



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У
НОВОМ САДУ



Марко Ђурђевић

**ПРИЛОГ ИСТРАЖИВАЊУ
СТРУЈАЊА ГАСА КРОЗ МЕРНЕ
БЛЕНДЕ СА ВИШЕ ОТВОРА**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Нови Сад, 2020.



КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:	
Идентификациони број, ИБР:	
Тип документације, ТД:	Монографска публикација
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација
Име и презиме аутора, АУ:	Марко Ђурђевић, маг. инж. маш.
Ментор, МН:	Др Сениша Бикић, ванредни професор
Наслов рада, НР:	Прилог истраживању струјања гаса кроз мерне бленде са више отвора
Језик публикације, ЈП:	Српски
Језик извода, ЈИ:	Српски/Енглески
Земља публикавања, ЗП:	Република Србија
Уже географско подручје, УГП:	АП Војводина
Година, ГО:	2020.
Издавач, ИЗ:	Ауторски репринт
Место и адреса, МА:	21000 Нови Сад, трг Доситеја Обрадовића 6
Физички опис рада, ФО: <small>(бр.поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)</small>	6/159/80/24/119/0/2
Научна област, НО:	Машинско инжењерство
Научна дисциплина, НД:	Механика флуида
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Мерење, мерне бленде, рачунарска динамика флуида
УДК	
Чува се, ЧУ:	Библиотека Факултета техничких наука
Важна напомена, ВН:	
Извод, ИЗ:	Уз растуће цене енергената, данас је од пресудног значаја тачно мерење протока флуида у индустријским процесима. Због своје једноставности, поузданости и једноставног одржавања, мерне бленде су често распрострањени мерни инструменти у многим индустријама. Конвенционална мерна бленда са једним отвором (БЈО) је широко заступљен мерни инструмент на бази диференцијалног притиска, али овај инструмент има и одређене недостатке, који се могу превазићи мерном блендом са више отвора (БВО). Предмет истраживања докторске дисертације је била БВО. За истраживање су се користиле експериментална и нумеричка метода, а истражили су се однос површине отвора бленде и површине попречног пресека цеви β , пад притисака, губитак притисака, утицај угла излазне ивице мерне бленде, утицај влажности гаса и утицај равних деоница испред и иза мерне бленде на тачност мерења. Такође поред овога одредио се и губитак снаге који настаје код различитих мерних бленди, поврат притиска, коефицијент протока тј. коефицијент пада притиска. Представљени резултати у оквиру докторске дисертације су показали бројне предности БВО у односу на БЈО.
Датум прихватања теме од стране Сената, ДП:	
Датум одбране, ДО:	
Чланови комисије, КО:	Председник: Др Милан Лечић, редовни професор
	Члан: Др Слободан Савић, редовни професор
	Члан: Др Маша Букуров, редовни професор
	Члан: Др Слободан Ташин, доцент
	Члан, ментор: Др Сениша Бикић, ванредни професор
	Потпис ментора



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monographic publication
Type of record, TR :	Textual material, printed
Contents code, CC :	Doctoral dissertation
Author, AU :	MSc Marko Đurđević
Mentor, MN :	Dr Siniša Bikić, Associate Professor
Title, TI :	Contribution to Gas Flow Research Through Multi Hole Orifices
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian/English
Country of publication, CP :	Republic of Serbia
Locality of publication, LP :	AP Vojvodina
Publication year, PY :	2020.
Publisher, PB :	Author's reprint
Publication place, PP :	21000 Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6
Physical description, PD : <small>(chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)</small>	6/159/80/24/119/0/2
Scientific field, SF /Artistic field, AF :	Mechanical Engineering
Scientific discipline, SD :	Fluid Mechanics
Subject/Key words, S/KW :	Measurement, Orifice Flow Meters, Computational Fluid Dynamics
UC	
Holding data, HD :	The Library of the Faculty of Technical Sciences
Note, N :	
Abstract, AB :	Nowadays, with rising energy prices, accurate flow measurement is playing an important role in industrial processes. Due to its simplicity, reliability and ease of maintenance, orifice flow meters are very common measuring instruments in many industries. Conventional single-hole orifice (SHO) flow meter is widely used differential pressure-based instrument, but this instrument has some disadvantages that can be overcome by multi-hole orifice (MHO) flow meter. The subject of the doctoral dissertation research was MHO flow meter. Experimental and numerical methods were used for the research, whereas the ratio of the orifice area and the cross-sectional pipe area β , pressure drop, pressure loss, angle of bevel influence, gas humidity influence and straight sections upstream and downstream of the orifice influence on measurement accuracy were investigated. Also, power loss for different orifice flow meters, pressure recovery, discharge coefficient i.e. pressure drop coefficient were determined. Results presented within the doctoral dissertation showed numerous advantages of MHO compared to SHO.
Accepted on Senate on, AS :	
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	President: Dr Milan Lečić, Full Professor
	Member: Dr Slobodan Savić, Full Professor
	Member: Dr Maša Bukurov, Full Professor
	Member: Dr Slobodan Tašin, Assistant Professor
	Member, Mentor: Dr Siniša Bikić, Associate Professor
	Mentor's sign

ОЗНАКЕ ФИЗИЧКИХ ВЕЛИЧИНА

- A – површина отвора мерне бленде са једним отвором [mm^2],
- A_1 – површина централног отвора мерне бленде са више отвора [mm^2],
- A_2 – површина мањег отвора мерне бленде са више отвора [mm^2],
- A_C – површина попречног пресека цеви [m^2],
- A_0 – укупна површина отвора мерне бленде са више отвора [m^2],
- c_p – специфична топлота на константом притиску [J/kgK],
- d – пречник отвора бленде [m],
- D – унутрашњи пречник цеви [m],
- d_1 – пречник централног отвора бленде са више отвора [m],
- d_2 – пречник мањих отвора на бленди са више отвора [m],
- D_b – хидраулички пречник [mm],
- e – дебљина грла мерне бленде [mm],
- E – дебљина мерне бленде [mm],
- h – величина репрезентативне ћелије [mm],
- k – топлотна поводљивост [W/mK],
- l – дужина отвора код мерне бленде са прорезима [mm],
- L_1 – дужина уструјне деонице између мерне бленде и локалног отпора [m],
- L_2 – дужина ниструјне деонице између мерне бленде и локалног отпора [m],
- l_c – хоризонтална димензија ћелија уструјно од сужења бленде [mm],
- L_k – дужина колена [m],
- L_{mi} – дужина деонице од локалног отпора до краја уструјне деонице [m],
- L_{mii} – укупна дужина уструјне деонице [m],
- OR – грешка приликом мерењу протока влажног гаса (енг. Over Read) [-],
- p – ред методе приликом анализе квалитета рачунске мреже GCI методом [-],
- P – флуидна (струјна) снага на улазу у цев [W],
- p_1 – статички притисак на прикључку пре мерне бленде [Pa],
- p_2 – статички притисак на прикључку иза мерне бленде [Pa],
- p_d – парцијални притисак сувог ваздуха [Pa],
- p_{in} – апсолутни притисак на улазу у цев [Pa],
- P_n – бездимензионални притисак [-],

p_{sat} – притисак засићења водене паре [Pa],
 p_u – уструјни апсолутни притисак [Pa],
 p_v – притисак водене паре [Pa],
 p_x – апсолутни притисак на аксијалном растојању [Pa],
 Q – запремински проток [m^3/s],
 Q_g – стварни запремински проток гаса [m^3/s],
 Q_{fp} – рачунски добијена вредност запреминског протока [m^3/s],
 r – индекс усавршавања мреже [-],
 R – специфична гасна константа [J/kgK],
 R_d – специфична гасна константа за сув ваздух, 287,058 [J/kgK],
 Re – Рејнолдсов број [-],
 r_k – радијус колена [m],
 R_v – специфична гасна константа за водену пару, 461,495 [J/kgK],
 T – температура флуида [K],
 v – брзина флуида кроз отвор бленде [m/s],
 v_m – брзина флуида на улазу у цев [m/s],
 w – ширина отвора код мерне бленде са прорезима [mm],
 X_{LM} – Локарт-Мартинели (енг. Lockart-Martinelli) параметар [-],
 Z – фактор компресибилности [-],
 Z_a – аксијално растојање [mm],
 Z_n – бездимензионално аксијално растојање [-],
 Δp_g – пад притисака у случају да је гас једнофазни [Pa],
 Δp_{fp} – пад притисака настала услед протока влажног гаса [Pa],
 \dot{m}_g – стварни масени проток гаса [kg/s],
 \dot{m}'_g – некоригован масени проток гаса [kg/s],
 \dot{m}_{gf} – масени проток гасне фазе [kg/s],
 \dot{m}_{jf} – масени проток течне фазе [kg/s],
 e_a^{21} – апроксимирана релативна грешка [%],
 e_{ext}^{21} – релативна грешка апроксимације [%],
 GCI_{fine}^{21} – индекс конвергенције уфињене мреже (енг. fine-grid convergence indeks) [-],
 \dot{m} – масени проток [kg/s],

ΔP – губитак снаге [W],

Δp – пад притиска [Pa] и

$\Delta \omega$ – губитак притиска [Pa].

ГРЧКА СЛОВА

α – угао излазне ивице мерне бленде [°],

α_k – угао колена [°],

β – однос површине отвора бленде и површине попречног пресека цеви [-],

β_p – запремински коефицијент топлотног истезања [1/K],

ε – фактор експанзије [-],

ε_p – релативни губитак снаге [%],

θ – угао који заклапају прстенови и предња ивица мерне бленде [°],

κ – однос специфичних топлота [-],

μ – коефицијент протока [-],

ν – кинематска вискозност [m²/s],

ξ – коефицијент пада притиска [-],

ρ – густина флуида [kg/m³],

ρ_g – густине гасне фазе [kg/m³],

ρ_l – густине течне фазе [kg/m³],

$\rho_{v,l}$ – густина влажног ваздуха [kg/m³],

φ – релативна влажност ваздуха [%],

Φ – функција дисипације [W/m³] и

ϕ – величина од значаја приликом анализе квалитета рачунске мреже GCI методом.

СПИСАК КОРИШЋЕНИХ СКРАЋЕНИЦА

AGA – American Gas Association

ANSI – American National Standards Institute

API – American Petroleum Institute

ASME – American Society of Mechanical Engineers

CFD – computational fluid dynamics

GCI – индекс конвергенције уфињене мреже (енг. grid convergence index)

ISO – International Organization for Standardization

LDA – laser dopler anemometry

БВО – блеџа са више отвора

БЈО – блеџа са једним отвором

РДФ – рачунарска динамика флуида

САДРЖАЈ

1. УВОД.....	1
1.1. Предмет истраживања	1
1.2. Циљ истраживања	1
1.3. Хипотеза истраживања	2
1.4. Примењена методологија	2
1.5. Структура докторске дисертације.....	2
2. ПРЕГЛЕД АКТУЕЛНОГ СТАЊА У ОБЛАСТИ	4
2.1. Уводна разматрања.....	4
2.2. Експериментална истраживања мерних бленди.....	11
2.3. Истраживање мерних бленди применом рачунарске динамике флуиде	23
2.4. Влажан гас.....	35
2.5. Завршна разматрања.....	39
3. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД ИСТРАЖИВАЊА	42
3.1. Физичке особине ваздуха	42
3.2. Мерне бленде.....	43
3.3. Експериментално постројење.....	48
3.3.1. Компресорско постројење.....	49
3.3.2. Регулационо припремна група.....	49
3.3.3. Мерни инструменти	50
3.3.4. Испитни сто	51
3.3.5. Прибор за прихват мерних бленди.....	52
3.3.6. Модификовано испитно постројење	55
3.3.7. Аквизиција	58
3.4. План експеримента	64
3.5. Рачунарска динамика флуида.....	68
3.6. План нумеричких симулација.....	71
3.6.1. Нумерички модели и мрежни континуум.....	73
3.6.2. Анализа квалитета мреже.....	82
3.6.3. Почетни и гранични услови	85
3.6.4. Физички континуум и модели.....	85
3.6.5. Критеријум заустављања нумеричких симулација	87
4. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА.....	89
4.1. Резултати експерименталних истраживања	89
4.1.1. Тачност подешеног притиска.....	89
4.1.2. Коефицијент пада притиска мерне бленде	90

4.1.3.	Однос запреминског протока и пад притиска	92
4.2.	Резултати истраживања применом РДФ	95
4.2.1.	Анализа квалитета мреже и грешке дискретизације.....	95
4.2.2.	Потврда модела	97
4.2.3.	Струјни параметри.....	98
4.2.4.	Поврат притиска	101
4.2.5.	Губитак притиска	103
4.2.6.	Губитак снаге.....	103
4.2.7.	Релативни губитак снаге.....	105
4.2.8.	Утицај оборене ивице мерне бленде	106
4.2.9.	Утицај влажности гаса	108
4.2.10.	Утицај дебљине мерне бленде.....	109
4.2.11.	Утицај локалних отпора.....	110
5.	ЗАКЉУЧАК	130
6.	ЛИТЕРАТУРА.....	134
	ПРИЛОГ 1	141
	ПРИЛОГ 2	158

СПИСАК СЛИКА

Слика 1 Гравура Темперанце, [2].....	5
Слика 2 Различите изведбе прикључака за притисак на мерној бленди, [4].....	7
Слика 3 Различите изведбе исправљача струјања, [3].....	10
Слика 4 Цанкеров усмеривач, [13] и [14].....	11
Слика 5 Приказ вектора брзине кроз мерну бленду, [15].....	12
Слика 6 Извор вртлога, [16].....	13
Слика 7 Позиција прикључака за мерење притиска, [17].....	14
Слика 8 Утицај радијуса и угла колена на коефицијент протока за различите позиције прикључака за притисак, [17].....	15
Слика 9 Изглед два колена у истој равни и различитим равнима, [18].....	16
Слика 10 Промена коефицијента протока у зависности од уструјних услова, [18].....	17
Слика 11 Мерна бленда са више отвора са $\beta=0,50$, [20].....	19
Слика 12 Промена коефицијента протока услед уструјно постављеног извора вртлога, [20].....	19
Слика 13 Структура мерне бленде са више отвора, [21].....	20
Слика 14 Резултати коефицијента протока за различите мерне бленде, [21].....	21
Слика 15 Однос коефицијента пада притиска и бездимензионе дебљине s/d , [22].....	22
Слика 16 Резултати испитивања бленди, [22].....	22
Слика 17 Приказ испитаних бленди, [22].....	23
Слика 18 Пример рачунског домена и ћелија у две (а) и три (б) димензије, [24].....	24
Слика 19 Разматрана геометрија цеви са сужењем, [26].....	25
Слика 20 Утицај промене пречника цеви на коефицијент протока за $\beta = 0,4$, [28].....	27
Слика 21 Коефицијент протока мерне бленде – поређење резултата симулације и експеримента, [32].....	29
Слика 22 Илустрација ефекта запрљања на проток кроз мерну бленду, [33].....	29
Слика 23 Коришћена геометрија за РДФ симулације, [33].....	30
Слика 24 Конвенционална и побољшана мерна бленда, [34].....	30
Слика 25 Мерна бленда са ниструјним прстеном, [36].....	31
Слика 26 Бленда са једним отвором и перфорирана плоча са више отвора, [37].....	32
Слика 27 Геометрија симулираних мерних бленди БЈО и БВО, [38].....	33
Слика 28 Геометрија мерне бленде са једним отвором и мерне бленде са више отвора, [39].....	34
Слика 29 Поређење резултата РДФ симулација [39].....	34
Слика 30 Схематски приказ влажног гаса, [40].....	35
Слика 31 Различите изведбе мерних бленди са више отвора за мерење протока влажног гаса, [43].....	39
Слика 32 Изглед израђених мерних бленди.....	45
Слика 33 Микрометар Tesa 00810800 са три тачке центрирања.....	45
Слика 34 Варијанта БЈО и БВО.....	46
Слика 35 Схема испитног постројење за испитне притиске до 16 bar.....	48
Слика 36 Изглед лабораторије "ГасТех" д.о.о. Инђија, [55].....	48

Слика 37	Схема регулационо-припремне групе.....	50
Слика 38	Квантометар Elster QAc650	51
Слика 39	Изглед постојећег испитног стола	52
Слика 40	Манометар на испитном столу	52
Слика 41	Нови прибор за прихват мерних бленди.....	53
Слика 42	Тродимензионални приказ прихватног прибора за мерне бленде	54
Слика 43	Изглед израђеног прихватног прибора за мерне бленде.....	54
Слика 44	Приказ прихватног прибора за мерне бленде постављеног на испитном столу.....	55
Слика 45	Шема новоформираног испитног постројења.....	56
Слика 46	Систем за аквизицију мерних сигнала.....	56
Слика 47	Манометри произвођача Yokogawa.....	57
Слика 48	Инструмент за мерење влажности ваздуха произвођача E+E Elektronik	58
Слика 49	Аквизиција CompactDAQ произвођача National Instruments	59
Слика 50	Повезани модули NI 9208 и NI 9208E произвођача National Instruments	59
Слика 51	LabVIEW апликација за аквизицију података са испитног постројења	60
Слика 52	Изглед корисничког прозора апликације за аквизицију	61
Слика 53	Калибрациона крива за диференцијални манометар у програмском пакету LabVIEW	62
Слика 54	Калибрациона крива за апсолутни манометар у програмском пакету LabVIEW	63
Слика 55	Калибрациона крива за инструмент за мерење влажности у програмском пакету LabVIEW	63
Слика 56	Калибрациона крива (температура) за инструмент за мерење влажности у програмском пакету LabVIEW	63
Слика 57	Изглед текстуалног документа са записима резултата мерења.....	64
Слика 58	Посматрана честица флуида за законе о одржању, [65]	68
Слика 59	Рачунски домен	73
Слика 60	Модели мерних бленди	74
Слика 61	Приказ генерисане мреже за први нумерички модел	75
Слика 62	Увећан приказ генерисане мреже.....	75
Слика 63	Геометрије мерних бленди коришћених за други нумерички модел	76
Слика 64	Приказ генерисане мреже за други нумерички модел	77
Слика 65	Приказ локалног отпора.....	78
Слика 66	Референтна уструјна деоница	79
Слика 67	Рачунски домен за анализу утицаја уструјних локалних отпора на струјне параметре мерне бленде.....	80
Слика 68	Референтна ниструјна деоница	80
Слика 69	Рачунски домен за анализу утицаја ниструјних локалних отпора на струјне параметре мерне бленде.....	81
Слика 70	Приказ генерисане рачунске мреже за трећи нумерички модел	82
Слика 71	Графички приказ релативних остатака током извршења нумеричке симулације	87

Слика 72 Графички приказ вредности притиска p_1 до устаљења током извршења нумеричке симулације.....	88
Слика 73 Графички приказ вредности притиска p_2 до устаљења током извршења нумеричке симулације.....	88
Слика 74 Графички приказ вредности притиска p_3 до устаљења током извршења нумеричке симулације.....	88
Слика 75 Експериментални резултати за апсолутни притиска и пад притиска	89
Слика 76 Коефицијент пада притиска за БЈО и БВО $\beta=0,50$	91
Слика 77 Коефицијент пада притиска за БЈО и БВО $\beta=0,55$	91
Слика 78 Коефицијент пада притиска за БЈО и БВО $\beta=0,60$	91
Слика 79 Коефицијент пада притиска за БЈО и БВО $\beta=0,70$	92
Слика 80 Однос запреминског протока и пада притиска, $p_1=2$ bar	92
Слика 81 Однос запреминског протока и пада притиска, $p_1=4$ bar	93
Слика 82 Однос запреминског протока и пада притиска, $p_1=6$ bar	93
Слика 83 Однос запреминског протока и пада притиска, $p_1=8$ bar	93
Слика 84 Однос запреминског протока и пада притиска, $p_1=12$ bar	94
Слика 85 Коефицијент пада притиска мерне бленде за БЈО и БВО при различитим притисцима	95
Слика 86 Конвергенција решења	97
Слика 87 Поређење вредности коефицијента пада притиска добијених нумеричким симулацијама и експериментом.....	98
Слика 88 Поређење вредности коефицијента протока добијених нумеричким симулацијама и експериментом.....	98
Слика 89 Равански приказ скаларног поља брзине мерних бленди БЈО и БВО2 ($\beta=0,70$ и $Re=70000$)	99
Слика 90 Равански приказ векторског поља брзине мерних бленди БЈО и БВО2 ($\beta=0,70$ и $Re=70000$)	100
Слика 91 Профил брзине и притиска у попречном пресеку за БЈО, ($\beta=0,70$ и $Re=70000$)	100
Слика 92 Профил брзине и притиска у попречном пресеку за БВО2, ($\beta=0,70$ и $Re=70000$)	101
Слика 93 Поврат притиска за БЈО и БВО са оптималном величином подеоног пречника	102
Слика 94 Зависност губитка притиска и Рејнолдсовог броја.....	104
Слика 95 Губитак снаге	104
Слика 96 Релативни губитак снаге	105
Слика 97 Поређење вредности коефицијента пада притиска добијених нумеричким симулацијама мерних бленди са обореном и равном ивицом са резултатима експеримента	106
Слика 98 Равански приказ скаларног поља брзине	107
Слика 99 Равански приказ векторског поља брзине.....	108
Слика 100 Вредности коефицијента пада притиска добијене експериментом и нумеричким путем за различите релативне влажности БЈО ($\beta=0,70$)	109
Слика 101 Вредности коефицијента пада притиска добијене експериментом и нумеричким путем за различите релативне влажности БВО1 ($\beta=0,70$).....	109
Слика 102 Утицај дебљине мерне бленде на коефицијент пада притиска.....	110

Слика 103 Утицај растојања уструјног локланог отпора на коефицијент пада притиска.....	112
Слика 104 Утицај растојања уструјног локланог отпора на коефицијент пада притиска.....	113
Слика 105 Равански приказ скаларног поља брзине на деоници са уструјним локалним отпором на растојању $L_1=5 D$	113
Слика 106 Векторски приказ брзине на деоници са уструјним локалним отпором на растојању $L_1=5 D$	114
Слика 107 Скаларно поље брзине приказано путем струјница на деоници са уструјним локалним отпором на растојању $L_1=5 D$	114
Слика 108 Приказ скаларног поља брзине у попречном пресеку за различите дужине деоница између уструјног локалног отпора и мерне бленде, $Re=100000$	116
Слика 109 Поље притиска на деоници са уструјним локалним отпором на растојању $L_1=5 D$	117
Слика 110 Поље притиска на референтној равној деоници.....	117
Слика 111 Равански приказ скаларног поља притиска нормалног на правац струјања за различите дужине деоница L_1 , ($Re=100000$).....	119
Слика 112 Утицај растојања ниструјног локланог отпора на коефицијент пада притиска.....	121
Слика 113 Коефицијент пада притиска за различита растојања ниструјног локалног отпора.....	121
Слика 114 Равански приказ скаларног поља брзине на деоници са ниструјним локалним отпором на растојању $L_2=1 D$	122
Слика 115 Приказ векторског поља брзине на деоници са ниструјним локалним отпором на растојању $L_2=1 D$	122
Слика 116 Скаларно поље брзине приказано путем струјнице на деоници са ниструјним локалним отпором на растојању $L_2=1 D$	122
Слика 117 Приказ скаларног поља брзине у попречном пресеку за различите дужине деоница између мерне бленде и ниструјног локалног отпора и мерне бленде, $Re=100000$	125
Слика 118 Поље притиска на уздужном пресеку.....	126
Слика 119 Равански приказ скаларног поља притиска нормалног на правац струјања за различите дужине деоница L_2 , $Re=100000$	129

СПИСАК ТАБЕЛА

Табела 1 Преглед утицаја различитих параметара нумеричких симулација на пад притиска, [26]	26
Табела 2 Поређење вредности коефицијента протока добијених експерименталним путем и РДФ, [6]	28
Табела 3 Резултати симулације за пад притиска, [13].....	32
Табела 4 Гасни састав сувог ваздуха [52].....	42
Табела 5 Основни подаци за сув ваздух [53]	43
Табела 6 Прорачунске димензије мерних бленди	44
Табела 7 Димензије израђених мерних бленди.....	47
Табела 8 Карактеристике компресорског постројења.....	49
Табела 9 Техничке карактеристике мерних инструмената	50
Табела 10 Техничке карактеристике мерила протока произвођача Elster, [56]..	51
Табела 11 Микро климатски услови	51
Табела 12 Техничке карактеристике мерила притиска на новоформираном постројењу, [57] и [58]	57
Табела 13 Техничке карактеристике инструмента за мерење влажности, [59] ...	57
Табела 14. Техничке карактеристике аналогно улазног модула за аквизицију, [60]	64
Табела 15 Улазни и излазни параметри код експерименталних испитивања....	65
Табела 16 Улазни и излазни параметри за нумеричке симулације	72
Табела 17 Број ћелија генерисане мреже за деонице без локалних отпора.....	75
Табела 18 Броја ћелија рачунских мрежа другог нумеричког модела.....	77
Табела 19 Разматране вредности појединих деоница референтне уструјне деонице	79
Табела 20 Разматране вредности појединих деоница референтне ниструјне деонице	81
Табела 21 Експериментални резултати коефицијента пада притиска	90
Табела 22 Број ћелија и односи усавршавања мреже за GCI методу.....	96
Табела 23 Резултати GCI методе	96
Табела 24 Поврат притиска за веће Рејнолдсове бројеве.....	103

1. УВОД

Уз растуће цене енергената, данас је од пресудног значаја тачно мерење протока флуида у индустријским процесима. Не постоји идеалан мерни инструмент због бројних грешака које се јављају током поступка мерења физичких величина, али и због одређених захтева при мерењу које неки инструменти имају, попут типа флуида, услова за постављање, мерног опсега итд. Сваки мерни инструмент има своје предности и недостатке који се огледају у тачности, поновљивости, резолуцији итд. Због своје једноставности, поузданости, једноставног одржавања итд., мерне бленде су често распрострањени мерни инструменти у многим индустријама. Конвенционална мерна бленда са једним отвором (БЈО) је широко заступљен мерни инструмент на бази диференцијалног притиска, али овај инструмент има и одређене недостатке који се могу превазићи мерном блендом са више отвора (БВО).

1.1. ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА

Предмет истраживања докторске дисертације је била БВО. Иако је мерна бленда једноставне геометрије, струјање флуида кроз мерну бленду је ипак доста сложено. Због сложеног струјања није лако доћи до параметара који утичу на тачност мерења мерном блендом као и услова постављања који значајно утичу на тачност мерења. Ово је посебно изражено код БВО отвора која није обрађена ни једним стандардом који описује мерење протока помоћу уређаја са диференцијалним притиском. Сваки од ових параметра потребно је посебно истражити како код БЈО тако и код БВО како би се добио оптималан мерни инструмент. Кроз рад су истражени однос површине отвора бленде и површине попречног пресека цеви β , пад притисака настао услед струјања флуида кроз мерну бленду, губитак притисака настао у инсталацији услед присуства мерне бленде, утицај угла излазне ивице мерне бленде, утицај влажности гаса и утицај равних деоница испред и иза мерне бленде на мерење. Такође поред овога одредио се и губитак снаге који настаје код различитих мерних бленди, поврат притиска, коефицијент протока тј. коефицијент пада притиска.

1.2. ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА

Истраживања спроведена у оквиру докторске дисертације имала су за циљ да дају прилог истраживању струјању гаса (ваздуха) кроз БВО. Сазнања добијена додатним истраживањима струјања гаса кроз БВО допринело би се развоју БВО која би могла у будућности да замени конвенционалну мерну БЈО. Експериментални резултати показали су да БВО имају мањи пад притиска, мањи

(бољи) коефицијент пада притиска мерне бленде, а индиректно већи (бољи) коефицијент протока у односу на БЈО за исту вредност параметра β и исти режим струјања. Наведено иде у прилог уштеди енергије на системима транспорта и дистрибуције природног гаса.

1.3. ХИПОТЕЗА ИСТРАЖИВАЊА

Мерна бленда са једним отвором широко је распрострањен мерни инструмент али и као такав има одређене недостатке које БВО може да отклони. Развојем БВО може се очекивати да БВО има повољније услове постављања у погледу захтеваних равних деоница испред и иза мерне бленде, мањи пад притиска, бржи поврат притиска, мањи губитак снаге и мањи коефицијент пада притиска мерне бленде, а индиректно већи коефицијент протока.

1.4. ПРИМЕЊЕНА МЕТОДОЛОГИЈА

За истраживање коришћене су експериментална и нумеричка метода што је модерна инжењерска пракса јер једна другу методу допуњују. Експериментални резултати искоришћени су за анализу пада притиска и коефицијента пада притиска. Након развијеног нумеричког модела извршено је његово потврђивање резултатима експеримента где се онда наставило са истраживањем мерних бленди нумеричком методом.

1.5. СТРУКТУРА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

Докторска дисертација се састоји из 6 поглавља. У првом поглављу дефинисани су предмет истраживања, циљ истраживања и постављена је хипотеза истраживања. Такође у овом поглављу наведене су методе које су коришћене као и очекивани резултати.

Преглед литературе од значаја за истраживање БЈО и БВО је дат у другом поглављу. Преглед литературе је обухватио досадашња истраживања мерних бленди како експерименталним тако и нумеричким методама.

Треће поглавље садржи опис испитаних мерних бленди. Поред описа мерних бленди у овом поглављу су детаљније описане коришћене методе у истраживању мерних бленди, експериментална и нумеричка. Описано је постојеће експериментално постројење са свим мерним инструментима. Како би се мерне бленде могле испитати на постојећем испитном постројењу биле су потребне одређене модификације које се описане. План експеримента и нумеричких симулација су дефинисани у овом поглављу.

У четвртом поглављу су детаљно приказани и дискутовани резултати истраживања. Први део овог поглавља чине резултати добијени експерименталним истраживањем коефицијент пада притиска и пад притиска. У другом делу овог поглавља приказани су резултати нумеричких симулација. Прво је приказана анализа квалитета рачунске мреже и потврда нумеричког модела. Потом су анализирани струјни параметри и приказани резултати поврата притиска, губитка притиска и снаге и релативног губитка снаге. Поред ових резултата анализирани су и утицај оборене ивице мерне бленде, влажности гаса и дебљине мерне бленде на струјне параметре. На крају је анализиран утицај уструјних и ниструјних локалних отпора на струјне параметре БВО.

Пето поглавље садржи закључна разматрања, критички осврт на добијене резултате и смернице будућих истраживања.

Списак коришћене литературе, референци и стандарда је наведен у шестом поглављу. На крају се налазе прилози. Прилог 1 садржи радионичке цртеже 16 испитаних мерних бленди, а прилог 2 садржи радионички цртеж ново израђеног прибора за прихват мерних бленди на постојећем испитном постројењу.

2. ПРЕГЛЕД АКТУЕЛНОГ СТАЊА У ОБЛАСТИ

2.1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА

Још од најранијих дана човек је имао потребу за мерењем које би му дало одређене поуздане информације тј. ближе описало неки предмет или појаву. Као један од најстаријих трагова процеса мерења треба поменути глинене лоптице из Месопотамије које датирају из периода 6000 година пре нове ере [1]. Ове лоптице се су користиле за квантитативни опис нпр. стада оваца, где је свака лоптица представљала једно јагње, а све лоптице би биле запечаћене у глинене ћупове. У случају да је била потребна информација о претходном бројном стању стада, глинени ћуп би се отварао и лоптице би се бројале како би се дошло до податка о претходном стању стада. У овом случају мерење се базирало искључиво на бројању. Записи у којима се спомиње мерење дужине и масе, као и постојање мерних система, потичу из трећег или четвртог миленијума пре нове ере и најстарији су познати записи о овим врстама мерења и мерних система. Древне цивилизације су имале потребу за мерењем и успостављањем мерних система који су имали примену у пољопривреди, трговини, изградњи итд. Такви мерни системи су били дефинисани у оквиру мање заједнице или регије, при чему су се разликовали од регије до регије. Чињеница да није постојала унификација, имала је за последицу низ потешкоћа у међусобним комуникацијама и разумевању, нарочито у сфери трговине, између регија. Како је технологија напредовала, а глобална трговина постајала све значајнија, тако и уређен систем мерних величина добија на својој важности почетком 18. века, и долази до појаве метрологије као науке која још ближе и боље дефинише основне мерне јединице. Значај мерења као једно од највећих достигнућа човечанства наглашена је у чувеној гравури познатој као Темперанција или Темперанца (аутор гравуре највероватније Филип Гале, 1537 – 1612) насталој на основу цртежа Питера Бројгела Старијег из 1560 године [2]. На различитим деловима гравуре се могу видети уобичајена мерења и њихова примена тог времена. Висак, угломер, шестар, као и часовник који представља врхунац технолошког развоја у мерењу тог периода, а који је приказан на глави централне фигура Темперанце¹ (слика 1), само су неки од примера мерења и метрологије из 16. века. Централна фигура је представљена као заштитница корисне, примењене и слободне уметности укључујући у то и метрологију.

¹ Једна од три женске фигуре које персонификују кардиналне врлине, *Пруденција* – мудрост, *Фортитудо* – снага и *Темперанција* – умереност, које представљају алегорију Правосуђа (праве)

Вилијам Томсон (енг. William Thomson) познат још као Лорд Келвин је рекао: „Када оно о чему говориш можеш измерити и исказати бројкама, ти о томе нешто знаш, али када то не можеш измерити ни исказати бројкама, твоје је знање оскудно и незадовољавајуће“. Заправо, циљ мерења и јесте добијање поузданог исказа о непознатим подацима објекта.



Слика 1 Гравура Темперанца, [2]

Проблем континуалног мерења протока флуида је занимао још и древне цивилизације, па су тако Египћани мерили проток воде у каналима за наводњавање помоћу мерних брана, а Римљани проток воде у аквадуктима користећи се једном врстом мерне бленде [3]. Ове методе мерења протока су биле искуствене. Прекретница у мерењу протока флуида настаје почетком 18. века појавом Бернулијеве теореме. Дефинисањем теореме, Данијел Бернули (1700-1782) је поставио теоријске основе мерења протока флуида и омогућио употребу диференцијалних мерила притиска за одређивање протока. Када су мерне бленде први пут коришћене за мерење протка флуида није познато, али је око 1890. Форест М. Товел (енг. Forrest M. Towl) присуствовао употреби мерне бленде за мерење протока природног гаса у околини Коламбуса, Охајо, Сједињене Америчке Државе [4]. У наредном периоду уследила су бројна истраживања мерне бленде, а резултати су се сумирали у многим стандардима

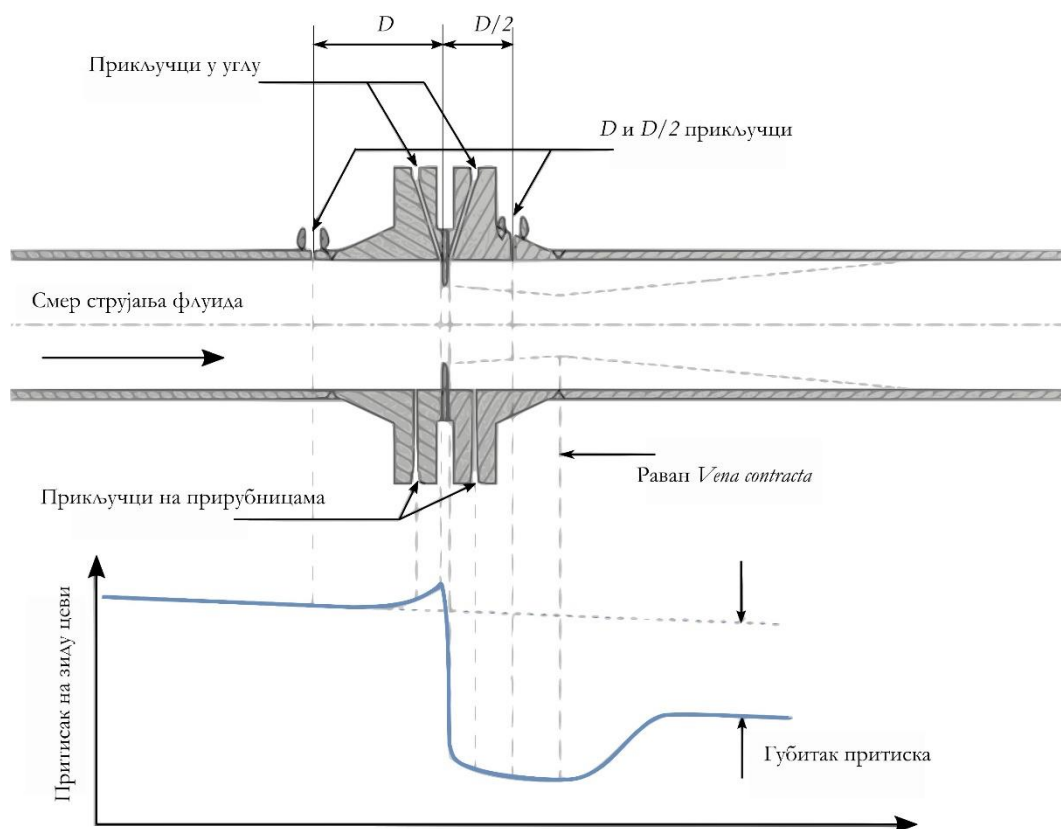
попут ANSI/API 2530 – 1985, ISO 5167:1980 и API MPMS 14:1990 који дефинишу употребу мерних инструмената за одређивање протока флуида на принципу пада притиска. Ови стандарди су временом пролазили кроз ревизије и допуне, а и данас су у употреби.

Како се све више пажње посвећује енергетској ефикасности због ограничене количине енергената, као и њихове растуће цене, али исто тако и због заштите животне средине, у индустрији је веома важно имати прецизне и поуздане податке о мерењу протока различитих (радних) флуида што је у директној вези са ефикасношћу и продуктивношћу производних процеса. Управо због овога је мерна бленда као јефтин, а поуздан мерни инструмент, поново постала предмет бројних истраживања. Мерне бленде су најраспрострањенији мерни инструмент за одређивање протока флуида. Иако су један од најстаријих инструмената за одређивање протока, због своје робусности, једноставне конструкције, поузданости, лакоће употребе и одржавања као и многих других предности остале су и данас у употреби као једно од најзаступљенијих мерних инструмената за одређивање протока флуида. Вероватно прва особа која је описала мерење протока у цевима још у периоду око 100. године нове ере је римски гувернер Британије Секст Јулије Фронтин (лат. Sextus Julius Frontinus) [4]. У 18. веку Бернули је поставком теоријских основа омогућио примену метода одређивања протока за инструменте на бази диференцијалног притиска које се и данас користе. Почетком 20. века мерна бленда постаје главни уређај за мерење протока природног гаса и лакших/нижих угљоводоника [5]. Америчка асоцијација за гас (American Gas Association – AGA) је од почетка 20. века до данас издала више извештаја (енг. Report No.) који су садржали различита унапређења у одређивању протока помоћу мерне бленде. Та унапређења су била прихваћена од Америчког удружења машинских инжењера (American Society of Mechanical Engineers – ASME) и Америчког института за нафту (American Petroleum Institute – API).

Мерна бленда представља плочу са отвором која се поставља у цев нормално на правац струјања флуида. Приликом проласка флуидне струје кроз отвор мерне бленде долази до снижавања притиска флуидне струје, при чему се део струјне енергије конвертује у топлотну енергију. Ако је геометрија мерне бленде позната, онда се лако може доћи до вредности протока флуида кроз мерну бленду након измереног пада притиска флуида испред и иза мерне бленде. Приликом конструисања мерне бленде мора се водити рачуна о димензијама плоче тако да њена дебљина не утиче на коефицијент протока, а опет да буде довољна да не дође до оштећења (деформисања) бленде од силе настале услед флуидне струје. Општи принципи за мерења и прорачун протока флуида у цевоводима коришћењем уређаја са диференцијалним притиском (мерне бленде, млазнице

и Вентуријевих цеви) као и начин на који се употребљавају (услови за постављање и руковање) дефинисани су стандардом SRPS EN ISO 5167-1:2012.

Приликом фискалног мерења у нафтној и гасној техници највише се користи изведба мерне бленде са положајем прикључака за притисак по стандарду (SRPS EN ISO 5167-2:2012) дефинисаном растојању $1 D$ и $1/2 D$ од ивице мерне бленде. Стандардом SRPS EN ISO 5167-2:2012 су поред овакве изведбе дефинисане и изведбе мерне бленде са положајем прикључака за притисак на прирубницама и са положајем прикључака за притисак у углу (слика 2).



Слика 2 Различите изведбе прикључака за притисак на мерној бленди, [4]

Да би се проток кроз мерну бленду могао израчунати потребно је познавање коефицијента протока μ и фактора експанзије стишљивог флуида ε у случају да је потребно одредити проток гаса. До коефицијента протока мерне бленде може се доћи калибрацијом у флуидној струји користећи израз:

$$\dot{m} = \frac{\mu \varepsilon}{\sqrt{1 - \beta^4}} \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \rho_1 \Delta p} \quad (2.1)$$

где су:

d – пречник отвора бленде [m],

\dot{m} – масени проток флуида [kg/s],

β – однос површине отвора бленде и површине попречног пресека цеви [-],

ε – фактор експанзије [-],

μ – коефицијент протока [-],

ρ – густина флуида [kg/m³] и

Δp – пад притиска [Pa].

Однос пречника грла бленде и унутрашњег пречника цеви, β , је важан структурни параметар мерних бленди и код БЈО се може написати као однос пречника. Овај параметар може се још представити и као квадратни корен односа површина унутрашњег пречника цеви и површине отвора мерне бленде што се користи код БВО:

$$\beta = \sqrt{\frac{A_o}{A_c}} \quad (2.2)$$

где су:

A_o – укупна површина отвора мерне бленде са више отвора [m²] и

A_c – површина попречног пресека цеви [m²].

Због немогућности да се прецизно одреди утицај геометрије и одвајање флуидне струје од зида цеви на проток, коефицијенти протока мерне бленде су емпиријског карактера [6]. Однос теоријског и стварног протока кроз мерну бленду представља коефицијент протока, а до њега се долази експерименталним путем. Да би се проток поуздано могао израчунати свака мерна бленда мора имати свој коефицијент протока до којег се морало доћи експерименталним путем.

Пре почетка коришћења природног гаса као енергента мерни инструменти на бази диференцијалног притиска углавном су коришћени за мерење протока течности тј. воде. Са почетком употребе природног гаса као енергента појавила се потреба и за поузданим мерењем количина истог. Да би се добили поуздани резултати мерења протока природног гаса коришћењем инструмената на бази диференцијалног притиска било је потребно у обзир узети и компресибилност природног гаса (фактор експанзије). Buckingham [7] је на основу прикупљених података за природни гас 1932. године објавио израз за фактор експанзије:

$$\varepsilon = 1 - (0,41 + 0,35 \beta^4) \frac{\Delta p}{\kappa p_1} \quad (2.3)$$

где су:

p_1 – статички притисак на прикључку пре мерне бленде [Pa] и

κ – однос специфичних топлота [-].

Овај израз за фактор експанзије је усвојен и уврштен у стандарде који обрађују мерну бленду ANSI/API 2530-1985, (API 1985), ISO 5167:1980 (ISO 1980), API MPMS 14.3.1:1990 (API 1990) и ISO 5167-1:1991 (ISO 1991). До фактора експанзије долази се искључиво експерименталним путем. Израз за фактор експанзије кориговали су прво Kinghorn [8] па Sedil [9] да би Reader-Harris [10] развио нови израз за фактор експанзије који је уврштен у ISO EN 5167:2003 и гласи:

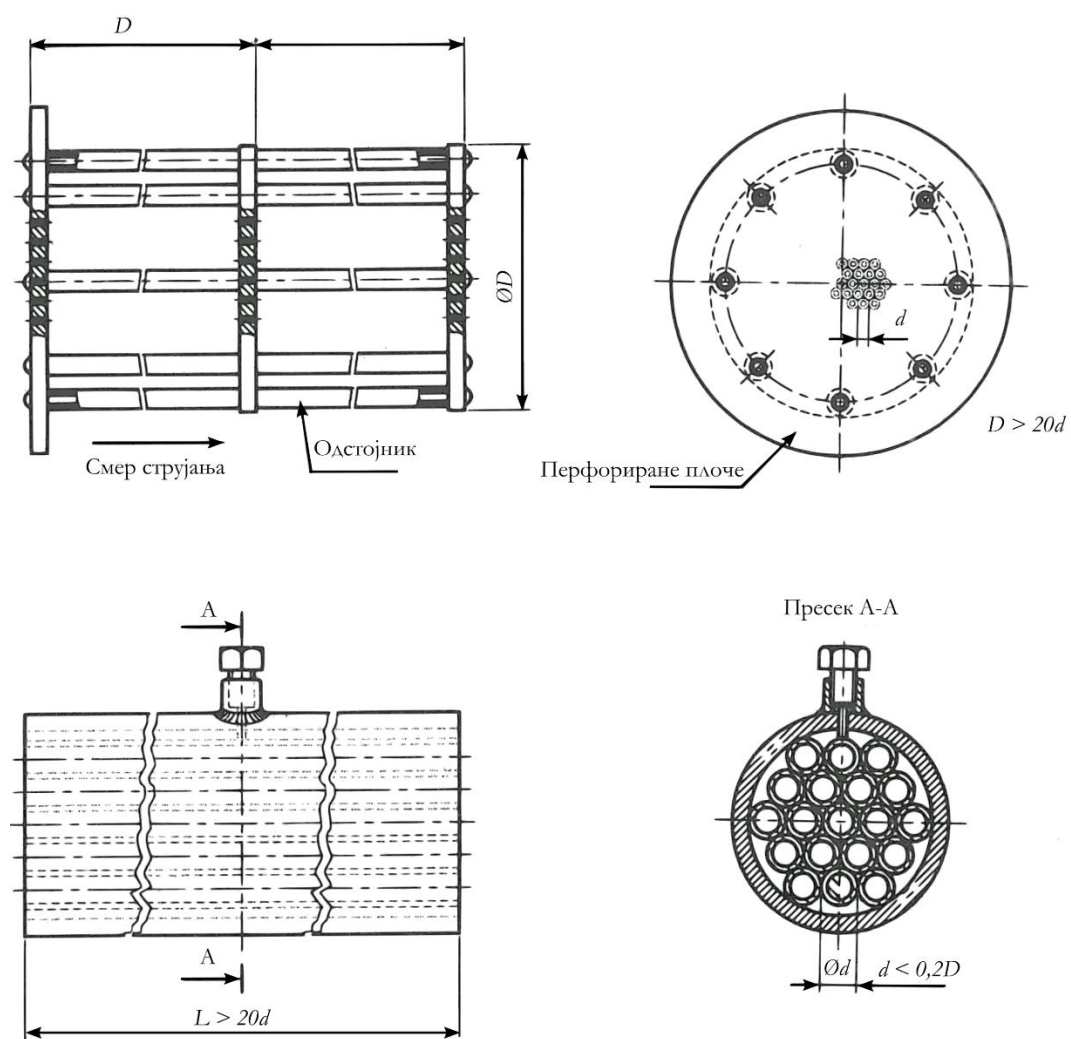
$$\varepsilon = 1 - (0,351 + 0,256 \beta^4 + 0,93 \beta^8) \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \right] \quad (2.4)$$

где је p_2 – статички притисак на прикључку иза мерне бленде [Pa].

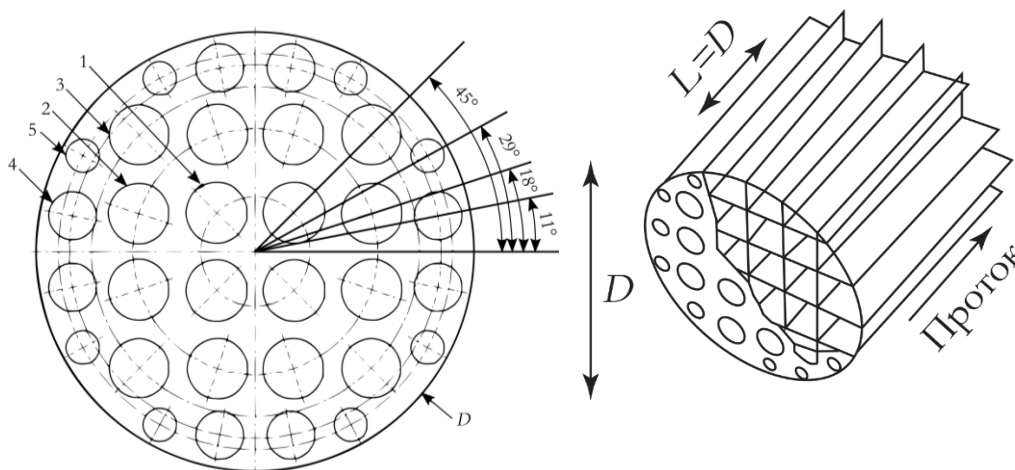
Како је природни гас постајао све распрострањенији енергент тако се све више пажње посвећивало што тачнијем мерењу количина природног гаса. Cristancho и остали [5] представили су алтернативну формулацију одређивања протока кроз мерну бленду где се коефицијент протока изражава без Рејнолдсовог броја. Осетљивост коефицијента протока и фактора експанзије на вискозност флуида и изентропски експонент анализирали су Ettouney и El-Rifai [11]. Gomez-Osorio и остали представили су нови израз за израчунавање масеног протока природног гаса и ваздуха кроз мерну бленду користећи термодинамички приступ [12]. Нови израз за масни проток користио је однос површина отвора мерне бленде и попречног пресека цеви β , однос пада притиска и уструјног притиска, однос специфичних топлота и уструјну температуру флуида.

Поред бројних предности, мерне бленде имају и одређене недостатке који се огледају у осетљивости на уструјне услове и ниструјне услове, потребне дужине улазних и излазних деоница. Да би се елиминисали вртлози, турбуленције и остали поремећаји струјања настали као последица опструкције цевовода, запорне арматуре итд., који могу да утичу на квалитет и поузданост мерења пре мерне бленде, могу се поставити исправљачи струјања или ламинатори (слика 3). Овакви уређаји могу да смање уструјно настале сметње, а постављају се иза узрочника турбулентног струјања, а испред примарног уређаја (мерног

инструмента). Исправљивачи струјања дизајнирани су да елиминишу или значајно смање турбуленције и да обезбеди профил брзине ниструјно који је прихватљив под условима дефинисаним важећим стандардима. Један од често коришћених исправљача струјања који је описан и у стандарду SRPS EN ISO 5167 је Цанкеров усмеривач који се састоји од 32 отвора симетрично распоређена (слика 4).



Слика 3 Различите изведбе исправљача струјања, [3]



Слика 4 Цанкеров усмеривач, [13] и [14]

2.2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА МЕРНИХ БЛЕНДИ

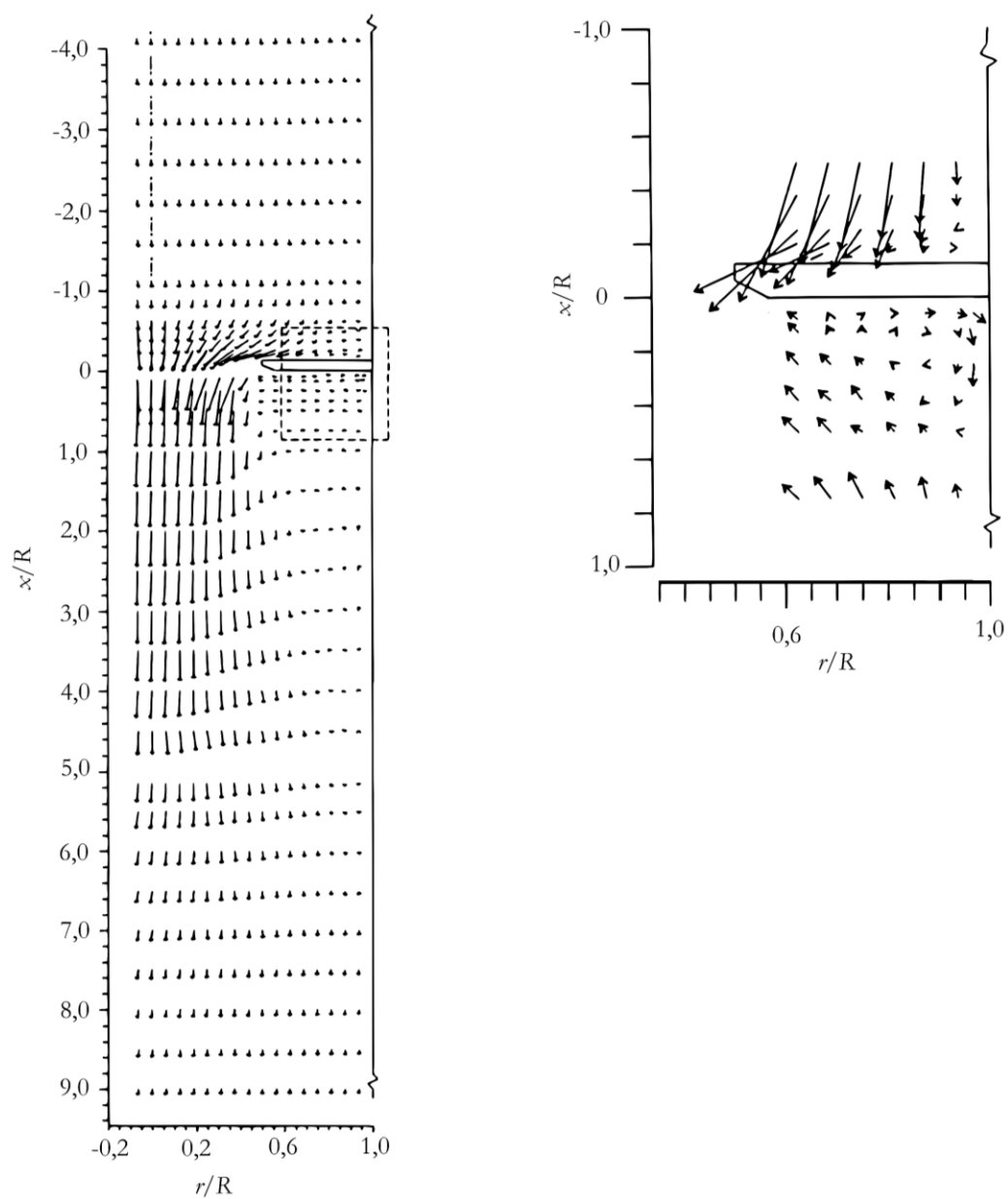
Поред унапређивања израза за одређивање протока кроз мерну бленду, бројни истраживачи бавили су се и проблемима струјања флуида кроз мерну бленду. Једно од таквих истраживања спровели су DeOtte *и остали* [15] где су помоћу 3D ласер доплер анемометра-ЛДА (енг. Laser Doppler Anemometry-LDA) анализирали поље брзине струјања флуида кроз мерну бленду.

Да би се могло анализирати струјање и поље брзине кроз мерну бленду морали су бити испоштовани уструјни услови који би обезбедили потпуно развијено струјање без вртлога. То се постигло постављањем равних улазних деоница дупле дужине од стандардом предвиђених и постављањем исправљача струјања.

Радијална и аксијалне компоненте брзине измерене су помоћу ЛДА, а њиховом комбинацијом су се добили вектори брзина који су приказани на слици 5. Може се видети да се компоненте брзина почињу мењати на растојању $x/R=-4,1$ уструјно од мерне бленде, али значајнији утицај се може видети тек на растојању $x/R=-1,13$. Нагло повећање брзине може се приметити непосредно пре мерне бленде где се радијална компонента брзине нагло повећава стварајући ефекат *vena contracta* ниструјно. На растојању $x/R=1$ правац струјања постао је потпуно аксијалан и достигао максималну брзину од 81,9 m/s а самим тим и *vena contracta*² лоцирана је на том месту. Са слике 5 б) поред вектора брзина могу се видети и вртложна струјања која настају приликом струјања флуида кроз мерну бленду. Јављају се вртложна струјања пре мерне бленде као и примарно и

² Vena contracta је сужени пресек у флуидној струји где су све струјнице међусобно паралелне и управне на пресек, а брзина флуида највећа

секундарно вртложно струјање иза мерне бленде. Мало вртложно струјање се може видети уструјно у углу између зида цеви и мерне бленде, а примарно ниструјно вртложно струјање се може уочити у висини отвора мерне бленде, док се секундарно ниструјно вртложно струјање може видети иза мерне бленде у углу између зида цеви и мерне бленде.

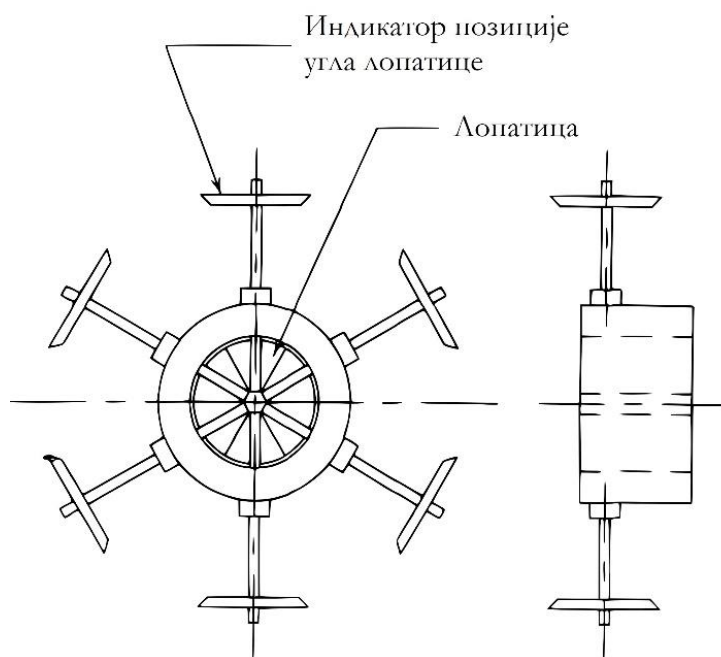


а)

б)

Слика 5 Приказ вектора брзине кроз мерну бленду, [15]

Morrison *и остали* [16] анализирали су утицај уструјног профила брзине на мерне бленде. У свом истраживању аутори су експериментално испитали више мерних бленди са различитим β параметром (0,43, 0,50, 0,60, 0,70 и 0,75) и њихову реакцију на различите профиле брзина уструјно који су генерисани различитим подешавањем исправљача струјања. Поред исправљача струјања за две бленде ($\beta=0,43$ и $\beta=0,50$) био је уструјно постављен и уређај за стварање вртлога (слика 6). Овај уређај може да произведе оносиметрична вихорна струјања а интензитет вихорног струјања се подешавао положајем (угла) лопатица. Различитим подешавањима исправљача струјања и уређај за стварање вртлога обезбедили су се различити профили брзине. Исправљач струјања имао је пет различитих подешавања која су обезбедила пет различитих профила брзина без поремећаја и вртлога, а уређај за стварање вртлога имао је четири различита подешавања која су зависила од четири различита угла лопатице (0° , 15° , 45° и 75°) обезбедивши на тај начин четири различита профила брзина са вртлозима.

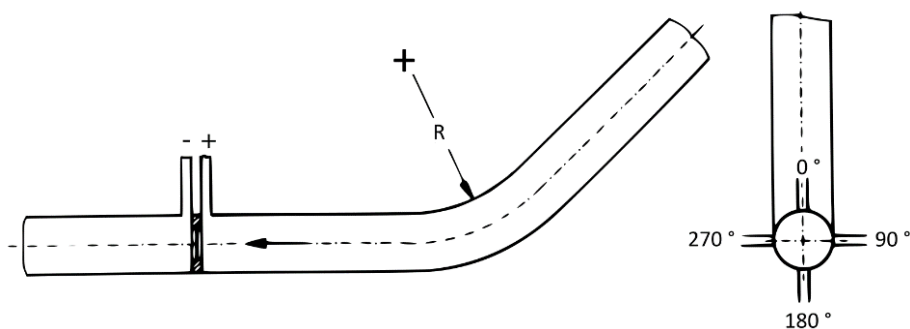


Слика 6 Извор вртлога, [16]

Резултати су показали да се са повећањем брзине (подешавање исправљача струјања које обезбеђује највишу брзину) пад притиска настао услед мерне бленде смањује, а коефицијент протока повећава и то са повећањем параметра β . Ова промена коефицијента протока услед промене профила брзине кретала се у распону од 0,5% за мерне бленде са параметром $\beta=0,43$ до 3,5% за мерне бленде са параметром $\beta=0,75$ у односу на случај када није било поремећаја. Са смањењем брзине (подешавање исправљача струјања које обезбеђује најнижу брзину) пад

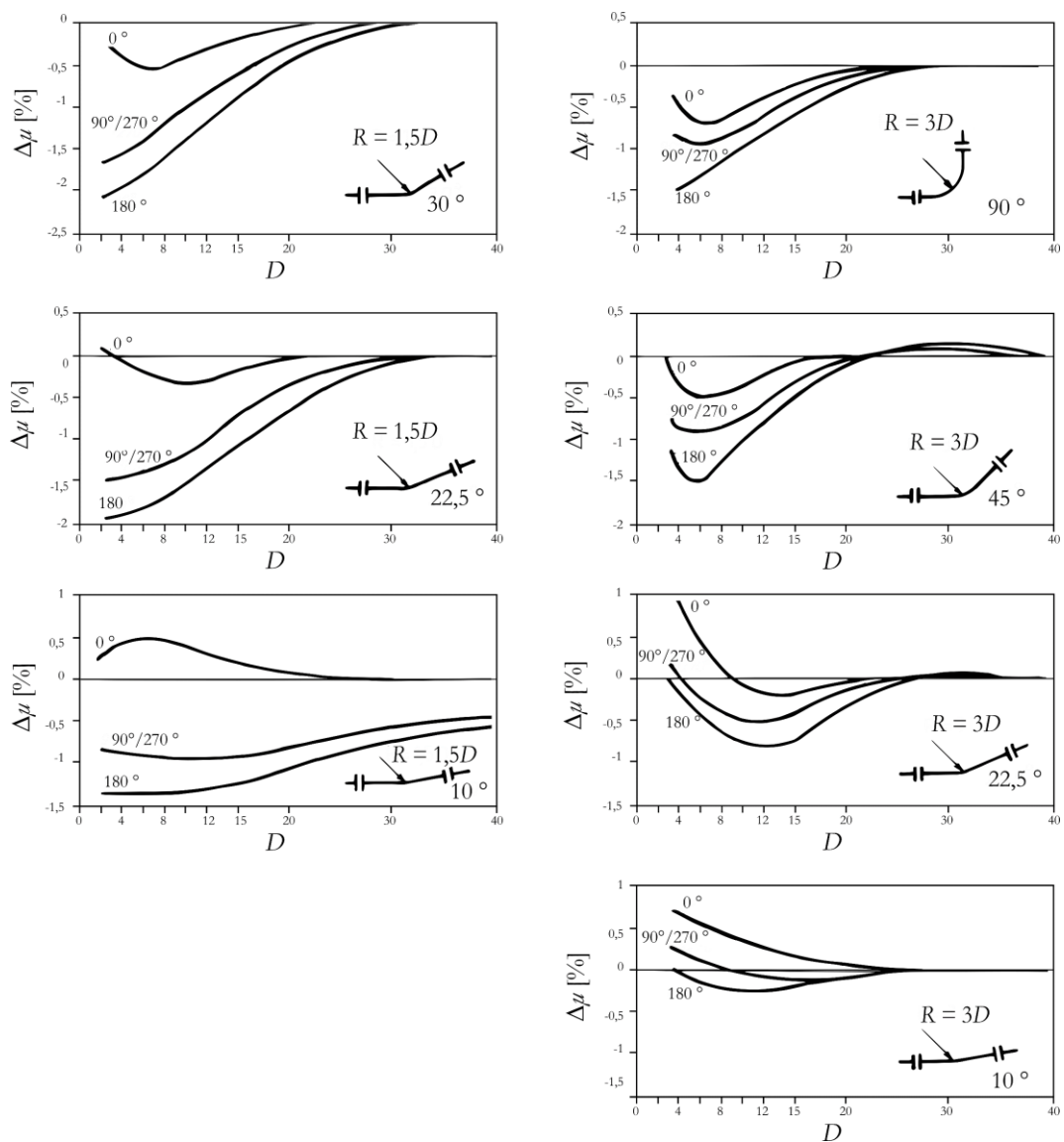
притиска се повећао, а коефицијент протка се смањило за око 1% у односу на случај када није било поремећаја за све испитане мерне бленде. Резултати са уређајем за стварање вртлога показали су ефекте супротне од оних који су се постигли са различитим профилима брзина без вртлога. Могло се видети да се са смањењем параметра β , коефицијент протока повећава. За мерну бленду $\beta=0,43$ коефицијент протока променио се за око 1% за најмање поремећаје (угао лопатице 15°) настале услед вртлога до 7% за највеће поремећаје (угао лопатице 75°) услед вртлога. Промена коефицијента протока за мерну бленду $\beta=0,50$ била је до 5% при највећим поремећајима насталим услед вртлога.

