

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

МИХАИЛО Р. ВАСИЋ

УТИЦАЈ ГЕОМЕТРИЈЕ ЕЛЕМЕНАТА
ЗА ДИСТРИБУЦИЈУ ВАЗДУХА НА
ЕКСПАНЗИЈУ ВАЗДУШНОГ МЛАЗА
У СИСТЕМИМА МЕШАЈУЋЕ
ВЕНТИЛАЦИЈЕ

докторска дисертација

Београд, 2021

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

MIHAILO R. VASIĆ

INFLUENCE OF GEOMETRY FOR
THE AIR TERMINAL DEVICES ON
AIR JET EXPANSION IN MIXING
VENTILATION SYSTEMS

doctoral dissertation

Belgrade, 2021

Ментори:

др **ВЛАДИМИР СТЕВАНОВИЋ**, редовни професор
УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ, МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

др **АЛЕКСАНДРА СРЕТЕНОВИЋ**, доцент
УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ, МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Чланови комисије:

др **ВЛАДИМИР СТЕВАНОВИЋ**, редовни професор
УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ, МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

др **АЛЕКСАНДРА СРЕТЕНОВИЋ**, доцент
УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ, МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

др **БРАНИСЛАВ ЖИВКОВИЋ**, редовни професор у пензији
УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ, МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

др **ТАМАРА БАЈЦ**, доцент
УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ, МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

др **МИЛИЦА ИЛИЋ**, научни сарадник
УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ,
ИНОВАЦИОНИ ЦЕНТАР МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Датум одбране:

Мојим славним прецима,

онима који часно изборише слободу, углед и поштовање
имена Србије у свету, и онима после њих, који поштењем,
знањем и радом подизаше нас и ову земљу
са вером у Бога и бољу будућност ...



У Африци-Бизерта 1917. године, успомена на дан славе Св. Николе
(други с десна мој чукундеда Тихомир Антонић)

„Свак је рођен да по једном умре,
част и брука живе до века.“

Петар II Петровић Његош

Захвалница

Током вишегодишњег рада на овој дисертацији пружена ми је драгоцену подршку од многих колега, пословних сарадника, познаника и пријатеља којима се овом приликом најсрдачније захваљујем.

Највећу захвалност дугујем свом ментору, др **Владимиру Стевановићу**, редовном професору Машинског факултета у Београду, првенствено на изузетном људском и професионалном односу још од времена основних студија када смо се први пут срели па током свих претходних година, који ми је пре свега указао неизмерно поверење прихвативши да руководи овим истраживањем, а потом пружио свесрдну и несебичну помоћ, подршку и својим искуством и корисним саветима допринео коначном циљу.

Др **Браниславу Живковићу**, редовном професору Машинског факултета у пензији, иначе ментору мог дипломског рада, захваљујем се на снажној стручној подршци, критичким запажањима приликом прегледа текста, плодотворним дискусијама и сугестијама које су допринеле квалитету овог рада, као и на целокупном односу према мени кроз сарадњу и дружење.

Доц. др **Александри Сретеновић** дугујем захвалност за преглед текста дисертације и корисне савете који су допринели њеној завршној форми.

Колеге са Катедре за хидрауличне машине и енергетске системе Машинског факултета у Београду, проф. др **Дејан Илић** и доц. др **Новица Јанковић**, давали су ми драгоцену смерницу неопходне за реализацију струјно-техничких мерења и пружили техничку помоћ везану за рачунарски програм у коме су извршене нумеричке симулације струјања.

Захваљујем се господину **Драгану Обрадовићу**, дипл. екон., директору предузећа КЛИМА ДОП, на уступљеним сегментима спиро-канала који су били део експерименталних инсталација, као и господину **Радојку Мићићу**, дипл. ел. инж., који је обезбедио потребну опрему и помогао око електричних инсталација потребних за извођење експеримената. Захвалност дугујем и господину **Миленку Радаљцу** који је уступањем простора адекватне величине у свом објекту омогућио реализацију једног дела експерименталних испитивања.

Непрекидно су били доступни сви технички ресурси предузећа КОРАЈА из Лознице, где је обезбеђена комплетна мерна опрема и направљени сви елементи примењени кроз експерименте.

Апсолутно је немогуће отргнути се сећањима на трагично настрадалог стрица Слободана Васића[†], дипл. маш. инж. (1955-2001), који ме је први увео у свет термотехнике и поставио основе нашег већ готово три деценије успешног породичног посла, што је

у потпуности трасирало пут ка мом професионалном опредељењу. Велика животна подршка били су ми деда Милисав[†] (1927-2021) и баба Милева Васић, бивши учитељи, и деда Спасоје[†], столар (1932-2019) и баба Неранца Петровић[†] (1936-2020) уз које сам одрастао. Захваљујем се својим родитељима, вечитом животном ослоњу, и Тијани, мојој јединој, најпоноснијој сестри на свету.

*„Позвани смо да чинимо сагласно своме звању,
онолико колико нам је Бог дао, ни мање ни више.
А оно што ми не успемо да учинимо, то остаје
да учини Господ и надопуни наше недостатке.“*

патријарх Павле

УТИЦАЈ ГЕОМЕТРИЈЕ ЕЛЕМЕНАТА ЗА ДИСТРИБУЦИЈУ ВАЗДУХА НА ЕКСПАНЗИЈУ ВАЗДУШНОГ МЛАЗА У СИСТЕМИМА МЕШАЈУЋЕ ВЕНТИЛАЦИЈЕ

Резиме

Овим радом обухваћене су нумеричке симулације и експериментална испитивања експанзије турбулентног ваздушног млаза који се појављује у системима механичке вентилације. Кретање ваздуха у затвореном простору има велики утицај на ниво комфора и представља озбиљан проблем у многим климатизованим или проветраваним просторијама. Ваздух се у просторију уводи локализовано и то релативно великим брзинама, а опште је прихваћен став да тако настали млаз поседује одговарајућу симетрију и униформност који су последица извесне симетрије завршних елемената за дистрибуцију ваздуха, те да искључиво они утичу на његово ширење. Међутим, делови каналске мреже и различита припадајућа опрема за усмеравање и регулацију доприноси да на улазном грлу иструјних елемената буде неравномерно поље брзине што се даље одражава на последични млаз. Спроведена истраживања посвећена су проблематици асиметрије и неравномерне расподеле протока на дистрибутивним елементима који су у широкој примени код ваздушних КГХ система. Обављена су нумеричка испитивања ваздушног млаза који се генерише на вентилационој решетки са једним редом појединачно подесивих недивергираних ламела и са регулатором протока са супротносмерним лопатицама при чему је посматрана максимална брзина млаза на различитим растојањима од иструјног отвора у зависности од степена отворености демпера, као и разлике у домету и ширењу млаза у простору. Анализиран је случај четвоространог плафонског анемостата монтираног на прикључну кутију са бочним прикључком којом приликом је сагледана променљивост протока ваздуха у свим правцима за различите типове дефлектора. Такође је размотрен утицај положаја и степена отворености регулационе клапне на равномерност раванског млаза код линијских дифузора са прикључном кутијом и бочним доводом ваздуха. Показано је да наведени примери, изабрани као незаобилазни у свакодневной практичној примени, и чији утицај се том приликом не узима у обзир, у већој или мањој мери утичу на кретање ваздуха у простору. Валидација нумеричких резултата спроведена је кроз експериментална мерења и визуелизацију струјања са димом.

Кључне речи: *ваздушни млаз, турбуленција, вентилациона решетка, плафонски дифузор, CFD*

Научна област: *Машинство*

Ужа научна област: *Термотехника - Примењена механика флуида*

УДК број: 628.854:697.921(0.43.3)
628.854:697.921|:004.94 (0.43.3)

INFLUENCE OF GEOMETRY FOR THE AIR TERMINAL DEVICES ON AIR JET EXPANSION IN MIXING VENTILATION SYSTEMS

Abstract

This paper includes numerical simulations and experimental investigations of the expansion of a turbulent air jet that occurs in mechanical ventilation systems. Indoor air movement has a major impact on comfort levels and is a serious problem in many air-conditioned or ventilated rooms.

Air is introduced into the room locally at relatively high velocities and it is generally accepted that the resulting jet has the appropriate symmetry and uniformity that are a consequence of a certain symmetry of the final devices, and that they only affect its spread. However, parts of the ducts and various attachments for air direction control and volume flow rate balancing contribute to an uneven velocity field at the neck of the air terminal devices, which is further reflected in the resulting jet. The conducted research is dedicated to the issue of asymmetry and uneven flow distribution on air terminal devices that are widely used in HVAC systems.

Numerical tests of the air jet generated on the ventilation grille with one row of individually adjustable non-diverged blades and with the opposed action blades damper unit were performed. During these tests, the maximum velocity of the jet was observed at different distances from the outlet. Depending on the damper openness, it would result in jet differences and the range of propagation in the room.

The four-sided ceiling diffuser with plenum box and side entry was studied. The unevenness of flow in all directions for different types of equalizing elements was observed. The position and openness of the damper influence the volume flow rate balancing on the uniformity of the plane jet in slot diffusers with a plenum box and side duct connection was also considered. It will be shown that the above examples, chosen as unavoidable in everyday practical application and whose influence is not considered on that occasion, to a greater or lesser extent affect the movement of air in a room. Validation of numerical results was performed through experimental measurements and visualization with smoke.

Keywords: *air jet, turbulence, ventilation grille, ceiling diffuser, CFD*

Scientific field in general: *Mechanical Engineering*

Scientific field in particular: *Thermal power science - Applied fluid mechanics*

UDC: 628.854:697.921(0.43.3)
628.854:697.921|:004.94 (0.43.3)

Садржај

Списак слика	xvii
Списак табела	xxi
Списак акронима	xxiii
Списак ознака	xxv
1 УВОДНА РАЗМАТРАЊА	1
1.1 Проблем затвореног простора	1
1.2 Дистрибуција ваздуха и њен значај у техници климатизације	3
1.3 Брзина струјања и интензитет турбуленције као параметри топлотне угодности	4
1.4 Мотивација и циљ истраживања	6
1.5 Преглед неких досадашњих истраживања	8
2 ФИЗИЧКО-МАТЕМАТИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ ТУРБУЛЕНТНИХ СТРУЈАЊА	11
2.1 Основни закони и једначине механике флуида	11
2.2 Модел динамике вискозног нестишљивог флуида	12
2.3 Турбуленција. Статистички концепт	14
2.4 Рејнолдсово осредњавање Навије-Стоксових једначина и турбулентни напони	15
2.5 Моделирање турбулентних напона	16
2.6 $k - \epsilon$ модел турбуленције	17
3 ТУРБУЛЕНТНИ МЛАЗ У ТЕХНИЦИ СОБНОГ ВАЗДУХА	21
3.1 Слободни млазеви	23
3.1.1 Својства и структура слободног млаза	23
3.1.2 Равански млаз	24
3.1.3 Осносиметрични млаз	25
3.1.4 Радијални млаз	27
3.2 Карактеристике слободних млазева	28
3.2.1 Интензитет турбуленције и степен мешања	28
3.2.2 Профил брзине	30
3.2.3 Зоне струјања и карактеристични пад брзине	32

3.2.4	Домент млаза	35
3.2.5	Контракција и дивергенција млаза	35
3.2.6	Пад брзине у оси изотермног млаза. Једначине млаза	36
3.2.7	Утицај температура на пад централне брзине. Архимедов број	40
3.2.8	Трајекторија неизотермног млаза	42
3.2.9	Температурни профил у неизотермном млазу	43
3.2.10	Запремина ваздуха покренута млазом. Индукција	44
3.3	Својства и структура припојеног млаза. Соанда ефекат и његов значај	45
3.4	Млазеви у ограниченем простору. Утицај геометрије просторије и унутрашњих ефеката на формирање млаза	48
3.5	Међусобна интеракција млазева	49
4	НУМЕРИЧКЕ АНАЛИЗЕ	53
4.1	Општи параметри	53
4.1.1	Полазне претпоставке	53
4.1.2	Формирање модела и прорачунске мреже	53
4.1.3	Гранични услови и параметри прорачуна	54
4.2	Утицај регулатора протока са супротносмерним лопатицама на карактеристике млаза код вентилационих решетки	55
4.2.1	Опис проблема	55
4.2.2	Резултати нумеричког прорачуна	56
4.2.3	Провера квалитета нумеричке мреже	69
4.3	Утицај прикључне кутије са бочним прикључком на расподелу млаза код плафонских дифузора	71
4.3.1	Опис проблема	71
4.3.2	Резултати нумеричког прорачуна	72
4.3.3	Провера квалитета нумеричке мреже	85
4.4	Утицај регулационе клапне у кутији са бочним прикључком на експанзију млаза код линијских дифузора	86
4.4.1	Опис проблема	86
4.4.2	Резултати нумеричког прорачуна	88
4.4.3	Провера квалитета нумеричке мреже	100
5	ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА	101
5.1	Избор мерне опреме и принципи мерења	101
5.2	Мерни инструменти	102
5.3	Мерне инсталације	103
5.4	Поступак мерења	104
5.5	Резултати експерименталних мерења	109
5.5.1	Брзине у слободном млазу формираном на зидној решетки	109
5.5.2	Протоци кроз карактеристичне зоне четвоространог анемоштата и аеродинамичке карактеристике дефлектора	110
5.5.3	Расподела протока дуж иструјног отвора линијског дифузора	111

6 ПОРЕЂЕЊЕ НУМЕРИЧКИХ И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ РЕЗУЛТАТА	113
6.1 Брзине у слободаном млазу формираном на зидној решетки	113
6.2 Расподела протока на четвоространом плафонском анемостату	115
6.3 Расподела протока на отвору линијског дифузора	116
7 ЗАКЉУЧАК	119
Литература	123
I ПОДАЦИ О МЕРЕЊУ БРЗИНЕ У СЛОБОДНОМ МЛАЗУ НА ЗИДНОЈ РЕШЕТКИ	131
Биографија аутора	165

Списак слика

1.1	Удео главних фактора на развој SBS	2
1.2	Дозвољене вредности средње брзине ваздуха у зони боравка према ISO 7730 (2005) у зависности од температуре и интензитета турбуленције	6
3.1	Облици млаза у зависности од типа иструјног отвора	22
3.2	Слободни турбулентни млаз	23
3.3	Слободни равански млаз	24
3.4	Слободни осносиметрични млаз	26
3.5	Слободни радијални млаз	27
3.6	Промена интензитета брзине у времену у једној тачки струјног простора	29
3.7	Сличност профила брзине у слободном млазу	31
3.8	Бездимензионе криве за профил брзине слободног кружног млаза	31
3.9	Зоне струјања и карактеристични пад брзине у млазу	33
3.10	Смањење централне брзине правоугаоних млазева	34
3.11	Вертикални отклон млаза при грејању за $m=0,2$, $\bar{v}_0=3$ m/s и $\Delta T=1-10$ К	43
3.12	Припојени млаз - иструјавање паралелно са равном површином	46
3.13	Припојени млаз - иструјавање под углом у односу на равну површину	47
3.14	Одбијање раванског припојеног млаза у угловима просторије	49
3.15	Интеракција паралелних млазева истог смера на блиском растојању	50
3.16	Интеракција супротних припојених млазева	51
4.1	Вентилациона решетка са хоризонталним, појединачно подесивим ламелама	56
4.2	Регулатор протока са супротносмерним лопатицама	56
4.3	Модел решетке са регулатором протока	57
4.4	Прорачунски домен при анализи експанзије млаза на вентилационим решеткама	57
4.5	Расподела брзине на излазном грлу решетке за различите степене отворености демпера ($\dot{V}=400$ m ³ /h)	59
4.6	Дијаграм зависности максималне брзине млаза од растојања x и степена отворености демпера ($\dot{V}=400$ m ³ /h)	59
4.7	Расподела брзине у централној хоризонталној равни за различите степене отворености демпера ($\dot{V}=400$ m ³ /h)	60

4.8	Расподела брзине на излазном грлу решетке за различите степене отворености демпера ($\dot{V}=550 \text{ m}^3/\text{h}$)	61
4.9	Дијаграм зависности максималне брзине млаза од растојања x и степена отворености демпера ($\dot{V}=550 \text{ m}^3/\text{h}$)	61
4.10	Расподела брзине у централној хоризонталној равни за различите степене отворености демпера ($\dot{V}=550 \text{ m}^3/\text{h}$)	62
4.11	Расподела брзине на излазном грлу решетке за различите степене отворености демпера ($\dot{V}=700 \text{ m}^3/\text{h}$)	63
4.12	Дијаграм зависности максималне брзине млаза од растојања x и степена отворености демпера ($\dot{V}=700 \text{ m}^3/\text{h}$)	63
4.13	Расподела брзине у централној хоризонталној равни за различите степене отворености демпера ($\dot{V}=700 \text{ m}^3/\text{h}$)	64
4.14	Расподела брзине на излазном грлу решетке за различите степене отворености демпера ($\dot{V}=850 \text{ m}^3/\text{h}$)	65
4.15	Дијаграм зависности максималне брзине млаза од растојања x и степена отворености демпера ($\dot{V}=850 \text{ m}^3/\text{h}$)	65
4.16	Расподела брзине у централној хоризонталној равни за различите степене отворености демпера ($\dot{V}=850 \text{ m}^3/\text{h}$)	66
4.17	Утицај отворености регулатора протока на хоризонтално ширење млаза при различитим протоцима	67
4.18	Утицај отворености регулатора протока на вертикално ширење млаза при различитим протоцима	68
4.19	Плафонски анемостат за четворострано хоризонтално усмеравање ваздуха	71
4.20	Модели прикључне кутије са бочним прикључком и квадратним анемостатом као иструјним елементом	72
4.21	Развијене површине различитих типова дефлектора	73
4.22	Прорачунски домен при анализи струјања ваздуха на плафонском дифузору	73
4.23	Карактеристичне зоне четвоространог анемостата	74
4.24	Расподела и вектори брзине струјања у равни лица дифузора ($\dot{V}=800 \text{ m}^3/\text{h}$)	76
4.25	Просторна расподела брзине у излазној зони дифузора ($\dot{V}=800 \text{ m}^3/\text{h}$)	77
4.26	Вектори брзине струјања у $x - y$ равни ($\dot{V}=800 \text{ m}^3/\text{h}$)	78
4.27	Дијаграм расподеле протока на дифузору ($\dot{V}=800 \text{ m}^3/\text{h}$)	78
4.28	Расподела и вектори брзине струјања у равни лица дифузора ($\dot{V}=1000 \text{ m}^3/\text{h}$)	79
4.29	Просторна расподела брзине у излазној зони дифузора ($\dot{V}=1000 \text{ m}^3/\text{h}$)	80
4.30	Вектори брзине струјања у $x - y$ равни ($\dot{V}=1000 \text{ m}^3/\text{h}$)	81
4.31	Дијаграм расподеле протока на дифузору ($\dot{V}=1000 \text{ m}^3/\text{h}$)	81
4.32	Расподела и вектори брзине струјања у равни лица дифузора ($\dot{V}=1200 \text{ m}^3/\text{h}$)	82
4.33	Просторна расподела брзине у излазној зони дифузора ($\dot{V}=1200 \text{ m}^3/\text{h}$)	83
4.34	Вектори брзине струјања у $x - y$ равни ($\dot{V}=1200 \text{ m}^3/\text{h}$)	84
4.35	Дијаграм расподеле протока на дифузору ($\dot{V}=1200 \text{ m}^3/\text{h}$)	84

4.36	Линијски дифузор са прикључном кутијом	86
4.37	Модели прикључне кутије са бочним прикључком и линијским дифузором као иструјним елементом	87
4.38	Прорачунски домен при анализи струјања ваздуха на линијском дифузору	88
4.39	Карактеристичне зоне дуж процепа линијског дифузора	88
4.40	Расподела брзине у равни лица линијског дифузора ($\dot{V}=75 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)	91
4.41	Дијаграм расподеле протока кроз карактеристичне зоне линијског дифузора ($\dot{V}=75 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)	91
4.42	Расподела брзине у излазној зони линијског дифузора - изометријска пројекција ($\dot{V}=75 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)	92
4.43	Расподела брзине у излазној зони линијског дифузора - ортогоналне пројекције ($\dot{V}=75 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)	93
4.44	Расподела брзине у равни лица линијског дифузора ($\dot{V}=100 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)	94
4.45	Дијаграм расподеле протока кроз карактеристичне зоне линијског дифузора ($\dot{V}=100 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)	94
4.46	Расподела брзине у излазној зони линијског дифузора, изометријска пројекција ($\dot{V}=100 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)	95
4.47	Расподела брзине у излазној зони линијског дифузора - ортогоналне пројекције ($\dot{V}=100 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)	96
4.48	Расподела брзине у равни лица линијског дифузора ($\dot{V}=125 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)	97
4.49	Дијаграм расподеле протока кроз карактеристичне зоне линијског дифузора ($\dot{V}=125 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)	97
4.50	Расподела брзине у излазној зони линијског дифузора - изометријска пројекција ($\dot{V}=125 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)	98
4.51	Расподела брзине у излазној зони линијског дифузора - ортогоналне пројекције ($\dot{V}=125 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)	99
5.1	Мерна опрема	103
5.2	Шеме мерних инсталација	104
5.3	Инсталација за испитивање струјања на линијском дифузору	105
5.4	Распоред мерних тачака у пресеку доводног канала при одређивању протока	105
5.5	Распоред мерних тачака при мерењу брзине у млазу	106
5.6	Мерење брзине струјања у млазу на вентилационој решетки	107
5.7	Шематски приказ мерења пада тоталног притиска на плафонском дифузору са прикључном кутијом	108
5.8	Мерење протока дуж отвора на линијском дифузору	108
5.9	Измерене вредности интензитета брзине у слободном млазу на вентилационој решетки при различитим угловима отворености демпера ($\dot{V}=550 \text{ m}^3/\text{h}$)	110
5.10	Измерене вредности протока кроз карактеристичне зоне линијског дифузора ($\dot{V}=100 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)	112

Списак табела

3.1	Приближне вредности за степен мешања разних отвора	30
4.1	Величине струјања за различите протоке ваздуха	57
4.2	Нумеричке вредности максималних брзина млаза у зависности од степена отворености демпера за различите протоке ваздуха	58
4.3	Максималне брзине у млазу са стандардном и модификованом мрежом ($\dot{V}=700 \text{ m}^3/\text{h}$)	70
4.4	Брзине ваздуха у улазном каналу прикључне кутије	74
4.5	Нумеричке апсолутне и процентуалне вредности протока ваздуха кроз карактеристичне површине четвоространог анемостата	75
4.6	Максималне вредности интензитета брзине у симулираном струјном пољу анемостата	85
4.7	Запремински протоци кроз карактеристичне зоне четвоространог анемостата са стандардном и модификованом мрежом ($\dot{V}=1000 \text{ m}^3/\text{h}$)	85
4.8	Карактеристичне брзине ваздуха при струјању на линијском дифузору	87
4.9	Нумеричке апсолутне и процентуалне вредности протока ваздуха кроз карактеристичне зоне линијског дифузора	89
4.10	Запремински протоци кроз карактеристичне зоне линијског дифузора са стандардном и модификованом мрежом ($\dot{V}=100 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)	100
5.1	Распоред мерних тачака при мерењу брзине у млазу	106
5.2	Измерене вредности интензитета брзине у слободном млазу на вентилационој решетки при различитим угловима отворености демпера ($\dot{V}=550 \text{ m}^3/\text{h}$)	109
5.3	Измерене апсолутне и процентуалне вредности протока ваздуха кроз карактеристичне зоне четвоространог анемостата ($\dot{V}=1000 \text{ m}^3/\text{h}$)	111
5.4	Падови тоталног притиска за различите геометрије дефлектора ($\dot{V}=1000 \text{ m}^3/\text{h}$)	111
5.5	Измерене апсолутне и процентуалне вредности протока ваздуха кроз карактеристичне зоне линијског дифузора ($\dot{V}=100 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)	112
6.1	Симулиране и измерене вредности максималне брзине млаза у зависности од степена отворености демпера ($\dot{V}=550 \text{ m}^3/\text{h}$)	113
6.2	Симулиране и измерене вредности протока кроз карактеристичне зоне четвоространог анемостата ($\dot{V}=1000 \text{ m}^3/\text{h}$)	115

6.3	Симулиране и измерене вредности протока кроз карактеристичне зоне линијског дифузора ($\dot{V}=100 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)	116
-----	--	-----

Списак акронима

SBS	S ick B uilding S yndrome
WHO	W orld H ealth O rganization
КТХ	К лиматизација Г рејање и Х лађење
PMV	P redicted M ean V ote
PPD	P redicted P ercentage of D issatisfied
DR	D raugh R ate
CFD	C omputational F luid D ynamics
PIV	P article I mage V elocimetry

Списак ознака

A_0	укупна површина иструјног отвора (почетни пресек млаза)
A_{ef}	слободна (ефективна) површина иструјног отвора
Ar	Архимедов број
Ar_0	Архимедов број на иструјном отвору
Ar_{0c}	Архимедов број на иструјном отвору - осносиметрични млаз
Ar_{0p}	Архимедов број на иструјном отвору - равански млаз
Ar_{xc}	локални Архимедов број на растојању x - осносиметрични млаз
Ar_{xp}	локални Архимедов број на растојању x - равански млаз
C_{ε_1}	константа у продукционом члану моделске једначини преноса дисипације кинетичке енергије турбуленције
C_{ε_2}	константа у дисипативном члану моделске једначини преноса дисипације кинетичке енергије турбуленције
C_μ	константа $k - \varepsilon$ модела
D_h	хидраулички пречник канала
D_k	турбулентна дифузија кинетичке енергије турбуленције
D_ε	дифузија дисипације кинетичке енергије турбуленције
d	пречник Питоове статичке сонде
d_0	димензија (пречник) иструјног отвора
\underline{E}	јединични тензор
e	јединична унутрашња енергија
\underline{f}	вектор јединичне масене силе
f_{cl}	фактор површине одевености тела
H	растојање иструјног отвора од таванице (зида)
h_0	димензија (висина) иструјног отвора
h_c	конвективни коефицијент прелаза топлоте
I_c	интензитет турбуленције ваздуха у почетном пресеку доводног канала
I_t	интензитет турбуленције ваздуха у млазу
i	индукција

J	количина кретања
J_0	количина кретања у почетном пресеку млаза
J_r	количина кретања у млазу на растојању r од иструјног отвора
J_x	количина кретања у млазу на растојању x од иструјног отвора
K	кофицијент пада централне брзине млаза
K_c	кофицијент пада централне брзине осносиметричног млаза
K_n	кофицијент пада централне брзине раванског неизотермног млаза услед температурне разлике убациваног и просторијског ваздуха
K_p	кофицијент пада централне брзине раванског млаза
K_r	кофицијент пада централне брзине радијалног млаза
K_s	кофицијент ограничености просторије
k	кинетичка енергија турбуленције
l	карактеристична величина вртлога
l_0	ширина правоугаоног иструјног отвора
M	производња топлоте услед метаболизма људског тела
m	степен мешања
P_k	продукција кинетичке енергије турбуленције
P_ε	продукција дисипације кинетичке енергије турбуленције
p	притисак
p_a	парцијални притисак водене паре
p_t	тотални притисак
q	вектор топлотног флукса
Re	Рејнолдсов број
Re_{DH}	Рејнолдсов број сведен на хидраулички пречник доводног канала
Re_t	турбулентни Рејнолдсов број
R_{fa}	однос слободне и укупне површине отвора
r	радијална координата
\underline{r}	вектор положаја
S	центар сличности
$\underline{\underline{S}}$	тензор брзине деформисања
$\underline{\underline{T}}$	тензор турбулентних напона
T_0	апсолутна температура доводног ваздуха
T_a	апсолутна температура околине
T_x	апсолутна температура у оси млаза на растојању x од иструјног отвора

T_{xs}	апсолутна температура у оси млаза на растојању x од иструјног отвора у просторији чија величина има утицај на ширење млаза
t_a	температура ваздуха
t_{cl}	температура површине одеће
t_r	локална радијантна температура
\dot{V}	запремински проток примарног ваздуха
\dot{V}_i	индукована количина ваздуха у јединици времена
\dot{V}_x	количина ваздуха у јединици времена кроз попречни пресек млаза на растојању x
\underline{v}	вектор брзине
v'	флукуациона брзина
\bar{v}	временски осредњена (просечна) брзина
\bar{v}_0	временски осредњена брзина у почетном пресеку млаза
\bar{v}_{ef}	временски осредњена ефективна брзина на дистрибутивном елементу
\bar{v}_k	временски осредњена брзина у доводном каналу
$-\bar{v}_i \bar{v}_j$	компоненте тензора турбулентних напона
\bar{v}_r, \bar{v}_x	компоненте временски осредњене брзине у смеру координатних оса
$\bar{v}_{rm}, \bar{v}_{xm}$	максимална временски осредњена брзина на попречном пресеку млаза - централна брзина млаза
\bar{v}_{tm}	максимална временски осредњена тангенцијална компонента брзине у попречном пресеку радијалног вртложног млаза
\bar{v}_{xs}	компонента временски осредњене брзине у доминантном смеру струјања у просторији чија величина има утицај на ширење млаза
v_τ	привидна брзина
x, y, z	Декартове правоугле координате
x_0	фиктивна дужина језгра млаза
x_p	растојање од равни иструјног отвора до тачке у којој млаз почиње да се припаја са таваницом (зидом)
W	ефективна механичка снага људског тела
y_a	растојање од осе млаза до тачке у којој брзина има вредност једнаку половини централне брзине
y_r, y_x	ширина полумлаза
y^+	бездимензијско нормално растојање од зида
α	угао ширења млаза
α_a	угао коефицијента ширења млаза
β	угао дивергенције ламела

δ_{ij}	Кронекеров делта симбол
ε	вискозна дисипација кинетичке енергије турбуленције
η	бездимензијска удаљеносту у правцу попречном на смер струјања
λ	однос димензија страница правоугаоног отвора
μ	динамичка вискозност флуида
ν	кинематичка вискозност флуида
ν_t	турбулентна вискозност
ρ	густина флуида
$\underline{\underline{\sigma}}$	тензор напона
σ_k	константа у дифузионом члану моделске једначини преноса кинетичке енергије турбуленције
σ_v	стандардна девијација тренутне брзине
σ_ε	константа у дифузионом члану моделске једначини преноса дисипације кинетичке енергије турбуленције
τ_{ij}^t	Рејнолдсови турбулентни напони
τ_l	вискозни напони у ламинарној струји граничног слоја
τ_w	смицајни напон на зиду
Φ_ε	деструкција дисипације кинетичке енергије турбуленције
φ_0	угао иструјавања млаза
Ψ	кофицијент у једначини трајекторије неизотермног млаза
\aleph	вон Карманова константа
∇	Хамилтонов векторско-диференцијални оператор - набла
$\overline{(\dots)}$	статистичко осредњавање по времену
$\underline{(\dots)}$	вектор
$\underline{\underline{(\dots)}}$	тензор другог реда

„Своју радост, коју ја овога тренутка осећам, ја не умем да вам искажем, али се радујем што могу овом приликом да пред вама, мила браћо, изразим свагда своје најмилије задовољство, да сам био и да вазда остајем само Србин и ништа више. Дешава се господо, да човек удаљен од своје отаџбине, занет послом каквим се ја занимам, по каткад смете с ума своје име, своју народност и своју отаџбину. Али тога, господо, код мене никада није било, а надам се да и неће и не може никад ни бити.“

Никола Тесла
у Београду, 2. јуна 1892.
приликом посете Велокој школи

1

УВОДНА РАЗМАТРАЊА

1.1 Проблем затвореног простора

Еволуција човека од најстаријих времена изазивала је у њему захтеве за побољшањем његовог живота, што је допринело ефекту његовог рада и умног развитка. Иако су у данашње време модерне технологије без сумње олакшале живот у сваком смислу, постоји један кључни елемент који указује на велику промену у људском понашању – постали смо нова 24/7 генерација затвореног простора. Због растуће урбанизације и индустријализације савременог света, људи углавном проводе значајан део свог живота у затвореном простору, у становима, на радним местима, просторијама за одмор и рекреацију. Глобално истраживања компаније **YouGov** показало је да око 90% њих проведе 22 сата у затвореном простору сваког дана, а једна од шест особа признала је да практично никад и не излази ван. Просечан административни радник који ради у канцеларији проведе на отвореном свега око 15 минута дневно. Наведене чињенице стављају нас у раскорак са биолошким ритмом, узимају данак над нашим здрављем и срећом. За велики број здравствених тегоба сматрају се одговорним такозване болесне или нездраве зграде.

Синдром болесних зграда (SBS) појам је који датира од шездесетих година 20. века, а деценију касније дефинисала га је и потврдила и Светска здравствена организација (WHO). Енергетски ембарго у новембру 1973. године, који је подсетио човечанство на светску енергетску кризу чији корени потичу из ранијих епоха, уз констатацију да се класичним изворима енергије сагледава крај, рефлектовао се у захтевима за смањењем потрошње енергије, што се даље одразило на побољшање квалитета изолације, повратно коришћење отпадне топлоте и смањење инфилтрације спољњег ваздуха услед појачане заптивености објеката. Установљено је да чак трећина нових зграда није добра



Слика 1.1. Удео главних фактора на развој SBS (извор: The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)-USA)

по здравље, односно да је изграђена попут затворених кутија без контакта са спољном средином. У највећем броју случајева реч је о пословним зградама, затим ту су тржни центри и други затворени простори у којима људи проводе своје слободно време. На основу великог броја испитивања спроведених на ову тему, постало је извесно да се иза овог феномена крије низ конкретних физикалних, ваздушно-хемијских и микробиолошких узрочника који неповољно делују на здравље људи а најугроженији су запослени који много времена проводе на радном месту у неадекватним условима. Након одређеног времена такве особе почињу да имају проблем са концентрацијом, осећају општу слабост, уморни су и расејани, жале се на главобољу, мучнину, вртоглавицу, имају иритације носа и очију, сувоћу грла. Иако за наведене здравствене тегобе не постоји конкретан разлог, у највећем броју случајева као узрочник се наводи недовољна угодност због климатских фактора у просторији. Ту се пре свега мисли на термичку неугодност и осећај промаје као и лош квалитет ваздуха. На слици 1.1 дат је удео главних фактора који изазивају развој SBS.

Због свега наведеног од кључног је значаја да се у затвореним просторима предвиде квалитетни системи вентилације и климатизације који ће омогућити контролисан довод одговарајуће количине свежег припремљеног ваздуха и обезбедити одржавање одређених карактеристика средине затвореног простора у уским границама оптималних вредности како би се достигао највећи могући степен угодности. Различите студије недвосмислено указују да побољшање услова угодности омогућава човеку да задржи пуну концентрацију чиме год да се бави, што доприноси његовој продуктивности и развоју у сваком погледу (Lorsch и Abdou, 1994; Roelofsen, 2002; Woods, 1989).

1.2 Дистрибуција ваздуха и њен значај у техници климатизације

Све екстремнији критеријуми, како у погледу строгих захтева параметара собног ваздуха тако и у грађевинско-архитектонским захтевима објеката, уз напредак технологије воде и правој револуцији у области технике климатизације. Ако је њена првобитна потреба била искључиво због постизања термичких услова средине, већ дуги низ година то свакако није тако. Данас све више долазе до изражаја захтеви за одржавањем параметара у просторима где постоји повећана концентрација прашине, гасова, дима, испарења, клица, повећаног нивоа буке и других поремећаја који долазе како из спољне средине тако и из простора који се третира. И сами елементи који су неизбежни делови сваког ваздушног система услед турбулентног струјања ваздуха генеришу одређену буку коју је потребно контролисати. Квалитет и чистоћа ваздуха од посебног су значаја када је у питању тзв. хигијенска климатизација (болнице, прехрамбена индустрија, прецизне технологије, мерне лабораторије, беле собе са највишим захтевима).

Развојем цивилизације и технике данас постоји могућност да се остваре сви жељени параметри микроклиме. Међутим, да би се остварио задовољавајући степен угодности, није довољно да ваздух буде само адекватно обрађен, већ је потребно остварити и одговарајућу дистрибуцију у просторији са циљем постизања што униформнијих поља општих и локалних индикатора топлотног комфора, нарочито у зони боравка људи. Механички ваздушни системи данас су постали стандард у свим пословним, продајним и угоститељским објектима, културним и образовним објектима, просторима за спорт и рекреацију и тд., а примена оваквих системе у болницама, фармацеутској индустрији, индустрији хране и сл. апсолутно је неизбежна. Без обзира да ли се ради о централизованом, чисто ваздушним КГХ системима, или о децентрализованим системима вода-ваздух или фреон-ваздух, при пројектовању посебну пажњу треба посветити начину дистрибуције ваздуха јер се услови угодности могу постићи само ако се оствари његова повољна расподела и успоставе одговарајући ваздушни токови унутар третираног простора. Веома је сложен процес одређивања најпогоднијег начина за посматрани случај јер је потребно узети у обзир распоред коришћења просторије, присутност особља и изложеност различитим утицајима. Велике стаклене површине које су у великој мери заступљене у модерној архитектури имају изузетно неповољан утицај на термичке услове средине због потенцијалног тзв. хладног зрачења и могућности појаве кондензације влаге у зимским условима, односно због великих топлотних добитака лети. У просторијама велике висине као што су атријуми, спортске хале и сл. долази до вертикалног раслојавања (диференцијације) температуре ваздуха што, због разлике у притисцима, у великој мери има утицај на његову расподелу и ефекат димњака. Са друге стране у ниским просторијама обично постоји проблем са расположивим простором за смештај опреме која мора бити тако дизајнирана да се не дозволи повећано кретање ваздуха у зони боравка људи. Посебна посвећеност проблему дистрибуције ваздуха неопходна је код хигијенске климатизације. У белим собама, операционим салама, јединицама интензивне неге и различитим лабораторијама нужно је неопходно да контаминација ваздуха буде на прописаном нивоу у свим деловима простора, а прашина, анестетички гасови и

супстанце оптерећене мирисима морају да буду одстрањени. Такође, важно је бринути о проблему расподеле ваздуха у индустријским објектима, нарочито где у различитим процесима долази до издвајања у ваздух запаљивих или експлозивних честица. Дакле, када су све карактеристике доводног ваздуха у глобалном смислу задовољене, ниво комфора апсолутно зависи од његове расподеле у простору, што је у великој мери повезано са архитектонским решењима, унутрашњим изворим и понорима топлоте, локализованим изворима загађења, али и са локацијом и перформансама елемената за дистрибуцију ваздуха као најугицајнијим факторима. Овом чињеницом пред опрему за дистрибуцију стављен је тежак задатак.

1.3 Брзина струјања и интензитет турбуленције као параметри топлотне угодности

Квалитет унутрашњег простора у општем смислу подразумева достигнути ниво топлотног, ваздушног, светлосног, звучног и естетског комфора. Иако се можемо прилагодити променљивом стању ваздуха, ипак постоји област у којој се осећамо најугодније. Строге границе за ову област не могу да се наведу јер не постоји адекватан начин да се оне детерминистички и одреде, већ се обично процењују на основу осећаја већег броја људи, при чему се угодном средином сматра она коју најмање 80% испитаника сматра пријатном, односно неутралном (Fanger, 1970). Препоручени критеријуми наводе се за општу топлотну угодност базирану на PMV-PPD (енг. PMV (*Predicted Mean Vote*) - предвиђена просечна оцена средине; PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*) - предвиђени проценат незадовољних). На основу теоријско-емпиријских једначина топлотног баланса људског тела те анкетирања одређеног броја испитаника изложених контролисаним микроклиматским условима, Fanger (1970) је извео следеће изразе:

$$PMV = \left[0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028 \right] \cdot \left\{ (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot \left[5,733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a \right] - 0,042 \cdot \left[(M - W) - 58,15 \right] - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5,867 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot \left[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4 \right] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \right\}, \quad (1.1)$$

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp \left(\left[- (0,03353 PMV^4 + 0,2179 PMV^2) \right] \right), \quad (1.2)$$

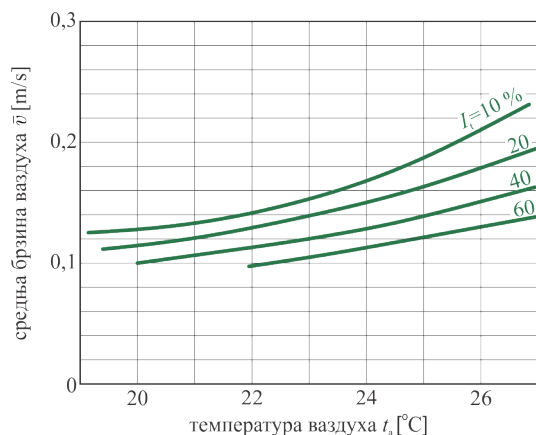
где су редом: M [W/m²] метаболички учинак површине тела, W [W/m²] ефективна механичка снага људског тела, p_a [Pa] парцијални притисак водене паре, t_a [°C] температура ваздуха, f_{cl} фактор површине одевености тела, t_{cl} [°C] температура површине одеће, \bar{t}_r [°C] локална радијантна температура тј. средња температура околних површина, h_c [W/m²·K] конвективни коефицијент прелаза топлоте. PMV индекс предвиђа средњу вредност изјашњавања о топлотном комфору велике групе људи у датом окружењу,

са скалом од -3 (веома хладно) до +3 (веома топло) при чему 0 означава топлотну неутралност, док РРД индекс представља проценат испитаника незадовољних у да- том топлотном окружењу. Међутим, поред наведених утицајних величина, као важан фактор локалне термичке угодности издваја се кретање ваздуха, односно промаја (енг. *draught*), као најчешћи узрок приговора на микроклиматске услове, што је према ISO 7730 (2005) дефинисано као локално хлађење организма изазвано повећаним конвективним одавањем топлоте тела услед тог кретања. У просторијама са механичким ваздушним системима, упркос уобичајеним претпоставкама, не постоји стабилно струјање, већ су присутне сталне промене правца и брзине кретања ваздуха, што је последица температурних разлика и сила инерције. При интензивнијем кретању ваздуха остварују се веће вредности конвективног коефицијента размене па је према томе и одавање топлоте интензивније. Имајући у виду потребну топлотну равнотежу, из претходног се може закључити да су при нижим амбијенталним температурама неопходне и мање брзине струјања. Настанак осећаја промаје код човека зависи од брзине струјања, интензитета турбуленције, температуре ваздуха, површине тела изложеног струјању, као и стања организма (Parsons, 2014). Људи су најосетљивији на промају при ниском интензитету метаболизма (седећа активност), а проценат људи који ће том приликом бити незадовољан према ISO 7730 (2005) може се предвидети изразом:

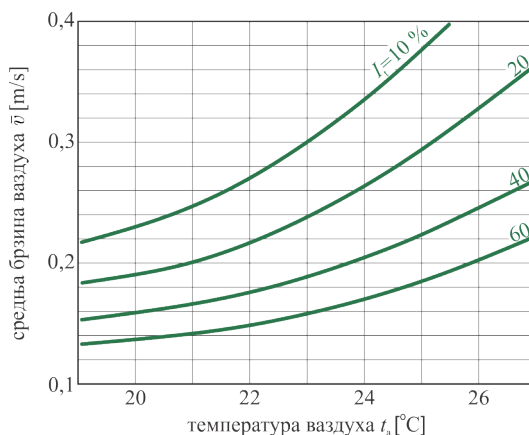
$$DR = (34 - t_a) \cdot (\bar{v} - 0,05)^{0,0623} \cdot (0,037\bar{v}I_t + 3,143) \quad (1.3)$$

у коме као променљиве величине, поред већ наведених, фигуришу \bar{v} [m/s] као средња брзина кретања ваздуха и I_t [%] као интензитет турбуленције, о којима ће више бити речи у поглављу 3.2.1. DR индекс односи се на температурни распон 20 до 26 °C, подручје брзине 0,05 до 0,5 m/s и интензитет турбуленције 0 до 70 %. Дозвољене вредности средње брзине струјања у зони боравка у зависности од температуре и интензитета турбуленције према ISO 7730 (2005) приказане су дијаграмима на слици 1.2. Може се уочити да пораст интензитета турбуленције од 50% при средњој брзини ваздуха 0,2 m/s доводи до повећања предвиђеног процента незадовољних за приближно 20%.