Да би мерни систем са блендом исправно радио и давао поуздане резултате морају се поштовати услови постављања дефинисани у SRPS EN ISO 5167-2:2012. Одступање од дефинисаних услова доводи до непоузданости мерења и појави грешака при мерењу. Један од тих услова је и потребна дужина праве деонице испред и иза мерне бленде. Како ове услове није увек могуће поштовати (захтева превише простора у постројењима где је то некад немогуће обезбедити) урађена су истраживања која су обрадила дужине потребних деоница пре и после мерне бленде и њихов утицај на тачност мерења. У раду [17], аутори су посматрали утицај правих деоница између мерне бленде и уструјно постављеног колена на коефицијент протока. Посматрана колена су имала различите радијусе ($1,5 D$ и $3 D$) и углове (10° , $22,5^\circ$, 45° , $67,5^\circ$ и 90°). Посматрала се једна мерна бленда која је имала прикључке за притисак у угловима, а на испитној инсталацији су постављени и прикључци за притисак на растојању од D и $D/2$ од ивице мерне бленде. За посматрану мерну бленду мериле су се вредности притиска и са прикључака у угловима и са прикључака на растојању D и $D/2$. Још једна ствар коју су аутори посматрали а која је показала значајне утицаје на коефицијент протока је и позиција прикључака за притисак у односу на раван угла колена. Посматране су четири различите позиција прикључка за притисак и свака је ротирана у односу на претходну за 90° , па су тако биле посматране позиције углова од 0° , 90° , 180° и 270° у односу на раван угла колена (слика 7).



Слика 7 Позиција прикључака за мерење притиска, [17]

Резултати овог истраживања показали су да колена угла $<90^\circ$ дефинитивно имају утицаја на тачност мерења мерном блендом. У зависности од угла колена и дужине деонице између мерне бленде и колена могу се појавити мања или већа одступања при мерењу протока. Поређењем коефицијента протока за колена са радијусом $3D$ и $1,5D$ могло се видети да имају сличан тренд (слика 8).

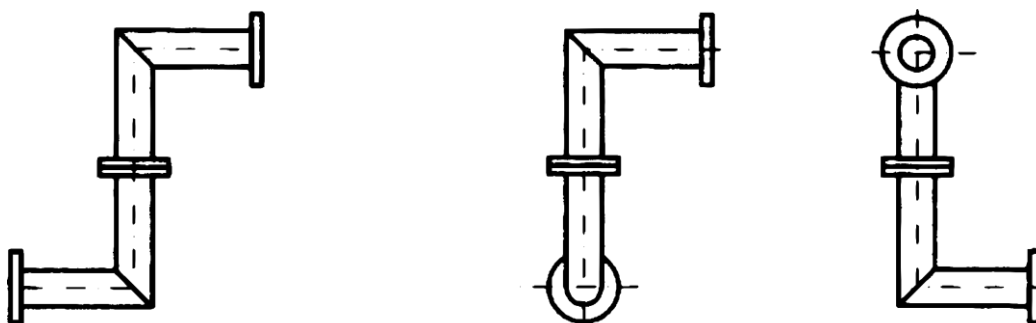


Слика 8 Утицај радијуса и угла колена на коефицијент протока за различите позиције прикључака за притисак, [17]

Када је у питању позиција прикључака за притисак видело се да за мерну бленду са прикључцима за притисак у углу чак и најмањи углови уструјног колена имају значајан утицај [17]. Углови колена од 10° имају мањи утицај на коефицијент протока него углови од 90° за обе изведбе прикључака за притисак. Са

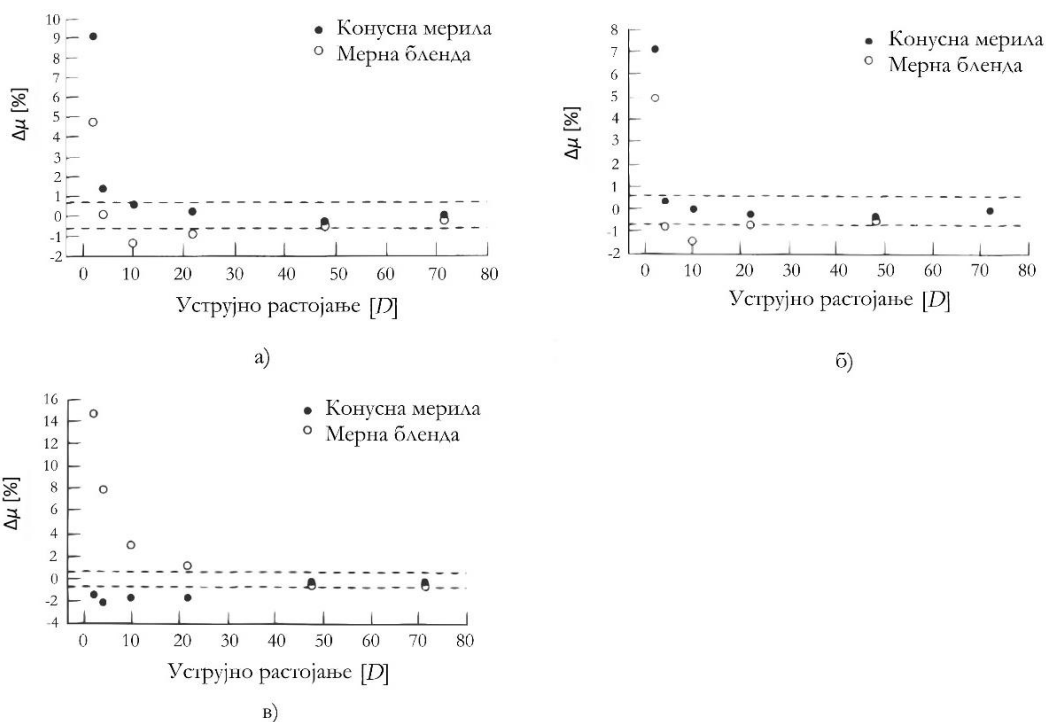
повећањем дужине деонице између мерне бленде и колена, утицај на коефицијент протока смањује се за колена са углом скретања од 90° , док се за колена са углом скретања од 10° и даље смањује, али знатно мање. Показало се да највећи утицај на коефицијент протока има прикључак постављен на позицији угла од 180° у односу на раван угла колена, док за позицију прикључка са унутрашње стране угла колена (позиција угла прикључка од 0° у односу на раван угла колена) има готово занемарљив утицај на коефицијент протока (слика 8).

Утицај уструјних колена (једно колено од 90° , два колена од 90° у истој равни и два колена од 90° у различитим равнима, слика 9) на перформансе конусних мерила и мерне бленде експериментално су испитали Prabu и остали [18]. Експерименти су изведени са ваздухом као радним флуидом при Рејнолдсовим бројевима од 30000 до 494000 за мерну бленду са једним параметром $\beta=0,75$.



Слика 9 Изглед два колена у истој равни и различитим равнима, [18]

На слици 10 могу се видети промене коефицијента протока конусних мерила и мерне бленде у зависности од типа уструјних отпора и растојања између мерног инструмента и колена. Разматрана су три колена: а) једно колено од 90° , б) два колена од 90° у истој равни и в) два колена од 90° у различитим равнима. За сва три случаја може се извући закључак да се проценат промене коефицијента протока повећава са смањењем растојања између мерног инструмента и колена. Резултати су показали да су оба мерна инструмента зависна од дужине деонице између ниструјног колена и мерног инструмента, а да је највећа промена у коефицијенту протока у случају када су два колена од 90° у различитим равнима.



Слика 10 Промена коефицијента протока у зависности од уструјних услова, [18]

Zimmermann [19] је експериментално проучавао утицај поремећаја насталих услед једноструких и двоструких колена изван равни са и без одстојничких цеви на мерење протока мерне бленде. Такође су представљене препоруке за ревизију потребних уздужних правих дужина дефинираних у стандарду EN ISO 5167-2.

Исправљач струјања у одређеној мери може да смањи захтеване дужине праве деонице испред мерног инструмента. Испуњавање потребних услова дужине равних деоница пре мерне бленде повећава потребан простор за уградњу а тиме и укупне трошкове, те се дошло на идеју да се развије мерна бленда која није толико осетљива на уструјне услове.

У раду [20] аутори предлажу БВО као замену за БЈО и врше поређење ове две бленде. Експерименталним путем коришћењем ваздуха као испитног флуида показали су да БВО поседује знатно боље карактеристике (бољи коефицијент протока и мањи пад притиска) од БЈО. За исту вредност $\beta=0,5$ БВО има мањи пад притиска, бржи поврат притиска ниструјно, мању осетљивост на уструјне услове и вртлоге. Како је коефицијент протока мерне бленде однос стварног протока и теоријског протока, а вредност добијеног коефицијента протока за БВО ближа 1,0 може се закључити да је за БВО стварни проток много ближи теоријском протоку него што је то случај код БЈО.

Бленда коју су аутори предложили има 48 идентичних правоугаоних отвора са заобљеним ивицама радијуса $R=0,8$ mm, а збир њихових површина идентичан је површини отвора код БЈО (*слика 11*). Уздужни отвори распоређени су у три концентрична круга различитих димензија, и то на начин да је на првом кругу 8, на другом 16, а на трећем 24 отвора. Сваки од отвора има исти хидраулички пречник³ који је за посматране отворе дефинисан следећим изразом:

$$D_b = \frac{w(4l + w\pi)}{2l + w\pi} \quad (2.5)$$

где су:

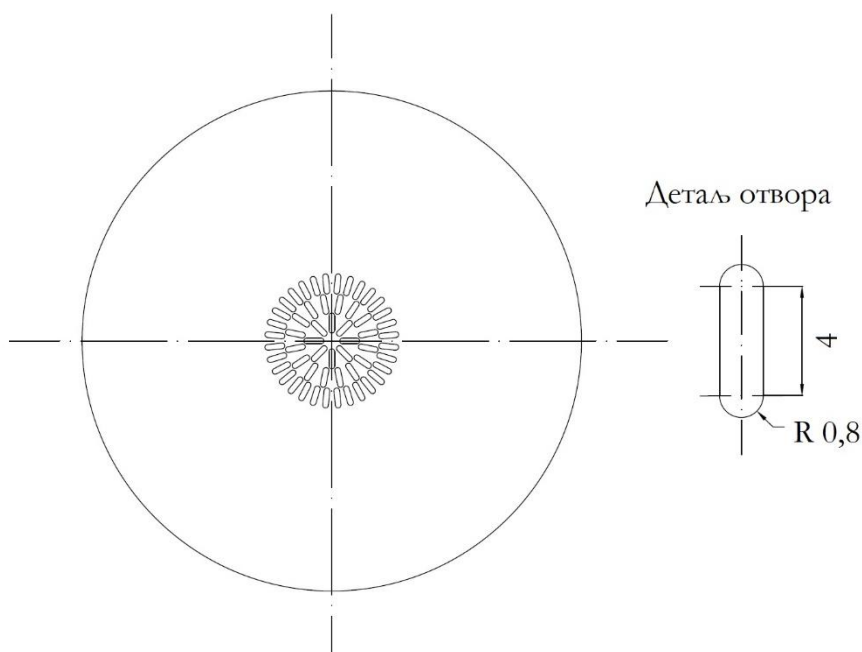
D_b – хидраулички пречник [mm],

w – ширина отвора [mm] и

l – дужина отвора [mm].

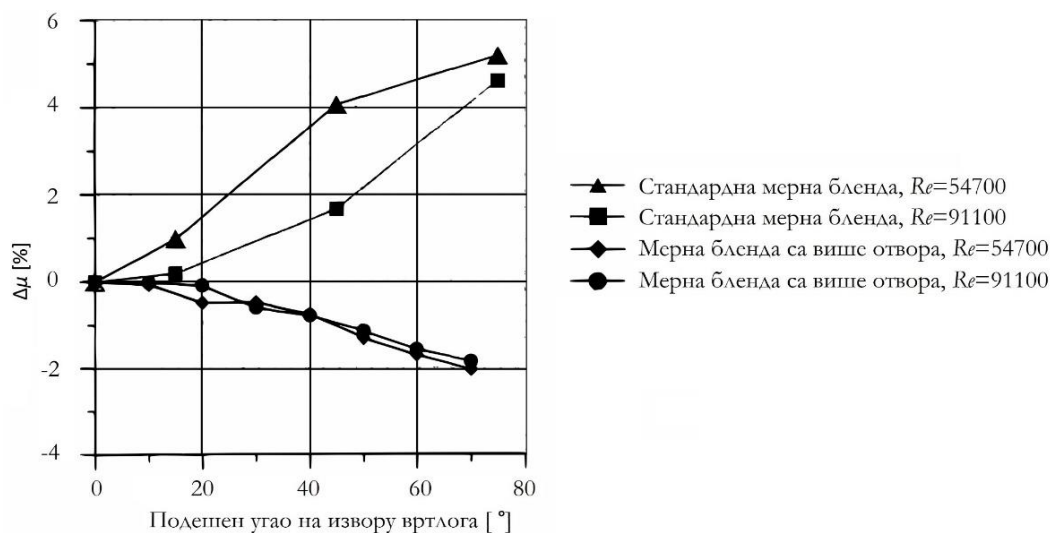
До вредности протока долази се на исти начин као и код БЈО, коришћењем једначине (2.1), док се за одређивање параметра β користи једначина (2.2). Да би се упоредиле карактеристике једне и друге бленде, на испитном постројењу уструјно постављен је извор вртлога (*слика 6*) који може да произведе осносиметрична вихорна струјања као и усмеривач струјања који може да произведе различите профиле брзина без вртлога. Приликом промена профила брзина пратила се промена коефицијента протока и за БЈО коефицијент протока био је у границама од -1% до +6% у односу на случај теоријског профила брзине, а за БВО одступао је свега $\pm 0,25\%$. Када су се вртлози увели у флуидну струју такође је дошло до промене вредности коефицијента протока и то за 5% код БЈО, а за -2% код БВО у односу на случај када није било уструјних вртлога и када је успостављен теоријски профил брзине (*слика 12*).

³ Хидраулички пречник представља однос попречног пресека и оквашеног обима и користи се за отворе који нису кружног попречног пресека



Слика 11 Мерна бленда са више отвора са $\beta=0,50$, [20]

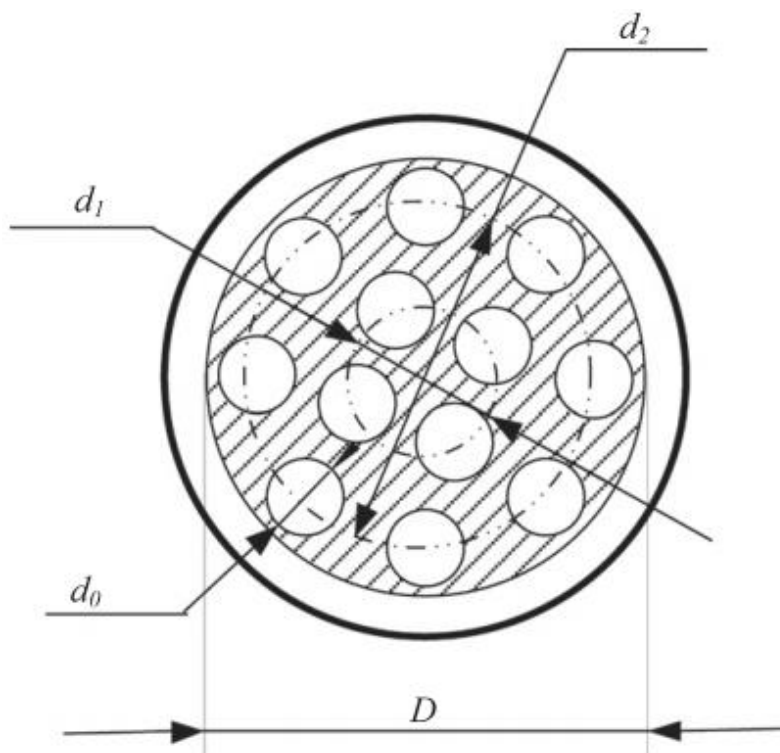
Из овога се може закључити да БВО има предности у односу на БЈО тј. мање је зависна од уструјних услова. Заправо, БВО делује једнако добро као усмеривач струјања и као мерни инструмент [20].



Слика 12 Промена коефицијента протока услед уструјно постављеног извора вртлога, [20]

Huang и остали [21] експериментално су проучавали утицај различитих структурних параметара (дебљину бленде, параметра β и расподелу отвора) на коефицијент протока БВО користећи воду као радни флуид. Експериментални резултати за БВО (слика 13) упоређени су са резултатима за одговарајућу (исти

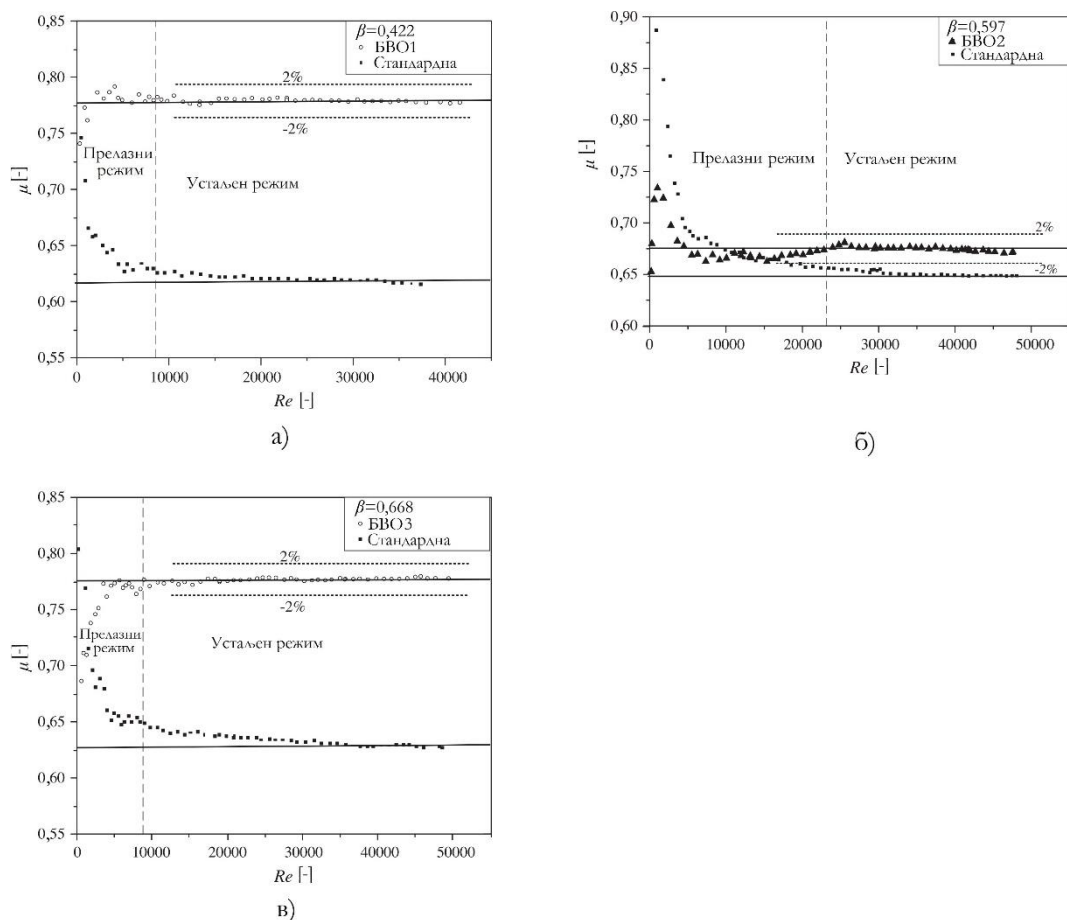
параметар β) стандардну БЈО. У поређењу са стандардним мерним блендама, БВО имала је мањи критични Рејнолдсов⁴ број и јачу анти-поремећајну способност док је константни коефицијент протока већи за 22,5-25,6% за услове извођења експеримената [21]. Више различитих типова БВО као и одговарајуће БЈО испитане су и анализирани.



Слика 13 Структура мерне бленде са више отвора, [21]

На слици 14 могу се видети експериментални резултати БВО и одговарајућих БЈО за три различите вредности параметра β . Може се видети да су коефицијенти протока код БВО знатно већи него код БЈО и то за 25,6%, 3,85% и 22,5% за бленде са параметром β од 0,422, 0,597 и 0,668. Код БЈО коефицијент протока прво расте, а потом опада док не дође до устаљене вредности, док код БВО коефицијент протока опада док не дође до устаљене вредности.

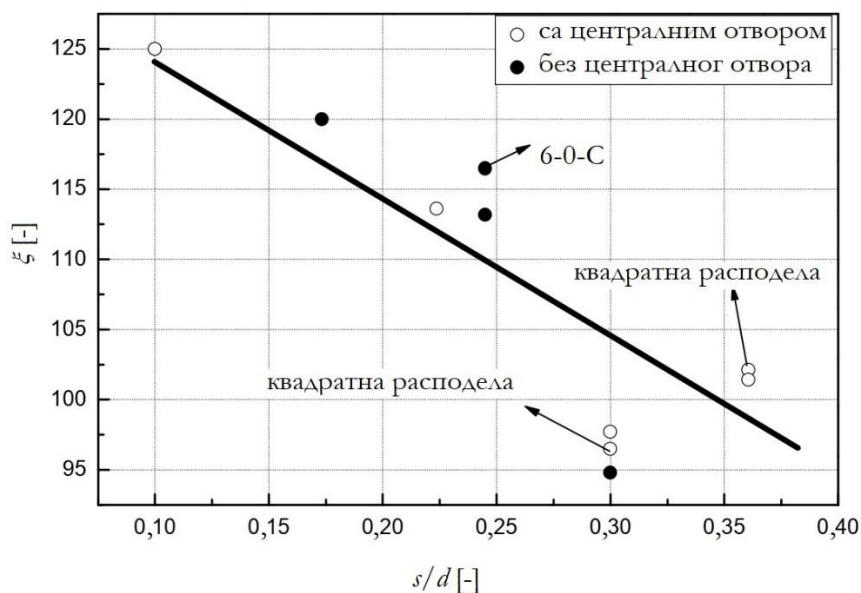
⁴ Критичан Рејнолдсов број представља прелазак из ламинарног у турбулентни режим струјања флуида. Вредност критичног Рејнолдсовог броја за струјање флуида у цеви је 2300.



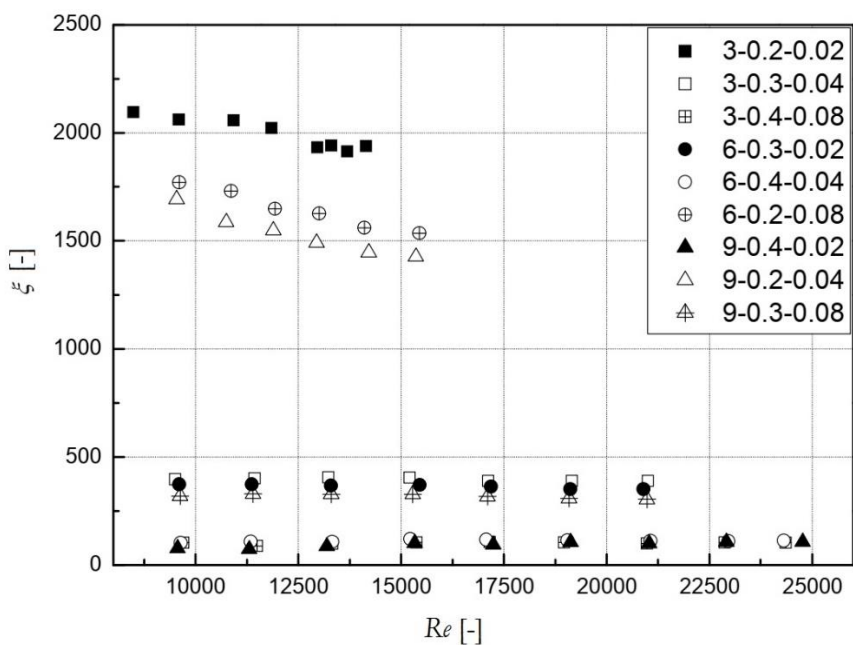
Слика 14 Резултати коефицијента протока за различите мерне бленде, [21]

Zhao и остали [22] представили су методологију геометријског дизајна за БВО. Методологија је увела геометријске параметре попут укупног броја отвора, густине расподеле отвора (растојање између суседних отвора) и однос еквивалентних дијаметара (β). Извршено је низ експеримената са деминерализованом водом да би се проучавали утицаји ових геометријских параметара на карактеристике губитка притиска БВО. Све испитане бленде су биле исте дебљине (2 mm), а са слике 15 може се видети зависност коефицијент пада притиска од односа дебљине бленде и пречника појединачног отвора s/d . Коефицијент пада притиска смањено се за 24 % у опсегу вредности s/d од 0,1 до 0,38. Може се видети да различит распоред отвора мерне бленде може да утиче на коефицијент пада притиска. Такође, аутори су приметили да је коефицијент пада притиска већи за мерне бленде са мање отвора. Са слике 16 могу се видети резултати испитивања 9 различитих бленди (слика 17, први број представља број отвора, други β , а трећи растојање између суседних отвора) које су подељене у групе у односу на β (0,2, 0,3 и 0,4), број отвора (3, 6 и 9) и растојање између суседних отвора (0,02, 0,04 и 0,08), са циљем да се испита утицај ових геометријских параметара на коефицијент пада притиска. Аутори су

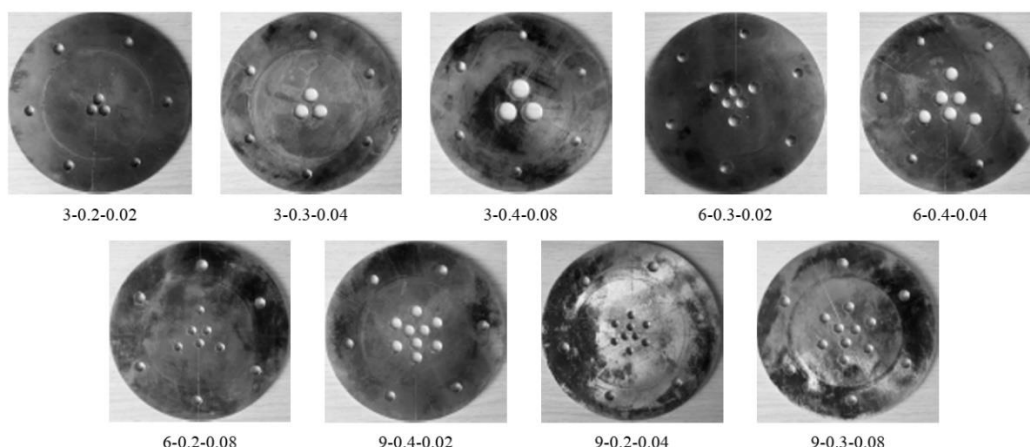
анализирали три фактора и установили да највећи утицај на резултате има фактор β . Утицај броја отвора и растојања између суседних отвора за $\beta=0,3$ и $\beta=0,4$ је занемарљив, док за $\beta=0,2$ није занемарљив (максимално до 30%). Може се видети тенденција да са повећањем β утицај броја отвора и растојања између суседних отвора опада.



Слика 15 Однос коефицијента пада притиска и бездимензионе дебљине s/d , [22]



Слика 16 Резултати испитивања бленди, [22]



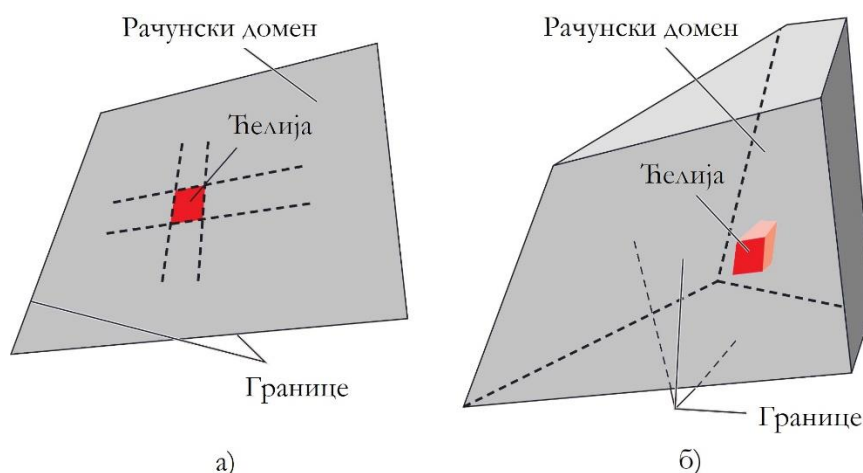
Слика 17 Приказ испитаних бленди, [22]

2.3. ИСТРАЖИВАЊЕ МЕРНИХ БЛЕНДИ ПРИМЕНОМ РАЧУНАРСКЕ ДИНАМИКЕ ФЛУИДЕ

Како експерименти знају да буду скупи и временски захтевни, као поуздан алат за брзо, јефтино и поуздано одређивање коефицијента протока као и струјних параметара мерних бленди у последње време се користи рачунарска динамика флуида – РДФ (енг. Computational Fluid Dynamics – CFD). РДФ је грана механике флуида која се бави решавањем једначина кретања флуида нумеричким методама уз помоћ рачунара. Једначине кретања флуида које се обично наводе за некомп्रेसибилне изотермне флуиде у РДФ укључују Навије-Стоксову једначину [23]. Векторски облик Навије-Стоксове једначине у Декартовом координатном систему гласи:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{f} - \frac{1}{\rho} \text{grad} p + \nu \Delta \vec{v} + \frac{1}{3} \nu \text{grad} \text{div} \vec{v} \quad (2.7)$$

Једначине кретања флуида решавају се за дефинисан рачунски домен који представља регију (проблеми дефинисани у две димензије – 2D) или простор, (проблеми дефинисани у три димензије – 3D), а генерисањем мреже у рачунском домену формирају се ћелије које су у ствари мањи рачунски домени (слика 18).

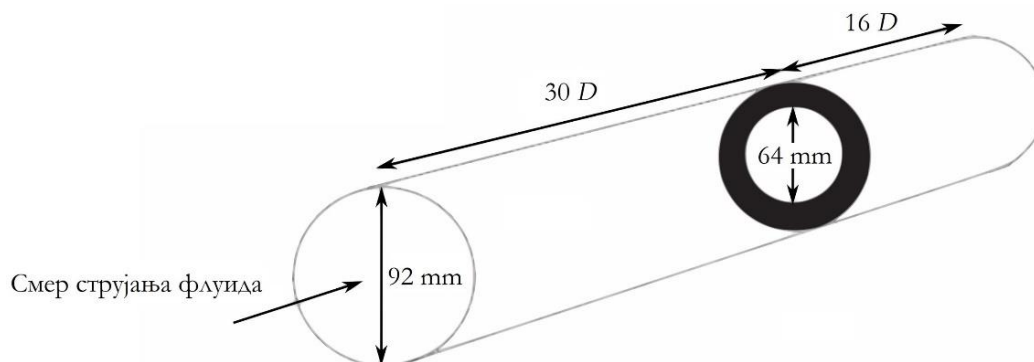


Слика 18 Пример рачунског домена и ћелија у две (а) и три (б) димензије, [24]

Модерне инжењерске методе за решавање бројних проблема користе и експерименталне и нумеричке методе (РДФ симулације). Уобичајен приступ решавања проблема модерним инжењерским методама је да се одређене вредности (пад притиска, брзина, температура, снага итд.) добијене експерименталним путем користе за потврду нумеричке симулације која за резултате даје детаље (које би експерименталним путем било тешко прикупити) струјања флуида као нпр. напоне, профиле притиска и брзине, струјнице итд. На овај начин експериментална и нумеричка метода допуњују једна другу, а пажљивим одабиром параметарских модела значајно скраћују циклус пројектовања [24].

Као полазна основа за симулацију протока флуида кроз мерну бленду могу се посматрати проблеми симулације протока кроз сужење у цеви. Један од таквих радова је [25] где су аутори добили добро поклапање резултата симулације и експеримента. У нумеричким симулацијама коришћен је $k-\varepsilon$ модел турбуленције, док су за проверу (верификацију) резултата нумеричке симулације коришћене вредности брзина измерене помоћу ЛДА. Пад притисака настао услед проласка флуида кроз сужење у цеви није приказана у овом раду. Група аутора [26] је такође радила истраживање струјања кроз цев са сужењем применом РДФ. Аутори су испитивали утицаје мреже, граничних услова, шема дискретизације и модела турбуленције на симулацију протока гаса кроз сужење у цеви, а добијени резултати овог истраживања могу се користити за моделовање протока кроз мерну бленду. Предмет њиховог истраживања била је глатка цев пречника $D=92$ mm и дужине $46 D$ (слика 19), где су проток кроз цев симулирали у две димензије. Улазна деоница била је дужине $30 D$, а излазна $16 D$, док је пречник сужења $d=64$ mm, а дебљина плоче којом се остварило сужење 11 mm. За овакву поставку урађена су и експериментална испитивања, а добијени резултати упоређени су

са резултатима симулације. Експериментална мерења рађена су за потпуно развијену флуидну струју и вредност Рејнолдсовог броја од 75000, док се вредност притиска мерила на позицијама од $2,5 D$, $5 D$, $10 D$ и $15 D$ ниструјно од сужења.



Слика 19 Разматрана геометрија цеви са сужењем, [26]

Урађена је анализа квалитета мреже (енг. grid independacy study) како би се одредила највећа величина ћелије мреже која даје задовољавајућу тачност нумеричке симулације. Као оптимална показала се мрежа од 60×150 ћелија и као таква је генерисала тачне резултате. Анализом се показало да су резултати симулације, а посебно пад притиска кроз целу деоницу цеви, веома осетљиви на квалитет генерисане мреже. Да би се добили квалитетни резултати симулације потребно је да хоризонтална димензија ћелија уструјно од сужења буде $l_x = 0,001 D$. Са овако генерисаном мрежом добијају се резултати симулације, односно вредности пада притиска које одступају свега 0,2% од измерених вредности пада притиска дуж целе деонице посматране цеви (табела 1). За граничне услове на зидовима изабрана је non-equilibrium log-law функција. И шеме дискретизације су се поредиле, а као најповољнија изабрана је комбинација linear upwind scheme (LUS) и van Leer harmonic scheme (VANLH). Ова комбинација показала се као нумерички стабилна и лако конвергирајућа шема дискретизације.

Табела 1 Преглед утицаја различитих параметара нумеричких симулација на пад притиска, [26]

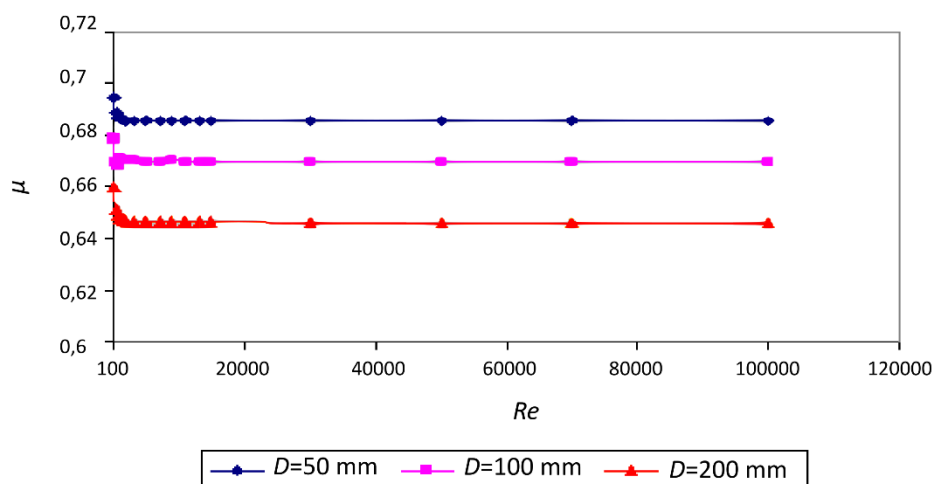
Величина мреже	l_c уструјно од бленде	Шеме дискретизације	Гранични услови са зидовима	Пад притиска у цеви	Одступање од измерене вредности p
60x150	0,001D	LUS + VANLH	Non eq. log-law	448,9 Pa	0,2%
30x150	0,001D	LUS + VANLH	Non eq. log-law	450,8 Pa	0,6%
90x150	0,001D	LUS + VANLH	Non eq. log-law	438,1 Pa	- 2,2%
90x300	0,001D	LUS + VANLH	Non eq. log-law	450,7 Pa	0,6%
60x150	0,01D	LUS + VANLH	Non eq. log-law	335,1 Pa	- 25,2%
60x150	0,001D	LUS + VANLH	Log-law	436,3 Pa	- 2,8%
60x150	0,001D	HDS	Non eq. log-law	354,6 Pa	- 20,8%
60x150	0,001D	Quick	Non eq. log-law	418,8 Pa	- 6,5%

Како квалитет резултата у великој мери зависи и од модела турбуленције, у овој студији аутори су урадили и анализу модела турбуленције. Употребом стандардног k - ε модела турбуленције видело се да се основне карактеристике струјања флуида које се јављају у експерименту могу видети и у симулацији, али се детаљне карактеристике нису могле одредити. Аутори су закључили да је могуће да k - ε модел турбуленције не може да прикаже варијације комплексних струјања када се мења Рејнолдсов број [26]. k - ε модел турбуленције се ипак показао да може добро да прикаже тренд у струјању кроз сужење, а са одређеним модификацијама модела могу се добити квалитетни резултати симулације. Конкретно у овој студији аутори су применили Чен и Ким (енг. Chen – Kim) k - ε модел који представља модификован стандардни k - ε модел турбуленције. Модел који су предложили Чен и Ким треба па побољша динамички одзив ε једначине (једначина које описују дисипацију кинетичке турбулентне енергије). Применом модификованог стандардног k - ε модела турбуленције добили су се много тачнији резултати, тј. много мање одступање резултата симулације од експерименталних резултата. И поред коришћења модификованог k - ε модела турбуленције није се постигло тачније одређивање пада притиска Δp на сужењу мерне бленде.

Мало је радова на тему нумеричких симулација који обухватају све аспекте струјања кроз мерну бленду [6]. Иако овакви проблеми имају једноставну геометрију, струјање флуида кроз мерну бленду ипак је сложено. У наставку је преглед неколико радова у којима је нумеричким симулацијама делимично описана струјна слика флуида кроз мерну бленду.

Група истраживача анализирала је утицај параметра β (од 0,5 до 0,8) на струјну слику ваздуха [27]. У РДФ симулацијама поређени су различити модели турбуленције (k - ε и Reynolds stress model-RSM) са експерименталним

результатима, као и њихов утицај на средњу аксијалну брзину и притисак на зиду, али пад притиска није приказан. Оба модела турбуленције показала су добро поклапање са резултатима експеримента. RSM модел турбуленције показао је мало боље резултате у односу на $k-\varepsilon$ модел турбуленције, али само у пределу непосредно након бленде. Уструјни и ниструјни параметри скоро идентични су за оба коришћена модела турбуленције. Аутори [28] су урадили нумеричке симулације струјања нењутновског флуида (разређени раствор натријумових соли карбокси метил целулозе - СМС) кроз мерне бленде са три различите вредности параметра β (0,4, 0,6 и 0,8). Анализирана је зависност коефицијента протока од Рејнолдсовог броја. Нумеричке симулације урађене су за девет различитих геометрија при чему су се за сваки параметра β користиле три различите вредности пречника цеви D (50 mm, 100 mm и 200 mm). Опсег Рејнолдсових бројева био је од 100 до 100000 за све случајеве. Из добијених резултата могло се видети да се за исту вредност параметра β при повећању пречника цеви коефицијент протока смањује (слика 20). У раду [29] аутори су представили нумеричку методу за калибрацију (одређивања коефицијента протока) мерних бленди коришћењем РДФ.



Слика 20 Утицај промене пречника цеви на коефицијент протока за $\beta = 0,4$, [28]

У претходно наведеним радовима РДФ симулацијама нису били обухваћени сви аспекти струјања флуида кроз мерну бленду. Више информација о струјању флуида кроз мерну бленду (биланс енергије, струјна слика, поврат притиска, профили брзина итд.) су помоћу РДФ симулација приказани у раду [6]. Аутори су успешно извршили симулацију струјања флуида кроз мерну бленду (различитих вредности β) помоћу РДФ, а за потврду симулације користили су резултате добијене експерименталним испитивањем мерних бленди за воду, као и резултате експерименталних испитивања [30] и [31] за ваздух. У раду [30] приказани су резултати аксијалне брзине, статичког притиска на зиду цеви,

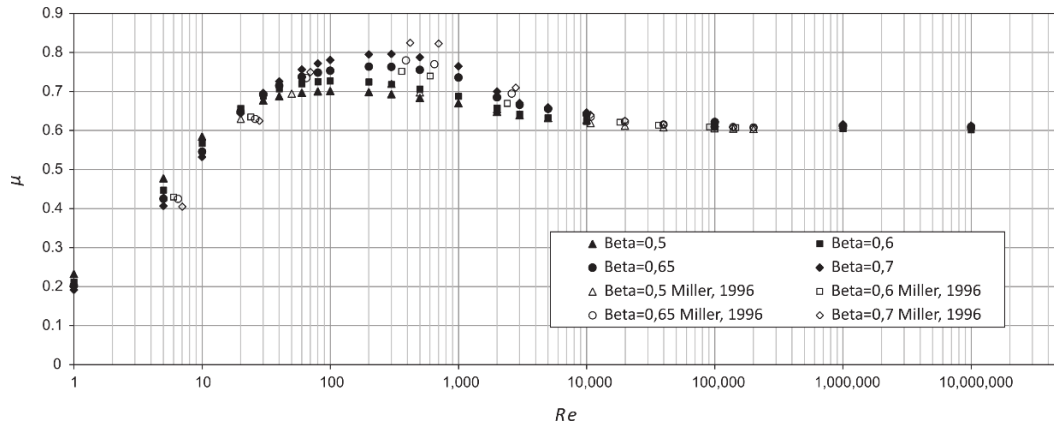
турбулентних и тангенцијалних напона (брзине струјања флуида дуж границе) приликом струјања флуида кроз мерну бленду, а за потребе експеримента коришћена је ЛДА метода. Morrison *и остали* [31] снимили су струјну слику помоћу 3D ЛДА и приказали средњу брзину и поље турбуленције унутар мерне бленде са $\beta = 0,5$. Такође приказани су аксијалне брзине и профили притиска на зиду цеви. Shah *и остали* [6] су коришћењем стандардног $k-\varepsilon$ модела турбуленције у РДФ симулацијама постигли висок ниво поклапања резултата симулације и експерименталних мерења. Подаци добијени из РДФ симулације о билансу енергије, струјној слици, поврату притиска, профилима брзина и притиска као и анализа осетљивости параметарских модела турбуленције показали су да је стандардни $k-\varepsilon$ модел турбуленције добар модел за описивање ефекта турбуленције у мерној бленди. Сваки од ових података показао је поклапање са резултатима експеримента као и све очекиване карактеристике струјања код мерне бленде. Поређењем коефицијената протока израчунатог на основу вредности пада притиска из експеримента и вредности пада притиска из РДФ симулације може се видети да су одступања РДФ симулације до 6% (табела 2). Резултати ове анализе показали су да се са РДФ као методом поуздано могу заменити скупни и дуготрајни експерименти за добијање вредности коефицијента протока.

Табела 2 Поређење вредности коефицијента протока добијених експерименталним путем и РДФ, [6]

Случај	Q (ml/s)	Δp (N/m ²)	Улазна брзина (m/s)	Брзина на сужењу (m/s)	Re за цев	μ	
	(измерено)	(измерено)	(израчунато)	(израчунато)	(израчунато)	експеримент	РДФ
1	44,67	5680,08	0,376	2,275	4489	0,6657	0,6253
2	57,33	10866,24	0,482	2,920	5762	0,6177	0,6128
3	80	23461,20	0,673	4,074	8040	0,5866	0,6035
4	89,67	29511,72	0,755	4,567	9012	0,5863	0,5996

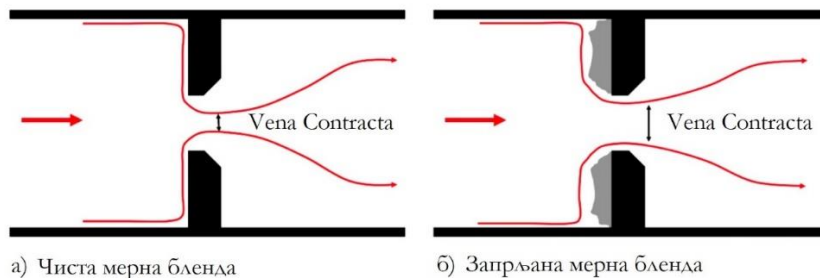
РДФ је успешно коришћен за симулацију различитих режима струјања кроз уређаје код којих се принцип мерења протока заснива на мерењу пада притиска настале услед отпора у флуидној струји. У раду [32] аутори су посматрали неколико типова мерила протока на принципу пада притиска: Вентури цеви, мерне бленде, конусна мерила и мерила са отпором у облику клина. Аутори су међусобно поредили коефицијенте протока наведених мерила који су добијени експерименталном методом и РДФ. Циљ овог истраживања био је да се види понашање коефицијента протока при различитим вредностима Рејнолдсовог броја Re ($1 \leq Re \leq 50000000$). За одређене вредности Рејнолдсових бројева урађена је валидација резултата нумеричких симулација експерименталном методом, а

затим је даље истраживање при различитим вредностима Re урађено применом РДФ методе. За мање вредности Рејнолдсовог броја сматрало се да је струјање ламинарно те није било потребе за моделом турбуленције, а за веће вредности Рејнолдсовог броја користио се $k-\epsilon$ модел турбуленције. Резултати (слика 21) су показали да је коефицијент протока израчунат помоћу резултата РДФ симулације у границама одступања 3% од експерименталних резултата [32].

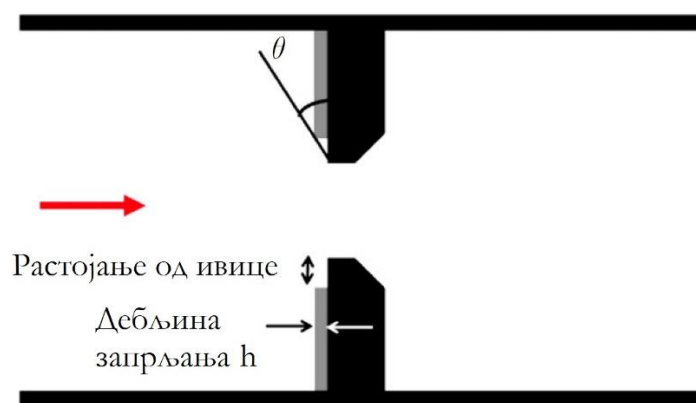


Слика 21 Коефицијент протока мерне бленде – поређење резултата симулације и експеримента, [32]

Накупљене нечистоће на мерној бленди могу да проузрокују одређену промену струјања флуида кроз мерну бленду а самим тим и погрешно одређене вредности протока (слика 22). Reader-Harris и остали [33] су симулирали запрљање стандардне мерне бленде са једним отвором експерименталним путем као и помоћу РДФ. За експериментална испитивања коришћен је азот као радни флуид на притиску од 63 bar док се запрљање мерне бленде симулирало постављењем металних прстенова тачно дефинисаних дебљина и радијуса испред мерне бленде. У РДФ симулацијама мењан је угао θ који заклапају прстенови и предња ивица мерне бленде (слика 23). Испитане су бленде са три различита β параметра 0,4, 0,6 и 0,7, а резултати су показали да коефицијент протока услед запрљања мерне бленде може да се промени и до 12%.



Слика 22 Илустрација ефекта запрљања на проток кроз мерну бленду, [33]



Слика 23 Коришћена геометрија за РДФ симулације, [33]

Dong *и остали* [34] проучавали су тачност конвенционалне мерне бленде од нерђајућег челика и побољшане мерне бленде са цементним карбидом на ивици отвора (слика 24). У ту сврху направљено је осам мерних бленди, четири од нерђајућег челика и четири од нерђајућег челика са цементно карбидним прстеном на ивици отвора и као такве постављене су у комерцијалне гасоводе на годину дана. Промене у храпавости улазне ивице мериле су се на свака 3 месеца специјалним уређајем који мери дебљину, храпавост улазне ивице као и друге параметре мерних бленди. Видело се да мерне бленде од чистог нерђајућег челика имају веће промене на улазној ивици отвора (9,192-57,329 μm) од мерних бленди са цементно карбидним прстеном (9,863-26,438 μm). РДФ је коришћена да би се симулирали услови под којима су мерне бленде биле постављене у гасоводе и да би се испитала њихова тачност. Коефицијент протока је параметар на основу којег се оцењивала тачност ових мерних бленди. За обе испитане мерне бленде видело се да временом губе на тачности због хабања материјала, али је тај тренд много спорији код мерне бленде са цементно карбидним прстеном на ивици отвора.

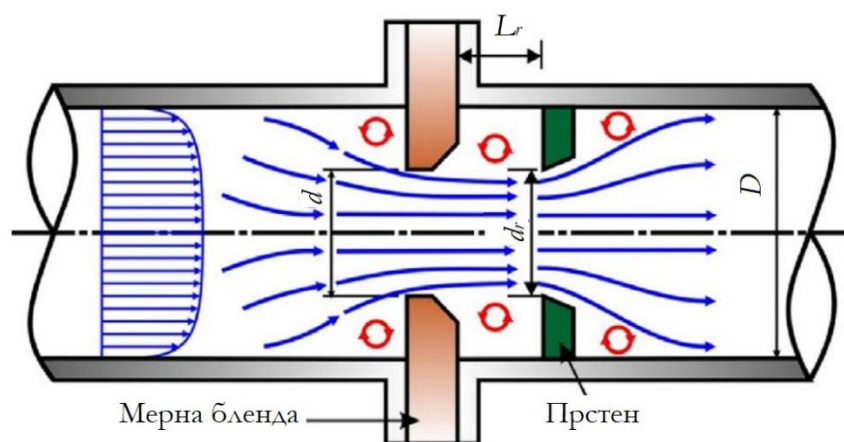


Слика 24 Конвенционална и побољшана мерна бленда, [34]

Elsaey *и остали* [35] су применом РДФ проучавали струјање кроз сегментну мерну бленду са ваздухом као радним флуидом. Резултати су показали да сегментне

мерне бленде имају значајан утицај на мешање флуида ниструјно од мерне бленде као и да имају нижи пад притиска од конвенционалне мерне бленде са централним кружним отвором. Резултати нумеричких симулација потврђени су експерименталним резултатима и добро поклапање се постигло са максималним одступањем резултата симулација од око 5,4%.

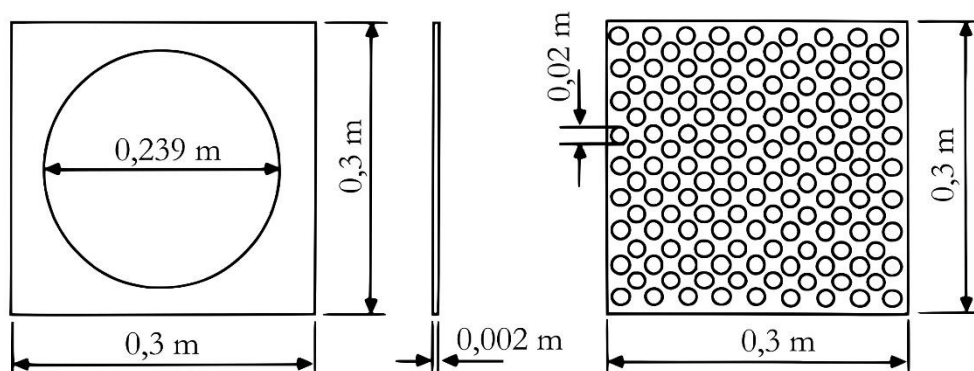
Shaaban [36] је предложио нову изведбу мерне бленде код које је прстен постављен ниструјно од мерне бленде (слика 25). Прстен смањује стални губитак притиска, повећава коефицијент протока и смањује потребну дужину равне деонице уструјно. Предложени нови дизајн значајно штеди потрошњу енергије. Аутор је применио нумеричку оптимизацију коришћењем РДФ и генетичког алгорита како би дошао до оптималне геометрије прстена. Резултати су показали смањење губитка притиска за (29,8-33,5)% и повећање коефицијента протока за (17,7-22)% при Рејнолдсовим бројевима од $1,84 \times 10^4$ до $8,69 \times 10^4$. Такође је испитан и утицај улазних равних деоница на перформансе мерне бленде са оптималним прстеном постављеним ниструјно. Улазна деоница смањена је са $30 D$ на $5 D$, а потом је и геометрија прстена оптимизована поново. За нову дужину улазне деонице од $5 D$ резултати су показали повећање губитка притиска за 0,4%.



Слика 25 Мерна бленда са ниструјним прстеном, [36]

Gan и Riffat [37] проучавали су карактеристике губитка притиска бленде са оштрим ивицама (правоугаоне ивице) и перфориране плоче у вентилационим цевима квадратног попречног пресека. Укупна површина свих 145 униформно распоређених отвора на перфорираној плочи била је једнака површини отвора бленде, а однос површине отвора и површине попречног пресека вентилационе цеви (β) био је 0,5 (слика 26). Користећи РДФ симулације предвидели су расподелу притиска и коефицијент пада притиска али и испитали утицај

дебљине плоче на губитак притиска. Аутори су закључили да је коефицијент пада притиска већи код разматране перфориране плоче него код бленде у цевима квадратног попречног пресека. Такође су приметили да је за турбулентна струјања (за Рејнолдсове бројеве од $1,6 \times 10^5$ до $3,7 \times 10^5$) утицај Рејнолдсовог броја на коефицијент пада притиска занемарљив као и да са повећањем дебљине плоче на 1,5 од пречника отвора бленде, губитак притиска кроз бленду може да се значајно смањи.



Слика 26 Бленда са једним отвором и перфорирана плоча са више отвора, [37]

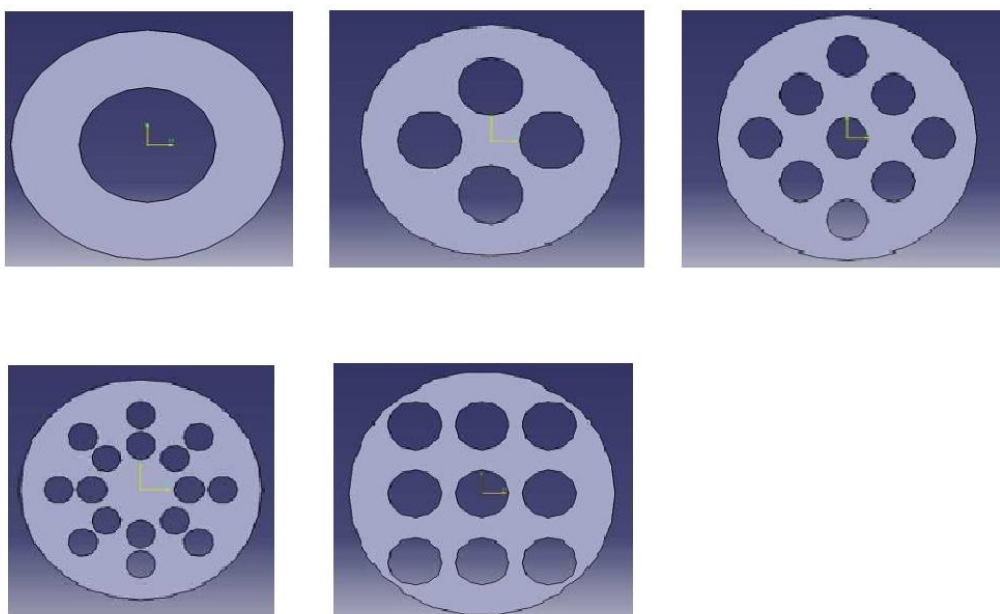
Drainy и остали [13] у својој нумеричкој студији Цанкеровог усмеривача (слика 4) упоредили су резултате различитих модела турбуленција (стандардни $k-\varepsilon$, реализабилни $k-\varepsilon$ (енг. Realizable $k-\varepsilon$), Рејнолдсов модел напрезања (енг. Reynolds Stress Model - RSM), симулација великих вртлога (енг. Large Eddy Simulation – LES) и симулација одвајајућих вртлога (енг. detached Eddy Simulacija - DES) са корелацијама за пад притиска из BS EN ISO 5167-2:2003, истовремено проучавајући утицаје дебљине плоче и Рејнолдсовог броја на карактеристике протока Цанкеровог усмеривача. Поређењем вредности добијених из израза за пад притиска из стандарда BS EN ISO 5167-2:2003 са резултатима симулација, DES модел турбуленције показао је најбоље резултате (табела 3).

Табела 3 Резултати симулације за пад притиска, [13]

Модел турбуленције		Резултати РДФ, Δp (Pa)	Одступање од вредности из стандарда за Δp (%)
Стандардни $k-\varepsilon$	1 реда	315,5	49,7
	Quick	290,1	37,9
$k-\varepsilon$ Realizable		275,3	30,8
RSM		288,6	37,2
LES		230,1	9,4
DES		220,5	4,8

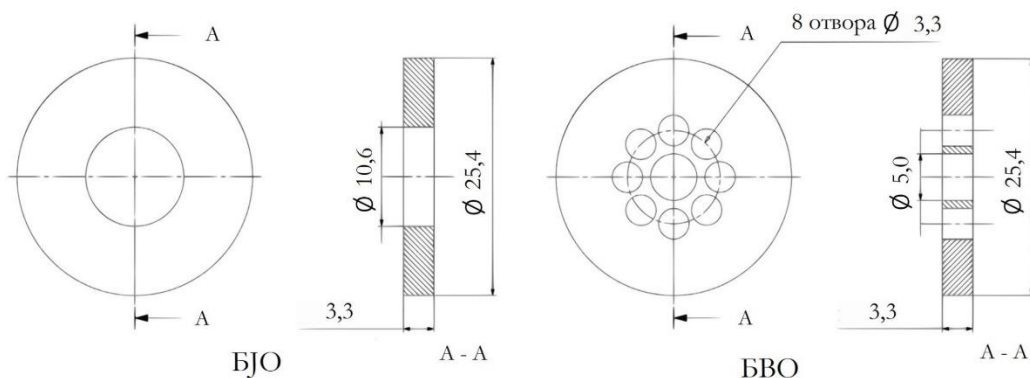
У претходном делу могло се видети да се РДФ може успешно користити као замена за експериментална испитивања за добијање параметра до којих се у прошлости могло доћи само експерименталним путем, исто тако РДФ се може користити и за развој БВО као замена за експериментална испитивања.

Barki и Ganesha [38] упоређивали су БЈО и БВО (слика 27) користећи воду као течност у својим РДФ симулацијама. Поред поређења БЈО и БВО, аутори су проучавали и утицаје расподеле отвора код БВО на проток, пад притиска, брзину и интензитет турбуленције. Нумеричка анализа показала је боље карактеристике протока БВО у поређењу са БЈО.



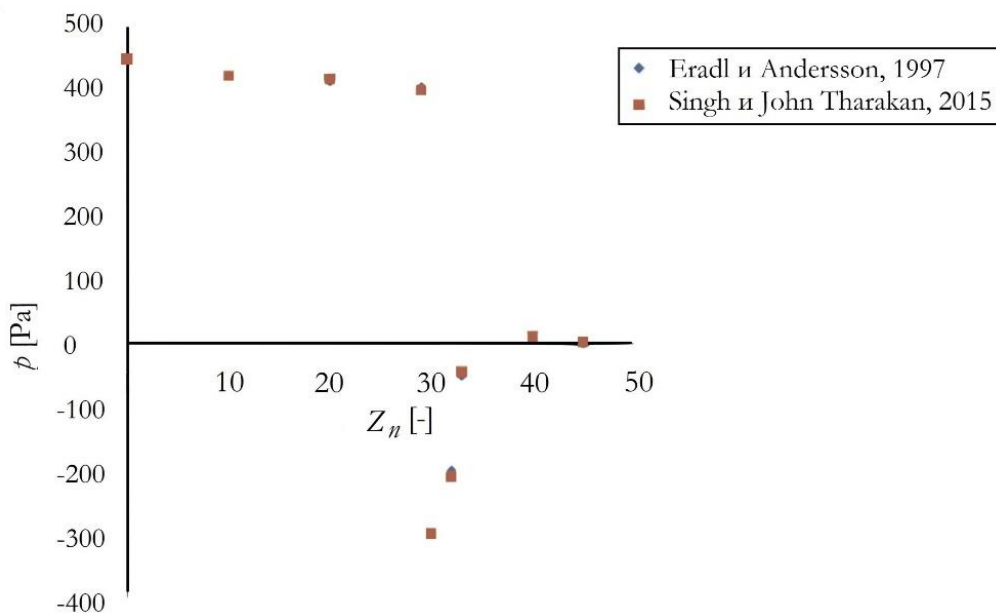
Слика 27 Геометрија симулираних мерних бленди БЈО и БВО, [38]

У раду [39] аутори су извршили симулацију струјања дестиловане воде при високим притисцима (од 10 bar до 450 bar) кроз БЈО као и кроз БВО, које имају исту вредност $\beta=0,50$, а за различите вредности Re бројева (од 500 до 20.000). Слично као и у раду [20] БВО има централни отвор димензије $d_1=5$ mm и осам мањих отвора димензије $d_2=3,3$ mm који су распоређени на подеоном кругу (слика 28). У симулацијама су се димензије подеоног круга мењале дајући различите конфигурације мерних бленди не би ли се дошло до најбоље геометрије за БВО.



Слика 28 Геометрија мерне бленде са једним отвором и мерне бленде са више отвора, [39]

Резултати симулације потврђени су експерименталним испитивањем мерних бленди и то за БЈО као и за две конфигурације БВО, док су за преостале конфигурације урађене РДФ симулације. Поред овога извршено је и поређење резултата симулације БЈО са резултатима симулације кроз сужење у цеву приказаним у [26]. Поредио се поврат притиска, а резултати су се скоро у потпуности покlopили (слика 29). Како се модел симулације за БЈО показао као добар, исти тај модел се применио и на БВО. Као и у раду [20] и овде се видело да је поврат притиска већи код БВО него код БЈО, као и да је вредност коефицијента протока већа за БВО. Да би се у будућности БВО користиле као замена за БЈО, потребно је свеобухватно испитивање ових бленди са различитим течностима и гасовима као и за различите вредности параметра β [39].

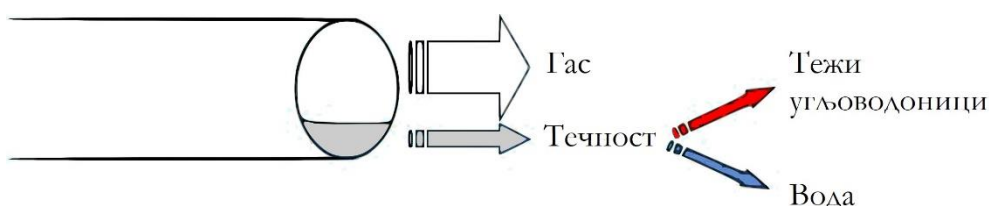


Слика 29 Поређење резултата РДФ симулација [39]

2.4. ВЛАЖАН ГАС

Поред мерења протока једнофазних, једнокомпонентних⁵ флуида, мерне бленде су нашле примену и у мерењу протока вишефазних (нпр. пара) али и више компонентних флуида. У многим индустријама јавља се проблем мерења влажног гаса, а овај проблем је нарочито значајан за нафтну и гасну индустрију. Не постоји квантитативна дефиниција протока влажног гаса која је универзално прихваћена [40]. Пре дефинисања влажног гаса потребно је дефинисати двофазне и вишефазне флуиде/струјање. Вишефазни флуиди се могу дефинисати као мешавина три фазе, течне, гасне и чврсте. Исто тако могу се дефинисати и двофазни флуиди који би по аналогији били мешавина две од било које три фазе, и онда би имали течно гасну мешавину, течно чврсту мешавину и гасно чврсту мешавину. Оваква терминологија се не користи у гасној и нафтној индустрији тј. има другачије значење. Тако се вишефазни флуид у нафтној и гасној индустрији посматра као двофазни флуид које се састоји од гасне и течне фазе, а течна фаза је сачињена од више компоненти. Како је у индустрији сигурно да скоро универзална дефиниција вишефазног струјања остаје као таква, може се рећи да је вишефазно струјање, струјање гаса и течности која има више од једне течне компоненте [41].