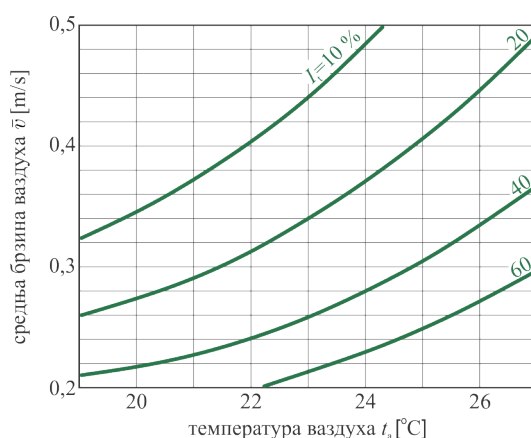
Дакле, топлотна непријатност настаје када термално окружење не испуњава захтеве нашег тела. Међутим, Ormandy и Ezratty (2012) наводе да то није само недостатак задовољста термичким параметрима средине, већ одражава ситуацију у којој постоји и потенцијална опасност за здравље. Задовољавање услова топлотног комфора у објектима један је од најважнијих задатака ефикасног пројектовања зграда. Постизање термичке угодности у затвореном простору где бораве људи представља кључни аспект при пројектовању и главни фактор оперативних подешавања КГХ система. При димензионисању и планирању система неопходно је држати се одговарајућих критеријума у том погледу предвиђених неким од међународних стандарда као што су ISO 7730 (2005), DIN EN 15251 (2012), ANSI/ASHRAE 55-2013 (2013) и ANSI/ASHRAE 62.1-2013 (2013), којима су специфицирани општи захтеви и препоручене пројектне вредности за топлотну угодност и квалитет ваздуха у информативним анексима.



(А) категорија А,
процент незадовољних $DR = 10\%$



(Б) категорија В,
процент незадовољних $DR = 20\%$



(В) категорија С,
процент незадовољних $DR = 30\%$

Слика 1.2. Дозвољене вредности средње брзине ваздуха у зони боравка према ISO 7730 (2005) у зависности од температуре и интензитета турбуленције

1.4 Мотивација и циљ истраживања

Ваздух се у просторију уводи локализовано у облику турбулентног млаза на местима изван зоне боравка људи и то релативно великим брзинама, а најзначајнију улогу у његовом формирању свакако имају различите конструкције примењених иструјних елемената. Истраживања су показала да управо овај млаз има кључни утицај на кретање ваздуха у просторији што је допринело да постане најзначајнији и најпроучаванији облик струјања у вентилацији. Разматрањем аеродинамичких особина млаза настоји се предвидети модел струјања као и услови топлотног комфора те ефикасност читавог система. Примена CFD (*Computational Fluid Dynamics*) метода при пројектовању система дистрибуције ваздуха у већини случајева није практично применљива, пре свега због комплексности дефинисања модела са почетним и граничним условима што изискује знање и време потребно за извођење оваквих симулација, али и због прилично високих цена комерцијалних софтвера прилагођених наведеним проблемима.

Као што је већ описано, кретање ваздуха у затвореном простору има велики утицај на ниво комфора и представља озбиљан проблем у многим климатизованим или проветраваним просторијама, што нарочито може доћи до изражаја када је у питању довођење хладног ваздуха. Осим тога, у просторима где постоје извори загађења, неправилно и неравномерно кретање ваздуха може довести до повећања концентрације штетних материја у одређеним зонама. У циљу смањења наведених непожељних ефеката развијене су одговарајуће конструкције елемената за иструјавање ваздуха како би се обезбедила жељена дистрибуција и брзина у зони боравка људи свела на прихватљиву. Тип, односно геометрија елемента за убацивање ваздуха, њихов међусобни положај као и параметри примарног и просторијског ваздуха у највећој мери утичу на расподелу ваздуха у просторији. Познавање струјне слике на излазу из дистрибутивног елемента од кључног је значаја за предвиђање кретања собног ваздуха, што је суштински важно приликом пројектовања ваздушних система. С обзиром на предвиђене дистрибутивне елементе, у свакодневној примени обично се користе упрошћене методе за дефинисање појединих параметара и величина струјања (дијаграми, табеле, формуле). Пројектанти термотехничких инсталација по правилу се руководе каталожним подацима произвођача опреме који ваздушне млазеве на плафонским дифузорима због њихове централне симетрије третирају као радијално симетричне, док нпр. ваздушне млазнице и зидне решетке дају струјну слику која се понаша по правилима слободног млаза, уз одговарајуће корекционе факторе за случај дивергентног распореда лопатица за усмеравање ваздуха. Овако дати резултати базирани су на претпоставци да је непосредно испред елемента потпуно развијени турбулентни профил брзине, тј. да ваздух наструјава на елемент у нормалном правцу са униформном расподелом брзине, што би у довољној мери било оствариво ако би се он налазио на крају праве деонице канала дуге минимум дванаест хидрауличких пречника. Овакве околности готово су недостижне у инжењерској пракси.

У реалној ситуацији простор за постављање инсталације је ограничен, а структура тока ваздуха је нарушена и поред одговарајућих мера које се спроводе у циљу смањења тог ефекта. Експериментална истраживања са струјањем обојеног ваздуха и директна мерења показала су резултате који нису у складу са претходно наведеним. Изузимајући различите положаје уградње и каналску мрежу испред решетке који без сумње имају огроман утицај на карактеристике млаза и који се практично не могу ни предвидети, готово неизбежни припадајући елементи за усмеравање и регулацију протока ваздуха у довољној мери могу нарушити и изменити карактеристике млаза. Мерења спроведена на излазу из анемоштата и плафонских дифузора монтираних на прикључну кутију са бочним прикључком показала су драстично веће брзине иструјавања на страни насупрот доводног прикључка. Перфорираним плочама за умирење струје које се постављају у кутију постижу се само нешто бољи резултати у погледу централне симетричности излазног млаза. Униформност млаза на линијским дифузорима такође је условљена геометријом прикључне кутије, односно распоредом и бројем доводних прикључака, али и положајем регулационе клапне на улазу. Све наведено евидентно проузрокује неравномерну расподелу ваздуха у просторији, доводећи у већој или мањој мери до нежељених ефеката који су претходно наведени, те постоји очигледна потреба за додатним истраживањем у том погледу.

У оквиру дисертације спроведена су нумеричка испитивања експанзије ваздушног млаза на вентилационој решетки са једним редом појединачно подесивих недивергираних ламела и са регулатором протока ваздуха са супротносмерним лопатицама при чему је посматрана максимална брзина млаза на различитим растојањима од иструјног отвора у зависности од степена отворености демпера, као и разлике у домету и ширењу млаза у простору. Анализиран је случај четвоространог плафонског анемостата монтираног на прикључну кутију са бочним прикључком којом приликом је сагледана променљивост протока ваздуха у свим правцима за различите типове дефлектора. Такође је размотрен утицај положаја и степена отворености регулационе клапне на равномерност раванског млаза код линијских дифузора са прикључном кутијом и бочним доводом ваздуха. Показаће се да наведени примери, изабрани као незаобилазни у свакодневној практичној примени, и чији утицај се том приликом не узима у обзир, у већој или мањој мери утичу на кретање ваздуха у простору. Валидација нумеричких резултата спроведена је кроз експериментална мерења и визуелизацију струјања димом.

1.5 Преглед неких досадашњих истраживања

Релативно велики број истраживача у прошлости посветио се проучавању карактеристика ваздушног млаза, а прва истраживања на ову тему везују се за Хелмхолца¹ и Кирхофа² који су 1850.-их први формулисали проблем. Ваздушни млаз у техници климатизације предмет је истраживања од 30-их година прошлог века, а најраније студије вршили су Förthmann (1934), Rydberg и Norbäck (1946), Koestel, Hermann и Tuve (1950), Nottage (1951), Tuve (1953), Koestel (1957), Helander, Yen и Tripp (1957) Regenscheit (1959), Abramović (1960), Shepelev (1961) Taliev (1963), затим касније Regenscheit (1970), Grititlyn (1970), Jackman (1971), Tanaka и Tanaka (1976), Shepelev (1978) и тд.

Примена CFD-а за анализу вентилационих система и уређаја уведена је средином друге половине прошлог века, а своју експанзију доживљава током претходних двадесет година (P. V. Nielsen, 2015). Најранија истраживања на тему предвиђања струјања помоћу CFD-а била су врло једноставна, дводимензионална, базирана на такозваној *box* методи где су стварни профили брзине на одређеној удаљености од елемента сматрани граничним условима, а нумеричка мрежа је била формирана од правоугаоних ћелија (P. Nielsen, 1973; P. V. Nielsen, 1997). Правилна спецификација граничних услова од суштинског је значаја за тачно предвиђање расподеле ваздуха у просторији, а систематски приступ овом проблему описали су Huo, Haghghat, Zhang и Shaw (2000). Са данашњим развојем рачунарске технике омогућена је анализа струјања ваздуха на дистрибутивним елементима врло сложене геометрије, са различитим врстама лопатица за усмеравање и регулацију, перфорираним плочама, закривљеним површинама и тд.

¹Херман Лудвиг Фердинанд фон Хелмхолц (нем. Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz; Потсдам, 31. август 1821. — Берлин, 8. септембар 1894.) је био немачки лекар и физичар. Сматра се једним од најзначајнијих научника 19. века.

²Густаф Роберт Кирхоф (нем. Gustav Robert Kirchhoff; Кенигсберг, 12. март 1824. — Берлин, 17. октобар 1887.), био је немачки физичар, пионир спектроскопије. Поставио је теорију електричних мрежа.

Међутим, Zhang, Zhang, Zhai и Chen (2007) наводе да тачност и поузданост симулација значајно зависе од изабраног модела турбуленције.

Карактеристике тока ваздуха на вртложним дифузорима, квадратним и округлим анемоностатима, као и њихове ефекте на топлотни комфор у вентилираној просторији истраживали су Aziz, Gad, Mohammed и Mohammed (2012). Симулиране вредности утицајних параметара добијене помоћу три различита модела турбуленције упоређени су са експерименталним, након чега је констатовано да се стандардни $k - \epsilon$ модел успешно може користити за наведене случајеве. Tavakoli и Hosseini (2013) рачунски су анализирали структуру турбулентног тока, пренос масе и карактеристике млаза који иструјава из вртложног дифузора при угловима завојнице вртлога 45° до 60° . Бавећи се оптимизацијом геометрије једног карактеристичног типа вртложног дифузора Sajadi, Saidi и Mohebbian (2011) закључили су да његове перформансе и расподела ваздуха у просторији у највећој мери зависе од угла нагиба лопатица за усмеравање ваздуха чија оптимална вредност износи 32° , при којој се млаз равномерно шири кроз просторију и не нарушава услове угодности у зони боравка. Hu (2003) је установио да је поље брзине у излазној зони дифузора неравномерно због вртложних лопатица, али поседује централну симетрију. Martinez-Almansa, Fernandez-Gutierrez, Perras и del Pino (2014) анализирали су млаз који иструјава у простор на зидној решетки, при чему је помоћу стандардног $k - \epsilon$ турбулентног модела извршена визуелизација тока ваздуха којом приликом је утврђено да се подаци добро поклапају са експериментално добијеним пољем брзине и температуре, а такође је показано да нумерички резултати могу доста добро да предвиде и губитак притиска при струјању на елементу. Експериментална мерења PIV методом у закривљеном турбулентном млазу генерисаном на линијском дифузору извршили су Essel, Tachie, Agelin-Chaab, Koupriyanov и Tully (2013). Bragança, Sodjavi, Meslem и Serres (2016) истраживали су поље брзине и карактеристике топлотног комфора у просторији при струјању ваздуха на кружном конусном дифузору, при чему су разматрани случајеви елемента у свом стандардном облику и са додатно монтираним усмеривачима за радијално усмеравање млаза. На основу развијеног CFD модела Sun и Smith (2005) утврђивали су утицај различитих геометријских фактора конусног квадратног дифузора на расподелу тока ваздуха и температурног поља у просторији, а резултати показују да вертикално растојање језгра од равни плафона и дужина хоризонталних ивичних делова лопатица имају пресудну важност на угао иструјавања и генералну расподелу тока. Awwad, Mohamed и Fatouh (2017) применили су $k - \epsilon$ модел за оптимизацију дизајна плафонског четвоространог анемоностата варирајући угао централног и завршног дела лопатице за усмеравање како би се оценио њихов утицај на кретање доводног ваздуха.

Горе поменута истраживања углавном се заснивају на претпоставци да је поље брзине униформно, као и да су вектори нормални у односу на улазно грло посматраног елемента, што је у реалним околностима тешко оствариво. Einberg, Hagström, Mustakallio, Koskela и Holmberg (2005) приказали су нумеричке и експерименталне податке параметара струјања ваздушног дифузора за индустријске намене базиране на детаљним мерењима температуре и брзине ваздуха у излазној зони елемента, а тестови визуелизације

са димом открили су да расподела протока око дифузора није у потпуности симетрична како је то предвиђено CFD-ом. Fontaine, Rapp, Koskela и Niemelä (2005) спровели су истраживања на плафонском кружном анемостату, а опсежна мерења показала су да поље брзине нема аксијалну симетрију. Закључено је да узрок ове асиметрије лежи у каналској инсталацији непосредно испред дистрибутивног елемента. Наиме, због ограниченог простора за монтажу исте, те различитих уређаја за усмеравање и контролу протока, долази до промене правца струјања у овој области што резултује неравномерним наструјавањем на елемент а то се директно одражава на појаву асиметрије у излазном млазу (Ren, Zhao, Li, Fan и Yang, 2003). Аутори су искористили четворострани плафонски анемостат монтиран на прикључну кутију са бочним прикључком, при чему је у сваком од четири правца брзина иструјавања мерена у шест мерних тачака распоређених од центра елемента ка ивицама, а резултати су показали да она расте ка делу насупрот прикључка за довод ваздуха што за последицу има изразиту асиметрију излазног млаза. Villafruela, Sierra-Pallares, Castro, Álvaro и Santiago-Casado (2018) развили су CFD модел за анализу расподеле протока на вртложном дифузору са 24 испуста, разматрајући при том случајеве када је он монтиран на прикључну кутију са бочним, односно са вертикалним прикључком. Симулирано је поље брзине унутар пленум кутије и одређена расподела протока по прорезима што је показало релативно добру дистрибуцију код вертикалног довода ваздуха, док је формирани млаз код хоризонталног прикључка био изразито асиметричан. Такође, Smoljan и Balen (2010) екпериментално показују асиметричност радијалног млаза формираног на вртложном дифузору са пленум кутијом и бочним доводом. Утврђено је да се максималне брзине јављају у делу млаза насупрот улазног прикључка, као и да перфорирана плоча постављена у кутију и нагнута под углом 45° у односу на хоризонталну раван не даје жељени резултат већ само у мањој мери утиче на побољшање униформности расподеле протока.

Дакле, описане ситуације указују да практично неизбежна пратећа опрема ствара не-пожељне ефекте на развој и симетрију млаза што ће кроз овај рад детаљније бити описано.

„Ако се ја и не налазим међу вама, да као и ви што више привредим на олтар српске мисли, ја радим други посао, на други начин прослављам име српско, и на други начин радим и трудим се, да колико могу и ја што корисно привредим своме народу и својој милој браћи. И ако има какве славе и заслуге за човечанство да се припише моме имену, то та почаст још више припада српском имену и српском народу из чије сам средине ја поникао.“

Никола Тесла
у Београду, 2. јуна 1892.
приликом посете Велокој школи

2

ФИЗИЧКО-МАТЕМАТИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ ТУРБУЛЕНТНИХ СТРУЈАЊА

2.1 Основни закони и једначине механике флуида

При проучавању механике флуида, у циљу лакшег разумевања и понашања у реалним условима, уводе се одређене идеализације и поједностављења. Ту се пре свега мисли на модел континуума на којем је заснована механика флуида, а који почива на идеји да се материја може делити на све мање и мање делове а да при том њена својства остају непромењена. Димензије тако дефинисаних честица и појава многоструко су веће од нивоа молекула, па се ефекти атомске структуре материје могу занемарити, те математички алат којим се описује њихово понашање постаје знатно једноставнији јер се флуид посматра као континуум. Претпоставља се да је струјно поље непрекидно што доводи до тога да се свака макроскопска физичка величина може описати као непрекидна функција времена и положаја у простору.

Механика континуума базирана је на фундаменталним принципима, односно основним законима одржања карактеристичних физичких величина који подразумевају:

- закон одржања масе
- закон одржања количине кретања
- закон одржања енергије

Сагласно постављеном концепту, полазећи од наведених основних принципа, фундаменталне једначине кретања непрекидне средине имају следећи облик:

- једначина континуитета

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \underline{v} = 0 \quad \leftrightarrow \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = 0, \quad (2.1)$$

где је ρ густина, а \underline{v} вектор брзине;

- једначина количине кретања

$$\frac{D(\rho \underline{v})}{Dt} + \rho \underline{v} (\nabla \cdot \underline{v}) = \rho \underline{f} + \nabla \cdot \underline{\underline{\sigma}} \quad \leftrightarrow \quad \frac{\partial}{\partial t} (\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_i v_j) = \rho f_i + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.2)$$

где је \underline{f} вектор јединичне масене силе, а $\underline{\underline{\sigma}}$ тензор напона који репрезентује површинске силе;

- једначина енергије

$$\begin{aligned} \frac{D}{Dt} \left[\rho \left(e + \frac{|v|^2}{2} \right) \right] &= \rho \underline{f} \cdot \underline{v} + \nabla \cdot (\underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{v} - \underline{q}) \\ \leftrightarrow \quad \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{|v|^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{|v|^2}{2} \right) \underline{v} \right] &= \rho \underline{f} \cdot \underline{v} + \nabla \cdot (\underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{v} - \underline{q}), \end{aligned} \quad (2.3)$$

где су e јединична унутрашња енергија, $\frac{|v|^2}{2}$ јединична кинетичка енергија, а чланови на десној страни једнакости означавају снагу масених сила, снагу површинских сила и топлоту размењену провођењем респективно. Скаларним множењем једначине количине кретања са вектором тренутне брзине \underline{v} , добија се једначина кинетичке енергије:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \frac{|v|^2}{2} \right) + \nabla \cdot \left(\rho \frac{|v|^2}{2} \underline{v} \right) = \rho \underline{v} \cdot \underline{v} + \nabla \cdot (\underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{v}) - \underline{\underline{\sigma}} : (\nabla \underline{v}), \quad (2.4)$$

док једначина унутрашње енергије представља разлику израза (2.3) и (2.4):

$$\frac{\partial (\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \underline{v}) = -\nabla \cdot \underline{q} + \underline{\underline{\sigma}} : (\nabla \underline{v}). \quad (2.5)$$

2.2 Модел динамике вискозног нестишљивог флуида

У општем случају, скуп основних једначина (2.1), (2.2) и (2.4) базиран је на темељима реологије и законима термодинамике, и обухвата једначине стања и једначине промене стања флуида. Овакав систем једначина је незатворен, па је с тим у вези неопходно дефинисати одговарајуће конститутивне релације које зависе од физичких особина непрекидне средине. Сасвим је природно да се успостави веза између напона и брзине

деформисања јер су ове брзине директна последица напона. Уопштавањем Њутнове¹ хипотезе за смицајни напон у ламинарној струји флуида према којој је однос између тангенцијалних напона и деформације линеаран, ова зависност гласи:

$$\underline{\sigma} = -p\underline{E} + 2\mu\underline{S} - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \underline{v})\underline{E}, \quad (2.6)$$

при чему је p притисак, μ је динамичка вискозност флуида, \underline{S} је тензор брзине деформисања а \underline{E} јединични тензор. Изразом (2.6) дефинисано је шест конститутивних једначина које репрезентују одговарајуће компоненте напоне:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right), \quad (2.7)$$

где је $\delta_{ij} = 1$ за $i = j$ односно $\delta_{ij} = 0$ за $i \neq j$, и које у комбинацији са (2.2) дају једначине Навијеа² и Стокса³ у следећем облику:

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{1}{3}\nu \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_j} \right), \quad (2.8)$$

при чему је $\nu = \mu/\rho$ кинематички вискозитет. Ако се разматра струјање нестишљивог флуида ($\rho = \text{const}$) једначина континуитета (2.1) се знатно поједностављује и своди на

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0, \quad (2.9)$$

док (2.8) постаје

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j}. \quad (2.10)$$

Претпостављајући да су познате вредности кинематске вискозности и запреминских сила које делују на флуид током кретања, изрази (2.9) и (2.10) чине нелинеарни систем од четири парцијалне диференцијалне једначине у којима као непознате величине фигуришу притисак и три компоненте брзине. Овај систем, заједно са почетним и граничним условима, представља веома сложен математички модел за решавање динамике вискозног флуида. Чак и ако се струјање може посматрати као стационарно, што у великој мери олакшава пут до резултата, опште решење оваквог система не постоји, осим у неким једноставним случајевима, па се за решавање наведеног проблема углавном примењују нумерички поступци. Међутим, резултати који се тако добијају добро се поклапају са експерименталним само при малим амплитудама брзина, односно при

¹Исак Њутн (енгл. Sir Isaac Newton; Линколншир, 4. јануар 1643 — Лондон, 31. март 1727) био је енглески физичар, математичар, астроном, алхемичар и филозоф природе, који је данас за већину људи једна од највећих личности у историји науке.

²Клод Луј Навије (фр. Claude-Louis Navier; Дижон, 10. фебруар 1785 — Париз, 21. август 1836) рођен Клод Луј Мари Анри Навије, француски инжењер и физичар са специјализацијом у механици.

³Сер Џорџ Габријел Стокс, Барон првог реда (енгл. Sir George Gabriel Stokes, 1st Baronet, 13. август 1819. — 1. фебруар 1903.) је био математичар и физичар, који је на Кембрицу дошао до важних открића на пољу динамике флуида (укључујући и Навје-Стоксове једначине), оптике, и математичке физике (укључујући и Стоксову теорему).

малим Рејнолдсовим⁴ бројевима, те су оне као такве применљиве искључиво на ламинарна струјања. Када су у питању турбулентна струјања, проблем решавања наведеног система се додатно усложњава због њихове изразите нестационарности па је примена нумеричких метода неизбежна.

2.3 Турбуленција. Статистички концепт

Веома је тешко дати прецизну дефиницију турбулентних струјања, мада су његове основне карактеристике нерегуларност односно случајност, хаотичност, затим појава дифузије, високе вредности Рејнолдовог броја, тродимензионалност, нелинеарност, дисипација, непрекидност и тд. (Crnojević, 2014; Tennekes и Lumley, 1972).

Структуру турбулентног тока чини широк спектар вртлога различите величине а процес преноса енергије у струјном домену врши се каскадно од већих ка мањим. Дисипација енергије појављује се у вртлозима најмање размере (размере Колмогорова⁵) где се она посредством вискозних сила претвара у унутрашњу енергију флуида, односно најмањи вртлози бивају трансформисани у топлоту уз повишење температуре. Због значајне појаве процеса дифузије у турбулентном току вртлози се преносе из зоне веће у зону мање концентрације вртлога што за директну последицу има хомогенизацију струје флуида. Све то доводи до равномернијег профила брзине него код ламинарног струјања, а утицај трења на зидовима при струјању кроз цеви и канале је знатно израженији.

Већ је наведено да су турбулентна струјања изразито нестационарна а расподела физичких величина је прилично произвољна. Посматрајући вредност неке величине током времена у одређеној тачки струјног простора долази се до констатације да она изгледа изузетно неправилно и непредвидиво, те као таква ни у ком случају није практично употребљива. Међутим, ако се изврши расподела вероватноће појављивања одређене вредности дате величине у довољно великом временском интервалу, уочава се њено понашање по принципу Гаусове нормалне расподеле са највећом вероватноћом појаве временски осредњене, односно просечне вредности, на чему се и заснива статистички концепт описивања турбуленције.

Рејнолдс је 1895. године први увео хипотезу према којој је извршена декомпозиција стохастичког турбулентног поља одговарајуће величине струјања на статистички осредњено и флукуационо поље те величине. Према томе се тренутна вредност величине f може представити као

$$f(x, t) = \bar{f}_t(x) + f'(x, t), \quad (2.11)$$

⁴Озборн Рејнолдс (енгл. Osborne Reynolds; 23. август 1842 – 21. фебруар 1912.), истакнути иноватор у разумевању динамике флуида. Осим тога, његове студије преноса топлоте између чврстих тела и флуида су донеле побољшање у дизајну котлова и кондензатора.

⁵Андреј Николајевић Колмогоров (рус. Андрей Николаевич Колмогоров; Тамбов, 25. април 1903. — Москва, 26. октобар 1987.) је био руски математичар.

при чему је $\bar{f}_t(\underline{r})$ дефинисано са

$$\bar{f}_t(\underline{r}) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(\underline{r}, t) dt, \quad (2.12)$$

и представља средњу вредност турбулентног скаларног и векторског поља, док је T временски интервал у коме се врши осредњавање. Осим у већини случајева најпогоднијем облику осредњавања по времену, могуће је извршити просторно осредњавање као и осредњавање по простору и по времену. Код статистички стационарних турбулентних струјања, која су изузетно много присутна у техничкој пракси, вредности дефинисане различитим методама осредњавања су једнаке (Wilcox и сар., 1998), а густине вероватноћа су такође стационарне и статистички параметри не зависе од времена. Овако осредњене величине заправо и јесу од значаја за техничку праксу.

2.4 Рејнолдсово осредњавање Навије-Стоксових једначина и турбулентни напони

Модел динамике вискозног нестишљивог флуида описаног системом једначина (2.9) и (2.10) могуће је проширити и на турбулентни режим при чему је потребно извршити временско осредњавање њихових чланова а одговарајуће величине представити преко временски осредњених, тј. просечних вредности и њихових одступања. Сходно Рејнолдсовом статистичком концепту осредњавања тренутне вредности физичких величина изражавају се као збир временски осредњене и флукуационе компоненте:

$$v_i = \bar{v}_i + v'_i, \quad f_i = \bar{f}_i + f'_i, \quad p = \bar{p} + p'. \quad (2.13)$$

Дакле, уврштавајући изразе (2.13) у једначину континуитета (2.9) и Навије-Стоксове једначине (2.10), након поступка осредњавања уз поштовање одговарајућих правила о истом, оне добијају следећи облик:

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \bar{v}_j \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} = \bar{f}_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} - \overline{v'_i v'_j} \right). \quad (2.15)$$

Изрази (2.14) и (2.15) представљају Рејнолдсове једначине нестишљивог флуида за просечно нестационарно струјање. Осредњавање је вршено по периодима варијације макроскопских промена физичких величина па је свака од величина која учествује у једначинама функција положаја и тренутка времена из интервала осредњавања. Временски осредњена једначина одржања масе (2.14) идентична је једначини одржања масе у свом основном облику (2.9), док је једина разлика између временски осредњених и

временски не осредњених Навије-Стоксових једначина у појављивању новог члана

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{v'_i v'_j}) \quad (2.16)$$

који репрезентује допунску инерцијалну силу по јединици масе, односно убрзање, настало као резултат узајамне размене количине кретања унутар флуидне масе што је условљено турбулентним флукуацијама. Ово у ствари и представља основни инжењерски проблем турбуленције. Да би се израчунале све главне величине тока турбулентног струјања потребно је наћи начин за израчунавање $\overline{v'_i v'_j}$ (Wilcox и сар., 1998). Величина $-\overline{\rho v'_i v'_j}$ физички представља напон, означава се са τ_{ij}^t и назива Рејнолдсовим турбулентним напоном. Ови турбулентни напони формирају матрицу турбулентних напона која представља симетричан тензор другог реда:

$$\underline{\underline{T}} = -\overline{\rho v'_i v'_j} = \begin{bmatrix} -\overline{\rho v'_1 v'_1} & -\overline{\rho v'_1 v'_2} & -\overline{\rho v'_1 v'_3} \\ -\overline{\rho v'_2 v'_1} & -\overline{\rho v'_2 v'_2} & -\overline{\rho v'_2 v'_3} \\ -\overline{\rho v'_3 v'_1} & -\overline{\rho v'_3 v'_2} & -\overline{\rho v'_3 v'_3} \end{bmatrix}. \quad (2.17)$$

Нормални напони $\tau_{ii}^t = -\overline{\rho v'_i v'_i}$ појављују се као последица флукуација брзине у правцу координатних оса, док флукуације брзине управно на правце координатних оса доводе до појаве тангенцијалних напона. Дакле, као резултат осредњавања добија се шест нових непознатих величина, што са четири главне непознате величине струјања (притисак и три компоненте брзине) чини укупно десет непознатих. Са друге стране број једначина се није повећао, има их укупно четири (једначина континуитета и три компоненте Навије-Стоксових једначина). Према томе, систем Рејнолдсових једначина је незатворен систем, што је још увек нерешен проблем турбуленције и њеног моделирања. Математички би, међутим, могуће било извести нове једначине којима би се овај систем затворио, али би се у том случају, с обзиром на нелинеарност Навије-Стоксових једначина, у њима појавио много већи број додатних непознатих. Дакле, са повећањем реда корелација повећава се и број једначина чији је значај, тј. утицај на коначно решење, све мањи. Ово доводи до закључка да се математички модел турбуленције добијен Рејнолдсовим осредњавањем не може затворити, што и није чудно имајући у виду да би такав покушај био чисто математичке природе те као такав не уводи додатне физичке принципе. Суштина моделирања турбуленције састоји се у проналажењу одговарајућих релација за непознате везе између познатих струјних величина за одређену класу струјања, тако да се добије одговарајући број једначина којим се полазни систем затвара.

2.5 Моделирање турбулентних напона

Већина стандардних турбулентних модела заснована је на одређивању турбулентних напона преко концепта турбулентне вискозности и као полазну претпоставку узима хипотезу Бусинеска⁶ базирану на аналогiji са молекуларним преносом количине кретања.

⁶Јозеф Валентин Бусинеск (фр. Joseph Valentin Boussinesq; 13. март 1842 - 19. фебруар 1929.) био је француски математичар и физичар који је значајно допринео теорији хидродинамике, вибрација, светлости и топлоте.

Према овоме, турбулентни напони су повезани са осредњеним пољем деформације тако да важи:

$$\overline{v'_i v'_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \bar{k} \delta_{ij}, \quad (2.18)$$

где је се ν_t означена турбулентна вискозност која није својство флуида већ услова струјања, а

$$k = \frac{1}{2} \overline{v'_i v'_i} \quad (2.19)$$

представља кинетичку енергију флукуација. На тај начин је шест компоненти тензора Рејнолдсових напона моделирано једним непознатим пољем коефицијената турбулентне вискозности. Ако се израз (2.18) уврсти у Навије-Стоксове једначине (2.15) добија се

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \bar{v}_j \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} = \bar{f}_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial \bar{k}}{\partial x_j}. \quad (2.20)$$

чиме се проблем затварања Рејнолдсових једначина своди на одређивање једне скаларне величине, односно турбулентне вискозности ν_t .

2.6 $k - \varepsilon$ модел турбуленције

Као најпоузданији, најчешће коришћен и најбоље верификован модел за сложене геометрије, као и комплексне токове са разменом топлоте и масе, свакако се истиче двоједначински $k - \varepsilon$ турбулентни модел. Оригинално су га дефинисали Jones и Launder (1972), а његову коначну, стандарну верзију објавили су В. Е. Launder и Sharma (1974).

За одређивање временских размера турбуленције користи се једначина кинетичке енергије флукуација која у компактној форми има следећи облик:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{v}_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = P_k + D_k - \varepsilon + \nu \frac{\partial^2 k}{\partial x_j \partial x_j}, \quad (2.21)$$

при чему је

$$P_k - \overline{v'_i v'_j} \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} (-\rho \overline{v'_i v'_j}) \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \tau_{ij}^t \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} \quad (2.22)$$

продукција кинетичке енергије турбуленције градијентима осредњеног тока,

$$D_k \equiv - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{\rho} \overline{v'_j p'} + \frac{1}{2} \overline{v'_i v'_i v'_j} \right) \quad (2.23)$$

је турбулентна дифузија кинетичке енергије турбуленције флукуацијама брзине и притиска, док

$$\varepsilon \equiv \nu \overline{\frac{\partial v'_i}{\partial x_j} \frac{\partial v'_i}{\partial x_j}}, \quad (2.24)$$

дефинише вискозну дисипацију кинетичке енергије флукуација, односно трансформацију енергије у вртлозима најмањих размера.

Транспортна једначина дисипације кинетичке енергије, која се користи за одређивање интегралне размере турбуленције, дата је са

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{v}_k \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} = P_\varepsilon + D_\varepsilon + \Phi_\varepsilon + \nu \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x_k \partial x_k} \quad (2.25)$$

где су редом

$$P_\varepsilon \equiv -2\nu \overline{\frac{\partial v'_i}{\partial x_j} \frac{\partial v'_k}{\partial x_j} \frac{\partial v'_i}{\partial x_k}} - 2\nu \overline{v'_k \frac{\partial v'_i}{\partial x_j} \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_k}} - 2\nu \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\overline{\frac{\partial p}{\partial x_j} \frac{\partial v'_i}{\partial x_j}} \right) - \nu \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\overline{v'_k \frac{\partial v'_i}{\partial x_j} \frac{\partial v'_i}{\partial x_j}} \right) \quad (2.26)$$

продукција дисипације кинетичке енергије турбуленције,

$$D_\varepsilon \equiv -2\nu \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\overline{\frac{\partial p}{\partial x_j} \frac{\partial v'_i}{\partial x_j}} \right) - \nu \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\overline{v'_k \frac{\partial v'_i}{\partial x_j} \frac{\partial v'_i}{\partial x_j}} \right) \quad (2.27)$$

је дифузија дисипације кинетичке енергије турбуленције, и

$$\Phi_\varepsilon \equiv -2\nu^2 \overline{\frac{\partial^2 v'_i}{\partial x_k \partial x_j} \frac{\partial^2 v'_i}{\partial x_k \partial x_j}} \quad (2.28)$$

деструкција дисипације кинетичке енергије турбуленције.

За непознате чланове у изразима (2.22) и (2.23) дефинишу се одговарајуће конститутивне релације, па се, на основу (2.18), продукција кинетичке енергије турбуленције моделира као

$$P_k = \nu_t \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right), \quad (2.29)$$

док дифузиони члан уз претпоставку о градијентној дифузији има следећи облик:

$$D_k = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right), \quad (2.30)$$

где је σ_k константа.

За моделирање продукције дисипације кинетичке енергије P_ε претпоставља се да је она пропорционална продукцији кинетичке енергије P_k , па је

$$P_\varepsilon = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k, \quad (2.31)$$

где је $C_{\varepsilon 1}$ емпиријска константа. Дифузиони члан дефинисан изразом (2.27) обликује се као

$$D_\varepsilon = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right), \quad (2.32)$$

а σ_ε је такође константа. Применом поступка димензијске анализе, моделирање деструкције дисипације Φ_ε засновано на аналогiji са дисипацијом кинетичке енергије даје следећу зависност:

$$\Phi_\varepsilon = C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (2.33)$$

при чему је $C_{\varepsilon 2}$ нова емпиријска константа.

Заменом израза (2.29)-(2.33) у (2.21) и (2.25), коначно се добијају моделски облици једначине кинетичке енергије турбуленције и једначине дисипације:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{v}_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \nu_t \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right], \quad (2.34)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{v}_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \nu_t \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right]. \quad (2.35)$$

При том је, поступком димензијске анализе, формулисан израз за турбулентну вискозност:

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (2.36)$$

а C_μ је константа која се одређује калибрисањем модела у циљу што бољег слагања са експерименталним резултатима. Коефицијенти σ_k , σ_ε , C_μ , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$ су константе добијене експерименталним мерењима и за стандардни $k - \varepsilon$ модел износе:

$$\sigma_k = 1,00, \quad \sigma_\varepsilon = 1,30, \quad C_\mu = 0,09, \quad C_{\varepsilon 1} = 1,44, \quad C_{\varepsilon 2} = 1,92. \quad (2.37)$$

Постоји и неколико модификација $k - \varepsilon$ модела изведених за неке специјалне примене код којих се једино разликују константе. Модел је валидан за високе вредности турбулентног Рејнолдсовог броја дефинисаног са

$$\text{Re}_t = \frac{k^2}{\nu \varepsilon} \quad (2.38)$$

те према томе није применљив у подручјима где турбулентна вискозност није доминантна. Овај проблем се јавља у близини зида јер се вискозни флуид лепи за чврсту површину, односно његова брзина на самој површини једнака је нули, што има за последицу да је на зиду и $k = 0$. Како ε овде има коначну вредност различиту од нуле, следи да Φ_ε тежи бесконачности, што је физички неоправдано. Због тога је у овој области потребно дефинисати одговарајуће граничне услове који су описани тзв. зидним функцијама. Зона уз зид представља подручје у коме је промена локалног Рејнолдсовог броја, бездимензионе удаљености од зида y^+ и вредности брзине трења значајна. Турбулентно струјање у близини зида може да се подели у три различита подручја (Bredberg, 2000):

- вискозни подслој: $0 < y^+ \leq 5$
- прелазна област: $5 < y^+ \leq 30$
- инерцијални слој: $30 < y^+ \leq 200$

где је y^+ дефинисано са

$$y^+ = \frac{v_\tau y}{\nu} = \frac{y C_\mu^{1/4} k^{1/2}}{\nu} \quad (2.39)$$

док су $v_\tau = \tau_w / \rho$ привидна брзина или брзина трења, y је стварна удаљеност од зида, а ν локални коефицијент кинематске вискозности, при чему је са τ_w означен смицајни напон

на зиду. За развијени турбулентни ток радијални флуks кинетичке енергије на $y^+ = 30$ једнак је нули. Ово представља гранични услов за турбулентну кинетичку енергију у близини зида добијен из услова локалне равнотеже продукције и дисипације, што чини основу зидних функција (Sijerčić, 1998). Гранични услови за турбулентну кинетичку енергију и дисипацију дати су изразима:

$$k = \frac{\rho v_\tau^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (2.40)$$

$$\varepsilon = \rho \frac{v_\tau^3}{\aleph y} \quad (2.41)$$

при чему је \aleph вон Карманова⁷ константа ($\aleph \approx 0,4$). У непосредној близини зида, тј. у вискозном подслоју ($y^+ < 5$) вискозни смицајни напони су много већи од турбулентних, у прелазној области они су истог реда величине, док се у инерцијалној зони ($y^+ > 30$), односно зони турбулентног језгра, могу занемарити у односу на турбулентне смицајне напоне, али ипак претпоставити да су они приближно једнаки смицајном напону на зиду. Сходно томе долази се до универзалног логаритамског профила средње брзине у језгру:

$$v^+ = \frac{1}{\aleph} \ln(Ey^+) \quad (2.42)$$

где је E емпиријска константа чија је типична вредност 5,2.

Међутим, у случајевима када струјање у непосредној близини зида има знатан утицај на расподелу осталих величина у струјном простору, чак и овакав приступ даје лоше резултате те као такав није погодан за примену. Због тога се, при струјањима са малим вредностима турбулентног Рејнолдсовог броја, у моделским једначинама за k и ε појављују пригушне функције и одговарајући допунски чланови. На тај начин прорачунава се и струјање у вискозном подслоју, односно непосредно уз чврсту површину, при чему се обезбеђује да вискозни напони у овој области имају доминантан утицај у односу на турбулентне.

⁷Теодор вон Карман (мађарски: Kármán Tódor; 11. мај 1881 - 6. мај 1963) био је мађарско-амерички математичар, ваздухопловни инжењер и физичар.

„Браћо и другови! Хвала вам на толикој пажњи и одликовању. У вама гледам ја младо Српство, које има да ради на општем задатку свију Срба. Ви сте будућност Српства. Ја сам, као што видите и чујете, остао Србин и преко мора, где се испитивањима бавим. То исто треба да будете и ви, и да својим знањем и радом подижете славу Српства у свијету.“

Никола Тесла
у Београду, 2. јуна 1892.
приликом посете Велокој школи

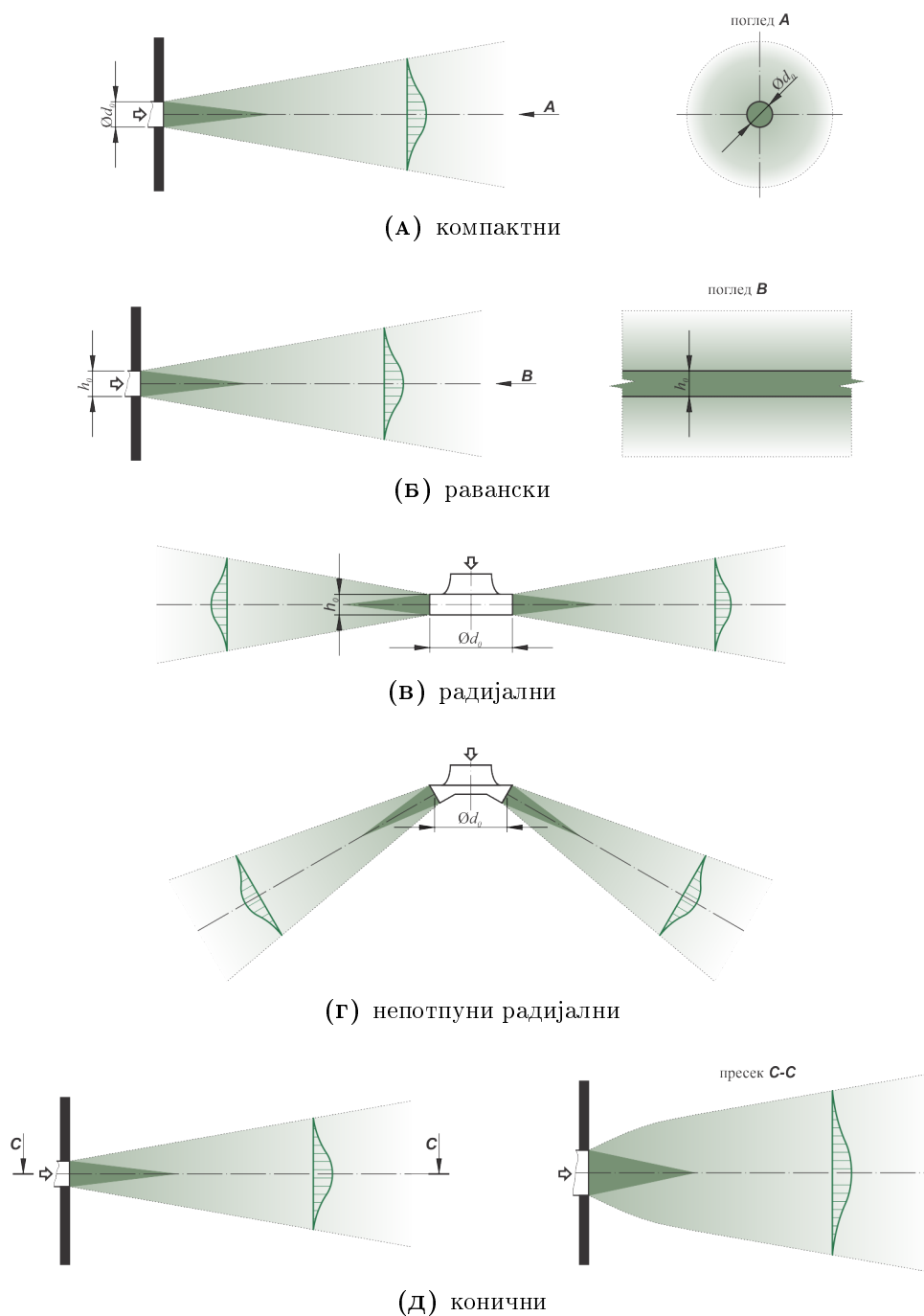
3

ТУРБУЛЕНТНИ МЛАЗ У ТЕХНИЦИ СОБНОГ ВАЗДУХА

У поређењу са типичним млазом који се проучава у механици флуида, млазеви који се појављују у КГХ системима углавном имају релативно мале почетне брзине и релативно велике димензије отвора. Иако су облици и функција елемената који репрезентују ове отворе (решетке, дифузори, млазнице...) веома различити, карактеристика свих јесте да се на њима формира ваздушни млаз одређене геометрије који представља главни фактор утицаја на кретање ваздуха у просторији. Теорија ваздушног млаза у техници собног ваздуха дели просторију на зону боравка и зону у којој је дозвољено интензивније струјање са циљем предвиђања екстремних вредности брзине и температуре у области у којој бораве људи, и пружа основ за пројектовање система.