Када је у питању нафтна и гасна индустрија, природни гас који се произведе из гасних налазишта најчешће није сув, већ садржи одређене количине течне фазе, и тај гас се посматра као влажан гас. Сам појам, влажан гас се односи на присуство угљоводоника који су тежи од метана и који при смањеној температури и одређеним притисцима, имају тенденцију кондензације и претварања у течну фазу. Када се каже влажан гас, мисли се на гас који има (запремински) удео течне фазе не већи од 5%. Најчешће се влажан гас посматра као трофазна мешавина која је сачињена од гаса (природног гаса), кондензата (тежи угљоводоници) и воде (слика 30).



Слика 30 Схематски приказ влажног гаса, [40]

⁵ Ваздух је смеша гасова, али је концентрација сваке компоненте ваздуха константна и једнака у свим тачкама флуида (дакле нема дифузије масе), те се ваздух третира као једнокомпонентни флуид

Струјање влажног гаса увек је двофазно струјање, а у зависности од састава течне фазе може да буде и вишефазно струјање [41].

Приликом мерења протока влажног гаса, задатак мерног система је да измери протоке сваке од три фазе појединачно. Како се влажан гас може посматрати и као двофазни флуид/мешавина, тако се и процес мерења може поједноставити посматрањем само две фазе, гасне и течне. Накнадно у процесу припреме и прераде посебно се третирају издвојени кондензат и вода.

Тренутно постоје три основна приступа мерења протеклих количина влажног гаса. Први приступ се базира на издавању сваке од фазе из влажног гаса и њихово појединачно мерење једнофазним мерним системима. Други начин уједно и најраспрострањенији односи се на одређивање протока влажног гаса једнофазним мерним системом најчешће базираног на принципу пада притиска (мерна бленда, Venturi цев итд.) и коришћењем накнадне корекције услед грешака насталих због влажног гаса. Трећи често и најскупљи начин мерења протока влажног гаса је развој посебног мерила за мерење протока три фазе.

Приликом мерења протока влажног гаса базираног на принципу пада притиска изазваног постављањем мерне бленде, свакако долази до појаве грешке која захтева одређену корекцију у односу на мерење протока сувог гаса. У индустрији широко распрострањена Мрдокова (енг. Murdock) корелација која пружа задовољавајућу корекцију одступања приликом мерења протока влажног гаса, дата је следећим изразом:

$$Q_g = \frac{Q_p}{1 + 1,26 X_{LM}} \quad (2.8)$$

где су:

Q_g – стварни запремински проток гаса [m^3/s],

Q_p – рачунски⁶ добијена вредност запреминског протока [m^3/s] и

X_{LM} – Локарт-Мартинели (енг. Lockart-Martinelli) параметар [-].

Локарт-Мартинели параметар ближе одређује влажност гаса и креће се у границама од 0,0 за сув гас до максимума од 0,3 за 95% запреминске гасне фракције влажног гаса. Параметар X_{LM} најчешће је непознат и мора се израчунати следећим изразом како би се могао применити у Мрдоковој корелацији:

⁶ Израчуната вредност запреминског протока на основу разлике притиска кроз мерну бленду за двофазну мешавину

$$X_{LM} = \frac{\dot{m}_{lf}}{\dot{m}_{gf}} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \quad (2.9)$$

где су:

\dot{m}_{lf} – масени проток течне фазе [kg/s],

\dot{m}_{gf} – масени проток гасне фазе [kg/s],

ρ_l – густине течне фазе [kg/m³] и

ρ_g – густине гасне фазе [kg/m³].

Chisholm [42] је експерименталним истраживањем различитих режима струјања двофазног флуида (влажан гас) кроз мерну бленду дошао до закључка да се при мерењу влажног гаса мерном блендом долази до појаве грешке (енг. OR или Over-Reading) која је функција Локарт-Мартинели параметра. Ова грешка се може изразити:

$$OR = \frac{\dot{m}'_g}{\dot{m}_g} = \sqrt{\frac{\Delta p_{fp}}{\Delta p_g}} \quad (2.10)$$

где су:

OR – грешка приликом мерењу протока влажног гаса [-],

\dot{m}'_g – некоригован масени проток гаса [kg/s],

\dot{m}_g – стварни масени проток гаса [kg/s],

Δp_{fp} – пад притисака настала услед протока влажног гаса [Pa] и

Δp_g – пад притисака у случају да је гас једнофазни [Pa].

Овакав начин корекције је нашао широку примену при мерењу протока двофазних флуида мерилима протока на принципу пада притиска.

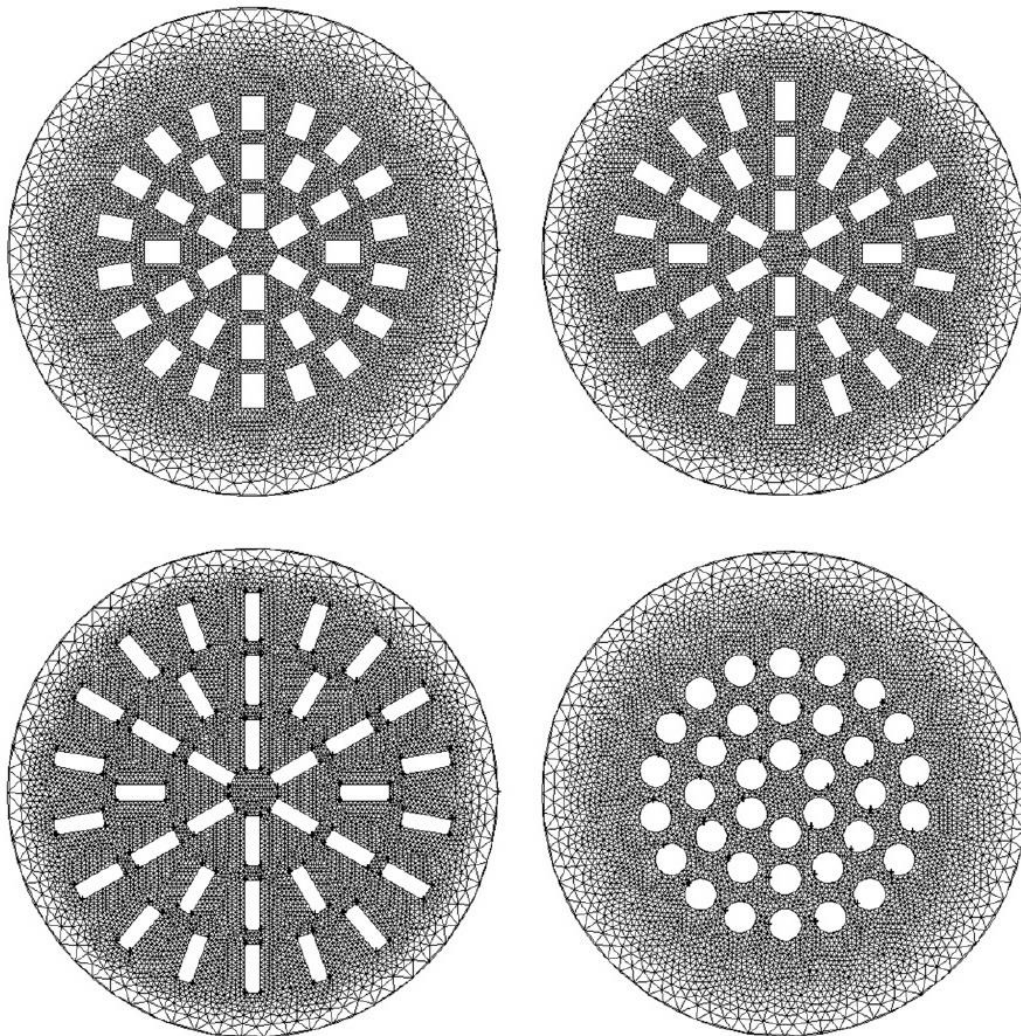
Има више разлога који подстичу произвођаче природног гаса да улажу и унапређују системе мерења природног гаса на гасним пољима. Први разлог је што прецизнија наплата скупе сировине. Ово за последице има повећање улагања у опрему и мерне системе на производним пољима, као и повећан надзор (контролу) квалитета мерења од стране заинтересованих учесника, са посебном пажњом на квалитетно мерење веома вредних сировина. Други значајан разлог је све већа посвећеност друштва заштити животне средине, која са собом носи и одређене прописе и законе који се морају поштовати. Хаварије

(цурења и емисије) се третирају озбиљније него раније, а трошкови њиховог одржавања постају веома велики како би се ризици хаварија svelи на минимум. Још један од разлога је и тренд у гасној индустрији да се експлоатишу и налазишта која захтевају флексибилније и прилагодљивије стратегије експлоатације. У том смислу квалитетно мерење незаобилазно је како би се процес производње могао оптимизовати.

Из претходно наведеног се може видети да има доста разлога да се развијају мерни системи за влажан гас, који су јефтини, не захтевају компликовано и скупо одржавање, не представљају опасност по животну средину, а обезбеђују квалитетно мерење. Велики број нових технологија се развија да би се могло одговорити овој потреби.

Током година, компаније из нафтног и гасног сектора су развијале различита мерила протока влажног гаса. Оваква мерила су базирана на различитим мерним принципима уз примену различитих технологија. Последњих година у нафтној и гасној индустрији, мерила за влажан гас која раде на принципу пада притиска као Venturi цеви и мерне бленде, постају све популарнија због своје једноставности и јефтиног одржавања у поређењу са мерним системима за више фаза [43]. Како би се дошло до бољих карактеристика мерног система, често је рађено унапређење основног дизајна мерне бленде. Као што се и мерна бленда може користити за мерење протока вишефазних флуида исто тако је и РДФ нашао примену у развоју мерних бленди за вишефазне флуиде (влажан гас).

У раду [43] аутори су се бавили БВО за мерење протока влажног гаса при ниским притисцима (од 2,6 bar до 3,65 bar). Посматрали су четири различите изведбе БВО (*слика 31*) као и БЈО, све са истом вредношћу параметра $\beta=0,4$. Уз помоћ РДФ пратио се и анализирао утицај геометрије отвора мерних бленди на мерење протока влажног гаса. И у овом случају, приликом мерења протока влажног гаса се показало да БВО има предности у односу на БЈО. Резултати добијени нумеричким симулацијама показују да БВО има повољније вредности пада притиска и поврата притиска. Геометрија отвора је утицала на брзину струјања и поље притиска али није утицала на додатну грешку које се јавља код мерне бленде приликом мерења влажног гаса. Како се ово истраживање односило на ниже притиске, вредности пада притиска нису биле велике, а вероватно би се промениле са порастом притиска. Међутим, потребно је више истраживања са протоцима на вишим притисцима како би се ово и потврдило [43].



Слика 31 Различите изведбе мерних бленди са више отвора за мерење протока влажног гаса, [43]

2.5. ЗАВРШНА РАЗМАТРАЊА

Поуздана, лака за употребу и одржавање, БЈО има и одређене захтеве и мане, а БВО може неке од њих да реши. У досадашњем прегледу литературе видело се које све предности БВО има у односу на БЈО. Ипак да би се БЈО могле потпуно заменити БВО потребна су додатна истраживања.

У литератури недостају експериментални подаци везани за БВО за мерење протока гаса при вишим притисцима. Као што је већ поменуто у раду [43] аутори су се бавили БВО за мерење протока влажног гаса при ниским притисцима од 2,6 bar до 3,65 bar. Мерном блендом са више отвора за мерење протка влажног гаса бавили су се и [44] на притисцима од 2 bar до 4 bar и [45] на притисцима до 7,6 bar. У истраживању у оквиру докторске дисертације применом

експерименталне методе и рачунарске динамике флуида испитале су се БВО са ваздухом као радним флуидом максималног притиска до 12 bar, на температури приближној собној температури (од 19 °C до 35 °C). На овај начин добиле су се информације о параметрима мерне бленде за опсеге притисака који до сада нису рађени.

Експериментална испитивања БВО за мерење протока ваздуха укључила су и мерење влажности ваздуха. Према горе наведеној дефиницији влажног гаса, ваздух који се користио у оквиру експеримента није влажан гас. Ради се о ваздуху који је припремљен у компресорској станици, међутим он и даље садржи одређену количину воде која ће бити измерена. Ради се о веома честој ситуацији која се јавља у гасоводним системима. У гасоводним системима, у различитим фазама, вода се одваја из гаса (производња, транспорт, дистрибуција, унутрашња гасна инсталација), међутим иако је у питању гас који више није влажан, одређена количина воде остаје присутна у гасу. У досадашњим истраживањима аутори се нису бавили узимањем у обзир воде гаса за случај када гас који је коришћен током експеримента није испуњавао услове за влажан гас. Ово је чест случај у пракси, јер гас у инсталацијама пролази процес филтрације где му се поред механичких нечистоћа уклања и вода. Током експерименталног испитивања БВО за мерење протока ваздуха мерила се и постојећа влажност ваздуха. Након потврде (валидације) резултата нумеричке симулације експерименталним резултатима који су укључили влажност гаса, даља истраживања која су била рађена применом РДФ испитала су утицај влажности гаса на параметре мерне бленде.

Занимљиво је то да су се аутори у прошлости бавили развијањем БВО која није јако осетљива на уструјне услове и вртлоге, при чему су остварени и одређени резултати [20, 46, 43, 39, 47, 48] док је утицај уструјних услова на БЈО приказан у [17, 18, 49, 19]. До сада нема информација у литератури како ниструјни услови и вртлози утичу на параметре рада БВО када је радни флуид гас. Ниструјни услови и вртлози такође могу да имају утицаје на параметре рада мерне бленде, што је добро познато код БЈО [50, 51, 15], па се инсистира на равној правој деоници иза бленде дужине од $4D$ до $8D$ у зависности од вредности β (SRPS EN ISO 5167-2:2012). Управо је то разлог зашто су се применом РДФ испитали утицаји како уструјних, тако и ниструјних услова на радне параметре БВО. Циљ је да се развије БВО за мерење протока гаса која ће бити најмање осетљива на уструјне и ниструјне услове.

На основу прегледа литературе може да се уочи да у последњих пар година траје интензиван развој БВО. Један од циљева јесте да се добије мерна бленда која ће имати најмањи пад притиска, како би се радом бленде потрошила најмања

количина енергије. Оно што је до сада доказано јесте да конструкција БВО несумњиво смањује пад притиска флуида. Занимљиво је то да до сада нема радова који би егзактно приказали количину енергије која би се уштедела конструкцијом БВО, што би био веома важан показатељ за будуће потенцијалне кориснике БВО. План истраживања је тако постављен да се добију сви параметри неопходни за одређивање потрошње енергије бленде, тј. уштеде енергије која би се остварила применом БВО у односу на БЈО при мерењу протока гаса.

3. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД ИСТРАЖИВАЊА

За потребе истраживања БВО користиле су се експериментална и нумеричка метода. Развојем РДФ, иста је постала моћан алат за анализу мерила протока [14]. РДФ се показао као поуздан алат за истраживање БЈО и БВО [6, 39, 47]. У оквиру истраживања користила се РДФ јер се ради о методи која знатно смањује експерименталне трошкове истраживања. У циљу смањења трошкова истраживања део плана истраживања реализовао се применом РДФ на начин да су се прво резултати РДФ потврдили експерименталним подацима, а затим се планирано истраживање наставило применом РДФ. И за експериментално и нумеричко истраживање мерних бленди коришћен је ваздух као радни флуид.

3.1. ФИЗИЧКЕ ОСОБИНЕ ВАЗДУХА

Земљину атмосферу чини слој гасова тј. ваздух, чији састав (без водене паре) се може видети у *табели 4*.

Табела 4 Гасни састав сувог ваздуха [52]

Конституент	Хемијски симбол	Молски удео
Азот	N ₂	78,084
Кисеоник	O ₂	20,947
Аргон	Ar	0,934
Угљен диоксида	CO ₂	0,0350
Неон	Ne	0,001818
Хелијум	He	0,000524
Метан	CH ₄	0,00017
Криптон	Kr	0,000114
Водоник	H ₂	0,000053
Азотни оксиди	N ₂ O	0,000031
Ксенон	Xe	0,0000087
Озон	O ₃	у траговима до 0,0008
Угљен монооксида	CO	у траговима до 0,000025
Сумпор диоксида	SO ₂	у траговима до 0,00001
Натријум диоксида	NO ₂	у траговима до 0,000002
Амонијак	NH ₃	у траговима до 0,0000003

Ваздух се користи у многим индустријским процесима као радни флуид због његове лаке доступности. За потребе експеримента ваздух је пролазио кроз

одређену припрему која се одвијала у припремној групи, где се одстрањиване све нечистоће (течне и чврсте) које могу да угрозе рад пнеуматског система. У припремној групи налазио се такође и науљивач који је служио за подмазивање пнеуматског прибора. Како се из припремне групе не добија потпуно сув ваздух, ваздух у пнеуматским системима обично садржи и одређену количину водене паре која зависи од метеоролошких услова и обично се креће у границама од 4 g/m^3 до 11 g/m^3 [53].

Табела 5 Основни подаци за сув ваздух [53]

Моларна маса	$M=28,95 \text{ kg/kmol}$
Густина при $1,033 \text{ bar}$ и $0 \text{ }^\circ\text{C}$	$\rho=1,293 \text{ kg/m}^3$
Гасна константа	$R=287 \text{ J/kgK}$
Специфична топлота при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ и $1,033 \text{ bar}$	$c_p=1,00 \text{ kJ/kgK}$; $c_v = 0,72 \text{ kJ/kgK}$
Однос специфичних топлота	$\kappa=c_p / c_v = 1,4$
Кинематска вискозност при $0 \text{ }^\circ\text{C}$	$\nu=13,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

3.2. МЕРНЕ БЛЕНДЕ

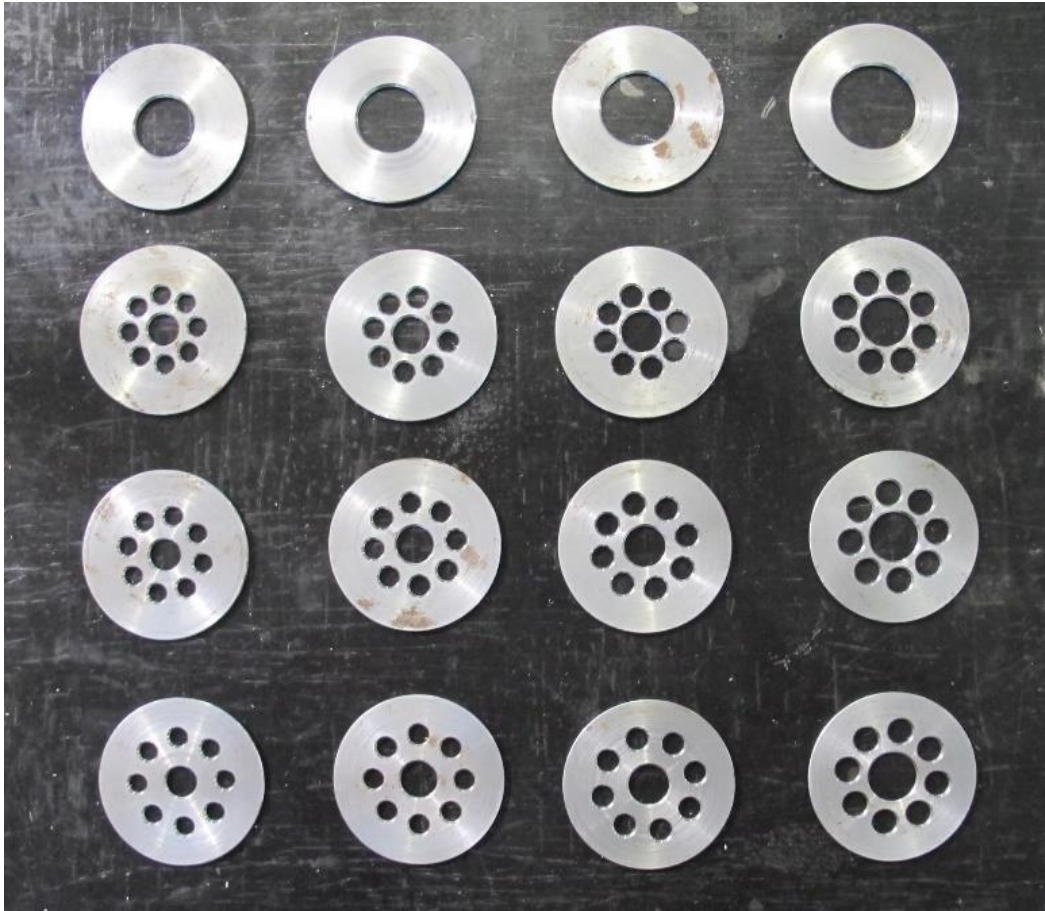
У литератури и даље има мало радова који се баве БВО за одређивање протока гаса, а да су отвори кружног попречног пресека. Kumar и Ming Bing [43] су изучавали БВО где су отвори кружног попречног пресека за одређивање протока влажног гаса, али се конфигурација отвора разликује од предложене конфигурације која се истраживала у оквиру ове докторске дисертације, Gronych и остали [54] су се бавили утицајем БВО на струјање аргона при ниским притисцима ($10^3 \div 10^{-3}$) Pa, док су Gan и Riffat [37] изучавали плочу са отворима кружног попречног пресека у вентилационим цевима квадратног попречног пресека. Из тог разлога предмет истраживања управо је БВО кружног попречног пресека.

Као што је већ наведено у прегледу литературе у раду [39] испитана је БВО за мерење протока деминерализоване воде при високим притисцима. Постојећи модел БВО који је испитан и који је показао добре резултате за одређивање протока воде [39] послужио је за израду модела БВО за одређивање протока гаса. За разлику од постојећег модела бленде који је изведен и експериментално испитан за једну вредност параметра $\beta=0,50$, у оквиру докторске дисертације урађено је експериментално испитивање мерних бленди са четири различите вредности параметра $\beta=0,50$, $\beta=0,55$, $\beta=0,60$ и $\beta=0,70$ (табела 6). Укупно је конструисано и испитано 16 мерних бленди, са 4 различите вредности параметра β , од чега је било 4 БЈО и 12 БВО, односно за сваку вредност параметра β била је једна мерна бленда са једним отвором и три са више отвора (слика 32). На овај начин су се различити параметри мерне бленде добијени експерименталним путем приказали у функцији параметра β .

Мерне бленде са једним отвором изведене су у потпуности у складу са стандардом SRPS EN ISO 5167-2:2012, а како не постоји ни један активан стандард који обрађује БВО применила се идентична методологија као код мерних бленди са једном отвором. За једну вредност параметра β , БВО су изведене тако да је укупна површина отвора била једнака површини отвора БЈО. Услед ограничења технологије израде дошло је до одступања стварних вредности димензија мерних бленди од прорачунских димензија. Након израде, димензије мерних бленди су измерене микрометром произвођача Tesa (резолуције 0,005 mm, мерне несигурности 4 μm , *слика 33*), а у *табели 7* су приказане измерене вредности. Рачунски добијене димензије мерних бленди (*табела 6*) одступале су незнатно од димензија стварно израђених бленди услед ограничења технологије израде. На *слици 34* и *табели 7* може да се види да БЈО имају централни кружни отвор пречника: 35,2 mm, 38,7 mm, 42,2 mm и 49,2 mm (детљи израђених бленди се могу видети у Прилогу 1). БВО су имале централни кружни отвор и осам мањих кружних отвора равномерно распоређених по подеоном кругу. Варијација за сваку вредност β код БВО била је у варијацији димензија подеоног круга за мање кружне отворе, где је свака следећа БВО имала већу димензију подеоног круга. На овај начин БВО1 имала је најмањи подеони круг где би мањи отвори били најближи централном отвору, БВО3 имала је највећи подеони круг где би мањи отвори били најближи ивици зида цеви док је БВО2 имала подеони круг димензија између БВО1 и БВО3. Оваква изведба БВО омогућила је да се анализира утицај дистрибуције мањих отвора на коефицијент пада притиска мерне бленде.

Табела 6 Прорачунске димензије мерних бленди

β	D [mm]	БЈО		БВО			
		d_1 [mm]	A [mm ²]	d_1 [mm]	d_2 [mm]	A_1 [mm ²]	A_2 [mm ²]
0,50	70,3	35,15	969,88	18	10,67	254,34	89,44
0,55	70,3	38,67	1173,56	21	11,48	346,19	103,42
0,60	70,3	42,18	1396,63	23	12,50	415,27	122,67
0,70	70,3	49,21	1900,97	28	14,31	615,44	160,69



Слика 32 Изглед израђених мерних бленди

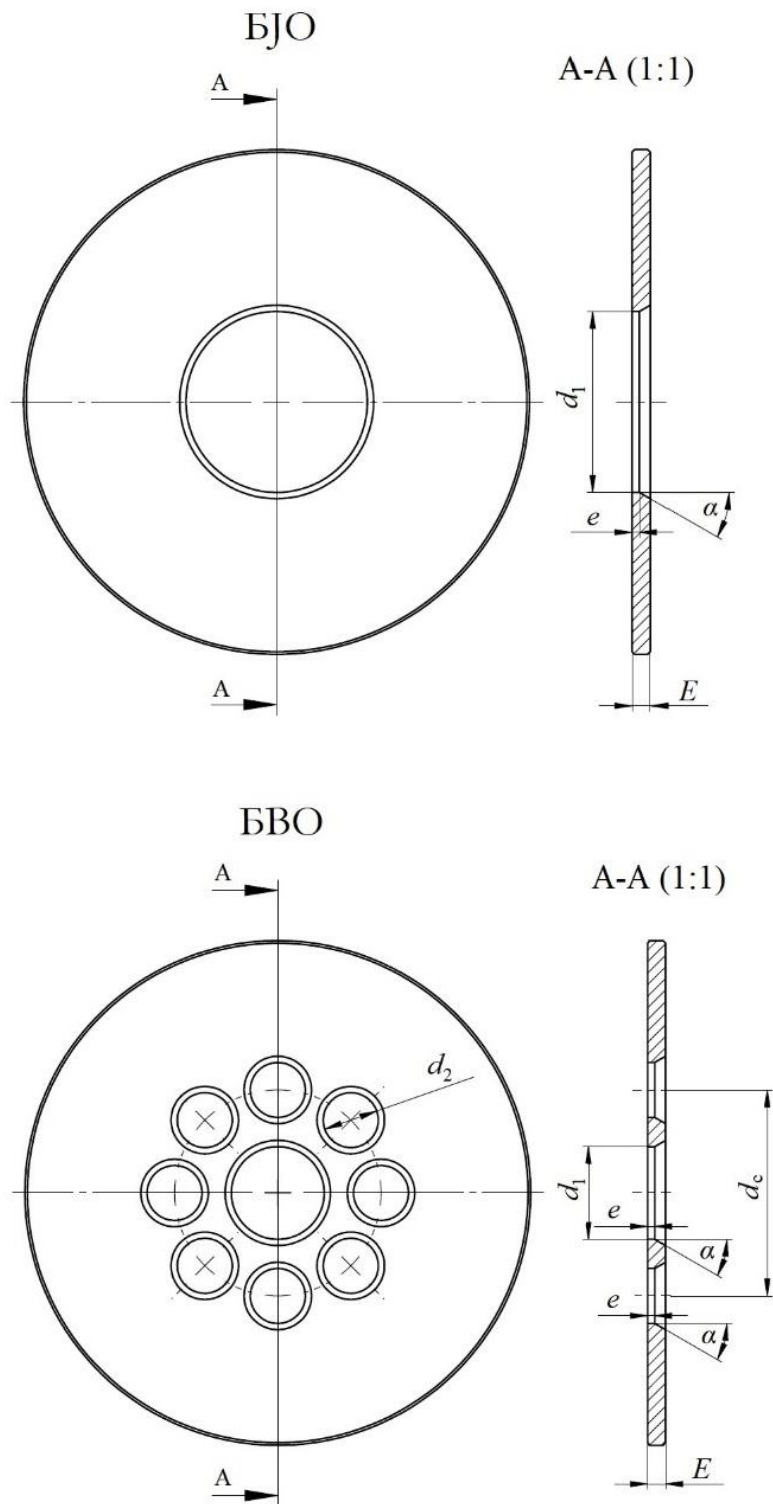


а) Сет микрометара



б) Мерење димензија отвора БВО

Слика 33 Микрометар Tesa 00810800 са три тачке центрирања



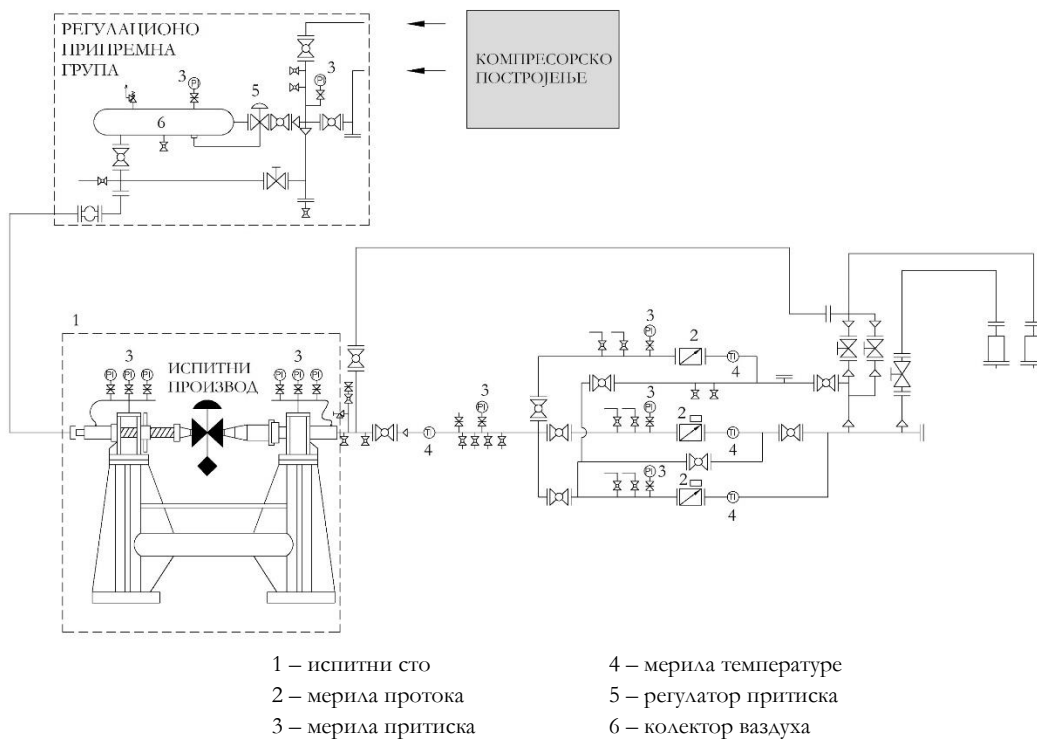
Слика 34 Варијанта БЈО и БВО

Табела 7 Димензије израбених мерних бленди

β [-]	D [mm]	Мерна бленда	E [mm]	e [mm]	a [°]	d_1 [mm]	d_2 [mm]	d_c [mm]	Стварно β [-]	Грешка β [%]
0,50	70,30	БЈО	3,50	1,50	30	35,20	-	-	0,500711	$1,42 \times 10^{-1}$
		БВО1	3,50	1,50	30	18,00	10,70	40,00	0,500889	$1,78 \times 10^{-1}$
		БВО2	3,50	1,50	30	18,00	10,70	45,00		
		БВО3	3,50	1,50	30	18,00	10,70	52,00		
0,55	70,30	БЈО	3,50	1,50	30	38,70	-	-	0,550498	$9,05 \times 10^{-2}$
		БВО1	3,50	1,50	30	21,00	11,50	43,00	0,550738	$1,34 \times 10^{-1}$
		БВО2	3,50	1,50	30	21,00	11,50	47,00		
		БВО3	3,50	1,50	30	21,00	11,50	52,00		
0,60	70,30	БЈО	3,50	1,50	30	42,20	-	-	0,600284	$4,74 \times 10^{-2}$
		БВО1	3,50	1,50	30	23,00	12,50	42,00	0,599974	$4,28 \times 10^{-3}$
		БВО2	3,50	1,50	30	23,00	12,50	49,00		
		БВО3	3,50	1,50	30	23,00	12,50	54,00		
0,70	70,30	БЈО	3,50	1,50	30	49,20	-	-	0,699858	$2,03 \times 10^{-2}$
		БВО1	3,50	1,50	30	28,00	14,30	48,50	0,699754	$3,52 \times 10^{-2}$
		БВО2	3,50	1,50	30	28,00	14,30	50,00		
		БВО3	3,50	1,50	30	28,00	14,30	53,00		

3.3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ПОСТРОЈЕЊЕ

Експериментална испитивања обављена су у лабораторији „ГасТех“ д.о.о. Инђија на постројењу за испитивање гасне опреме за испитне притиске до 16 bar. Шематски приказ испитног постројења дат је на слици 35, док је изглед лабораторије “ГасТех” д.о.о приказан на слици 36.



Слика 35 Схема испитног постројење за испитне притиске до 16 bar



Слика 36 Изглед лабораторије “ГасТех” д.о.о. Инђија, [55]

Лабораторија је пројектована за испитивање гасне и енергетске опреме, а као радни флуид користи се ваздух. Основни елементи испитног постројења су: компресорско постројење, регулационо-припремна група, мерила протока (квантометри), испитни сто, мерила притиска (манометри и претварачи притиска) и мерила температуре (термометри и температурне сонде). Сви параметри процеса испитивања прате се путем централизованог рачунарског система и аутоматски се чувају у електронском облику.

3.3.1. Компресорско постројење

Компресорско постројење чине три компресора, произвођача „Трудбеник“ од чега су два радна а један резервни (табела 8). За складиштење компримованог ваздуха користе се три резервоара укупног капацитета $12,5 \text{ m}^3$, а са пратећим колектором укупна запремина ускладиштеног компримованог ваздуха је $13,4 \text{ m}^3$.

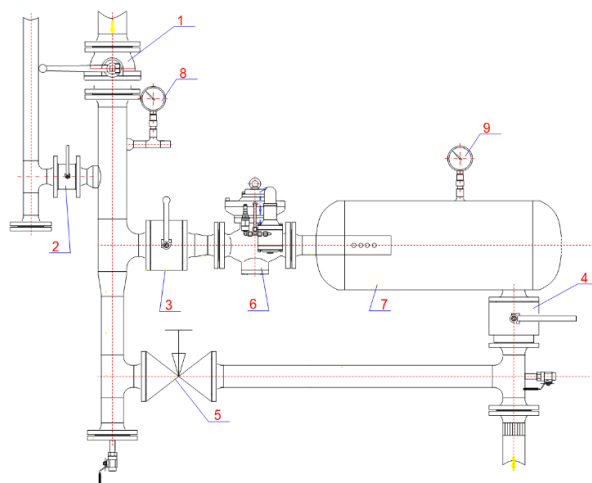
Табела 8 Карактеристике компресорског постројења

Тип компресора	Произвођач	Модел компресора	Број [комада]	Мах притисак [bar]	Еф. добава [nm^3/min]	Снага ел. мот. [kW]
Вијчани	Трудбеник	E1VK-104.5 PP-N	1	8 ÷ 10	4,05	30
Клишни	Трудбеник	NF 2010	1	15	1,05	11
Клишни ⁷	Трудбеник	EK 1200	1	6	1,05	6
УКУПНО:					5,1	41

3.3.2. Регулационо припремна група

Подешавање улазног притиска врши се помоћу регулатора притиска који се налази у регулационо-припремној групи (слика 37). Доводне славине (1 и 2), у зависности са којег компресора се допрема ваздух, се отварају, као и славина (3) да омогући довод ваздуха до регулатора притиска (6) и резервоара за ваздух (7) док су славина (4) и засун (5) затворени. Подешавањем регулатора (6) и праћењем вредности притиска на манометру (9) добија се жељени притисак у резервоару за ваздух (7) одакле ваздух даље наставља до испитног постројења након отварања славине (4). Засун (5) остаје затворен. Улазни притисак у регулационо припремну групу прати се преко манометра (8).

⁷ Резервни компресор



Слика 37 Схема регулационо-припремне групе

3.3.3. Мерни инструменти

Мерни инструменти постављени на испитној линији служе за праћење параметара приликом испитивања опреме, а њихове техничке карактеристике се могу видети у *табели 9*. На инсталацији су постављена мерила притиска (манометри и претварачи притиска), мерила температуре (термометри и температурне сонде) и мерила протока (квантометри).

Табела 9 Техничке карактеристике мерних инструмената

Тип мерног инструмента	Произвођач	Мерни опсег	Класа тачности
Манометар	WIKA	(0 ÷ 10) bar	1
Манометар	WIKA	(0 ÷ 25) bar	1
Манометар	WIKA	(0 ÷ 60) bar	1
Претварач притиска	WIKA	(0 ÷ 250) mbar	0,2
Претварач притиска	WIKA	(0 ÷ 10) bar	0,2
Претварач притиска	WIKA	(0 ÷ 40) bar	0,2
Термометар	WIKA	(-20 ÷ 60) °C	2
Термометар	WIKA	(-20 ÷ 60) °C	2
Температурна сонда	Testo	(0 ÷ 120) °C	0,5

За мерење протока користе се квантометри чије су карактеристике дате у *табели 10*, а на *слици 38* и изглед. На испитном постројењу за притиске до 16 bar налазе се два квантометра произвођача Elster, један за притиске до 4 bar мерног опсега од 20 m³/h до 400 m³/h, а други за притиске до 16 bar са опсегом од 50 m³/h до 1000 m³/h. У зависности од потребног тј. подешеног протока и притиска за испитни узорак манипулацијом постојећих славина ваздух се усмерава на одговарајући квантометар док је други квантометар у том случају изолован.

Табела 10 Техничке карактеристике мерила протока произвођача Elster, [56]

Тип мерила протока	Модел	Мах. притисак [bar]	Величина	$Q_{\min} \div Q_{\max}$ [m ³ /h]	Тачност	
					(20%÷100%) Q_{\max}	(10%÷20%) Q_{\max}
Квантометар	QAc250	4	G250	20 ÷ 400	+/-1,5%	+/-3%
Квантометар	QAc650	16	G650	50 ÷ 1000	+/-1,5%	+/-3%



Слика 38 Квантометар Elster QAc650

Ради што поузданијег мерења у лабораторији се контролишу микро климатски услови, а амбијентални услови које се захтевају дати су у *табели 11*.

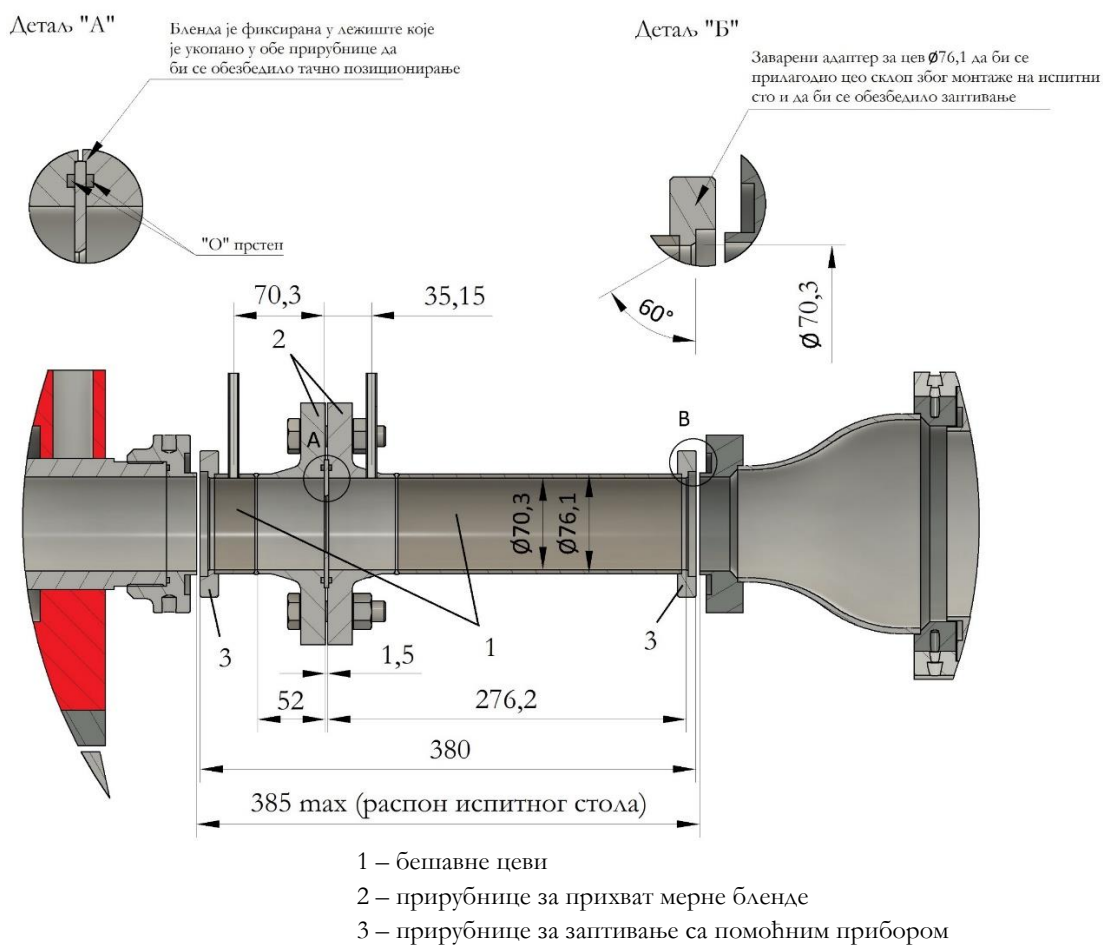
Табела 11 Микро климатски услови

Амбијентални услови лабораторије	
Температура ваздуха	(20 ± 5) °C
Релативна влажност ваздуха	(60 ± 20) %
Брзина струјања ваздуха, [max]	0,5 m/s
Брзина промене температуре, [max]	2,0 °C/h

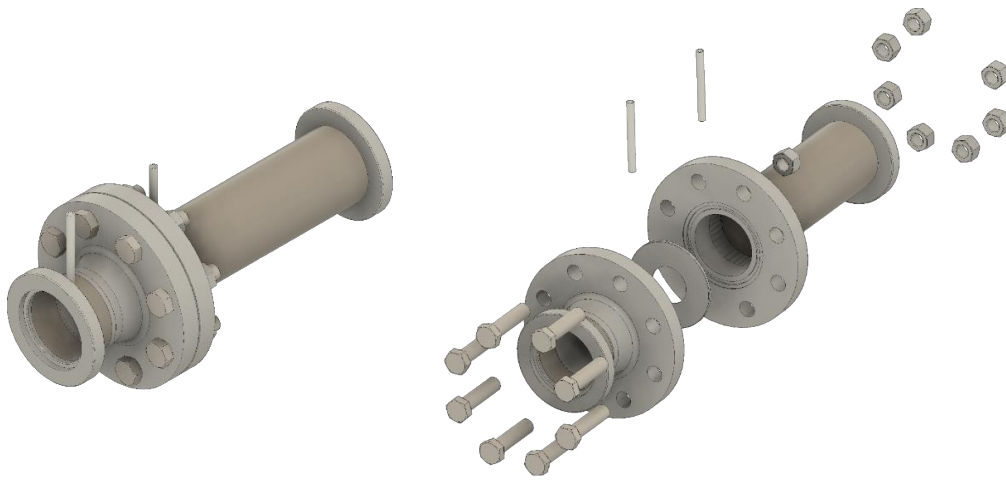
3.3.4. Испитни сто

Испитни сто (*слика 39*) у испитном постројењу служи за прихват испитних узорак тако да је обезбеђена њихова функционалност и потпуна заптiveness. Испитни узорак (2) који се испитује (регулатори притиска, сигурносни вентили итд.) подиже се на висину осе механичког стезача (1) на испитном столу. Помоћу хидрауличког клипа (4) испитни узорак се стеже између две одговарајуће прирубнице (3) обезбеђујући на тај начин заптiveness. Притисак стезања хидрауличког клипа прати се на манометру уграђеном у испитном столу (*слика 40*).

приказан изглед израђеног прихватног прибора. Узимајући у обзир геометрију испитног постројења и испитног стола развијен је нови прибор за прихват мерне бленде који је омогућио да се добију праве деонице од $12 D$ испред мерне бленде и $4 D$ иза мерне бленде (слика 44). Део (слика 41) је сачињен из две бешавне цеви (1) и два пара прирубница, од којих један пар служи за заптивање новог дела са помоћним прибором (3), а други за заптивање између две бешавне цеви као и за прихват мерне бленде (2). Прирубница је урађена према препорукама стандарда EN 1092 – 1 ради се о типу прирубнице 11, а уградњом прирубница обезбеђује се саосност како мерне бленде тако и бешавних цеви са цевима на испитном столу. Прикључци за притисак су на стандардом (SRPS EN ISO 5167-2:2012) дефинисаном растојању од $1 D$ и $\frac{1}{2} D$ од ивице мерне бленде. Мерна бленда се поставља у нови прибор између две прирубнице, у лежиште које је укопано у обе прирубнице да би се обезбедило тачно позиционирање (слика 41, Детаљ А). Да би се обезбедило заптивање између мерне бленде и прирубница уграђен је „О“ прстен (O – ring).



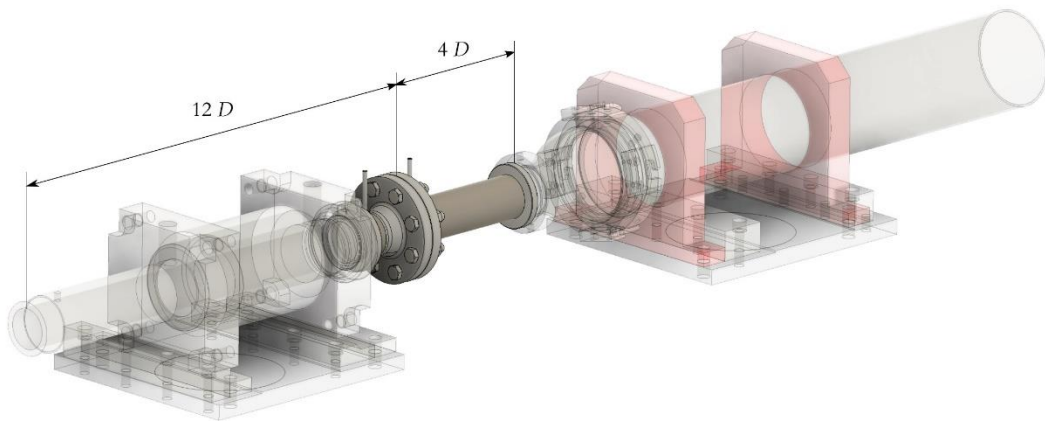
Слика 41 Нови прибор за прихват мерних бленди



Слика 42 Трoдимензионални приказ прихватног прибора за мерне бленде



Слика 43 Изглед израђеног прихватног прибора за мерне бленде

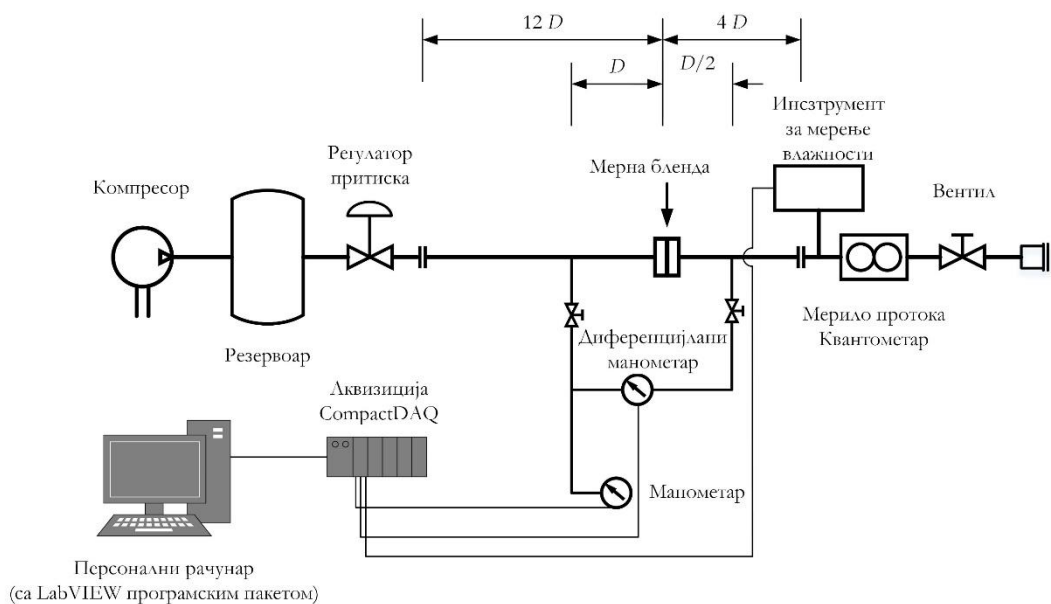


Слика 44 Приказ прихватног прибора за мерне бленде постављеног на испитном столу

3.3.6. Модификовано испитно постројење

Како испитно постројење у лабораторији ГасТех-а није предвиђено за испитивање мерних бленди било га је потребно модификовати и на тај начин формирати постројење за испитивање мерних бленди. Поред већ постојећих инструмената за мерење притиска, температуре и протока на испитном постројењу, додатно су били постављени манометар и диференцијални манометар, инструмент за мерење влажности ваздуха при високим притисцима као и одговарајућа аквизиција.

На слици 45 шематски је приказано новоформирано експериментално постројење за испитивање мерних бленди, а на слици 46 је приказан систем за аквизицију мерних сигнала. Испитивана мерна бленда поставља се прво између две прирубнице у укопано лежиште. Спајањем прирубница вијчаном везом остварује се заптивеност и цео подсклоп се поставља на испитни сто. Подешавање улазног притиска врши се помоћу регулатора притиска, док се вредности притиска прате преко манометара у регулационо-пришремној групи док се не постигне жељени улазни притисак. Помоћу кугласте славине у регулационо-пришремној групи успоставља се и зауставља проток флуида кроз испитну линију.



Слика 45 Шема новоформираног испитног постројења

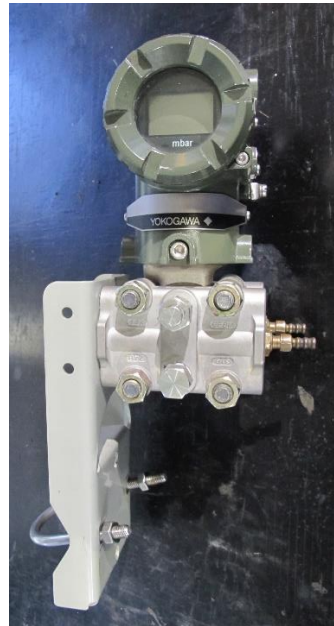


Слика 46 Систем за аквизицију мерних сигнала

Пад притиска настао услед струјања флуида кроз сужење мерне бленде мерио се помоћу диференцијалног манометра (табела 12 и слика 47) који је сигнале притиска узимао са растојања $1 D$ и $\frac{1}{2} D$ од ивице мерне бленде, док се статички притисак испред мерне бленде мерио помоћу апсолутног манометра (табела 12 и слика 47) на растојању $1 D$ уструјно од ивице мерне бленде.



а) Апсолутни манометар



б) Диференцијални манометар

Слика 47 Манометри произвођача *Yokogawa*

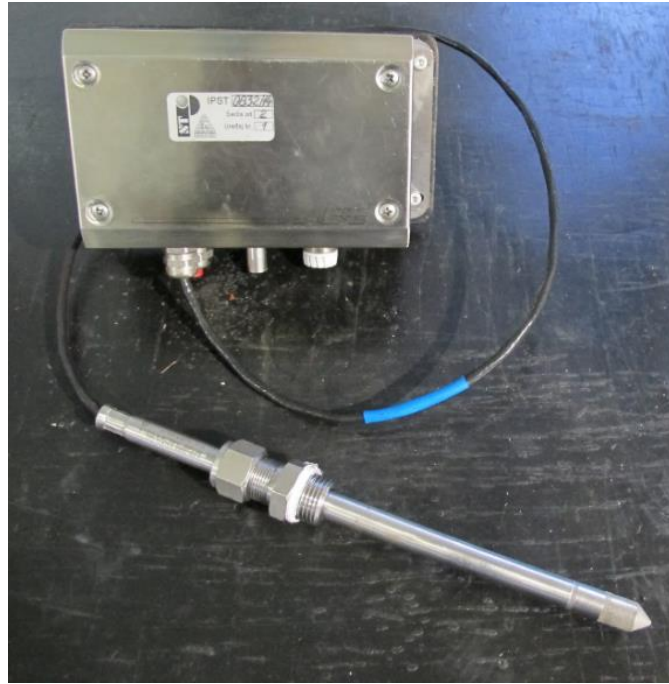
Инструмент за мерење влажности ваздуха (табела 13 и слика 48) био је постављен ниструјно од мерне бленде и користио се за континуално мерење влажности ваздуха. У зависности од потребног протока бира се излазни вод испитног флуида помоћу цевних затварача. Проток се мерио помоћу мерила запремине на испитној линији која се налазе ниструјно од мерне бленде.

Табела 12 Техничке карактеристике мерила притиска на новоформираном постројењу, [57] и [58]

Инструмент	Модел	Мерни опсег	Подешени опсег	Мерни однос	Тачност (од подешеног опсега)	Резолуција	Излазни сигнал
Манометар	EJA530A	0 – 10 МПа	0 – 4 МПа	1 : 20	± 0,2%	0,01 bar	4-20 mA
Диф. манометар	EJA110A	0 – 100 kPa	0 – 50 kPa	1 : 100	± 0,065%	0,01 kPa	4-20 mA

Табела 13 Техничке карактеристике инструмента за мерење влажности, [59]

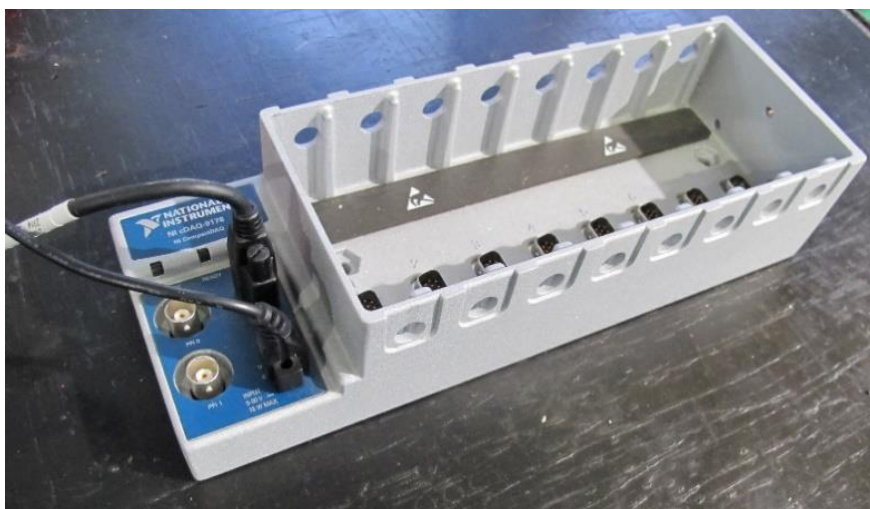
Инструмент	Модел	Мерни опсег (Релативна влажност)	Тачност за опсег температуре од -15 °C до 40 °C	Мерни опсег (температура)	Излазни сигнал
Инструмент за мерење влажности	EE33	0 – 100%	≤90% RH ... ±(1,3+0,3% mv) %RH >90% RH ... ±2,3% RH	-40 to +180 °C	4-20 mA



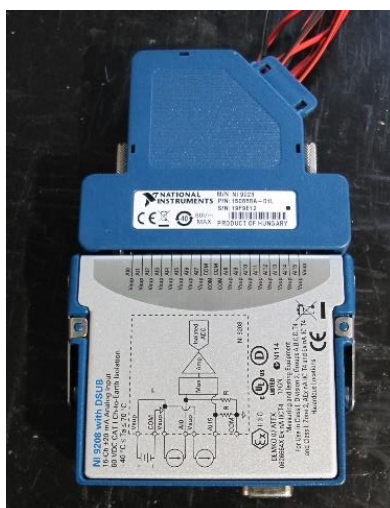
Слика 48 Инструмент за мерење влажности ваздуха произвођача E+E Elektronik

3.3.7. Аквизиција

Приликом експерименталних испитивања мерних бленди за прикупљање података са мерних инструмената (манометара, диференцијалног манометра и мерила температуре и влажности гаса-ваздуха) повезаних на аквизицију CompactDAQ (слика 49) са модулима NI 9208 [60] и NI 9208E [61] користио се LabVIEW програмски пакет. Програмски пакет LabVIEW је погодан за израду прилагођених решења/система за мерење уз помоћ National Instruments хардвера или других уређаја за визуелизацију и анализу сигнала/информација [62]. Овај програмски пакет је омогућио креирање специфичних апликација које су послужиле за мерење и аквизицију података са новоформираног испитног постројења. Сваки од коришћених инструмената на новоформираном испитном постројењу је имао 4-20 mA излазни струјни сигнал. Обрада струјних сигнала из мерних инструмената и њихово претварање у физичке величине обављало се уз помоћ модула NI 9208 (слика 50 и табела 14) и уз помоћ специфичне апликације развијене у програмском пакету LabVIEW.

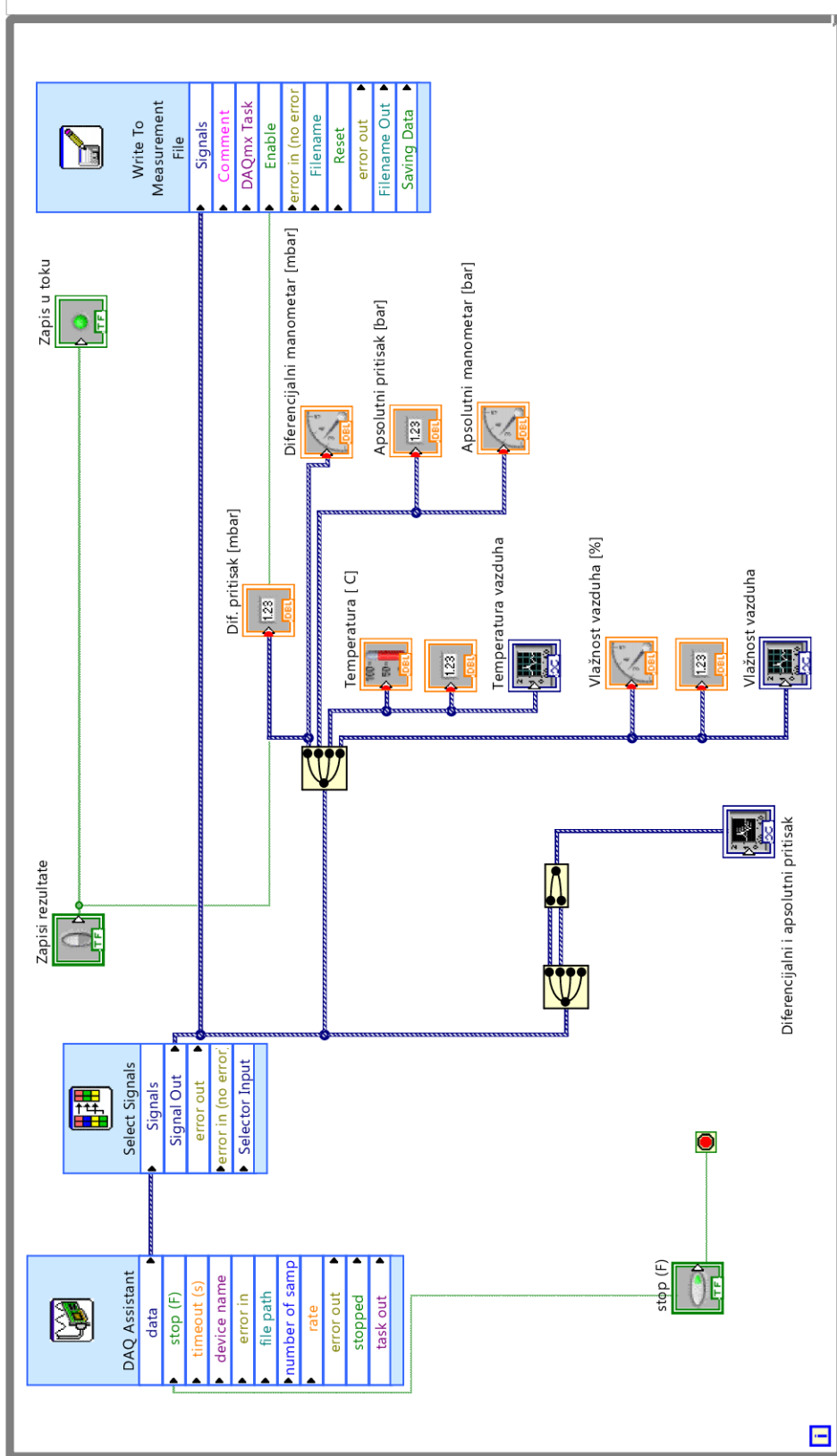


Слика 49 Аквизиција CompactDAQ произвођача National Instruments

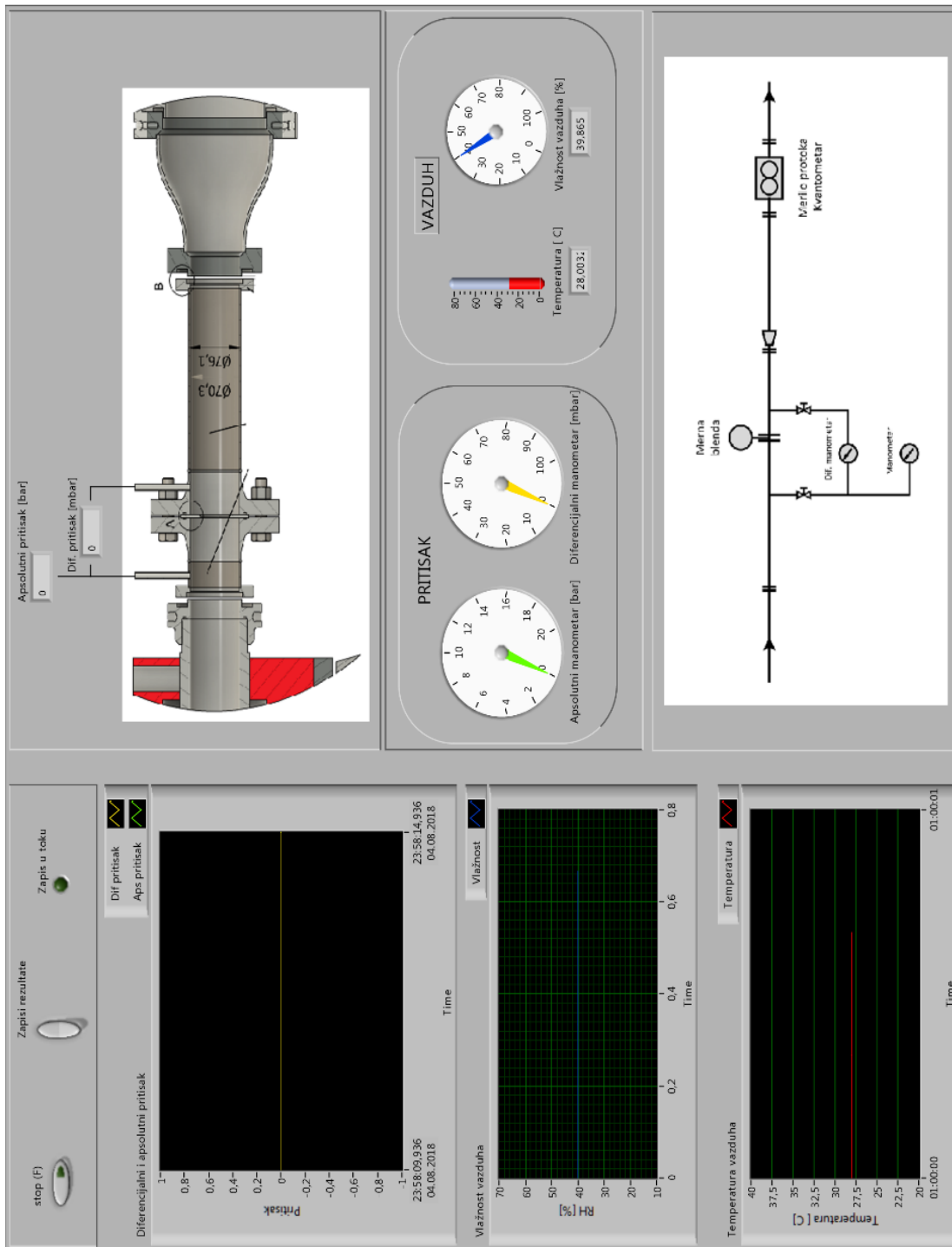


Слика 50 Повезани модули NI 9208 и NI 9208E произвођача National Instruments

На слици 51 се може видети блок дијаграм схеме апликације за аквизицију података мерења са постројења за испитивање мерних бленди у програмском пакету LabVIEW, а на слици 52 изглед корисничког прозора апликације за аквизицију података са постројења за испитивање мерних бленди. Претварање струјног сигнала у одговарајућу физичку вредност обавља се у блоку DAQ Assistant (слика 51) где се ради и калибрисање (скалирање) сваког од мерних инструмената. На сликама 53, 54, 55 и 56 могу се видети калибрационе криве за манометар, диференцијални манометар и инструмент за мерење влажности ваздуха.

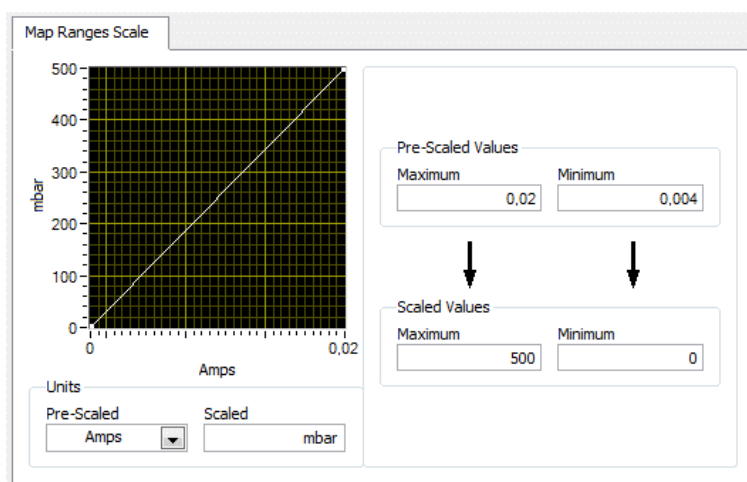


Слика 51 LabVIEW апликација за аквизицију података са испитног постројења

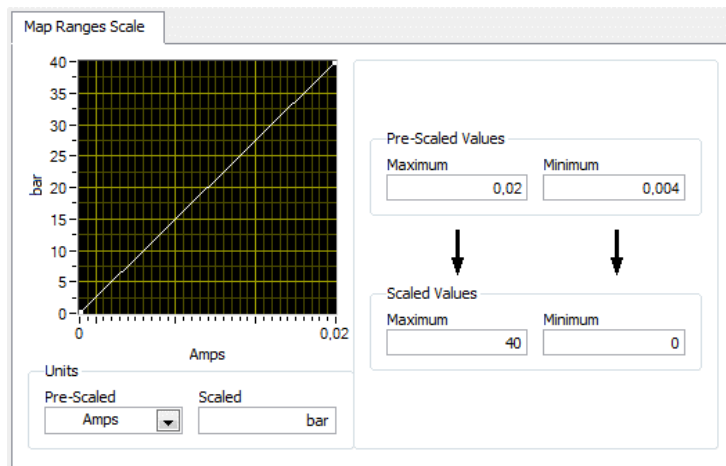


Слика 52 Изглед корисничког прозора апликације за аквизицију

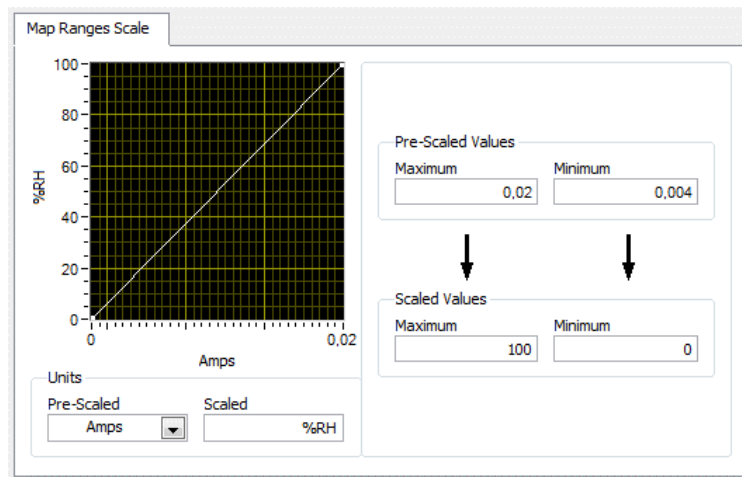
Након постављања жељене мерне бленде у прибор за прихват мерних бленди и њихово постављење на испитни сто, ради се подешавање жељеног испитног притиска на регулационо-припремној групи. Након отварања кугласте славине 4 (слика 37) и успостављања подешеног притиска и на испитном столу, ради се провера непропусности инсталације. Уколико је провера непропусности била успешна и систем није имао губитак притиска, могло се почети са испитивањем мерних бленди. У овом моменту се креће са бележењем података са мерних инструмената притискањем тастера „Zapiši rezultate“ у прозору корисничке апликације за аквизицију (слика 52). Када је запис у току лампица „Zapis u toku“ ће бити активна тј. светлеће зелено (слика 52). Отварањем вентила који се налази на крају саме испитне инсталације остварује се проток кроз испитни сто а самим тим и мерну бленду и долази до пада притиска насталог услед постављене мерне бленде. Подаци о улазном притиска (растојање $1 D$ испред мерне бленде), разлици притисака (са растојања D испред мерне бленде и $\frac{1}{2} D$ иза мерне бленде) температуре и влажности ваздуха записују се у текстуални документ (слика 57). По завршетку испитивања кугласте славине 3 и 4 (слика 37) затварају се као и вентил на крају испитног постројења, запис података са мерних инструмената прекида се притиском на тастер „Zapiši rezultate“ а рад апликација прекида се притиском на тастер „stop (F)“ (слика 52).



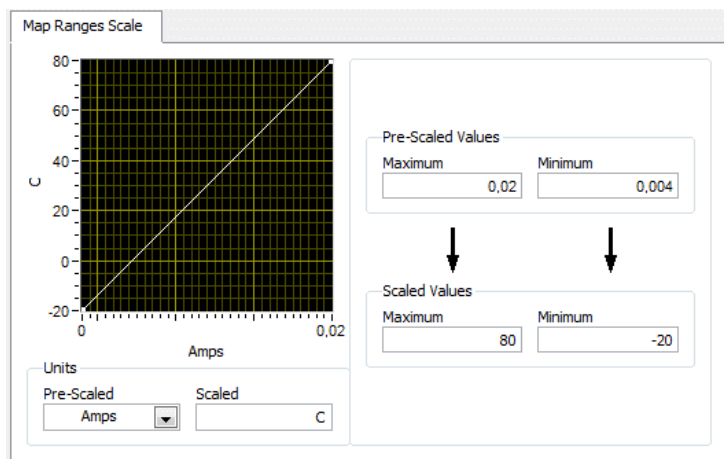
Слика 53 Калибрациона крива за диференцијални манометар у програмском пакету LabVIEW



Слика 54 Калибрациона крива за апсолутни манометар у програмском пакету LabVIEW



Слика 55 Калибрациона крива за инструмент за мерње влажности у програмском пакету LabVIEW



Слика 56 Калибрациона крива (температура) за инструмент за мерње влажности у програмском пакету LabVIEW

```

kampanja 0.7 mhd3 3.3 - Notepad
File Edit Format View Help
LabVIEW Measurement
Writer_Version 2
Reader_Version 2
Separator Tab
Decimal_Separator ,
Multi_Headings No
X_Columns One
Time_Pref Absolute
Operator Administrator
Date 2018/08/07
Time 14:18:11,6267450249998482504
***End_of_Header***

Channels 4
Samples 3 3 3 3
Date 2018/08/07 2018/08/07 2018/08/07 2018/08/07
Time 14:18:12,2916975021362304688 14:18:12,2916975021362304688 14:18:12,2916975021362304688 14:18:12,2916975021362304688
Y_Unit_Label mbar bar C %RH
X_Dimension Time Time Time Time
X0 0,000000000000000E+0 0,000000000000000E+0 0,000000000000000E+0 0,000000000000000E+0
Delta_X 0,333333 0,333333 0,333333 0,333333
***End_of_Header***

X_Value Dif pritisak Aps pritisak Temperatura Vlažnost Comment
0,000000 2,787881 6,089980 27,502722 51,110196
0,333333 2,790913 6,090007 27,503820 51,103820
0,666667 2,791651 6,090171 27,500001 51,128456
1,000000 2,791077 6,089961 27,499116 51,142356
1,333333 2,791815 6,089417 27,504295 51,149207
1,666667 2,789520 6,089934 27,507655 51,121375
2,000000 2,790667 6,090236 27,505754 51,155272
2,333333 2,790831 6,090033 27,511081 51,164320
2,666667 2,786488 6,090157 27,506246 51,156534
3,000000 2,791159 6,090059 27,503000 51,167762
3,333333 2,789684 6,090000 27,504312 51,172745
3,666667 2,790012 6,090046 27,506557 51,172073
4,000000 2,787225 6,090000 27,505705 51,193595
4,333333 2,789930 6,090125 27,511130 51,199922
4,666667 2,786897 6,089941 27,505672 51,201430
5,000000 2,789684 6,089843 27,507033 51,185170
5,333333 2,790421 6,090118 27,511868 51,180023
5,666667 2,788291 6,090171 27,504918 51,198857
6,000000 2,790831 6,089797 27,506574 51,236540
6,333333 2,788291 6,090131 27,511212 51,243408
6,666666 2,787635 6,090262 27,507328 51,217920
7,000000 2,792142 6,090000 27,506820 51,243474
7,333333 2,787471 6,090007 27,511163 51,252276
7,666666 2,787061 6,089836 27,505541 51,269355
8,000000 2,791979 6,089771 27,506541 51,244244
8,333333 2,789766 6,090295 27,512016 51,237983
8,666666 2,788618 6,090125 27,506262 51,260144
9,000000 2,789930 6,090171 27,509950 51,275978
9,333333 2,788864 6,090190 27,519326 51,281534
9,666666 2,788946 6,090039 27,505918 51,294680
10,000000 2,791159 6,089934 27,507901 51,291598

```

Слика 57 Изглед текстуалног документа са записима резултата мерења

Табела 14. Техничке карактеристике аналогно улазног модула за аквизицију, [60]

Модул	Произвођач	Модел	Број канала	ADC ⁸ резолуција	Улазни опсег
Улазни струјни модул	National Instruments	NI 9208	16	24 – bit	±20 mA

3.4. ПЛАН ЕКСПЕРИМЕНТА

Експериментална испитивања обухватала су варијацију улазних параметара приликом испитивања мерних бленди где су се добијени резултати испитивања (излазни параметри) користили за верификацију резултата нумеричких симулација (табела 15). Након потврђивања резултата нумеричких симулација резултатима добијеним експериментом, даље истраживање БВО реализовало се применом РДФ, варирањем улазних параметара (табела 16). Параметри који су константни су: унутрашњи пречник цеви, унутрашња храпавост цеви, дебљина зида цеви.

⁸ ADC – аналогно дигитални конвертер (енг. analog to digital converter)

Табела 15 Улазни и излазни параметри код експерименталних испитивања

Експеримент		Бр. варијација	Вредности
УЛАЗНИ ПАРАМЕТРИ	Параметар β	4	0,50; 0,55; 0,60 и 0,70
	Режим струјања (вредност Re)	15	Различите брзине струјања у цевоводу
	Тип мерне бленде	2	Са једним отвором и са више отвора
ИЗЛАЗНИ ПАРАМЕТРИ	Пад притиска на мерној бленди	/	За све комбинације улазних параметара
	Статички притисак испред мерне бленде	/	За све комбинације улазних параметара
	Влажност ваздуха	/	За све комбинације улазних параметара
	Температура	/	За све комбинације улазних параметара
	Коефицијент пада притиска	/	За све комбинације улазних параметара

Свеобухватна испитивања БВО за мерење протока гаса која би обухватила испитивања различите геометрије, и услова струјања дала би потпунију слику о БВО као мерним уређајима који би у будућности могли да буду замена за БЈО План рада је тако дефинисан да уз примењену методологију истраживања допринесе разумевању струјних параметара, и истражи утицај локалних отпора, влажности ваздуха и геометрије мерних бленди на струјне параметре БВО за мерење протока гаса.

За поређење различитих бленди бројни аутори користили су коефицијент протока као параметар за поређење [6, 17, 20, 28, 39]. Из једначине (2.1) може се видети да у изразу за одређивање масеног протока кроз мерну бленду фигурише и фактор експанзије (стишљивости). Фактор експанзије се одређује експерименталним путем за БЈО из израза дефинисаног у SRPS EN ISO 5167-1:2012. Како за БВО не постоји ни један стандард који дефинише одређивање фактора експанзије, у овој студији је ради анализе и поређења различитих бленди уведен коефицијент пада притиска мерне бленде. Коефицијент пада притиска мерне бленде може се изразити као:

$$\xi = \frac{\Delta p}{0,5\rho v^2} \quad (3.1)$$

и

$$\xi = \frac{1-\beta^4}{(\mu\varepsilon)^2} \quad (3.2)$$

где су:

v – брзина флуида кроз отвор бленде⁹ [m/s],

β – однос површине отвора бленде и површине попречног пресека цеви [-],

ε – фактор експанзије [-],

μ – коефицијент протока [-],

ρ – густина флуида [kg/m³] и

Δp – пад притиска измерен на растојању $1 D$ испред и $1/2 D$ иза бленде [Pa].

Иако фактор експанзије приликом анализе мерних бленди није узет у обзир, за одређивање густине ваздуха компресибилност је узета у обзир, где је густина ваздуха била дефинисана као:

$$\rho = \frac{p}{ZRT} \quad (3.3)$$

где су:

T – температура флуида [K],

R – специфична гасна константа [J/kgK],

Z – фактор компресибилности [-],

ρ – густина флуида [kg/m³] и

p – притисак флуида [Pa].

Влажност (гаса) ваздуха је такође мерена и користила се у анализи мерних бленди. Утицај влажности ваздуха на тачност мерења анализиран је кроз промену густине и вискозности услед различитих вредности влажности у нумеричким симулацијама. Додавањем водене паре ваздуху густина ваздуха се смањује. Густина влажног ваздуха се може израчунати помоћу [63]:

⁹ Ово представља средњу брзину струјања ваздуха кроз отвор или отворе мерне бленде, до које се дошло помоћу запреминског протока кроз мерну бленду и укупне површине отвора мерне бленде

$$\rho_{v.v.} = \frac{p_d}{R_d T} + \frac{p_v}{R_v T} = \frac{p_d M_d + p_v M_v}{RT} \quad (3.4)$$

где су:

$\rho_{v.v.}$ – густина влажног ваздуха [kg/m³],

p_d – парцијални притисак сувог ваздуха [Pa],

R_d – специфична гасна константа за сув ваздух, 287,058 [J/kgK],

T – температура флуида [K],

p_v – притисак водене паре [Pa] и

R_v – специфична гасна константа за водену пару, 461,495 [J/kgK].

За одређивање притиска водене паре помоћу притиска засићења водене паре и релативне влажности ваздуха користи се израз:

$$p_v = \varphi p_{sat} \quad (3.5)$$

где су:

φ – релативна влажност ваздуха [%] и

p_{sat} – притисак засићења водене паре [Pa].

Једначина [64] помоћу које се може одредити притисак засићене водене паре има облик:

$$p_{sat} = 6,1078 \times 10^{\frac{7,5T}{T+237,3}} \quad (3.6)$$

На основу Далтоновог закона¹⁰ може се доћи до парцијалног притиска сувог ваздуха:

$$p_d = p - p_v \quad (3.7)$$

где је апсолутни притисак представљен са p [Pa].

За потребе експеримента користио се ваздух као радни флуид а масени проток на улазу у испитно постројење вариран је у границама од 96 kg/h до 2111 kg/h. Мерне бленде су испитиване на различитим притисцима: 2 bar, 4 bar, 6 bar, 8 bar и 12 bar. Варирањем улазног масеног протока и испитних притисака остварио се распон Рејнолдсових бројева од $1,5 \times 10^4$ до $5,7 \times 10^5$ при којима су испитане

¹⁰ Далтонов закон говори о притисцима појединих врста гасова у смеси гасова, и гласи: притисак смеси једнак је збиру парцијалних притисака гасова који чине смешу. Парцијални притисак одређеног гаса у смеси, је онај притисак који би тај гас имао када би сам заузимао запремину, коју заузима смеша.

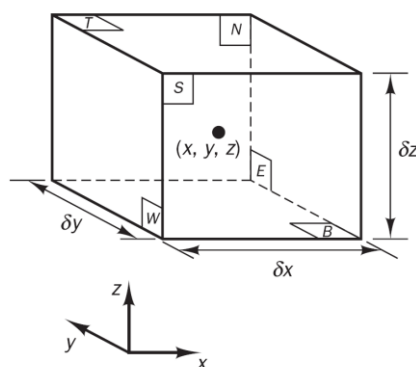
мерне бленде. За време трајања експерименталних мерења лабораторијски услови су се пратили и кретали се у границама: температура од 21°C до 24°C , притисак од $100,2\text{ kPa}$ до $100,52\text{ kPa}$ и влажност ваздуха од 57% до 64% .

3.5. РАЧУНАРСКА ДИНАМИКА ФЛУИДА

Једначине закона одржања које математички описују струјање флуида могу се поделити на једначине:

1. Закон о одржању масе
2. Њутнови закони кретања
 - Закони инерције (први Њутнов закон)
 - Закон промене количине кретања (други Њутнов закон)
 - Закон акције и реакције (трећи Њутнов закон)
3. Закон одржања енергије (први закон термодинамике).

Посматрањем флуида као чврстог тела, могу се дефинисати једначине сила које делују на посматрану честицу (слика 58). Кретање идеалног невискозног флуида дефинише се Ојлеровим једначинама. Проширењем ове једначине и укључивањем вискозних сила добијају се Навије-Стоксове једначине.



Слика 58 Посматрана честица флуида за законе о одржању, [65]

Закони о одржању дају систем од пет парцијалних диференцијалних једначина које описују кретање флуида, једну из закона о одржању масе, три (у x , y и z правцу) једначине из закона о промени количине кретања и једну енергијску једначину. Да би се овај незатворен систем једначина решио потребно га је затворити увођењем једначине стања. Стационарно струјање компресибилног/стишљивог Њутновског флуида може се описати једначинама [66]:

Једначина континуитета:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (3.4)$$

Једначине промене количине кретања:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} v_x + \frac{\partial v_x}{\partial y} v_y + \frac{\partial v_x}{\partial z} v_z = f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial v_y}{\partial x} v_x + \frac{\partial v_y}{\partial y} v_y + \frac{\partial v_y}{\partial z} v_z = f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial x} v_x + \frac{\partial v_z}{\partial y} v_y + \frac{\partial v_z}{\partial z} v_z = f_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \quad (3.7)$$

Једначина енергије:

$$\rho c_p \left(v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \beta_p T \left(v_x \frac{\partial p}{\partial x} + v_y \frac{\partial p}{\partial y} + v_z \frac{\partial p}{\partial z} \right) + \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi \quad (3.8)$$

Једначина стања (идеалан гас):

$$p = \rho RT \quad (3.9)$$

Где су:

- f_x, f_y, f_z – спољашње силе [N/kg],
- ν – кинематска вискозност [m²/s],
- c_p – специфична топлота при константом притиску [J/kgK],
- k – топлотна поводљивост [W/mK],
- β_p – запремински коефицијент топлотног истегања [1/K] и
- Φ – функција дисипације [W/m³].

Диференцијалне једначине које описују струјање флуида (Навије-Стоксове једначине) изведене још у 19. веку до сада имају свега неколико аналитичких решења за одређене струјне проблеме. Иако је могуће решити Навије-Стоксове једначине за многе случајеве при ламинарном режиму струјања, приликом турбулентног струјања јављају се нестабилности и нелинеарности. Да би се систем једначина који описује струјање флуида могао решити и за турбулентне режиме струјања потребно је увести и један од модела турбуленције и на тај начин формирати систем једначина који има једнозначно решење. Постоји више модела турбуленције као нпр. дужина мешања, Спаларт-Алмарас (енг.

Spalart-Allmaras) модел, стандардни k - ε модел, RNG k - ε модел, реализабилни k - ε модел, модел Рејнолдсових напона итд. Један од најзаступљенијих модела турбуленције у нумеричким симулацијама је k - ε модел са својим једноставним моделом турбуленције којем су потребни само почетни и/или гранични услови, а при томе се показао као одличан модел за симулацију различитих струјања у индустрији и један је од најчешће потврђиваних¹¹ модела турбуленције са експерименталним резултатима [65]. Многи аутори [6, 26, 27, 37, 39, 67] који су нумерички изучавали мерну бленду су користили стандардни k - ε модел турбуленције, те је управо овај модел турбуленције изабран за нумеричке симулације и у овој студији. У наставку се могу видети транспортне једначине за турбулентну кинетичку енергију k и дисипацију ε које се користе у стандардном k - ε моделу турбуленције:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.11)$$

Чланови $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, σ_k и σ_ε су константе стандардног k - ε модела турбуленције, а G_k представља производњу турбуленције и изражава се као:

$$G_k = \mu_t S^2 - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot v_i - \frac{2}{3} \mu_t (\nabla \cdot v_i)^2 \quad (3.12)$$

Члан μ_t представља турбулентну вискозност и изражава се као:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.13)$$

Са развојем рачунара постало је могуће доћи до приближног решења једначина које описују струјање флуида (и других једначина из механике флуида) нумеричким путем за различите услове [68]. Нумеричке методе решавања диференцијалних једначина користе дискретизацијске методе које их апроксимирају као систем алгебарских једначина касније лако решивих на рачунарима. Нумеричке симулације у оквиру овог истраживања урађене су у РДФ програмском пакету Siemens Simcenter STAR-CCM+ 2019.2.

¹¹ Поступак потврђивања у РДФ је поређење резултата симулација са резултатима експеримента за идентичан случај

3.6. ПЛАН НУМЕРИЧКИХ СИМУЛАЦИЈА

Код експерименталних истраживања анализирани су пад притиска на мерној бленди и коефицијент пада притиска мерне бленде, а индиректно и коефицијент протока. Код нумеричких симулација анализирани су: пад притиска на мерној бленди, поврат притиска, губитак снаге, коефицијент протока, утицај влажности ваздуха на тачност мерења, утицај уструјних и ниструјних услова (*табела 16*).

За анализу поврата притиска коришћене су две бездимензионе величине:

$$P_n = \frac{p_z}{p_u} \quad (3.14)$$

$$Z_n = \frac{Z_a}{D} \quad (3.15)$$

где су:

P_n – бездимензионални притисак [-],

p_z – апсолутни притисак на аксијалном растојању [Pa],

p_u – уструјни апсолутни притисак [Pa],

Z_n – бездимензионално аксијално растојање [-],

Z_a – аксијално растојање [mm] и

D – унутрашњи пречник цеви [mm].

Снага коју мерна бленда потроши тј. количина снаге која се изгуби у систему услед постављање мерне бленде може се израчунати на основу следећег израза:

$$\Delta P = Q \Delta \omega. \quad (3.16)$$

где су:

ΔP – губитак снаге [W],

Q – запремински проток [m³/s] и

$\Delta \omega$ – губитак притиска [Pa].

Струјна снага на улазу у цев се дефинише са:

$$P = \rho Q \left(\frac{v_{in}^2}{2} + \frac{p_{in}}{\rho} \right) \quad (3.17)$$

где су:

P – флуидна (струјна) снага на улазу у цев [W],

Q – запремински проток [m³/s]

ρ – густина флуида [kg/m³]

v_{in} – брзина флуида на улазу у цев [m/s] и

p_{in} – апсолутни притисак на улазу у цев [Pa].

Релативни губитак снаге може да се представи са:

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta P}{P} \cdot 100 \quad (3.18)$$

где су:

ΔP – губитак снаге [W],

P – флуидна (струјна) снага на улазу у цев [W] и

ε_p – релативни губитак снаге [%].

Табела 16 Улазни и излазни параметри за нумеричке симулације

	РДФ	Бр. варијација	Вредности
УЛАЗНИ ПАРАМЕТРИ	Параметар β	4	0,50; 0,55; 0,60 и 0,70
	Режим струјања (вредност Re)	15	различите брзине струјања у цевоводу
	Тип мерне бленде	2	са једним отвором и са више отвора
	Дебљина мерне бленде	3	3,5 mm; 7 mm и 10,5 mm
	Угао излазне ивице мерне бленде	2	0° и 30°
	Влажност ваздуха	/	Вредности добијене из експеримента
	Температура	/	Вредности добијене из експеримента
	Деонице испред мерне бленде	5	5 D ; 10 D ; 15 D ; 22 D и 30 D
	Деонице иза мерне бленде	8	1 D ; 2 D ; 3 D ; 4 D ; 5 D ; 6 D ; 7 D и 8 D
	Отпори уструјно и ниструјно од мерне бленде	1	90° угао колена
ИЗЛАЗНИ ПАРАМЕТРИ	Пад притиска на мерној бленди	/	За све комбинације улазних параметара
	Пад притиска	/	За све комбинације улазних параметара
	Поврат притиска	/	За све комбинације улазних параметара
	Губитак снаге	/	За све комбинације улазних параметара
	Коефицијент пада притиска	/	За све комбинације улазних параметара

3.6.1. Нумерички модели и мрежни континуум

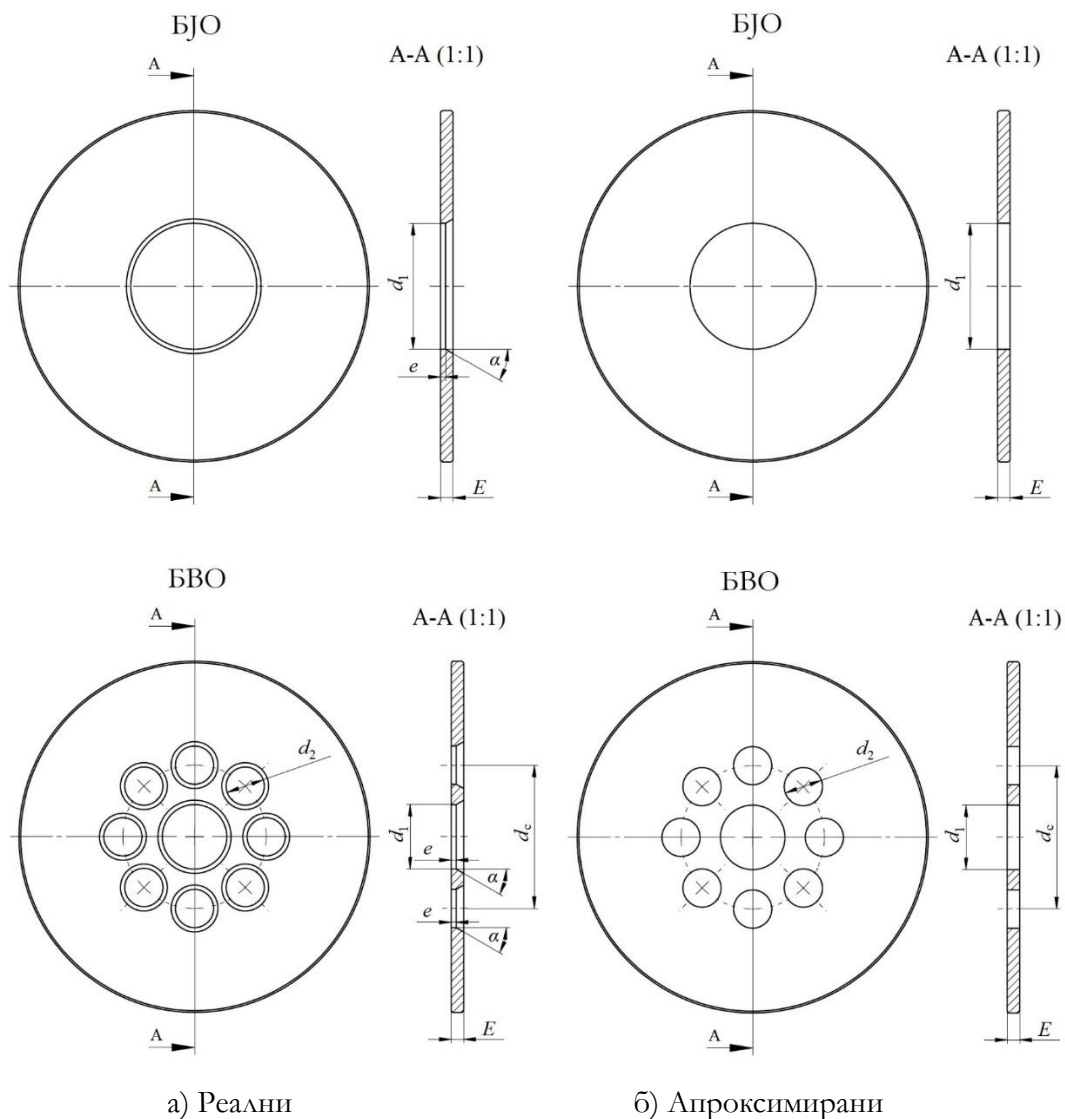
Нумерички модел чини цев унутрашњег пречника од 70,3 mm, дужине 3940,3 mm, од чега је уструјна деоница $12 D$ (843,6 mm), а ниструјна $44 D$ (3093,2 mm) (слика 59). Све мерне бленде симулиране су у ламинарном и турбулентном режиму струјања у широком распону Рејнолдсових бројева.



Слика 59 Рачунски домен

Генерисање квалитетне мреже значајно је веома у РДФ јер квалитет мреже може значајно да утиче на резултате нумеричких симулација као и на брзину извршења симулације. За потребе нумеричких симулација у овој дисертацији користила су се три различита нумеричка модела. Сви нумерички модели имали су неструктурирану полнедарску мрежу, а да би се струјања у близини зида што тачније решила моделован је слој призматичних ћелија у пределима уз зидове. Призматичне ћелије биле су распоређене у 4 слоја од чега је укупна дебљина призматичних слојева износила 45% од величине основне тј. задате ћелије мреже.

Први нумерички модел коришћен је за симулације где су се анализирали параметри при струјању ваздуха кроз цев са равним деоницама и без локалних отпора. У овом нумеричком моделу направљена је апроксимација. На слици 60 а) приказан је изглед физичког модела мерне бленде са обореним углом излазне ивице од $\alpha=30^\circ$, док је на слици 60 б) приказан изглед мерне бленде која је коришћена у нумеричким симулацијама која има равну излазну ивицу.



Слика 60 Модели мерних бленди

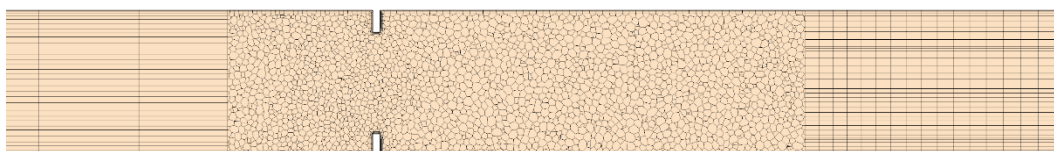
Ова апроксимација је направљена ради лакшег генерисања мреже потребне за нумеричко решавање проблема струјања гаса (ваздуха) кроз мерну бленду и брже извршење нумеричких симулација. Све остале димензије мерних бленди су остале исте и нема разлике између експериментално испитаних и нумерички симулираних мерних бленди. Рачунски домен је подељен на 3 региона. Регион 1 био је око отвора мерне бленде са фином полиедарском мрежом густине око 130000 ћелија, док су устујни и нистујни региони (регион 2 и регион 3) имали грубљу мрежу густине око 10000 и 120000 ћелија. Ова два региона (регион 2 и регион 3) у ствари представљају екструдираних регионе са устујног и ниструјног лица региона 1 (слика 59 и 61). У табели 17 може да се види број ћелија по

регионима, док се на *слици 62* могу видети детаљи рачунских мрежа за први нумерички модел.

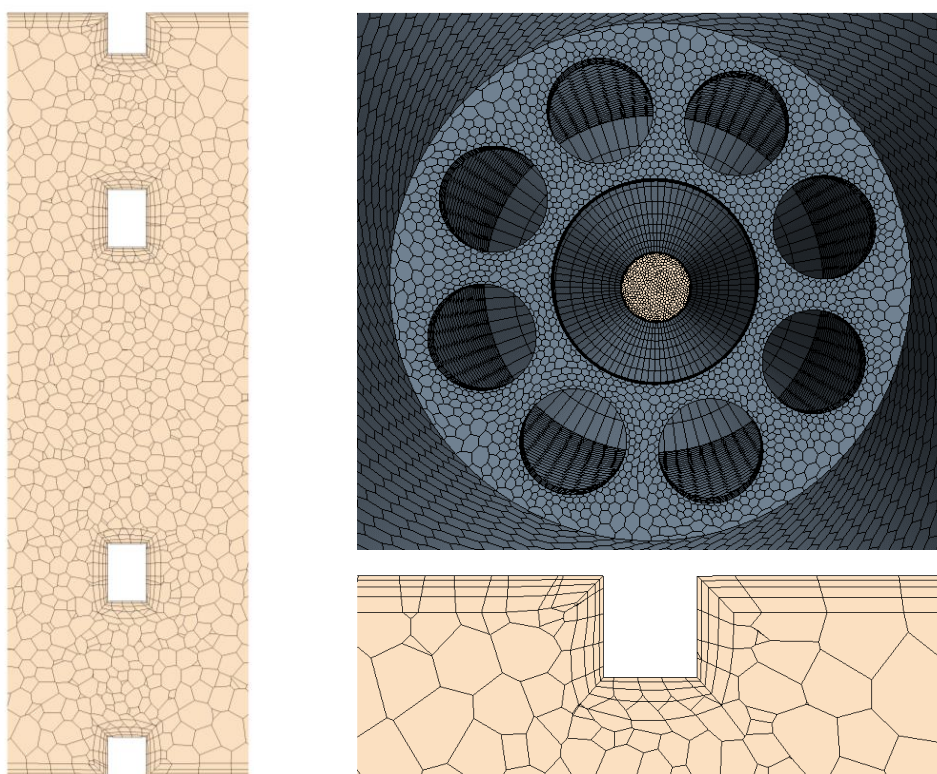
Табела 17 Број ћелија генерисане мреже за деонице без локалних отпора

Тип бленде	Регион 1	Регион 2	Регион 3	Укупан број ћелија
БЈО	86727	9760	117120	213607
БВО1	129389	9680	118680	257749
БВО2	133214	10130	119400	262744
БВО3	203222	11140	119520	333882

STAR-CCM+



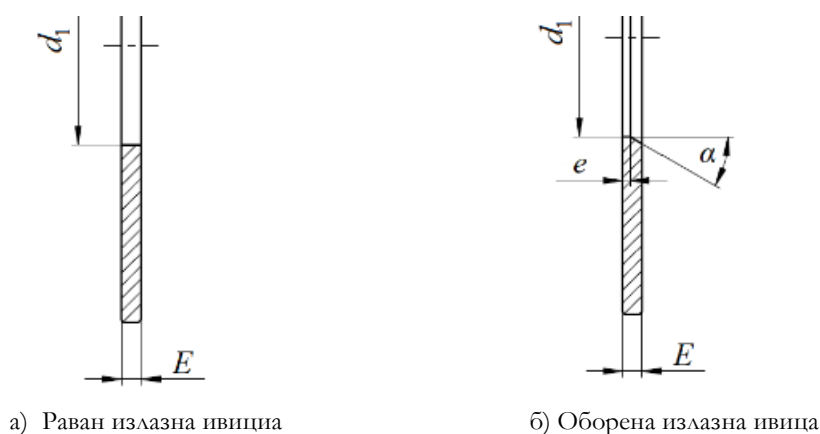
Слика 61 Приказ генерисане мреже за први нумерички модел



Слика 62 Увећан приказ генерисане мреже

Други нумерички модел је коришћен за анализу утицаја угла излазне ивице мерне бленде на коефицијент пада притиска. У циљу анализе утицаја угла

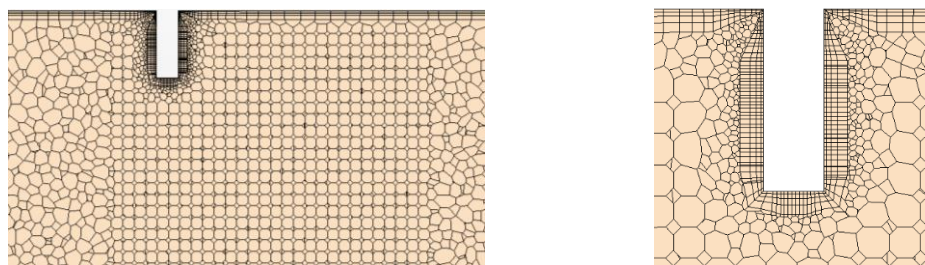
излазне ивице мерне бленде на њене радне параметре разматрале су се две под варијанте нумеричког модела. Прва под варијанта нумеричког модела уводи апроксимацију у односу на физички модела где је угао излазне ивице мерне бленде $\alpha=0^\circ$ (слика 63 а). Друга под варијанта нумеричког модела урађена је са обореним углом излазне ивице мерне бленде $\alpha=30^\circ$ (слика 63 б). Геометрија мерне бленде са обореном ивицом идентична је геометрији експериментално испитаних мерних бленди (табела 7). И у овом нумеричком моделу коришћена су три региона као у претходном нумеричком моделу.



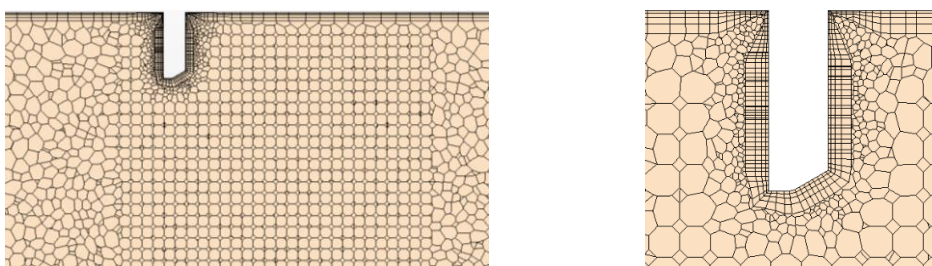
Слика 63 Геометрије мерних бленди коришћених за други нумерички модел

Како би се што боље генерисала рачунска мрежа која би се боље прилагодила мерној бленди са обореном излазном ивицом применила се техника локалног уфињавања рачунске мреже (енг. volumetric control). Ова техника омогућава да се запремина коју дефинише корисник (положај, величина и облик) може поставити у било ком делу рачунског домена. У овој дефинисаној запремини је могуће мењати параметре рачунске мреже независно од мреже остатка рачунског домена. Ова функција је веома корисна посебно када су рачунски домени велики, а део од интереса се налази на мањем делу рачунског домена, што је заправо и случај са симулацијом протока кроз мерне бленде. На овај начин може се мрежа локално уфинити, а остатак домена остати са грубљом мрежом, уместо да цео домен има мрежу високог квалитета што би у многоструко повећало потребне рачунарске ресурсе и потребно време за извршење симулације. У овом нумеричком моделу техника локалног уситњавања применила се на регион 1 у пределу око мерне бленде. Техника локалног уситњавања може се применити како на површинску мрежу тако и на запреминску мрежу. У случају оборене ивице мерне бленде, техника локалног уситњавања применила се и на површинску и на запреминску мрежу. Површинска мрежа је послужила да се мрежа што боље прилагоди обореној ивици мерне бленде тј. излазном углу, док је запреминска мрежа коришћена за додатно уфињавање дела рачунске мреже

иза мерне бленде где се дешавају промене параметара струјања флуида. Величина ћелије површинске мреже у пределу где је примењена техника локалног уфињавања износила је 10% од величине основне ћелије тј. величине основне ћелије у региону 1, док је величина ћелије запреминске мреже износила 60% од величине основне ћелије. Детаљи рачунских мрежа за анализу утицаја угла излазне ивице мерне бленде на њене струјне параметре се могу видети на *слици 64*, а у *табели 64* број ћелија.



а) Приказ генерисане мреже за мерну бленду са равном излазном ивицом



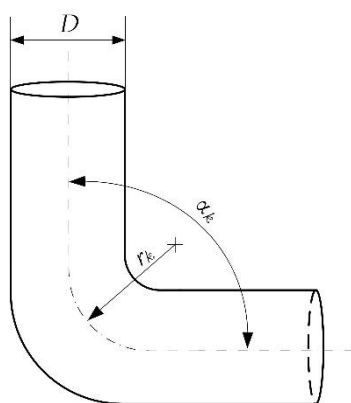
б) Приказ генерисане мреже за мерну бленду са обореном излазном ивицом

Слика 64 Приказ генерисане мреже за други нумерички модел

Табела 18 Броја ћелија рачунских мрежа другог нумеричког модела

Тип бленде	Излазна ивица	Укупан број ћелија
БЈО	Равна ивица	623946
	Оборена ивица	631101
БВОЗ	Равна ивица	766876
	Оборена ивица	683687

За потребе анализе утицаја локалних отпора на радне параметре мерне бленде направљен је нови (трећи) нумерички модел, који је описан у наставку. Као локални отпор, како уструјно тако и ниструјно, користило се колено угла $\alpha_k=90^\circ$ и радијуса r_k , једнаког са унутрашњим пречником цеви, D (*слика 65*). Посебно су се анализирали локални отпори уструјно, а посебно ниструјно.



Слика 65 Приказ локалног отпора

Локални отпор колена дефинисан је следећим параметрима:

α_k – угао колена [°],

r_k – радијус колена [m] и

L_k – дужина колена [m].

Дужина колена се одређује помоћу израза:

$$L_k = \frac{\alpha_k}{360^\circ} 2r_k\pi \quad (3.19)$$

Утицај локалних отпора анализирао се променом положаја (промена дужине равне деонице између локалног отпора и мерне бленде) локалног отпора, а да би се ови случајеви могли поредити прво је било потребно дефинисати референтни модел тј. референтну деоницу посебно за уструјне локалне отпоре и посебно за ниструјне локалне отпоре. Како би за све случајеве уструјних и ниструјних локалних отпора важили исти услови, дужина укупне деонице је била исте али је положај локалног отпора био различит. Дужина укупне деонице за анализу утицаја уструјних локалних отпора једнака је референтној уструјној деоници, а дужина укупне деонице за ниструјне локалне отпоре једнака је референтној ниструјној деоници.

Као референтна деоница за уструјне локалне отпоре усвојена је деоница коју чине укупна равна уструјна деоница, L_{uu} и равна ниструјна деоница, L_2 (слика 66). Дужина укупне уструјне деонице може се представити као:

$$L_{uu} = L_1 + L_k + L_{ni} = \text{const.} \quad (3.20)$$

где су:

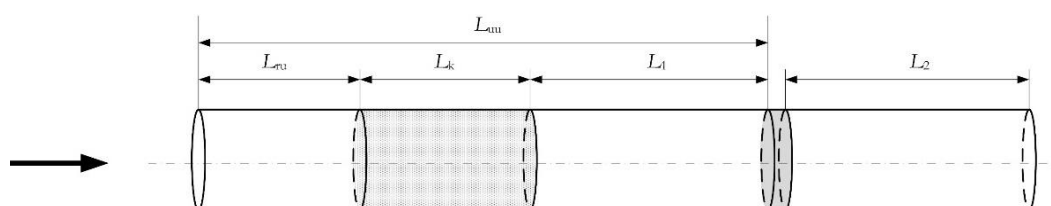
$L_{\text{ми}}$ – укупна дужина уструјне деонице,

L_1 – дужина уструјне деонице између мерне бленде и локалног отпора,

L_k – локални отпор представљен као равна деоница и

$L_{\text{ми}}$ – дужина деонице од локалног отпора до краја уструјне деонице.

Дужина укупне уструјне деонице $L_{\text{ми}}$ била је константна за све случаје симулације уструјних локалних отпора. Померањем локалног отпора дужине L_k мењале су се дужине $L_{\text{ми}}$ и L_1 .



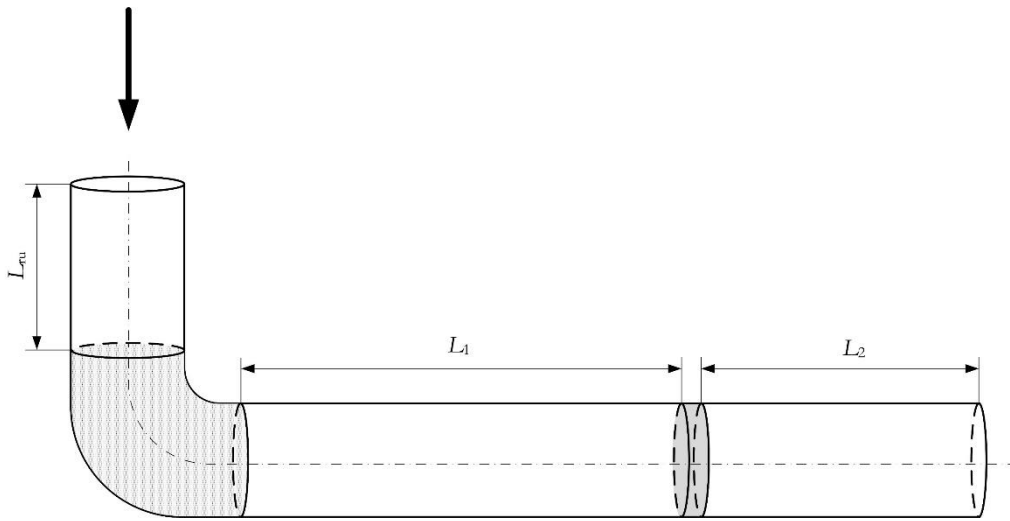
Слика 66 Референтна уструјна деоница

За случајеве анализе утицаја локалних отпора уструјно искључен је утицај ниструјних услова избором равне деонице ниструјно од мерне бленде дужине дефинисане стандардом SRPS EN ISO 5167-2:2013. Изабрана је дужина ниструјне равне деонице за „нулту“ додатну мерну несигурност. Ова дужина ниструјне деонице ($L_2=16 D$) користила се код свих симулација са уструјним локалним отпорима.

Дужине појединих деоница (различити положаји локалног отпора) и детаљи рачунског домена за анализу утицаја уструјних локалних отпора могу се видети у *табели 19* и на *слици 67*.

Табела 19 Разматране вредности појединих деоница референтне уструјне деонице

Случај	$L_{\text{ми}} [D]$	$L_1 [D]$	$L_{\text{ми}} [D]$	$L_2 [D]$
1	31	5	26	16
2	31	10	21	16
3	31	15	16	16
4	31	22	9	16
5	31	30	1	16



Слика 67 Рачунски домен за анализу утицаја уструјних локалних отпора на струјне параметре мерне бленде

Слично референтној деоници за уструјне локалне отпоре усвојена је и референтна деоница за ниструјне локалне отпоре која представља равну уструјну деоницу L_1 и укупну равну ниструјна деоница L_{in} (слика 68). Дужина укупне ниструјне деонице може се представити као:

$$L_{in} = L_2 + L_k + L_m = \text{const.} \quad (3.21)$$

где су:

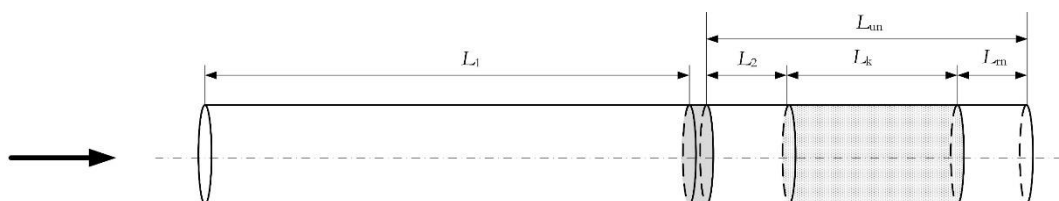
L_{in} – укупна дужина ниструјне деонице,

L_2 – дужина ниструјне деонице између мерне бленде и локалног отпора,

L_k – локални отпор представљен као равна деоница и

L_m – дужина деонице од локалног отпора до краја ниструјне деонице.

И код референтне деонице за уструјне локалне отпоре дужина укупне ниструјне деонице L_{in} била је константна за све случаје симулације ниструјних локалних отпора. Померањем локалног отпора мењале су се дужине L_m и L_2 .



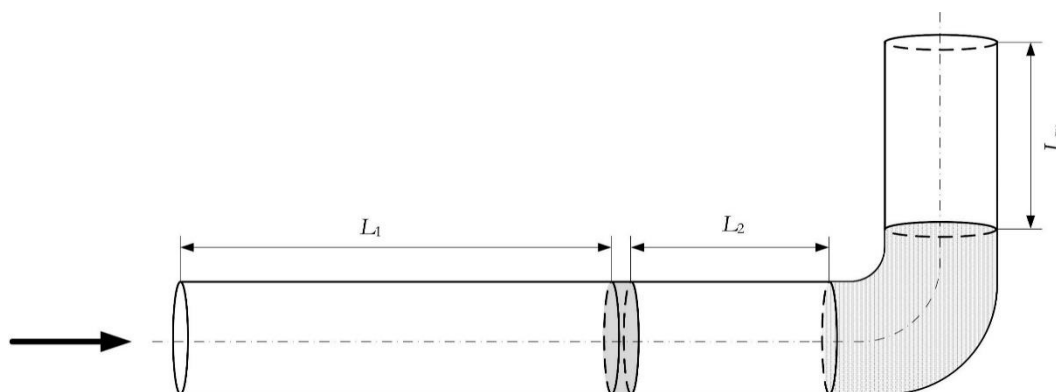
Слика 68 Референтна ниструјна деоница

За случајеве анализе утицаја ниструјних локалних отпора искључен је утицај уструјних услова избором равне деонице уструјно од мерне бленде дужине дефинисане стандардом SRPS EN ISO 5167-2:2013. Изабрана је дужина уструјне равне деонице за „нулту“ додатну мерну несигурност. Ова дужина уструјне деонице ($L_1=44 D$) користила се код свих симулација са ниструјним локалним отпорима.

У *табели 20* приказане су вредности појединих деоница референтне деонице за случај анализе утицаја ниструјних услова на струјне параметре мерне бленде. На *слици 69* приказан је рачунски домен за случај анализе утицаја ниструјног локалног отпора на струјне параметре мерне бленде.

Табела 20 Разматране вредности појединих деоница референтне ниструјне деонице

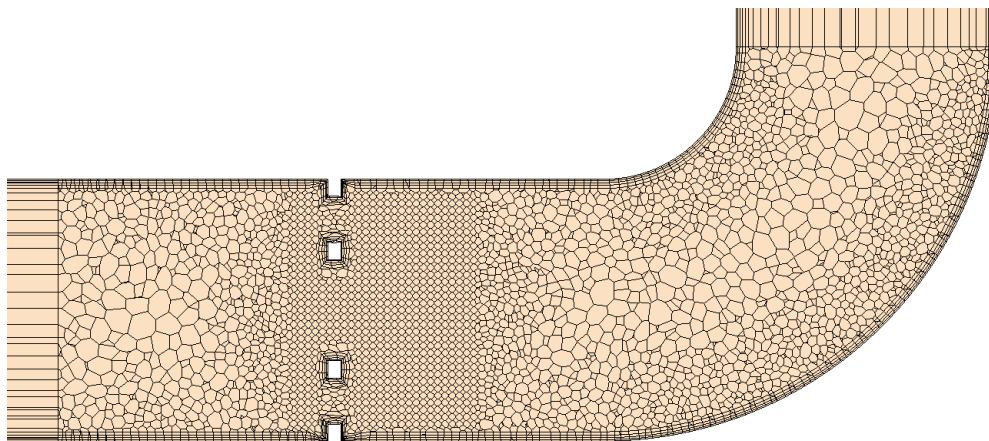
Случај	$L_1 [D]$	$L_2 [D]$	$L_{int} [D]$	$L_m [D]$
1	44	1	9	8
2	44	2	9	7
3	44	3	9	6
4	44	4	9	5
5	44	5	9	4
6	44	6	9	3
7	44	7	9	2
8	44	8	9	1



Слика 69 Рачунски домен за анализу утицаја ниструјних локалних отпора на струјне параметре мерне бленде

Након дефинисања геометрије нумеричког модела за анализу утицаја, како уструјних локалних отпора тако и ниструјних локалних отпора, у наставку је описан одговарајући мрежни континуум. Код рачунског домена за случајеве присуства локалних отпора исто се применила техника локалног уфињавања

рачунске мреже. И у нумеричком моделу са локалним отпорима коришћена је апроксимација геометрије мерне бленде, као у првом нумеричком моделу. Три региона (регион 1, регион 2 и регион 3) су се применила и у трећем нумеричком моделу са тим што се њихова величина мењала у зависности од положаја локалног отпора тј. дужине деонице између мерне бленде и локалног отпора. Регион 1 чини део где се налазе мерна бленда и локални отпор и ово је случај како за уструјне тако и за ниструјне локалне отпоре. Техника локалног уфињавања рачунске мреже се применила на регион 1 у пределу око мерне бленде (слика 70). Дефинисана запремина у којој се рачунска мрежа додатно уфинила тј. где се применила техника локалног уфињавања је облика цилиндра радијуса 35,15 mm и висине 50 mm (10 mm устројно и 40 mm ниструјно од мерне бленде). Величина ћелије у запремини у којој се рачунска мрежа додатно уфинила износила је 35% од величине основне ћелије у региону 1. Регион 2 и регион 3 су екструдирани региони са уструјног и ниструјног лица региона 1. За деоницу са присутним уструјним локалним отпорима регион 3 је исти за све случајеве јер он одговара деоници L_2 (слика 67) који се не мења, док је регион 2 у ствари деоница дужине L_m и зависи од дужине деонице L_1 између мерне бленде и локалног отпора. Слично претходном, деоница са присутним локалним отпорима ниструјно имала је непромењен регион 2 који одговара уструјној деоници дужине L_1 , док је регион 3 био једнаке дужине као L_m и мењао се са променом дужине деонице L_2 (слика 69 и табела 20). Екстудирањем региона 2 и 3 смањена је густина рачунске мреже чиме је смањено време неопходно за извршење нумеричке симулације.



Слика 70 Приказ генерисане рачунске мреже за трећи нумерички модел

3.6.2. Анализа квалитета мреже

Дискретизација је процес апроксимирања решења континуалних проблема, јер некада није могуће решити континуалне проблеме те се они могу заменити

познатим решењима дискретних проблема. Процес дискретизације уноси грешке дискретизације због одступања решења дискретног проблема од решења континуалног проблема. У нумеричкој анализи и РДФ је веома важно да се оцени утицај грешке дискретизације. Како грешка дискретизације настаје због чињенице да је функција континуиране променљиве у рачунару представљена коначним бројем процена, иста се најчешће може смањити гушћом рачунском мрежом или повећањем броја процена што има за последицу повећавање потребног времена решавања нумеричких проблема.

Један од метода за одређивање грешке дискретизације је метод Ричардсонове екстраполације (енг. Richardson extrapolation) који је представљен још почетком 20. века [65, 66] од стране Луиса Фраја Ричардсона (енг. Lewis Fry Richardson). Поред ограничења која има Ричарсонов метод овај метод је тренутно најпоузданији за одређивање нумеричке несигурности [71].

Да би се осенио утицај грешке дискретизације потребно је урадити додатно устињавање или укрупњавање мреже дискретизацијског домена да би се утврдио утицај густине мреже на тачност решења [72]. За потребе ове анализе одабране су 4 мерне бленде (БЈО, БВО1, БВО2 и БВО3) са параметром $\beta=0,70$. У овој дисертацији коришћена је метода GCI (енг. grid convergence index) за оцену грешке дискретизације. Ова метода заснива се на Ричардсоновој екстраполацији и до сада је била примењена на великом броју РДФ случајева [73, 70, 74, 75, 76]. Поступак оцене грешке дискретизације се одвија у 5 корака који ће бити приказани у наставку.

Први корак подразумева одређивања величине репрезентативне ћелије у мрежи. Израз за одређивање величине репрезентативне ћелије h , за тродимензиони случај дефинише се као:

$$h = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta V_i) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3.22)$$

где је укупан број ћелија у домену представљен са N , а запремина појединачне i -те ћелије са ΔV_i . У следећем кораку потребно је дефинисати 3 различите мреже које би се користиле за симулације како би се одредиле величине од значаја ϕ . Величине репрезентативне ћелије у мрежи су h_1 , h_2 и h_3 , где h_1 представља најфинију мрежу, а h_3 најгрубљу ($h_1 < h_2 < h_3$). У трећем кораку се одређује ред методе, p , али је пре тога потребно дефинисати индекс усавршавања мреже. Он се може представити као:

$$r = \frac{h_{\text{Груба}}}{h_{\text{Фина}}} \quad (3.23)$$

Ред методе се може одредити помоћу следећих израза:

$$p = \frac{1}{\ln(r_{21})} \left| \ln \left| \frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}} \right| + q(p) \right| \quad (3.23)$$

$$q(p) = \ln \left(\frac{r_{21}^p - s}{r_{32}^p - s} \right) \quad (3.24)$$

$$s = 1 \cdot \text{sign} \left(\frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}} \right) \quad (3.25)$$

Где су $\varepsilon_{32} = \phi_3 - \phi_2$ и $\varepsilon_{21} = \phi_2 - \phi_1$, а решење k -те мреже је представљено са ϕ_k . За решавање једначина (3.23) и (3.24) је потребно применити итеративни поступак. Негативна вредност једначине (3.25), што следи из $\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21} < 0$, је показатељ да је конвергенција осцилаторна. Поклапање добијеног реда методе са формалним редом коришћене схеме може се узети као добра индикација да ли су изабране мреже у асимптотском домету, док супротан случај не мора обавезно да буде показатељ незадовољавајућег решења [71].

Следећи, четврти корак подразумева одређивање екстраполиране вредности за коју се користи следећи израз:

$$\phi_{ext}^{21} = \frac{r_{21}^p \phi_1 - \phi_2}{r_{21}^p - 1} \quad (3.26)$$

У петом и последњем кораку рачунају се и приказују следеће процене грешака заједно са редом методе p :

Апроксимирана релативна грешка:

$$e_a^{21} = \left| \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1} \right| \quad (3.27)$$

Релативна грешка екстраполације:

$$e_{ext}^{21} = \left| \frac{\phi_{ext}^{21} - \phi_1}{\phi_{ext}^{21}} \right| \quad (3.28)$$

И индекс конвергенције уфињене мреже (енг. fine-grid convergence indeks):

$$GCI_{fine}^{21} = \frac{1,25e_a^{21}}{r_{21}^p - 1} \quad (3.29)$$

Приказивањем GCI_{fine}^{21} у процентуалним вредностима долази се до нумеричке несигурности.

3.6.3. Почетни и гранични услови

Све мерне бленде су симулиране у ламинарном и турбулентном режиму струјања где је распон Рејнолдсових бројеве био од 500 до 600000, што се постигло варирањем улазног масеног протока ваздуха у границама од 0,00051 kg/s до 0,61415 kg/s, док су притисак, температура и густина били константни ($p_{in}=300$ kPa, $t=298,15$ K и $\rho=3,513$ kg/m³).

Гранични услов на улазу у рачунски домен дефинисан је као улазни масени проток (енг. Mass Flow Inlet) док је гранични услов на излазу из рачунског домена дефинисан као подељени излазни проток (енг. Flow Split Outlet). Улазни масени проток користи се за дефинисање масеног протока или масеног флукса (масени проток по јединици површине) на улазу у рачунски домен, при чему је струјање усмерено према рачунском домену. Излазни гранични услов, подељени излазни проток представља излазни проток код којег не долази до повратног тока. Овај гранични услов представља излазни проток из цеви уз очување улазног масеног протока, а излазни проток може се поделити у одређеном односу или остати неподељен. Подељени излазни проток примењује се на месту рачунског домене где је струјање (проток) усмерено изван рачунског домена. Као такав овај гранични услов нема тачно дефинисане услове на излазу рачунског домена већ га ближе одређују услови дефинисани уструјно од излазног граничног услова. Све зидне површине специфициране су као неклизећи (енг. No-slip) зидни гранични услов са високим y^+ (енг. High y^+) третманом зида за моделовање у непосредној близини зида. Овакав третман зидних површина претпоставља да се тежишта (центроиди) ћелија у близини зида налазе у логаритамском региону граничног слоја.

3.6.4. Физички континуум и модели

Након подешавања мреже, почетних и граничних услова, формирао се физички континуум. У физичком континууму дефинисани су физички модели који описују струјање флуида у дефинисаном рачунском домену. У оквиру докторске дисертације коришћена су два физичка континуума, један за ламинарни режим струјања, а други за турбулентни режим струјања.

Основни модели физичког континуума за ламинарни режим струјања:

- ламинарно струјање
- константна густина
- segregated flow¹²
- гас (ваздух)
- стационарни режим
- градијенти
- три димензије (3D).

Основни модели физичког континуума за турбулентни режим струјања:

- константна густина
- гас (ваздух)
- градијенти
- висок y^+ третман зида
- k - ε модел турбуленције
- Рејнолдс осредњене Навије Стоксове једначине
- segregated flow
- segregated fluid temperature¹³
- стандардни k - ε модел турбуленције
- стационарни режим
- три димензије (3D)
- турбулентно струјање.

Више информација о изабраним моделима може се наћи у корисничком упутству Siemens Simcenter Star CCM+ [77].

¹² Segregated flow је тип solvera који решава једначину једне променљиве за све ћелије, па потом једначину за следећу променљиву за све ћелије итд. Овај тип solvera је погодан за некомп्रेसибилна струјања, или компресибилна струјања са ниским вредностима Маховог броја.

¹³ Segregated fluid temperature модел решава енергијске једначине где је температура променљива која се решава. На основу израчунате температуре рачуна се енталпија. Овај модел је погодан за проблеме који немају процес сагоревања.