Ваздушни млазеви који се формирају на дистрибутивним елементима, у зависности од њиховог концепта, могу бити различитих геометријских облика (ASHRAE, 2005), слика 3.1. Компактни млазеви појавиће се на кружним или правоугаоним отворима са релативно малим односом димензија суседних страница (млазнице, решетке), док су равански карактеристични за релативно уске и дугачке отворе као што су линијски дифузори. Вишесмерни, радијални и вртложни млазеви углавном су везани за различите врсте плафонских елемената, док се конични обично појављују при дивергенцији лопатица за усмеравање ваздуха.

Ако зид, таваница или нека друга препрека немају утицаја на струјање ваздуха, реч је о слободном млазу. Иструјавање ваздуха паралелно или под неким углом у односу на чврсту површину (плафон, зид) непосредно у њеној близини или уз њу веома је



Слика 3.1. Облици млаза у зависности од типа иструјног отвора

чест случај, када, због Coanda¹ ефекта, настаје припојени односно зидни млаз. Ово је практично обавезан случај у просторијама мале висине, обично до 4 m, где је примењен довод преко плафонских дифузора, који су по правилу дизајнирани да обезбеде хоризонтално иструјавање под плафон како би се спречила појава струјања у зони боравка брзином већом од прихватљиве. Углови просторије су места на којима долази до

¹Henri Marie Coandă (7. јун 1886. – 25. новембар 1972.) био је румунски проналазач, пионир аеродинамике и конструктор експерименталне летелице Coanda-1910. Изумео је велики број уређаја, пројектовао „летећи тањир” и открио Coanda ефекат у динамици флуида.

промене смера струјања ваздуха у приљубљеном млазу и веома је значајно познавање карактеристика даљег тока ваздуха. Готово неизбежан догађај у пракси јесте интеракција два супротна приљубљена млаза који се сударају, а такође не треба изоставити ни случај интеракције између два паралелна млаза на блиском растојању.

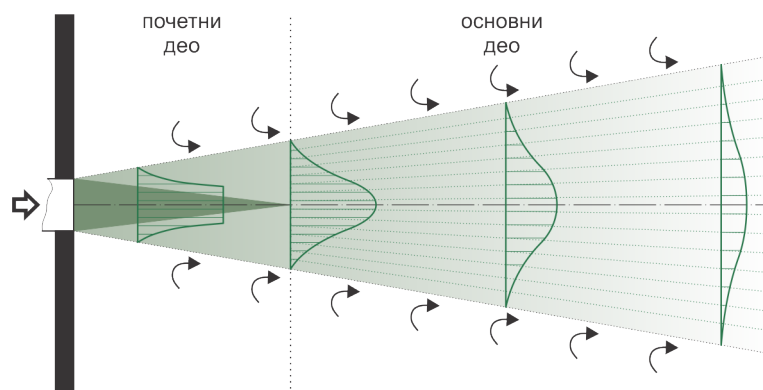
Узимајући у обзир и температурну разлику која може постојати између доводног и просторијског ваздуха, сви наведени феномени могу се остварити у изотермним или неизотермним условима. Разлика у температури између примарног и просторијског ваздуха ствара силе узгона у млазу, утичући на његову путању, место где се приљубљује или одваја од неке површине и слично. Степен испољености ових ефеката зависи од односа гравитационе силе и силе инерције која настаје у млазу, и карактерише се Архимедовим² бројем.

Многобројним теоријским и експерименталним истраживањима прикупљена су драгоцене сазнања о структури врло сложених струјних поља која се јављају у техничкој пракси, чиме је развијена чврста основа за њихову примену. Иако су у општем случају поља физичких величина (брзине, притиска, густине и температуре) узајамно спрегнута и у сложеним међудејствима, добијени резултати доведени су на математичко-физички облик који је разумљив и применљив у свакодневној инжењерској пракси.

3.1 Слободни млазеви

3.1.1 Својства и структура слободног млаза

Слободним млазом сматра се неометано иструјавање флуида кроз релативно мали отвор у релативно велики простор. Код изотермног млаза, температура ваздуха је иста у целој његовој запремини, што одговара случају када нема размене топлоте између млаза и околине, тј. када је температура на почетку млаза једнака температури средине у коју он истиче, слика 3.2. Компонента брзине у главном смеру струјања знатно је већа



Слика 3.2. Слободни турбулентни млаз

²Архимед (грч. Αρχιμήδης, 287. г.п.н.е. — 212. г.п.н.е.) био је старогрчки математичар, физичар и астроном из Сиракузе на Сицилији. Сматра се највећим математичаром антике и једним од највећих научника до данас.

него у било ком другом смеру, при чему су изражене интензивне попречне флукуације брзине, чији градијенти и смичући напон као њихова последица генеришу турбуленцију. Ово доводи до мешања са околном ваздушном масом у мировању што утиче на формирање турбулентног граничног слоја чија се дебљина непрекидно повећава. На тај начин, димензије млаза се низструјно увећавају, а маса млаза се такође повећава индуковањем околног ваздуха. Криволинијске границе млаза замењују се приближно правим, а језгро, односно зона константне брзине, сужава се до потпуног ишчежавања. Слободан млаз одликује се знатном неравномерношћу расподеле брзине по пресеку. У почетном делу млаза разликује се област језгра константне брзине једнаке иницијалној, и област граничног слоја где профил брзине одговара кривој са тачком превоја. Надаље, у зони потпуно развијеног турбулентног струјања, брзине у млазу се смањују, што се односи и на оне у оси, а поља бездимензијских брзина у свим пресецима ортогоналним у односу на правац струјања међусобно су слична, услед чега релативна неравномерност остаје константна. Промена притиска у главном смеру струјања првенствено зависи од расподеле притиска околног ваздуха изван подручја млаза који је обично константан, па је и притисак у млазу константан и једнак притиску околног ваздуха (Hinze, 1975).

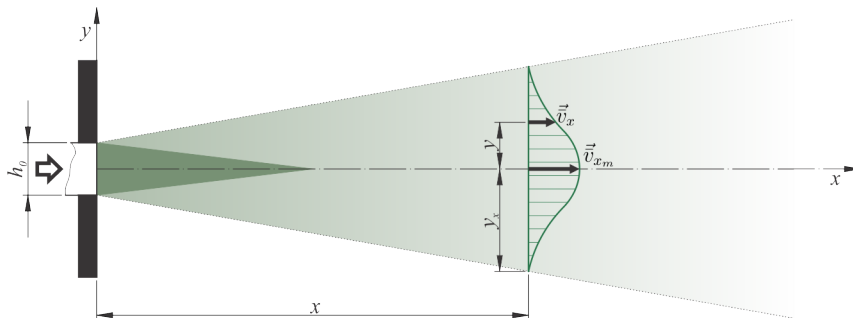
3.1.2 Равански млаз

На слици 3.3 приказан је бесконачно дуг процеп константне ширине кроз који истиче ваздух у облику раванског млаза са константним пољем брзине у почетном пресеку. Полазећи од Рејнолдсових једначина нестишљивог флуида за просечно стационарно струјање, уз чињеницу да запреминске силе немају утицај на изотермни млаз, и узимајући у обзир да је промена величина струјања у попречном смеру знатно већа него у главном, једначине кретања за слободан равански млаз гласе:

$$\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}_y}{\partial y} = 0, \quad (3.1)$$

$$\bar{v}_x \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial y} - \overline{v'_x v'_y} \right), \quad (3.2)$$

при чему десна страна последње једнакости може да се представи као функција збира вискозних напона у ламинарној струји граничног слоја и Рејнолдовог турбулентног



Слика 3.3. Слободни равански млаз

напона као (Rajaratnam, 1976):

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} (-\rho \overline{v'_x v'_y}) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} (\tau_l + \tau_{xy}^t). \quad (3.3)$$

Како је млаз слободан, односно не постоји равна површина уз коју би се формирао ламинарни гранични слој, смицајни напони практично не постоје, а израз (3.2) се своди на

$$\bar{v}_x \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xy}^t}{\partial y}. \quad (3.4)$$

На основу тога, интегрални облик једначине количине кретања у раванском млазу гласи

$$\rho \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{v}_x \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial x} dy + \rho \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{v}_y \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial y} dy = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial \tau_{xy}^t}{\partial y} dy \quad (3.5)$$

па се, будући да је $v_x = 0$ за $x = \pm\infty$, уз коришћење израза (3.5), након једноставних трансформација добија

$$\rho \frac{\partial}{\partial x} \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{v}_x^2 dy = 0. \quad (3.6)$$

Према томе, количина кретања у млазу остаје константна

$$\rho \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{v}_x^2 dy = \text{const} = J, \quad (3.7)$$

што представља суштину за предвиђање карактеристика млаза. На основу (3.5), анализом сличности чланова у једначинама кретања (3.1) и (3.4) показује се да је у зони потпуно развијеног турбулентног струјања ширење млаза линеарно сразмерно растојању, док брзина у оси млаза опада обрнуто сразмерно квадратном корену растојања (Rajaratnam, 1976):

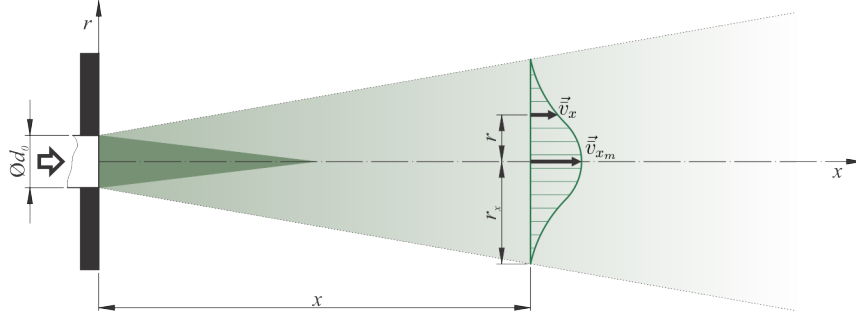
$$y_x \propto x^1, \quad (3.8)$$

$$\bar{v}_{x_m} \propto x^{-\frac{1}{2}}. \quad (3.9)$$

3.1.3 Осносиметрични млаз

За разлику од претходно описаног дводимензионог случаја, овде се посматра иструјавање ваздуха из кружног отвора са равномерним пољем почетне брзине, при чему се формира млаз конусног облика са осносиметричним ширењем у радијалним смеровима, слика 3.4.

Узевши у обзир константност притиска, као и чињеницу да је радијална компонента брзине много мања и занемарљива у односу на аксијалну, када нема вртложења и обимска компонента брзине не постоји, Рејнолдсове једначине кретања у поларно цилиндричним



Слика 3.4. Слободни осносиметрични млаз

координатама гласе

$$\frac{\partial}{\partial r} r \bar{v}_r + \frac{\partial}{\partial x} r \bar{v}_x = 0, \quad (3.10)$$

$$\bar{v}_r \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial r} + \bar{v}_x \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial x} = - \left(\frac{\partial}{\partial r} \overline{v'_r v'_x} + \frac{\overline{v'_r v'_x}}{r} + \frac{\partial}{\partial x} \overline{v'^2_x} \right). \quad (3.11)$$

Сређивањем десне стране израза (3.11) она може да се представи као функција турбулентног напона $\tau_{rx}^t = -\overline{\rho v'_r v'_x}$ (Rajaratnam, 1976):

$$- \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \overline{v'_r v'_x}) = \frac{1}{\rho r} \frac{\partial r \tau_{rx}^t}{\partial r} \quad (3.12)$$

па је у коначном облику

$$\bar{v}_r \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial r} + \bar{v}_x \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial x} = \frac{1}{\rho r} \frac{\partial r \tau_{rx}^t}{\partial r}. \quad (3.13)$$

Интегрални облик једначине количине кретања за осносиметрични млаз према томе је

$$\int_0^{+\infty} \rho r \bar{v}_r \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial r} dr + \int_0^{+\infty} \rho r \bar{v}_x \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial x} dr = \int_0^{+\infty} \frac{\partial r \tau_{rx}^t}{\partial r} dr, \quad (3.14)$$

што коначно даје

$$2\pi\rho \frac{\partial}{\partial x} \int_0^{+\infty} \bar{v}_x^2 r dr = 0, \quad (3.15)$$

односно, количана кретања остаје константна:

$$2\pi\rho \int_0^{+\infty} \bar{v}_x^2 r dr = \text{const} = J. \quad (3.16)$$

И овде се, на основу (3.14), анализом сличности чланова у (3.10) и (3.13), долази до закључка да ширење млаза представља линеарну функцију растојања, док се, међутим, показује да је опадање брзине у оси млаза, за разлику од раванског случаја, такође

сразмерно растојању (Rajaratnam, 1976):

$$r_x \propto x^1, \quad (3.17)$$

$$\bar{v}_{x_m} \propto x^{-1}. \quad (3.18)$$

3.1.4 Радијални млаз

У претходна два описана случаја млаз је иницијално формиран из отвора који се налазе у равни, било да је то уски бесконачни процеп или округли отвор. Радијалним млазом сматра се иструјавање ваздуха из цилиндричне површине пречника d_0 и висине h_0 као што је приказано на слици 3.5. Када нема вртложења, а самим тим ни обимне компоненте брзине, узевши у обзир да је аксијална компонента занемарљива у односу на доминантну радијалну, као и да су градијенти у радијалном правцу занемарљиви, Рејнолдсове једначине кретања у изворном облику гласе:

$$\frac{\partial}{\partial r} r \bar{v}_r + \frac{\partial}{\partial y} r \bar{v}_y = 0 \quad (3.19)$$

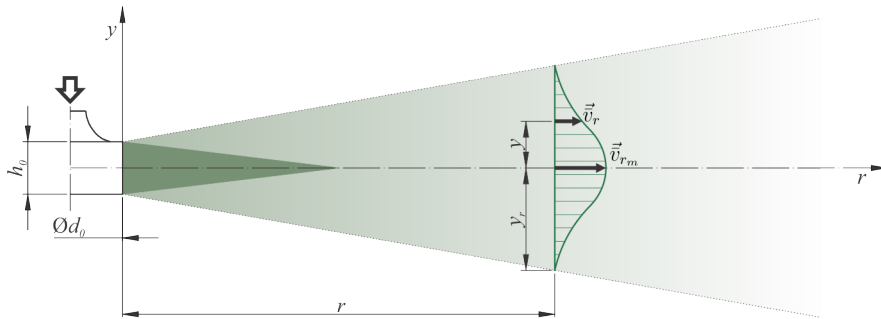
$$\bar{v}_y \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial y} + \bar{v}_r \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial r} = - \left(\frac{\partial}{\partial y} \overline{v'_y v'_r} + \frac{\overline{v'_y v'_r}}{y} + \frac{\partial}{\partial r} \overline{v'^2_r} \right) \quad (3.20)$$

Поступком описаним у случају кружног млаза, (3.20) се записује у функцији турбулентног напона $\tau_{yr}^t = -\rho \overline{v'_y v'_r}$ као

$$\bar{v}_y \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial y} + \bar{v}_r \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial r} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{yr}^t}{\partial y}. \quad (3.21)$$

На исти начин, интегрални облик једначине количине кретања је

$$\rho \int_{-\infty}^{+\infty} r \bar{v}_y \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial y} dy + \rho \int_{-\infty}^{+\infty} r \bar{v}_r \frac{\partial \bar{v}_r}{\partial r} dy = \int_{-\infty}^{+\infty} r \frac{\partial \tau_{yr}^t}{\partial y} dy, \quad (3.22)$$



Слика 3.5. Слободни радијални млаз

односно, након сређивања

$$\rho \frac{\partial}{\partial r} \int_{-\infty}^{+\infty} r \bar{v}_r^2 dy = 0, \quad (3.23)$$

па и у овом случају количина кретања у радијалном правцу остаје константна, тј.

$$\rho \int_{-\infty}^{+\infty} r \bar{v}_r^2 dy = \text{const} = J, \quad (3.24)$$

док се на основу (3.22), анализом сличности чланова у (3.19) и (3.21) долази до закључка да се ширење млаза и пад брзине у централној равни дуж радијалног правца одвија по истим законитостима као и за слободан кружни млаз (Rajaratnam, 1976):

$$y_r \propto r^1, \quad (3.25)$$

$$\bar{v}_{r_m} \propto r^{-1}. \quad (3.26)$$

3.2 Карактеристике слободних млазева

Карактеристике млаза који се појављују у системима климатизације зависе од читавог низа фактора. Највећи утицај на параметре формираног млаза свакако има тип, односно геометрија дистрибутивног елемента, као и запремински проток ваздуха кроз њега, што директно утиче на брзине у млазу и домете који ће се остварити, као и на степен турбуленције и количину индукованог ваздуха. Разлике у температурама примарног и просторијског ваздуха доводе до отклона хоризонталног млаза у вертикалном правцу, док код вертикалног иструјавања долази до повећања, односно смањења домета под утицајем гравитације.

Као што је раније већ речено, утицај важних граничних услова на карактеристике тока ваздуха представљен је емпиријским формулацијама. Различитим експерименталним истраживањима дошло се до емпиријских образаца за предвиђање карактеристика млаза који су прилагођени свакодневnoj инжењерској примени. Код припојеног млаза најчешће се користи принцип симетрије којим се он третира као половина слободног, што резултира постојањем корекционог фактора за параметре слободног млаза како би се они приближно прилагодили онима које описују припојени млаз, и чија је вредност $\sqrt{2}$ (Regenscheit, 1971). Чињеница је да се тиме прави одређена грешка али она у практичној примени нема значај.

3.2.1 Интензитет турбуленције и степен мешања

Степен турбуленције млаза представља једану од најутицајнијих карактеристика ваздушног тока. Као што је већ описано, турбуленција није својство флуида, већ феномен изазван његовим кретањем под утицајем различитих фактора (ASHRAE, 2005). Упркос уобичајеној претпоставци о стабилности тока, у млазу не постоји континуално

струјање већ су присутне сталне промене правца и брзине кретања изазване температурним разликама и силама инерције, а пример промене интензитета брзине у једној тачки струјног простора приказан је на слици 3.6. Компонента тренутне брзине у доминантном смеру струјања подразумева збир осредњене и флукутирајуће компоненте, а интензитет турбуленције представља однос стандардне девијације тренутне брзине и компоненте средње брзине ваздуха као

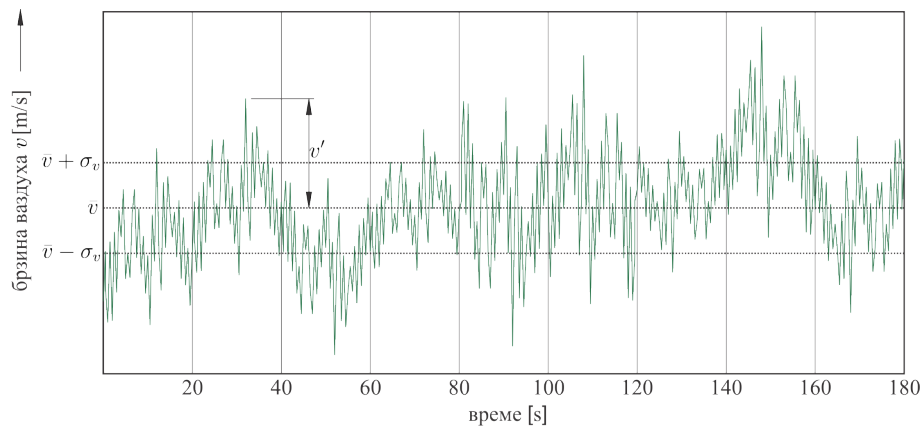
$$I_t = \frac{\sqrt{v'^2}}{\bar{v}} = \frac{\sigma_v}{\bar{v}}. \quad (3.27)$$

Код интензивније турбуленције ваздушног тока на излазу из дистрибутивног елемента, зона граничног слоја у којој долази до мешања са околним ваздухом је израженија, а млаз је мање уочљив. Такође се интензитет турбуленције може приказати у функцији Рејнолдсовог броја који представља бездимензијски приказ инерцијалних и вискозних сила у млазу:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot l}{\mu} \quad (3.28)$$

где је l карактеристична величина вртлога а μ коефицијент динамичке вискозности. Турбулентни токови се при високим вредностима Рејнолдсовог броја састоје од широког спектра вртлога различите величине, а највећи вртлози, који су уједно и носиоци највећег дела турбулентне кинетичке енергије настале као последица интеракције са главним током, реда су величине дужинског размера који је упоредив са карактеристичном геометријском дужином главног тока, односно дебљином турбулентног граничног слоја. Са удаљавањем од отвора дебљина граничног слоја се повећава а језгро се смањује до потпуног ишчезавања. У практичној примени, за дефинисање степена турбуленције на излазном отвору уведен је коефицијент m као однос карактеристичне димензије отвора и фиктивне дужине језгра млаза познат као степен мешања (Regenscheit, 1971) који је за равански млаз дефинисан као

$$m = \frac{h_0}{x_0}, \quad (3.29)$$



Слика 3.6. Промена интензитета брзине у времену у једној тачки струјног простора

ТАБЕЛА 3.1. Приближне вредности за степен мешања m разних отвора (Recknagel и сар., 2002)

Врста отвора	Степен мешања m
млазнице	0,14 ... 0,17
правоугаони слободни отвори	0,17 ... 0,20
процепи, $\lambda^*=20 \dots 25$	0,2 ... 0,25
перфорирани отвори, $R_{fa}^{**}=0,1 \dots 0,2$	0,22 ... 0,28
$R_{fa}=0,01 \dots 0,1$	0,28 ... 0,40
ламеласте решетке, $\beta^{***}=0^\circ$	0,18 ... 0,25
$\beta=40^\circ$	0,28
$\beta=60^\circ$	0,6
$\beta=90^\circ$	0,5

* λ - однос димензија страница правоугаоних отвора

** R_{fa} - однос слободне и укупне површине отвора

*** β - угао дивергенције ламела

односно за осносиметрични

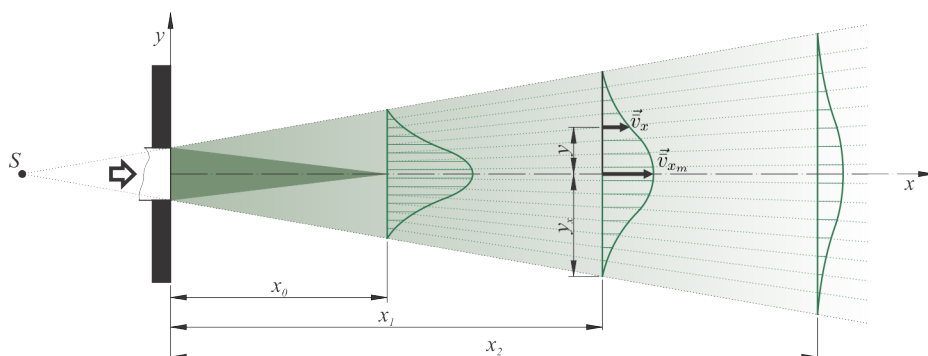
$$m = \frac{d_0}{x_0}. \quad (3.30)$$

Степен мешања је често коришћен у емпиријским формулама и представља почетну карактеристику млаза. Веcker (1950) је утврдио да језгро изотермног млаза који истрјујава из једноставног отвора конвергира под углом од $8,8^\circ$, па се према томе лако може одредити његова дужина а самим тим према (3.29) и степен мешања. Међутим, код сложеније геометрије отвора који није слободан, распоред и подешеност лопатица за усмеравање ваздуха на дистрибутивном елементу има пресудан утицај на формирање млаза. Код отвора са оштрим ивицама, перфорираних елемената или ламеластих решетки треба узети у обзир и контракцију млаза због смањене ефективне површине. Вредности за m добијене испитивањем за неке случајеве у односу на израз (3.29) приказане су у табели 3.1.

3.2.2 Профил брзине

Феноменолошки опис слободног турбулентног млаза базиран је на претпоставци постојања међусобне сличности између профила брзина у различитим попречним пресецима граничног слоја управним на осу млаза дуж зоне потпуно развијеног турбулентног струјања, што је и доказано бројним експерименталним истраживањима. Док се брзина у оси млаза постепено смањује обрнуто сразмерно растојању од отвора, поља бездимензијских брзина у свим таквим пресецима међусобно су слична. Математички се ова сличност за пресеке на растојањима x_0 , x_1 и x_2 може изразити као

$$\frac{\bar{v}_x(x_0, \eta_0)}{\bar{v}_{x_m}(x_0)} = \frac{\bar{v}_x(x_1, \eta_0)}{\bar{v}_{x_m}(x_1)} = \frac{\bar{v}_x(x_2, \eta_0)}{\bar{v}_{x_m}(x_2)} \quad (3.31)$$

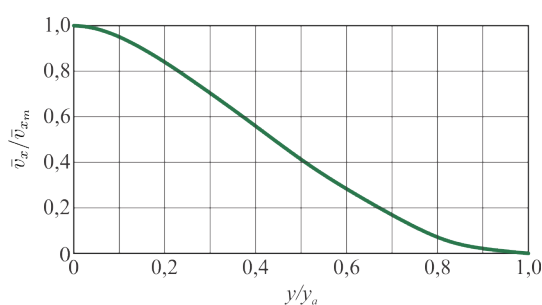


Слика 3.7. Сличност профила брзине у слободном млазу

где је са \bar{v}_x означена осредњена брзина у главном смеру струјања у тачки на растојању y од осе, \bar{v}_{x_m} је осредњена брзина у оси млаза, а y_a укупна ширина полумлаза, при чему је бездимензијска удаљеност у правцу попречном на смер струјања означена са $\eta = y/y_a$, слика 3.7. Ову сличност међу првима је уочио Tollmien (1926), који је у експерименту са кружним млазом установио да се за апроксимацију профила брзине у попречном пресеку изотермног млаза може користити облик Гаусове³ функције као

$$\frac{\bar{v}_x}{\bar{v}_{x_m}} = e^{-\ln 2 \left(\frac{y}{y_a}\right)^2} = \exp(-0,6931\eta^2), \quad (3.32)$$

а за y_a је узето растојање од осе млаза до тачке у којој брзина има вредност $\bar{v} = 1/2\bar{v}_{x_m}$. Код иструјавања млаза из правоугаоних отвора са релативно малим односом страница, расподела је врло слична као код кружних отвора тако да се при већим растојањима практично не може установити да ли ваздух излази из кружног или правоугаоног отвора. Бездимензионе криве за профил слободног кружног млаза приказане су на слици 3.8. Каснијим многобројним истраживањима потврђено је да облик Гаусове функције



Слика 3.8. Бездимензионе криве за профил брзине слободног кружног млаза

³Јохан Карл Фридрих Гаус (нем. Johann Carl Friedrich Gauß, 30. април 1777. – 23. фебруар 1855.) био је немачки математичар и научник који је дао значајан допринос у многим пољима, укључујући теорију бројева, анализу, диференцијалну геометрију, геодезију, електростатику, астрономију и оптику. Познат као „принц математичара” и „највећи математичар од давнина”, Гаус је оставио траг на многим пољима математике и науке и сматра се једним од најугицајнијих математичара у историји.

најбоље апроксимира профил брзине не само код једноставнијих облика иструјног отвора, већ се подједнако добро може применити и код сложеније геометрије (Becher, 1949; Grititlin, 1994; Nottage, 1951; Shepelev, 1961). Иако се у литератури могу пронаћи и другачији изрази за апроксимацију профила брзине (Taliev, 1963), облик 3.32 је најчешће коришћен. Међутим, да би он био применљив за различите степене турбуленције као последица геометрије излазног отвора, уводећи степен мешања, израз (3.32) постаје (Recknagel и сар., 2002):

$$\frac{\bar{v}_x}{\bar{v}_{x_m}} = e^{-2\left(\frac{y}{mx}\right)^2} = \exp\left(-2\left(\frac{y}{mx}\right)^2\right). \quad (3.33)$$

Строго гледано, било би исправније као нулту референцу за растојање x , уместо равни зида, користити тачку S која представља центар сличности, мада је и ово практично занемарено због релативно мале разлике.

Код припојеног млаза, слика 3.12, ширење у хоризонталном правцу је неометано а профил брзине може се апроксимирати Гаусовом функцијом облика као што је то наведено у изразу (3.32). Међутим, у вертикалном правцу ширење је омогућено само са доње стране, а Verhoff (1963) је показано да се за ову оријентацију профил брзине припојеног млаза најбоље описује Гаусова функција грешке, односно erf функција, тако да важи

$$f(\eta) = A\eta^{\frac{1}{7}} [1 - erf(B\eta)] \quad (3.34)$$

где су A и B константе са вредностима 1,4794 и 0,67753 респективно, па је коначно

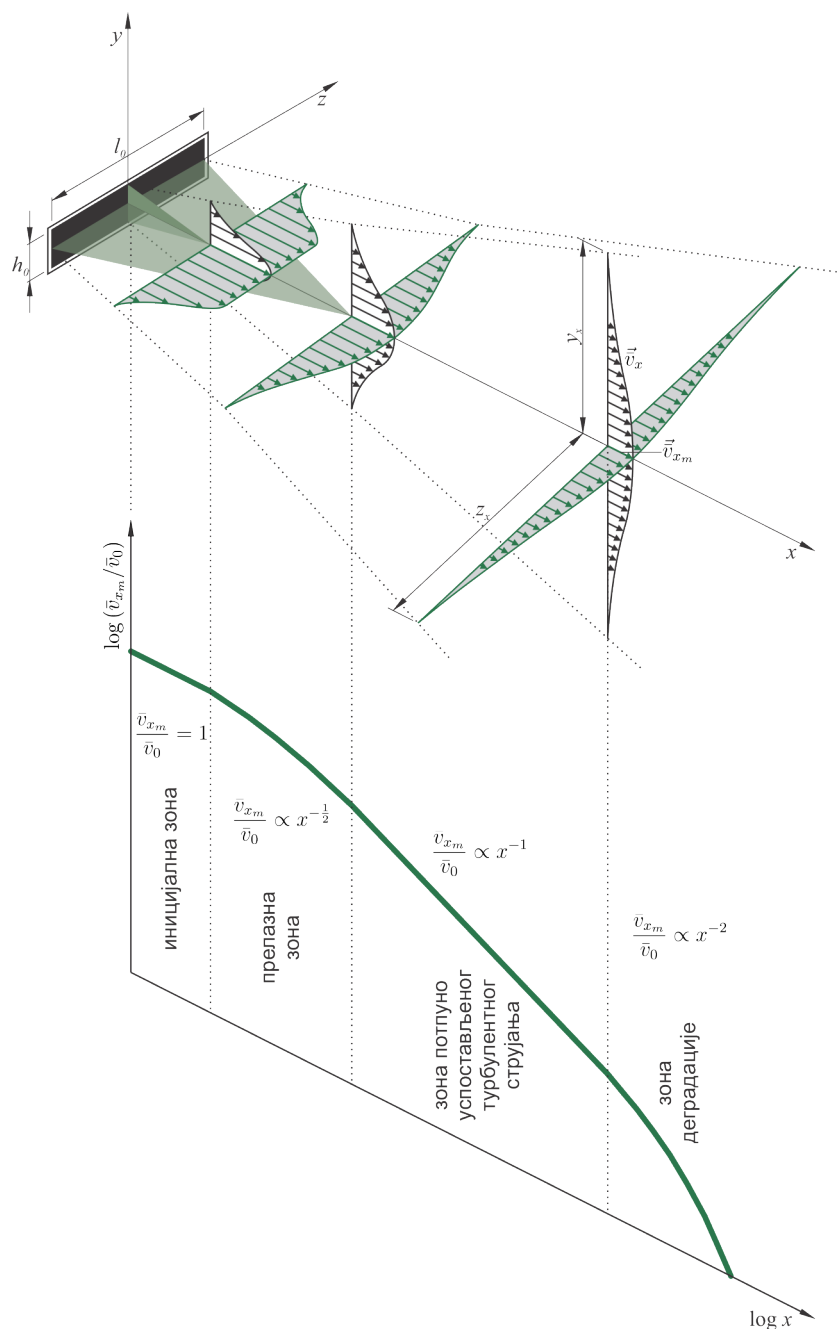
$$\frac{\bar{v}_x}{\bar{v}_{x_m}} = 1,4794\eta^{\frac{1}{7}} [1 - erf(0,67753\eta)]. \quad (3.35)$$

Међутим, у инжењерској пракси се за дефинисање профила брзине углавном користи корекциони фактор примењен на величине у слободном млазу, а постојање ламинарног граничног слоја до зида се занемарује, односно сматра се да је максимална брзина на зиду.

3.2.3 Зоне струјања и карактеристични пад брзине

Као што је већ описано, у почетном делу млаза, тзв. језгру, брзина остаје константна и једнака иницијалној. Надаље, брзина ваздуха у осци млаза опада, а према карактеристичном паду брзине издвајају се четири зоне у развоју млаза, слика 3.9 (ASHRAE, 2005; Awbi, 1991; Djunaedy и Cheong, 2002; Tuve, 1953).

Дужина сваке од ових четири области првенствено зависи од геометрије отвора, као и од карактеристика турбуленције на отвору. У слободном раванском (дводимензионалном) млазу доминантне су зоне 1 и 2, док је у осносиметричном (тродимензионалном) млазу то случај са областима 1 и 3. Генерално говорећи, са значајним повећањем односа димензија излазног отвора, тј. са повећањем раванских карактеристика млаза, област 2 постаје доминантнија док се дужина подручја 3 смањује (Awbi, 1991).

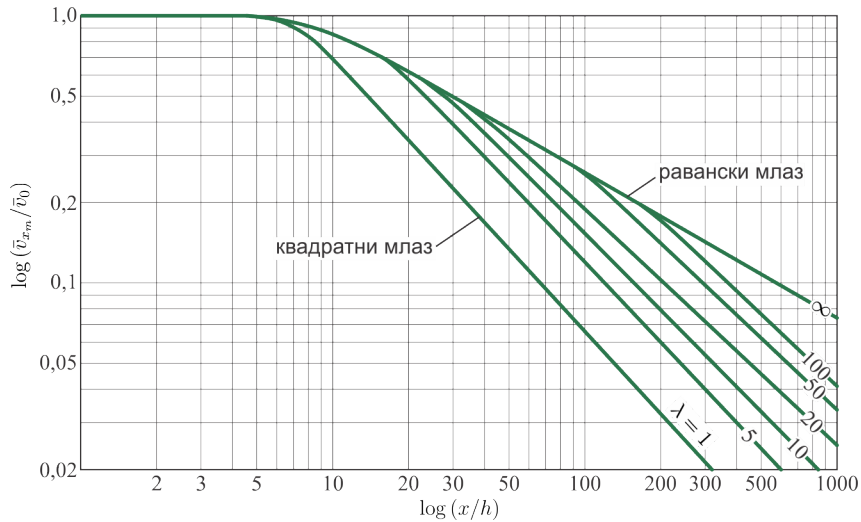


Слика 3.9. Зоне струјања и карактеристични пад брзине у млазу

Зона 1, или *иницијална зона*, представља кратку област чија дужина износи приближно четири еквивалентна пречника излазног отвора за компактни и радијални, односно четири ширине отвора за равански млаз (ASHRAE, 2005). У овој зони разликују се област језгра константних брзина једнаких иницијалној, односно

$$\frac{\bar{v}_{xm}}{\bar{v}_0} = 1, \quad (3.36)$$

и област граничног слоја у којој профил брзине одговара кривој са тачком превоја.



Слика 3.10. Смањење централне брзине правоугаоних млазева при степу мешања $m = 0, 2$ (Recknagel и сар., 2002)

Зона **2** названа је *прелазном зоном* и представља подручје у коме брзина постепено почиње да се смањује тако да важи:

$$\frac{\bar{v}_{x_m}}{\bar{v}_0} \propto x^{-\frac{1}{2}}. \quad (3.37)$$

Међутим, Awbi (1991) наводи да пад централне брзине у овој зони зависи од облика и карактеристика излазног отвора и понаша се по закону

$$\frac{\bar{v}_{x_m}}{\bar{v}_0} \propto x^n, \quad (3.38)$$

где се n креће се у границама $-1/3$ до -1 . За кружне и правоугаоне отворе са односом димензија мањим од 13,5 ова зона је занемарљива ($n = -1$) и, за компактни млаз, заузима простор од око осам еквивалентних пречника излазног отвора, док је за отворе који генеришу равански млаз значајна ($n = -1/3$) и протеже се до четири еквивалентна пречника (ASHRAE, 2005; Awbi, 1991). Криве смањења централне брзине за различите односе $\lambda = l/h$ и степен мешања $m = 0, 2$ приказане су у дијаграму на слици 3.10.

Зона **3** је област од изузетног инжењерског значаја, често се назива и *зона потпуно успостављеног турбулентног струјања*. У највећем броју случајева, млаз доспева у зону боравка са карактеристикама које важе за ову област струјања. Дужина ове зоне креће се у распону 25 до 100 еквивалентних пречника излазног отвора зависно од његовог облика и еквивалентне површине, почетне брзине, као и геометријских карактеристика просторије (ASHRAE, 2005). Брзина у оси млаза опада обрнуто сразмерно растојању (Awbi, 1991):

$$\frac{\bar{v}_{x_m}}{\bar{v}_0} \propto x^{-1}. \quad (3.39)$$

У овој зони важи и закон сличности према коме су поља бездимензијских брзина у свим пресецима управним на осу млаза међусобно слична. Такође, закон сличности се

поред брзине може применити и на поље температуре, као и на концентрацију честица и гасова (Chen и Srebric, 2000).

Зона 4 је крајња зона, односно терминална, или зона деградације, у којој максимална брзина опада све интензивније (Awbi, 1991):

$$\frac{\bar{v}_{x_m}}{\bar{v}_0} \propto x^{-2}. \quad (3.40)$$

Опадање брзине нарочито је изражено у случају ограниченог простора, где она брзо пада испод 0,25 m/s. И поред опсежних истраживања, карактеристике млаза у овој зони и даље нису у потпуности разумљиве.

3.2.4 Домет млаза

Домет или дубина продирања представља изузетно важну карактеристику млаза која је дефинисана као растојање од отвора за довод ваздуха до положаја где се струјање у млазу практично више не може разликовати од кретања околног ваздуха. Струјање није јасно уочљиво када брзина у оси млаза падне испод одређене границе која је позната као терминална брзина и чије вредности се наводе у границама 0,1-0,25 m/s. За задате услове домет је првенствено функција брзине на излазу, односно протока, док при константном протоку домет зависи од пада брзине, тј. геометрије иструјног отвора и облика млаза који се формира, односно степена мешања. Код вертикалних неизотермних млазева, због дејства гравитационих сила, значајан утицај на домет има разлика температура примарног и просторијског ваздуха.

3.2.5 Контракција и дивергенција млаза

У техници климатизације отвори за иструјавање ваздуха прективени су ламеластим решеткама и другим елементима за усмеравање струје ваздуха, различитим перфорираним плочама и сл. У најидеалнијем случају, ако је брзинско поље испред отвора равномерно и управно на раван отвора, онда непосредно иза решетке настају одвојени слободни млазеви који се постепено шире и тек на одређеном растојању од решетке спајају у заједнички млаз са максималном брзином на централној оси. При том долази до интензивног индуковања околног ваздуха од стране свих појединачних млазева чиме се повећава присједињена маса и због чега око сваког млаза настаје циркулација индукованог ваздуха, тако да маса млаза остаје константна од излазног пресека до пресека у коме се практично спајају сви млазеви. Само ивични млазеви могу непрекидно да индукују ваздух из околне средине предајући му део кинетичке енергије па је увећање масе централних млазева на рачун околног флуида отежано тако да они почињу да привлаче суседне млазеве. Због тога сви млазеви скрећу ка оси, а површина попречног пресека у коме млаз постаје јединствен мања је од почетног пресека, тј. површине решетке. Карактеристичне величине у том, најужем пресеку, битно зависе од односа слободне и укупне површине почетног пресека, тако да, на пример, за $R_{fa} = A_{ef}/A_0 = 0,3 - 0,4$, важи да је $\bar{v}_{x_m}/\bar{v}_0 \approx 0,7$ (Taliev, 1963).

Угао дивергенције, или угао ширења млаза првенствено је условљен геометријом отвора и интензитетом турбуленције као почетном карактеристиком млаза. Према ASHRAE (2005), угао дивергенције слободног осносиметричног млаза креће се у границама $\alpha=20^\circ-24^\circ$. Код раванског млаза, због немогућности бочног ширења, овај угао је нешто већи, приближно 33° (Recknagel и сар., 2002). Када отвори нису слободни, због контракције, почетни угао ширења је нешто мањи, а касније, након суженог, контракованог пресека, када млаз постане јединствен, он се шири по законима који важе за слободан млаз. Осим тога, млаз може бити додатно дивергиран ламелама за усмеравање ваздуха, при чему се са повећањем угла дивергенције ламела повећава и степен мешања, док се дужина језгра млаза и домет смањују.