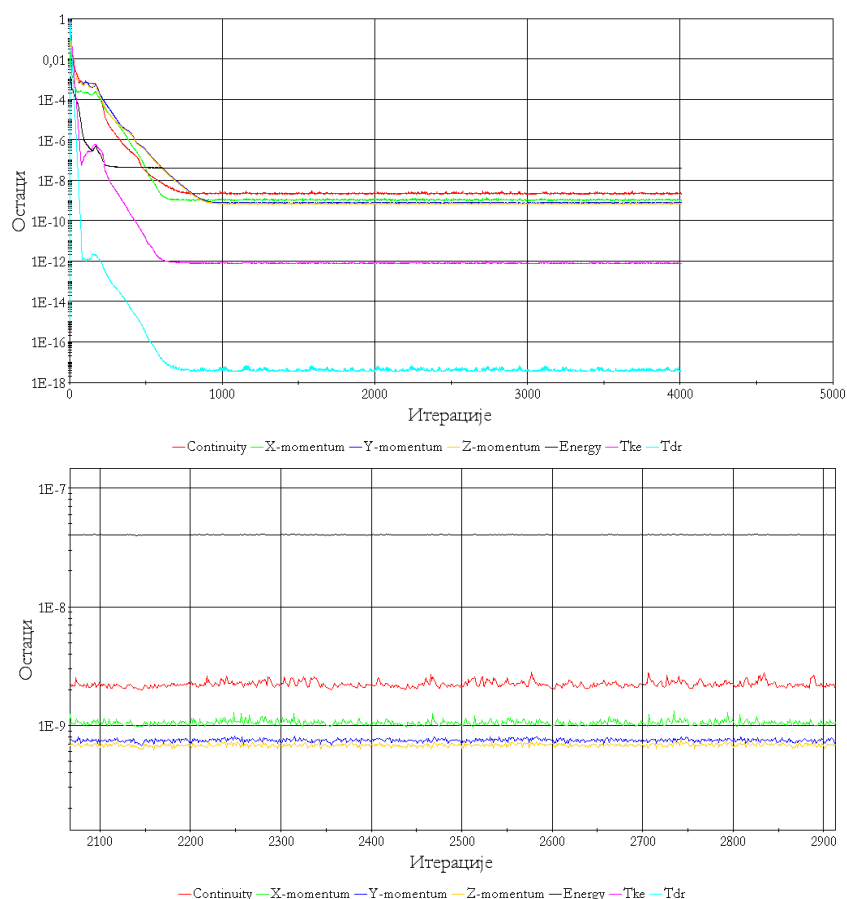
3.6.5. Критеријум заустављања нумеричких симулација

Два основна критеријума конвергенције коришћена су за заустављање итеративног поступка када резултат постане довољно тачан:

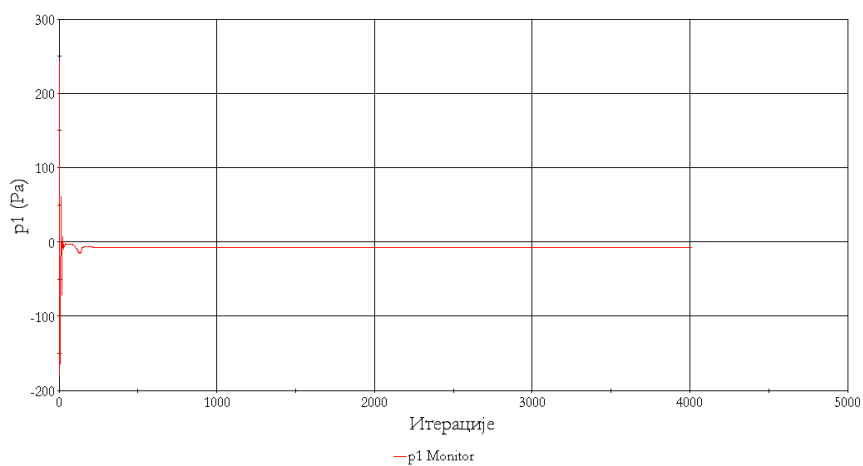
- релативни остаци при решавању једначина ($<10^{-7}$), слика 71 и
- вредност посматране физичке величине ($<1\%$ између две последње итерације), слике 72, 73 и 74.

Када су се ови критеријуми задовољили, симулације су се заустављале, најчешће после 1000 итерација. По препорукама ASME [73] релативни остаци при решавању свих једначина треба да буду испод 10^{-3} до 10^{-4} . У нумеричким симулацијама које су урађене у склопу ове дисертације конвергирана решења свих једначина била су умањена за најмање 7 редова величина (слика 71).

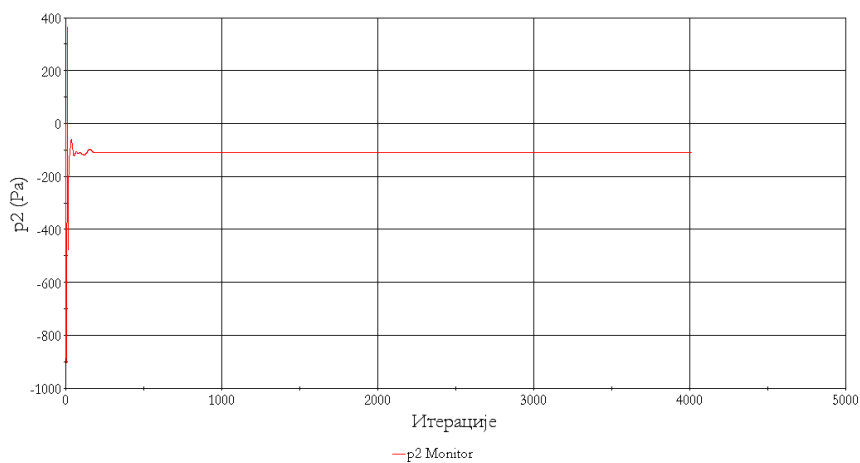
Приликом симулације, већа важност је дата другом критеријуму конвергенције, тј. посматраним физичким величинама (притисци p_1 , p_2 и p_3). Нумеричка симулација одвијала се све док тражени притисци нису постали приближно константни.



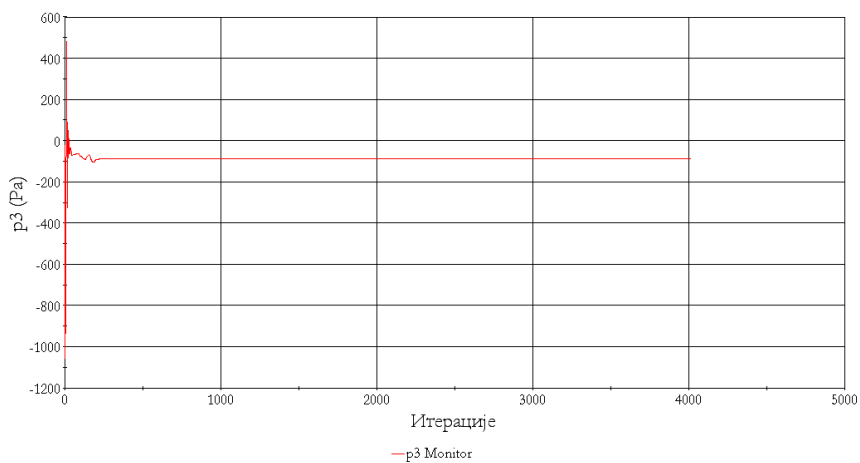
Слика 71 Графички приказ релативних остатака током извршења нумеричке симулације



Слика 72 Графички приказ вредности притиска p_1 до устаљења током извршења нумеричке симулације



Слика 73 Графички приказ вредности притиска p_2 до устаљења током извршења нумеричке симулације



Слика 74 Графички приказ вредности притиска p_3 до устаљења током извршења нумеричке симулације

4. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

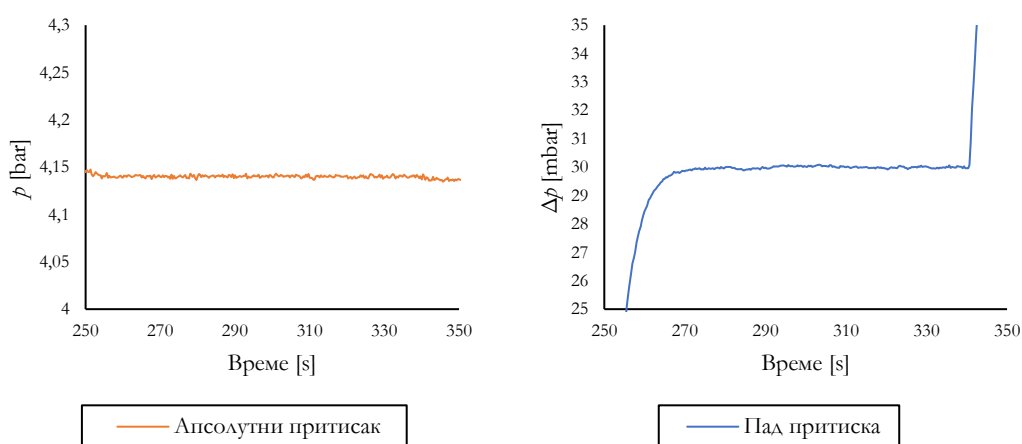
Као што је у претходном делу било речено, истраживање мерне бленде се спровело експерименталним испитивањима и нумеричким симулација и овом поглављу су представљени и једни и други резултати. Резултати експерименталних испитивања приказани су у виду дијаграма и табела док су резултати нумеричких симулација приказани у виду дијаграма, табела и графичког приказа скаларних и векторских поља физичких величина.

4.1. РЕЗУЛТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСТРАЖИВАЊА

Да би се боље разумеле перформансе БВО, ова студија се бавила структурним параметрима мерних бленди као нпр. величина отвора и њихова расподела. Као што је већ раније напоменуто предмет истраживања било је 16 мерних бленди (БЈО и БВО) са 4 различите вредности параметра β : 0,50, 0,55, 0,60 и 0,70. На овај начин било је могуће урадити директно поређење БВО и БЈО за исте параметре β .

4.1.1. Тачност подешеног притиска

У поглављу 3.3.2 описан је начин подешавања улазног притиска на регулационо припремној групи помоћу регулатора притиска. Приликом експерименталног мерења континуално су се мериле вредности улазног апсолутног притиска али и вредности пада притиска, те се на основу тих резултата могло закључити каква је била тачност подешеног улазног притиска.



а) Апсолутни притисак БВО2, $\beta=0,55$

б) Пад притиска БВО2, $\beta=0,55$

Слика 75 Експериментални резултати за апсолутни притисак и пад притиска

Тачност подешеног улазног притиска за све испитане мерне бленде на свим притисцима кретала се за апсолутни улазни притисак од 0,066% до 1,03%, а за пад притиска од 0,041% до 0,65%.

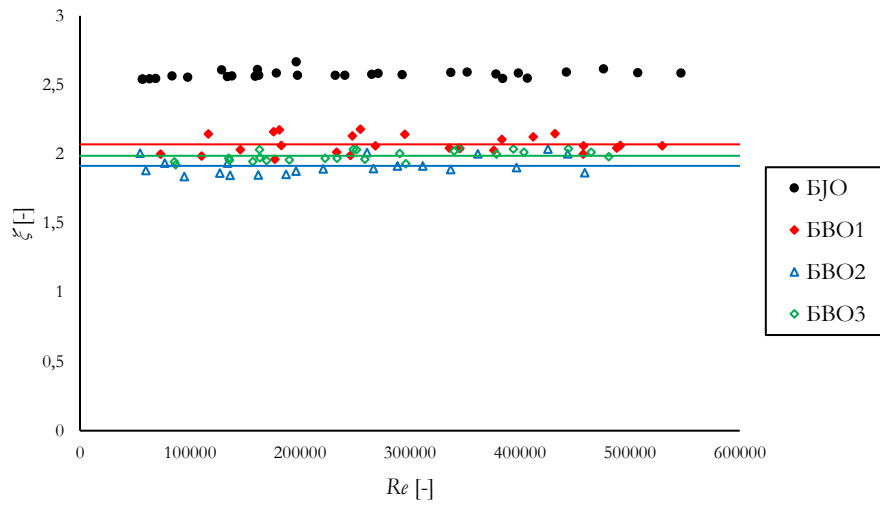
4.1.2. Коefицијент пада притиска мерне бленде

Као мерило протока мерна бленда мора да има константан коefицијент протка у потпуно развијеним струјањима и да има познату зависност од Рејнолдсовог броја са незнатном променом Рејнолдсовог броја [78]. За анализу и поређење мерних бленди уместо коefицијента протока користио се коefицијент пада притиска мерне бленде како је то и наведено у претходном поглављу. Такође је у претходном делу дефинисана и веза између коefицијента протока и коefицијента пада притиска мерне бленде. На сликама 76, 77, 78 и 79 приказани су експериментални резултати коefицијента пада притиска за БЈО и БВО и њихове варијације при различитим β параметрима. Поређењем резултата коefицијента пада притиска за БЈО и БВО може се видети да БВО имају евидентно мањи коefицијент пада притиска.

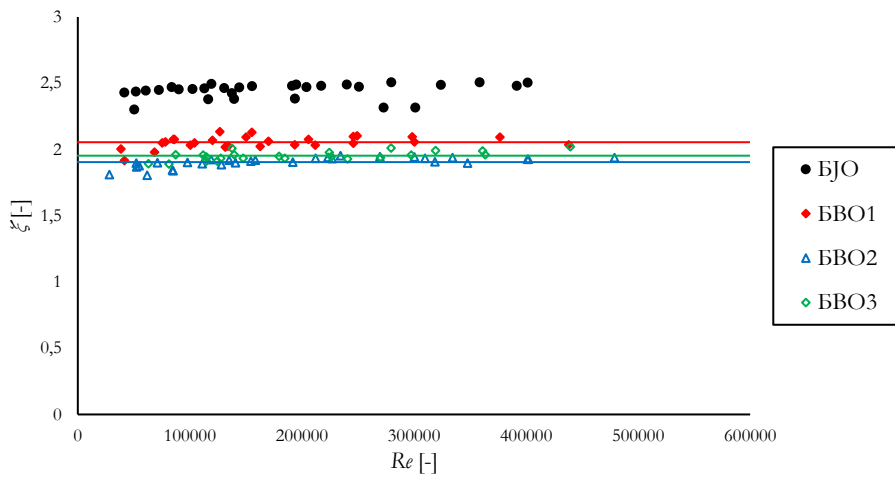
Табела 21 Експериментални резултати коefицијента пада притиска

Мерна бленда	$\beta=0,50$		$\beta=0,55$		$\beta=0,60$		$\beta=0,70$	
	ξ [-]	$\Delta\xi$ [%]	ξ [-]	$\Delta\xi$ [%]	ξ [-]	$\Delta\xi$ [%]	ξ [-]	$\Delta\xi$ [%]
БЈО	2,576	/	2,445	/	2,323	/	2,004	/
БВО1	2,071	19,604	2,055	15,951	1,786	23,117	1,207	39,771
БВО2	1,915	25,661	1,904	22,127	1,659	28,584	1,213	39,471
БВО3	1,988	22,826	1,953	20,123	1,828	21,309	1,151	42,565

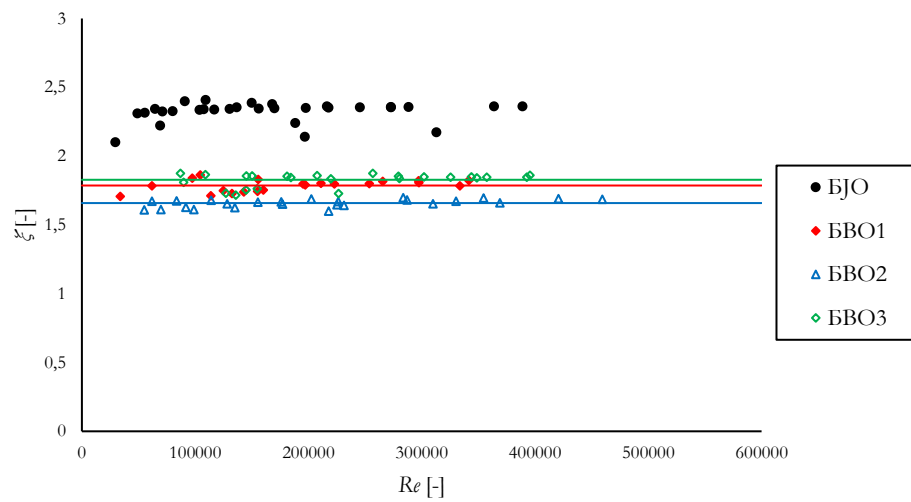
Најмање смањење коefицијента пада притиска је код БВО1 $\beta=0,55$ а највеће код БВО3 $\beta=0,70$ што се може и видети из *табеле 21*. Распоред мањих отвора тј. пречник подеоног круга код БВО такође утиче на коefицијент пада притиска па тако има мерних бленди са истом вредношћу параметра β , а различитом вредношћу коefицијента пада притиска. Највећи утицај пречника подеоног круга на коefицијент пада притиска се приметно код БВО1 $\beta=0,50$ где је дошло до смањења коefицијента за 6,057% и БВО3 $\beta=0,60$ где је дошло до смањења за 7,275%. Ако се узме у обзир да је вредност фактора експанзије ε око 1, из једначине (3.2) може се закључити да се смањењем коefицијента пада притиска ξ , коefицијент протока μ повећава, те стога БВО имају бољи (већи) коefицијент протока μ у поређењу са БЈО за исту вредност параметра β .



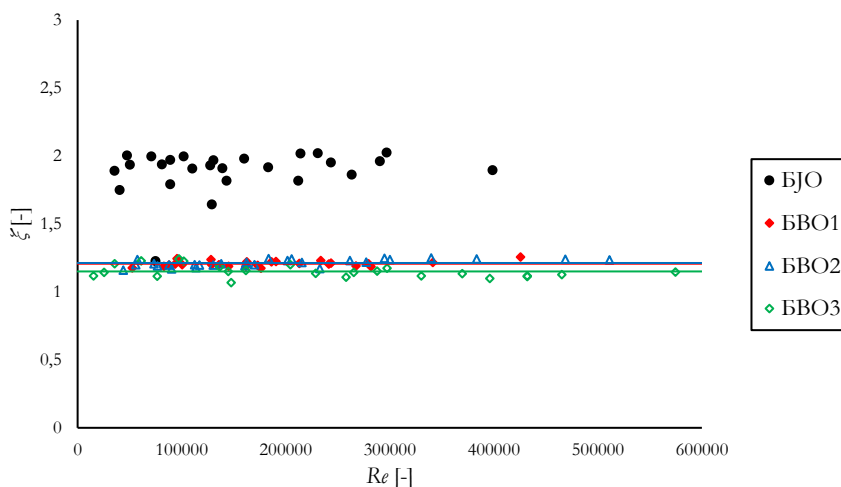
Слика 76 Коэффициент пада притиска за БЈО и БВО $\beta=0,50$



Слика 77 Коэффициент пада притиска за БЈО и БВО $\beta=0,55$



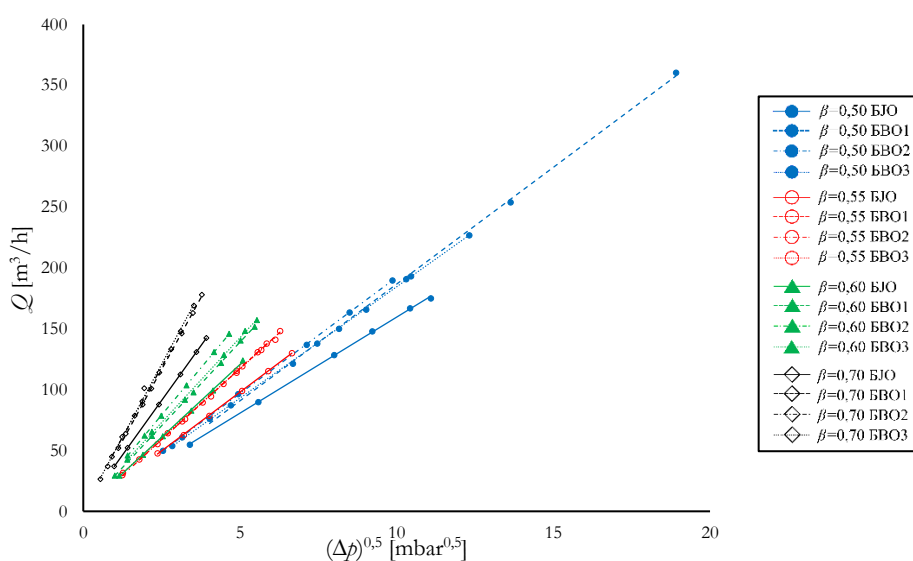
Слика 78 Коэффициент пада притиска за БЈО и БВО $\beta=0,60$



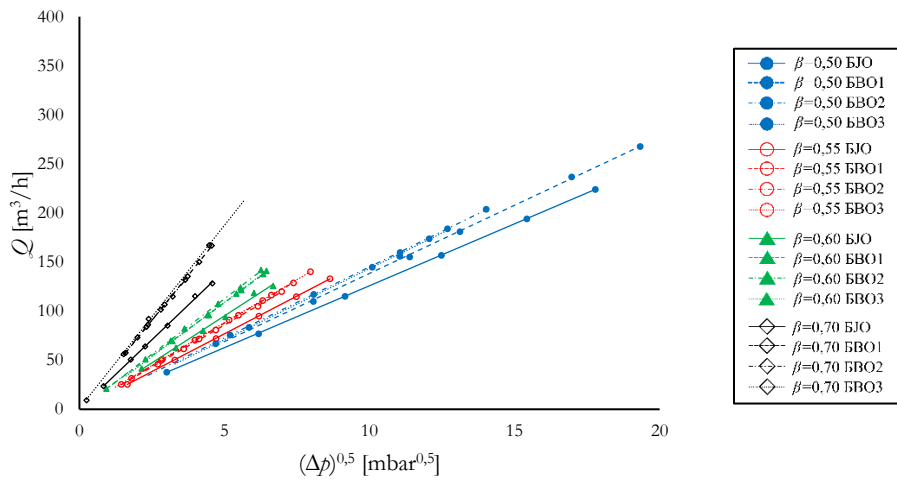
Слика 79 Коэффициент пада притиска за БЈО и БВО $\beta=0,70$

4.1.3. Однос запреминског протока и пад притиска

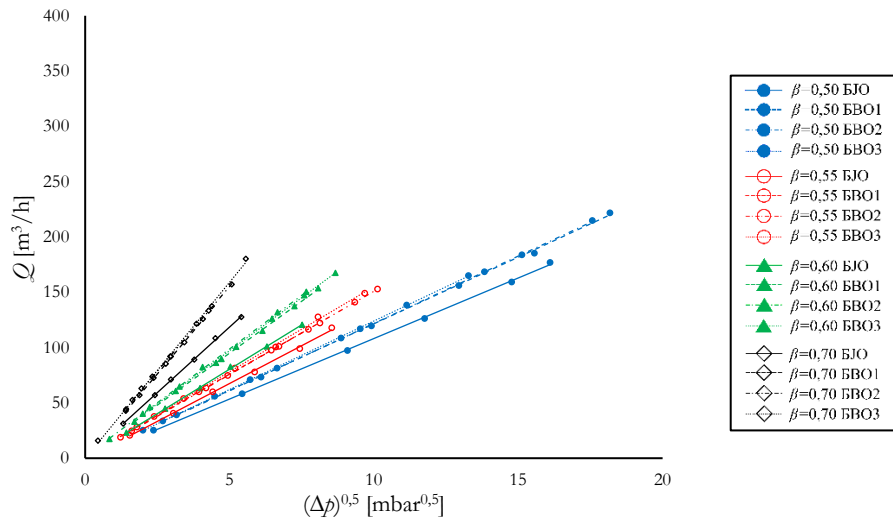
Однос протока кроз мерну бленду и пада притиска насталог услед пригушења значајан је јер се на основу измереног пада притиска може индиректно одредити проток кроз мерну бленду. Више фактора (гравитација, убрзање, облик, отпор, трење итд.) утиче на настали пад притиска приликом проласка флуида кроз мерну бленду, али је брзина најважнији. Расподела (профил) брзине је приближно униформан уструјно од мерне бленде. Након проласка кроз отвор мерне бленде брзина флуида се повећава што има за циљ смањење статичког притиска ниструјно од мерне бленде. Са слика 80, 81, 82, 83 и 84 може се видети зависност између запреминског протока и квадратног корена пада притиска за све испитане мерне бленде на свим притисцима.



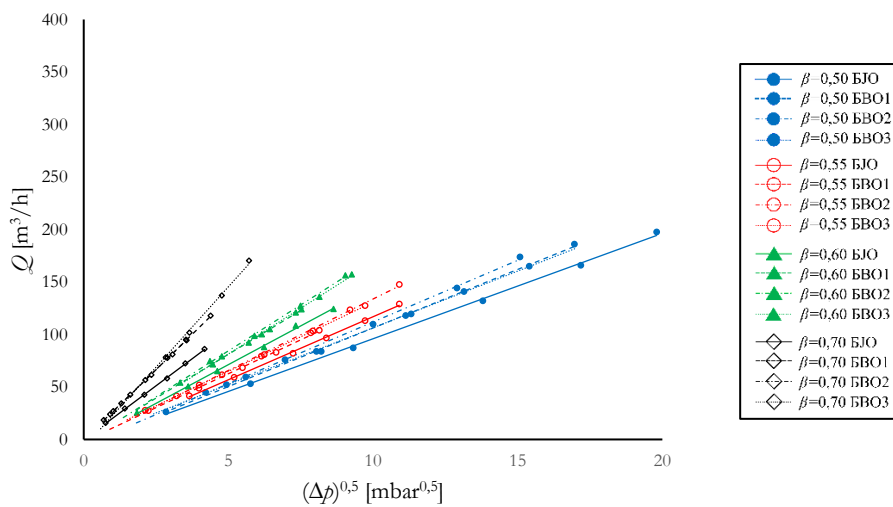
Слика 80 Однос запреминског протока и пада притиска, $p_1=2 \text{ bar}$



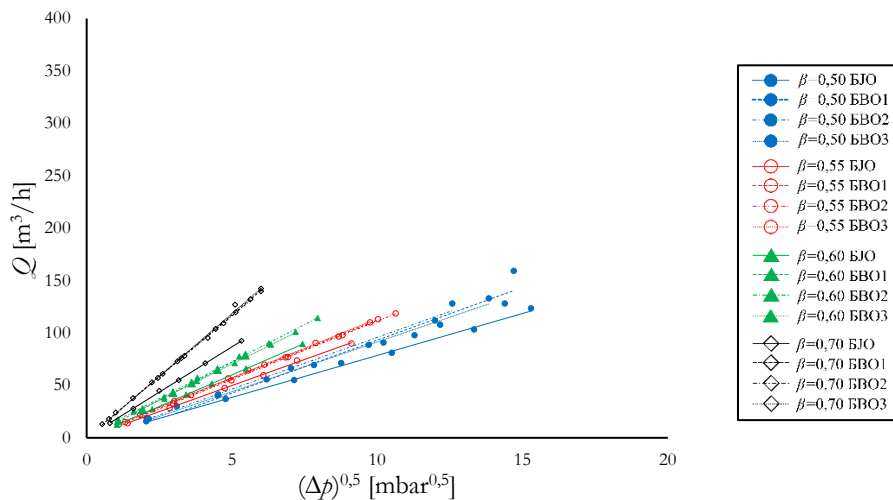
Слика 81 Однос запреминског протока и пада притиска, $p_1=4 \text{ bar}$



Слика 82 Однос запреминског протока и пада притиска, $p_1=6 \text{ bar}$



Слика 83 Однос запреминског протока и пада притиска, $p_1=8 \text{ bar}$



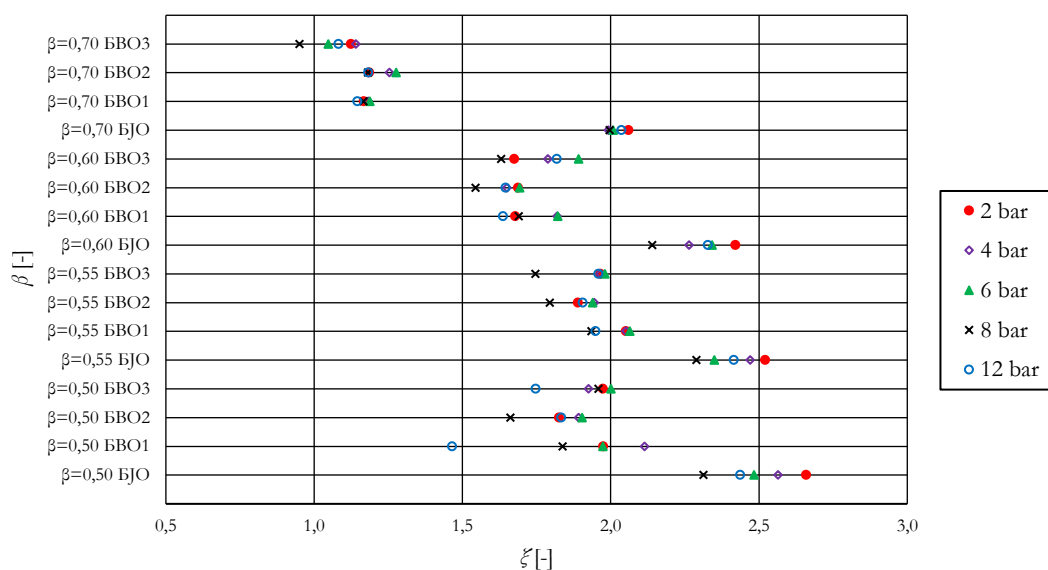
Слика 84 Однос запреминског протока и пада притиска, $p_1=12 \text{ bar}$

Иако БЈО и БВО имају једнаке површине отвора за исту вредност параметра β , БВО имају равномерније распоређене отворе у поређењу са БЈО која има само један централни отвор (слика 34). При проласку флуида кроз БЈО долази до појаве великих вртлога ниструјно услед концентрације флуидне струје (протока) кроз један централни отвор, док се код БВО јављају мањи вртлози непосредно иза мерне бленде [39]. За мерне бленде са истом вредношћу параметра β БВО имају мањи пад притиска у поређењу са БЈО за исти проток.

Са повећањем вредности параметра β пад притиска се смањује. То се види на сликама 80, 81, 82, 83 и 84 где мерне бленде са већим параметром β имају нижи пад притиска за исте протоке него мерне бленде са мањим параметром β . Мерне бленде са већим параметром β мање тј. слабије реагују на промене протока, док су БВО мање осетљиве на промене протока од БЈО за исту вредност параметра β . Са порастом притиска повећава се и осетљивост мерних бленди, док расподела отвора код БВО има незнатан утицај на осетљивост услед промене протока (слике 80, 81, 82, 83 и 84). Ови трендови су исти за све опсеге притиска.

Користећи криве приказане на сликама 80, 81, 82, 83 и 84 и једначину (2.1) може се извући коефицијент пада притиска мерне бленде за сваку појединачну мерну бленду при сваком испитном притиску. На слици 85 могу се видети коефицијент пада притиска мерне бленде за све испитане мерне бленде одакле се може проценити које БВО и БЈО имају исти коефицијент пада притиска мерне бленде, а самим тим индиректно и коефицијент протока. На пример, БВО3 $\beta=0,50$ има еквивалентан коефицијент пада притиска мерне бленде као и БЈО $\beta=0,70$ на притиску од 6 bar. Заменом БЈО $\beta=0,70$ са БВО $\beta=0,50$ на притисцима од 6 bar би за циљ имало исте губитке притиска у систему услед постављања

мерне бленде, али би БВО била осетљивија на промене протока од БЈО. Посматрајући БЈО може се видети да се са повећањем параметра β , на коефицијент пада притиска мерне бленде мање утиче притисак. Промена притиска мање утиче на коефицијент пада притиска за све БВО у поређењу са БЈО, чинећи на тај начин БВО погодне за ширу примену на различитим притисцима. Такође се са *слике 85* може видети да се са повећањем параметра β коефицијент пада притиска мерне бленде смањује, а на тај начин индиректно се коефицијент протока повећава.



Слика 85 Коефицијент пада притиска мерне бленде за БЈО и БВО при различитим притисцима

4.2. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА ПРИМЕНОМ РДФ

У претходном делу овог поглавља могли су се видети резултати добијени експерименталним истраживањем, а за резултате који се нису добили експериментом коришћена је РДФ која је дала додатне информације о струјању гаса кроз мерне бленде.

4.2.1. Анализа квалитета мреже и грешке дискретизације

Како је и раније напоменуто да квалитет мреже може значајно да утиче на резултате симулације, након избора облика ћелија, дефинисања призматичног слоја и региона као и физике проблема урађена је анализа квалитета мреже. Анализа квалитета мреже подразумева испитивање независности решења од броја ћелија у мрежи. За потребе анализе квалитета мреже користиле су се 3 мреже различитих величина ћелија где је свака следећа мрежа имала мање ћелија од претходне (*табела 22*). Индекс усавршавања мреже r , такође је приказан за све генерисане мреже. Анализа квалитета мреже урађена је за 4 мерне бленде (БЈО,

БВО1, БВО2 и БВО3) све са истим параметром $\beta=0,70$. Вредности за граничне услове за све наведене случајеве биле су идентичне као стварни услови при којима су изведени експерименти ($Q=166,84 \text{ m}^3/\text{h}$, $p_{in}=499 \text{ kPa}$ и $t=300,18 \text{ K}$).

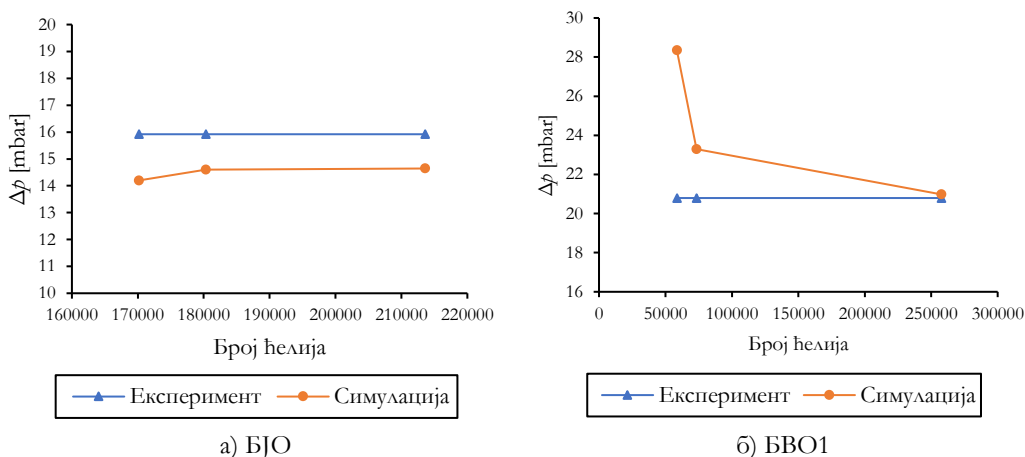
Табела 22 Број ћелија и односи усавршавања мреже за GCI методу

Бленда, $\beta=0,70$	БЈО	БВО1	БВО2	БВО3
N_1	213607	257749	262744	333882
N_2	180333	73415	74061	76079
N_3	170158	58608	58782	56711
r_{21}	1,058	1,520	1,525	1,637
r_{32}	1,020	1,078	1,080	1,103

За оцену грешке дискретизације користила се GCI метода описана у поглављу 3.6.2, а физичка величина од значаја ϕ , која се посматрала и анализирана је пад притиска (са растојања $1 D$ испред и $1/2 D$ иза мерне бленде) настао услед проласка флуида кроз мерну бленду. У табели 23 могу се видети резултати примене GCI методе, а из резултата анализе може се видети да је нпр. за БВО1 вредност пада притиска $20,979 \text{ mbar}$ и да се може очекивати да ова вредност буде у границама од $\pm 0,0224\%$ са даљим усавршавањем мреже. Конвергенција је за све случајеве била монотона што се може и видети на основу резултата из табеле 23 и са слике 86. У случајевима где је присутно веће одступање резултата симулације од резултата експеримента може се закључити на основу вредности GCI_{fine}^{21} да је извор грешке услед квалитета мреже занемарљива у поређењу са осталим изворима грешака као нпр. модели турбуленције, физика проблема, апроксимације у геометрији итд.

Табела 23 Резултати GCI методе

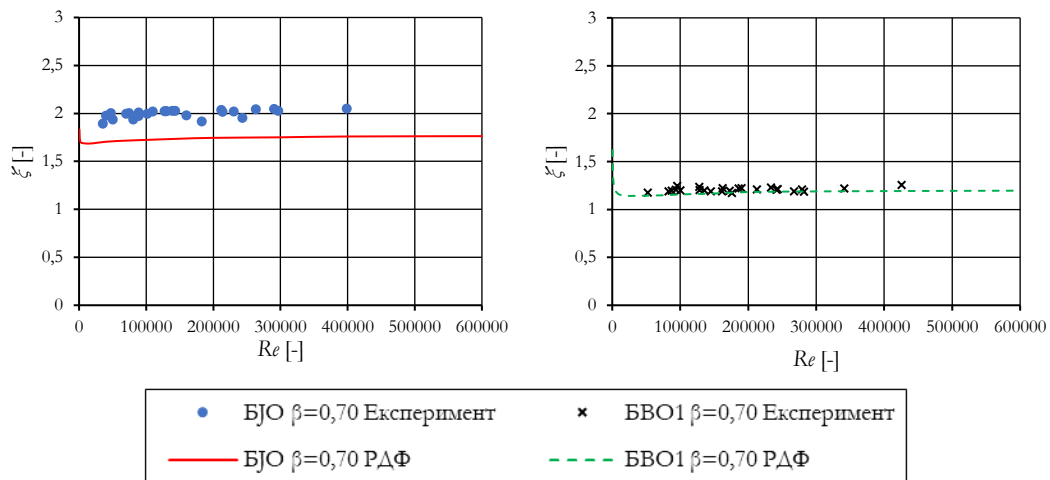
Мерна бленда	БЈО	БВО1	БВО2	БВО3
ϕ	$\Delta p \text{ [mbar]}$			
Конвергенција	Монотона	Монотона	Монотона	Монотона
ϕ_1	14,644	20,979	5,025	32,217
ϕ_2	14,601	23,301	5,875	35,493
ϕ_3	14,199	28,346	7,333	44,103
p	120,65	15,35	12,92	13,16
ϕ_{ext}^{21}	14,644	20,975	5,021	32,212
e_a^{21}	0,294%	11,1%	16,9%	10,2%
e_{ext}^{21}	0,0003%	0,02%	0,07%	0,02%
GCI_{fine}^{21}	0,0004%	0,0224%	0,0908%	0,0194%



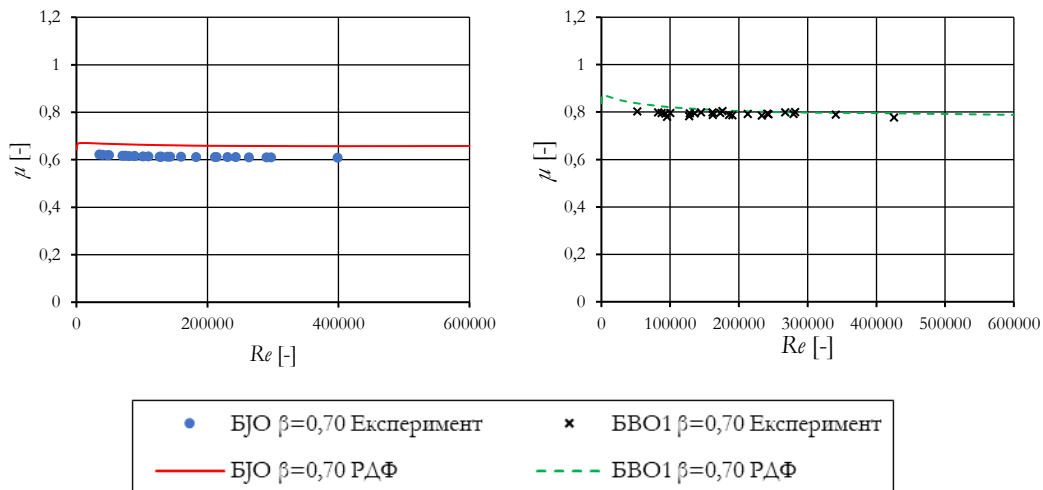
Слика 86 Конвергенција решења

4.2.2. Потврда модела

Након анализе квалитета генерисане мреже, урађена је и потврда (валидација) резултата симулације са експерименталним резултатима. Нумерички модел описан у поглављу 3.6.1 потврђен је резултатима експерименталних испитивања Ђурђевић *и остали* [79]. Потврда резултата симулација урађена је за БЈО и БВО1 са параметром $\beta=0,70$ што се може видети на слици 87. Као и при експерименталним испитивањима и овде се користио коефицијент пада притиска мерне бленде као параметар за поређење. Са усвојеним нумеричким моделом постигло се добро поклапање резултата симулације са резултатима експеримента. Различити аутори [6, 13, 35, 37, 39] који су нумерички истраживали мерне бленде постигли су одступање од око 8%, где је за потврду нумеричких симулација коришћен коефицијент протока μ са падом притиска као подкореном величином што се и може видети из једначине 2.1. За разлику од коефицијента протока μ у коефицијенту пада притиска ζ пад притиска није подкорена величина (једначина (3.1)) те је стога и разлика између резултата нумеричких симулација и експеримента већа када се коефицијент пада притиска ζ користити као параметар за поређење. Поређењем резултата коефицијента протока μ за коришћени нумерички модел са резултатима коефицијента протока μ добијених из експеримента, максимално одступање резултата је било 7,9% за БЈО, док је за БВО1 то одступање било 5,4% (слика 88). Посматрањем коефицијента протока као параметра за поређење добили су се резултати који одговарају резултатима доступним у литератури.



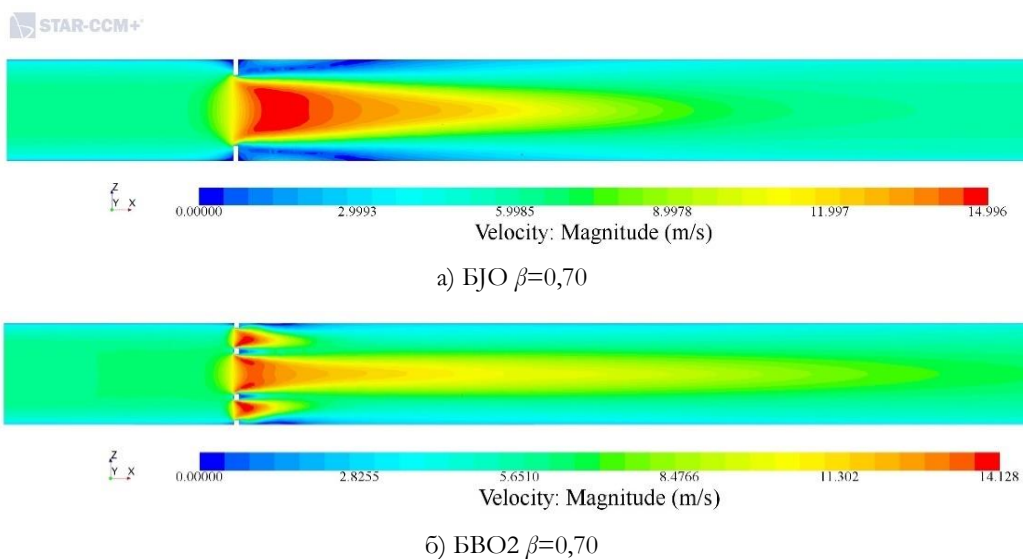
Слика 87 Поређење вредности коефицијента пада притиска добијених нумеричким симулацијама и експериментом



Слика 88 Поређење вредности коефицијента протока добијених нумеричким симулацијама и експериментом

4.2.3. Струјни параметри

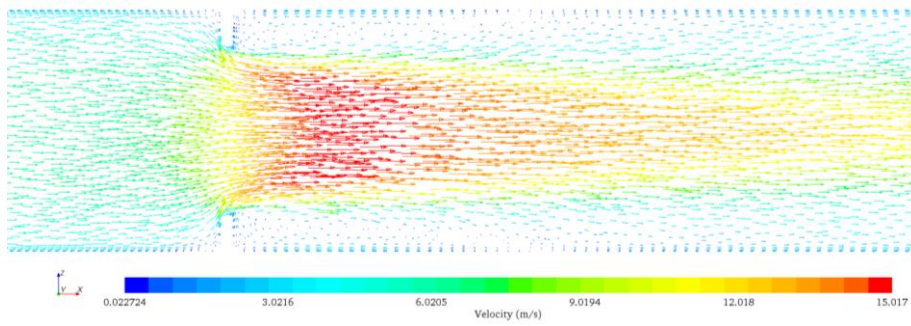
Након дефинисања, анализе и потврде нумеричког модела, што се могло видети у претходним поглављима, приступило се даљем истраживању струјања флуида (ваздуха) кроз мерне бленде применом рачунарске динамике флуида. Раније је речено да БЈО и БВО имају исте површине отвора али да БВО има равномернију расподелу отвора у поређењу са БЈО. Са слике 89 може се видети како геометрија БВО утиче на поље брзине при струјању флуида кроз мерну бленду. Са проласком флуида кроз БЈО ниструјно од мерне бленде се стварају велики вртлози док се код БВО ниструјно стварају мањи вртлози (слика 90).



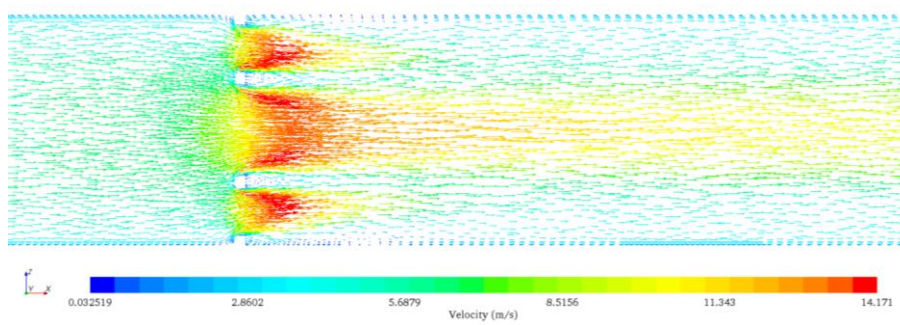
Слика 89 Равански приказ скаларног поља брзине мерних бленди БЈО и БВО ($\beta=0,70$ и $Re=70000$)

Профил брзина уструјно од мерне бленде исти је и за БЈО и БВО што се може и видети са слика 91 а) и 92 а). Брзине у попречном пресеку ниструјно од мерне бленде могу се видети на сликама 91 б) и 92 б). Са ових слика може се видети да БВО имају ниже вредности брзине струјања флуида у непосредној близини зида у поређењу са БЈО. Овакви трендови уочени су за све симулиране мерне бленде, те се може закључити да за мерне бленде са истим параметром β , БВО имају већи притисак ниструјно што доводи до мањег пада притиска код БВО. Мањи пад притиска код БВО у поређењу са БЈО забележили су и различити аутори у својим експериментални и нумеричким истраживањима [20, 21, 39, 67, 80].

На сликама 91 б) и 92 б) могу се видети расподела притиска у попречном пресеку цеви ниструјно од мерних бленди. Посматрајући расподелу притиска ниструјно од мерне бленде може се видети да она није равномерна код БВО, а нарочито у непосредној близини зида. Ово може бити веома важно приликом мерења пада притиска, посебно ако се она мерни са растојања $1 D$ и $1/2 D$ уструјно и ниструјно од мерне бленде, јер се у том случају мора водити рачуна о позиционирању отвора БВО у односу на позицију са које ће се мерити притисак ниструјно. Лоше позиционирање може довести до неадекватно измереног пада притиска, што индиректно води до нетачно одређеног протока.

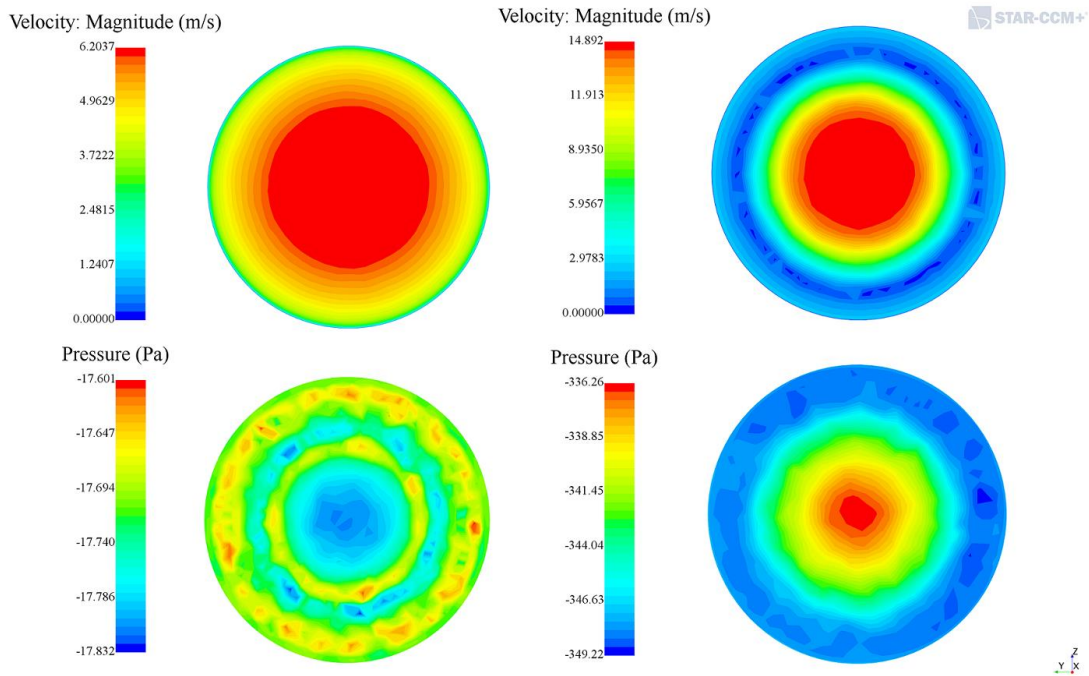


а) БЈО $\beta=0,70$



б) БВО2 $\beta=0,70$

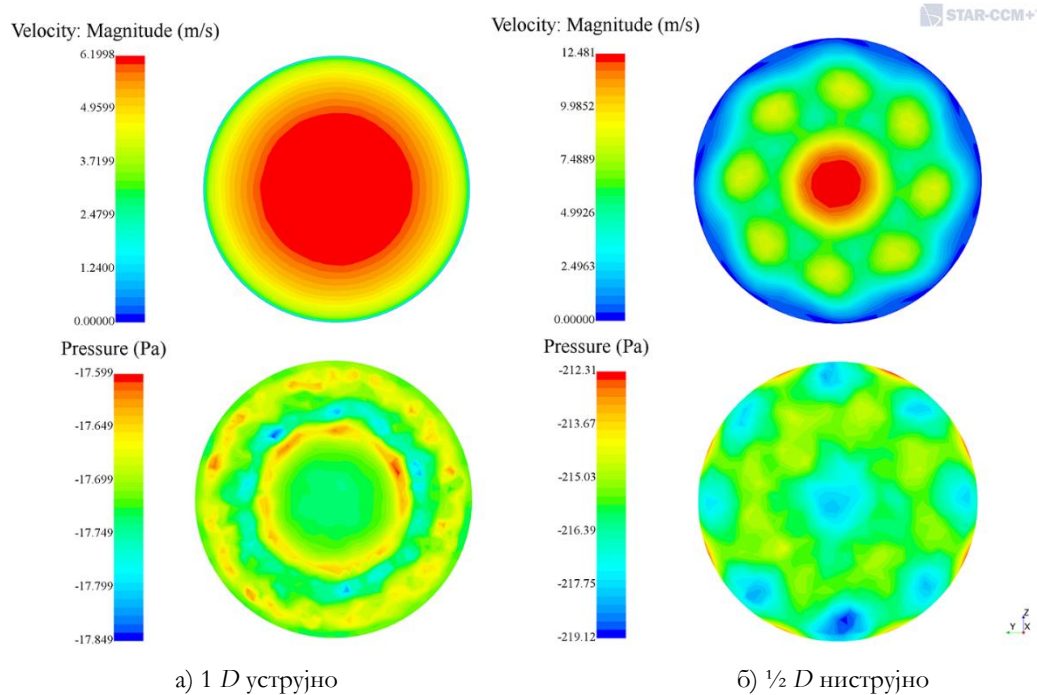
Слика 90 Равански приказ векторског поља брзине мерних бленди БЈО и БВО2 ($\beta=0,70$ и $Re=70000$)



а) 1 D уструјно

б) $\frac{1}{2}$ D ниструјно

Слика 91 Профил брзине и притиска у попречном пресеку за БЈО, ($\beta=0,70$ и $Re=70000$)



Слика 92 Профил брзине и притиска у попречном пресеку за БВО2, ($\beta=0,70$ и $Re=70000$)

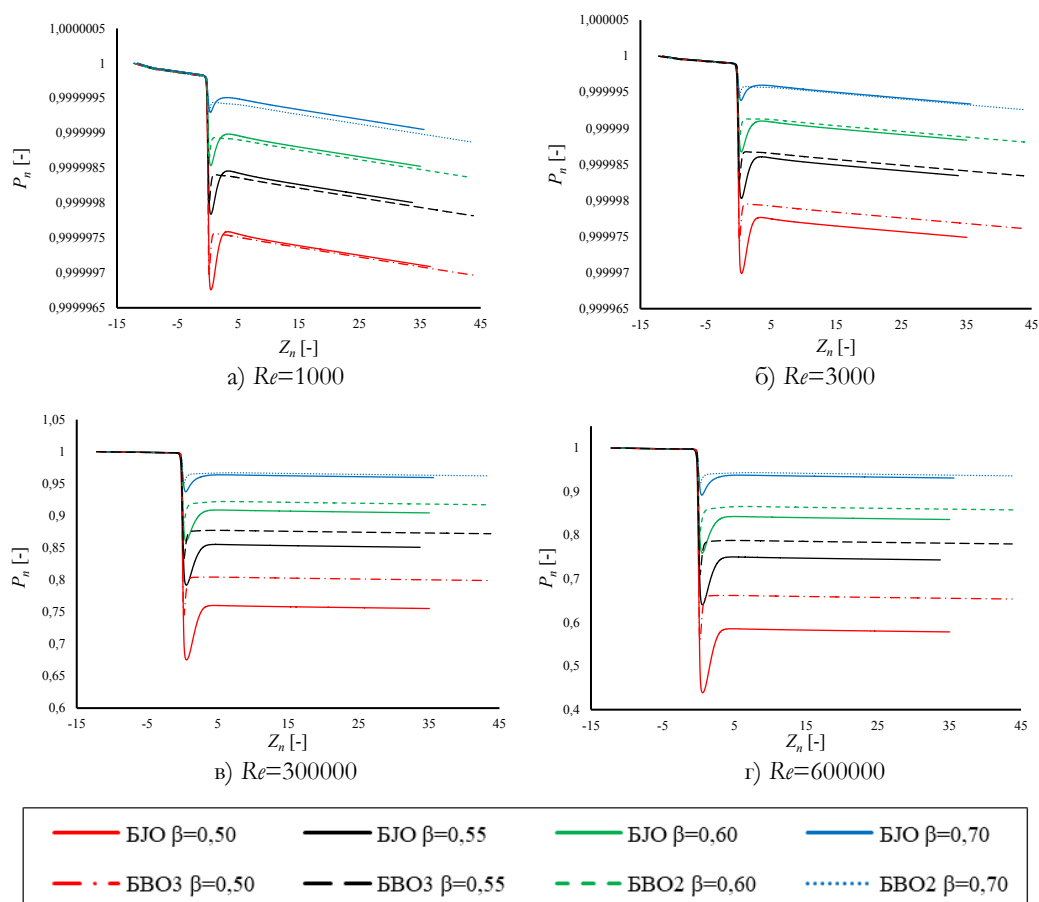
4.2.4. Поврат притиска

Графичким приказом поврата притиска гаса кроз мерну бленду (слика 93) могу да се анализирају:

- притисак гаса који се трајно изгуби кроз мерну бленду и
- притисак који се поврати иза мерне бленде.

Све БВО имале су бржи и већи поврат притиска у односу на БЈО за Рејнолдсове бројеве веће од 3000. У наставку ће се анализирати вредности поврата притиска кроз следеће мерне бленде: $\beta=0,50$ (БЈО и БВО3); $\beta=0,55$ (БЈО и БВО3); $\beta=0,60$ (БЈО и БВО2) и $\beta=0,70$ (БЈО и БВО2). Ове мерне бленде су претходном анализом РДФ резултата показале да имају оптималне пречнике подеоног круга тј. да имају најбоље коефицијенте пада притиска. При нижим Рејнолдсовим бројевима ($Re < 3000$) БЈО имале су већи поврат притиска, али БВО су и при овим Рејнолдсовим бројевима имале бржи поврат притиска. Са повећањем Рејнолдсовог броја на 3000 БВО са параметром β од 0,50, 0,55 и 0,60 имају незнатно већи поврат притиска од БЈО за исти параметар β , док БВО са β параметром од 0,70 још увек има мањи поврат притиска од БЈО за исти параметар β . При нижим Рејнолдсовим бројевима ($Re=500$, $Re=1000$, $Re=3000$ итд.) може се приметити да је поврат притиска значајан односно да се скоро целокупан притисак поврати након дужине деонице од $5 D$ до $10 D$ нистујно од мерне бленде, али је стопа поврата притиска незнатна. Поврат притиска за веће

Рејнолдсове бројеве је знатно већа за БВО у поређењу са БЈО при истим параметрима β .



Слика 93 Поврат притиска за БЈО и БВО са оптималном величином подеоног пречника

У табели 24 приказане су вредности поврата притиска као и побољшање поврата притиска БВО у поређењу са БЈО за више Рејнолдсове бројеве (200000, 300000, 600000). Са повећањем Рејнолдсовог броја поврат притиска се смањује. Највеће побољшање поврата притиска од 7,7% се може видети код БВОЗ за $\beta=0,50$ при Рејнолдсовом броју 600000, док се намање побољшање може видети код БВОЗ за $\beta=0,70$ при Рејнолдсовом броју 200000.

Табела 24 Поврат притиска за веће Рејнолдсове бројеве

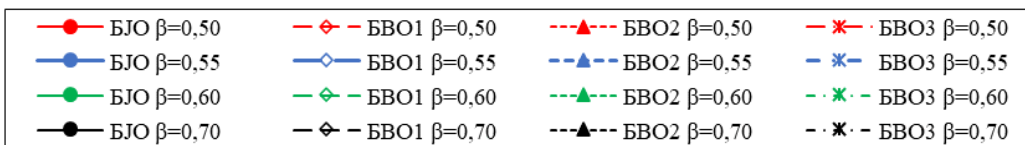
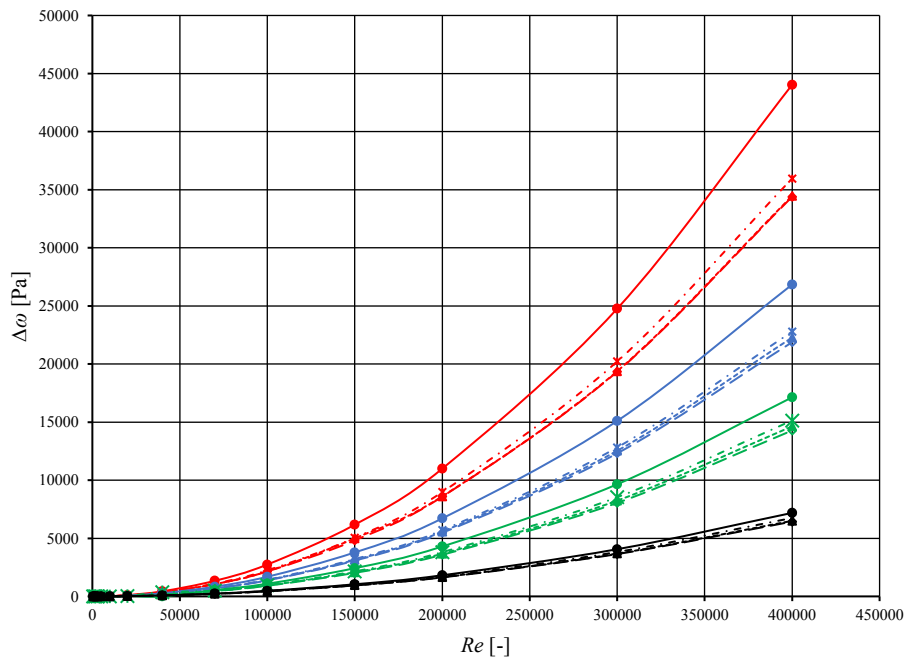
β [-]	Мерна бленда	Re		
		200000	300000	600000
0,50	БЈО	89,4%	76,1%	58,5%
	БВО3	91,3%	80,4%	66,2%
	Побољшање	1,9%	4,3%	7,7%
0,55	БЈО	93,6%	85,5%	75,1%
	БВО3	94,6%	87,7%	78,8%
	Побољшање	1,0%	2,2%	3,7%
0,60	БЈО	95,9%	90,9%	84,3%
	БВО2	96,5%	92,2%	86,6%
	Побољшање	0,7%	1,3%	2,3%
0,70	БЈО	98,3%	96,4%	93,8%
	БВО2	98,5%	96,7%	94,3%
	Побољшање	0,2%	0,3%	0,5%

4.2.5. Губитак притиска

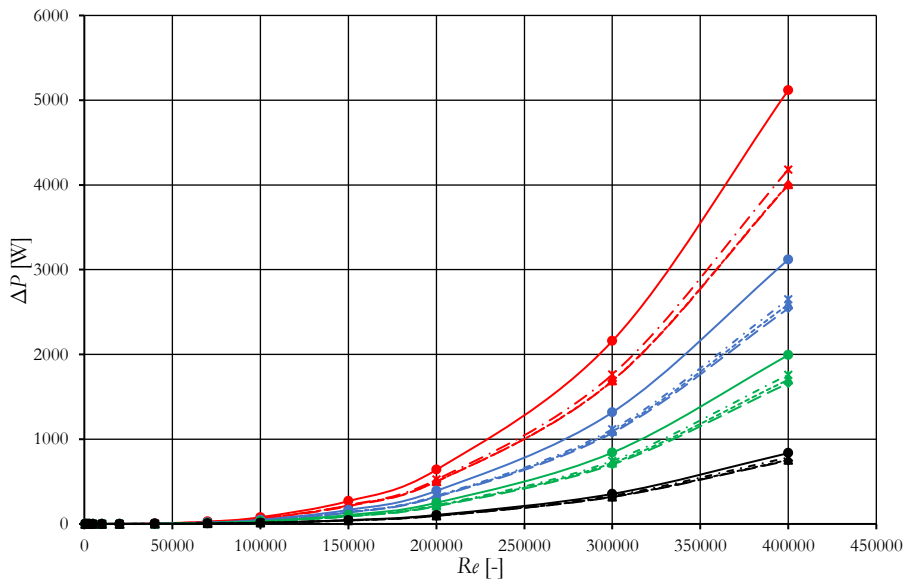
Слика 94 представља зависност губитака притиска од Рејнолдсовог броја преко целог рачунског домена. Са повећањем параметра β губитак притиска се смањивао док се са смањењем параметра β разлика у вредности губитка притиска између БЈО и БВО истих параметра β повећавала. За исте Рејнолдсове бројеве БЈО, $\beta=0,50$ је имала највећи губитак притиска док је БВО 1, $\beta=0,70$ имала најмањи губитак притиска од свих симулираних мерних бленди. Највеће смањење (побољшање) губитка притиска може се видети код БВО са параметром $\beta=0,50$, а најмање смањење (побољшање) код БВО са параметром $\beta=0,70$.

4.2.6. Губитак снаге

На слици 95 може се видети потрошња (губитак) снаге израчуната на основу једначине 3.16 за све симулиране мерне бленде. При нижим Рејнолдсовим бројевима губитак снаге идентичан је скоро за све симулиране мерне бленде, а тек при вишим Рејнолдсовим бројевима од 150000 могу се уочити разлике. Код свих симулираних мерних бленди може да се уочи да са повећањем Рејнолдсовог броја и смањењем β расте губитак снаге. Исто тако може се видети да су бленде са истим параметром β , БВО имале мањи губитак снаге од БЈО. Губитак снаге од 2158,82 W за БЈО $\beta=0,50$ при Рејнолдсовом броју од 300000 приближан је губитку снаге БВО1 $\beta=0,55$ од 2543,26 W при Рејнолдсовом броју од 400000. Из овога се може извући закључак да БВО са већим β при већим Рејнолдсовим бројевима имају приближно исти губитак снаге као БЈО са мањим β при нижим Рејнолдсовим бројевима.



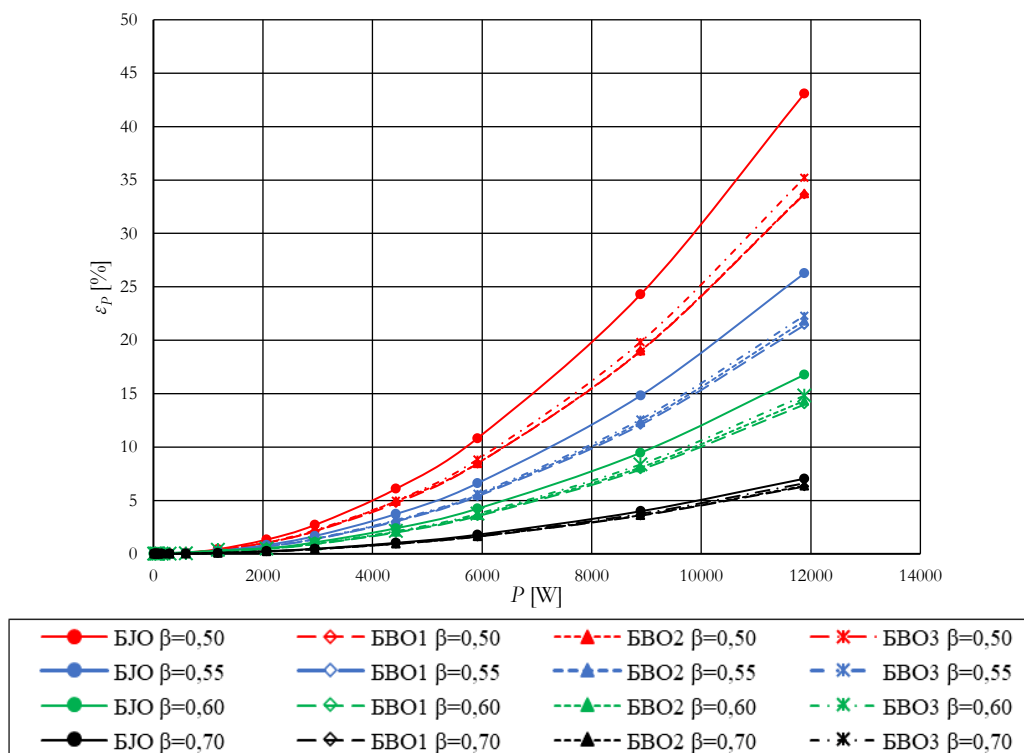
Слика 94 Зависност губитка притиска и Рејнолдсовог броја



Слика 95 Губитак снаге

4.2.7. Релативни губитак снаге

На слици 96 представљен је релативни губитак снаге израчунат на основу једначина (3.17) и (3.18) као функција флуидне (струјне) снаге. Из овог дијаграма може се видети која је од симулираних мерних бленди најефикаснија у гасовитим флуидима. Релативни губитак снаге најмањи је за мерне бленде (БЈО и БВО) са параметром $\beta=0,70$, а највећи за мерне бленде (БЈО и БВО) са параметром $\beta=0,50$. Са повећањем флуидне (струјне) снаге повећава се и релативни губитак снаге, док се са повећањем параметра β релативни губитак снаге смањује. Посматрајући мерне бленде са истим параметром β , БВО су имале мањи релативни губитак снаге од БЈО и ово је био случај за све симулиране мерне бленде. Највећа уштеда снаге може се приметити код мерних бленди са параметром $\beta=0,50$ где је БВО1 имала релативан губитак снаге од 33,72% у поређењу са релативним губитком снаге БЈО од 43,08%. Са друге стране најмању уштеду снаге имале су мерне бленде са параметром $\beta=0,70$ где је БВО1 имала релативан губитак снаге од 6,29% у поређењу са релативним губитком снаге БЈО од 7,03%. Распоред мањих отвора тј. величина подеоног круга није значајније утицао на релативни губитак снаге код свих симулираних мерних бленди. Енергетска ефикасност БВО може се првенствено приписати геометрији БВО (слика 34 и Прилог 1) која има равномернији распоред отвора у поређењу са једним централним отвором код БЈО.

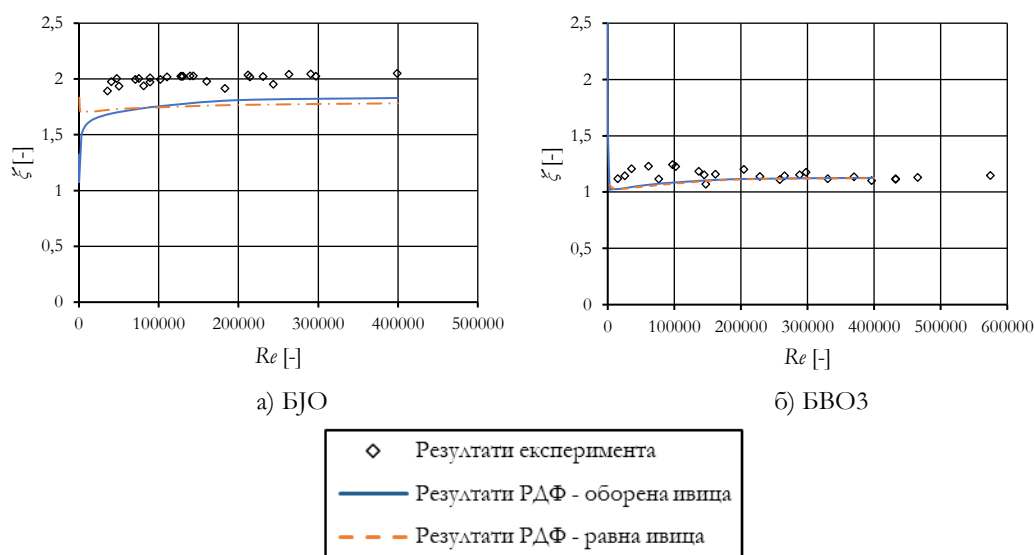


Слика 96 Релативни губитак снаге

4.2.8. Утицај оборене ивице мерне бленде

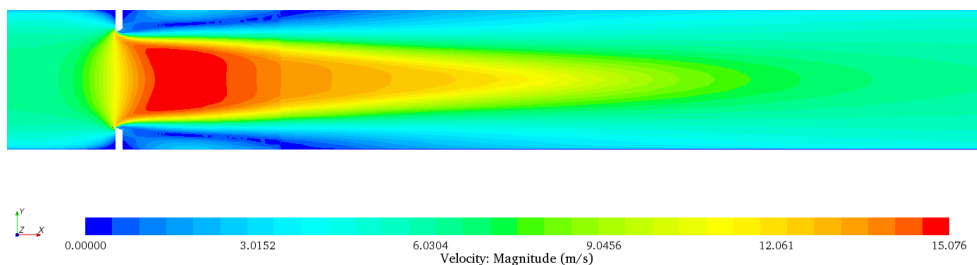
Како је раније наведено у поглављу 3.6 у нумеричким моделима урађене су геометријске апроксимације ради лакше симулације. Ове апроксимације могу да доведу до одређеног одступања вредности пада притиска од стварно измерених вредности. Због тога је нумеричким истраживањима био обухваћен и утицај геометрије мерне бленде, тј. угла излазне ивице мерне бленде на коефицијент пада притиска ζ . Да би се симулирала оборена ивица приликом генерисања рачунске мреже примењена је техника локалног уситњавања мреже.

На слици 97 виде се експериментални и нумерички резултати коефицијента пада притиска. Резултати нумеричких симулација БЈО и БВОЗ ($\beta=0,70$) са обореном и равном излазном ивицом отвора упоређени су са експерименталним резултатима. Код БВОЗ види се (слика 97 б) да разматрани угао излазне ивице нема утицај на вредност коефицијент пада притиска. За разлику од БВОЗ, на БЈО разматрани угао излазне ивице има утицај (слика 97 а). Резултати мерне бленде са обореном ивицом мање одступају од експерименталних резултата у поређењу са резултатима мерне бленде са равном ивицом. Са обореним углом излазне ивице постигло се побољшање резултата од 2,96 % у односу на резултате нумеричких симулација са равном излазном ивицом мерне бленде. На основу ових резултата из графичког приказа може се закључити да код БВО нумеричке симулације могу да се раде уз апроксимацију угла излазне ивице мерне бленде. На овај начин поједностављује се рачунска мрежа и смањује време потребно за извршење симулације.

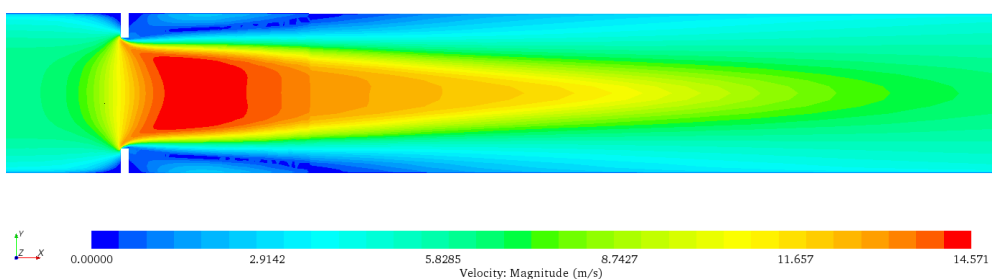


Слика 97 Поређење вредности коефицијента пада притиска добијених нумеричким симулацијама мерних бленди са обореном и равном ивицом са резултатима експеримента

Равански приказ скаларног поља брзина за мерне бленде са равном ивицом и обореном ивицом види се на слици 98. Контуре брзине, како за оборену ивицу, тако и за равну ивицу могу се сматрати идентичним, али се незнатно већа аксијална брзина могла приметити код мерне бленде са обореном ивицом.



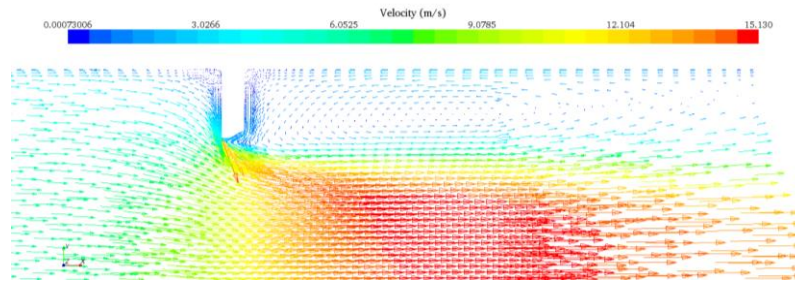
а) БЈО са обореном ивицом, ($\beta=0,70$ и $Re=70000$)



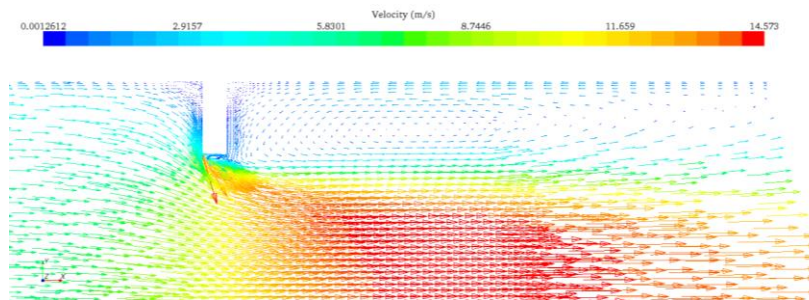
б) БЈО са равном ивицом, ($\beta=0,70$ и $Re=70000$)

Слика 98 Равански приказ скаларног поља брзине

Слично као код приказа скаларног поља ни приказ векторског поља није показао нека значајнија одступања у струјној слици између мерне бленде са обореном ивицом и са равном ивицом (слика 99). И код приказа векторског поља могло се видети да су максимални вектори брзина код мерних бленди са обореном ивицом незнатно већи него они код мерне бленде са равном ивицом.



а) БЈО са обореном ивицом, ($\beta=0,70$ и $Re=70000$)

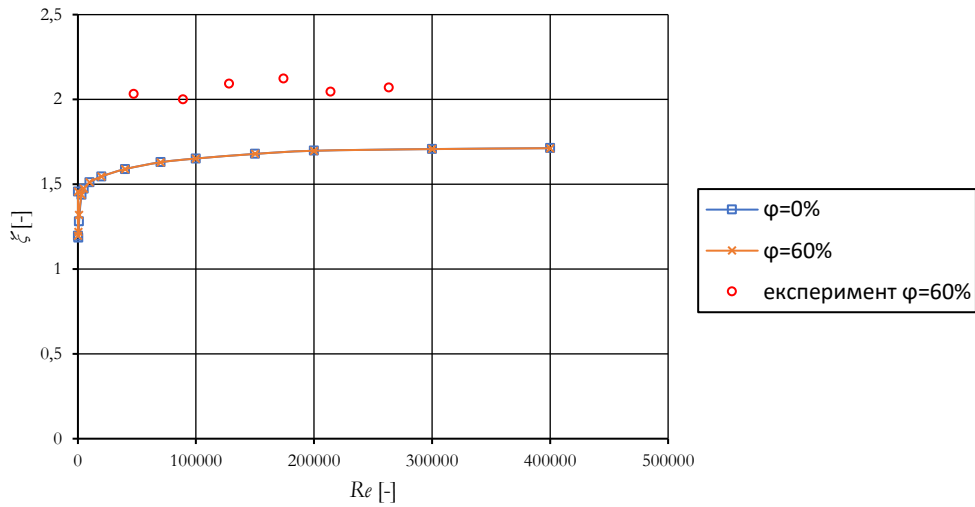


б) БЈО са равном ивицом, ($\beta=0,70$ и $Re=70000$)

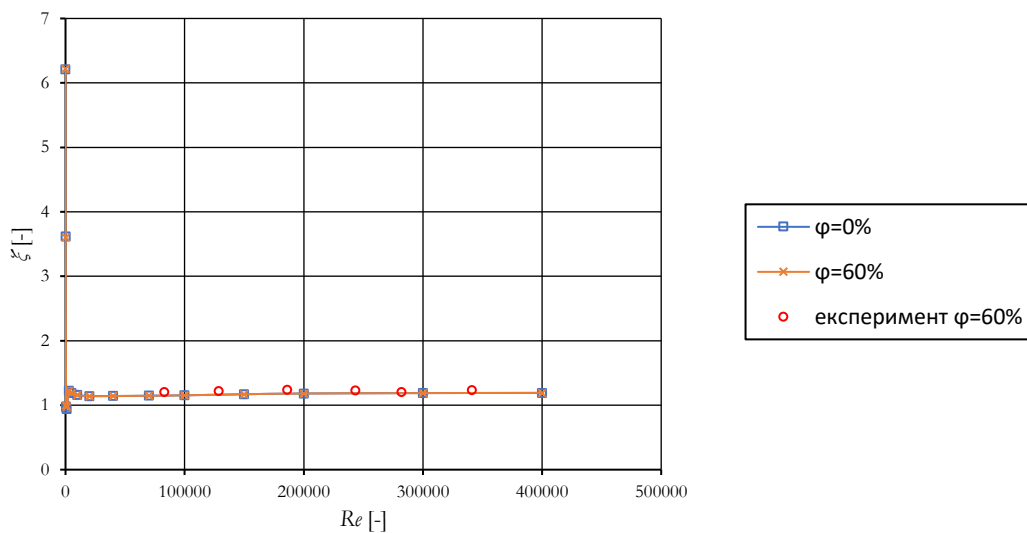
Слика 99 Равански приказ векторског поља брзине

4.2.9. Утицај влажности гаса

Чест је случај у индустријским инсталацијама да ваздух који се користи као радни флуид није у потпуности сув, већ садржи одређени проценат влажности. Утицај влажности на тачност мерења протока мерном блендом испитан је помоћу РДФ. Како је наведено у поглављу 3.4 утицај влажности на тачност мерења проверена је помоћу густине ваздуха и вискозности која се мењала у зависности од процента влажности ваздуха. Поред промене густине у симулацијама се мењала и вискозност ваздуха до чије промене такође долази услед различитих степена влажности ваздуха. Слика 100 приказује коефицијенте пада притиска БЈО ($\beta=0,70$) за релативну влажност ваздуха 0% и 60% док се на слици 101 види све исто али за БВО1 ($\beta=0,70$). Резултати нумеричких симулација за релативну влажност ваздуха од 60% упоређени су са резултатима експерименталних испитивања за исту релативну влажност. Одступања резултата нумеричких симулација од резултата експерименталних испитивања за релативну влажност ваздуха од 60% било је у границама као и приликом потврде нумеричког модела. Са ових слика се види да влажност ваздуха занемарљиво утиче на коефицијент пада притиска ξ , а тиме и на тачност мерења мерном блендом. При нижим Рејнолдсовим бројевима Re (500 и 1000) одступања су до максимално 3,2%, док је при Рејнолдсовим бројевима $Re > 1000$ највеће одступање 0,3%.



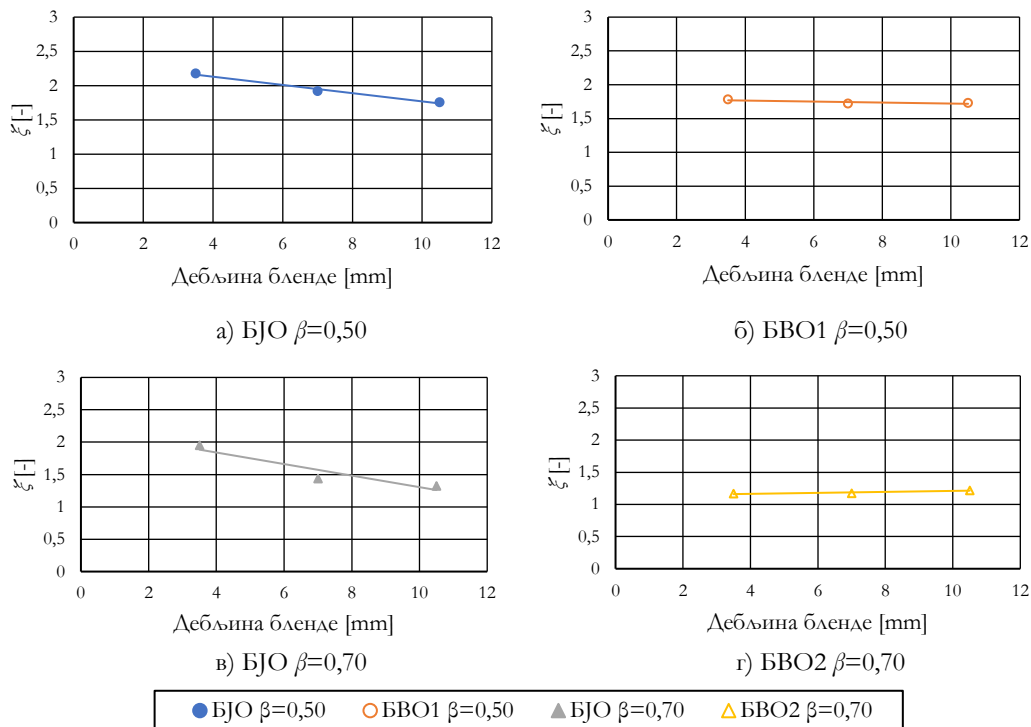
Слика 100 Вредности коефицијента пада притиска добијене експериментом и нумеричким путем за различите релативне влажности БЈО ($\beta=0,70$)



Слика 101 Вредности коефицијента пада притиска добијене експериментом и нумеричким путем за различите релативне влажности БВО1 ($\beta=0,70$)

4.2.10. Утицај дебљине мерне бленде

Дебљина конвенционалне мерне бленде дефинисана је стандардом SRPS EN ISO 5167-2:2012 и мора да буде у границама од e до $0,05 D$. У оквиру докторске дисертације испитан је утицај дебљине мерних бленди на коефицијент пада притиска. Три различите дебљине мерних бленди (3,5, 7 и 10,5 mm) су испитане од чега су две дебљине веће од стандарда дефинисане.



Слика 102 Утицај дебљине мерне бленде на коефицијент пада притиска

Слика 102 приказује утицај дебљине мерне бленде на коефицијент пада притиска за $\beta=0,50$ (БЈО и БВО1) и $\beta=0,70$ (БЈО и БВО2). Са слике се види да дебљина мерне бленде више утиче на БЈО него на БВО. Смањење од 19,35% у коефицијенту пада притиска види се код БЈО $\beta=0,50$ (слика 102, а) док смањење од 32% код БЈО $\beta=0,70$ (слика 102, в). Утицај дебљине мерне бленде на коефицијент пада притиска код БВО је занемарљив.

4.2.11. Утицај локалних отпора

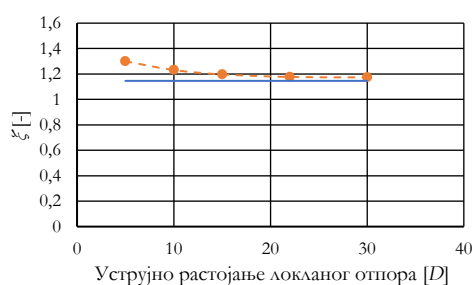
Локални отпори у виду цевоводне арматуре јављају се у многим индустријским постројењима, а како је већ раније наведено овакви локални отпори значајно могу да утичу на тачност мерења мерном блендом. Стандард SRPS EN ISO 5167-2:2012 има препоручене дужине деоница између локалног отпора и мерне бленде како уструјно тако и ниструјно, а тренутно ни један стандард нема препоруке за дужине деоница између локалних отпора и БВО. Управо због тога у наставку, у складу са методологијом дефинисаном у поглављу 3.6.1 биће приказани резултати нумеричких симулација мерне бленде (БВО1, $\beta=0,70$) са локалним отпорима присутним како уструјно тако и ниструјно од мерне бленде.

Препоручено растојање између уструјног локалног отпора (колена од 90°) и мерне бленде по стандарду SRPS EN ISO 5167-2:2012 је $44 D$ за „нулту“ мерну несигурност, док је за проширену мерну несигурност од 0,5% то растојање $20 D$

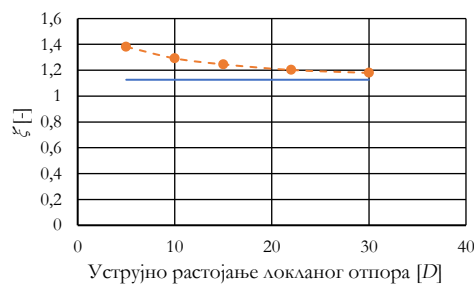
за мерне бленде са β параметром 0,67 и 0,75. На слици 103 приказани су резултати нумеричких симулација БВО1 ($\beta=0,70$) где се може видети утицај растојања уструјног локалног отпора на коефицијент пада притиска за различите вредности Рејнолдсових бројева. Резултати за коефицијент пада притиска БВО1 за референтну равну деоницу која нема локалних отпора (укупна уструјна дужина је $44 D$ и додата дужина локалног отпора) упоређени су са резултатима коефицијент пада притиска БВО1 за различита уструјна растојања локалног отпора.

Са повећањем Рејнолдсовог броја, коефицијент пада притиска смањивао се као што се смањивао и са повећањем дужине деонице између мерне бленде и уструјног локалног отпора. Скоро за све Рејнолдсове бројеве (сем $Re=1000$) на растојању уструјног локалног отпора од $30 D$ резултати коефицијента пада притиска били су исти као и резултати за референтну деоницу без локалног отпора дужине $44 D$. На основу овога може се закључити да се дужином уструјне деонице од $30 D$ може занемарити утицај уструјног локалног отпора за мерну БВО1 ($\beta=0,70$).

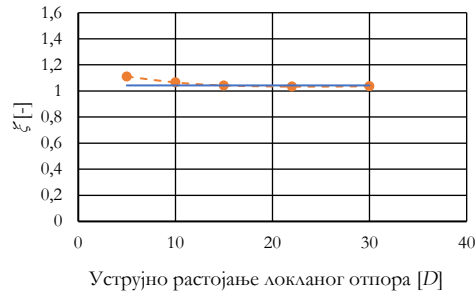
Како је раније било наведено са повећањем растојања уструјног локалног отпора и мерне бленде коефицијент пада притиска се смањује тј. приближава коефицијенту пада притиска за референтну равну деоницу без уструјног локалног отпора. Што је растојање између уструјног локалног отпора и мерне бленде мање веће је одступање коефицијента пада притиска од вредности за референтну равну деоницу без локалног отпора. Ово одступање при мањим растојањима уструјног локалног отпора веће је при ламинарном режиму струјања ($Re=500$ и $Re=1000$). За турбулентне режиме струјања одступање при мањим растојањима уструјног локалног отпора је мање, па тако за $Re=600000$ одступање на растојању од $5 D$ је 6,11%, док је одступање за $Re=1000$ на $5 D$ 22,6%.



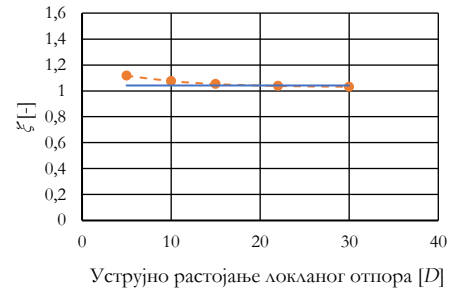
а) $Re=500$



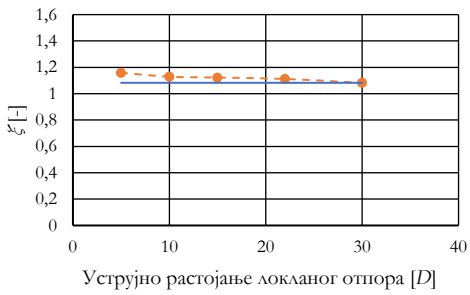
б) $Re=1000$



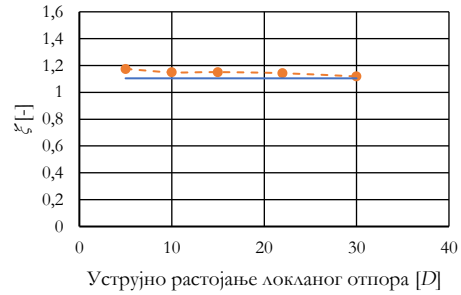
в) $Re=5000$



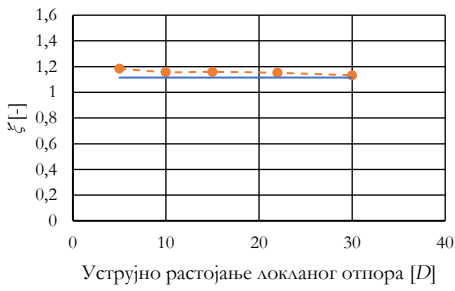
г) $Re=10000$



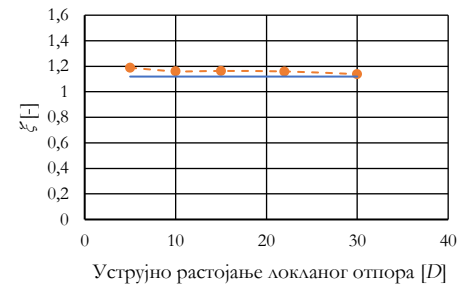
а) $Re=50000$



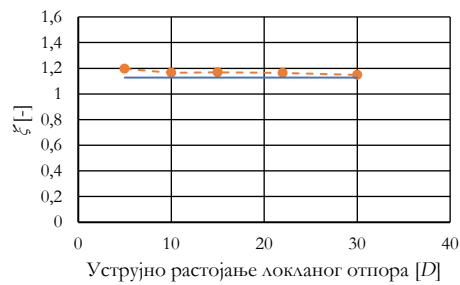
б) $Re=100000$



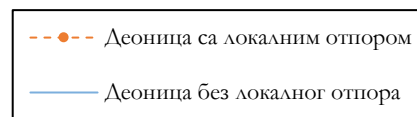
е) $Re=200000$



ж) $Re=300000$



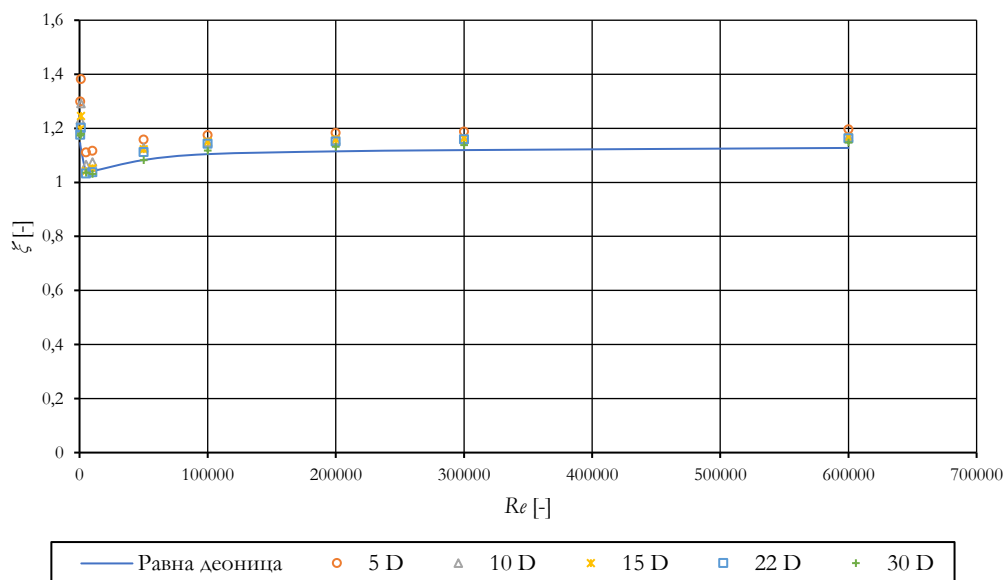
з) $Re=600000$



Слика 103 Утицај растојања уструјног локланог отпора на коефицијент пада притиска

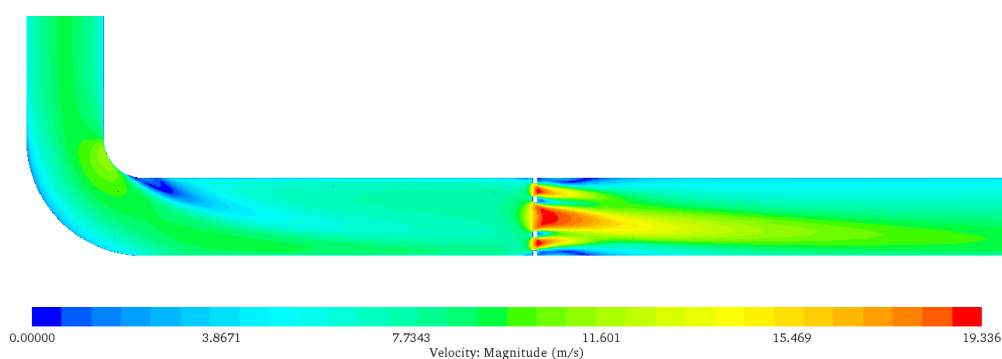
На слици 104 може се видети зависност коефицијента пада притиска од Рејнолдсовог броја за различите дужине деоница између уструјног локалног отпора и мерне бленде. Најмањи коефицијент пада притиска могао се

приметити за референтну равну деоницу. Са повећањем растојања између уструјног локалног отпора и мерне бленде коефицијент пада притиска се смањивао и скоро поклопио са вредностима коефицијента пада притиска за референтну равну деоницу.



Слика 104 Утицај растојања уструјног локалног отпора на коефицијент пада притиска

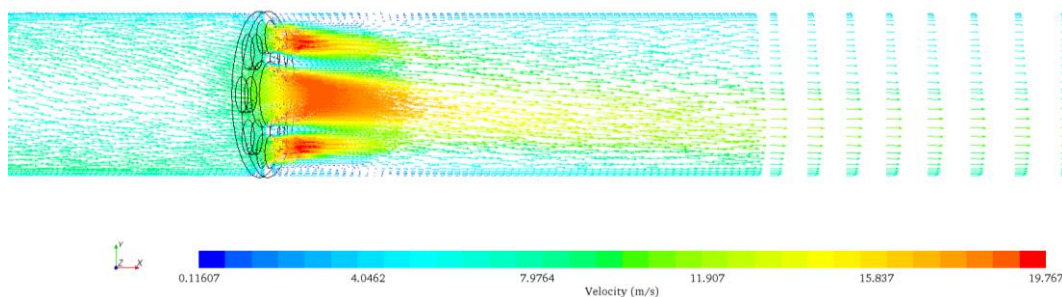
Равански приказ скаларног поља брзине на деоници са уструјним локалним отпором на растојању од $5 D$ се види на слици 105. Поремећај флуидне струје настаје непосредно после локалног отпора али је непосредно пре мерне бленде дошло до смањења поремећаја што се види са приказа векторског поља брзине (слика 106) и струјнице¹⁴ брзине (слика 107).



Слика 105 Равански приказ скаларног поља брзине на деоници са уструјним локалним отпором на растојању $L_1=5 D$

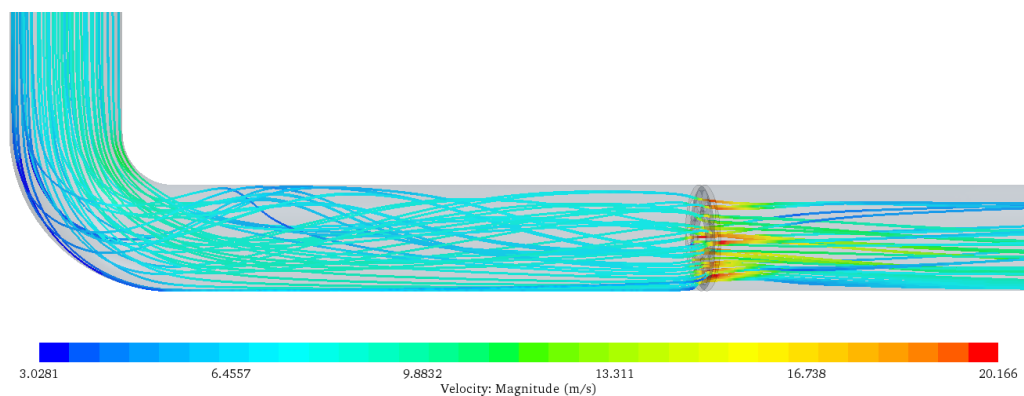
¹⁴ Струјнице су zamiшљене линије којима се крећу честице флуида. То су у ствари линије којима је брзина струјања флуидног дељића тангента у сваком временском интервалу.

Приказ векторског поља брзине струјања флуида није показао велике вртлоге или поремећаје који значајније одступају од слике приказа векторског поља брзине струјања флуида кроз мерну бленду на деоници без локалног отпора (слика 90). Једино одступање које се може приметити је да млаз који настаје на изласку из мерне бленде није у потпуности симетричан и померен је у правцу Y осе у смеру супротном од положаја локалног отпора.



Слика 106 Векторски приказ брзине на деоници са уструјним локалним отпором на растојању $L_1 = 5 D$

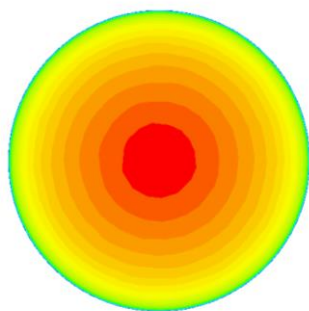
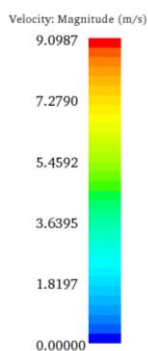
Како је ово струјање стационарно, приказом струјница у ствари се приказује путања честица флуида. Оваквим приказом могли су се видети поремећаји у струјању флуида насталих услед уструјног локалног отпора, као и путања флуидних честица кроз мерну бленду.



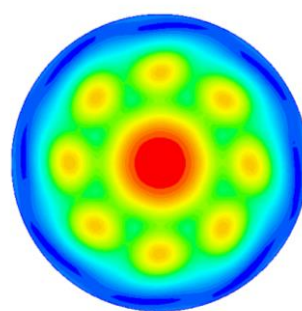
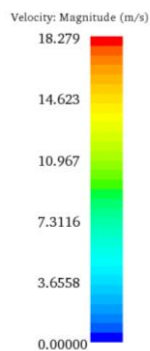
Слика 107 Скаларно поље брзине приказано путем струјница на деоници са уструјним локалним отпором на растојању $L_1 = 5 D$

Брзине у попречним пресецима $1 D$ уструјно и $1/2 D$ ниструјно од мерне бленде за различите положаје уструјног локалног отпора се виде на слици 108. Утицај локалног уструјног отпора се види на скаларном приказу брзине на уструјном растојању $1 D$ од мерне бленде. Поремећаји које је створио локални отпор утицали су да профил брзине непосредно пре мерне бленде не буде униформан као што је то случај био за референтну равну деоницу без локалног отпора. Са повећањем растојања између уструјног локалног отпора и мерне бленде

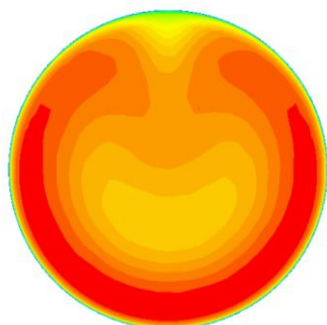
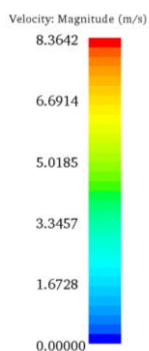
скаларно поље брзине на растојању уструјно од $1 D$ и ниструјно од $\frac{1}{2} D$ постаје више симетрично и стабилније. На ниструјном попречном пресеку слика скаларног поља б) се на много краћем растојању између локалног отпора и мерне бленде усталила у поређењу са сликом скаларног поља а) уструјног попречног пресека.



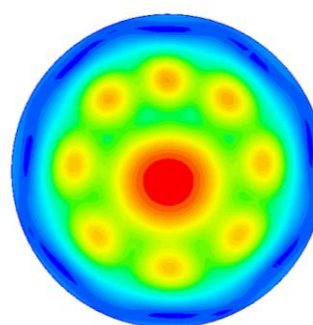
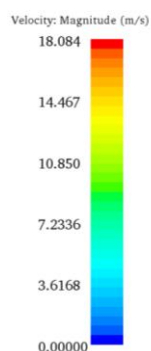
Равна деоница



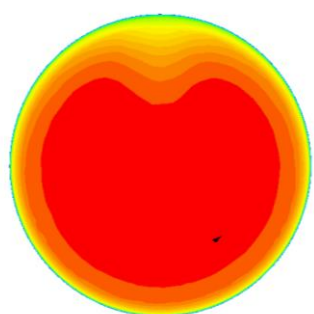
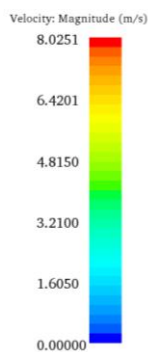
Равна деоница



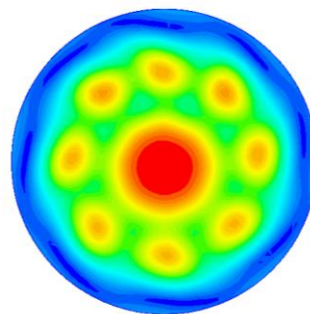
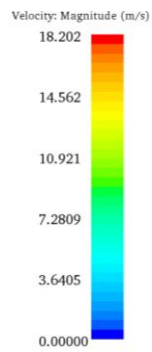
$L_1=5 D$



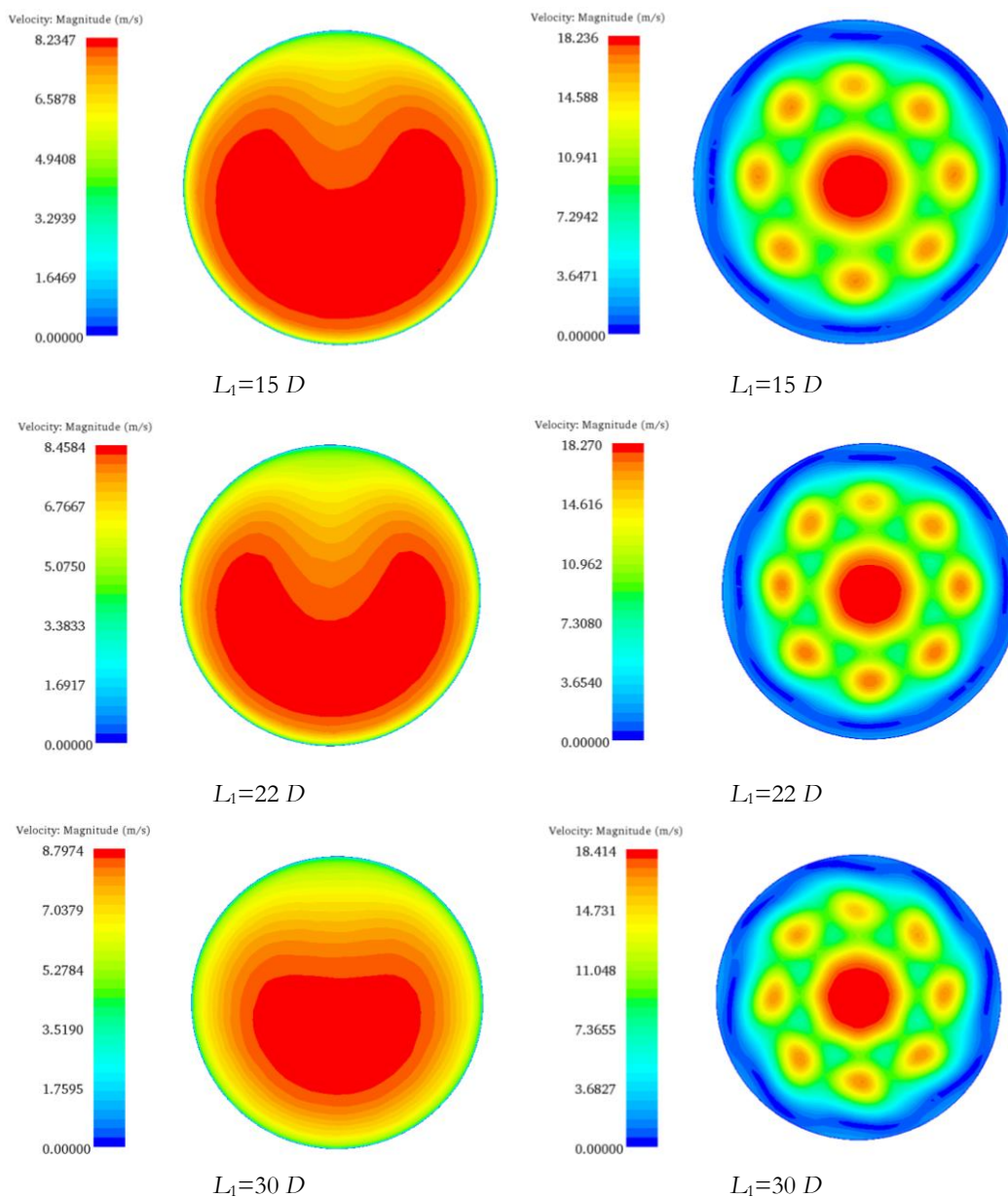
$L_1=5 D$



$L_1=10 D$



$L_1=10 D$



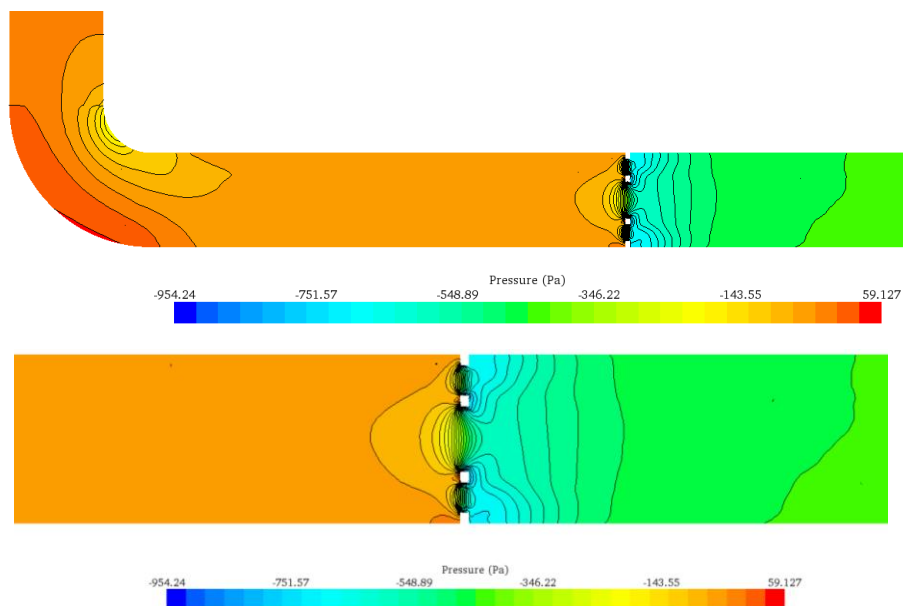
а) Попречни пресек уструјно од мерне
бленде на растојању $1 D$

б) Попречни пресек ниструјно од мерне
бленде на растојању $\frac{1}{2} D$

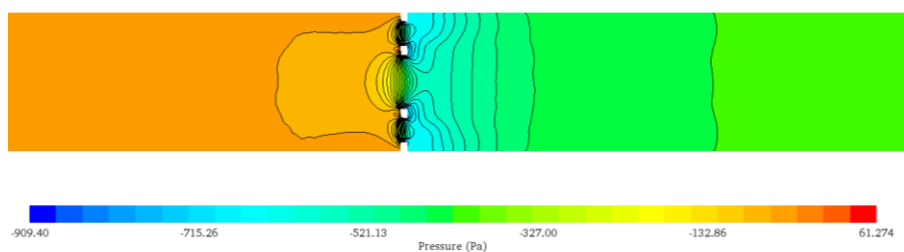
Слика 108 Приказ скаларног поља брзине у попречном пресеку за различите дужине деоница између уструјног локалног отпора и мерне бленде, $Re=100000$

Са слике 109 која приказује поље притиска на уздужном пресеку се види да уструјни локални отпор нема значајнији утицај на поље притиска у уздужном пресеку непосредно иза мерне бленде тј. на растојању $\frac{1}{2} D$ ниструјно од мерне бленде нема значајнијих промена у односу на равну деоницу без локалног отпора (слика 110). За разлику од поља притиска ниструјно од мерне бленде на пољу притиска уструјно од мерне бленде се види одступања поређењем деоница

са локалним отпором (слика 109) и деонице без локалног отпора (слика 110). На референтној равној деоници много веће је поље нижег притиска непосредно пре мерне бленде.



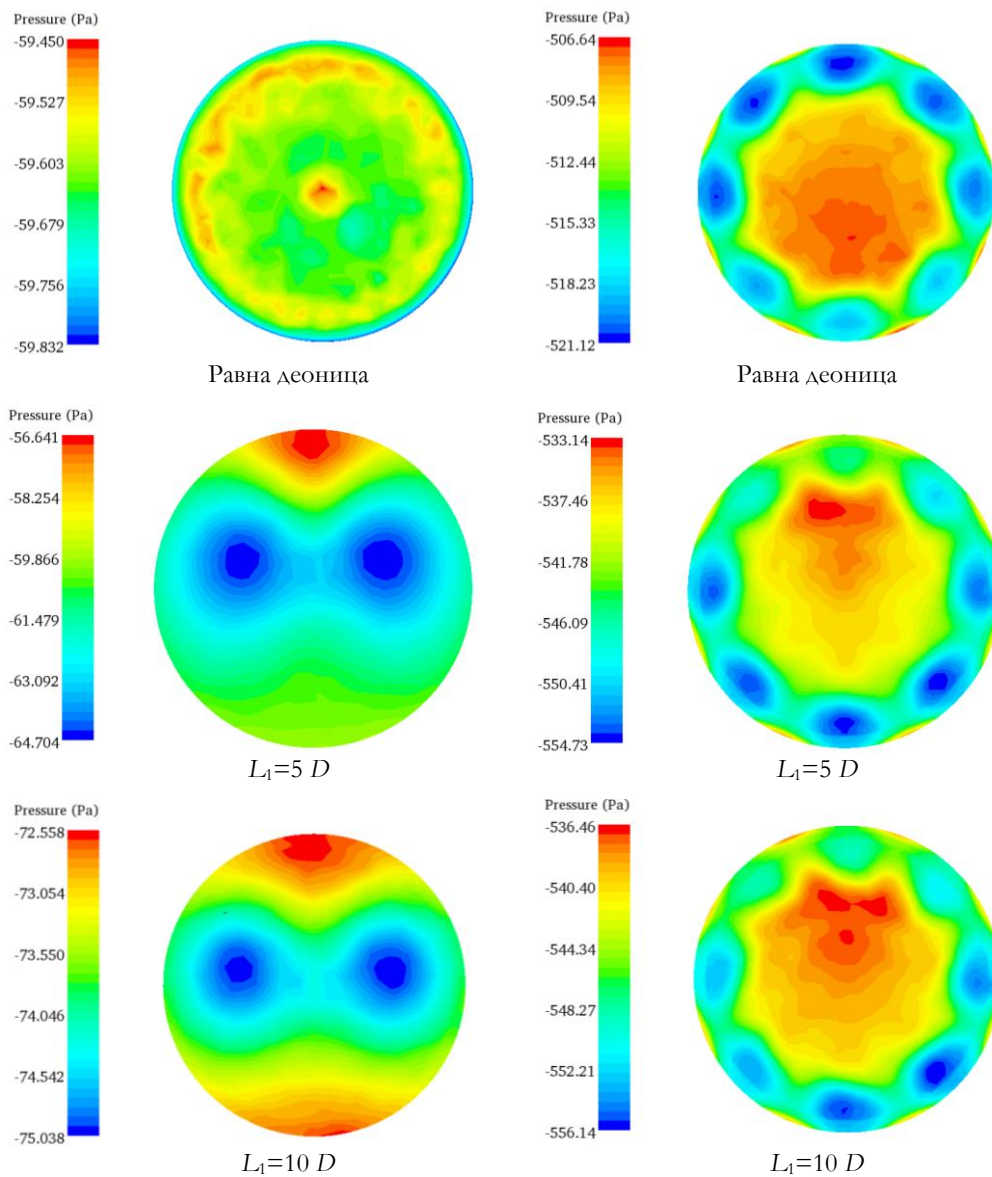
Слика 109 Поље притиска на деоници са уструјним локалним отпором на растојању $L_1 = 5 D$

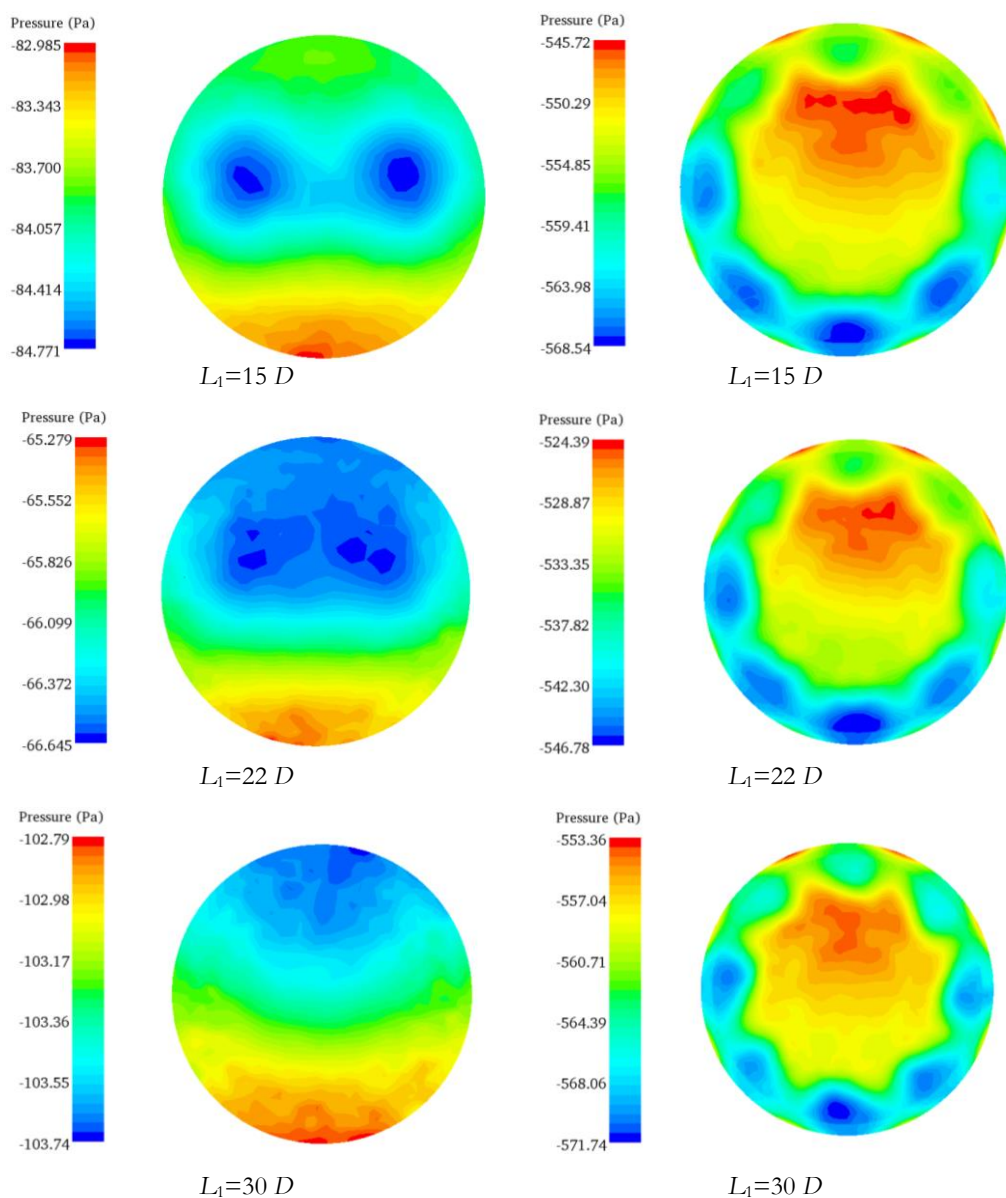


Слика 110 Поље притиска на референтној равној деоници

На слици 111 се види скаларно поље притиска у попречном пресеку цеви уструјно $1 D$ и ниструјно $\frac{1}{2} D$ од мерне бленде за различита растојања уструјног локалног отпора L_1 . Са слике се види да локални отпор значајно утиче на расподелу притиска како уструјно тако и ниструјно. Са повећањем дужине деонице између локалног отпора и мерне бленде скаларно поље притиска у попречном пресеку на растојању $\frac{1}{2} D$ ниструјно постаје више симетрично и устаљено тј. више личи на скаларно поље притиска на истом растојању за референтну равну деоницу. Иако разлике у притиску нису толико велике, нарочито на уструјним попречним пресецима мора се обратити пажња на којим позицијама ће се мерити пад притиска, јер може доћи до великих одступања приликом одређивања протока.

Управо због тога резултати приказани на слици 103 одговарају вредностма притиска на позицијама $1 D$ уструјно и $\frac{1}{2} D$ ниструјно рачунатим као осредњене вредности притиска на површинама попречног пресека удаљених $1 D$ уструјно и $\frac{1}{2} D$ ниструјно од мерне бленде. На овај начин се неравномерна расподела притиска могла узети у обзир.





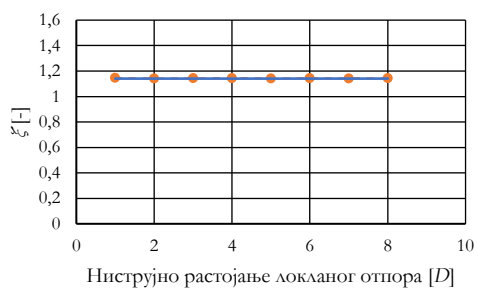
а) Попречни пресек уструјно од мерне
бленде на растојању $1 D$

б) Попречни пресек ниструјно од мерне
бленде на растојању $\frac{1}{2} D$

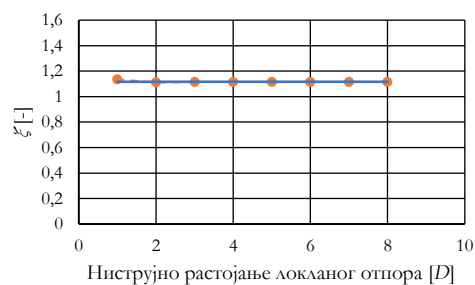
Слика 111 Равански приказ скаларног поља притиска нормалног на правац струјања за различите дужине деоница L_1 , ($Re=100000$)

Слично као и за уструјне локалне отпоре стандарда SRPS EN ISO 5167-2:2012 има препоруке за дужине равних деоница између мерне бленде и ниструјних локалних отпора. За мерне бленде са β параметром 0,75 ова дужина је $8 D$ за нулту мерну несигурност, док је за проширену мерну несигурност од 0,5 % та дужина $4 D$. Слично као и за уструјне локалне отпоре на слици 112 приказани су резултати нумеричких симулација мерне БВО1 ($\beta=0,70$) где се може видети утицај растојања ниструјног локалног отпора на коефицијент пада притиска за

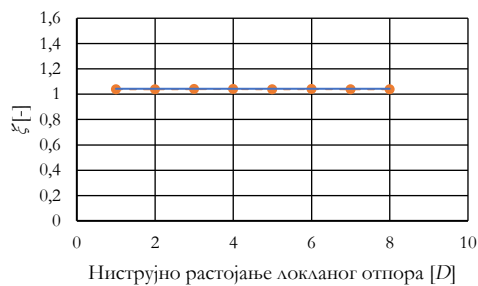
различите Рејнолдсове бројеве. За разлику од уструјних локалних отпора, ниструјни локални отпори имају занемарљив утицај на коефицијент пада притиска. На основу резултата нумеричких симулација може се сматрати да локални ниструјни отпори немају утицај на коефицијент пада притиска.



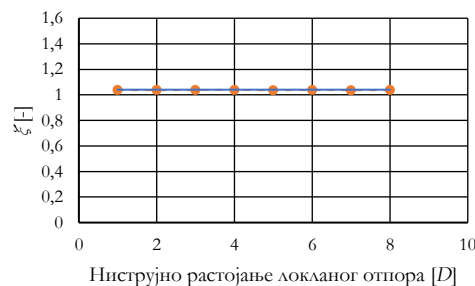
а) $Re=500$



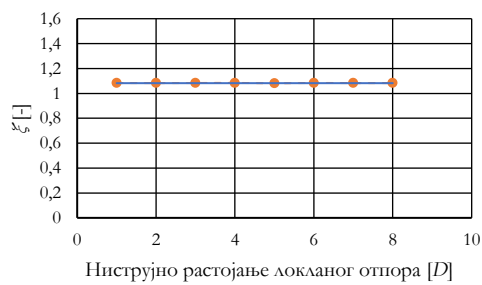
б) $Re=1000$



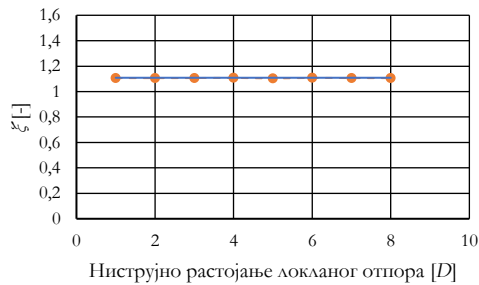
в) $Re=5000$



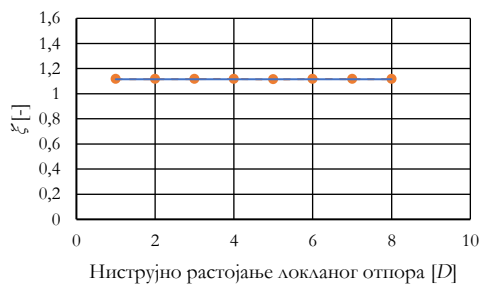
г) $Re=10000$



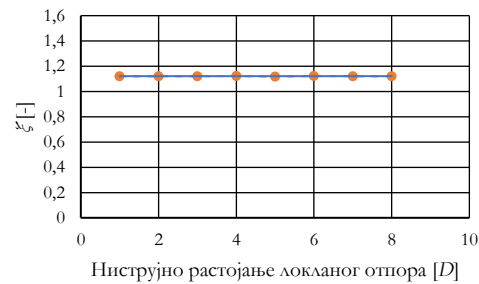
д) $Re=50000$



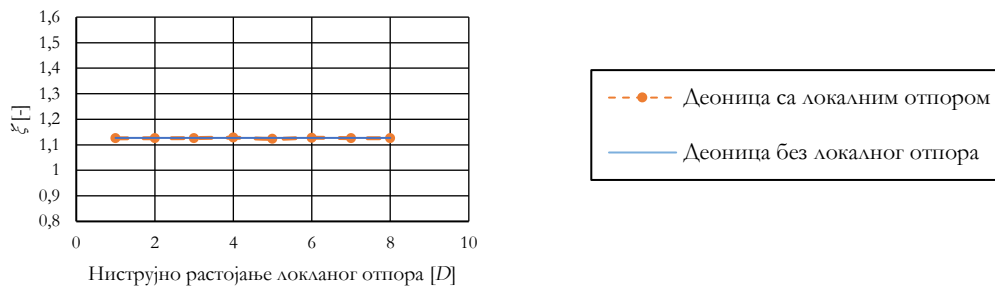
ж) $Re=100000$



з) $Re=200000$



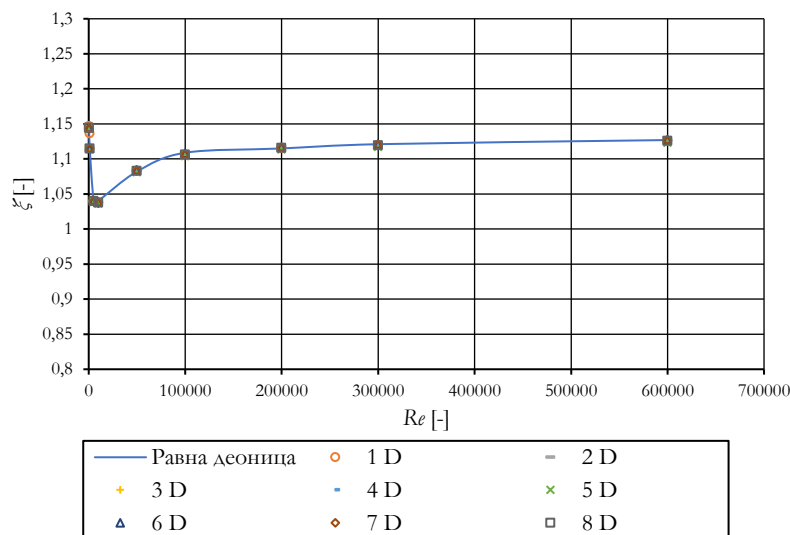
и) $Re=300000$



з) $Re=600000$

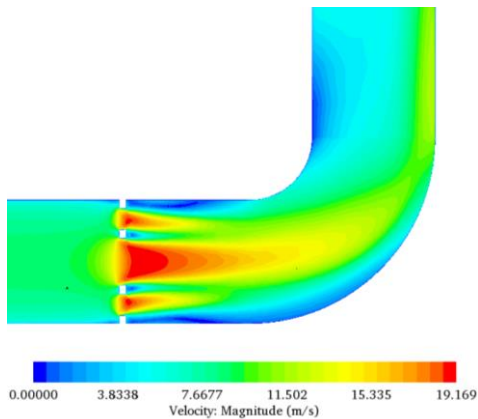
Слика 112 Утицај растојања ниструјног локалног отпора на коефицијент пада притиска

На слици 113 се види зависност коефицијента пада притиска од Рејнолдсовог броја за различите дужине деоница између ниструјног локалног отпора и мерне бленде. Не примећује се значајније одступање коефицијента пада притиска за различите дужине деоница између локалног отпора и мерне бленде, односно резултати коефицијента пада притиска за различите дужине ниструјне деонице се поклапају са резултатима за референтну равну деоницу.

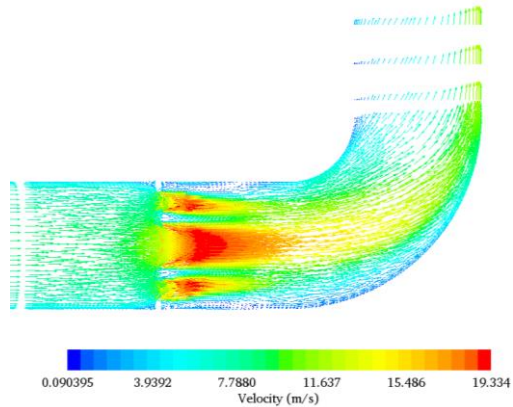


Слика 113 Коефицијент пада притиска за различита растојања ниструјног локалног отпора

Равански приказ скаларног поља брзине на деоници са ниструјним локалним отпором на растојању од 1 D се види на слици 114. Постављањем мерне бленде уструјно од локалног отпора поремећаји који настају ниструјно од мерне бленде улазе у локални отпор. Са слика 114, 115 и 116 које приказују скаларно и векторско поље као и приказ струјница се види да ниструјно постављен локални отпор нема значајнији утицај на струјну слику уструјно и ниструјно од мерне бленде. Већа концентрација као и интензитет вектора примећује се ниструјно од мерне бленде са стране унутрашњег радијуса колена (слика 115).