3.2.6 Пад брзине у оси изотермног млаза. Једначине млаза

Максимална брзина, тј. брзина у центру млаза дуж зоне потпуно развијеног турбулентног струјања може се одредити из закона одржања количине кретања. За случај раванског дводимензионог млаза количина кретања у почетном пресеку једнака је

$$J_0 = \rho \bar{v}_0^2 h_0, \quad (3.41)$$

односно на растојању x

$$J_x = \rho \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{v}_x^2 dy, \quad (3.42)$$

па узимајући у обзир израз (3.32) за апроксимацију профила брзине на растојању x , на основу (3.7) важи:

$$\rho \bar{v}_0^2 h_0 = \rho \bar{v}_{x_m}^2 \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-2 \ln 2 \left(\frac{y}{y_a}\right)^2} dy. \quad (3.43)$$

Подинтегрална функција може да се напише у облику

$$\exp\left(-2 \ln 2 \left(\frac{y}{y_a}\right)^2\right) = \exp\left(-2 \left(\frac{1}{2} y \sqrt{\frac{4 \ln 2}{y_a^2}}\right)^2\right) = \exp\left(-2 \left(\frac{1}{2} z\right)^2\right), \quad (3.44)$$

односно

$$\frac{z}{2} = \frac{y}{2} \sqrt{\frac{4 \ln 2}{y_a^2}} \quad (3.45)$$

па је, након диференцирања

$$dy = \sqrt{\frac{y_a^2}{4 \ln 2}} dz. \quad (3.46)$$

Увођењем (3.45) и (3.46) у (3.43), узимајући у обзир (3.44) добија се

$$\rho \bar{v}_0^2 h_0 = \rho \bar{v}_{x_m}^2 \sqrt{\frac{y_a^2}{4 \ln 2}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz. \quad (3.47)$$

У теорији математичке вероватноће показује се да је

$$\int_0^{+\infty} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz = \sqrt{\frac{\pi}{2}}, \quad (3.48)$$

па је, због парности подинтегралне функције

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz = \sqrt{2\pi}. \quad (3.49)$$

Увођењем (3.49) у (3.47), уз претпоставку нестишљивог струјања, добија се

$$\bar{v}_0^2 h_0 = \bar{v}_{x_m}^2 \sqrt{\frac{\pi y_a^2}{2 \ln 2}}. \quad (3.50)$$

Због постојања међусобне сличности профила брзине у различитим попречним пресецима дуж зоне потпуно развијеног турбулентног струјања управним у односу на доминантни смер брзине, растојање од осе млаза до тачке у којој брзина има вредност $\bar{v}_x = 1/2\bar{v}_{x_m}$ може се приказати као линеарна функција растојања, односно

$$y_a = \tan \alpha_a \cdot x \quad (3.51)$$

где $\tan \alpha_a = \text{const}$ представља коефицијент ширења млаза који се одређује експериментално. Према томе се коначно добија израз за пад централне брзине раванског осносиметричног млаза као

$$\frac{\bar{v}_{x_m}}{\bar{v}_0} = \left(\sqrt{\frac{2 \ln 2}{\pi}} \cdot \frac{h_0}{\tan \alpha_a \cdot x} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{2 \ln 2}{\tan^2 \alpha_a \cdot \pi} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \sqrt{\frac{h_0}{x}} \quad (3.52)$$

односно

$$\frac{\bar{v}_{x_m}}{\bar{v}_0} = K_p \sqrt{\frac{h_0}{x}}. \quad (3.53)$$

Коефицијент пада централне брзине млаза K_p представља важан фактор за описивање перформанси млаза. Његове вредности обично се одређују експериментално мерењем осредњених вредности брзина у оси млаза на различитим растојањима од иструјног отвора. На сличан начин, узимајући у обзир да је иницијална количина кретања у млазу

$$J_0 = \rho A_0 \bar{v}_0^2, \quad (3.54)$$

и да је слободна површина пресека кружне млазнице

$$A_0 = \frac{\pi}{4} d_0^2 \quad (3.55)$$

где је d_0 пречник млазнице, полазећи од (3.16), показује се да је за осносиметрични слободни млаз пад централне брзине одређен изразом

$$\frac{\bar{v}_{x_m}}{\bar{v}_0} = \sqrt{\frac{\ln 2}{2}} \frac{1}{\tan \alpha_a} \frac{d_0}{x}, \quad (3.56)$$

тј.

$$\frac{\bar{v}_{x_m}}{\bar{v}_0} = K_c \frac{d_0}{x}. \quad (3.57)$$

Regenscheit (1976) наводи једначину за пад брзине изотермног млаза која је базирана на степену мешања m као почетној карактеристици млаза дефинисаној изразом (3.29). Према томе је за слободан равански млаз

$$\frac{\bar{v}_{x_m}}{\bar{v}_0} = \sqrt{\frac{h_0}{mx}} \quad (3.58)$$

док за млаз са централном симетријом важи

$$\frac{\bar{v}_{x_m}}{\bar{v}_0} = \frac{d_0}{mx}. \quad (3.59)$$

Schwenke (1975) у свом истраживању између осталог истиче да наведене једначине дају најбоље резултате за предвиђање брзине слободног млаза. Поредићи изразе (3.53) и (3.58), односно (3.57) и (3.59), може се успоставити однос између коефицијента мешања m и коефицијената K за равански млаз као

$$K_p = \sqrt{\frac{1}{m}}, \quad (3.60)$$

односно за осносиметрични млаз

$$K_c = \frac{1}{m}. \quad (3.61)$$

Радијални облик млаза углавном се посматра као иструјавање ваздуха из цилиндричне површине висине h_0 и пречника d_0 . Према томе, узевши у обзир (3.54), количина кретања на иструјном отвору је

$$J_0 = \rho \bar{v}_0^2 \cdot d_0 \pi h_0, \quad (3.62)$$

док је на радијалном растојању r она

$$J_r = \rho \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{v}_r^2 dy \cdot 4r\pi. \quad (3.63)$$

Апроксимирајући профил брзине у главном смеру струјања Гаусовим обликом функције (3.32), те имајући у виду да се количина кретања у млазу не мења, добија се

$$\rho \bar{v}_0^2 \cdot d_0 \pi h_0 = \rho \bar{v}_{r_m}^2 \int_0^{+\infty} e^{-2 \ln 2 \left(\frac{y}{y_a}\right)^2} dy \cdot 4r\pi, \quad (3.64)$$

па након сређивања слично поступку који је претходно описан важи

$$\bar{v}_0^2 \cdot d_0 h_0 = 4 \bar{v}_{r_m}^2 \cdot r \sqrt{\frac{\pi y_a^2}{2 \ln 2}}, \quad (3.65)$$

на основу чега је коначно

$$\frac{\bar{v}_{r_m}}{\bar{v}_0} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{2 \ln 2}{\pi}} \cdot \frac{d_0 h_0}{\tan \alpha_a \cdot r^2} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} \left(\frac{2 \ln 2}{\tan^2 \alpha_a \cdot \pi} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \frac{\sqrt{d_0 h_0}}{r}, \quad (3.66)$$

односно

$$\frac{\bar{v}_{r_m}}{\bar{v}_0} = K_r \frac{\sqrt{d_0 h_0}}{r}. \quad (3.67)$$

У општем случају, код отвора сложеније геометрије, односно отвора који су прекривени дистрибутивним елементима, ASHRAE (2005) наводи следећи израз за пад централне брзине у зони потпуно развијеног турбулентног струјања:

$$\frac{\bar{v}_{x_m}}{\bar{v}_{ef}} = \frac{K \sqrt{A_{ef}}}{x}. \quad (3.68)$$

При том, A_{ef} представља иницијалну ефективну површину попречног пресека језгра млаза, а вредности коефицијента K првенствено зависе од геометрије иструјног отвора и у себи садрже све параметре који утичу на пад централне брзине. За различите типове вентилационих отвора коефицијент пада централне брзине представља константу која је при одређеним условима иструјавања наведена у ASHRAE (2005), при чему се за припојени млаз овај коефицијент може узети као $\sqrt{2}$ пута већи (B. Launder и Rodi, 1981). Међутим, интуитивно је јасно да димензије просторије те сам положај елемената за дистрибуцију ваздуха значајно утичу на пад централне брзине. Malmström, Kirkpatrick, Christensen и Knappmiller (1997) показали су да K може зависити и од димензија простора, промене правца млаза у угловима просторије, као и од Рејнолдсовог броја, док са друге стране, одређујући коефицијент пада централне брзине при различитим иструјним брзинама и различитим величинама округле млазнице, Yue (2001) закључује да се он мења само при различитим величинама иструјног отвора а не и при промени ефективне брзине на излазу.

Наизглед некарактеристична ситуација појављује се при иструјавању на вртложним дифузорима где се формира радијални вртложни млаз. Grititlyn и Pozin (1993) су

извели изразе за пад централне брзине за радијалну и тангенцијалну компоненту:

$$\bar{v}_{r_m} = 0,67 \sqrt{\frac{J}{\rho}} \cdot \frac{1}{\tan \alpha_a \cdot r}, \quad (3.69)$$

$$\bar{v}_{t_m} = 0,52 \frac{J_0}{\sqrt{J\rho}} \cdot \frac{1}{r^2 \cdot \tan^2 \alpha_a}, \quad (3.70)$$

где су J_0 и J иницијална и количина кретања у развијеној зони млаза. Чињеница да радијална компонента брзине опада обрнуто сразмерно растојању као и код обичног радијалног млаза, док се тангенцијална компонента смањује обрнуто сразмерно квадрату растојања, говори да се млаз из вртложног дифузора може посматрати као обичан радијални млаз, осим у зони малих удаљености које немају практичан значај. Овај закључак поткрепљују и експериментална истраживања вртложног радијалног млаза која су спровели В. Launder и Rodi (1981), као и Smoljan и Balen (2010), где је показано да тангенцијална компонента релативно брзо нестаје и већ на растојању од два пречника дифузора постаје безначајна.

3.2.7 Утицај температура на пад централне брзине. Архимедов број

Неизотермни млаз настаје када се температура ваздуха на излазу из отвора разликује од температуре околног ваздуха што је и најчешћи случај у техничкој пракси, када гравитационе силе имају значајан утицај на развој и путању млаза. Разлика у густини између доводног и просторијског ваздуха доводи до појаве гравитационих сила због чега је дефинисана бездимензиона вредност позната као *Архимедов број*, што се може интерпретирати као

$$Ar = \frac{\text{гравитациона сила}}{\text{сила инерције}} = \frac{\text{слободна конвекција}}{\text{принудна конвекција}}.$$

У зависности од облика млаза дефинише се Архимедов број на иструјном отвору, и то за равански млаз као

$$Ar_{0_p} = \frac{g \cdot \Delta T_0 \cdot h_0}{T_a \bar{v}_0^2}, \quad (3.71)$$

односно за осносиметрични млаз

$$Ar_{0_c} = \frac{g \cdot \Delta T_0 \cdot d_0}{T_a \bar{v}_0^2}, \quad (3.72)$$

при чему је g гравитационо убрзање, ΔT_0 је темпертурна разлика собног и доводног ваздуха, T_a је апсолутна температура околине. Уопштено, за вентилационе отворе може се узети (Awbi, 1991)

$$Ar_0 = \frac{g \sqrt{A_0}}{\bar{v}_0^2} \cdot \frac{T_0 - T_a}{T_a} \quad (3.73)$$

Према томе, за вертикално иструјавања неизотермног млаза максимална брзина зависи од смера дејства инерцијалне и гравитационе силе. Ако су ови смерови супротстављени

опадање брзине је веће у односу на изотермни млаз и супротно што доводи до тога да се домет млаза мења. Сходно наведеном, на основу експериментално-теоријских анализа Shepelev (1961) и Grititlyn (1970) наводе израз који описује пад централне брзине код слободног вертикалног раванског млаза:

$$\frac{\bar{v}_{x_m}}{\bar{v}_0} = K_p \sqrt{\frac{h_0}{x}} K_n, \quad (3.74)$$

при чему је

$$K_n = \left[1 \pm \frac{1,8K_2}{K_1^2} Ar_{0_p} \left(\frac{x}{h_0} \right)^{3/2} \right]^{1/3}, \quad (3.75)$$

где су K_1 и K_2 коефицијенти пада температуре који се одређује експериментално, а знак " \pm " је позитиван када узгонске силе делују у смеру главног струјања и обратно. За остале типове вертикалног неизотермног млаза (компактни, некомплетни радијални и конични) може бити примењен следећи израз:

$$\frac{\bar{v}_{x_m}}{\bar{v}_0} = K_c \sqrt{\frac{A_0}{x}} K_n, \quad (3.76)$$

за који важи

$$K_n = \left[1 \pm \frac{2,5K_2}{K_1^2} Ar_{0_r} \left(\frac{x}{\sqrt{A_0}} \right)^2 \right]^{1/3}. \quad (3.77)$$

Regenscheit (1970) наводи емпиријске изразе за максималну брзину вертикалног раванског и осносиметричног млаза у којима фигурише степен мешања као карактеристика иструјног отвора:

$$\frac{\bar{v}_{x_m}}{\bar{v}_0} = \sqrt{\frac{x_0}{x}} \pm \sqrt{\frac{Ar_{0_p}}{m} \left(2,83 \cdot \sqrt{\frac{x}{x_0}} - 1 \right)}, \quad (3.78)$$

$$\frac{\bar{v}_{x_m}}{\bar{v}_0} = \frac{x_0}{x} \pm \sqrt{\frac{Ar_{0_r}}{m} \left(1 + \ln \frac{2x}{x_0} \right)}, \quad (3.79)$$

где је фиктивна дужина језгра x_0 за наведене случајеве одређена са (3.29) и (3.30).

На самом излазном отвору и у његовој непосредној близини узгонске силе су занемарљиве у односу на силе инерције. Међутим, на већим растојањима оне могу постати интензивније у односу на инерцијалне, а њихово дејство се на одређеној удаљености x од иструјног отвора може описати локалним Архимедовим бројем за равански и осносиметрични млаз (Grititlin, 1994):

$$Ar_{x_p} = \frac{K_2}{K_1^2} Ar_{0_p} \left(\frac{x}{h_0} \right)^{3/2}, \quad (3.80)$$

$$Ar_{x_c} = \frac{K_2}{K_1^2} Ar_{0_c} \left(\frac{x}{\sqrt{A_0}} \right)^2. \quad (3.81)$$

Неизотермни млаз може се сматрати изотермним ако су узгонске силе занемариве у

односу на силе инерције, тј. ако важи $Ar_{x_p} \leq 0,15$, односно $Ar_{x_c} \leq 0,1$ (Grinitlyn и Pozin, 1993), те је у том случају могућа примена једначина које важе за изотермно струјање.

3.2.8 Трајекторија неизотермног млаза

Код хоризонталног иструјавања неизотермног млаза долази до његовог додатног пада или подизања према промени висине која је условљена углом ширења, зависно од тога да ли је његова температура виша или нижа од температуре околног ваздуха. За предвиђање путање хоризонталног неизотермног компактног млаза, на основу аналитичких студија које су извршили Abramović (1960), Shepelev (1978), Nosovitsky и Posokhin (1966), Omelchuk (1966), путања млаза се може описати једначином

$$\frac{y}{\sqrt{A_0}} = \Psi \frac{K_2}{K_1^2} Ar_0 \left(\frac{x}{\sqrt{A_0}} \right)^3. \quad (3.82)$$

При том, y представља вертикално растојање од осе отвора где се на хоризонталном растојању x појављује максимална брзина у млазу, док је Ψ коефицијент који зависи од типа и величине излазног отвора. Експерименталним истраживањима потврђено је да израз (3.82) представља добру апроксимацију трајекторије неизотермног млаза (Grinitlyn, 1969; Jackman, 1970; Stein, 1953). За млазеве који иструјавају под углом, Shepelev (1961) уводи додатни члан у (3.82):

$$\frac{y}{\sqrt{A_0}} = \frac{x}{\sqrt{A_0}} \tan \varphi \pm \Psi \frac{K_2}{K_1^2} Ar_0 \left(\frac{x}{\sqrt{A_0}} \right)^3. \quad (3.83)$$

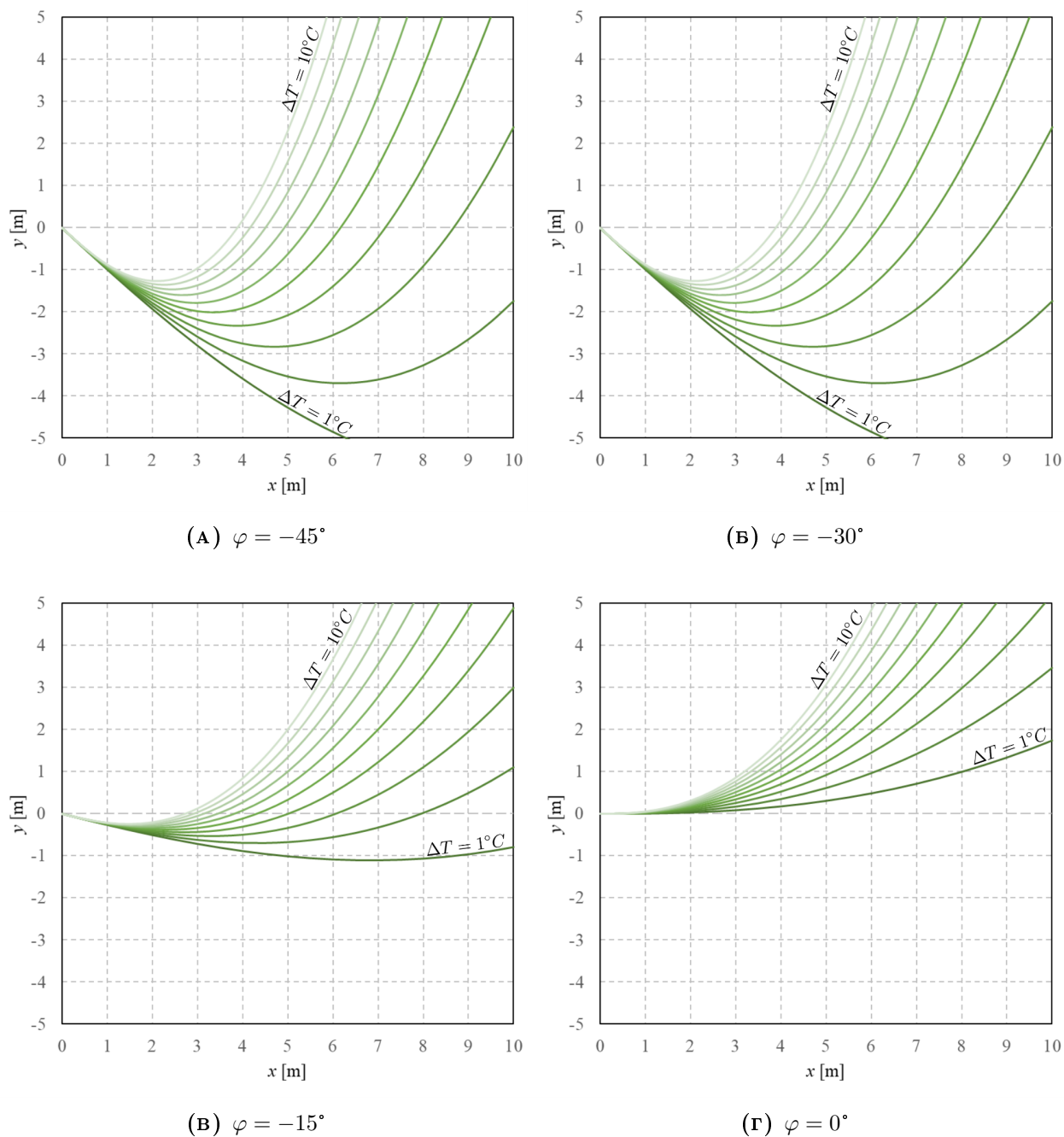
Експерименталним истраживањима млаза који иструјава под углом за различите типове млазница и решетки утврђено је да се вредност коефицијента Ψ креће у границама $0,47 \pm 0,06$ при угловима иструјавања $\varphi_0 = \pm 45^\circ$ (Grinitlyn, Zhivov и Kelina, 1987).

Schwenke (1975) је упоредио неколико сличних емпиријских формулација, при чему наводи да једначине које је дао Regenscheit ипак имају најбоље резултате. Recknagel и сар. (2002) наводе ове једначине за прорачун путање равних и кружних млазева и то за неизотермне млазеве који излазе из зида, при чему угао иструјавања може бити било који. За пад, односно успон слободног млаза за наведене случајеве апроксимативно важи следеће:

$$\frac{y}{h_0} = \frac{x}{h_0} \cdot \tan \varphi \pm 0,4 \cdot \sqrt{m} \cdot Ar_{0p} \left(\frac{x}{h_0 \cdot \cos \varphi} \right)^{2,5}, \quad (3.84)$$

$$\frac{y}{d_o} = \frac{x}{d_o} \cdot \tan \varphi \pm 0,33 \cdot m \cdot Ar_{0c} \left(\frac{x}{d_o \cdot \cos \varphi} \right)^3. \quad (3.85)$$

Опсег вредности степена мешања за карактеристичне случајеве приближно је наведен у табели 3.1, при чему се мање од њих односе на хладни а веће на топли млаз. На слици 3.11 дати су упоредни дијаграми трајекторије млаза за различите углове иструјавања топлог ваздуха при различитим температурним разликама раванског млаза, где је брзина иструјавања $\bar{v}_0 = 3 \text{ m/s}$ а степен мешања $m = 0,2$.



Слика 3.11. Вертикални отклон млаза при грејању за $m=0,2$, $\bar{v}_0=3$ m/s и $\Delta T=1-10$ K

3.2.9 Температурни профил у неизотермном млазу

При удивавању ваздуха чија се температура разликује од оне која влада у простору долази до постепене промене температуре у млазу. Расподела температуре по попречном пресеку млаза разликује се у односу на расподелу брзине, а Grimitlyn и Pozin (1993) у свом истраживању наводе да се профили температуре брже развијају. Ово се може објаснити чињеницом да се, за разлику од Тејлорове теорије вртложног преноса по којој турбулентно мешање узрокује пренос вртложности, пренос топлоте у млазу одвија

механизмом турбулентне дифузије. Ова се промена температуре на централној оси код хоризонталног раванског млаза може одредити према (Grimitlyn, 1970; Shepelev, 1961):

$$\frac{T_x - T_a}{T_0 - T_a} = K_2 \sqrt{\frac{h}{x}}, \quad (3.86)$$

док се за вертикални млаз примењује израз

$$\frac{T_x - T_a}{T_0 - T_a} = K_2 \sqrt{\frac{h}{x}} \frac{1}{K_n}, \quad (3.87)$$

при чему је T_x температура у оси млаза на растојању x , а K_n се рачуна према 3.77. У случају осносиметричног, коничног и непотпуног радијалног млаза, за хоризонтални, односно вертикални млаз респективно се могу применити изрази (Grimitlyn, 1970; Shepelev, 1961):

$$\frac{T_x - T_a}{T_0 - T_a} = K_2 \frac{\sqrt{A_0}}{x}, \quad (3.88)$$

$$\frac{T_x - T_a}{T_0 - T_a} = K_2 \frac{\sqrt{A_0}}{x} \frac{1}{K_n}. \quad (3.89)$$

За различите типове излазних отвора Regenscheit (1971) такође наводи изразе за профил температуре у млазу који су често коришћени, у којима фигурише степен мешања m , па је за равански млаз

$$\frac{\Delta T_x}{\Delta T_0} = \sqrt{\frac{3}{4} \frac{h}{mx}}, \quad (3.90)$$

док за случај осносиметричног млаза важи

$$\frac{\Delta T_x}{\Delta T_0} = \frac{3}{4} \frac{d}{mx}. \quad (3.91)$$

Дакле, код вертикалних хладних млазева усмерених на доле, као и код топлих млазева из пода постоји интензивнија промена температуре што је последица утицаја гравитације. Равански млазеви због својих дводимензионих карактеристика и немогућности бочног ширења и индуковања околног ваздуха имају спорију промену температуре, док је нпр. код вртложног радијалног млаза она веома интензивна због појачаног мешања са околним ваздухом.

3.2.10 Запремина ваздуха покренута млазом. Индукција

Са повећањем удаљености од излазног отвора млаз се шири а његова запремина расте. Пораст запреминског протока кроз попречни пресек у главном смеру струјања узрокована је индуковањем секундарног ваздуха у струју млаза, што је последица интензивних попречних флукуација брзине, чији градијенти и смичући напони као њихова последица генеришу турбуленцију, а то даље доводи до формирања турбулентног граничног слоја чија се дебљина непрекидно повећава. Однос количине ваздуха у просторији који се меша са количином убаченог ваздуха познат је под називом индукција и представља

једну од важних карактеристика дистрибутивног органа (А. Поповић и Serafimov, 1985), односно

$$i = \frac{\dot{V}_a}{\dot{V}}. \quad (3.92)$$

Пошто се количина ваздуха покренута из просторије \dot{V}_i не може измерити, индукција се изражава преко одговарајућих температура које су мерљиве величине. Једначина мешања двеју струја ваздуха без размене топлоте и влаге гласи:

$$\dot{V}_x \cdot T_x = \dot{V} \cdot T_0 + \dot{V}_i \cdot T_a, \quad (3.93)$$

односно,

$$(\dot{V} + \dot{V}_i) \cdot T_x = \dot{V} \cdot T_0 + \dot{V}_i \cdot T_a, \quad (3.94)$$

где $\dot{V}_x = \dot{V} + \dot{V}_i$ представља запремински проток ваздуха кроз попречни пресек млаза на растојању x . Дељењем израза (3.94) са \dot{V} , користећи (3.92), након сређивања добија се израз за индукцију изражен преко мерљивих величина, односно температура:

$$i = \frac{T_0 - T_x}{T_x - T_a}. \quad (3.95)$$

Укупна запремина ваздуха покренута млазом на растојању x од излазног отвора за равански и округли млаз приближно се може предвидети на основу емпиријских једначинама које је дао Regenscheit, а које су засноване на степену мешања као карактеристици излазног отвора (Recknagel и сар., 2002):

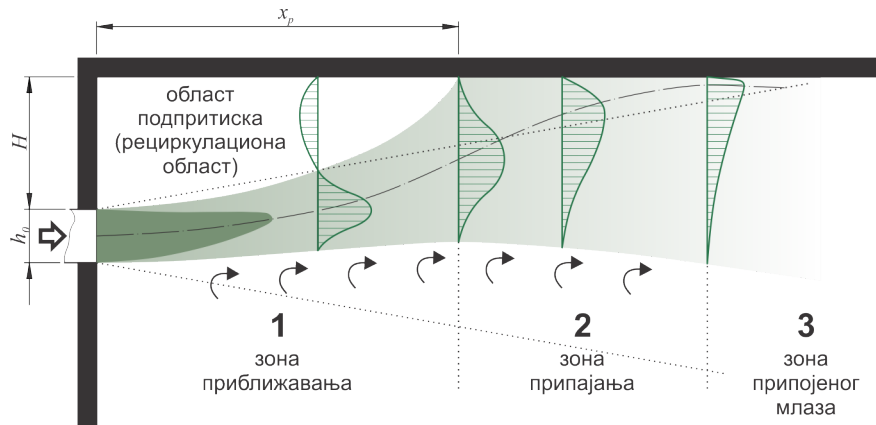
$$\frac{\dot{V}_x}{\dot{V}_0} = \sqrt{\frac{2mx}{h}}, \quad (3.96)$$

$$\frac{\dot{V}_x}{\dot{V}_0} = 2m \frac{x}{d}. \quad (3.97)$$

Према томе, са повећањем удаљености од излазног отвора индукција расте. У појединим случајевима, при дизајну уређаја у системима вентилације тежи се постићи што је могуће већи степен индукције, што се нарочито односи на плафонске елементе намењене уградњи на релативно малим висинама.

3.3 Својства и структура припојеног млаза. Coanda ефекат и његов значај

У овом случају посматра се млаз формиран иструјавањем ваздуха из отвора који се налази непосредно уз чврсту површину која тада има значајан утицај на карактеристике насталог млаза. За разлику од слободног млаза код кога је омогућена симетрична експанзија у простору, овде је ширење на једну страну ограничено постојањем равне површине. Сходно томе, код припојеног млаза уочава се постојање унутрашње области, односно ламинарног граничног слоја уз ту површину, док је спољашњи турбулентни



Слика 3.12. Припојени млаз - иструјавање паралелно са равном површином

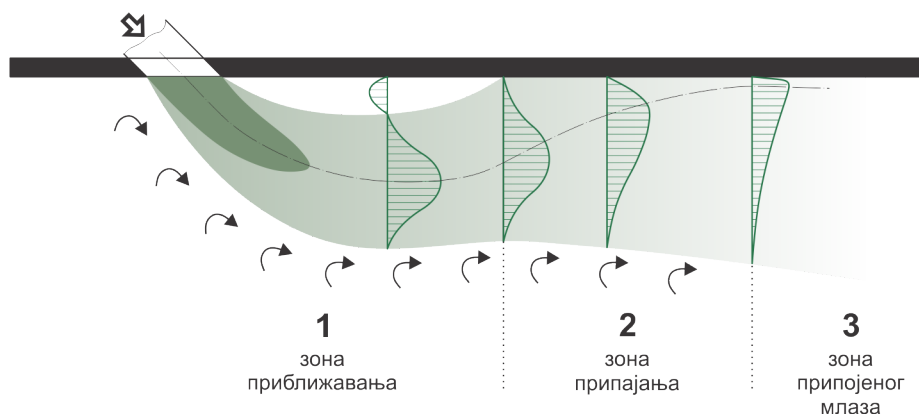
гранични слој сличан оном код слободног млаза, било да се ради о раванском, осносиметричном или радијалном (Seban и Back, 1961; Shigeki, Satoshi, Yasuaki и Takayasu, 2006; Verhoff, 1963). У подручју ламинарног граничног слоја, брзина расте од нуле на зиду до локалног максимума, а дебљина граничног слоја се низструјно повећава, што има за последицу да су сви профили брзине у области потпуно развијеног турбулентног струјања међусобно слични. Када вискозни напон на зиду постане једнак нули долази до одвајања млаза, а низструјно у односу на тачку одвајања, због негативног притиска, долази до индуковања ваздуха са супротне стране и формирања вртлога, што је праћено нестабилностима и преласком ламинарног у турбулентно струјање.

За случај приказан на слици 3.12, када се отвор налази у бочном зиду на извесном одстојању од таванице, најпре се формира слободан млаз који са страна повлачи још извесну количину ваздуха. Док је са доње стране, где млаз није ограничен, то могуће, са горње стране се, због ограничене количине ваздуха коју млаз може да индукује, формира зона потпритиска, која условљава лепљење млаза уз плафон. Установљено је да се ова појава може очекивати само онда када између улазног млаза и таванице нема довољно простора за формирање макро-вртлога потребне величине, чиме би се спречило повлачење ваздуха од стране млаза (Saljnikov, 1980).

У доминантном смеру струјања могу се уочити три специфичне области: зона приближавања, зона припајања и зона припојеног млаза (Nasr и Lai, 1998). Захваљујући силама инерције, млаз се не може од самог почетка преломити и припојити паралелној површини, већ се то дешава тек после одређене дужине тока. Растојање од равни излазног отвора до тачке у којој млаз почиње да се припаја са плафоном приближно се може одредити према следећој емпиријској формули (Awbi, 1991):

$$\frac{x_p}{h_0} = \frac{0,73H}{h_0} - 2,3. \quad (3.98)$$

Када је иструјни отвор непосредно уз равну површину, тј. када је $H = 0$, зона приближавања, а самим тим и рециркулациона област, практично не постоји, већ се млаз



Слика 3.13. Припојени млаз - иструјавање под углом у односу на равну површину

од самог почетка лепи уз њу. У специјалном случају, ако та површина заузима неки туп угао φ са равни отвора, струја ваздуха се у потпуности лепи за ту површину ако је $\varphi < \varphi_{krit}$ и прати је по законима који важе за струјање дуж равних зидова (Katz, 1973). У случају да је φ сасвим мало веће од φ_{krit} , формира се слободан млаз, који међутим није стабилан. Под дејством неког спољњег утицаја и у овом случају долази до скретања и припајања млаза, с тим да он више не подлеже законима струјања који важе за припојени млаз. При даљем повећању угла φ који равна површина заклапа са равни отвора, млаз се понаша приближно као слободан. Слична је појава присутна и ако се отвор не налази непосредно уз равну површину већ је на одређеном растојању од ње. Млаз се, најпре формира као слободан, а касније, ако је то растојање мање од критичне вредности за посматрани угао тако да се ствара зона потпритиска, долази до његовог скретања и припајања (Katz, 1973). Коандин ефекат испољава се и у условима иструјавања млаза под одређеним углом у односу на неку површину, слика 3.13. Слично као и за претходно наведене случајеве, то ће се остварити ако је вредност нападног угла мања од критичне. Код струјања са довољно високим вредностима Рејнолдсовог броја, при повећању нападног угла, та вредност готово да нема утицај на дужину рециркулационе зоне (Sawyer, 1963). О наведеним критичним вредностима угла и растојања не може се ништа уопштено рећи, оне зависе од геометрије излазног отвора, почетне брзине, степена турбуленције, карактеристика простора у коме се млаз формира итд.

Тенденција припајања млаза уз површину у његовој непосредној близини има изузетан значај у техници климатизације. Припојени млаз по правилу се одликују већим дOMETOM и мањим падом ваздушне струје, чак и при негативној разлици температура примарног и просторијског ваздуха. Све наведене чињенице узимају се у обзир како при пројектовању, тако и за конструкцију дистрибутивних елемената, нарочито оних намењених за ниске просторије са тзв. тангенцијалним иструјавањем.

3.4 Млазеви у ограниченом простору. Утицај геометрије просторије и унутрашњих ефеката на формирање млаза

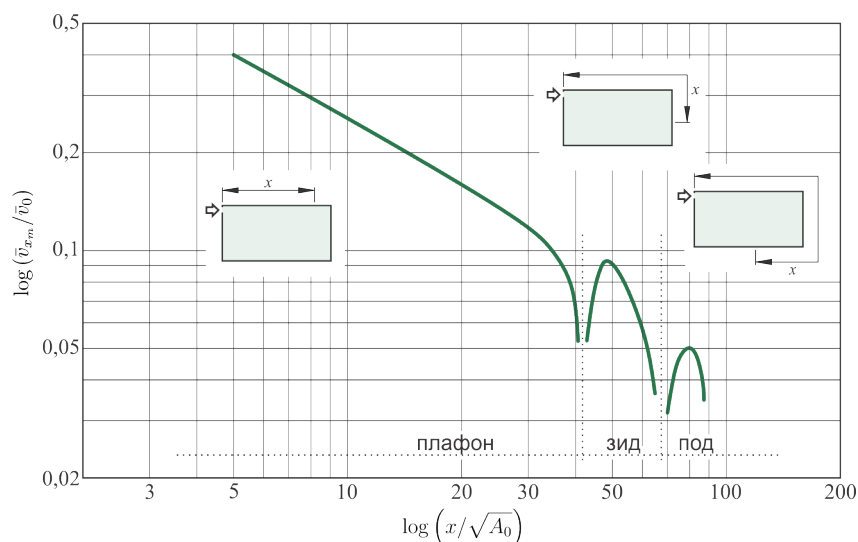
До сада је углавном било речи о ваздушним млазевима који хоризонтално или вертикално иструјавају из различитих отвора, а њихова експанзија је неометана у главном смеру струјања. Међутим, када се узму у обзир димензије просторије, долази до знатних одступања од закона који важе за слободне млазеве. У реалним ситуацијама индуковани ваздух може да струји слободно само у почетном делу млаза који често доспева до супротног зида, или до пода, и надаље прати собне површине, због чега долази до повратног струјања у простору (Karimipouran, 1996). Овакав утицај величине, односно ограничености просторије на централну брзину млаза и температурну разлику узет је у обзир преко коефицијента ограничености K_s (Girnitlyn и Pozin, 1973):

$$\bar{v}_{xs} = \bar{v}_x K_s, \quad (3.99)$$

$$\Delta T_{xs} = \Delta T_x \frac{1}{K_s}, \quad (3.100)$$

где су \bar{v}_{xs} и ΔT_{xs} брзина млаза и температурна разлика у просторији чија величина има утицај на ширење млаза. Girnitlyn и Pozin (1993) такође наводе дијаграме за одређивање коефицијента K_s при чему је показано да се он може изразити као функција површине попречног пресека млаза и површине пресека просторије у којој се млаз формира.

При убацивању ваздуха кроз отвор на зиду, без обзира да ли се ради о кружним, правоугаоним или отворима у облику процепа, у довољно високим просторијама на извесном растојању долази до враћања млаза и стварања примарног вртлога, а домет млаза, односно дубина продирања углавном зависи од висине просторије и креће се у границама између 3 и 4,5 ове вредности (Recknagel и сар., 2002). У случају да млаз не допире до наспрамног зида, примарном вртлогу обично се придружује један или више секундарних вртлога чија величина и број зависи од дужине просторије (Müller, 1977; Schwenke, 1976). Истраживања које је спровео Linke (1966) показала су да, у зависности од положаја и облика отвора за довод ваздуха, постоји максимална дужина просторије која се ефикасно може проветравати млазом, док је остатак просторије слабо вентилиран. Код раванског млаза који иструјава из зида непосредно уз плафон, при Рејнолдсовом броју у распону 1825 до 12000, наведена дужина не прелази три пута већу ширину, док у случају отвора који се налази на једној половини висине просторије она износи око четири ширине просторије, а проветравање ће бити најдубље код примене округлих млазница које ће омогућити дубину продирања млаза једнаку петострукој вредности попречног пресека просторије. Etheridge и Sandberg (1996) детаљније су анализирали припојени изотермни млаз који иструјава из зидне решетке као равански, прати раван плафона а затим се у угловима просторије одбија и мења правац. Резултати експерименталних мерења централне брзине дуж плафона, зида и пода приказани су на слици 3.14. Закључено је да се овако формиран млаз нагло шири у зони непосредне близине



Слика 3.14. Одбијање раванског припојеног млаза у угловима просторије (Etheridge и Sandberg, 1996)

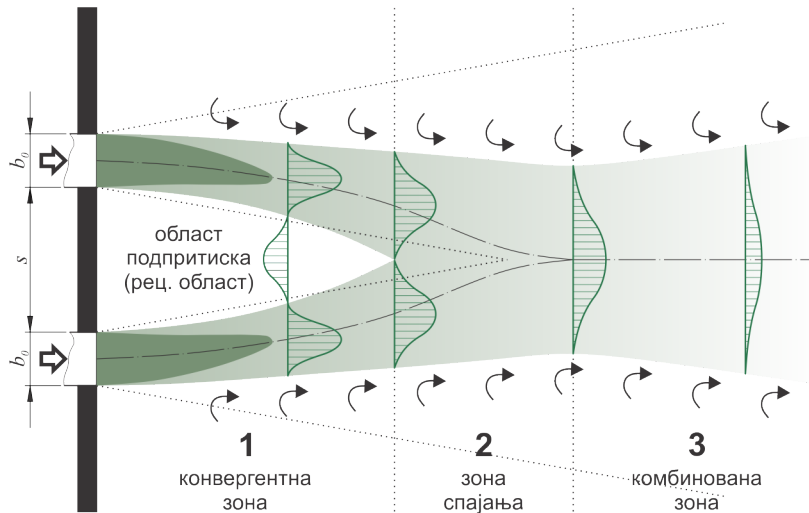
наспрамног зида, брзина нагло опадне док притисак у млазу порасте, те он наставља струјање дуж зида ка поду просторије. У случају припојеног радијалног млаза који струји уз плафон, Waschke (1974) констатује да се он након одбијања и промене правца у углу просторије и даље понаша као радијални, с тим да у овако насталом зидном млазу угао ширења, а самим тим и константа пада централне брзине нису исте као у делу млаза формираном уз плафон.

Струјање значајно може бити ометано а правац млаза измењен због различитих препрека које су део реалног простора, као што су нпр. плафонске греде и каскаде. У зависности од њихових димензија и растојања од излазног отвора, припојени млаз може променити правац струјања и одвојити се од површине уз коју струји, при чему се евентуално поново може прилепити на неком растојању низструјно од баријере, али и заузети неки угао и потпуно се одвојити, или пак оваква препрека готово да неће имати утицај на карактеристике млаза (Holmes и Sachariewicz, 1973; Regenscheit, 1975). Awbi (1991) и P. V. Nielsen, Hebu и Moller-Jensen (2006) наводе преглед истраживања утицаја намештаја и других сличних препрека у просторији.

Извори топлоте попут различитих електричних и електронских уређаја, грејна тела и кухињски елементи у просторији, велике стаклене површине и слично такође могу имати прилично велики утицај на формирање струјања (Heiselberg, 1994; Murakami, Kato и Nakagawa, 1991).

3.5 Међусобна интеракција млазева

Осим што димензије просторије, те различите физичке препреке могу имати значајан утицај на формирање и кретање струје ваздуха у млазу, пажњу итекако треба посветити и међусобној интеракцији млазева што представља веома чест случај у пракси. Готово

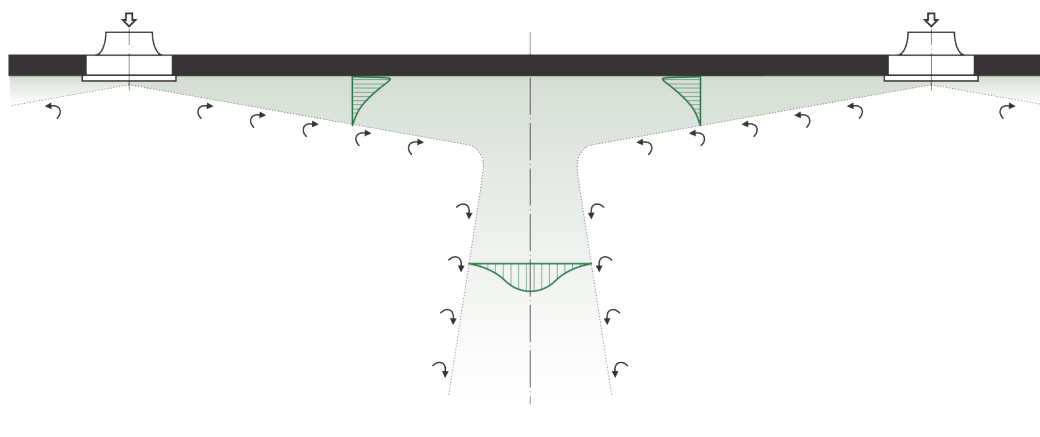


Слика 3.15. Интеракција паралелних млазева истог смера на блиском растојању

увек, ваздух се доводи у просторију кроз већи број отвора, при чему се, у зависности од њихове геометрије и распореда формирају у извесној мери реактивни млазеви, што у појединим случајевима може довести до потпуно другачије расподеле струјања од очекиваног.

Код паралелних млазева који иструјавају из отвора у истој равни (решетке и ваздушне млазнице постављене у низу и сл.), при њиховом довољно малом међусобном растојању, индукција ваздушне масе са стране суседног млаза је ограничена. У овој зони долази до стварања потпритиска и повратног струјања услед формирања макрортлога што доводи до промене путање млазева и њиховог скретања, да би се они на крају спојили у јединствен млаз (Elbanna, Gahin и Rashed, 1983; Lin и Sheu, 1991; Marsters, 1977), слика 3.15. У развоју млаза разликују се три области: конвергентна зона, зона спајања и комбинована зона. Уз претпоставку да су отвори и протоци ваздуха једнаки, оваква два млаза приближавају се равни симетрије са повећањем растојања од равни отвора и спајају се на крају конвергентне области у тачки на симетралној равни у којој је брзина једнака нули. Аксијалне средње брзине имају позитиван смер низструјно од тачке почетка спајања, а брзина у оси симетрије такође расте и достиже максимум у тачки у којој се два млаза потпуно спајају и надаље се понашају као јединствен млаз. Shepelev (1978) наводи изразе за расподелу брзине у оваквом млазу уз претпоставку да је момент количине кретања у попречном пресеку резултујућег млаза једнак збиру момената одвојених интерактивних млазева кроз исти попречни пресек.

Када је реч о овој теми, вероватно најзаступљенији случај у пракси је судар два припојена млаза са супротним смеровима струјања. Оваква ситуација јавља се углавном када је довод ваздуха изведен са плафонским елементима који убацују ваздух тангенцијално под плафон (линијски дифузори, вртложни дифузори, анемостати), слика 3.16, или са решеткама или млазницама на наспрамним зидовима. У зони интеракције у описаном случају брзина нагло опада, док притисак расте, након чега се формира јединствен млаз



Слика 3.16. Интеракција супротних припојених млазева

са струјањем усмереним на доле, директно ка зони боравка. Ако се претпостави да су протоци, а самим тим и карактеристичне брзине у првобитним наспрамним млазевима једнаки, односно да су приљубљени млазеви радијално симетрични, експанзија новонасталог млаза ће бити симетрична у односу на вертикалну раван судара. Код интеракције два раванска млаза, у пресеку ове равни и равни плафона брзина ваздуха има нулту вредност, а пораст централне, односно максималне брзине с вертикалним удаљавањем приближно је линеарна и на неком растојању достиже максимум. Надаље, својства млаза у спојеном струјању углавном се одликују правилима која важе за слободан млаз, с тим да је угао ширења више него двоструко већи него у слободном млазу. Grimitlin (1994) наводи изразе за одређивање брзине у спојеном млазу, а на основу графички датих зависности одговарајућих коефицијената може се закључити да мања релативна удаљеност између излазних отвора и геометријског места тачака интеракције млазева резултира мањим брзинама ваздуха у комбинованом млазу. У свом експерименталном истраживању интеракције супротних радијалних припојених млазева, Gilbert (1989) закључује да након интеракције спојени млаз има структуру радијалног млаза, међутим он не представља директан наставак на појединачни млаз који струји уз плафон, а раван спајања није савршено стабилна, већ осцилује око средишта између два отвора. Радијални млаз са нестабилном равни спајања такође ће бити резултат интеракције два осносиметрична млаза, што су у свом раду потврдили Liu, Higuchi, Arens и Zhang (2009).

Такође су спроведена и истраживања међудејства млазева у неким случајевима који се ређе појављују у пракси, као што су нпр. коаксијални млазеви (Zhivov, 1985), или млазеви који се сударају под углом (Zhivov, 1982).

„Као и сваки млад човек, ја сам имао и имам пуно планова, идеја, замишљања, идеала. Човек се маша за хиљаду ствари, па од хиљаду може бити само једна добра, а од хиљаду добрих само једна остварљива. Гонећи се за тим остварењем, мој је живот био непрестано трептање између агоније неуспеха и блаженства успеха... У свим тим тренуцима успеха и неуспеха, вазда ме је крепила нада да ће мој рад бити од користи за Српство, за мој мили народ, у коме сам рођен.“

Никола Тесла
у Београду, 2. јуна 1892.
на банкету у кафани Смутековац

4

НУМЕРИЧКЕ АНАЛИЗЕ

4.1 Општи параметри

4.1.1 Полазне претпоставке

Нумеричка истраживања која су приказана у овом раду имају за циљ квалитативан и квантитативан опис и предикцију струјања ваздушног млаза на излазу из дистрибутивних елемената који се користе у механичким ваздушним системи, а све у зависности од њихове геометрије и положаја подесивих елемената. Све анализе струјања посматране су за стационарне услове и случај када је температура примарног ваздуха у млазу једнака амбијенталној, односно као изотермне. Претпоставља се да је густина ваздуха непромењена, односно да је струјање нестишљиво, што одговара релативно малим брзинама и променама притиска у оквиру струјног простора. Такође се претпоставља да је поље брзине на улазном попречном пресеку посматраног струјног домена униформно и да су вектори брзине ваздуха нормални у односу на ту раван, као и да је простор у који млаз иструјава бесконачан те да нема никаквих физичких препрека које би ометале слободно струјање, нити постоји интеракција са другим млазом.

4.1.2 Формирање модела и прорачунске мреже

Релативно сложене геометрије модела припремљене су помоћу програма SOLIDWORKS 2017, а дискретизација струјног простора извршена је коришћењем софтверског алата ICEM CFD. За нумеричко решавање постављених математичких модела користи се метода коначних запремина, а тачност нумеричких апроксимација условљена је густином прорачунске мреже, као и начином дискретизације простора. Императив је да грешке

које неизбежно настају као последица просторне и нумеричке дискретизације буду сведене на минимум. Јасно је да боље дискретизован простор доводи до бољих нумеричких резултата, будући да грешка нумеричког решења тежи ка нули када број дискретних тачака тежи ка бесконачности. Са друге стране, економичност прорачуна због лимитираности рачунарских капацитета и ефекти који произилазе од формирања прорачунске мреже на предмет истраживања условили су одабир технике којом је он подељен на велики број контролних запремина. Генерално се састоји од улазног канала са елементима за дистрибуцију ваздуха који је као геометријски сложено подручје дискретизован неструктурираном мрежом, и просторије у којој се генерише млаз и у којој је структурирана мрежа. Максималне димензије контролних запремина ограничене су на 25 mm и смањене су у областима где су очекивани највећи градијенти разматраних величина до минималних 1 mm са фактором раста 1,2.

4.1.3 Гранични услови и параметри прорачуна

Да би систем диференцијалних једначина уз одговарајући турбулентни модел имао једнозначно решење потребно је дефинисати и граничне услове. Са физичког становишта примењени су следећи гранични услови: улазна граница, излазна граница и непропусна граница. За дефинисање улазне границе изабрана је опција *velocity inlet*, док су излазне границе, односно површине кроз које ваздух напушта подручје прорачуна означена као *outflow* имајући у виду да параметри тока у овим областима нису познати, што подразумева нулти дифузиони флуks за све променљиве струјања и укупну корекцију биланса масе. Све остале површине означене су као *wall*. Интензитет турбуленције у почетном пресеку задат је на основу израза за потпуно развијени турбулентни профил брзине у каналу изведен из емпиријске корелације за струјање у цевима (ANSYS, 2009):

$$I_c = 0,16 (\text{Re}_{D_H})^{-1/8}, \quad (4.1)$$

где је Re_{D_H} Рејнолдсов број сведен на хидраулички пречник улазног канала. На излазним пресецима вредност интензитета турбуленције подешена је на 0,5 што искуствено одговара флуиду са релативно малом брзином струјања. Динамичка вискозност и густина ваздуха у струјном домену узете су за референтну температуру $T_{ref} = 293,15 \text{ K}$ и износе

$$\mu = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ kg/(ms)}, \quad \rho = 1,2 \text{ kg/m}^3. \quad (4.2)$$

За прорачун је коришћен описани стандардни $k - \varepsilon$ турбулентни модел са константама

$$\sigma_k = 1,00, \quad \sigma_\varepsilon = 1,30, \quad C_\mu = 0,09, \quad C_{\varepsilon_1} = 1,44, \quad C_{\varepsilon_2} = 1,92, \quad (4.3)$$

а добијање поља брзине и поља притиска извршено је по SIMPLE алгоритму (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) који у основи решава једначине корекције притиска, те на основу добијених резултата коригује брзину и притисак на страницама коначних запремина, односно масени проток кроз странице коначних запремина и компоненте брзине у главним чворовима. Фактори подрелаксације задржани су на својим препорученим вредностима које износе:

- притисак: 0,3
- момент: 1,0
- кинетичка енергија турбуленције: 0,8
- дисипација кинетичке енергије турбуленције: 0,8

Осим у случају повећања густине прорачунске мреже, тачност нумеричких резултата расте и са повећањем реда тачности нумеричке шеме, па је с тим у вези примењена линеарна узводна шема вишег реда (*Second Order Upwind Method*). Решавање моделираних диференцијалних једначина извршено је у програмском пакету ANSYS Fluent 15.0. Имајући у виду да решавање нелинеарних проблема захтева итеративни нумерички поступак, потребно је утановити критеријум његовог окончања. Итеративни процес се сматра завршеним када је грешка мања од задате вредности, а достизање стационарних услова врши се помоћу критеријума конвергенције. У свим случајевима у овом истраживању дефинисана је тзв. rms-вредност остатка од 10^{-5} или је извршено минимум 20000 итерација.

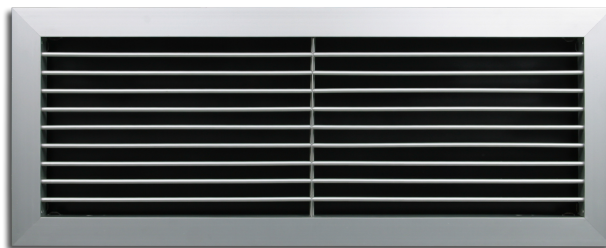
Дуготрајним нумеричким експериментима добијени су обимни подаци за изабране случајеве при чему су приказани они параметри који су од практичног значаја за одређивање расподеле ваздуха у простору.

4.2 Утицај регулатора протока са супротносмерним лопатицама на карактеристике млаза код вентилационих решетки

4.2.1 Опис проблема

При генерисању млаза на вентилационим решеткама разматран је утицај различитог степена отворености регулатора протока на пад централне брзине и ширење млаза као фактора који се у реалним условима не узима у обзир. Ефекат различитог степена отворености демпера на карактеристике формираног млаза огледа се пре свега кроз изражен негативан ефекат повећане неравномерности расподеле брзине на улазном грлу решетке. У овом случају анализирана је решетка са хоризонталним, појединачно подесивим, недивергираним ламелама у кораку 20 mm, слика 4.1, у комбинацији са регулатором протока са супротносмерним лопатицама, слика 4.2.

Анализе су извршене у случају регулатора протока са вертикалним, супротносмерним лопатицама распоређеним у кораку 50 mm, и то за угао подешености 0° , 15° , 30° и 45° , при чему 0° одговара потпуно отвореном демперу. Величина грла решетке у испитиваном случају је 400×200 mm чему одговара слободна, односно ефективна површина од $0,0603 \text{ m}^2$. Димензије улазног канала су према томе 420×220 mm, дужине 500 mm а разматрања су изведена за протоке ваздуха 400, 550, 700 и $850 \text{ m}^3/\text{h}$. Изглед модела приказан је на слици 4.3 а одговарајуће величине струјања дате су у табели 4.1.



Слика 4.1. Вентилациона решетка са хоризонталним, појединачно подесивим ламелама

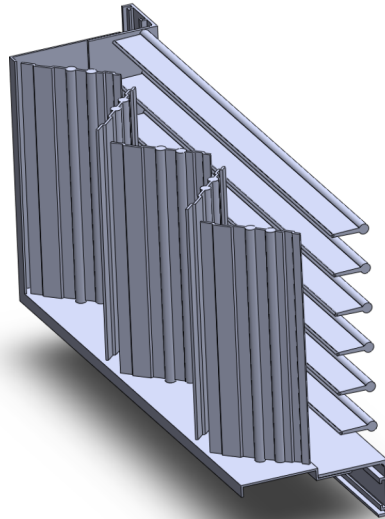
Димензије прорачунског домена просторије у вертикалном пресеку нормалном на правац струјања су 4×4 m, док је дужина 10 m. Координатни систем усвојен је као на слици 4.4. Укупан број ћелија, у зависности од посматраног случаја, варира у уским границама око 13650000 (приближно 5800000 тачака), док је сама просторија дискретизована са 3900000 ћелија (3978601 тачака) облика правоуглог хексаедра. Димензије ових полиедара су најмање у близини иструјног отвора и повећавају се ка ивицама просторије. Граница просторије која се налази у равни отвора дефинисана је као непропусна (*wall*), а све остале њене границе идентификоване су као слободне (*outflow*).

4.2.2 Резултати нумеричког прорачуна

Нумеричким резултатима обухваћени су подаци о максималној брзини млаза у зависности од хоризонталног растојања x од равни иструјног отвора. Такође су дефинисане границе млаза, при чему је као критеријум за њихово одређивање узето геометријско место тачака у којима је компонента брзине у главном смеру струјања једнака $0,05$ m/s. Осим тога, значајно је познавати и област у млазу где су брзине мање од $0,2$ m/s. Дата је расподела брзине у карактеристичним пресецима, а такође су упоредно представљене и границе млаза са углом ширења за разматране случајеве, као и геометријско место тачака у којима је брзина $0,2$ m/s. Извршена је анализа и поређење наведених вредности у оквиру разматраних утицаја.



Слика 4.2. Регулатор протока са супротносмерним лопатицама



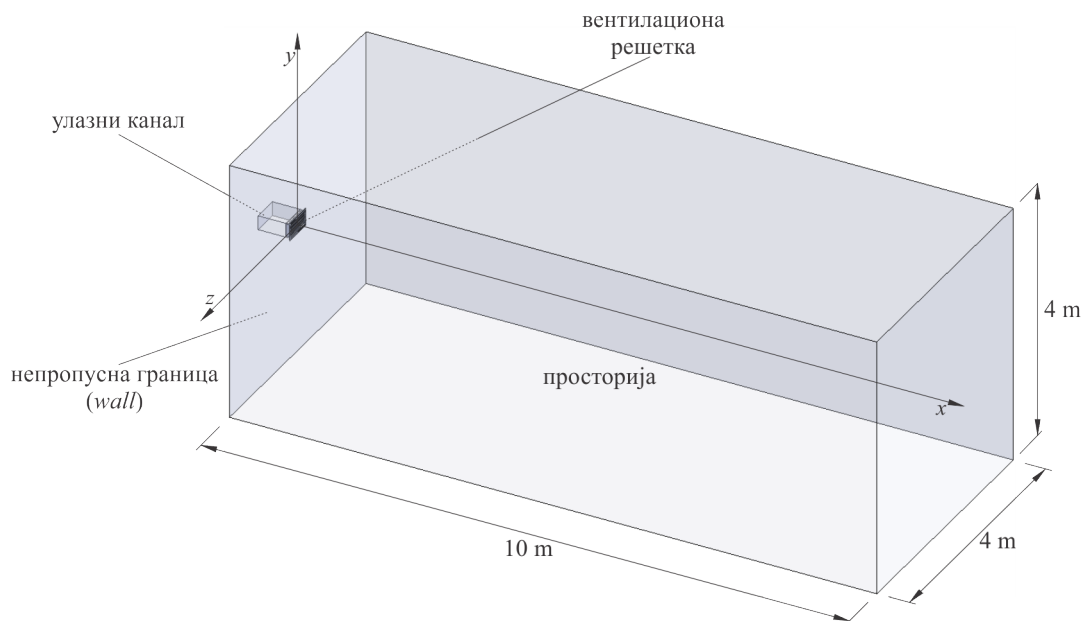
Слика 4.3. Модел решетке са регулатором протока - пресек

ТАБЕЛА 4.1. Величине струјања за различите протоке ваздуха

Проток ваздуха \dot{V} [m ³ /h]	400	550	700	850
\bar{v}_k [m/s]	1,20	1,65	2,10	2,56
\bar{v}_{ef} [m/s]	1,84	2,53	3,22	3,91

\bar{v}_k [m/s] - осредњена брзина у улазном каналу

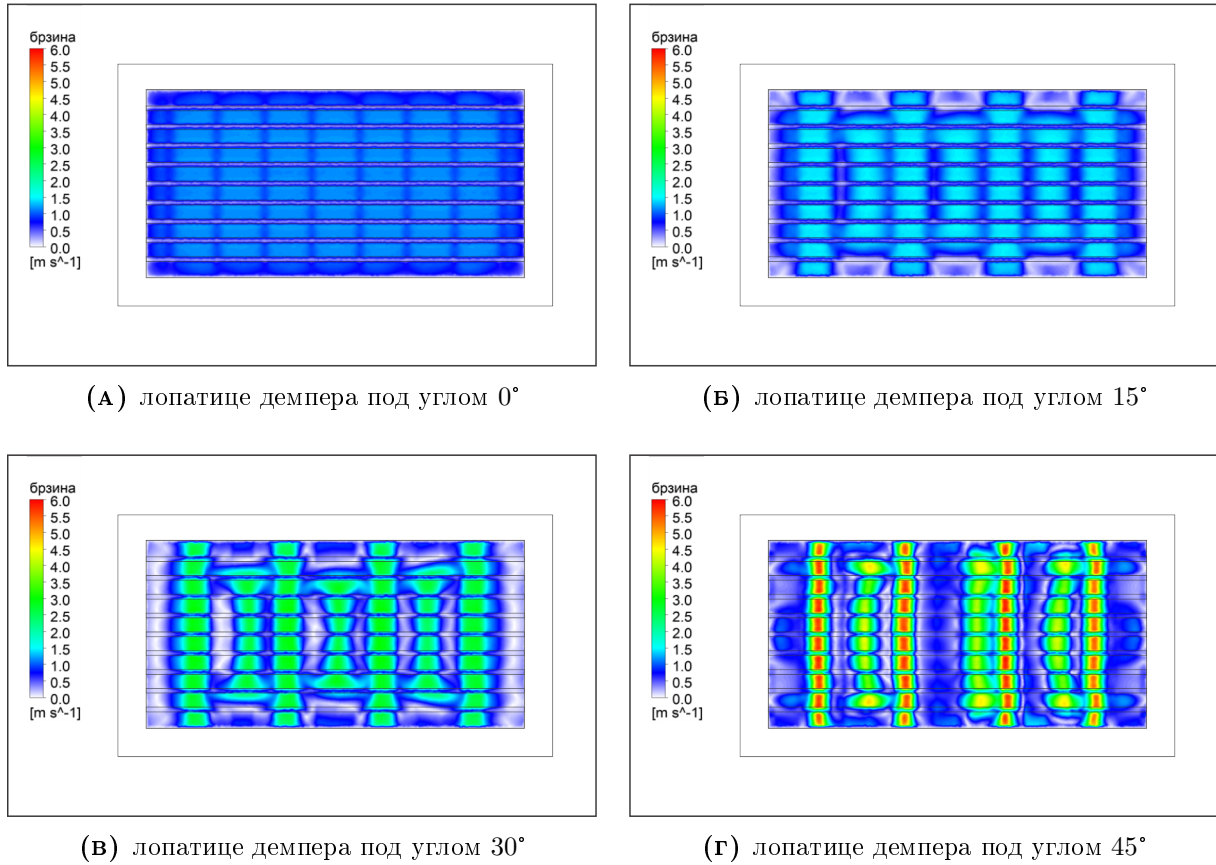
\bar{v}_{ef} [m/s] - осредњена иструјна брзина



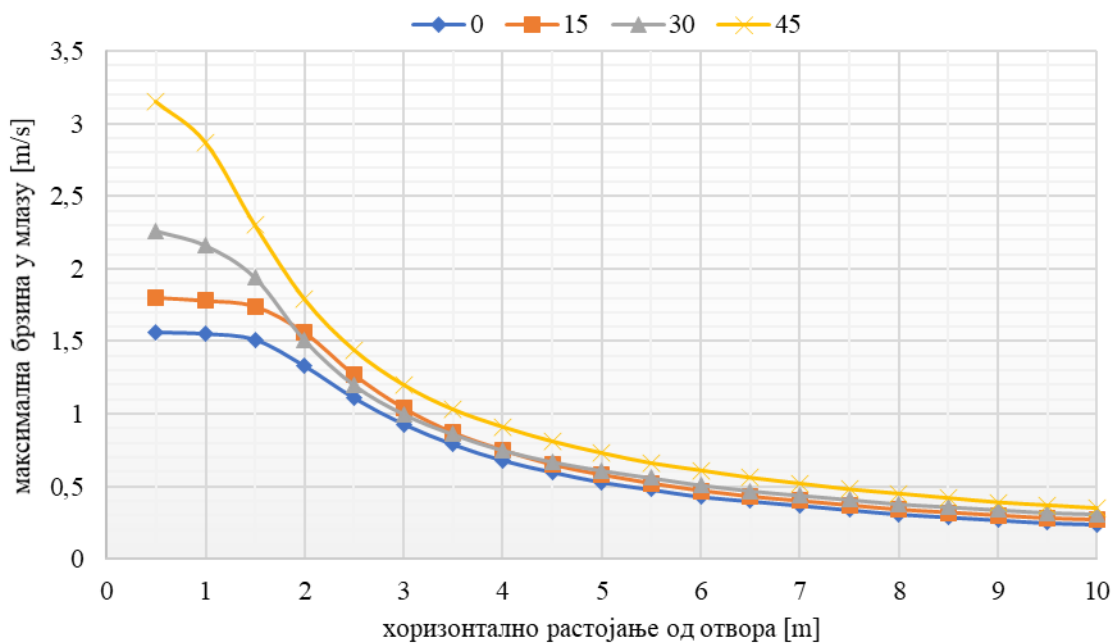
Слика 4.4. Прорачунски домен при анализи експанзије млаза на вентилационим решеткама

ТАБЕЛА 4.2. Нумеричке вредности максималних брзина млаза у зависности од степена отворености демпера за раз-
личите протоке ваздуха

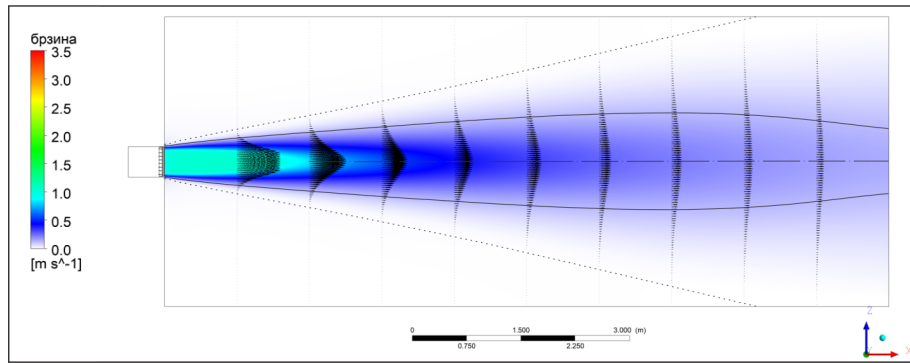
распојање x [m]	$\dot{V} = 400 \text{ m}^3/\text{h}$				$\dot{V} = 550 \text{ m}^3/\text{h}$				$\dot{V} = 700 \text{ m}^3/\text{h}$				$\dot{V} = 850 \text{ m}^3/\text{h}$			
	0°	15°	30°	45°	0°	15°	30°	45°	0°	15°	30°	45°	0°	15°	30°	45°
0,5	1,56	1,80	2,26	3,15	2,15	2,51	3,21	4,26	2,75	3,23	4,16	5,58	3,35	3,95	5,03	6,75
1,0	1,55	1,78	2,16	2,87	2,13	2,47	3,02	3,77	2,71	3,17	3,90	5,02	3,30	3,88	4,75	6,09
1,5	1,51	1,74	1,94	2,30	2,08	2,44	2,72	3,22	2,66	3,15	3,50	4,15	3,25	3,86	4,26	4,98
2,0	1,33	1,56	1,51	1,79	1,83	2,21	2,09	2,52	2,35	2,86	2,67	3,24	2,88	3,52	3,24	3,88
2,5	1,11	1,27	1,20	1,44	1,53	1,78	1,66	2,05	1,96	2,31	2,17	2,60	2,41	2,84	2,56	3,09
3,0	0,93	1,04	1,00	1,20	1,28	1,46	1,38	1,71	1,63	1,88	1,76	2,19	2,00	2,30	2,12	2,57
3,5	0,79	0,87	0,86	1,03	1,09	1,22	1,18	1,47	1,38	1,57	1,51	1,90	1,70	1,92	1,82	2,20
4,0	0,68	0,75	0,75	0,91	0,94	1,04	1,04	1,28	1,19	1,34	1,33	1,69	1,46	1,64	1,60	1,90
4,5	0,60	0,65	0,67	0,81	0,82	0,91	0,93	1,15	1,04	1,17	1,19	1,51	1,28	1,43	1,43	1,71
5,0	0,53	0,58	0,61	0,73	0,73	0,81	0,84	1,03	0,93	1,04	1,07	1,36	1,14	1,27	1,30	1,56
5,5	0,48	0,52	0,56	0,66	0,66	0,72	0,77	0,93	0,83	0,93	0,98	1,23	1,02	1,14	1,19	1,42
6,0	0,43	0,47	0,51	0,61	0,60	0,66	0,71	0,86	0,76	0,84	0,90	1,13	0,93	1,03	1,09	1,31
6,5	0,40	0,43	0,47	0,56	0,55	0,60	0,65	0,78	0,69	0,77	0,84	1,04	0,85	0,94	1,01	1,21
7,0	0,37	0,40	0,44	0,53	0,50	0,55	0,61	0,72	0,64	0,71	0,78	0,96	0,78	0,87	0,94	1,12
7,5	0,34	0,37	0,41	0,48	0,47	0,51	0,57	0,67	0,59	0,66	0,73	0,89	0,72	0,80	0,88	1,04
8,0	0,31	0,34	0,38	0,45	0,44	0,48	0,53	0,63	0,55	0,61	0,68	0,83	0,67	0,75	0,83	0,97
8,5	0,29	0,32	0,36	0,42	0,41	0,45	0,50	0,59	0,51	0,57	0,64	0,77	0,62	0,70	0,78	0,92
9,0	0,27	0,30	0,34	0,39	0,38	0,42	0,47	0,56	0,48	0,54	0,60	0,73	0,58	0,66	0,74	0,87
9,5	0,25	0,28	0,32	0,37	0,36	0,40	0,45	0,53	0,46	0,51	0,57	0,69	0,55	0,62	0,70	0,82
10,0	0,24	0,27	0,31	0,35	0,34	0,38	0,43	0,51	0,43	0,48	0,55	0,66	0,52	0,59	0,68	0,79



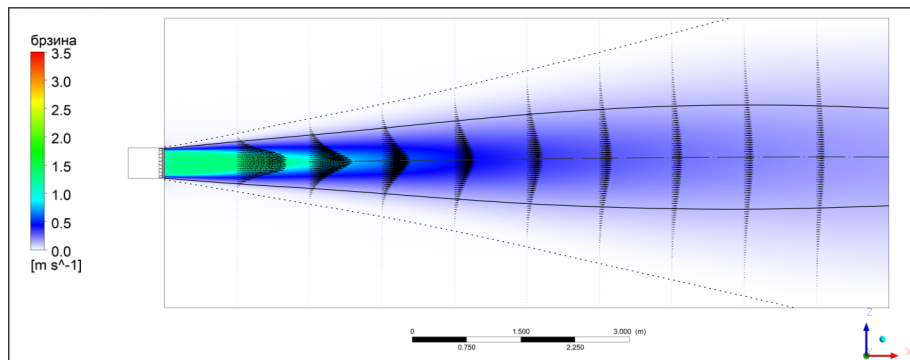
СЛИКА 4.5. Распредела брзине на излазном грлу решетки за различите степене отворености демпера ($\dot{V}=400 \text{ m}^3/\text{h}$)



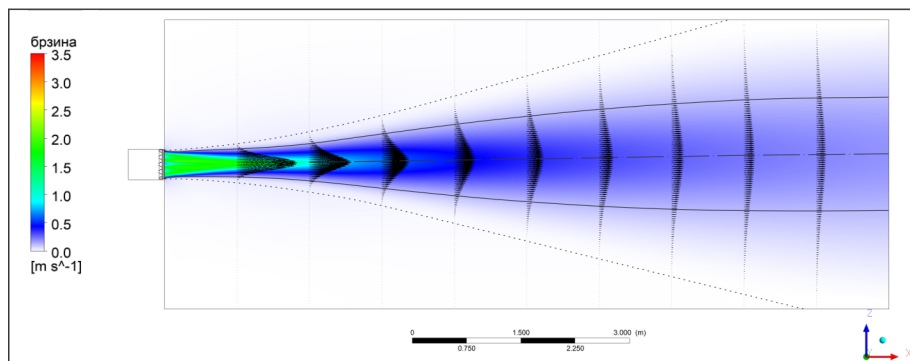
СЛИКА 4.6. Дијаграм зависности максималне брзине млаза од растојања x и степена отворености демпера ($\dot{V}=400 \text{ m}^3/\text{h}$)



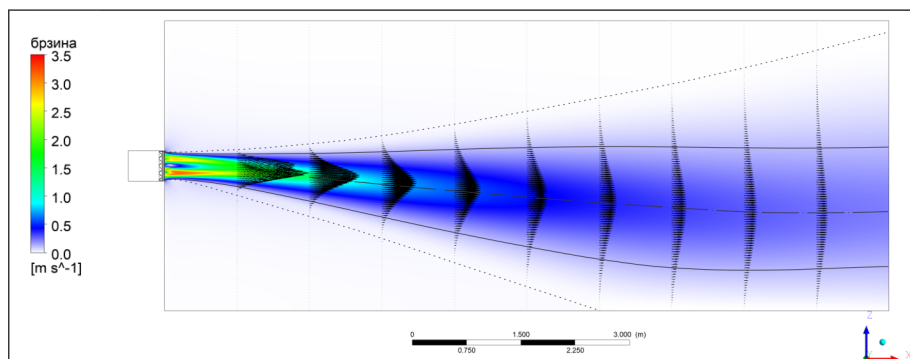
(А) лопатике демпера под углом 0°



(Б) лопатике демпера под углом 15°

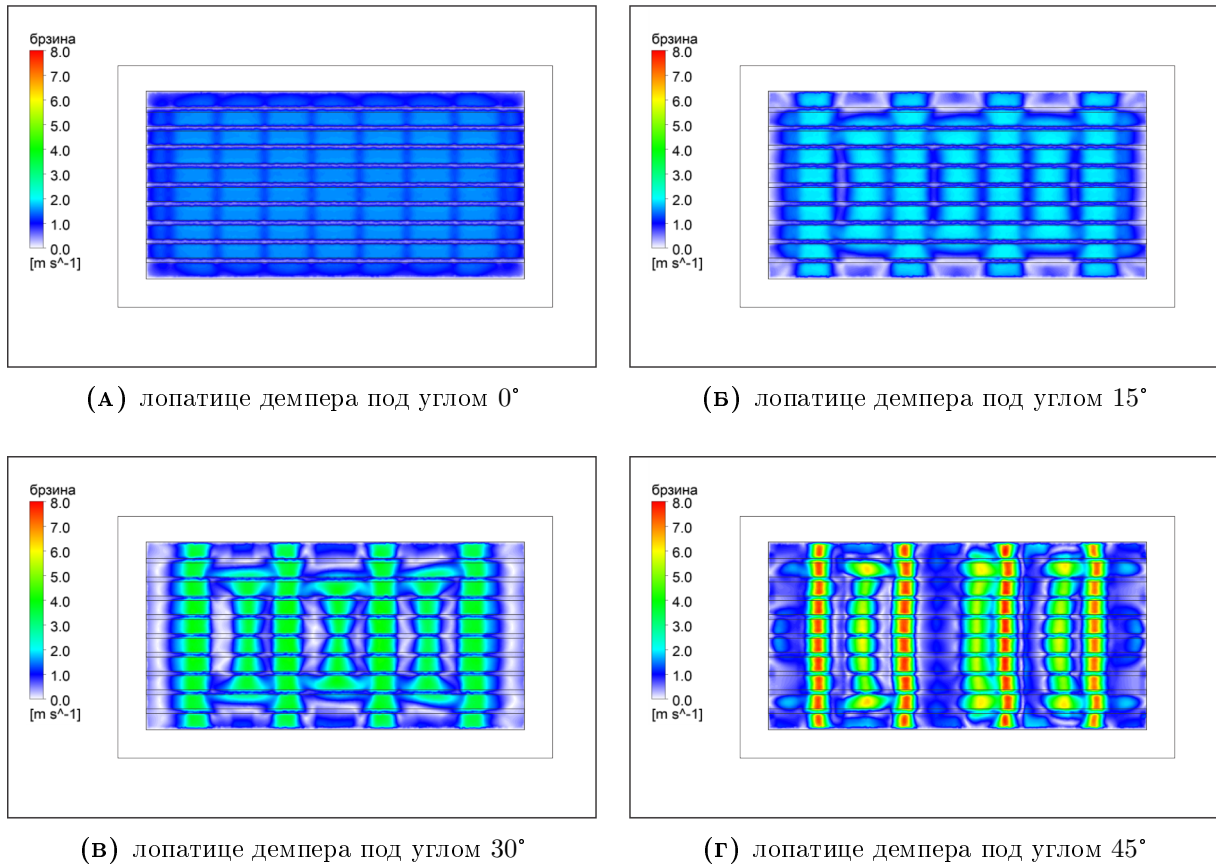


(В) лопатике демпера под углом 30°

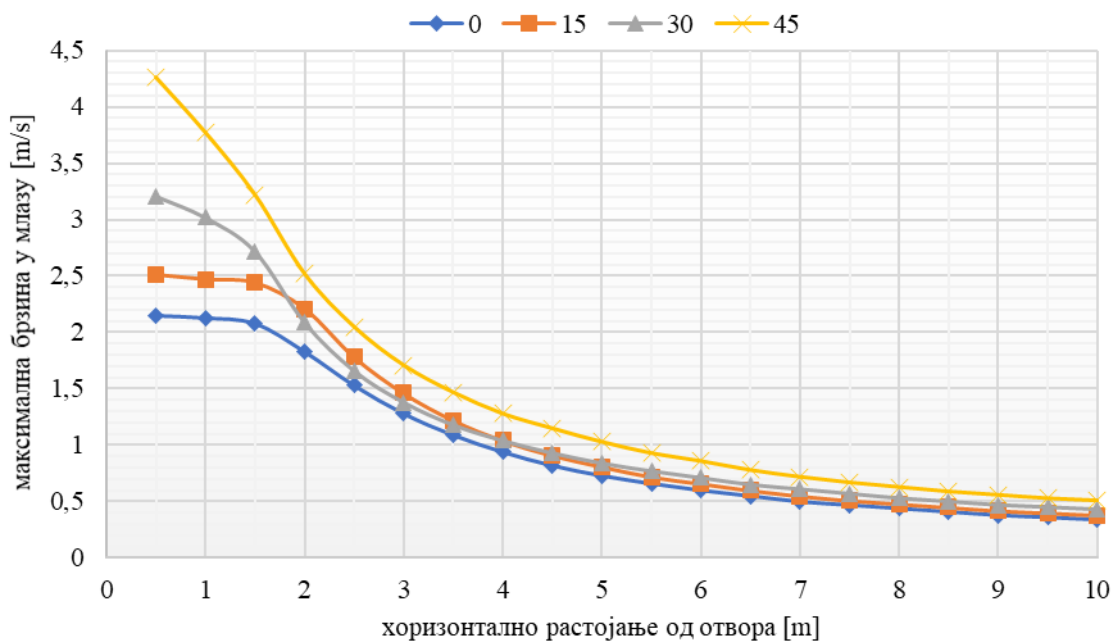


(Г) лопатике демпера под углом 45°

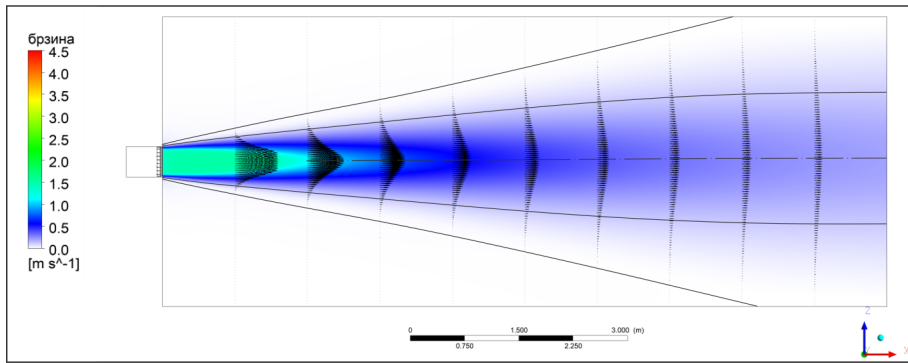
Слика 4.7. Распредела брзине у централној хоризонталној равни за различите степене отворености демпера ($\dot{V}=400 \text{ m}^3/\text{h}$)
 границе млаза; — $\bar{v}_x=0,2 \text{ m/s}$



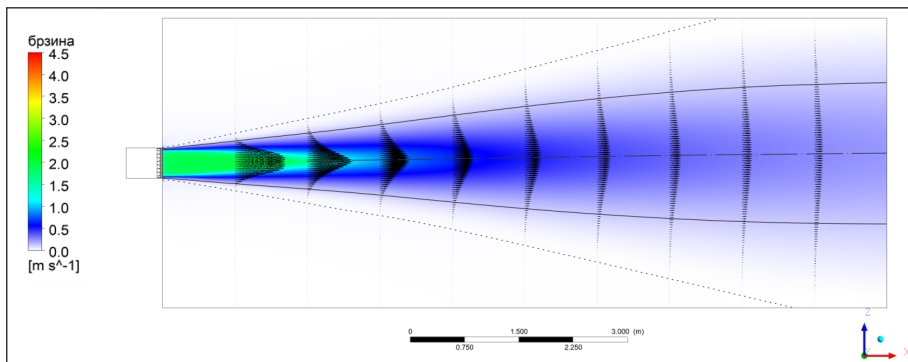
СЛИКА 4.8. Распредела брзине на излазном грлу решетки за различите степене отворености демпера ($\dot{V}=550 \text{ m}^3/\text{h}$)



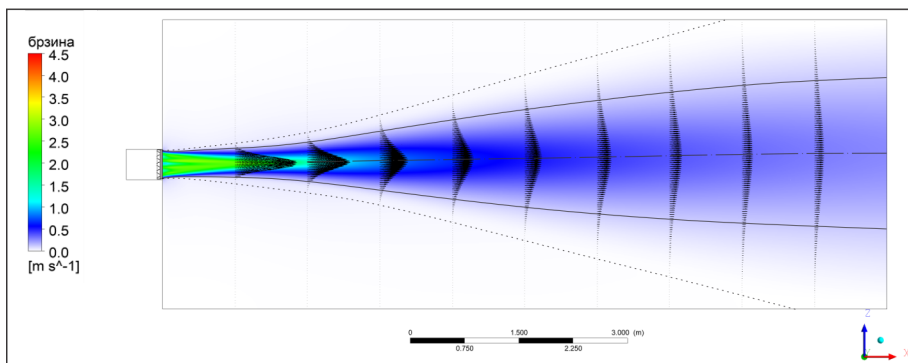
СЛИКА 4.9. Дијаграм зависности максималне брзине млаза од растојања x и степена отворености демпера ($\dot{V}=550 \text{ m}^3/\text{h}$)