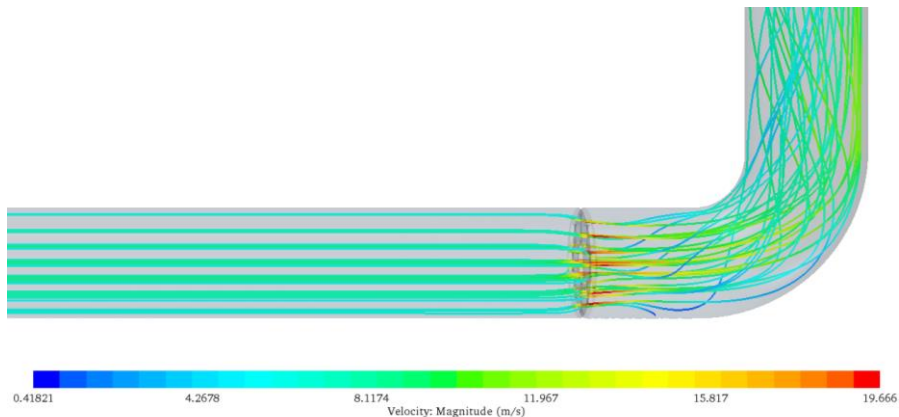


Слика 114 Равански приказ скаларног поља брзине на деоници са ниструјним локалним отпором на растојању $L_2=1 D$



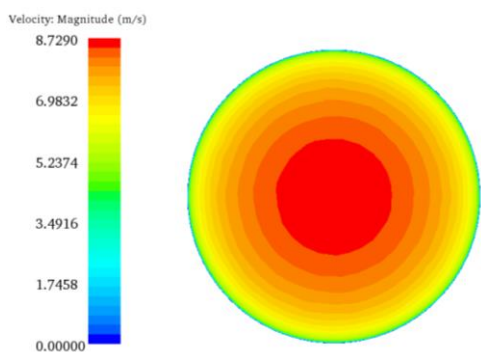
Слика 115 Приказ векторског поља брзине на деоници са ниструјним локалним отпором на растојању $L_2=1 D$

Са слике 116 се види да поремећаји који се јављају код ниструјних локалних отпора у ствари потичу од мерне бленде и они се преносе даље кроз локални отпор. Како се ови поремећаји јављају нешто даље од мерне бленде не утичу на измерене вредности пада притиска са позиција $1 D$ уструјно и $\frac{1}{2} D$ ниструјно.

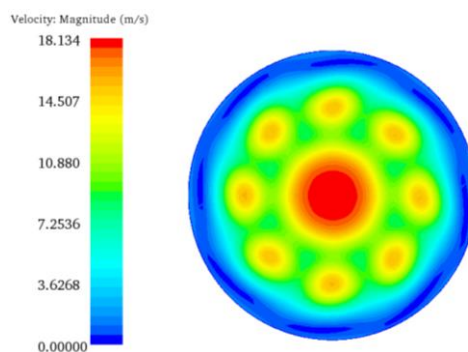


Слика 116 Скаларно поље брзине приказано путем струјнице на деоници са ниструјним локалним отпором на растојању $L_2=1 D$

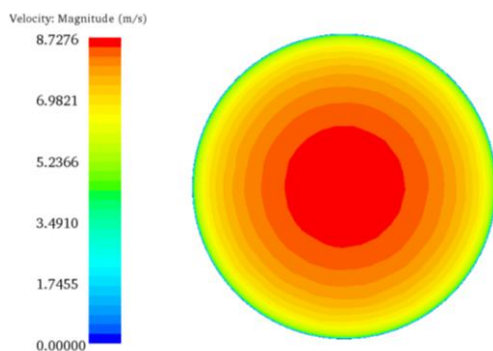
На слици 117 се виде брзине у попречним пресецима $1 D$ уструјно и $\frac{1}{2} D$ ниструјно од мерне бленде за различите положаје ниструјног локалног отпора. Скаларни приказ брзине уструјно $1 D$ од мерне бленде је униформан за све случајеве због непостојања поремећаја уструјно од мерне бленде. Ниструјни скаларни приказ на $\frac{1}{2} D$ може се сматрати униформним за све случајеве (разлике су једва видљиве). Ови резултати говоре да ниструјни локални отпори немају утицај на профил брзине уструјно и ниструјно од мерне бленде.



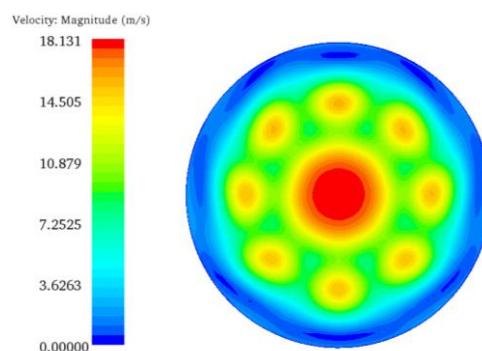
Равна деоница



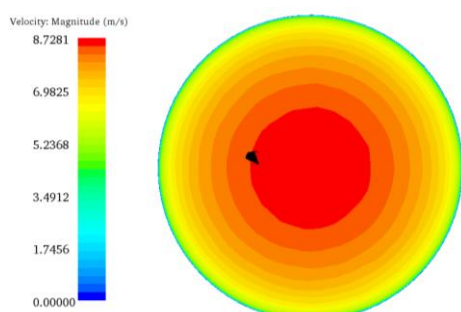
Равна деоница



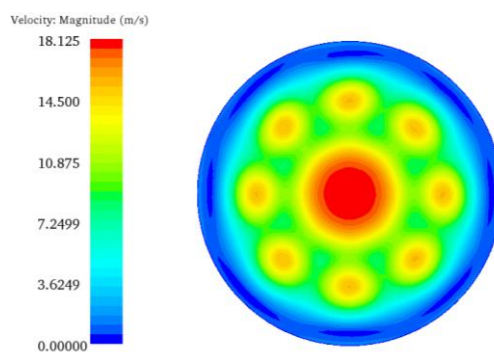
$L_2=1 D$



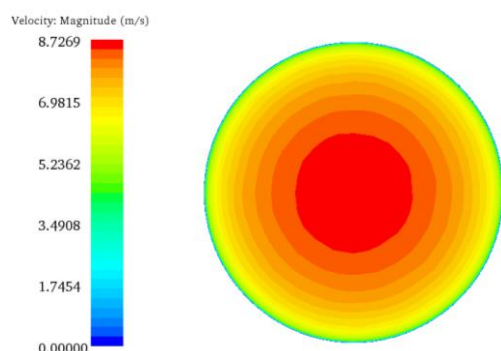
$L_2=1 D$



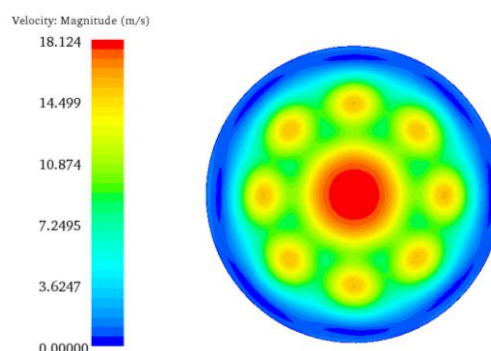
$L_2=2 D$



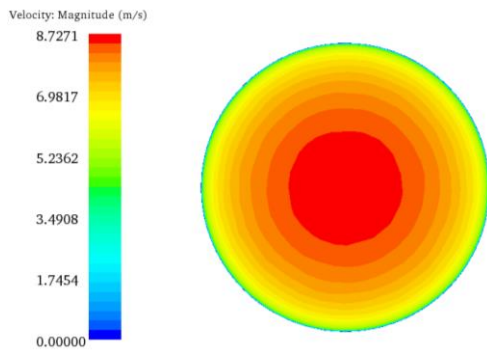
$L_2=2 D$



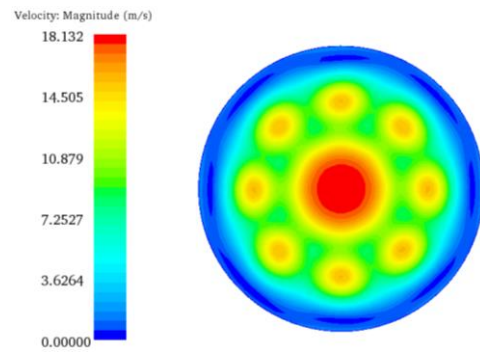
$L_2=3 D$



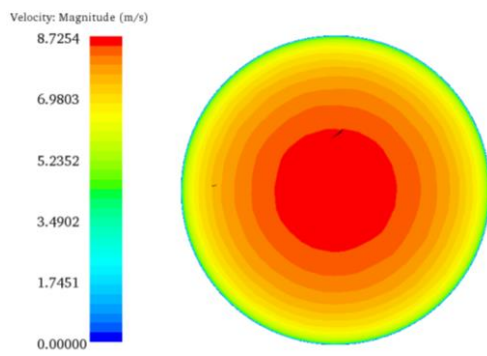
$L_2=3 D$



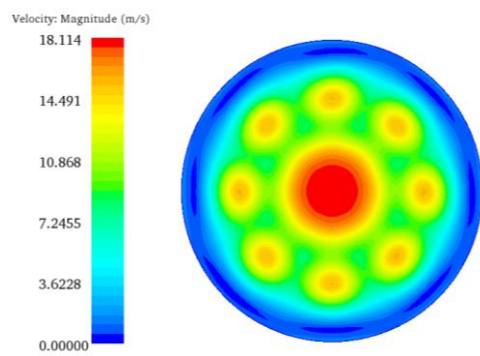
$L_2=4 D$



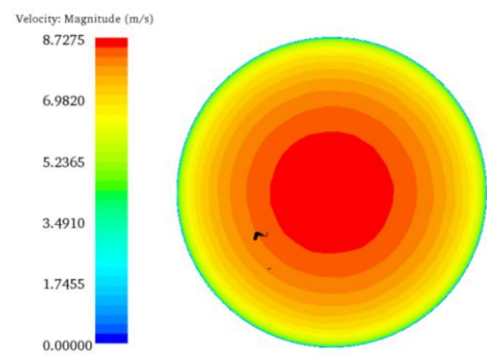
$L_2=4 D$



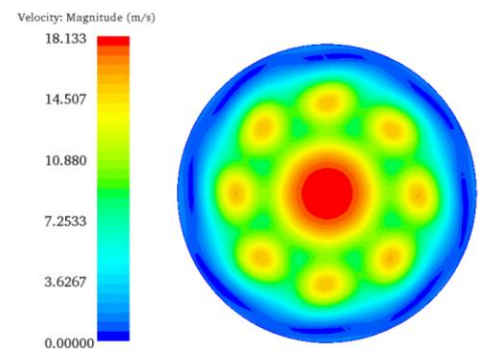
$L_2=5 D$



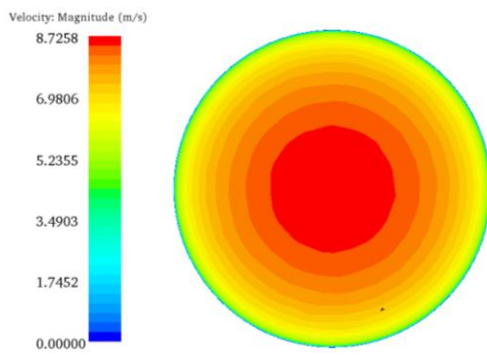
$L_2=5 D$



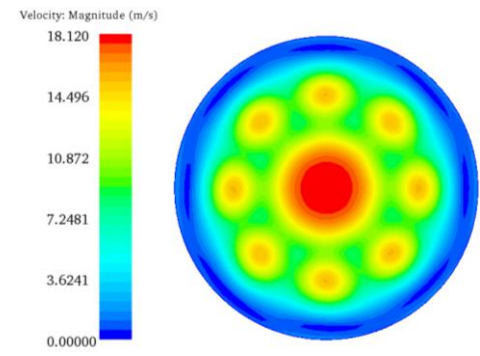
$L_2=6 D$



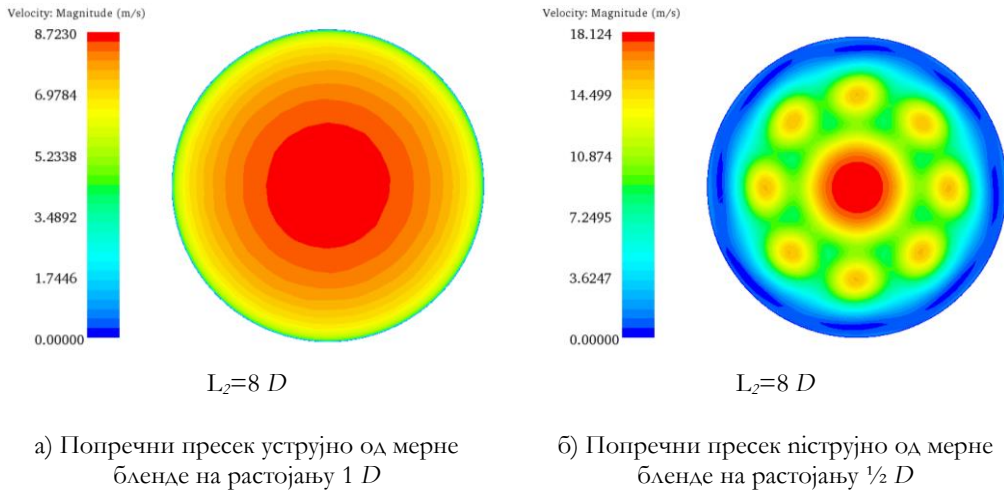
$L_2=6 D$



$L_2=7 D$

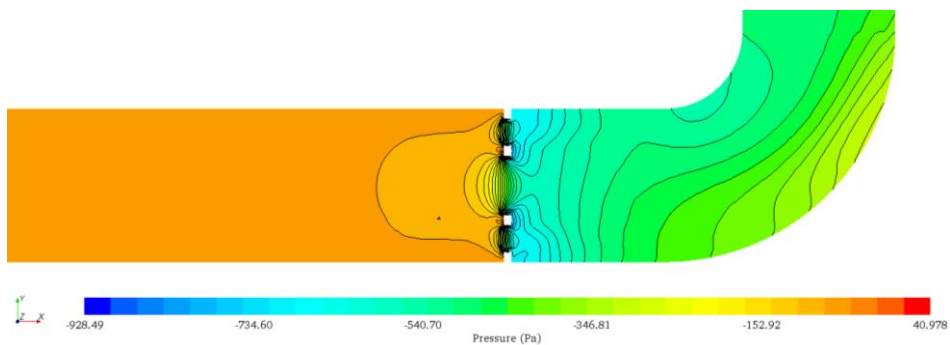


$L_2=7 D$

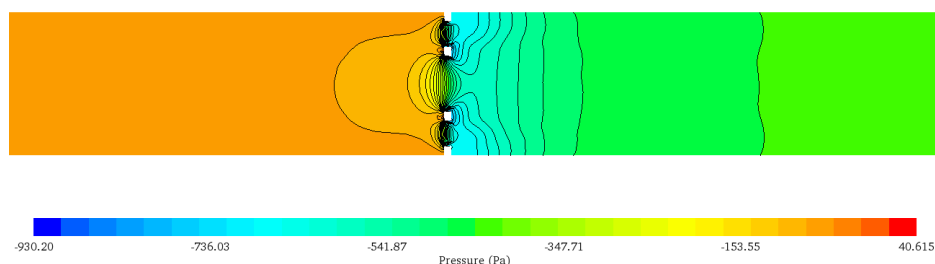


Слика 117 Приказ скаларног поља брзине у попречном пресеку за различите дужине деоница између мерне бленде и ниструјног локалног отпора и мерне бленде, $Re=100000$

Поље притиска на уздужном пресеку се види на слици 118. Ниструјно локални отпори немају значајнији утицај на расподелу притиска на уздужном пресеку како уструјно ($1 D$) тако и ниструјно ($1/2 D$) од мерне бленде. Поље притиска уструјно од мерне бленде идентично је за случај са референтном равном деоницом са случајем локалног отпора ниструјно од мерне бленде. Ниструјно поље притиска има мала одступања, па се тако код деонице са ниструјном локалним отпором могло приметити да је поље са нижим притиском непосредно иза мерне бленде мало веће (у правцу X осе ближе унутрашњем радијусу колена) него код случаја са равном деоницом. Последица тога могу бити већи вектори брзина у том делу деонице (слика 115).



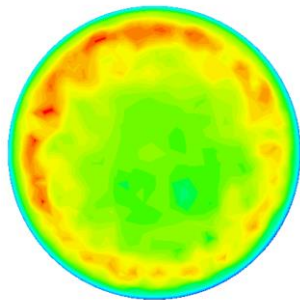
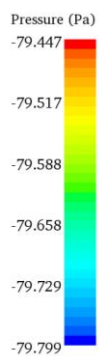
а) Деоница са ниструјним локалним отпором на растојању $5 D$



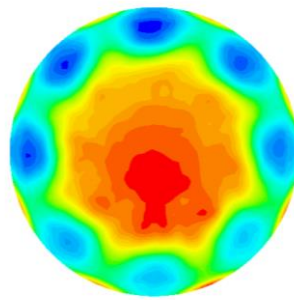
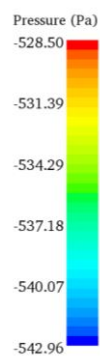
б) Референтна равна деоница

Слика 118 Поље притиска на уздужном пресеку

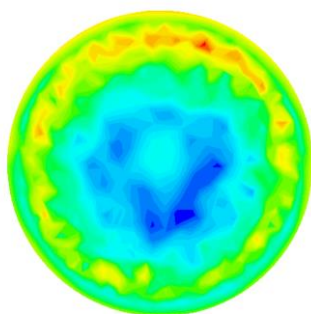
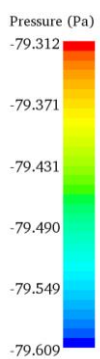
На слици 119 приказана је расподела притиска у попречном пресеку цеви уструјно $1 D$ и ниструјно $\frac{1}{2} D$ од мерне бленде за различите позиције ниструјног локалног отпора L_2 . Са слике се види да нема значајнијих промена у расподели притиска уструјно и ниструјно од мерне бленде на деоници са ниструјним локалним отпором. Веће одступање у расподели притиска може се приметити на деоници где је локални ниструјни отпор удаљен $1 D$ од мерне бленде. Одступање у расподели притиска могло се видети и на уструјном попречном пресеку $1 D$ и ниструјном попречном пресеку $\frac{1}{2} D$ од мерне бленде. Са повећањем растојања између мерне бленде и ниструјног локалног отпора расподела притиска како уструјно тако и ниструјно је постајала све равномернија тј. све је више личила расподели која се могла видети код референтне равне деонице.



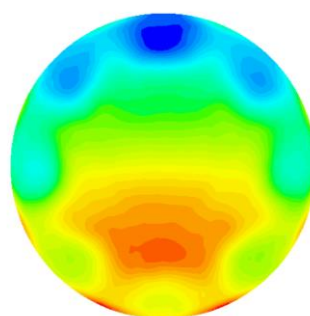
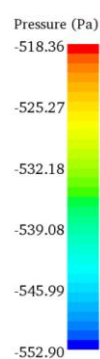
Равна деоница



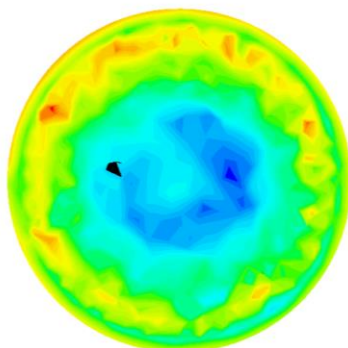
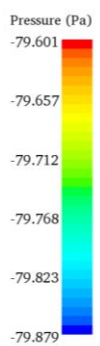
Равна деоница



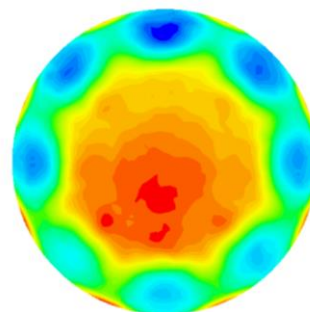
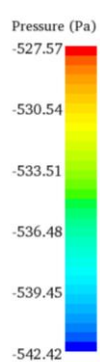
$L_2=1 D$



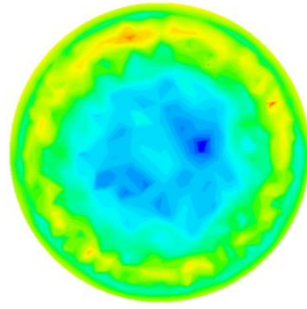
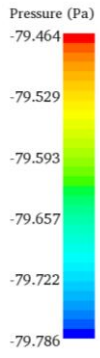
$L_2=1 D$



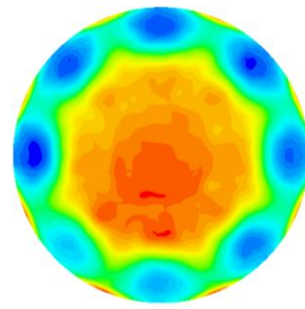
$L_2=2 D$



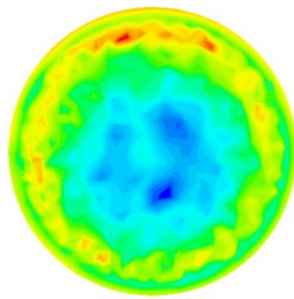
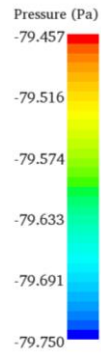
$L_2=2 D$



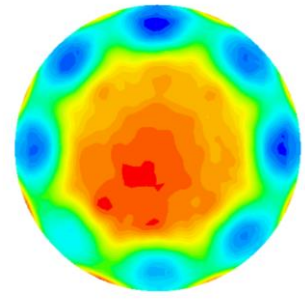
$L_2=3 D$



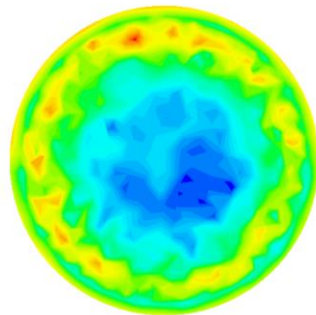
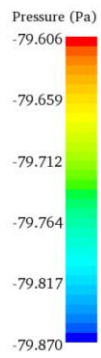
$L_2=3 D$



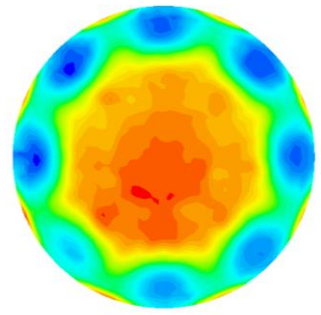
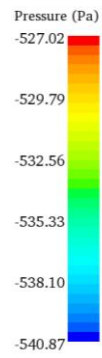
$L_2=4 D$



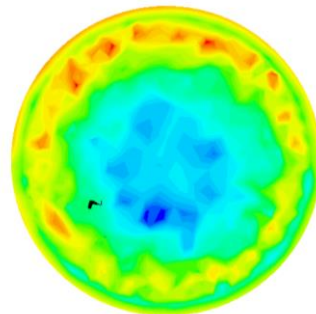
$L_2=4 D$



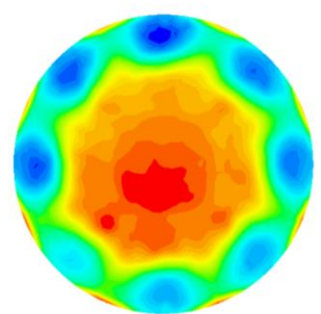
$L_2=5 D$



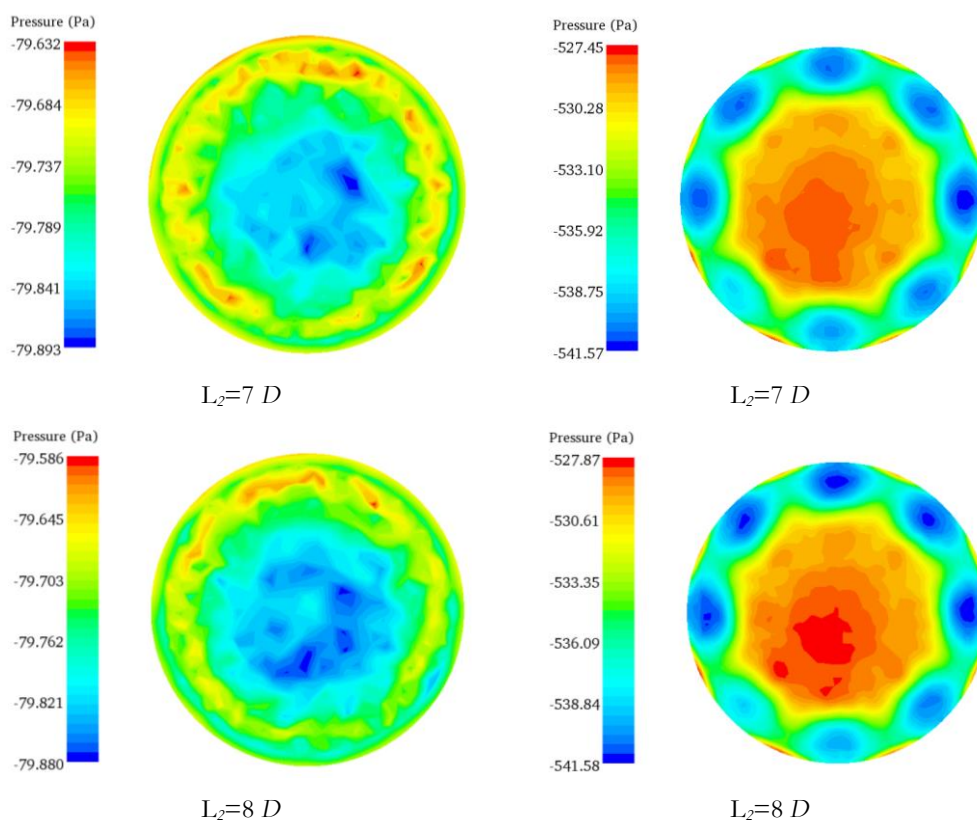
$L_2=5 D$



$L_2=6 D$



$L_2=6 D$



Попречни пресек уструјно од мерне бленде на растојању $1 D$

Попречни пресек ниструјно од мерне бленде на растојању $1/2 D$

Слика 119 Равански приказ скаларног поља притиска нормалног на правац струјања за различите дужине деоница L_2 , $Re=100000$

5. ЗАКЉУЧАК

Мерне бленде као један од најстаријих мерних инструмената за одређивање протока флуида најзаступљенији су мерни инструменти који раде на принципу мерења пада притиска. Као широко распрострањени мерни инструмент БЈО покривена је бројним стандардима, док се ни један активни стандард не бави БВО. У оквиру докторске дисертацију испитане су различите БВО као и БЈО.

Истраживања спроведена у оквиру докторске дисертације имала су за циљ да дају прилог истраживању струјању гаса кроз БВО. Добијене вредности струјних параметара попут пада притисака, губитка притиска, влажности гаса (ваздуха), губитка снаге, поврата притиска, коефицијента пада притиска итд. дале су допринос у бољем описивању проблем струјања гаса кроз БВО. Ова сазнања доприносе развоју БВО које су показале бројне предности у односу на конвенционалне мерне бленде и које би у будућности могле да замене БЈО. За истраживање мерних бленди користиле су се две основне методе истраживања: експериментална и нумеричка метода.

Експериментални део истраживања обављен је у лабораторији ГасТех д.о.о. из Инђије. Испитано је укупно 16 мерних бленди, од тога 4 са једним отвором и 12 са више отвора. Испитане мерне бленде имале су различите вредности параметра β и то 0,50, 0,55, 0,60 и 0,70. За сваки параметар β испитане су 4 мерне бленде од чега је једна била БЈО, а три БВО. Варијација код БВО била је у димензијама подеоног круга на којем су се налазили мањи отвори. За све мерне бленде анализирао се коефицијент пада притиска варирањем структурних параметара попут величине отвора (параметар β) и расподеле отвора тј. димензије подеоног круга. Уочен је значајан пад коефицијента пада притиска код БВО у поређењу са БЈО и то за 25,67%, 22,13%, 28,59% и 42,59% за β односе 0,50, 0,55, 0,60 и 0,70, редом. Не тако значајан утицај на коефицијент пада притиска имала је расподела отвора код БВО. Различите расподеле отвора код БВО смањују коефицијент пада притиска за 8,12%, 7,89%, 10,2% и 5,4% за БВО са β односима 0,50, 0,55, 0,60 и 0,70, редом. Поред коефицијента пада притиска анализирао се и пад притиска за све испитане мерне бленде на свим испитним притисцима. Могло се уочити да параметар β и притисак утичу на пад притиска, док расподела отвора БВО готово да не утиче. Мањи пад притиска за БВО може се приписати већем броју отвора распоређених по читавој површини мерне бленде, стварајући на тај начин мање препреке флуидној струји. Упоредивши БЈО и БВО, забележено је да БВО имају мањи пад притиска, а из тога се може

закључити да су за поуздане податке о измереном протоку флуида потребни бољи инструменти за мерење притиска.

Нумеричка истраживања мерних бленди односно РДФ симулације урадиле су се помоћу програмског пакета Siemens Simcenter STAR-CCM+ 2019.2. С обзиром да је урађен велики број симулација приказани су само одабрани резултати. Резултати осталих симулација били су истог тренда као и приказани резултати симулација. Све бленде ($\beta=0,50$, $\beta=0,55$, $\beta=0,60$ и $\beta=0,70$) симулиране су у широком распону Рејнолдсових бројева са ваздухом као радним флуидом. Нумерички модел је упоређен са експерименталним резултатима и постигнуто је добро поклапање резултата. Као и код експерименталних истраживања и нумеричке симулације су показале значајно смањење коефицијента пада притиска. Трендови промене коефицијента пада притиска услед структурних параметара били су исти као и код експерименталних испитивања. До поврата притиска дошло се применом РДФ. У поређењу са БЈО, све БВО имале су бржи поврат притиска. За Рејнолдсове бројеве $Re>3000$ БВО имале су већи поврат притиска у поређењу са одговарајућим БЈО. Бржи и већи поврат притиска БВО може се приписати њиховој геометрији где су отвори равномерније распоређени у поређењу са БЈО која има само један централни отвор. Са порастом β параметра растао је и поврат притиска, док је највећи степен поврата забележена код мерних бленди са најмањим параметром $\beta=0,50$. Резултати нумеричких симулација су показали да за исте протоке, мерне бленде са мањим параметром β имају већи пад притиска у поређењу са мерним блендама са већим параметром β . Исти тренд примећен је и за губитак притиска. БВО су имале мањи пад и губитак притиска у поређењу са БЈО одговарајућег параметра β . Димензија подеоног круга имала је утицај на пад и губитак притиска само на мерну бленду са параметром $\beta=0,50$, док за остале БВО димензија подеоног круга није имала већи утицај. На основу губитка притиска израчунати су губитак снаге и релативни губитак снаге за све изучаване мерне бленде. Мерне бленде са већим параметром β имале су мањи губитак снаге и релативни губитак снаге. Упоређујући БВО са БЈО истог параметра β , БВО су имале мањи губитак снаге и релативни губитак снаге. Утицај угла излазне ивице мерне бленде испитан је применом РДФ. Разматрана су два различита угла излазне ивице $\alpha=0^\circ$ и $\alpha=30^\circ$ и показало се да код БЈО разматрани угао има утицај од 2,96%, док је код БВО утицај разматраног угла занемарљив. Из овога се може закључити да код БВО нумеричке симулације могу да се раде уз апроксимацију угла излазне ивице мерне бленде, што би поједноставило рачунску мрежу и смањило време потребно за извршење симулације. У оквиру нумеричких истраживања испитао се и утицај влажности гаса (ваздуха) на тачност мерења. Резултати су показали да је утицај влажности на тачност мерења максимално 3,2% при нижим Рејнолдсовим бројевима ($Re=500$ и $Re=1000$), док се при Рејнолдсовим бројевима

$Re > 1000$ утицај влажности гаса (ваздуха) може занемарити. Утицај дебљине мерне бленде истражио се помоћу РДФ, а резултати су показали да на БВО дебљина има незнатан утицај. Повећањем дебљине мерне бленде постиже се сличан ефекат као са исправљачима струјања, смањују се тангенцијалне брзине и углови вртлога ниструјно од усмеривача. Утицај уструјних и ниструјних локалних отпора (колена од 90°) испитан је применом РДФ. Резултати су показали да се са повећањем растојања уструјног локалног отпора од мерне бленде коефицијент пада притиска смањује, односно да се приближава вредности коефицијента пада притиска мерној бленди без локалног отпора. Исти овакав тренд постоји и код БЈО али су растојања која елиминишу утицај уструјног локалног отпора мања за БВО. Утицај ниструјних локалних отпора има много мањи, чак занемарљив утицај на коефицијент пада притиска. И у овом случају растојање које елиминише утицај ниструјних локалних отпора мање је за БВО него за БЈО.

Мерне бленде су и даље веома популарни мерни инструменти за одређивање протока флуида због своје приступачности, једноставности употребе и одржавања, поузданости итд., али имају и недостатке попут губитка притиска који настаје у инсталацији услед проласка флуида кроз бленду. Представљени резултати у оквиру докторске дисертације показали су бројне предности БВО у односу на БЈО нижи коефицијент пада притиска, мањи пад притиска, бржи поврат притиска, мањи губитак притиска а тиме и снаге, краће дужине потребних уструјних и ниструјних деоница, као и да је код БВО могућа апроксимација угла излазне ивице. Ови резултати доказали су постављену хипотезу. Да би у будућности БВО могла у потпуности да замени БЈО потребна су додатна истраживања.

У оквиру докторске дисертације испитан је утицај једног локалног отпора (колена од 90°) постављеног уструјно и ниструјно на различитим растојањима од мерне бленде. Будућа истраживања БВО могла би да обухвате утицај различитих локалних отпора (колена различитих углова, два колена од 90° у истој равни, два колена од 90° у различитим равнима итд.) на тачност мерења. Ова истраживања могла би да узму у обзир и различите флуиде али и више притиске од притисака коришћених у докторској дисертацији (од 2 bar до 12 bar). Резултати за више притиске где је радни флуид гас нису доступни у литератури. Израз за фактор експанзије за БЈО који је потребан за одређивање протока гасова дефинисан је стандардом, али је за БВО овај фактор непознат. Одређивање фактора експанзије за БВО могла би да буде тема будућег истраживања БВО. Конвенционална мерна бленда користи се често за мерење протока вишефазних флуида (водена пара, влажан гас и сл). Испитивање БВО у вишефазним флуидима је такође једна од особина коју је потребно додатно

испитати како би БВО могла комерцијално да се користи у мерењу вишефазних флуида.

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] M.E. Himbert, A brief history of measurement, *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 172 (2009) 25–35. doi:10.1140/epjst/e2009-01039-1.
- [2] H.A. Klein, *THE SCIENCE OF MEASUREMENT: A Historical Survey*, Dover Publications, Inc. New York, 1974.
- [3] B. Milenković, *PRIRUČNIK ZA MERENJE PROTOKA FLUIDA mernim blendama, mlaznicama Venturi cevima i dr.*, Savez mašinskih i elektrotehničkih inženjera i tehničara Srbije (SMEITS), Beograd, 2000.
- [4] M. Reader-Harris, *Orifice Plates and Venturi Tubes*, Springer International Publishing Switzerland, 2015. doi:10.1007/978-3-319-16880-7.
- [5] D.E. Cristancho, L.A. Coy, K.R. Hall, G.A. Iglesias-Silva, An alternative formulation of the standard orifice equation for natural gas, *Flow Meas. Instrum.* 21 (2010) 299–301. doi:10.1016/j.flowmeasinst.2010.03.003.
- [6] M.S. Shah, J.B. Joshi, A.S. Kalsi, C.S.R. Prasad, D.S. Shukla, Analysis of flow through an orifice meter: CFD simulation, *Chem. Eng. Sci.* 71 (2012) 300–309. doi:10.1016/j.ces.2011.11.022.
- [7] E. Buckingham, Notes on the orifice meter: The expansion factor for gases, *Bur. Stand. J. Res.* 9 (1932) 61. doi:10.6028/jres.009.009.
- [8] F. Kinghorn, The expansibility correction for orifice plates: EEC data., u: *Fm 80'S, Flow Meas. Mid 80'S Int. Conf.*, (East Kilbride, U.K. Jun. 9-12, 1986), 1986.
- [9] W. Seidl, The orifice expansion correction for a 50 mm line size at various diameter ratios, u: *3rd Int. Fluid Flow Meas. Symp.*, San Antonio, Texas, 1995.
- [10] M.J. Reader-Harris, The equation for the expansibility factor for orifice plates, u: *Proc. of FLOMEKO*, 1998: str. 209–214.
- [11] R.S. Ettouney, M.A. El-Rifai, Sensitivity of orifice meter gas flow computations, *J. Pet. Sci. Eng.* 80 (2011) 102–106. doi:10.1016/J.PETROL.2011.11.005.
- [12] M.A. Gomez-Osorio, D.O. Ortiz-Vega, I.D. Mantilla, H.Y. Acosta, J.C. Holste, K.R. Hall, G.A. Iglesias-Silva, A formulation for the flow rate of a fluid passing through an orifice plate from the First Law of Thermodynamics, *Flow Meas. Instrum.* 33 (2013) 197–201. doi:10.1016/J.FLOWMEASINST.2013.07.007.
- [13] Y.A. El Drainy, K.M. Saqr, H.S. Aly, M. Nazri, M. Jaafar, CFD ANALYSIS OF INCOMPRESSIBLE TURBULENT SWIRLING FLOW THROUGH ZANKER PLATE, *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.* 3 (2009) 562–572.

<https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/19942060.2009.11015291>
(pristupljeno 03. ožujak 2018.).

- [14] R.C. Baker, *Flow Measurement Handbook*, Second, Cambridge University Press, New York, NY 10013-2473, USA, 2016.
- [15] R.E. DeOtte, G.L. Morrison, D.L. Panak, G.H. Nail, 3-D laser Doppler anemometry measurements of the axisymmetric flow field near an orifice plate, *Flow Meas. Instrum.* 2 (1991) 115–123. doi:10.1016/0955-5986(91)90019-N.
- [16] G.L. Morrison, K.R. Hall, M.L. Macek, L.M. Ihfe, R.E. DeOtte, J.E. Hauglie, Upstream velocity profile effects on orifice flowmeters, *Flow Meas. Instrum.* 5 (1994) 87–92. doi:10.1016/0955-5986(94)90041-8.
- [17] U. Himpe, B. Götte, M. Schatz, Influence of upstream bends on the discharge coefficients of classical venturi tubes and orifice plates, *Flow Meas. Instrum.* 5 (1994) 209–216. doi:10.1016/0955-5986(94)90022-1.
- [18] S. V. Prabu, R. Mascomani, K. Balakrishnan, M.S. Konnur, Effects of upstream pipe fittings on the performance of orifice and conical flowmeters, *Flow Meas. Instrum.* 7 (1996) 49–54. doi:10.1016/0955-5986(96)00001-5.
- [19] H. Zimmermann, Examination of disturbed pipe flow and its effects on flow measurement using orifice plates, *Flow Meas. Instrum.* 10 (1999) 223–240. doi:10.1016/S0955-5986(99)00015-1.
- [20] G.L. Morrison, K.R. Hall, J.C. Holste, M.L. Macek, L.M. Ihfe, R.E. DeOtte, D.P. Terracina, Comparison of orifice and slotted plate flowmeters, *Flow Meas. Instrum.* 5 (1994) 71–77. doi:10.1016/0955-5986(94)90039-6.
- [21] S. Huang, T. Ma, D. Wang, Z. Lin, Study on discharge coefficient of perforated orifices as a new kind of flowmeter, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 46 (2013) 74–83. doi:10.1016/j.expthermflusci.2012.11.022.
- [22] T. Zhao, J. Zhang, L. Ma, A general structural design methodology for multi-hole orifices and its experimental application, *J. Mech. Sci. Technol.* (2011). doi:10.1007/s12206-011-0706-3.
- [23] P.K. Kundu, I.M. Cohen, D.R. Dowling, *Fluid Mechanics*, Academic Press Elsevier, London, England, 2015.
- [24] Y.A. Cengel, J.M. Cimbala, *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*, 2014. http://highered.mheducation.com/sites/0073380326/information_center_view0/index.html.
- [25] F. Durst, A.B. Wang, Experimental and numerical investigations of the axisymmetric, turbulent pipe flow over a wall-mounted thin obstacle, u: *Symp. Turbul. Shear Flows*, 7th, Stanford, CA, Aug. 21-23, 1989, *Proceedings*. Vol. 1 (A90-35176 15-34). Univ. Park. PA, Pennsylvania State Univ. 1989, p. 10.4.1-10.4.6., 1989.
- [26] A. Erdal, H. Andersson, Numerical aspects of flow computation through

- orifices, *Flow Meas. Instrum.* 8 (1997) 27–37. doi:10.1016/S0955-5986(97)00017-4.
- [27] S. Eiamsa-Ard, A. Ridluan, P. Somravysin, P. Promvongse, NUMERICAL INVESTIGATION OF TURBULENT FLOW THROUGH A CIRCULAR ORIFICE, *KMITL Sci. J.* 8 (2008) 43–50.
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.515.3799&rep=rep1&type=pdf> (pristupljeno 01. svibanj 2019.).
- [28] N. Arun, S. Malavarayan, M. Kaushik, CFD Analysis on Discharge Co-Efficient During Non-Newtonian Flows Through Orifice Meter, *Int. J. Eng. Sci. Technol.* 2 (2010) 3151–3164.
- [29] N.M.B. Oliveira, L.G.M. Vieira, J.J.R. Damasceno, Numerical Methodology for Orifice Meter Calibration, *Mater. Sci. Forum.* 660–661 (2010) 531–536. doi:10.4028/www.scientific.net/msf.660-661.531.
- [30] G.H. Nail, A study of 3-Dimensional flow through orifice meters, Texas A&M University, USA, 1991.
- [31] G.L. Morrison, R.E. Deotte Jr., G.H. Nail, D.L. Panak, Mean velocity and turbulence fields inside a $\beta=0.50$ orifice flowmeter, *AIChE J.* 39 (1993) 745–756. doi:10.1002/aic.690390503.
- [32] C.L. Hollingshead, M.C. Johnson, S.L. Barfuss, R.E. Spall, Discharge coefficient performance of Venturi, standard concentric orifice plate, V-cone and wedge flow meters at low Reynolds numbers, *J. Pet. Sci. Eng.* 78 (2011) 559–566. doi:10.1016/j.petrol.2011.08.008.
- [33] M. Reader-Harris, N. Barton, D. Hodges, The effect of contaminated orifice plates on the discharge coefficient, *Flow Meas. Instrum.* 25 (2012) 2–7. doi:10.1016/j.flowmeasinst.2011.11.003.
- [34] J. Dong, C. Jing, Y. Peng, Y. Liu, H. Ren, X. Liu, Study on the measurement accuracy of an improved cemented carbide orifice flowmeter in natural gas pipeline, *Flow Meas. Instrum.* 59 (2018) 52–62. doi:10.1016/J.FLOWMEASINST.2017.12.008.
- [35] A. Elsaey, A. Abou El-Azm Aly, M. Fouad, CFD simulation of fractal-shaped orifices for flow measurement improvement, *Flow Meas. Instrum.* 36 (2014) 14–23. doi:10.1016/j.flowmeasinst.2014.01.004.
- [36] S. Shaaban, Optimization of orifice meter’s energy consumption, *Chem. Eng. Res. Des.* 92 (2014) 1005–1015. doi:10.1016/j.cherd.2013.08.022.
- [37] G. Gan, S.B. Riffat, Pressure loss characteristics of orifice and perforated plates, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 14 (1997) 160–165. doi:10.1016/S0894-1777(96)00041-6.
- [38] M. Barki, T. Ganesha, CFD Analysis and Comparison of Fluid Flow Through A Single Hole And Multi Hole Orifice Plate, *Int. J. Res. Advent Technol.* 2 (2014) 6–15.
- [39] V.K. Singh, T. John Tharakan, Numerical simulations for multi-hole orifice

- flow meter, *Flow Meas. Instrum.* 45 (2015) 375–383.
doi:10.1016/j.flowmeasinst.2015.08.004.
- [40] NEL, *An Introduction to wet-gas*, 2010.
http://www.tuvnel.com/_x90lbm/An_Introduction_to_Wet-Gas_Flow_Metering.pdf.
- [41] A. Hall, G. Douglas, S. Richard, *A Discussion on Wet Gas Flow Parameter Definitions*, u: 25th North Sea Flow Meas. Work., 2007: str. 1–25.
- [42] D. Chisholm, *Research note: Two-phase flow through sharp-edged orifices*, *J. Mech. Eng. Sci.* 19 (1977) 128–130.
- [43] P. Kumar, M.W. Ming Bing, *A CFD study of low pressure wet gas metering using slotted orifice meters*, *Flow Meas. Instrum.* 22 (2011) 33–42.
doi:10.1016/j.flowmeasinst.2010.12.002.
- [44] Y. Li, J. Wang, Y. Geng, *Study on wet gas online flow rate measurement based on dual slotted orifice plate*, *Flow Meas. Instrum.* 20 (2009) 168–173.
doi:10.1016/j.flowmeasinst.2009.04.002.
- [45] G. Annamalai, S. Pirouzpanah, S.R. Gudigopuram, G.L. Morrison, *Characterization of flow homogeneity downstream of a slotted orifice plate in a two-phase flow using electrical resistance tomography*, *Flow Meas. Instrum.* 50 (2016) 209–215. doi:10.1016/J.FLOWMEASINST.2016.07.003.
- [46] G.L. Morrison, D. Terracina, C. Brewer, K.R. Hall, *Response of a slotted orifice flow meter to an air/water mixture*, *Flow Meas. Instrum.* 12 (2001) 175–180. doi:10.1016/S0955-5986(01)00018-8.
- [47] M.A. Mehmood, M.A. Ibrahim, A. Ullah, M.H. Inayat, *CFD study of pressure loss characteristics of multi-holed orifice plates using central composite design*, *Flow Meas. Instrum.* 70 (2019) 101654.
doi:10.1016/J.FLOWMEASINST.2019.101654.
- [48] DELBERT M. OTTMERS, HOWARD F. RASE, D.M. Ottmers, H.F. Rase, *Characteristics of Single-and Multiple-Hole Orifice Plates for Gas-Liquid Reactions*, *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 3 (1964) 106–110.
doi:10.1021/i160010a004.
- [49] G.L. Morrison, R.E. DeOtte, E.J. Beam, *Installation effects upon orifice flowmeters*, *Flow Meas. Instrum.* 3 (1992) 89–93. doi:10.1016/0955-5986(92)90005-P.
- [50] F. Shan, Z. Liu, W. Liu, Y. Tsuji, *Effects of the orifice to pipe diameter ratio on orifice flows*, *Chem. Eng. Sci.* 152 (2016) 497–506.
doi:10.1016/j.ces.2016.06.050.
- [51] T. Takano, Y. Ikarashi, K. Uchiyama, T. Yamagata, N. Fujisawa, *Influence of swirling flow on mass and momentum transfer downstream of a pipe with elbow and orifice*, *Int. J. Heat Mass Transf.* 92 (2016) 394–402.
doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.08.087.
- [52] F.T. Mackenzie, J.A. Mackenzie, *Our Changing Planet*, Prentice-Hall, Upper

Saddle River, NJ, 1995.

- [53] D. Uzelac, S. Bikić, Hidropneumatske komponente, FTN izdavaštvo, Novi Sad, 2018.
- [54] T. Gronych, M. Jeřáb, L. Peksa, J. Wild, F. Staněk, M. Vičar, Experimental study of gas flow through a multi-opening orifice, *Vacuum*. 86 (2012) 1759–1763. doi:10.1016/j.vacuum.2012.02.008.
- [55] GasTeh d.o.o., GasTeh laboratorija, (2020). <https://gasteh.com/laboratorija/>.
- [56] Elster, Quantometer QA / QAc, (2016).
- [57] Yokogawa, General Specifications Model EJA510A and EJA530A Absolute and Gauge Pressure Transmitter, (2013).
- [58] Yokogawa, General Specifications Model EJA110A Differential Pressure Transmitter, (2013).
- [59] E+E Elektronik, Manual Hardware and Software Humidity/Temperature Transmitter Series EE, (bez dat.).
- [60] NATIONAL INSTRUMENTS, DATASHEET NI 9208, (2010).
- [61] NATIONAL INSTRUMENTS, Operating Instructions and Specifications NI 9208E, (2010).
- [62] NATIONAL INSTRUMENTS, Getting started with LabVIEW, (2010).
- [63] R. Shelquist, An Introduction to Air Density and Density Altitude Calculations, (2019). https://wahiduddin.net/calc/density_altitude.htm.
- [64] R. Shelquist, Algorithms, Comparisons and Source References by Schlatter and Baker, (2009). https://wahiduddin.net/calc/density_algorithms.htm.
- [65] H.K. Versteeg, W. Malalasekera, An Introduction to Computational Fluid Dynamics, 2nd Edition, London, England, 2007. doi:10.1109/mcc.1998.736434.
- [66] М. Букуров, С. Биќић, Механика флуида, Књига друга, Факултет техничких наука у Новом Саду, Нови Сад, 2019.
- [67] M. Moosa, M.H. Nekmat, Numerical investigation of turbulence characteristics and upstream disturbance of flow through standard and multi-hole orifice flowmeters, *Flow Meas. Instrum.* 65 (2019) 203–218. doi:10.1016/J.FLOWMEASINST.2019.01.002.
- [68] B.R. Munson, T.H. Okiishi, W.W. Huebsch, A.P. Rothmayer, Fundamentals of Fluid Mechanics 7th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2013. doi:10.1016/B978-0-12-381383-1.00002-3.
- [69] L.F. Richardson, The Approximate Arithmetical Solution by Finite Differences of Physical Problems Involving Differential Equations, with an Application to the Stresses In a Masonry Dam, *Trans. R. Soc. London*. 210 (1910) 307–357.
- [70] L.F. Richardson, J.A. Gaunt, VIII. The deferred approach to the limit, *Philos.*

- Trans. R. Soc. London. Ser. A, Contain. Pap. a Math. or Phys. Character. 226 (1927) 299–361. doi:10.1098/rsta.1927.0008.
- [71] Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications, *J. Fluids Eng.* 130 (2008). doi:10.1115/1.2960953.
- [72] A. Del Toro, Computational fluid dynamics investigation of butterfly valve performance factors, Utah State University, 2012. doi:10.5942/jawwa.2015.107.0052.
- [73] Journal of fluids engineering editorial policy statement on the control of numerical accuracy, *J. Fluids Eng. Trans. ASME.* (bez dat.). doi:10.1115/1.2910144.
- [74] P.J. Roache, Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies, *J. Fluids Eng.* 116 (1994) 405–413. doi:10.1115/1.2910291.
- [75] L. Eça, M. Hoekstra, P. Roache, Verification of Calculations: An Overview of the 2nd Lisbon Workshop, u: 18th AIAA Comput. Fluid Dyn. Conf., American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007. doi:doi:10.2514/6.2007-4089.
- [76] L. Eça, M. Hoekstra, P.J. Roache, Verification of calculations: An overview of the Lisbon Workshop, *Collect. Tech. Pap. - 18th AIAA Comput. Fluid Dyn. Conf. 1* (2007) 862–873. doi:10.2514/6.2007-4089.
- [77] Siemens, Simcenter Star CCM+ Documentation, Version 2019.2, (2019) 11943.
- [78] P.A. Kolodzie Jr., M. Van Winkle, Discharge coefficients through perforated plates, *AICHe J.* 3 (1957) 305–312. doi:10.1002/aic.690030304.
- [79] M. Đurđević, M. Bukurov, S. Tašin, S. Bikić, Experimental research of single-hole and multi-hole orifice gas flow meters, *Flow Meas. Instrum.* 70 (2019) 101650. doi:10.1016/j.flowmeasinst.2019.101650.
- [80] M. Đurđević, M. Bukurov, S. Tašin, S. Bikić, Numerical Study of Single-Hole and Multi-Holes Orifice Flow Parameters, *J. Appl. Fluid Mech.* 14 (2021).

Списак коришћених стандарда:

ISO 5167:1980 Measurement of fluid flow by means of orifice plates, nozzles and Venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full

ISO 5167-1:1991 Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices — Part 1: Orifice plates, nozzles and Venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full

ANSI/API 2530-1985 Manual of Petroleum Measurement Standards Chapter 14 _
Natural Gas Fluids Measurement Section 3 - Orifice Metering of Natural Gas and
Other Related Hydrocarbon Fluids

API MPMS 14.3.1:1990 Natural Gas Fluids Measurement; Concentric, Square-Edged
Orifice Meters-General Equations and Uncertainty Guidelines

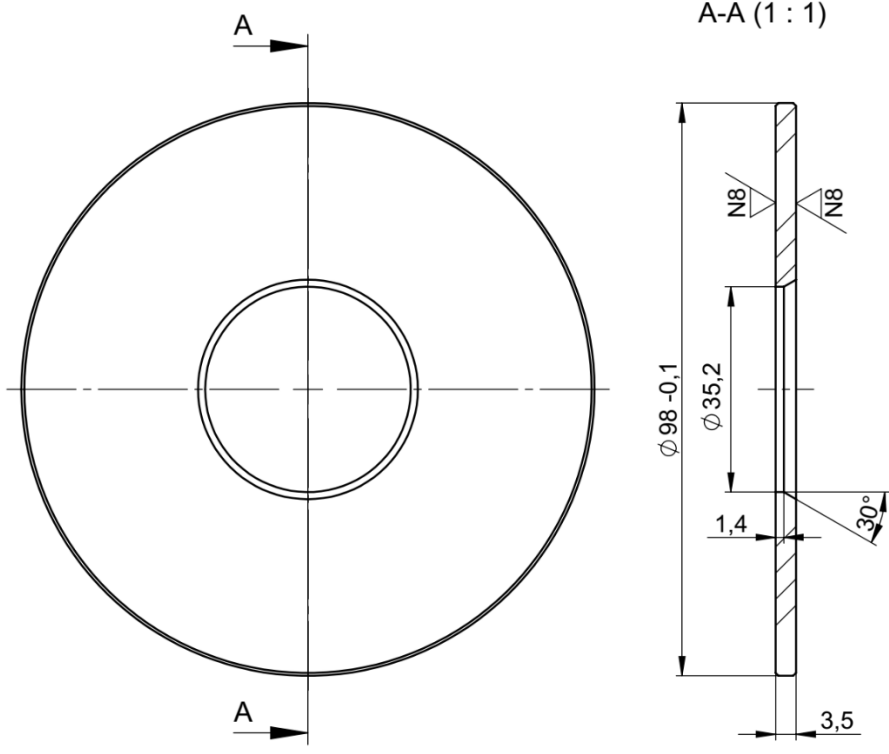
SRPS EN ISO 5167-1:2003 Measurement of fluid flow by means of pressure
differential devices inserted in circular cross-section conduits running full — Part 1:
General principles and requirements

SRPS EN ISO 5167-1:2012 Measurement of fluid flow by means of pressure
differential devices inserted in circular cross-section conduits running full - Part 1:
General principles and requirements

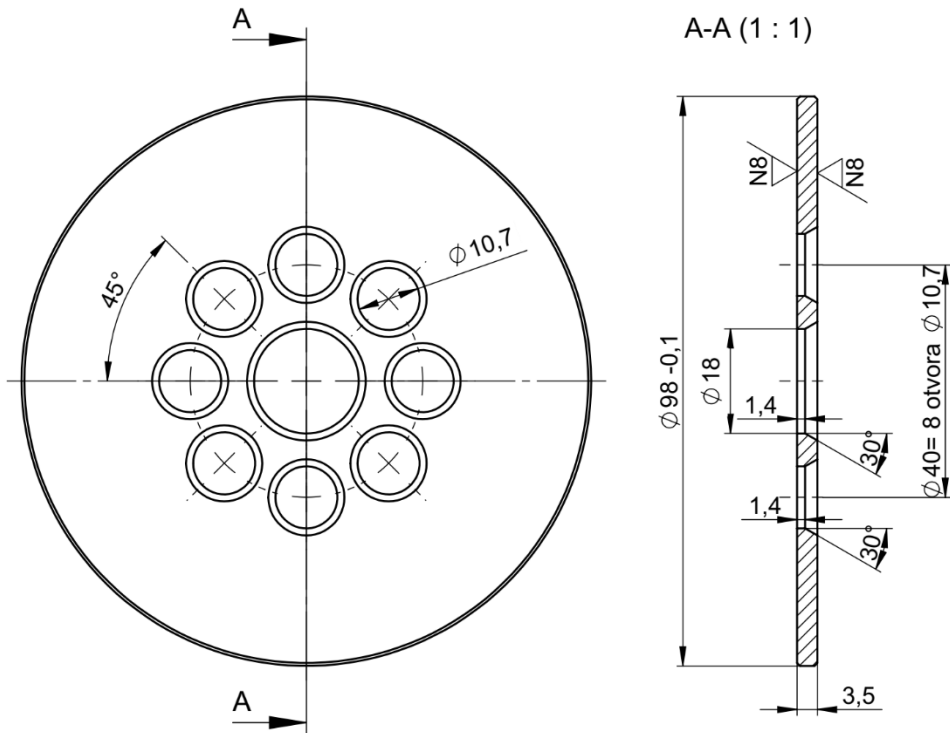
SRPS EN ISO 5167-2:2012 Measurement of fluid flow by means of pressure
differential devices inserted in circular cross-section conduits running full - Part 2:
Orifice plates

SRPS EN 1092-1:2013 Flanges and their joints - Circular flanges for pipes, valves,
fittings and accessories, PN designated - Part 1: Steel flanges

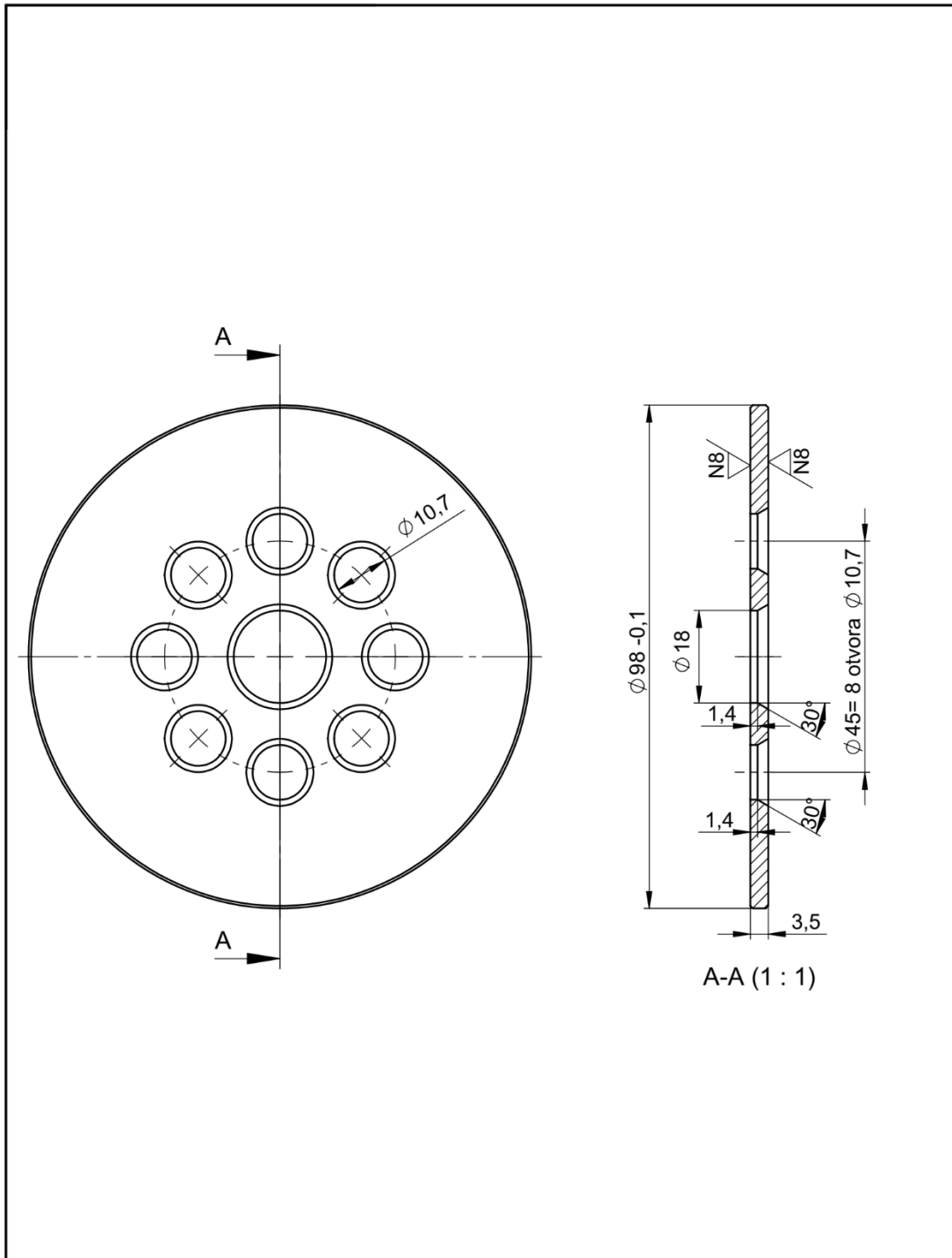
ПРИЛОГ 1



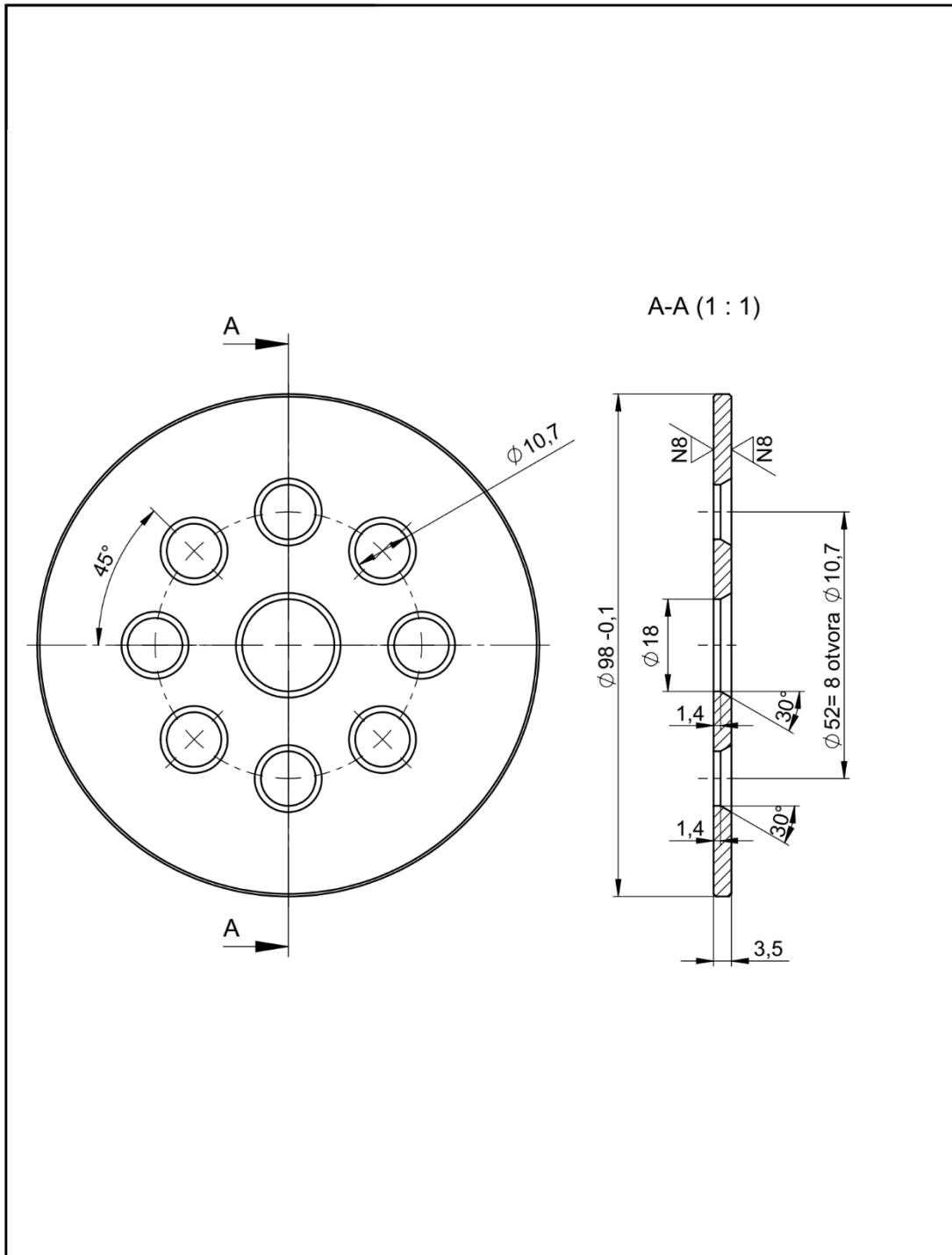
Površinska zaštita:		Termička obrada:			
Masa [kg]:	Status:	Materijal:	Dimenzije:		
		S235JRG2 (Č.0363)	Ø98x3,5		
<input type="checkbox"/>	Konstruisao:	Odgovorna osoba:	Datum:		
	Kontrolisao:	Marko Đurđević			
	Odobrio:				
		Naziv:			
		β=0,50 BJO			
	Format:	Razmera:	Klasa tolerancije slobodnih mera prema SRPS ISO 2768-1	Oznaka / broj crteža:	Revizija: List: 1 Listova: 1
	A4	1:2			