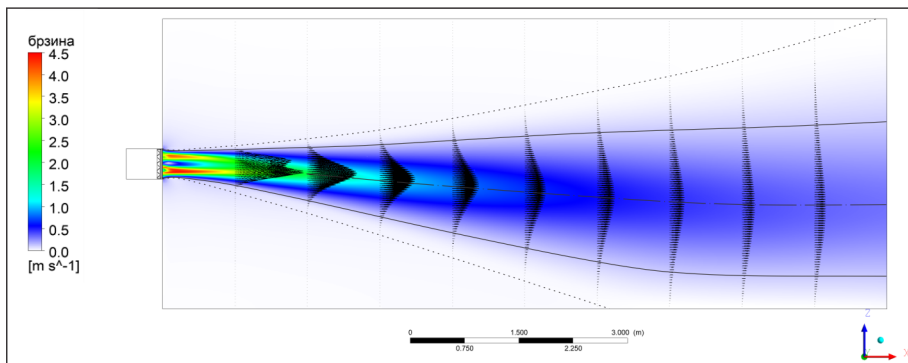
(А) лопатике демпера под углом 0°



(Б) лопатике демпера под углом 15°

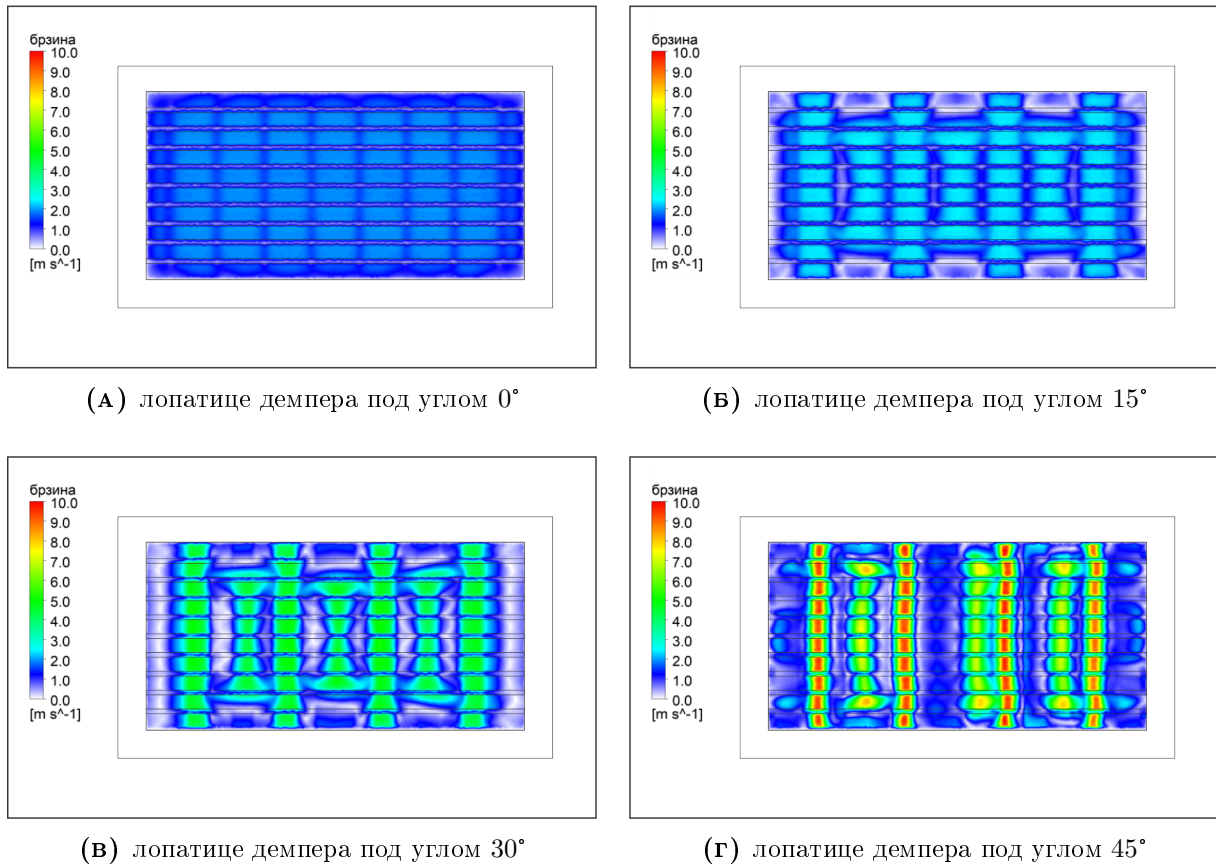


(В) лопатике демпера под углом 30°

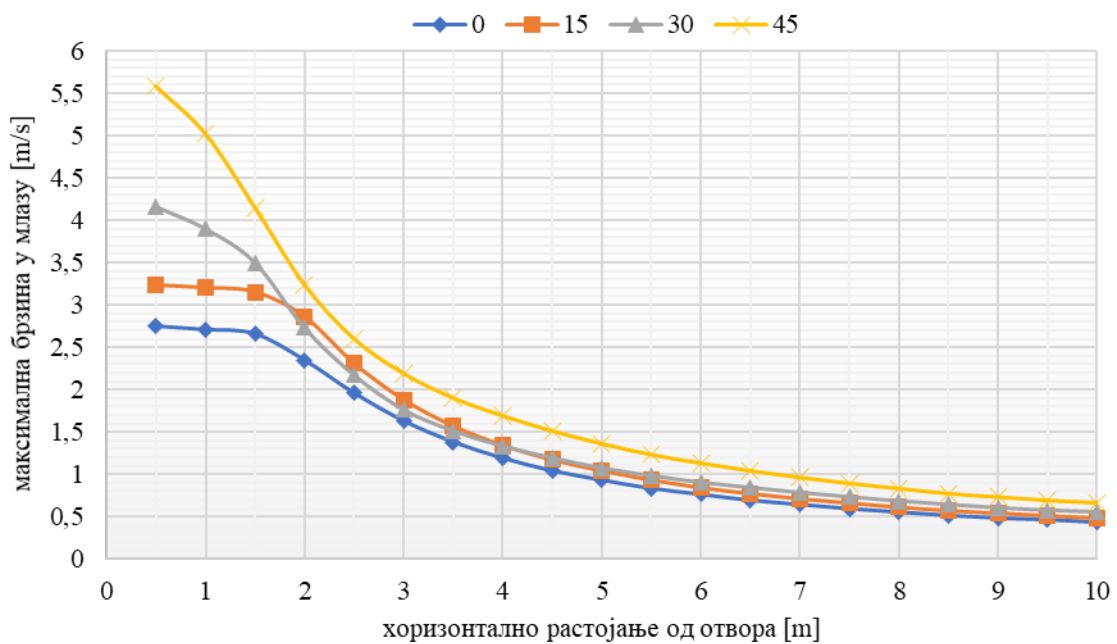


(Г) лопатике демпера под углом 45°

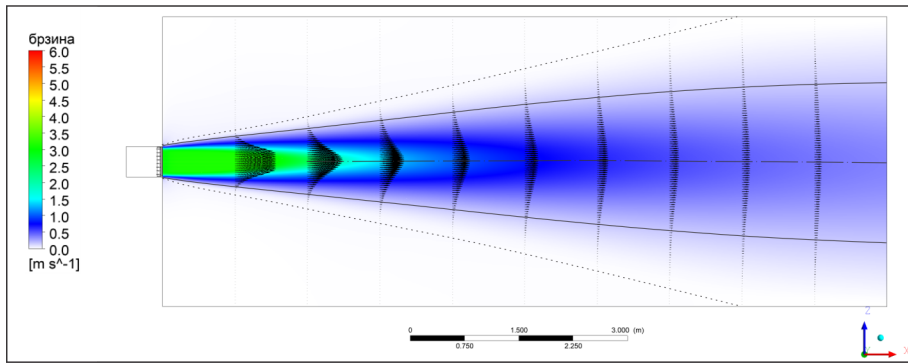
Слика 4.10. Распада брзине у централној хоризонталној равни за различите степене отворености демпера ($\dot{V}=550 \text{ m}^3/\text{h}$)
 границе млаза; — $\bar{v}_x=0,2 \text{ m/s}$



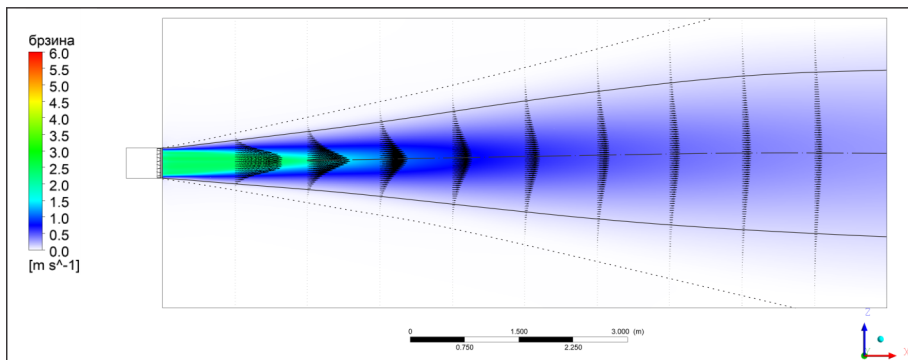
СЛИКА 4.11. Расподела брзине на излазном грлу решетки за различите степене отворености демпера ($\dot{V}=700 \text{ m}^3/\text{h}$)



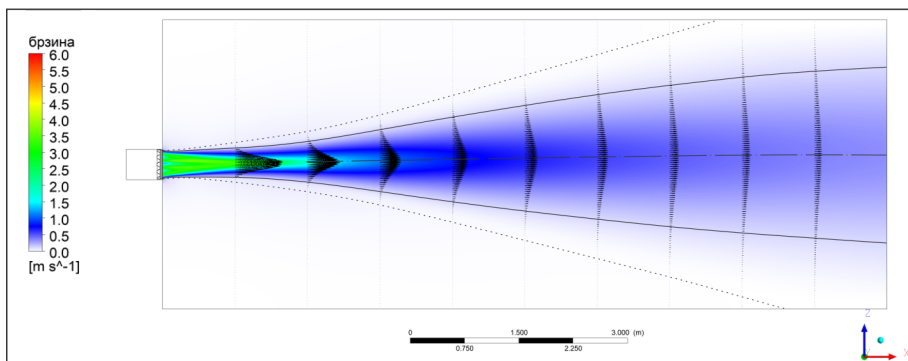
СЛИКА 4.12. Дијаграм зависности максималне брзине млаза од растојања x и степена отворености демпера ($\dot{V}=700 \text{ m}^3/\text{h}$)



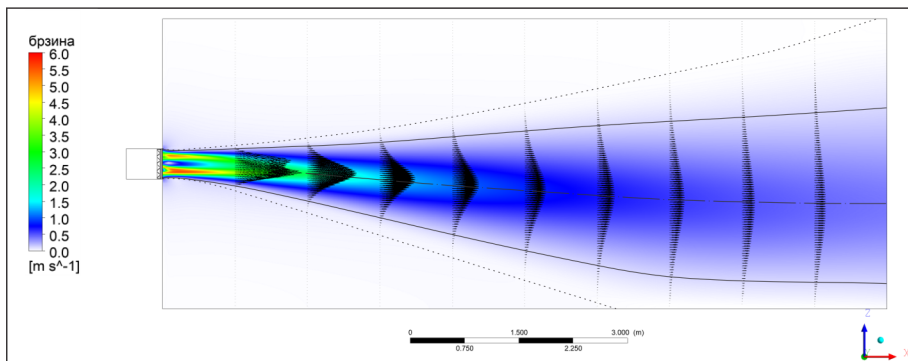
(А) лопатике демпера под углом 0°



(Б) лопатике демпера под углом 15°

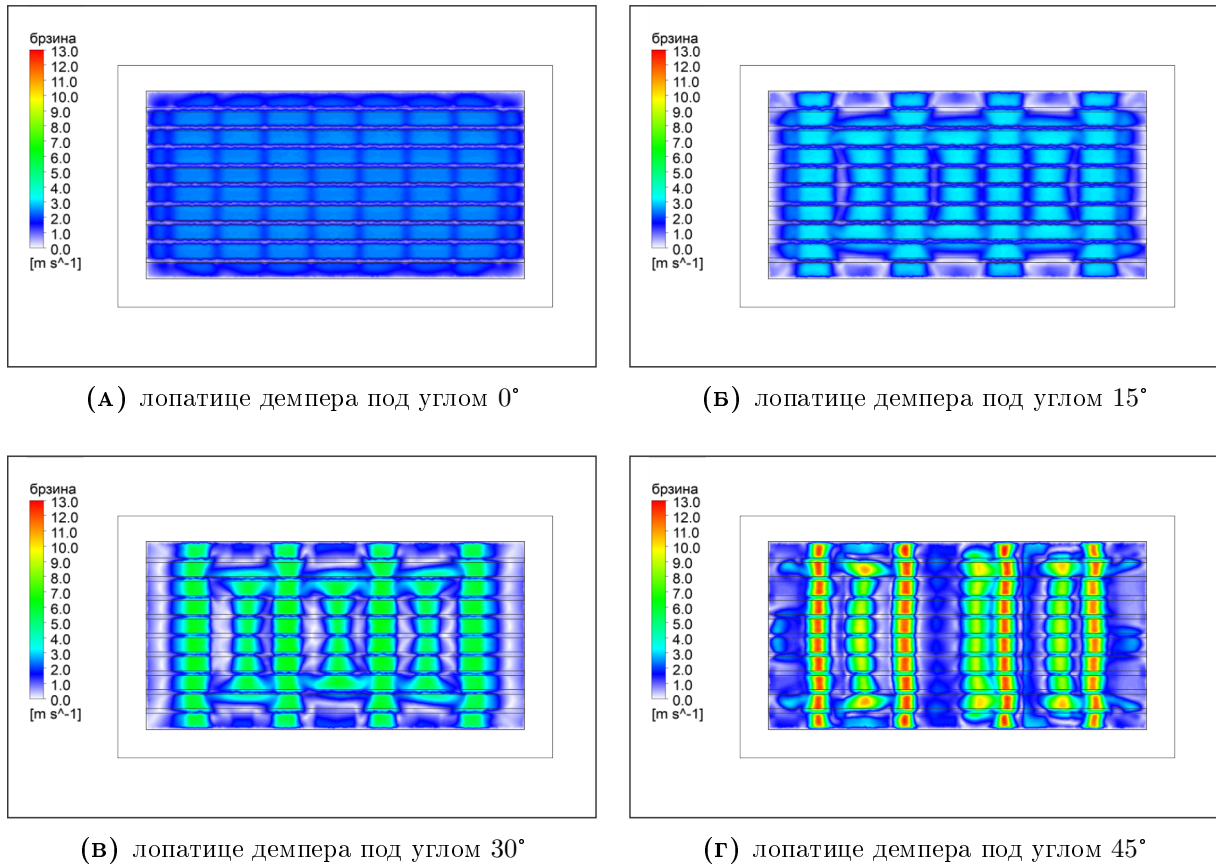


(В) лопатике демпера под углом 30°

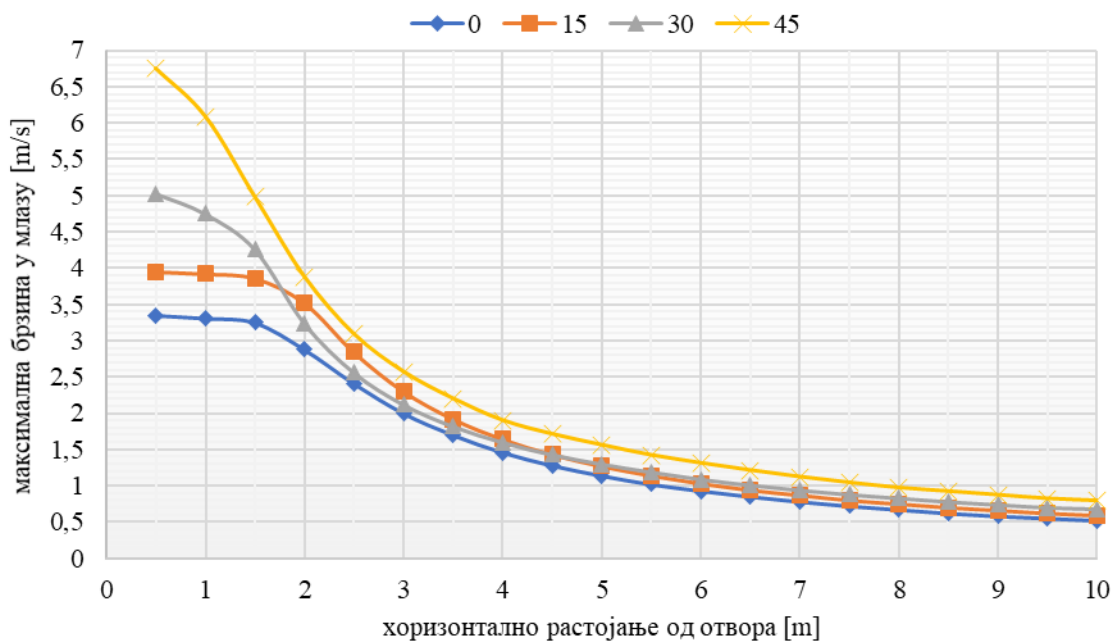


(Г) лопатике демпера под углом 45°

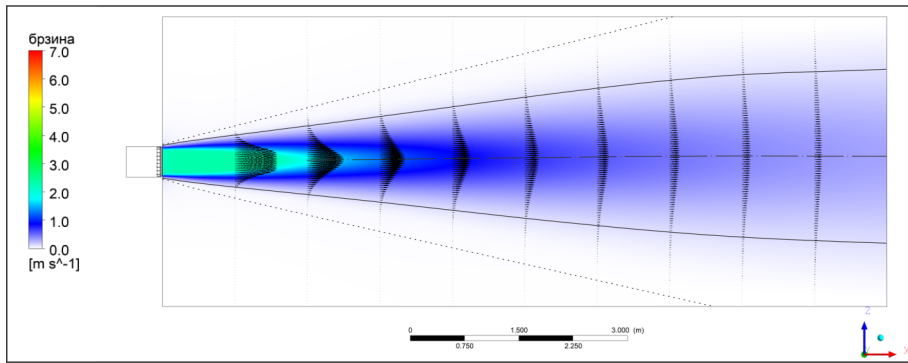
Слика 4.13. Распада брзине у централној хоризонталној равни за различите степене отворености демпера ($\dot{V}=700 \text{ m}^3/\text{h}$)
 границе млаза; — $\bar{v}_x=0,2 \text{ m/s}$



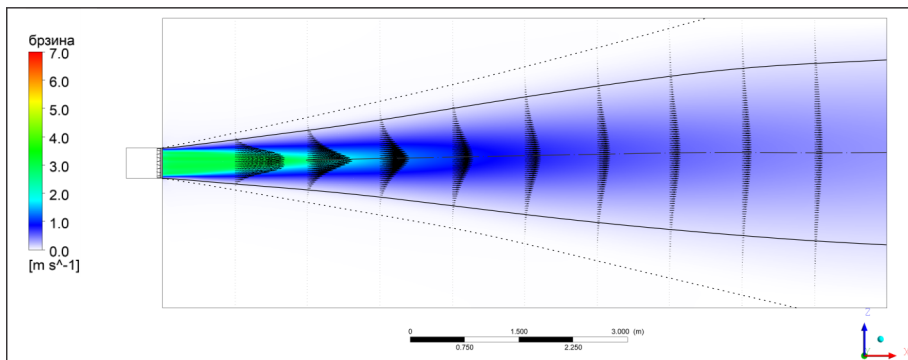
СЛИКА 4.14. Распoдела брзине на излазном грлу решетке за различите степене отворености демпера ($\dot{V}=850 \text{ m}^3/\text{h}$)



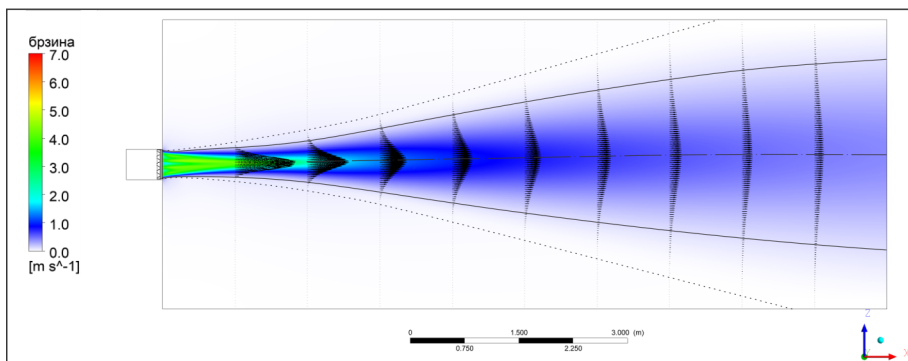
СЛИКА 4.15. Дијаграм зависности максималне брзине млаза од растојања x и степена отворености демпера ($\dot{V}=850 \text{ m}^3/\text{h}$)



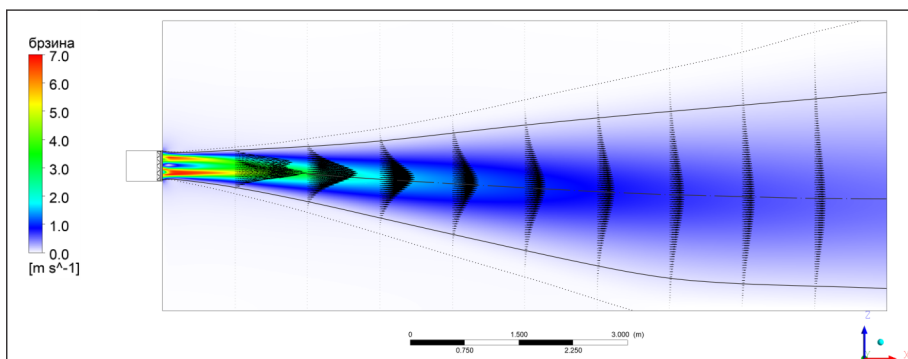
(А) лопатике демпера под углом 0°



(Б) лопатике демпера под углом 15°

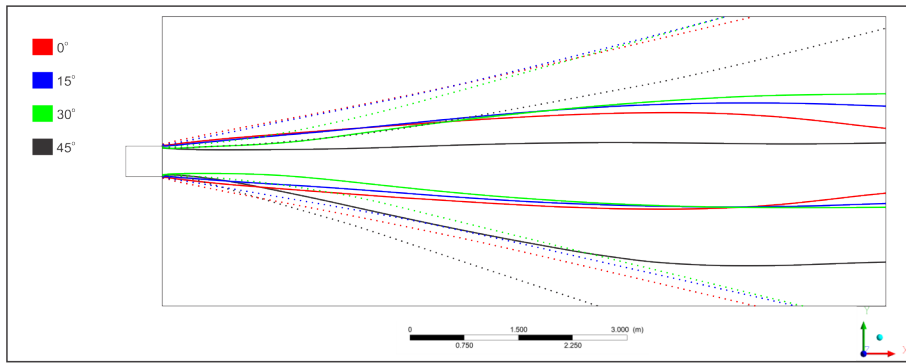


(В) лопатике демпера под углом 30°

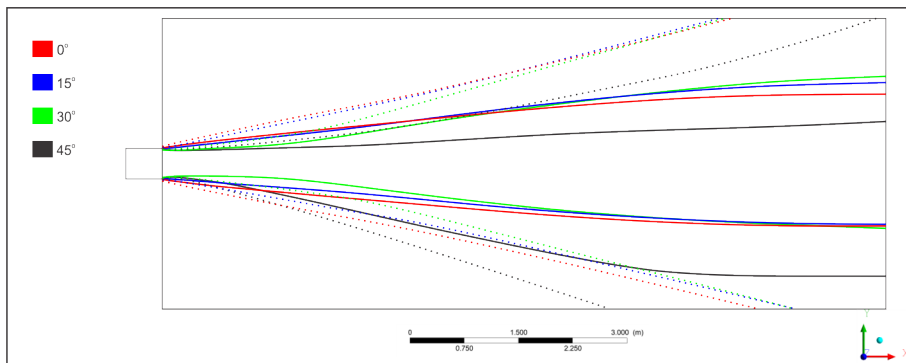


(Г) лопатике демпера под углом 45°

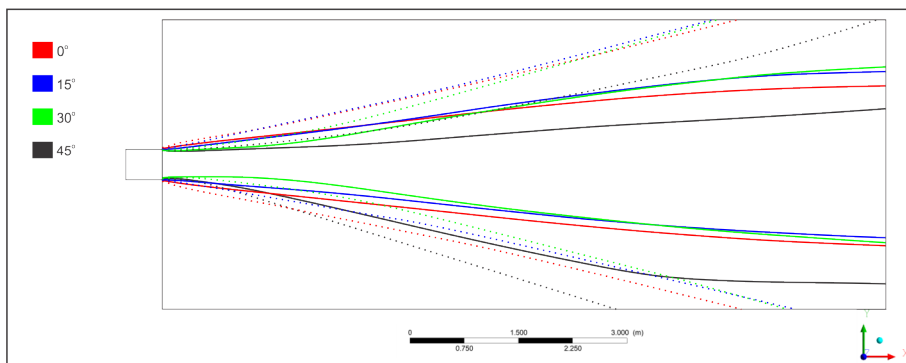
Слика 4.16. Распада брзине у централној хоризонталној равни за различите степене отворености демпера ($\dot{V}=850 \text{ m}^3/\text{h}$)
 границе млаза; — $\bar{v}_x=0,2 \text{ m/s}$



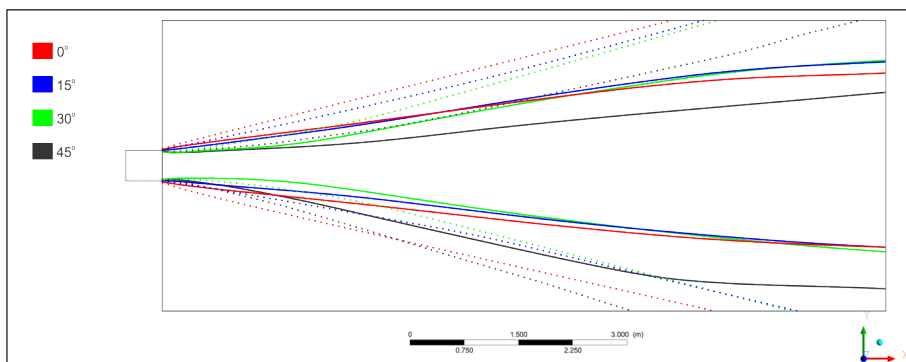
(А) $\dot{V} = 400 \text{ m}^3/\text{h}$



(Б) $\dot{V} = 550 \text{ m}^3/\text{h}$

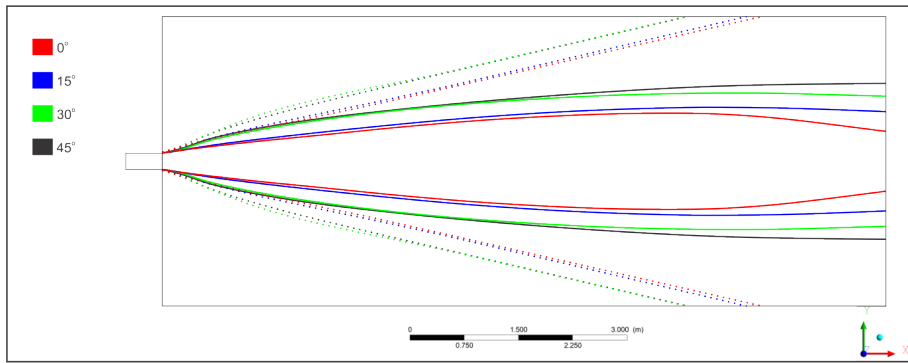


(В) $\dot{V} = 700 \text{ m}^3/\text{h}$

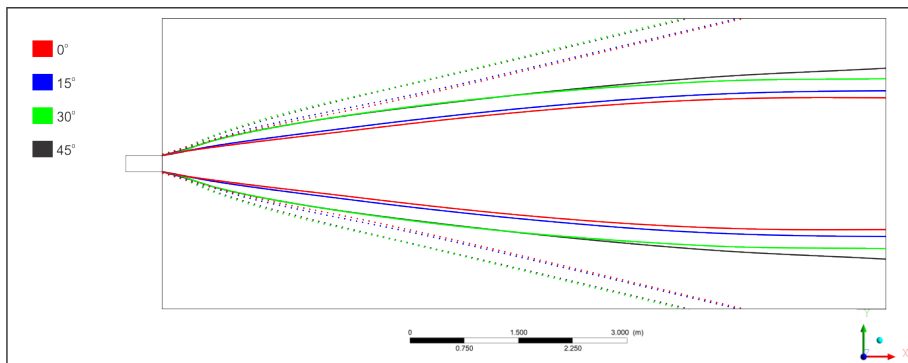


(Г) $\dot{V} = 850 \text{ m}^3/\text{h}$

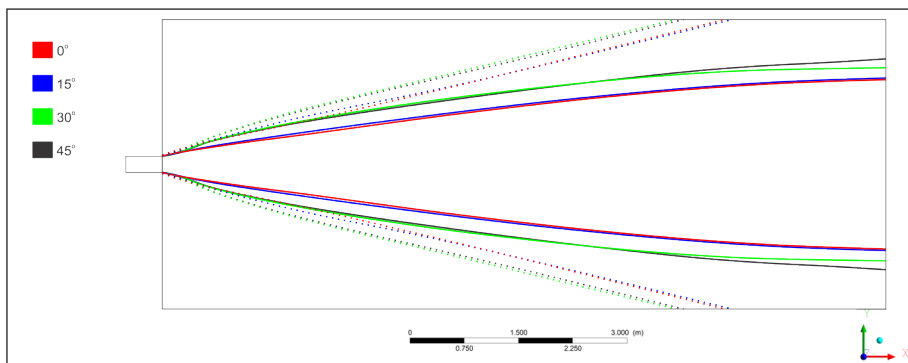
Слика 4.17. Утицај отворености регулатора протока на хоризонтално
ширење млаза при различитим протоцима
..... границе млаза; — $\bar{v}_x=0,2 \text{ m/s}$



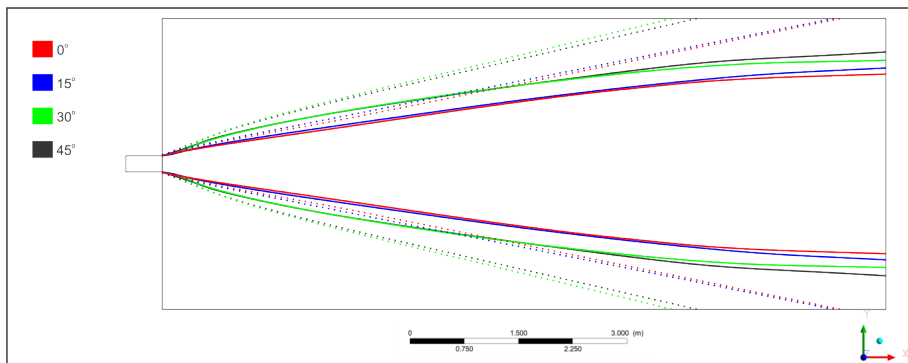
(А) $\dot{V} = 400 \text{ m}^3/\text{h}$



(Б) $\dot{V} = 550 \text{ m}^3/\text{h}$



(В) $\dot{V} = 700 \text{ m}^3/\text{h}$



(Г) $\dot{V} = 850 \text{ m}^3/\text{h}$

Слика 4.18. Утицај отворености регулатора протока на вертикално ширење млаза при различитим протоцима
 границе млаза; — $\bar{v}_x=0,2 \text{ m/s}$

Прорачунске вредности максималне брзине у млазу зависно од хоризонталног растојања x за протоке ваздуха 400, 550, 700 и 850 m³/h при различитом степену отворености регулатора протока наведене су у табели 4.2. Очекивано, због смањења пресека за струјање ваздуха у зони грла решетки, са затварањем регулатора протока долази до све израженије неравномерности расподеле брзине по пресеку, што је приказано на сликама 4.5, 4.8, 4.11 и 4.14, а ово има за последицу појаву драстично веће брзине у почетном делу млаза. Дијаграми зависности пада максималне брзине у млазу у зависности од угла лопатица на регулатору за различите случајеве протока приказани су на сликама 4.6, 4.9, 4.12 и 4.15. Наведено смањење пресека и повећање брзине доводи до слабијег ширења млаза и израженије контракције у хоризонталном правцу која је јасно уочљива на сликама 4.7, 4.10, 4.13 и 4.16 где се види расподела брзине у хоризонталној симетралној равни. Међутим, у почетном делу млаза, брзина слабо опада са повећањем угла лопатица до 15°, док је са даљим затварањем овај пад све интензивнији. Ово се може објаснити значајнијим ширењем млаза у вертикалном правцу, што се види на слици 4.18. Наиме, млаз се овде релативно мало шири када лопатице заузимају угао до 15° у односу на положај који одговара потпуној отворености, док се са даљим повећањем угла до 30° уочава интензивнија разлика у вертикалном ширењу и управо је то разлог због кога се у једном делу млаза максимална брзина смањује при наведеним угловима отворености.

Ипак, од кључног практичног значаја јесу брзине у развијеној зони млаза, а нарочито разлике које ће се појавити у домету. Према наведеним подацима, дијаграмима и сликама, сасвим је јасно да веће брзине које су последица већег пригушења на регулатору дају и веће домете. Имајући у виду релативно мали пад централне брзине са повећањем растојања у потпуно развијеном млазу, као и разлике у максималној брзини на граници домена за различите степене отворености регулатора, може се закључити да ће се појавити и одговарајуће разлике у растојањима где брзина у оси млаза достиже граничну вредност угодности. Ове разлике ће бити утолико веће уколико је изабрана мања вредност те брзине, а такође ће се и повећавати са повећањем протока.

Ширење млаза у вертикалном правцу, због потпуне симетрије геометрије у односу на хоризонталну симетралну раван, има потпуну симетрију, док у хоризонталној равни постоји извесно одступање од осе при већим угловима затворености. Ово може допринети припајању млаза уз зид чиме се остварују сви учинци Coanda ефекта, а осим тога, код распореда решетки у низу може доћи до непланиране интеракције са суседним млазом. Битно је нагласити да покушај апроксимације струјања са углом лопатица на демперу од 60° није дао конвергентно решење, те да су деформације у толикој мери изражене да уопште не долази до образовања јединственог млаза.

4.2.3 Провера квалитета нумеричке мреже

Валидација нумеричке мреже извршена је за случај струјања при углу лопатица регулатора од 45° и протоку 700 m³/h. Број контролних запремина просторије повећан је на 20 милиона, док је укупан број ћелија износио нешто више од 34 милиона. Упоредне

ТАБЕЛА 4.3. Максималне брзине у млазу са стандардном и модификованом мрежом ($\dot{V}=700 \text{ m}^3/\text{h}$)

Растојање $x[\text{m}]$	Макс. брзина у млазу $[\text{m}/\text{s}]$		апсолутна грешка $\bar{v}_{x,stan.} - \bar{v}_{x,mod.}$ $[\text{m}/\text{s}]$	релативна грешка $\frac{ \bar{v}_{x,stan.} - \bar{v}_{x,mod.} }{\bar{v}_{x,stan.}}$
	13,65 милиона контр. зап.	34 милиона контр. зап.		
0,5	5,58	5,51	0,07	0.0125
1,0	5,02	4,95	0,07	0.0139
1,5	4,15	4,08	0,07	0.0169
2,0	3,24	3,17	0,07	0.0216
2,5	2,60	2,54	0,06	0.0274
3,0	2,19	2,13	0,06	0.0274
3,5	1,90	1,85	0,05	0.0263
4,0	1,69	1,64	0,05	0.0296
4,5	1,51	1,47	0,04	0.0265
5,0	1,36	1,32	0,04	0.0294
5,5	1,23	1,19	0,04	0.0325
6,0	1,13	1,10	0,03	0.0265
6,5	1,04	1,01	0,03	0.0288
7,0	0,96	0,94	0,02	0.0208
7,5	0,89	0,87	0,02	0.0225
8,0	0,83	0,81	0,02	0.0241
8,5	0,77	0,75	0,02	0.0260
9,0	0,73	0,72	0,01	0.0137
9,5	0,69	0,68	0,01	0.0145
10,0	0,66	0,65	0,01	0.0152

вредности резултата добијених са првобитном и финијом мрежом, као и апсолутне и релативне грешке у вредностима централне брзине млаза које се том приликом појављују наведене су у табели 4.3.

Максимална разлика у централној брзини за различите густине нумеричке мреже је $0,07 \text{ m}/\text{s}$, и то у почетним деловима млаза, и опада са повећањем растојања од излазног отвора до $0,01 \text{ m}/\text{s}$ на граници домена, што практично нема никакав значај. Релативна грешка је дуж целог струјног простора мања од око 3%. Сходно разматраном проблему, повећање густине нумеричке мреже неће имати значајан утицај на симулиране вредности.

4.3 Утицај прикључне кутије са бочним прикључком на расподелу млаза код плафонских дифузора

4.3.1 Опис проблема

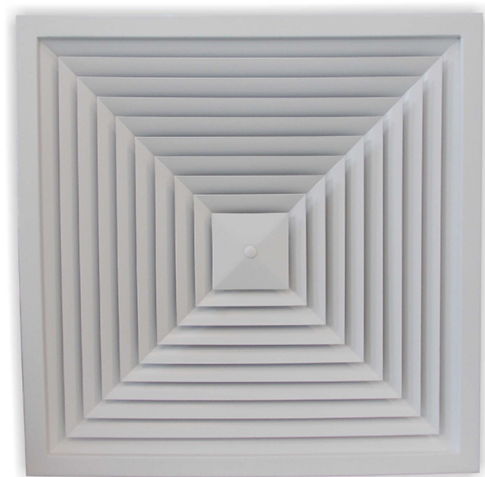
Код генерисања млаза на плафонским дифузорима анализиран је утицај прикључне кутије са бочним прикључком заједно са елементом за умирење струје ваздуха, тзв. дефлектором, као изузетно утицајним чиниоцем на расподелу протока ваздуха. Као иструјни елемент изабран је квадратни четворострани плафонски анемостат номиналне величине 600 са ламелама за хоризонтално усмеравање ваздуха приказан на слици 4.19. При том су упоређени следећи случајеви:

- прикључна кутија без дефлектора, слика 4.20а;
- прикључна кутија и дефлектор као униформно перфорирана плоча, слика 4.20б;
- прикључна кутија и дефлектор као неуниформно перфорирана плоча, слика 4.20в;
- прикључна кутија и дефлектор са усмеравајућим лопатицама, слика 4.20г.

Димензије прикључне кутије су у основи 560x560 mm, висине 410 mm, са бочним прикључком Ø315 mm. Перфориране плоче састоје се од хоризонталног дела равномерне пропустљивости, дужине 140 mm и дела који је нагет под углом од 60° у односу на хоризонталну раван и чија слободна површина зависи од анализираниог случаја. Сви отвори су пречника Ø8 mm. Дефлектор са усмеравајућим лопатицама изведен је у лиму, са усмеривачима у три реда. Отвори који формирају ове усмериваче су висине 30 mm, док њихова дужина и корак зависе од положаја. Дужина се смањује а корак се повећава ка делу кутије насупрот улазном прикључку. Код случаја са слике 4.20в и 4.20г, спроведен је већи број нумеричких симулација за различите распореде отвора са

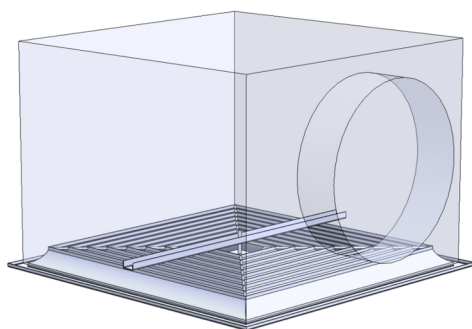


(А) са прикључном кутијом и бочним прикључком

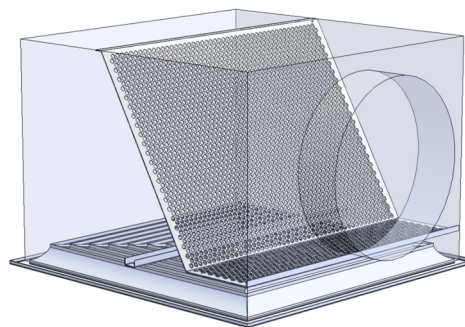


(Б) лице дифузора

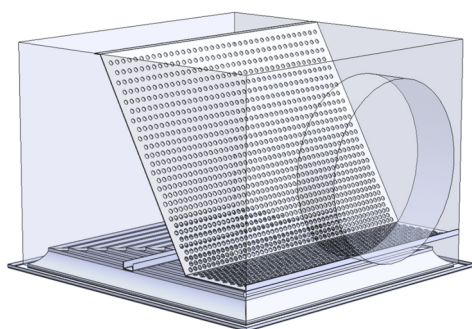
Слика 4.19. Плафонски анемостат за четворострано хоризонтално усмеравање ваздуха



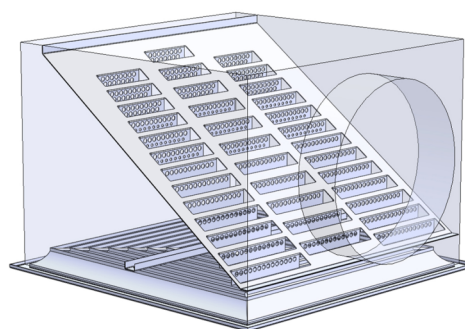
(А) без дефлектора



(Б) дефлектор као равномерно перфорирана плоча



(В) дефлектором као неуниформно перфорирана плоча



(Г) дефлектор са усмеравајућим лопатицама

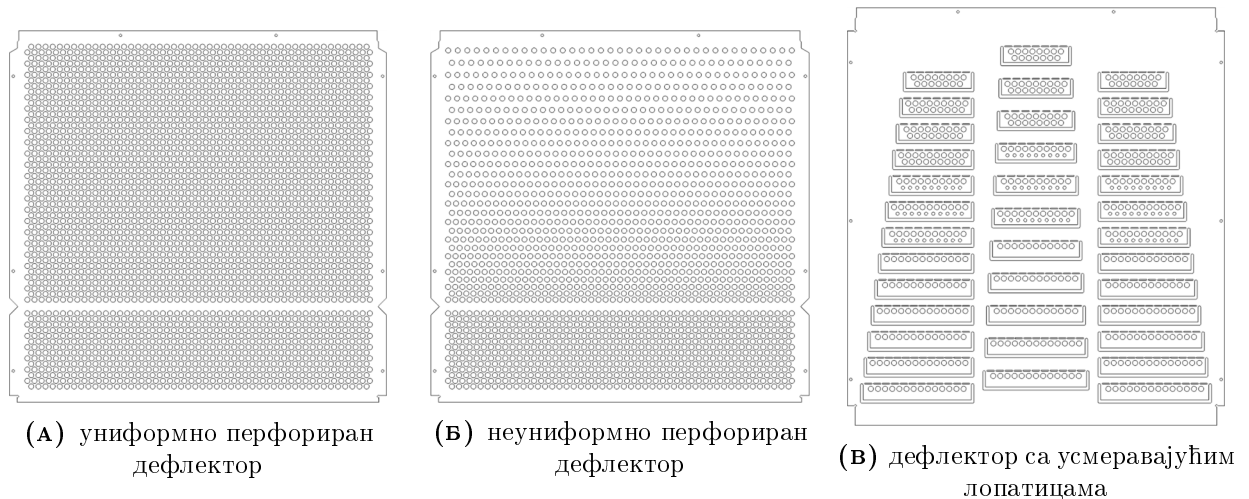
Слика 4.20. Модели прикључне кутије са бочним прикључком и квадратним анемостатом као иструјним елементом

циљем проналажења оптималне геометрије у погледу равномерности протока ваздуха на све четири стране. Развијене површине различитих типова дефлектора приказане су на слици 4.21.

Прорачунски домен дат је на слици 4.22. Улазни прикључак је дужине 500 mm, а излазна област је у облику цилиндра пречника 2 m и висине 1 m чија је горња граница означена као непропусна (*wall*), а све остале њене границе су слободне (*outflow*). У зависности од случаја, број ћелија креће се у распону 8 до 16 милиона. Прорачун је извршен за протоке ваздуха 800, 1000 и 1200 m³/h као оптималне за наведени тип и величину дистрибутивног елемент, а еквивалентне брзине ваздуха у улазном каналу назначене су у табели 4.4.

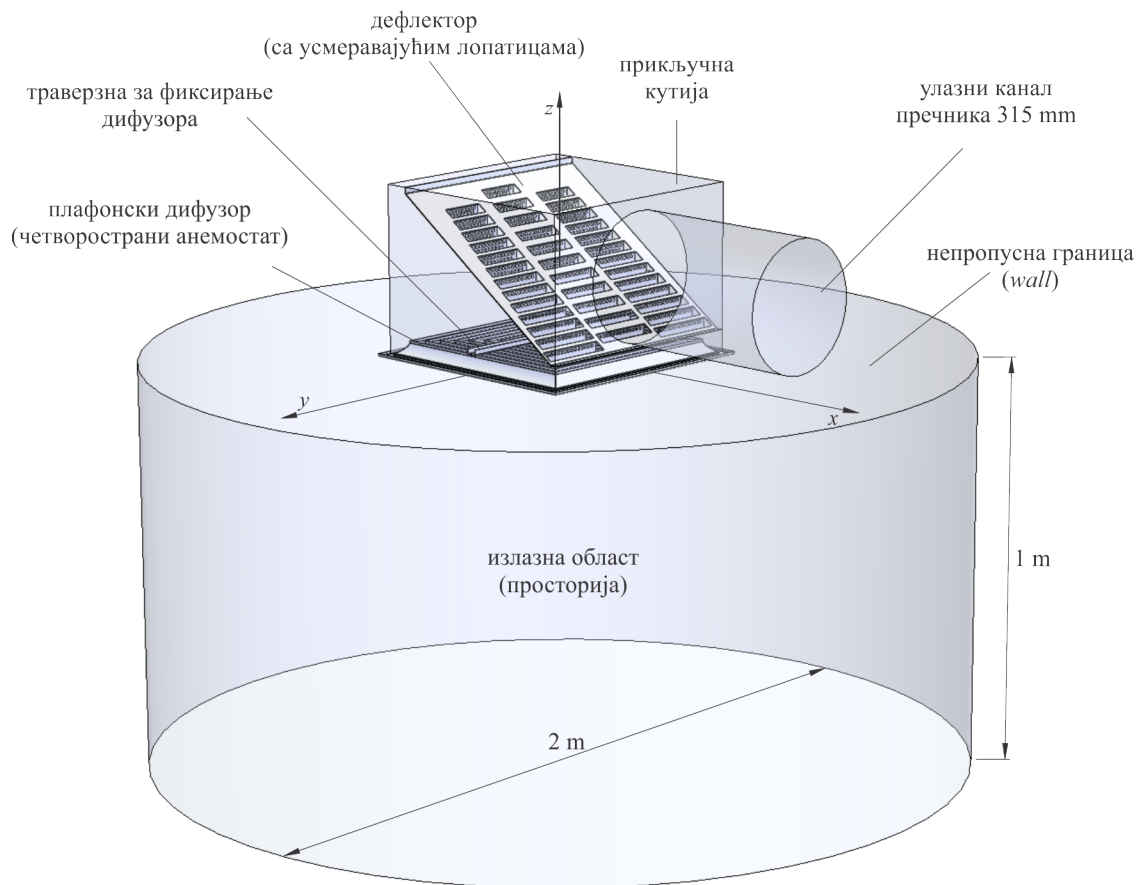
4.3.2 Резултати нумеричког прорачуна

Нумеричке апсолутне и процентуалне вредности запреминске количине ваздуха која иструјава кроз карактеристичне површине четвоространог анемостата означене на слици 4.23 за различите геометрије дефлектора и укупне протоке 800, 1000 и 1200 m³/h дате су у табели 4.5. Очекивано, наведене вредности значајно се разликују када у прикључној



Слика 4.21. Развијене површине различитих типова дефлектора

кутији није постављен дефлектор и највеће су кроз означену површину која се налази насупрот улазног прикључка. Перфорираним плочама униформне пропустљивости, иначе опште прихваћеним у пракси, постиже се само нешто равномернија расподела



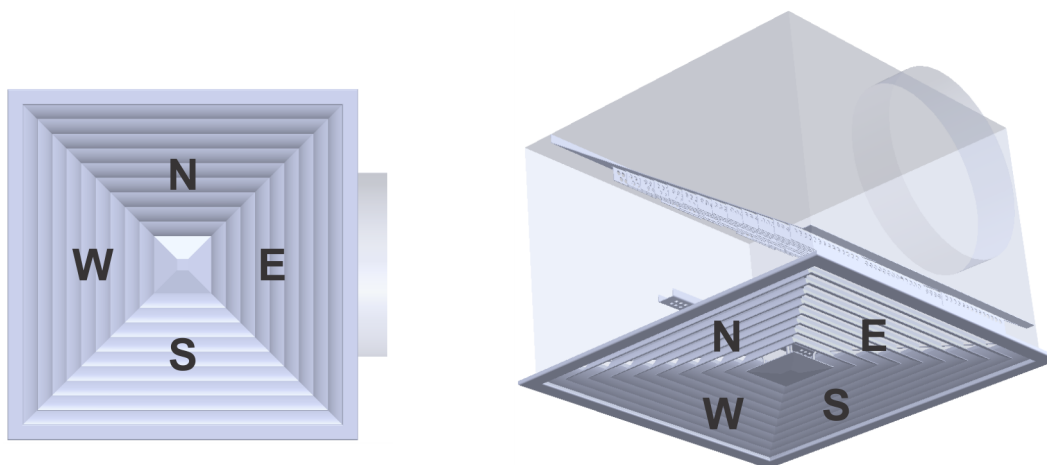
Слика 4.22. Прорачунски домен при анализи струјања ваздуха на плафонском дифузору

ТАБЕЛА 4.4. Брзине ваздуха у улазном каналу прикључне кутије

запремински проток ваздуха $\dot{V}[\text{m}^3/\text{h}]$	брзина у каналу $\bar{v}_k[\text{m}/\text{s}]$
800	2,85
1000	3,56
1200	4,28

протока, док решења која предлажу Vasic, Stevanovic и Zivkovic (2020) дају драстично боље резултате без обзира на варијације укупног протока. Наведени односи такође су приказани дијаграмима на сликама 4.27, 4.31 и 4.35.

Контура расподеле брзине као и вектори брзине струјања у равни лица дифузора за разматране вредности укупног протока приказани су редом на сликама 4.24, 4.28 и 4.32. Јасно се уочава да се максималне иструјне брзине јављају када у кутији нема дефлектора и то уз ивицу супротно од стране улаза ваздуха. Дефлектор равномерне пропустљивости обезбеђује нешто бољу дистрибуцију брзине, мада су неравномерности у овом погледу и даље изражене. Драстично бољи резултати постижу се помоћу перфорираних плоче неуниформне пропустљивости, односно дефлектора са усмеравајућим лопатицама. Узевши у обзир и податке у табели 4.5, овде би се могло погрешно проценити да друга два случаја дају једнако добре резултате. Међутим, коначан закључак може се донети на основу сагледавања просторне расподеле ваздуха на излазу из дифузора репрезентоване интензитетом брзине, што је за различите протоке редом приказано на сликама 4.25, 4.29 и 4.33. У првом од разматраних случајева, када у кутији нема дефлектора, млаз који иструјава из дифузора је крајње асиметричан, што је такође у само нешто мањој мери изражено и када је у питању перфорирана плоча једнаке пропустљивости. Ово је и очекивано имајући у виду различите протоке кроз површину дифузора. Међутим, асиметрија ваздушног млаза јевља се и у случају дефлектора неједнаке пропустљивости, иако су запремински протоци кроз четири карактеристична



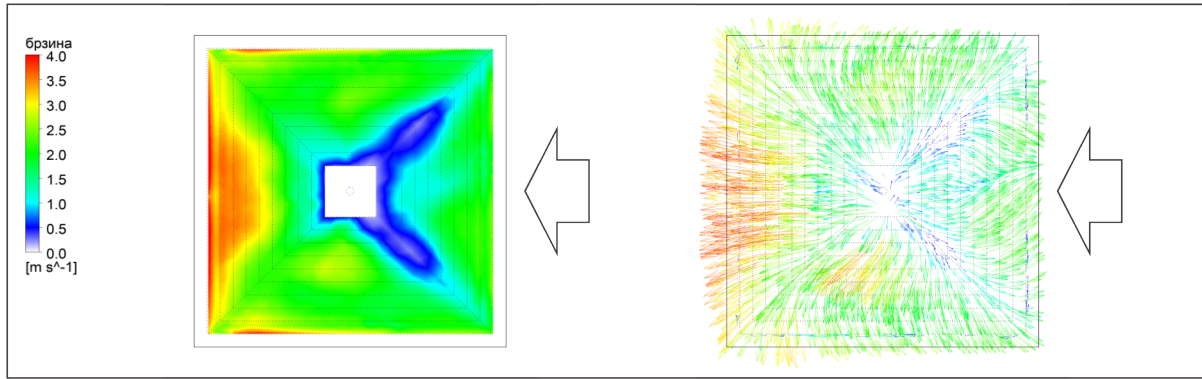
СЛИКА 4.23. Карактеристичне зоне четвоространог анемостата

ТАБЕЛА 4.5. Нумеричке апсолутне и процентуалне вредности протока ваздуха кроз карактеристичне површине четвоространог анемостата

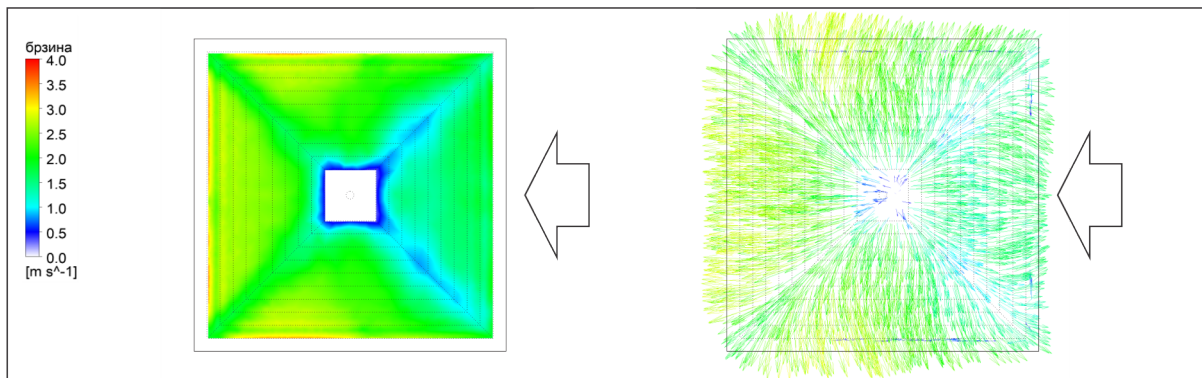
ознака зоне анемостата *	без дефлектора		униформно перфориран дефлектор		неуниформно перфориран дефлектор		дефлектор са усмеравајућим лопатицама	
	m ³ /h	%	m ³ /h	%	m ³ /h	%	m ³ /h	%
$\dot{V}=800 \text{ m}^3/\text{h}$								
E	147	18,4	142	17,8	195	24,4	203	24,5
W	283	35,4	241	30,1	198	24,8	202	25,3
N	183	22,9	209	24,8	208	26,0	197	24,6
S	187	23,4	208	25,3	199	24,9	198	24,8
$\dot{V}=1000 \text{ m}^3/\text{h}$								
E	184	18,4	179	17,9	246	24,6	253	25,3
W	350	35,0	301	30,1	249	24,9	254	25,4
N	226	22,6	260	26,0	253	25,3	245	24,5
S	240	24,0	260	26,0	252	25,2	248	24,8
$\dot{V}=1200 \text{ m}^3/\text{h}$								
E	227	18,9	215	17,9	297	24,8	302	25,2
W	417	34,8	362	30,2	300	25,0	305	25,4
N	281	23,4	312	26,0	302	25,2	295	24,6
S	275	22,9	311	25,9	301	25,1	298	24,8

* карактеристичне зоне означене су на слици 4.23

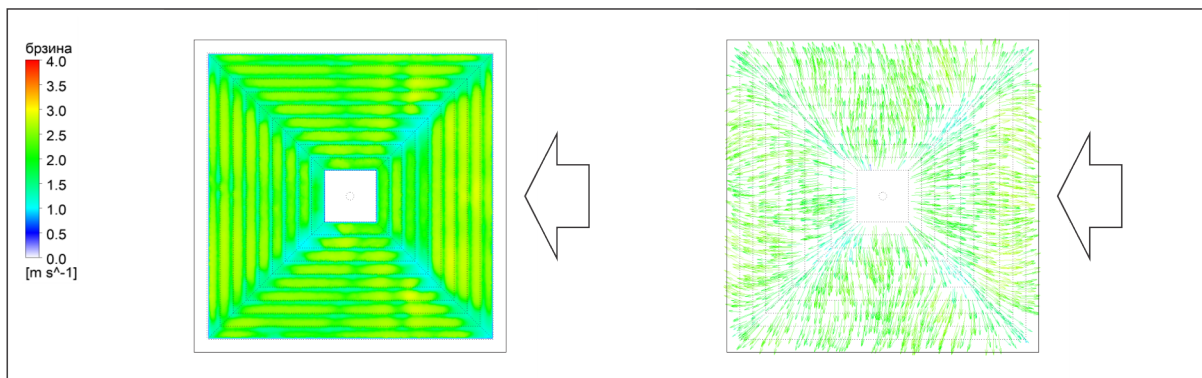
подручја приближно једнаки. Разлог тога јесте што вектори брзине непосредно изнад дифузора, односно на његовом улазном грлу имају значајне хоризонталне компоненте. Наиме, показано је да при струјању гасова кроз перфорирану плочу, вектори брзине на излазу заузимају приближно управан положај у односу на раван те површине а затим врло брзо теже да постигну нападни угао (Guo, Hou, Yu, Li и Guo, 2013). Дакле, перфорираним плочама не може се обезбедити скретање ваздушне струје на доле. Овај проблем у доброј мери је решен применом дефлектора са усмеравајућим лопатицама, што се јасно види на сликама 4.26, 4.30 и 4.34. Битно је истаћи и да се најмањи интензитети брзине у струјном пољу такође јављају у случају дефлектора са усмеравајућим лопатицама (табела 4.6) што може имати утицај на ниво звучне снаге која се генерише услед струјања.



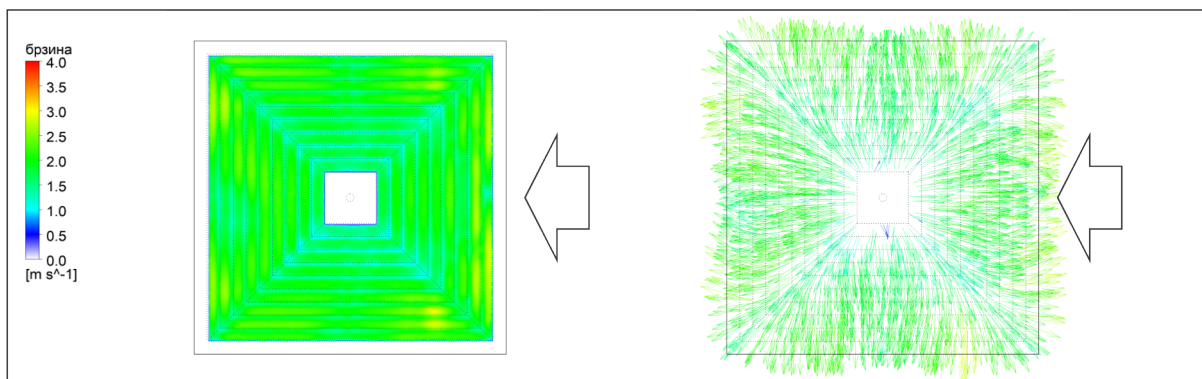
(А) без дефлектора



(Б) равномерно перфориран дефлектор



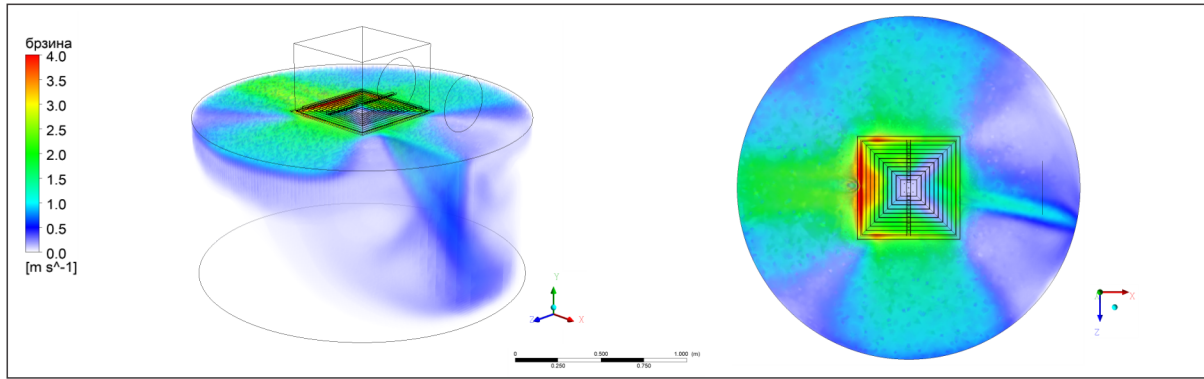
(В) неуниформно перфориран дефлектор



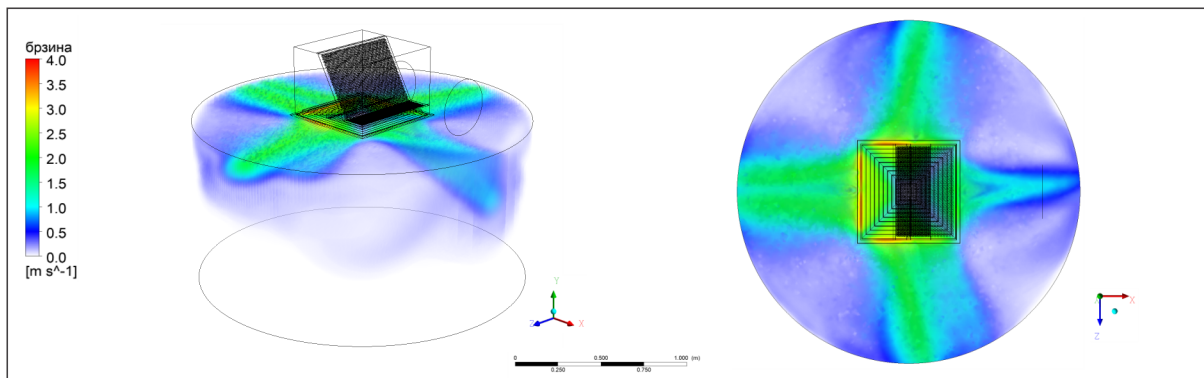
(Г) дефлектор са усмеравајућим лопатицама

СЛИКА 4.24. Расподела (лево) и вектори брзине струјања (десно) у равни лица дифузора ($\dot{V}=800 \text{ m}^3/\text{h}$)

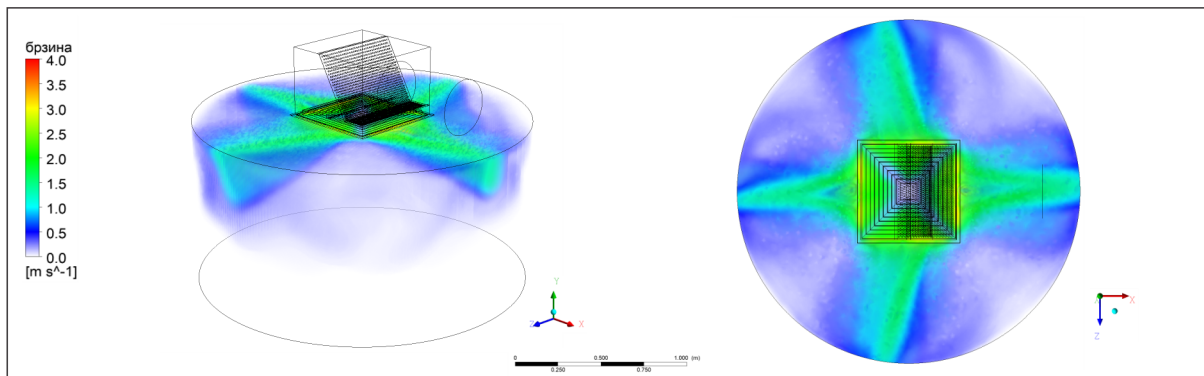
4.3. Утицај прикључне кутије са бочним прикључком на расподелу млаза код плафонских дифузора



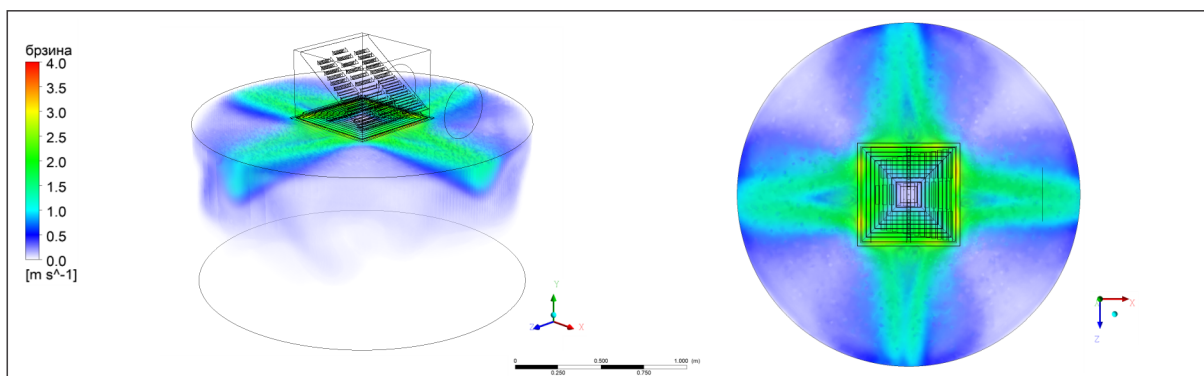
(А) без дефлектора



(Б) униформно перфориран дефлектор

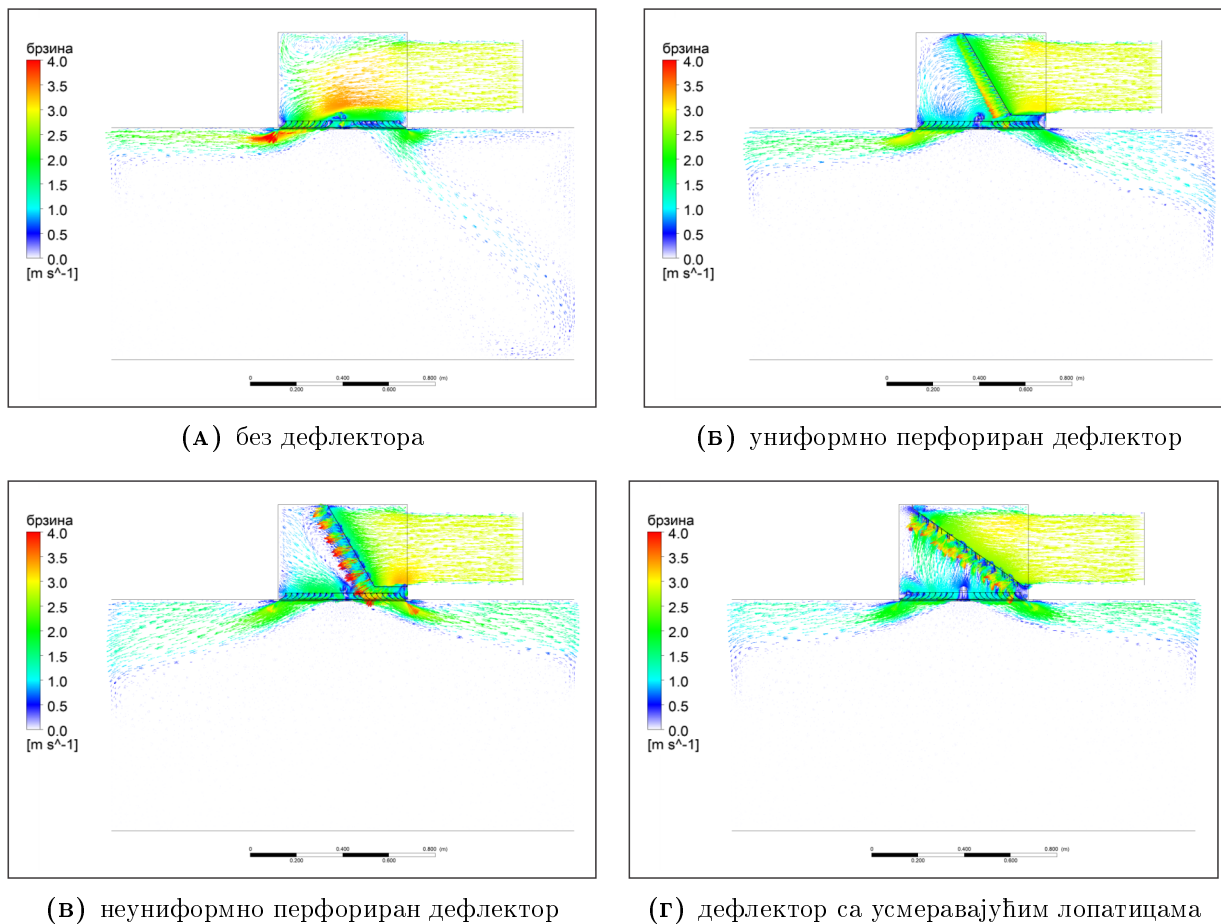


(В) неуниформно перфориран дефлектор

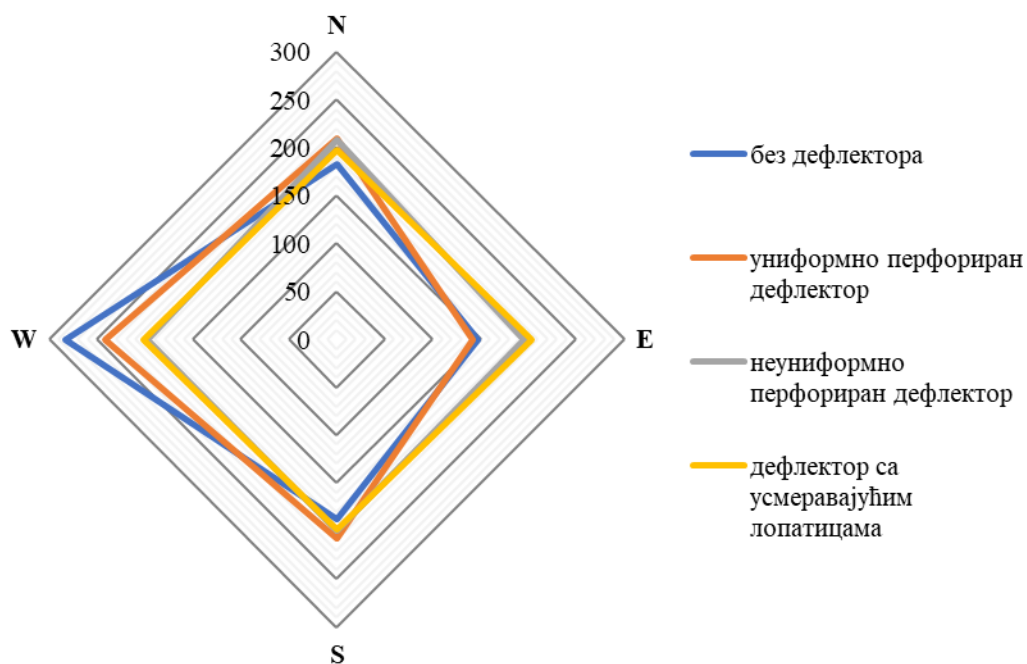


(Г) дефлектор са усмеравајућим лопатицама

Слика 4.25. Просторна расподела брзине у излазној зони дифузора ($\dot{V}=800 \text{ m}^3/\text{h}$)

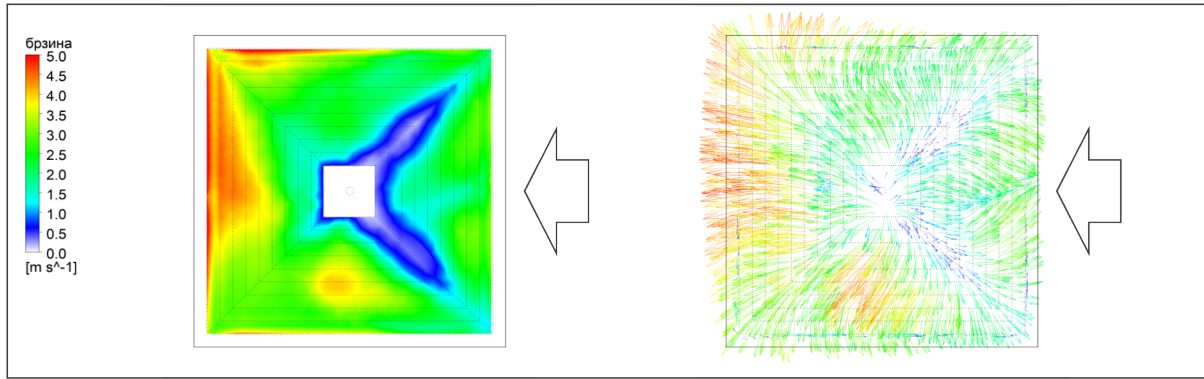


Слика 4.26. Вектори брзине струјања у $x - y$ равни ($\dot{V}=800 \text{ m}^3/\text{h}$)

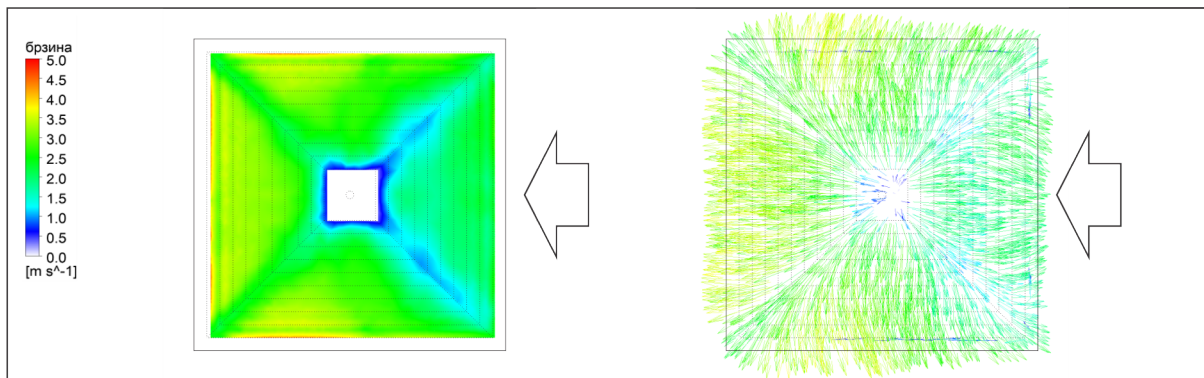


Слика 4.27. Дијаграм расподеле протока на дифузору ($\dot{V}=800 \text{ m}^3/\text{h}$)

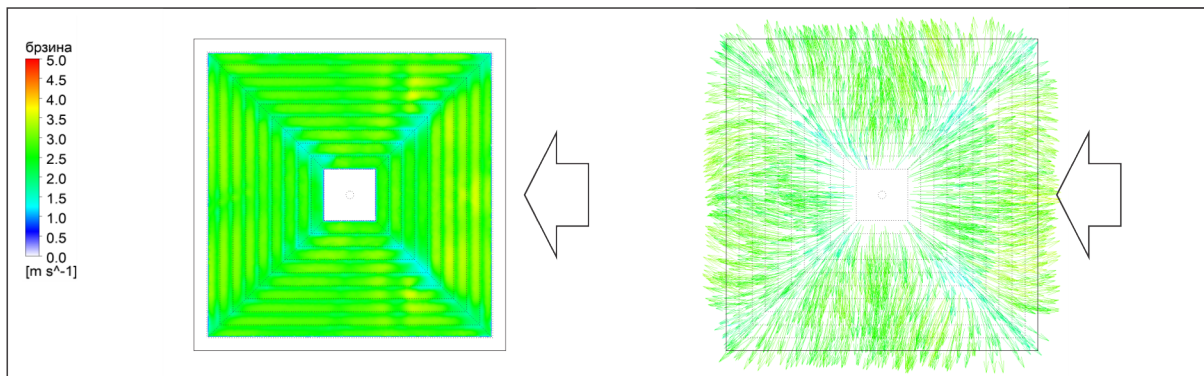
4.3. Утицај прикључне кутије са бочним прикључком на расподелу млаза код
плафонских дифузора



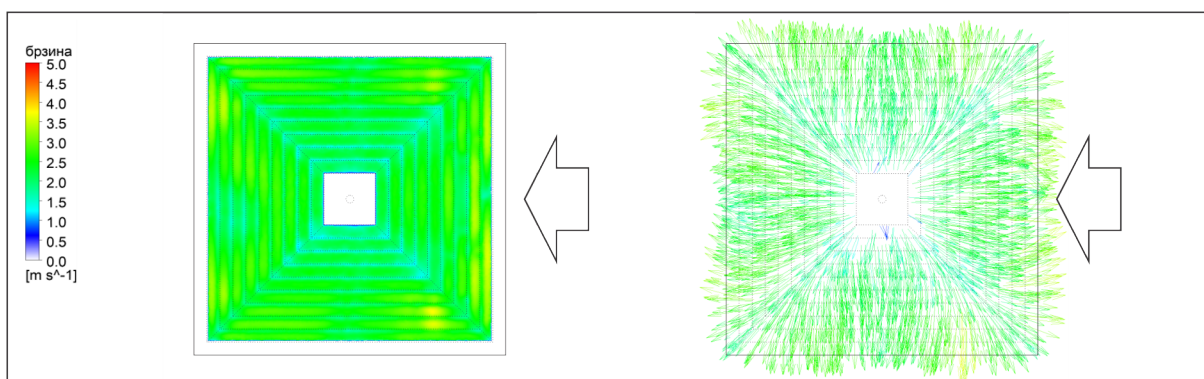
(А) без дефлектора



(В) равномерно перфорирани дефлектор

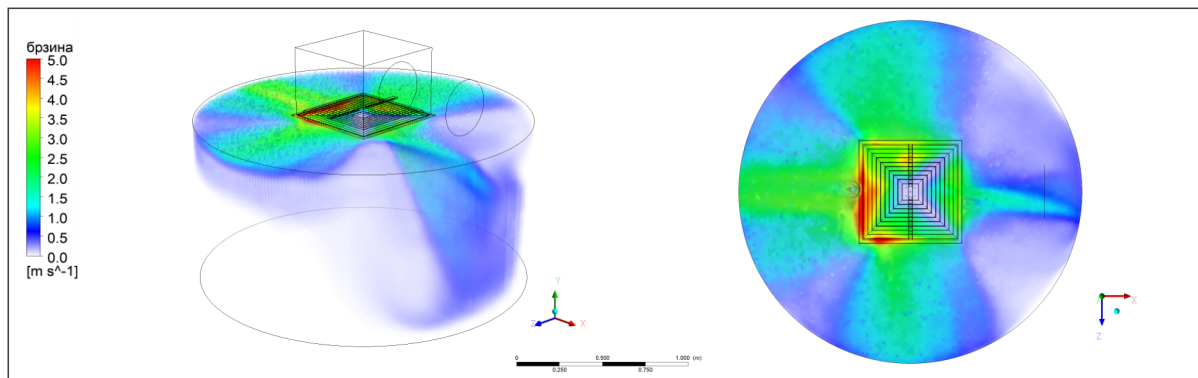


(В) неuniformно перфорирани дефлектор

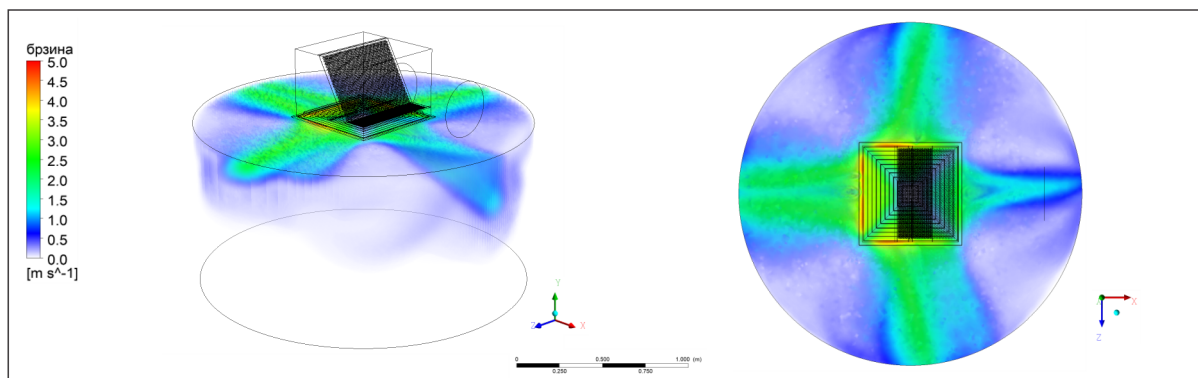


(Г) дефлектор са усмеравајућим лопатицама

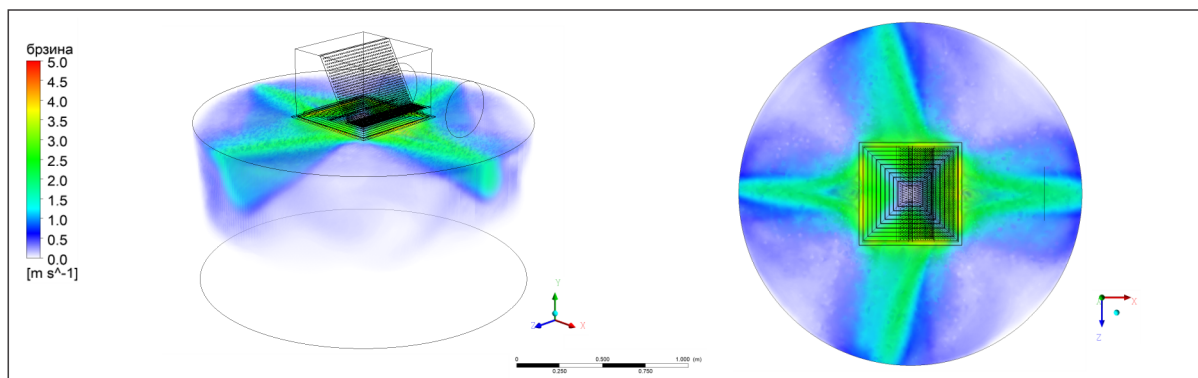
СЛИКА 4.28. Расподела (лево) и вектори брзине струјања (десно) у равни
лица дифузора ($\dot{V}=1000 \text{ m}^3/\text{h}$)



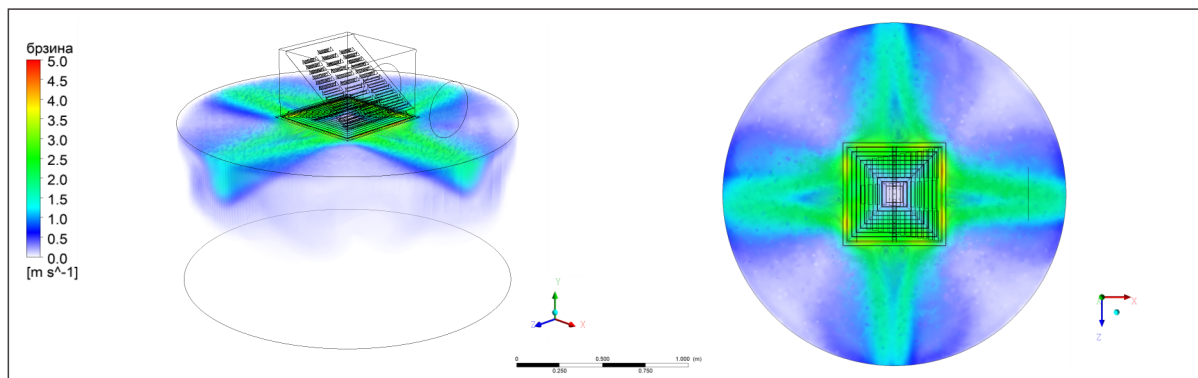
(А) без дефлектора



(Б) равномерно перфориран дефлектор



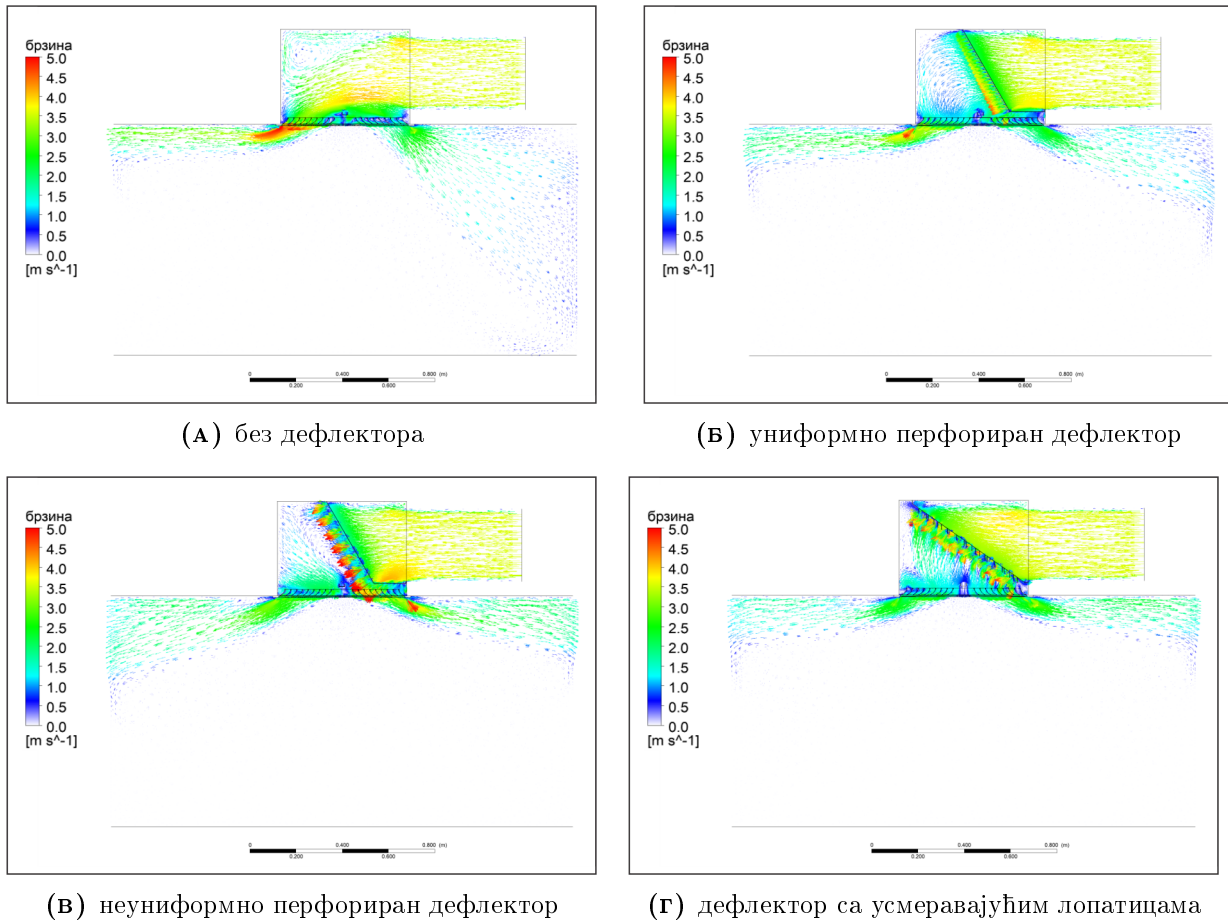
(В) неунормно перфориран дефлектор



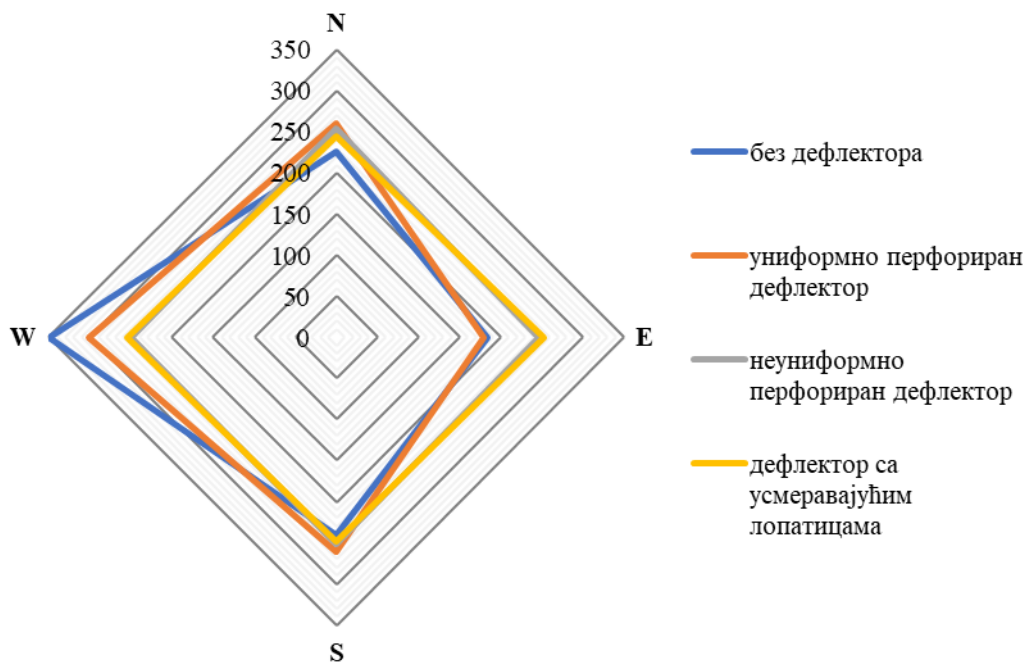
(Г) дефлектор са усмеравајућим лопатицама