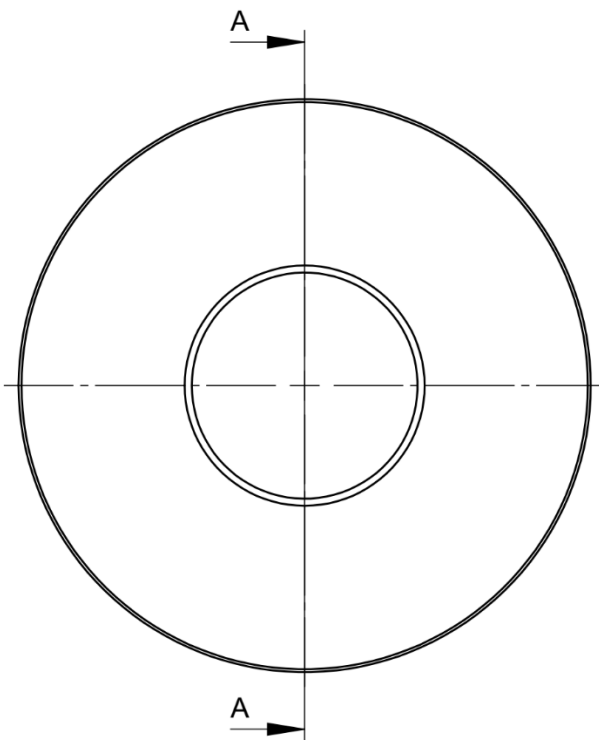
Površinska zaštita:			Termička obrada:			
Masa [kg]:	Status:	Materijal:	Dimenzije:			
		S235JRG2 (Č.0363)	$\phi 98 \times 3,5$			
	Odgovorna osoba:	Datum:	Naziv:			
Konstruisao:	Marko Đurđević		$\beta=0,50$ BVO1			
Kontrolisao:						
Odobrio:						
	Format: A4	Razmera: 1:2	Klasa tolerancije slobodnih mera prema SRPS ISO 2768-1	Oznaka / broj crteža:	Revizija:	List: 1
						Listova: 1



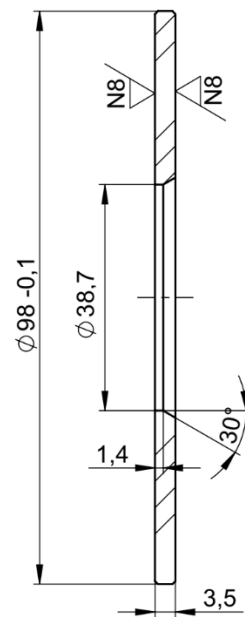
Površinska zaštita:		Termička obrada:	
Masa [kg]:	Status:	Materijal: S235JRG2 (Č.0363)	Dimenzije: Ø98x3,5
	Odgovorna osoba: Marko Đurđević	Naziv: β=0,50 BVO2	
	Kontrolisao:		
	Odobrio:		
Format: A4	Razmera: 1:2	Klasa tolerancije slobodnih mera prema SRPS ISO 2768-1	Oznaka / broj crteža:
			Revizija:
			List: 1
			Listova: 1



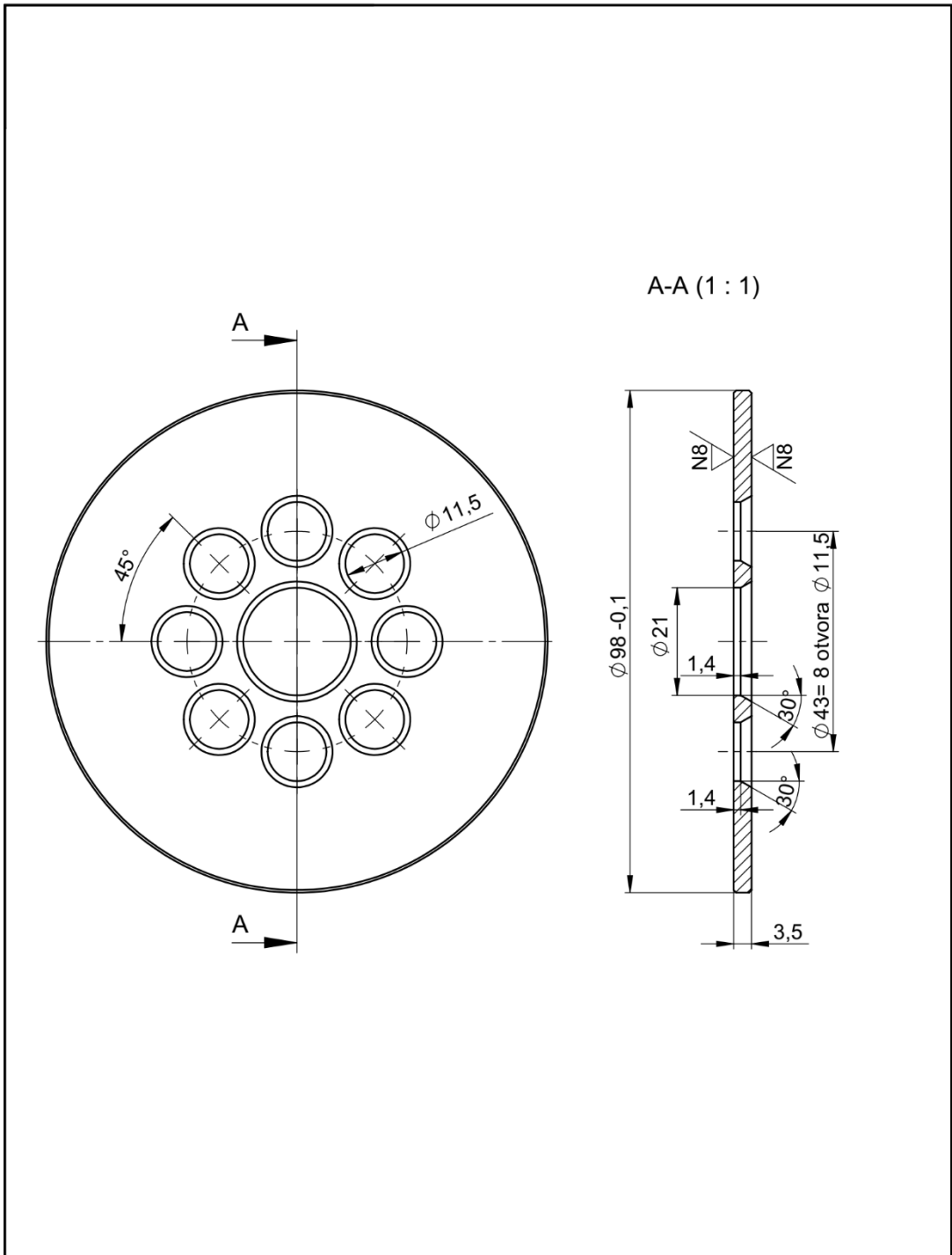
Površinska zaštita:			Termička obrada:		
Masa [kg]:	Status:	Materijal:	Dimenzije:		
		S235JRG2 (Č.0363)	Ø 98x3,5		
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Odgovorna osoba:	Datum:	$\beta=0,50$ BVO3		
	Konstruisao:	Marko Đurđević			
	Kontrolisao:				
	Odobrio:				
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Format: A4	Razmera: 1:2	Klasa tolerancije slobodnih mera prema SRPS ISO 2768-1	Oznaka / broj crteža:	Revizija:
					List: 1 Listova: 1



A-A (1 : 1)

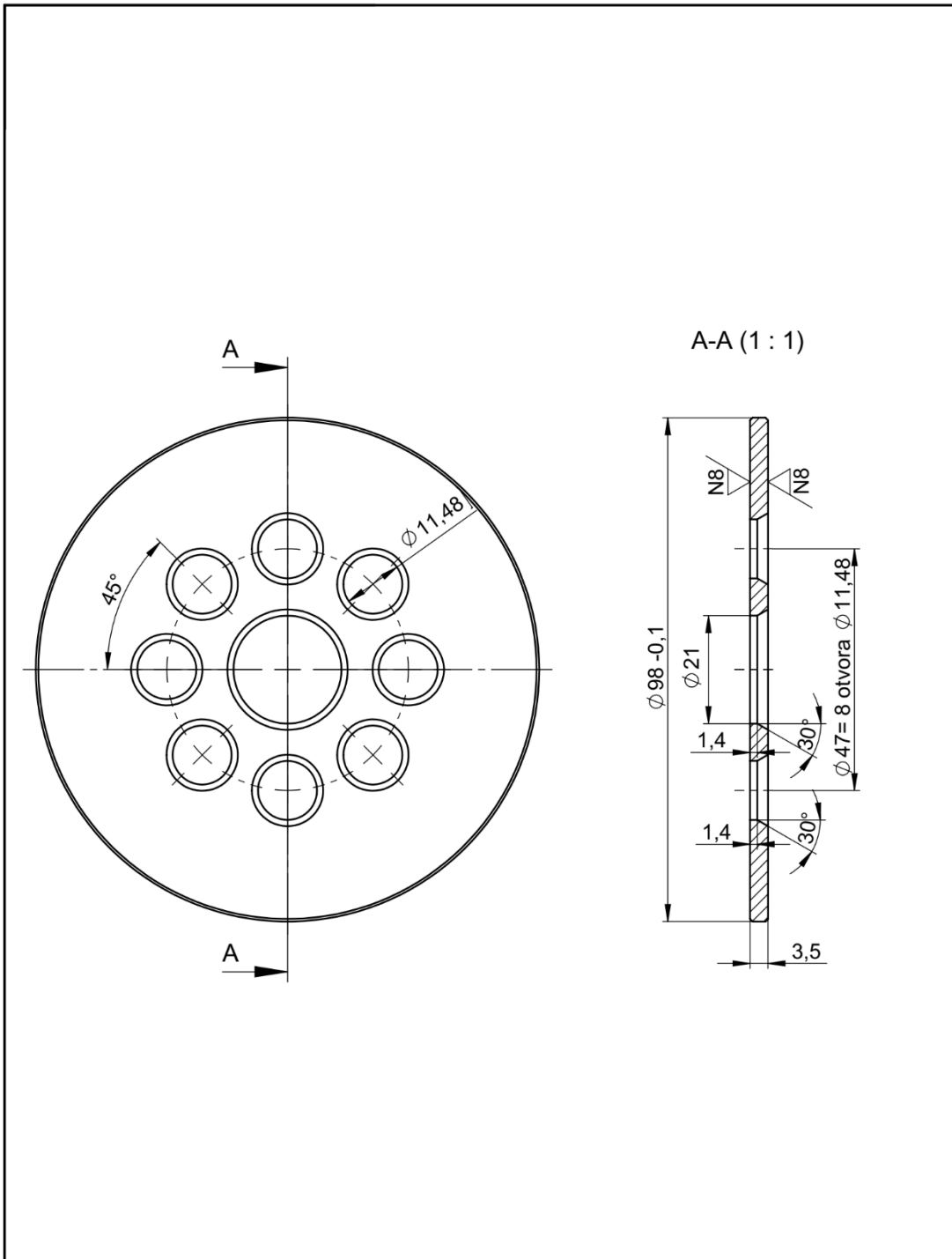


Površinska zaštita:		Termička obrada:			
Masa [kg]:	Status:	Materijal:	Dimenzije:		
		S235JRG2 (Č.0363)	$\phi 98 \times 3,5$		
	Odgovorna osoba:	Datum:	Naziv: $\beta=0,55$ BJO		
	Konstruisao:	Marko Đurđević			
	Kontrolisao:				
	Odobrio:				
Format:	Razmera:	Klasa tolerancije slobodnih mera prema SRPS ISO 2768-1	Oznaka / broj crteža:	Revizija:	List: 1
A4	1:2				Listova: 1

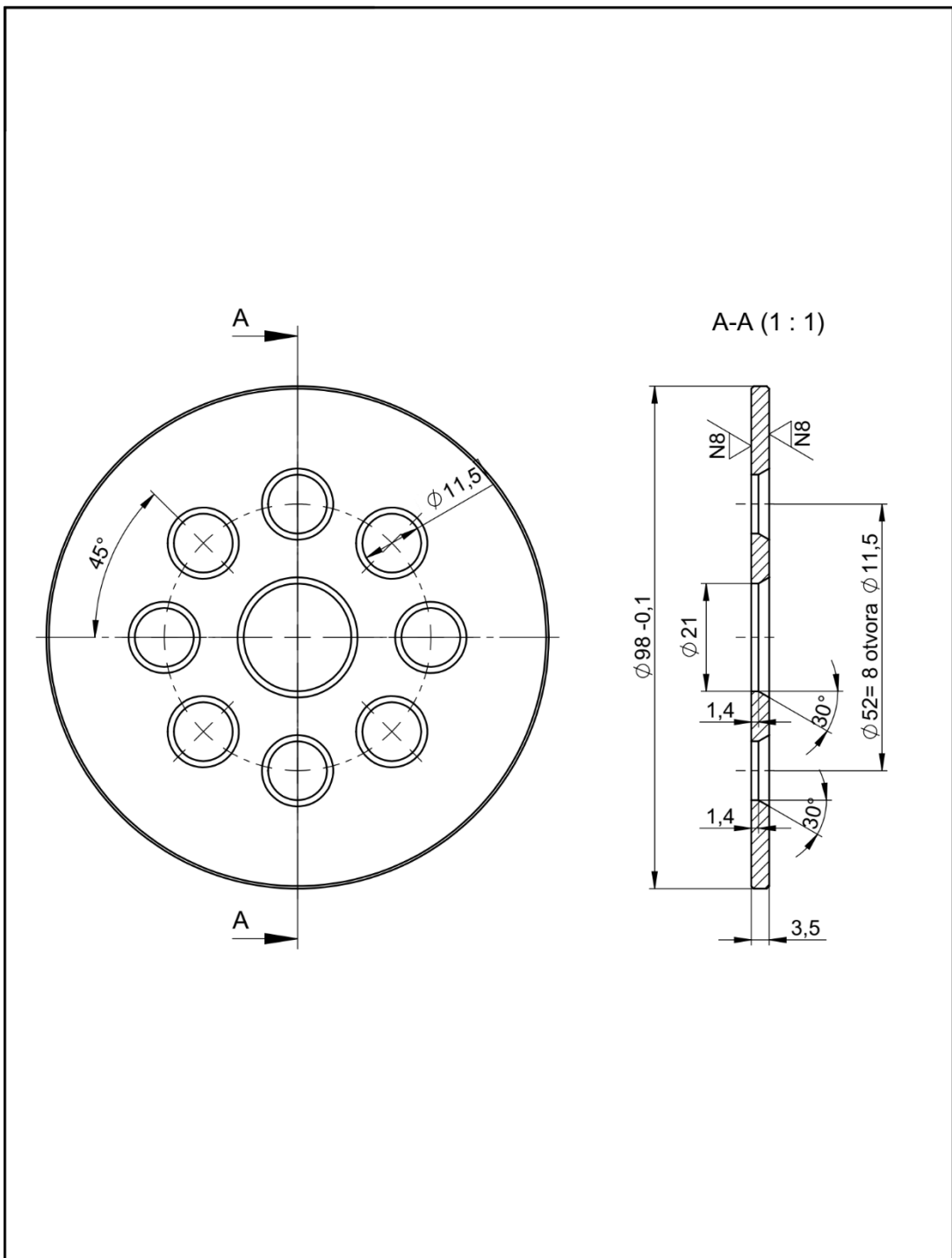


A-A (1 : 1)

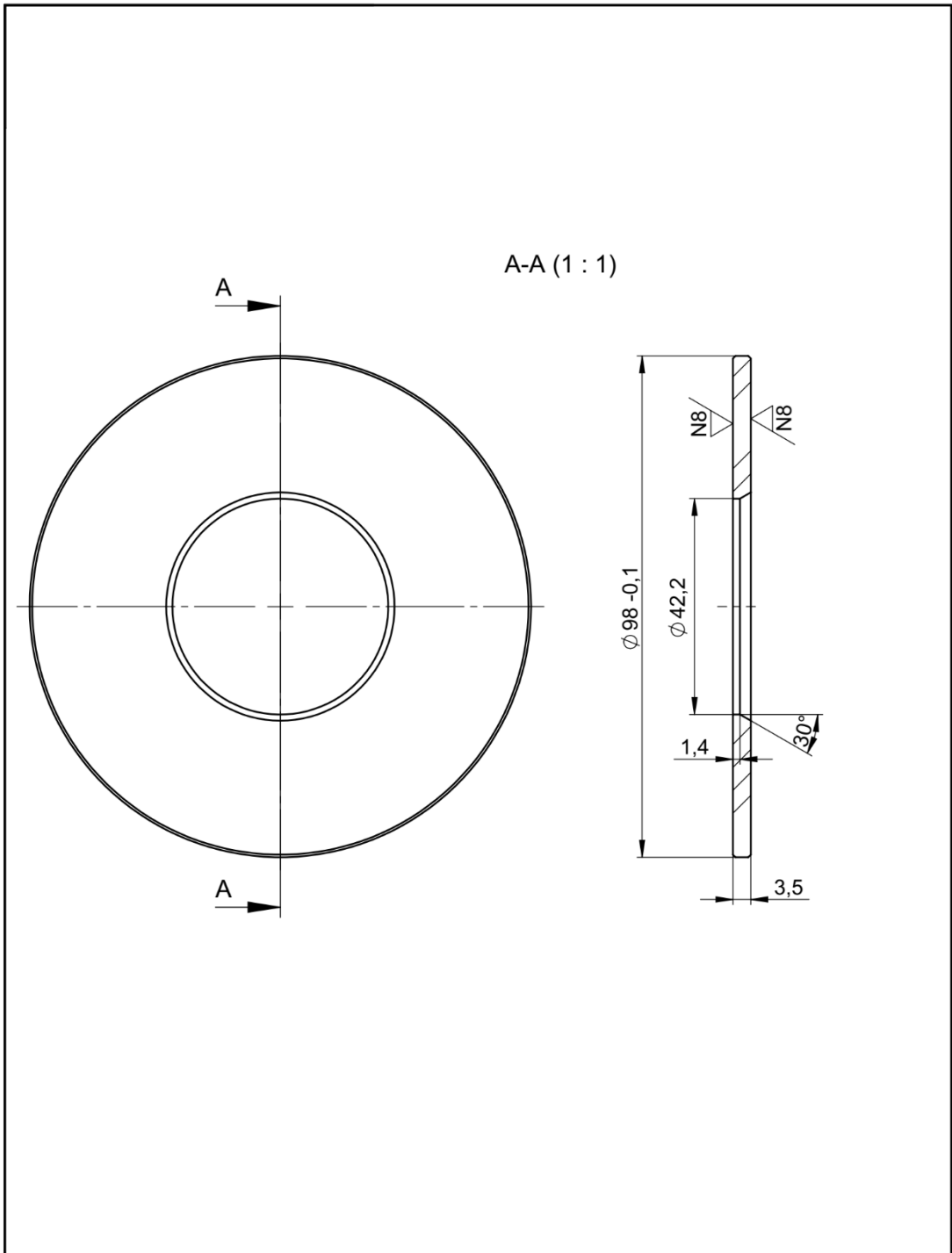
Površinska zaštita:		Termička obrada:	
Masa [kg]:	Status:	Materijal: S235JRG2 (Č.0363)	Dimenzije: Ø 98x3,5
Konstruisao: Kontrolisao: Odobrio:	Odgovorna osoba: Marko Đurđević	Naziv: $\beta=0,55$ BVO1	
	Datum:		
Format: A4 Razmera: 1:2	Klasa tolerancije slobodnih mera prema SRPS ISO 2768-1		Oznaka / broj crteža: Revizija:
		List: 1	Listova: 1



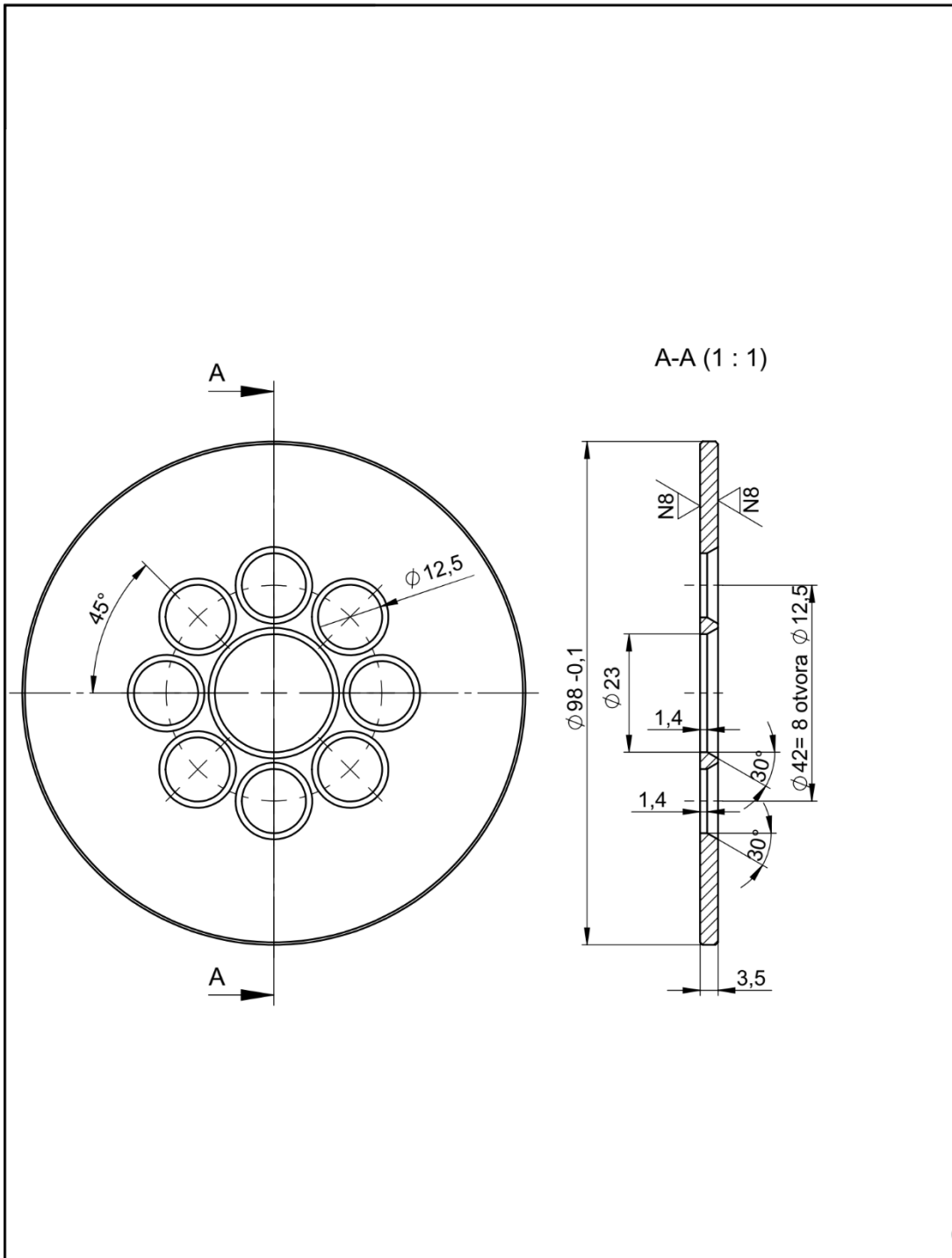
Površinska zaštita:		Termička obrada:			
Masa [kg]:	Status:	Materijal: S235JRG2 (Č.0363)	Dimenzije: Ø 98x3,5		
	Odgovorna osoba: Marko Đurđević	Naziv: β=0,55 BVO2			
	Datum:				
	Kontrolisao:				
	Odobrio:				
Format: A4	Razmera: 1:2	Klasa tolerancije slobodnih mera prema SRPS ISO 2768-1	Oznaka / broj crteža:	Revizija:	List: 1
					Listova: 1



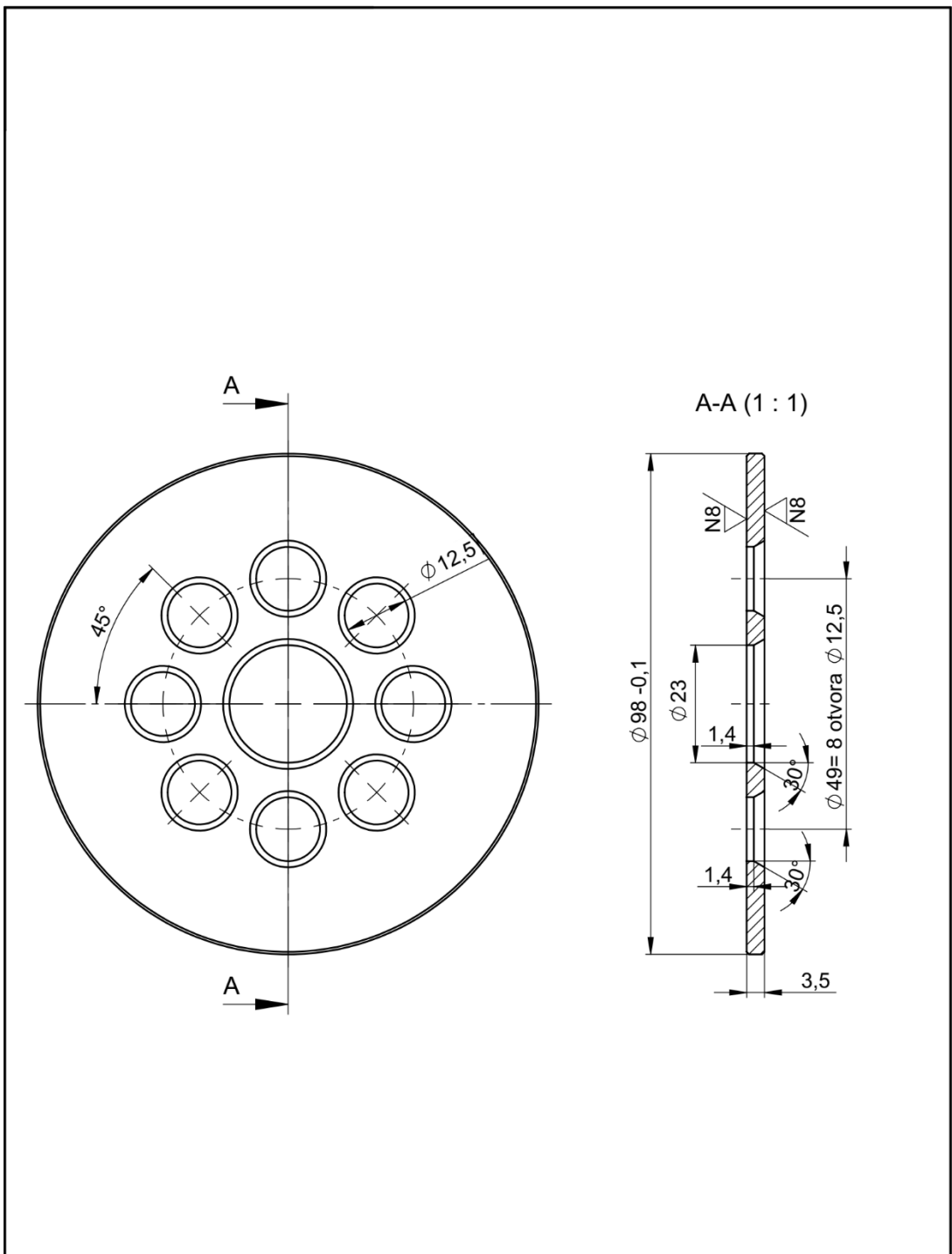
Površinska zaštita:		Termička obrada:														
Masa [kg]:	Status:	Materijal: S235JRG2 (Č.0363)	Dimenzije: Ø 98x3,5													
<table border="1"> <tr> <td>Konstruisao:</td> <td>Marko Đurđević</td> <td>Datum:</td> <td rowspan="4"> $\beta=0,55$ BVO3 </td> </tr> <tr> <td>Kontrolisao:</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Odobrio:</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td></td> </tr> </table>	Konstruisao:	Marko Đurđević	Datum:	$\beta=0,55$ BVO3	Kontrolisao:			Odobrio:						Odgovorna osoba:	Datum:	Naziv:
	Konstruisao:	Marko Đurđević	Datum:		$\beta=0,55$ BVO3											
	Kontrolisao:															
	Odobrio:															
Format: A4	Razmera: 1:2	Klasa tolerancije slobodnih mera prema SRPS ISO 2768-1														
Oznaka / broj crteža:		Revizija:	List: 1 Listova: 1													



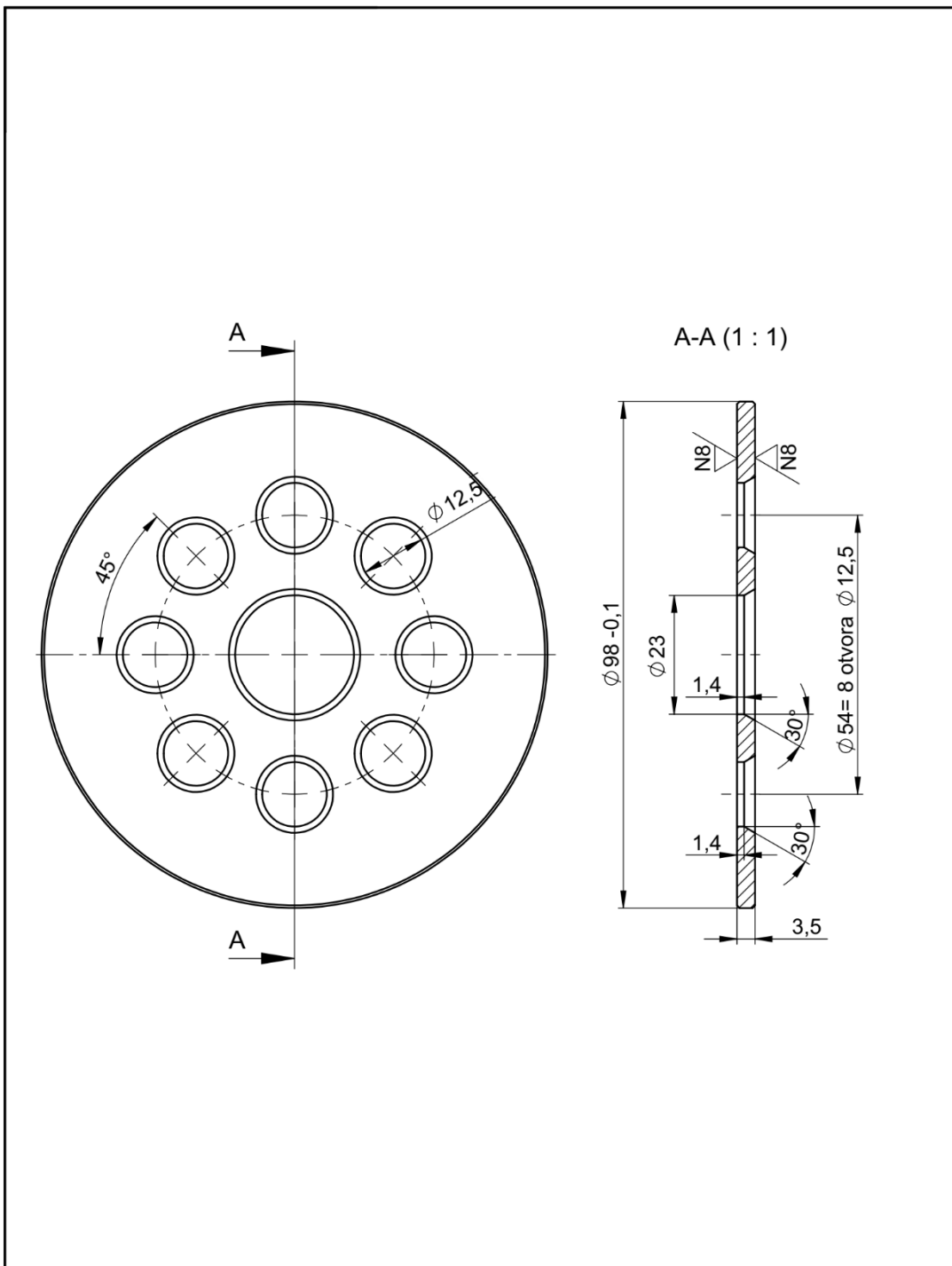
Površinska zaštita:		Termička obrada:															
Masa [kg]:	Status:	Materijal: S235JRG2 (Č.0363)	Dimenzije: Ø 98x3,5														
<table border="1"> <tr> <td>Konstruisao:</td> <td>Odgovorna osoba:</td> <td>Datum:</td> </tr> <tr> <td>Kontrolisao:</td> <td>Marko Đurđević</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Odobrio:</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	Konstruisao:	Odgovorna osoba:	Datum:	Kontrolisao:	Marko Đurđević		Odobrio:			Naziv: β=0,60 BJO							
	Konstruisao:	Odgovorna osoba:	Datum:														
	Kontrolisao:	Marko Đurđević															
Odobrio:																	
<table border="1"> <tr> <td>Format: A4</td> <td>Razmera: 1:2</td> <td>Klasa tolerancije slobodnih mera prema SRPS ISO 2768-1</td> <td>Oznaka / broj crteža:</td> <td>Revizija:</td> <td>List: 1</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Listova: 1</td> </tr> </table>	Format: A4	Razmera: 1:2	Klasa tolerancije slobodnih mera prema SRPS ISO 2768-1	Oznaka / broj crteža:	Revizija:	List: 1						Listova: 1					
Format: A4	Razmera: 1:2	Klasa tolerancije slobodnih mera prema SRPS ISO 2768-1	Oznaka / broj crteža:	Revizija:	List: 1												
					Listova: 1												



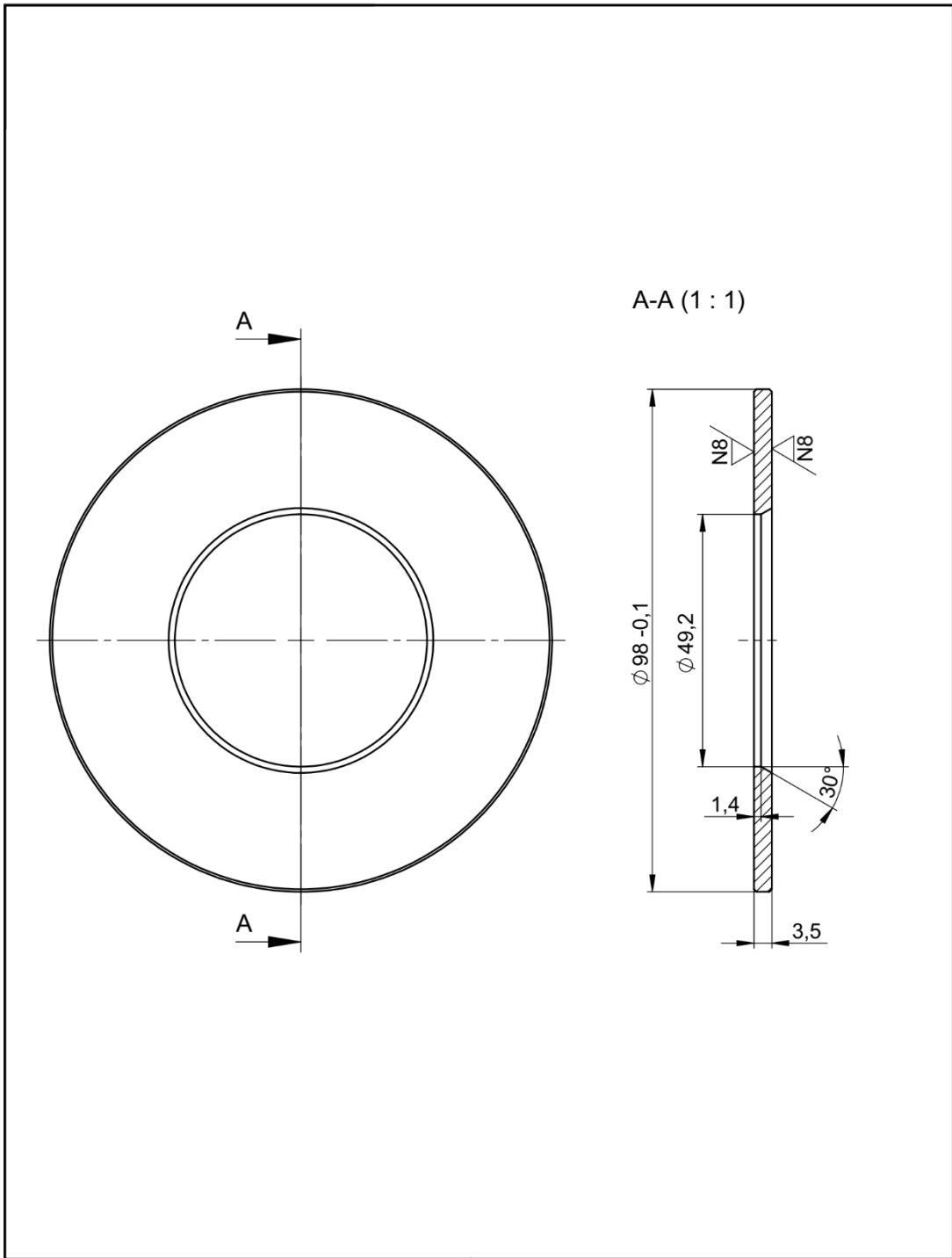
Površinska zaštita:		Termička obrada:	
Masa [kg]:	Status:	Materijal: S235JRG2 (Č.0363)	Dimenzije: Ø 98x3,5
Konstruisao: Kontrolisao: Odobrio:	Odgovorna osoba: Marko Đurđević	Datum:	Naziv: $\beta=0,60$ BVO1
	Format: A4	Razmera: 1:2	Klasa tolerancije slobodnih mera prema SRPS ISO 2768-1
Oznaka / broj crteža:		Revizija:	List: 1 Listova: 1



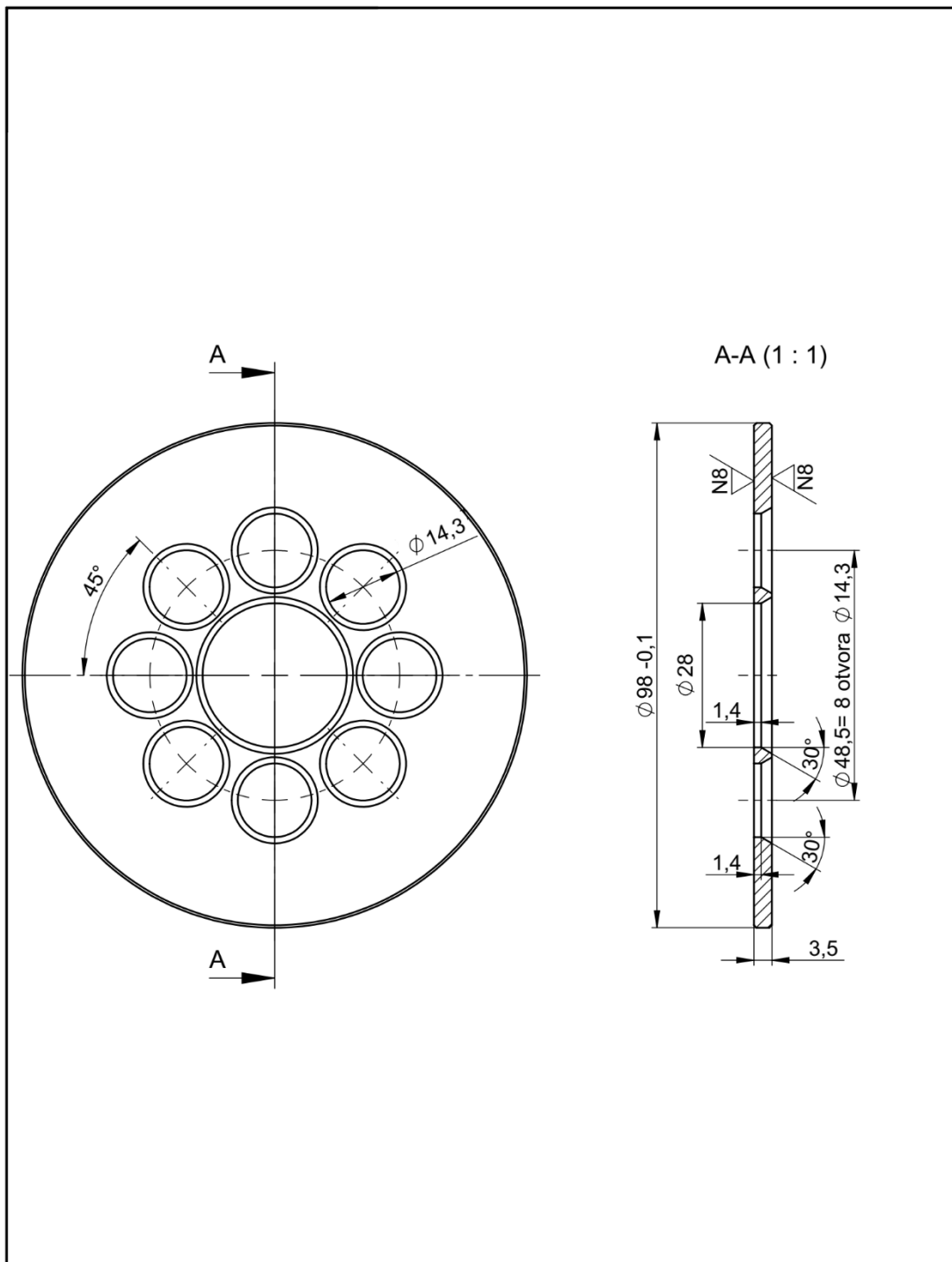
Površinska zaštita:		Termička obrada:			
Masa [kg]:	Status:	Materijal: S235JRG2 (Č.0363)	Dimenzije: $\phi 98 \times 3,5$		
Konstruisao: Kontrolisao: Odobrio:	Odgovorna osoba: Marko Đurđević	Naziv: $\beta=0,60$ BVO2			
	Datum:				
Format: A4	Razmera: 1:2	Klasa tolerancije slobodnih mera prema SRPS ISO 2768-1	Oznaka / broj crteža:	Revizija:	List: 1 Listova: 1



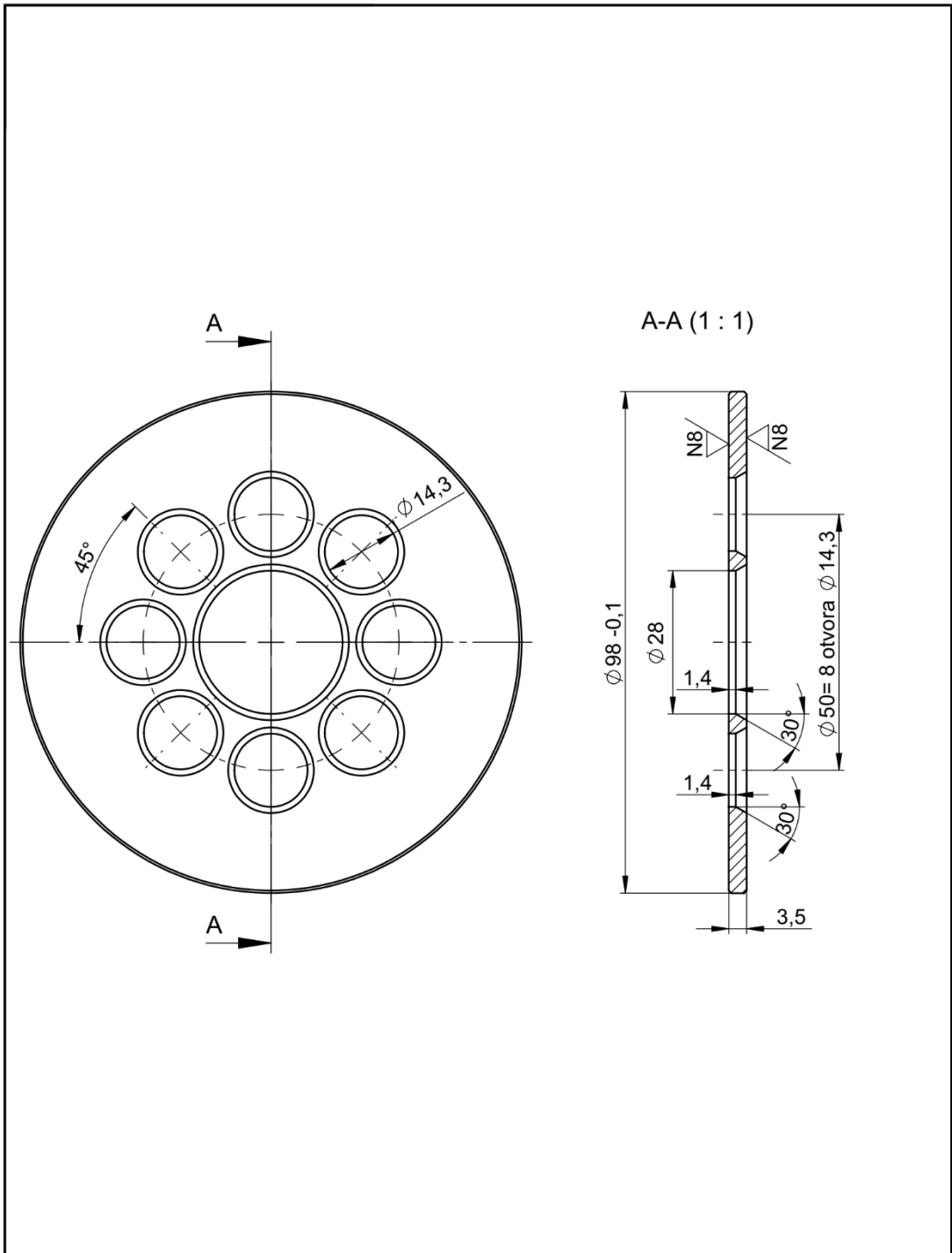
Površinska zaštita:		Termička obrada:			
Masa [kg]:	Status:	Materijal:	Dimenzije:		
		S235JRG2 (Č.0363)	Ø 98x3,5		
	Odgovorna osoba:	Datum:	Naziv:		
Konstruisao:	Marko Đurđević		β=0,60 BVO3		
Kontrolisao:					
Odobrio:					
Format:	Razmera:	Klasa tolerancije slobodnih mera prema SRPS ISO 2768-1	Oznaka / broj crteža:	Revizija:	List: 1
A4	1:2				Listova: 1



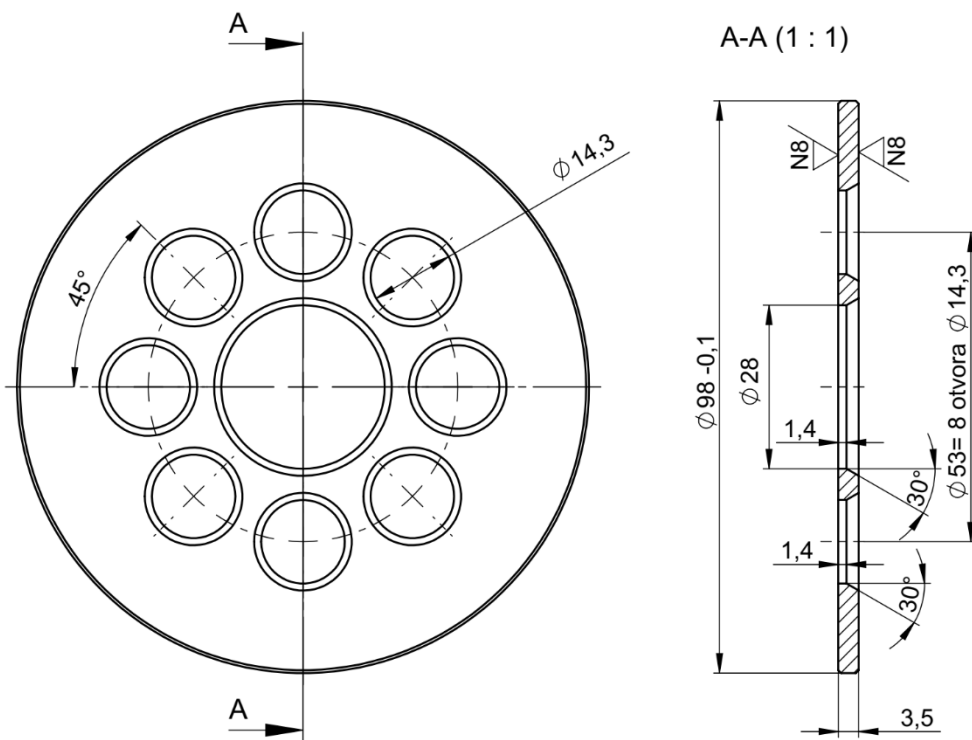
Površinska zaštita:		Termička obrada:			
Masa [kg]:	Status:	Materijal:	Dimenzije:		
		S235JRG2 (Č.0363)	Ø98x3,5		
	Konstruisao:	Odgovorna osoba:	Naziv:		
	Kontrolisao:	Marko Đurđević			
	Odobrio:				
		β=0,70 BJO			
	Format:	Razmera:	Klasa tolerancije slobodnih mera prema SRPS ISO 2768-1	Oznaka / broj crteža:	Revizija:
	A4	1:2			
					List: 1
					Listova: 1



Površinska zaštita:		Termička obrada:	
Masa [kg]:	Status:	Materijal: S235JRG2 (Č.0363)	Dimenzije: Ø 98x3,5
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Konstruisao:	Odgovorna osoba:	$\beta=0,70$ BVO1
	Kontrolisao:	Marko Đurđević	
	Odobrio:	Datum:	
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Format: A4	Razmera: 1:2	Klasa tolerancije slobodnih mera prema SRPS ISO 2768-1
Oznaka / broj crteža:		Revizija:	List: 1 Listova: 1

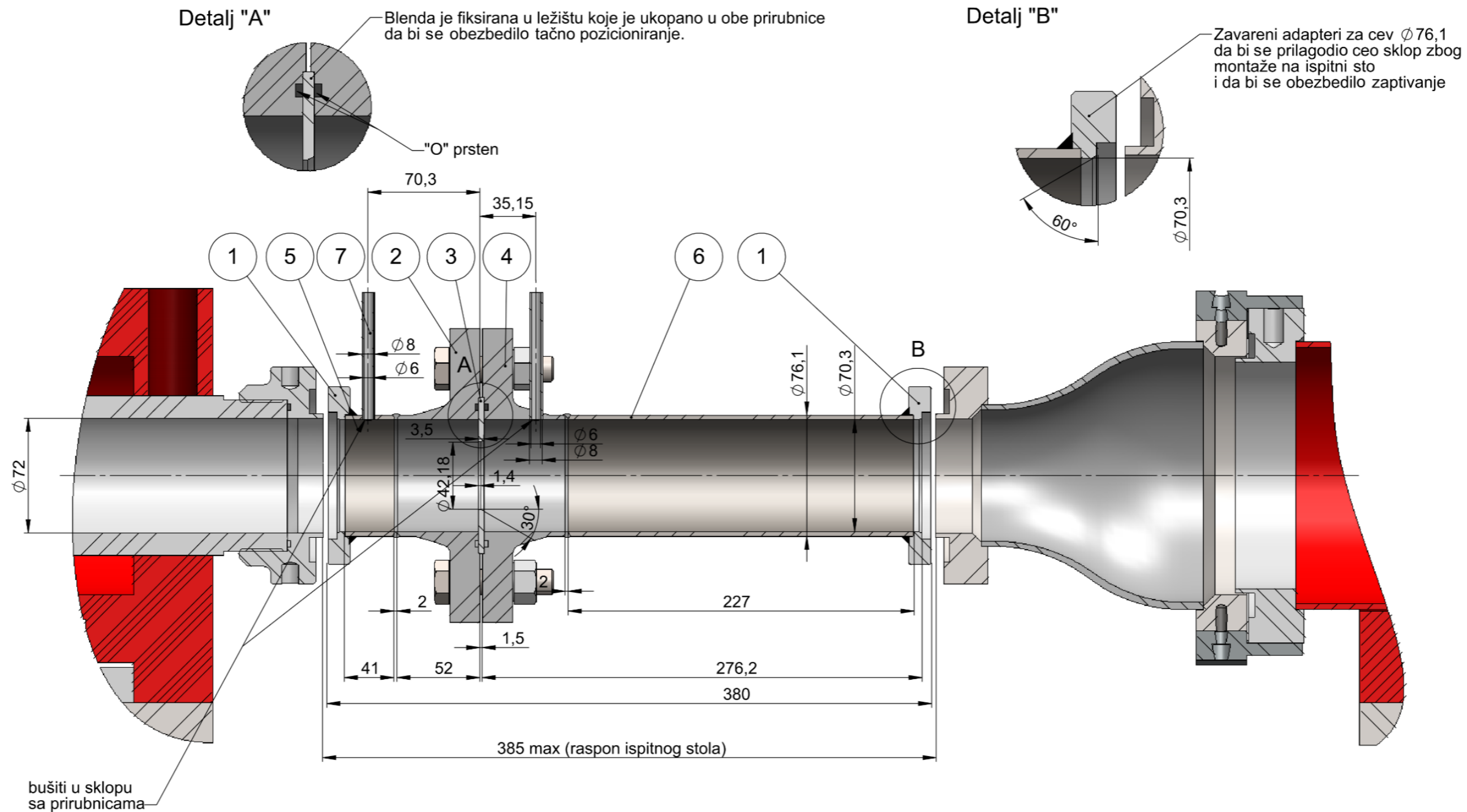


Površinska zaštita:		Termička obrada:	
Masa [kg]:	Status:	Materijal: S235JRG2 (Č.0363)	Dimenzije: Ø 98x3,5
Konstruisao: Kontrolisao: Odobrio:	Odgovorna osoba: Marko Đurđević	Naziv: $\beta=0,70$ BVO2	
	Datum:		
Format: A4 Razmera: 1:2	Klasa tolerancije slobodnih mera prema SRPS ISO 2768-1		Oznaka / broj crteža: Revizija:
		List: 1	Listova: 1



Površinska zaštita:			Termička obrada:		
Masa [kg]:		Status:	Materijal:	Dimenzije:	
			S235JRG2 (Č.0363)	Ø 98x3,5	
	Konstruisao:	Odgovorna osoba:	Naziv:		
	Kontrolisao:	Marko Đurđević			
	Odobrio:				
Klasa tolerancije slobodnih mera prema SRPS ISO 2768-1			Oznaka / broj crteža:		Revizija:
	Format: A4	Razmera: 1:2	Naziv: $\beta=0,70$ BVO3		List: 1 Listova: 1

ПРИЛОГ 2



Poz.	kol.	ID Broj	Naziv	Dimenzija	Materijal
9	8	K011954	Šestougaona navrtka	M16	Klasa 10.9 (34Cr4: Č.4130)
8	8	K011820	Vijak M6	M16x65	Klasa 10.9
7	2		Impulsna cev $\varnothing 8$	$\varnothing 8 \times L$	X5CrNi18-10 (Č.4580)
6	1		Bešavna cev 76,1x217	$\varnothing 76,1 \times 2,9 \times 217$	P235TR1 (Č.1212)
5	1		Bešavna cev 76,1x31	$\varnothing 76,1 \times 2,9 \times 31$	P235TR1 (Č.1212)
4	1	K005944	Prirubnica-EN 1092-1 Tip 11	DN65 PN16-dorada	GP240GH (PED; 1.0619)
3	1		Blenda 1	$\varnothing 98 \times 3,5$	S235JRG2 (Č.0363)
2	1	K005944	Prirubnica-EN 1092-1 Tip 11	DN65 PN16-dorada	GP240GH (PED; 1.0619)
1	2		Prirubnica za zaptivanje	$\varnothing 112 \times 14$	S235JRG2 (Č.0363)
Poz.	kol.	ID Broj	Naziv	Dimenzija	Materijal

Površinska zaštita:		Termička obrada:	
Masa [kg]:	Status:	Materijal:	Dimenzije:
		Sklop	
	Odgovorna osoba:	Naziv:	
	Marko Đurđević	Geometrija merne blende i cevi V3	
	Datum:		
	Konstruisao:		
	Kontrolisao:		
	Odobrio:		
Format:	Razmera:	Oznaka / broj crteža:	Revizija:
A3	1:20		List: 1
			Listova: 1

Овај Образац чини саставни део докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта који се брани на Универзитету у Новом Саду. Попуњен Образац укоричити иза текста докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта.

План третмана података

Назив пројекта/истраживања
Прилог истраживању струјања гаса кроз мерне бленде
Назив институције/институција у оквиру којих се спроводи истраживање
Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Департман за енергетику и процесну технику
Назив програма у оквиру ког се реализује истраживање
/
1. Опис података
<i>1.1 Врста студије</i> <i>Укратко описати тип студије у оквиру које се подаци прикупљају</i> <u>Докторска дисертација</u>
<i>1.2 Врсте података</i> а) квантитативни б) квалитативни
<i>1.3. Начин прикупљања података</i> а) анкете, упитници, тестови б) клиничке процене, медицински записи, електронски здравствени записи в) генотипови: навести врсту _____ г) административни подаци: навести врсту _____ д) узорци ткива: навести врсту _____ ђ) снимци, фотографије: навести врсту _____ е) текст, навести врсту <u>Литературни извори</u>

ж) мапа, навести врсту _____

з) остало: описати **Експериментална испитивања** _____

1.3 Формат података, употребљене скале, количина података

1.3.1 Употребљени софтвер и формат датотеке:

а) Excel фајл, датотека **.xlsx** _____

б) SPSS фајл, датотека _____

в) PDF фајл, датотека **.pdf** _____

г) Текст фајл, датотека **.docx** _____

д) JPG фајл, датотека **.jpg, .png** _____

е) Остало, датотека _____

1.3.2. Број записа (код квантитативних података)

а) број варијабли **Велики број** _____

б) број мерења (испитаника, процена, снимака и сл.) **Велики број** _____

1.3.3. Поновљена мерења

а) да

б) не

Уколико је одговор да, одговорити на следећа питања:

а) временски размак између поновљених мера је **2 минута** _____

б) варијабле које се више пута мере односе се на **Диференцијални притисак, проток**

в) нове верзије фајлова који садрже поновљена мерења су именоване као _____

Напомене: _____

Да ли формати и софтвер омогућавају дељење и дугорочну валидност података?

а) *Да*

б) *Не*

Ако је одговор не, образложити _____

2. Прикупљање података

2.1 Методологија за прикупљање/генерисање података

2.1.1. У оквиру ког истраживачког нацрта су подаци прикупљени?

а) експеримент, навести тип Мерење диференцијалног и апсолутног притиска, протока, температуре и влажности ваздуха при струјању флуида кроз мерне бленде са јединим и више отвора

б) корелационо истраживање, навести тип _____

ц) анализа текста, навести тип Прикупљање података анализом доступне литературе

д) остало, навести шта Нумеричке симулације, рачунарска динамика флуида - РДФ

2.1.2 Навести врсте мерних инструмената или стандарде података специфичних за одређену научну дисциплину (ако постоје).

Квантометар Elster QAc250

Квантометар Elster QAc650

Манометар Yokogawa EJA530A

Диференцијални манометар Yokogawa EJA110A

Инструмент за мерење влажности E+E Elektronik EE33

Аквизиција CompactDAQ произвођача National Instruments

Модул NI 9208 произвођача National Instruments и

Модул NI 9208Е произвођача National Instruments

2.2 Квалитет података и стандарди

2.2.1. Третман недостајућих података

а) Да ли матрица садржи недостајуће податке? Да **Не**

Ако је одговор да, одговорити на следећа питања:

а) Колики је број недостајућих података? _____

б) Да ли се кориснику матрице препоручује замена недостајућих података? Да **Не**

в) Ако је одговор да, навести сугестије за третман замене недостајућих података

2.2.2. На који начин је контролисан квалитет података? Описати

Квалитет података је контролисан при експерименталном испитивању понављањем мерења при истим условима и њиховим поређењем

2.2.3. На који начин је извршена контрола уноса података у матрицу?

Подаци унесени у матрицу су упоређени са подацима из активних стандарда као и са подацима из доступне литературе

3. Третман података и пратећа документација

3.1. Третман и чување података

3.1.1. Подаци ће бити депоновани у репозиторијум докторских дисертација на Универзитету у Новом Саду.

3.1.2. URL адреса <https://cris.uns.ac.rs/searchDissertations.jsf>

3.1.3. DOI _____

3.1.4. Да ли ће подаци бити у отвореном приступу?

- a) Да
- б) Да, али после ембарга који ће трајати до _____
- в) **Не**

Ако је одговор не, навести разлог _____

3.1.5. Подаци неће бити депоновани у репозиторијум, али ће бити чувани.

Образложење

3.2 Метаподаци и документација података

3.2.1. Који стандард за метаподатке ће бити примењен? _____

3.2.1. Навести метаподатке на основу којих су подаци депоновани у репозиторијум.

Ако је потребно, навести методе које се користе за преузимање података, аналитичке и процедуралне информације, њихово кодирање, детаљне описе варијабли, записа итд.

3.3 Стратегија и стандарди за чување података

3.3.1. До ког периода ће подаци бити чувани у репозиторијуму? _____

3.3.2. Да ли ће подаци бити депоновани под шифром? Да Не

3.3.3. Да ли ће шифра бити доступна одређеном кругу истраживача? Да Не

3.3.4. Да ли се подаци морају уклонити из отвореног приступа после извесног времена?

Да Не

Образложити

4. Безбедност података и заштита поверљивих информација

Овај одељак МОРА бити попуњен ако ваши подаци укључују личне податке који се односе на учеснике у истраживању. За друга истраживања треба такође размотрити заштиту и сигурност података.

4.1 Формални стандарди за сигурност информација/података

Истраживачи који спроводе испитивања с људима морају да се придржавају Закона о заштити података о личности (https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html) и одговарајућег институционалног кодекса о академском интегритету.

4.1.2. Да ли је истраживање одобрено од стране етичке комисије? Да **Не**

Ако је одговор Да, навести датум и назив етичке комисије која је одобрила истраживање

4.1.2. Да ли подаци укључују личне податке учесника у истраживању? Да **Не**

Ако је одговор да, наведите на који начин сте осигурали поверљивост и сигурност информација везаних за испитанике:

- a) Подаци нису у отвореном приступу
 - б) Подаци су анонимизирани
 - ц) Остало, навести шта
-
-

5. Доступност података

5.1. Подаци ће бити

- a) јавно доступни
- б) доступни само уском кругу истраживача у одређеној научној области
- ц) **затворени**

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести под којим условима могу да их користе:

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести на који начин могу приступити подацима:

5.4. Навести лиценцу под којом ће прикупљени подаци бити архивирани.

Ауторство – некомерцијално – без прераде

6. Улоге и одговорност

6.1. Навести име и презиме и мејл адресу власника (аутора) података

Марко Ђурђевић, markodj@uns.ac.rs

6.2. Навести име и презиме и мејл адресу особе која одржава матрицу с подацима

Марко Ђурђевић, markodj@uns.ac.rs

6.3. Навести име и презиме и мејл адресу особе која омогућује приступ подацима другим истраживачима

Марко Ђурђевић, markodj@uns.ac.rs