Слика 4.29. Просторна расподела брзине у излазној зони дифузора ($\dot{V}=1000 \text{ m}^3/\text{h}$)

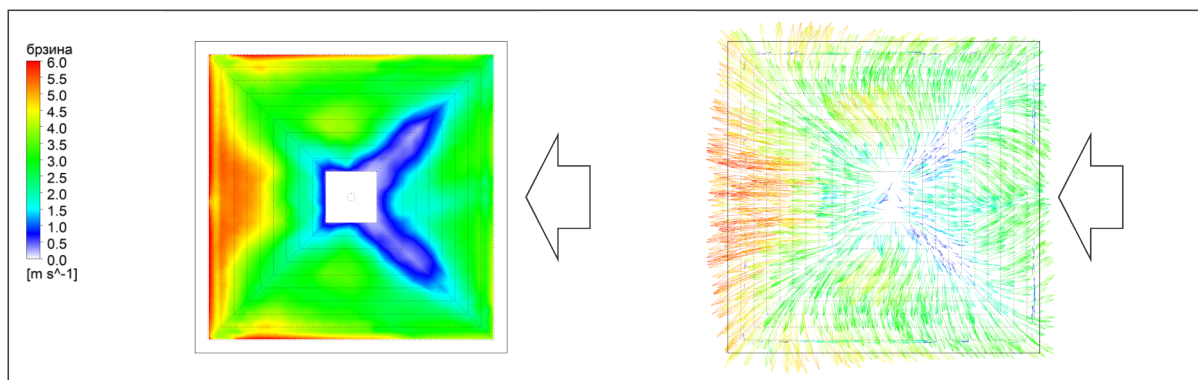
4.3. Утицај прикључне кутије са бочним прикључком на расподелу млаза код
плафонских дифузора



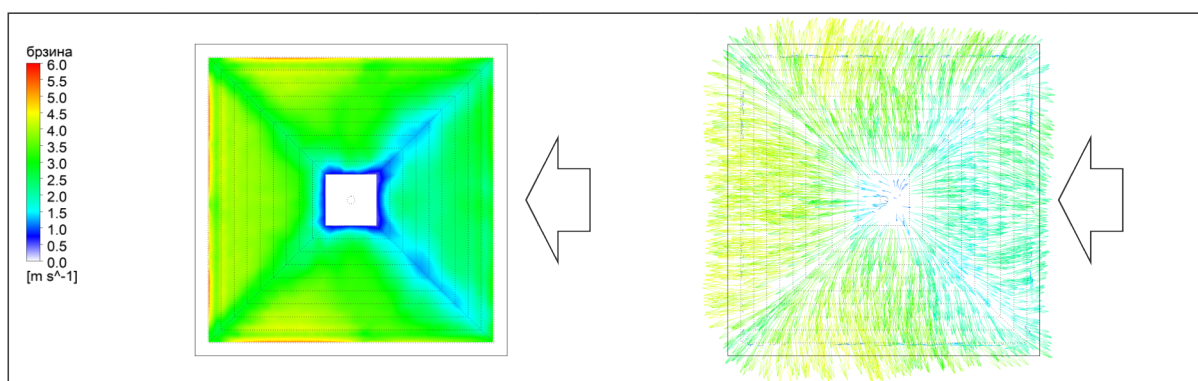
СЛИКА 4.30. Вектори брзине струјања у $x - y$ равни ($\dot{V}=1000 \text{ m}^3/\text{h}$)



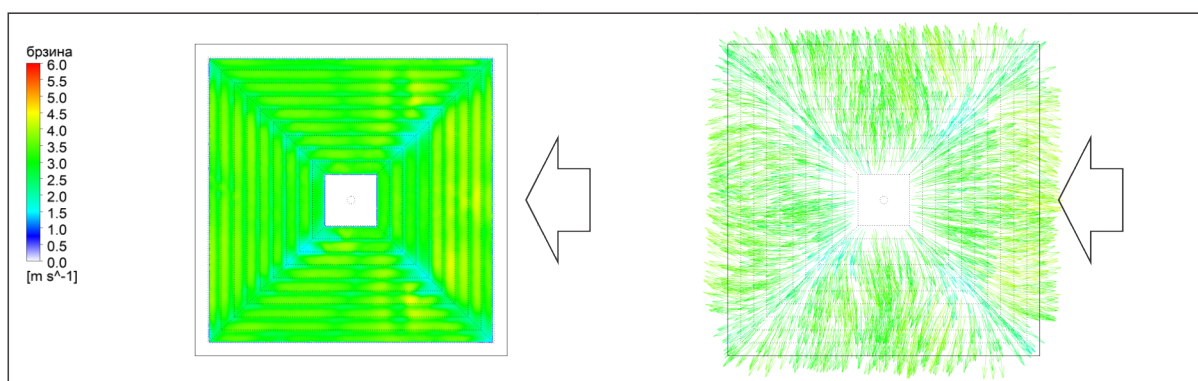
СЛИКА 4.31. Дијаграм расподеле протока на дифузору ($\dot{V}=1000 \text{ m}^3/\text{h}$)



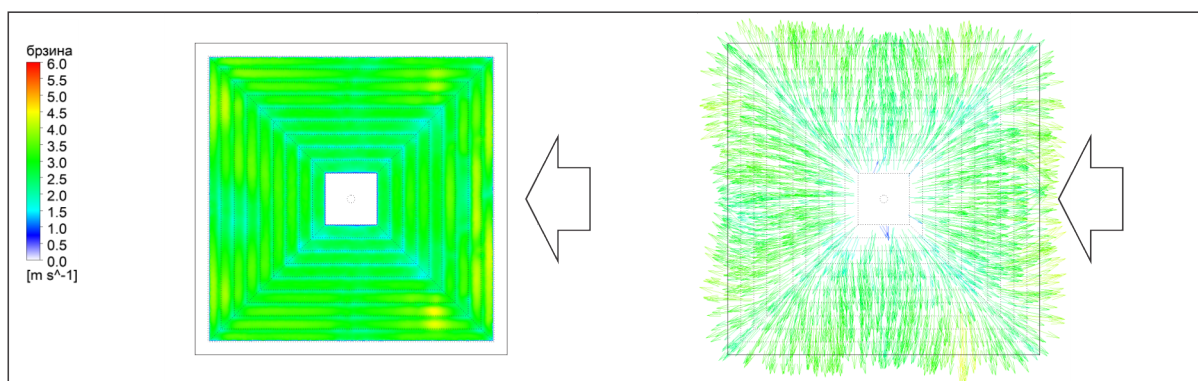
(А) без дефлектора



(Б) равномерно перфориран дефлектор



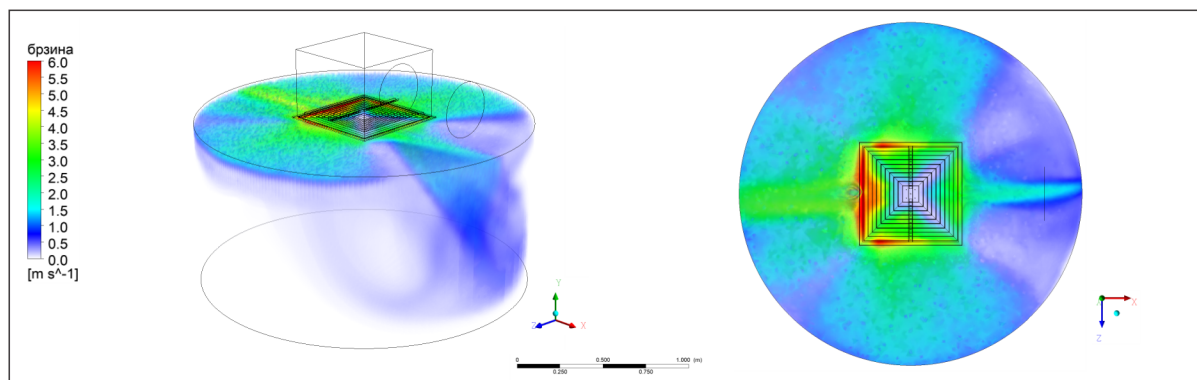
(В) неуниформно перфориран дефлектор



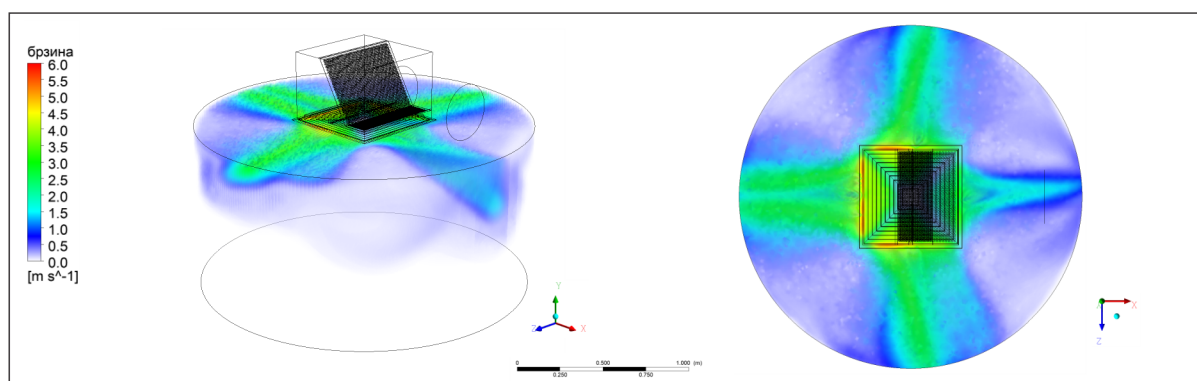
(Г) дефлектор са усмеравајућим лопатицама

Слика 4.32. Расподела (лево) и вектори брзине струјања (десно) у равни лица дифузора ($\dot{V}=1200 \text{ m}^3/\text{h}$)

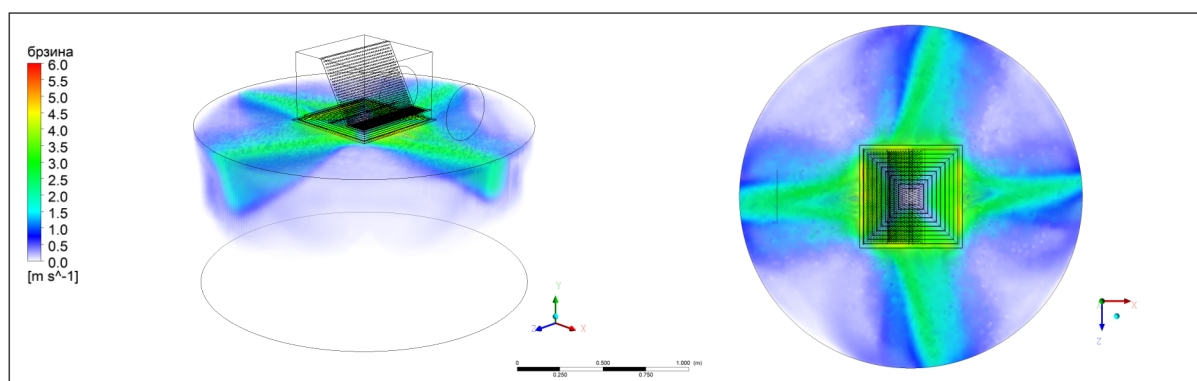
4.3. Утицај прикључне кутије са бочним прикључком на расподелу млаза код плафонских дифузора



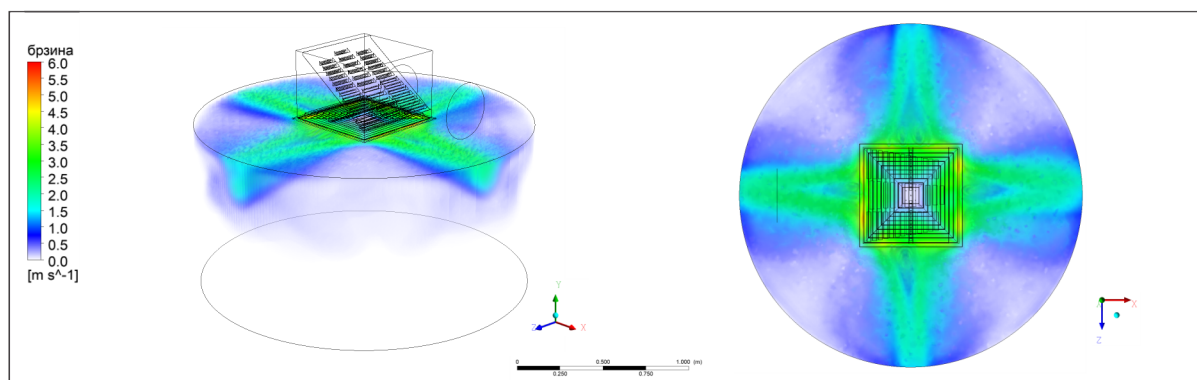
(А) без дефлектора



(Б) равномерно перфориран дефлектор

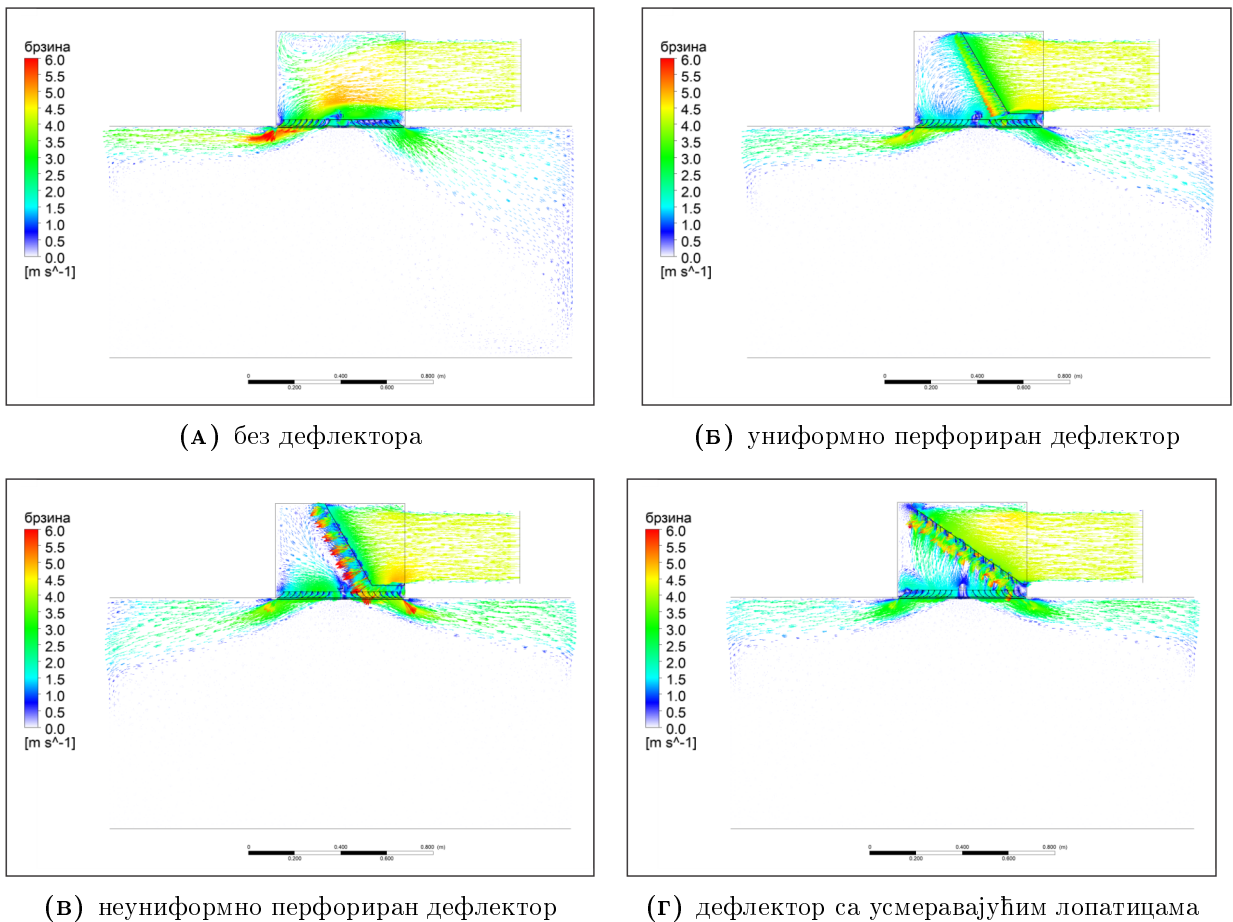


(В) неuniformно перфориран дефлектор

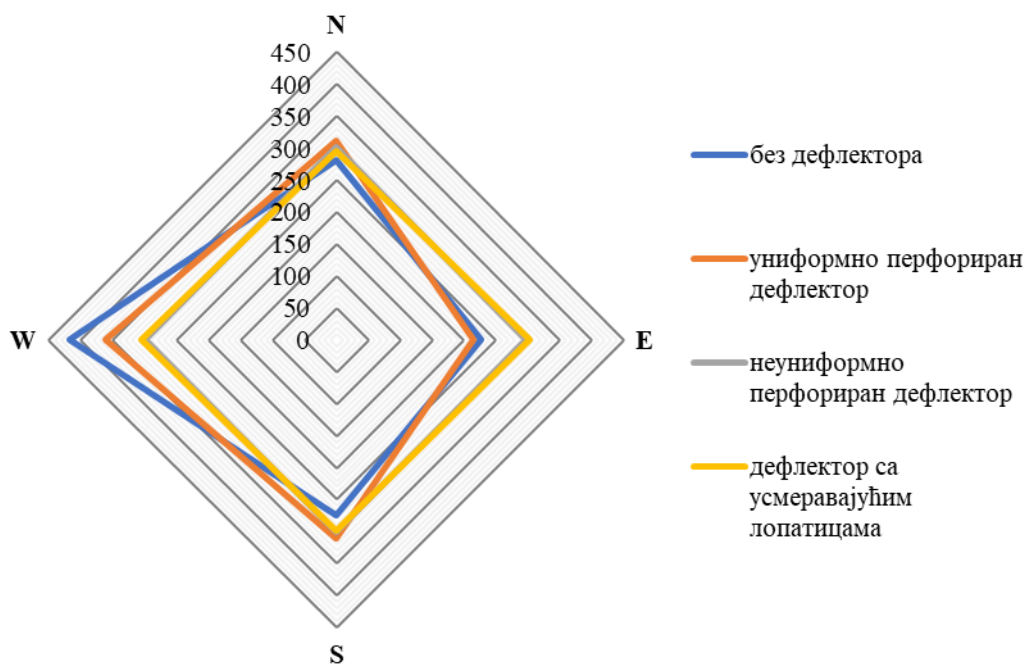


(Г) дефлектор са усмеравајућим лопатицама

Слика 4.33. Просторна расподела брзине у излазној зони дифузора ($\dot{V}=1200 \text{ m}^3/\text{h}$)



Слика 4.34. Вектори брзине струјања у $x - y$ равни ($\dot{V}=1200 \text{ m}^3/\text{h}$)



Слика 4.35. Дијаграм расподеле протока на дифузору ($\dot{V}=1200 \text{ m}^3/\text{h}$)

ТАБЕЛА 4.6. Максималне вредности интензитета брзине у симулираном струјном пољу анемостата

тип дефлектора	запремински проток ваздуха \dot{V} [m ³ /h]		
	800	1000	1200
без дефлектора	6,56	8,38	10,01
униформно перфорирана плоча	4,97	6,31	7,63
неуниформно перфорирана плоча	4,94	6,21	7,52
плоча са усмеравајућим лопатицама	4,63	5,97	7,23

4.3.3 Провера квалитета нумеричке мреже

Провера квалитета нумеричке мреже изведена је код струјање ваздуха преко плоче са усмеравајућим лопатицама и то за проток 1000 m³/h. При том је наведени случај симулиран са модификованом нумеричком мрежом која садржи приближно 38 милиона контролних запремина. Добијени резултати приказани су у табели 4.7.

ТАБЕЛА 4.7. Запремински протоци кроз карактеристичне зоне четворо-страног анемостата са стандардном и модификованом мрежом ($\dot{V}=1000$ m³/h)

ознака зоне анемостата *	Проток ваздуха [m ³ /h]		апсолутна грешка $\dot{V}_{stan.} - \dot{V}_{mod.}$ [m ³ /h]	релативна грешка $\frac{ \dot{V}_{stan.} - \dot{V}_{mod.} }{\dot{V}_{stan.}}$
	16 милиона контр. зап.	38 милиона контр. зап.		
E	252,7	252,6	0,1	0.0004
W	254,2	252,6	1,6	0.0063
N	245,0	247,1	-2,1	0.0086
S	248,1	247,1	-0,4	0.0016

* карактеристичне зоне означене су на слици 4.23

Максимална разлика која се појављује у протоцима кроз карактеристичне зоне дифузора јесте 2,1 m³/h, односно свега 0,86 %. Дакле, више него двоструким увећањем броја контролних запремина, са 16 на 38 милиона, није добијена никаква значајна разлика у симулираном струјном пољу. Према томе, даље повећање густине мреже у практичном смислу нема утицај на тачност резултата.

4.4 Утицај регулационе клапне у кутији са бочним прикључком на експанзију млаза код линијских дифузора

4.4.1 Опис проблема

На основу претходно описаног, јасно је да прикључна кутија има пресудну улогу код расподеле протока на иструјним елементима, нарочито када се ради о бочном увођењу ваздуха што је и најчешћи случај. Проблем се додатно компликује постављањем регулационе клапне на улазном отвору, која поред своје примарне улоге балансирања укупног протока доводи до додатног повећања неравномерности тока и формираног млаза у просторији. У конкретном случају разматра се струјање на излазу из линијског дифузора са прикључном кутијом и бочним прикључком дужине 1000 mm, са једним шлицем ширине 20 mm, слика 4.36.

Утицај регулационе клапне сагледан је кроз различите положаје осе ротације и угла отворености што подразумева следеће:

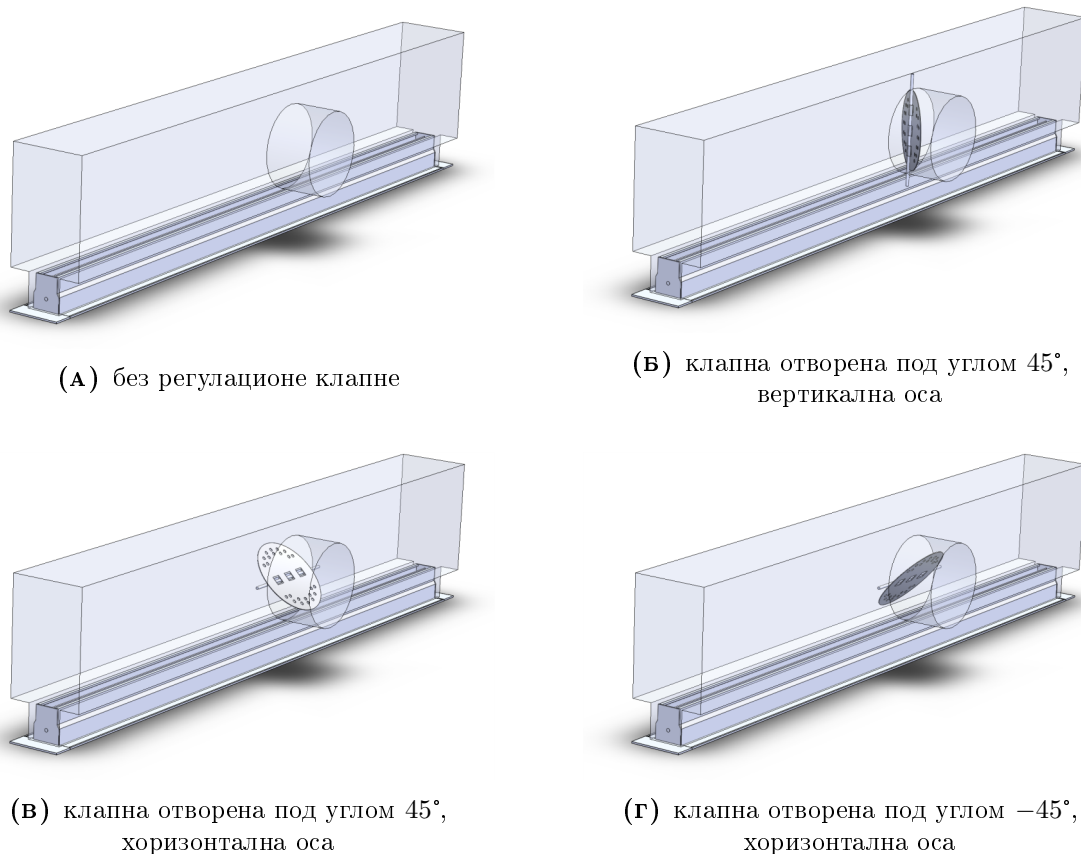
- кутија без регулационе клапне, што приближно одговара потпуно отвореној или потпуно затвореној клапни без обзира на положај осе ротације, слика 4.37а;
- клапна отворена под углом 45° при вертикалној оси ротације, слика 4.37б;
- клапна отворена под углом 45° при хоризонталној оси ротације, слика 4.37в;
- клапна отворена под углом -45° при хоризонталној оси ротације, слика 4.37г.

Висина грла прикључне кутије је 50 mm, док је укупна висина 230 mm при чему је горњи део симетрично шири у односу на грло за 60 mm. Доводни прикључак је постављен у централном делу кутије и стандардног је пречника $\varnothing 125$ mm, регулациона клапна је делимично перфорирана отворима $\varnothing 5$ mm. Ради јасније визуелизације, линијски дифузор је подешен за вертикално иструјавање.

Прорачунски домен је представљен на слици 4.38. Дужина улазног прикључка је 300 mm, док је цилиндрична излазна област пречника и висине 2 m чија је горња површина дефинисана као непропусна граница (*wall*), а све остале површине су слободне (*outflow*).



Слика 4.36. Линијски дифузор са прикључном кутијом

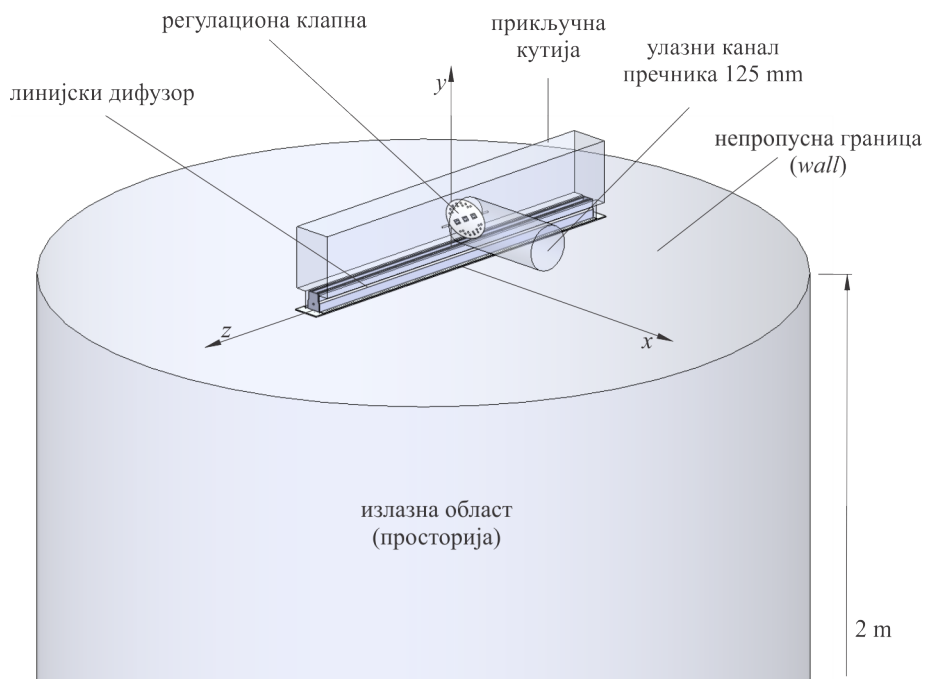


Слика 4.37. Модели прикључне кутије са бочним прикључком и линијским дифузором као иструјним елементом

Дискретизација струјног простора извршена је са око 4,4 милиона ћелија у случају када нема регулационе клапне, односно приближно 4,7 милиона контролних запремина у свим осталим случајевима. Анализе су извршене за протоке 75 , 100 и $125 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$, при чему су еквивалентне вредности брзине струјања у улазном каналу наведене у табели 4.8.

ТАБЕЛА 4.8. Карактеристичне брзине ваздуха при струјању на линијском дифузору

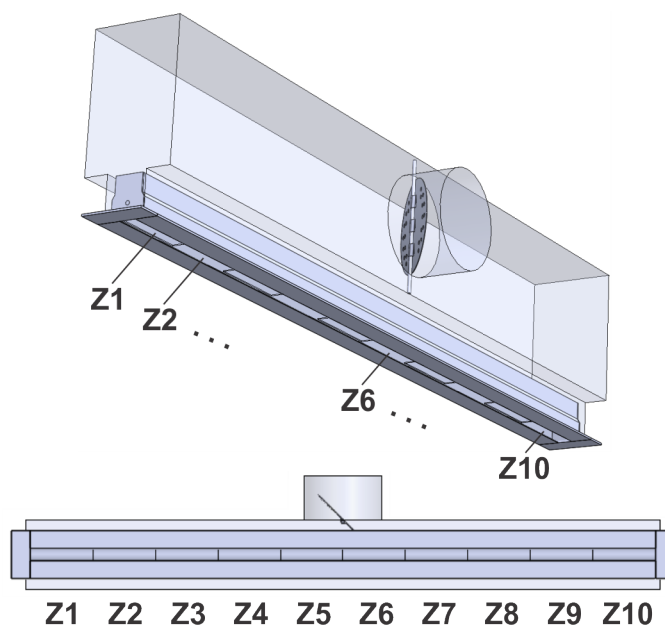
запремински проток ваздуха $\dot{V} [\text{m}^3/\text{h}]$	брзина у каналу $\bar{v}_k [\text{m}/\text{s}]$	ефективна излазна брзина $\bar{v}_{ef} [\text{m}/\text{s}]$
75	2,85	1,04
100	3,56	1,39
125	4,28	1,74



Слика 4.38. Прорачунски домен при анализи струјања ваздуха на линијском дифузору

4.4.2 Резултати нумеричког прорачуна

У оквиру нумеричких резултата, у табели 4.9 приказани су подаци о расподели протока дуж излазног отвора линијског дифузора који је подељен на десет зона дужине 100 mm, слика 4.39.



Слика 4.39. Карактеристичне зоне дуж процепа линијског дифузора

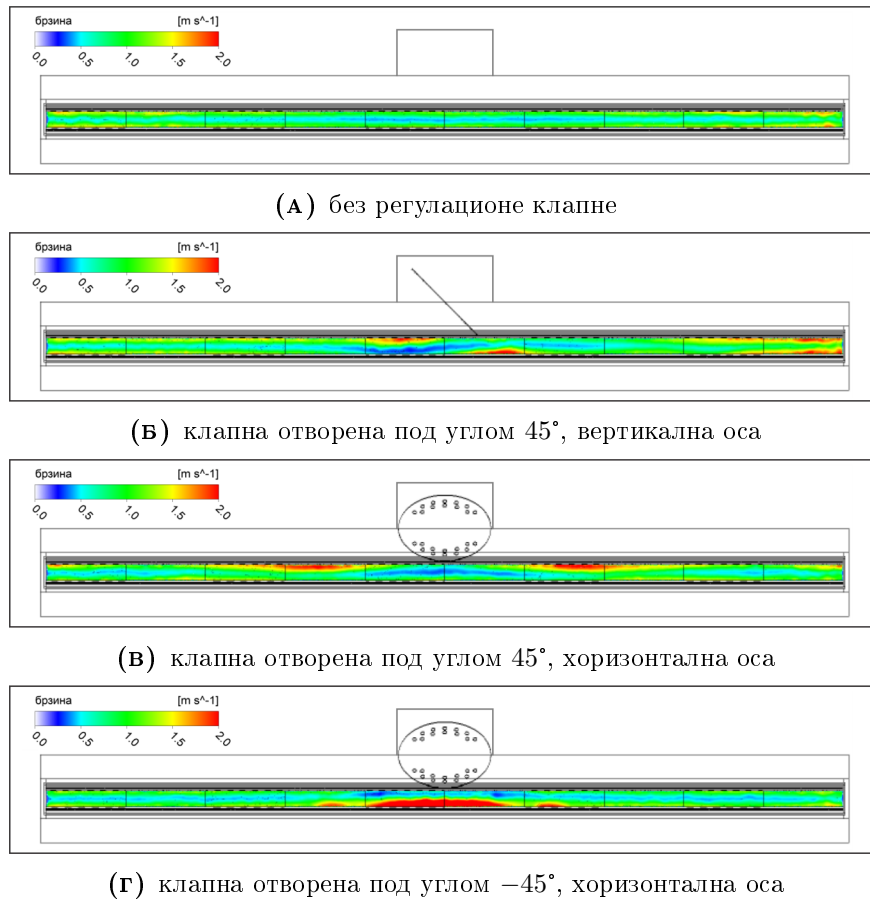
ТАБЕЛА 4.9. Нумеричке апсолутне и процентуалне вредности протока
ваздуха кроз карактеристичне зоне линијског дифузора

ознака зоне линијског дифузора*	без регулационе клапне		клапна отворена под углом 45°, вертикална оса		клапна отворена под углом 45°, хоризонтална оса		клапна отворена под углом -45°, хоризонтална оса	
	m ³ /h	%	m ³ /h	%	m ³ /h	%	m ³ /h	%
$\dot{V}=75 \text{ m}^3/\text{h}$								
Z1	8,15	10,9	8,04	10,7	7,37	9,8	7,52	10,0
Z2	8,19	10,9	7,85	10,5	7,68	10,2	7,01	9,3
Z3	7,37	9,8	7,60	10,1	8,29	11,1	7,11	9,5
Z4	6,86	9,1	7,64	10,2	7,69	10,3	7,47	10,0
Z5	6,74	9,0	6,23	8,3	6,19	8,3	8,71	11,6
Z6	6,97	9,3	7,18	9,6	6,28	8,4	8,41	11,2
Z7	6,62	8,8	5,19	6,9	7,68	10,2	7,29	9,7
Z8	7,66	10,2	6,96	9,3	8,53	11,4	7,18	9,6
Z9	7,83	10,4	8,29	11,1	7,47	10,0	6,79	9,1
Z10	8,61	11,5	10,02	13,4	7,82	10,4	7,51	10,0
$\dot{V}=100 \text{ m}^3/\text{h}$								
Z1	10,96	11,0	10,87	10,9	9,52	9,5	9,84	9,8
Z2	10,83	10,8	10,81	10,8	10,24	10,2	9,38	9,4
Z3	9,90	9,9	10,33	10,3	11,08	11,1	9,49	9,5
Z4	9,08	9,1	9,98	10,0	10,18	10,2	10,34	10,3
Z5	8,99	9,0	7,98	8,0	8,58	8,6	11,33	11,3
Z6	9,28	9,3	9,37	9,4	8,52	8,5	10,71	10,7
Z7	8,79	8,8	6,62	6,6	10,36	10,4	9,73	9,7
Z8	10,28	10,3	9,60	9,6	11,43	11,4	9,79	9,8
Z9	10,37	10,4	10,98	11,0	9,81	9,8	9,21	9,2
Z10	11,52	11,5	13,46	13,5	10,28	10,3	10,18	10,2
$\dot{V}=125 \text{ m}^3/\text{h}$								
Z1	13,64	10,9	13,09	10,5	11,85	9,5	12,40	9,9
Z2	13,53	10,8	12,81	10,2	12,79	10,2	11,90	9,5
Z3	12,41	9,9	12,63	10,1	13,97	11,2	12,02	9,6
Z4	11,30	9,0	12,63	10,1	12,73	10,2	13,05	10,4
Z5	11,24	9,0	10,15	8,1	10,92	8,7	13,86	11,1
Z6	11,63	9,3	12,50	10,0	10,66	8,5	12,95	10,4
Z7	11,01	8,8	8,20	6,6	12,93	10,3	12,12	9,7
Z8	12,84	10,3	12,27	9,8	14,28	11,4	12,38	9,9
Z9	12,94	10,4	13,71	11,0	12,13	9,7	11,58	9,3
Z10	14,46	11,6	17,01	13,6	12,74	10,2	12,74	10,2

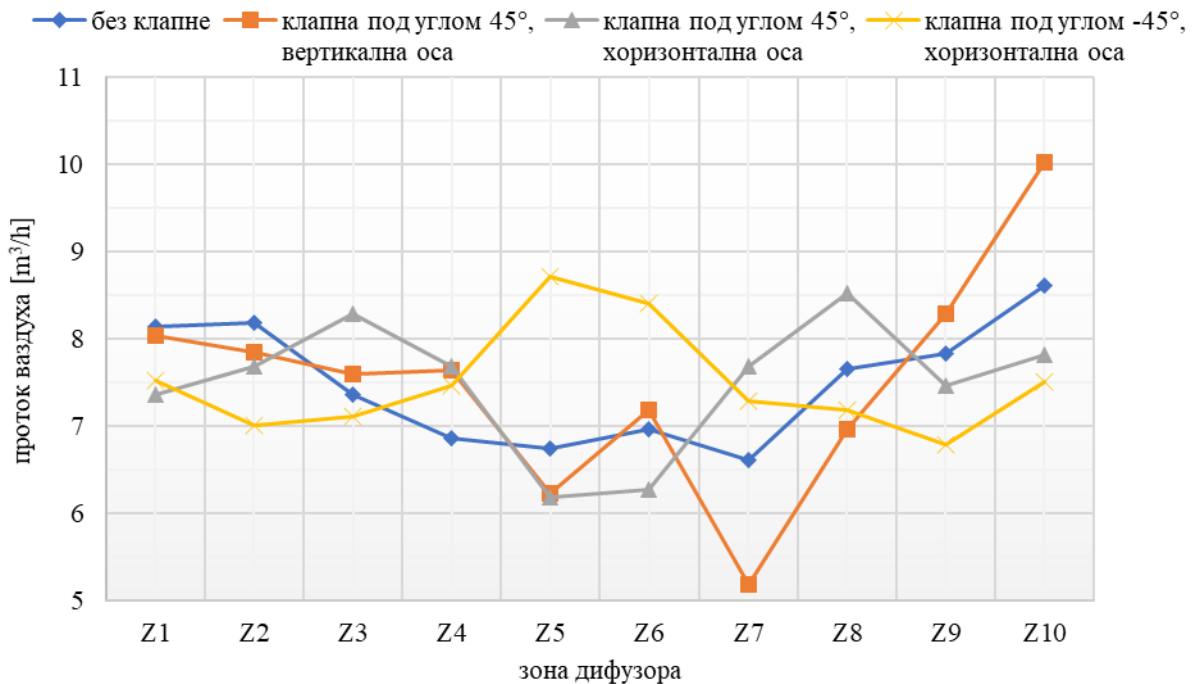
* карактеристичне зоне означене су на слици 4.39

Дијаграми расподеле протока дуж процепа линијског дифузора за разматране случајеве дати су на сликама 4.41, 4.45 и 4.49, и то за протоке 75, 100 и 125 m³/h·m⁻¹ респективно. Сасвим је уочљиво да је код кутије где нема регулационе клапне, односно при њеној потпуној отворености, проток нешто мањи у централном делу и приближно равномерно се повећава ка крајевима, али и да су ове промене најмање у односу на преостале случајеве. Убедљиво најнеповољнији резултати по овом питању присутни су код делимичне отворености клапне са вертикалном осом ротације, где долази до извесног усмеравања ваздуха ка једној страни елемента што коначно резултира драстично већим протоцима на самом крају при изразито неравномерној расподели истог. Насупрот томе, прилично симетрична расподела присутна је у преостала два случаја са хоризонталном осом ротације клапне, с тим да се при њеном отварању у позитивном смеру минимални протоци остварују у централном делу и повећавају се ка крајевима до приближно једне четвртине дужине а затим поново бележе пад, док се при отварању у негативном смеру максимални протоци појављују у уској области централног дела линијског дифузора, затим нагло падају и остају приближно константи ка крајевима. Јасно је да су наведене расподеле протока последица брзине на излазу чије су контуре приказане на сликама 4.40, 4.44 и 4.48. Овде се, међутим, уочавају и разлике у иструјној брзини по ширини процепа, и управо је то разлог због кога постоји отклон млаза у односу на вертикалну симетралну раван дуж линијског дифузора, што се види из просторне расподеле брзине у изометријским пројекцијама на сликама 4.42, 4.46 и 4.50, а нарочито у ортогоналним пројекцијама, слике 4.43, 4.47 и 4.51. Неравномерност расподеле брзине најизраженија је када је клапна половично отворена у негативном смеру у односу на хоризонталну раван, а вектори брзине тада имају максималне интензитета у централном делу процепа насупрот доводног прикључка. Оправдано је закључити да ће се код линијског дифузора са два, три или четири процепа јавити изразите неравномерности иструјне брзине, а самим тим и протока, по процепима на истој дужинској координати, што у крајњем случају хоризонталног усмеравања сасвим сигурно има за последицу изразито неравномерну и асиметричну струјну слику.

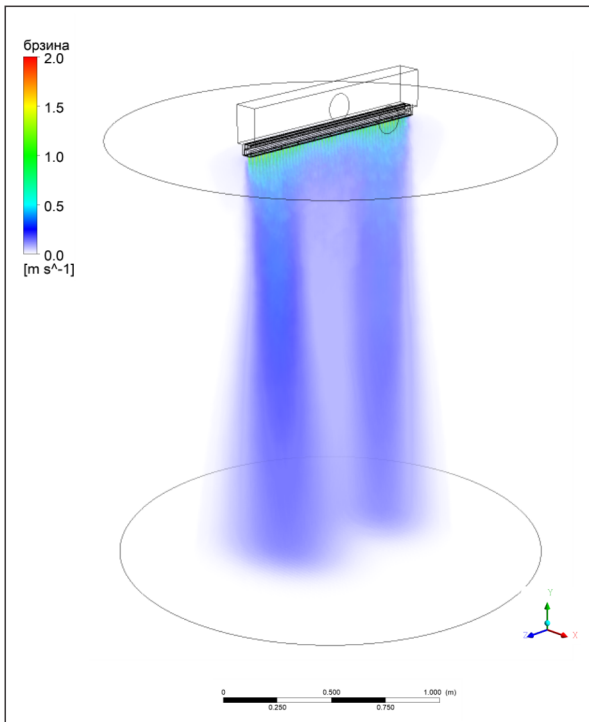
4.4. Утицај регулационе клапне у кутији са бочним прикључком на експанзију млаза код линијских дифузора



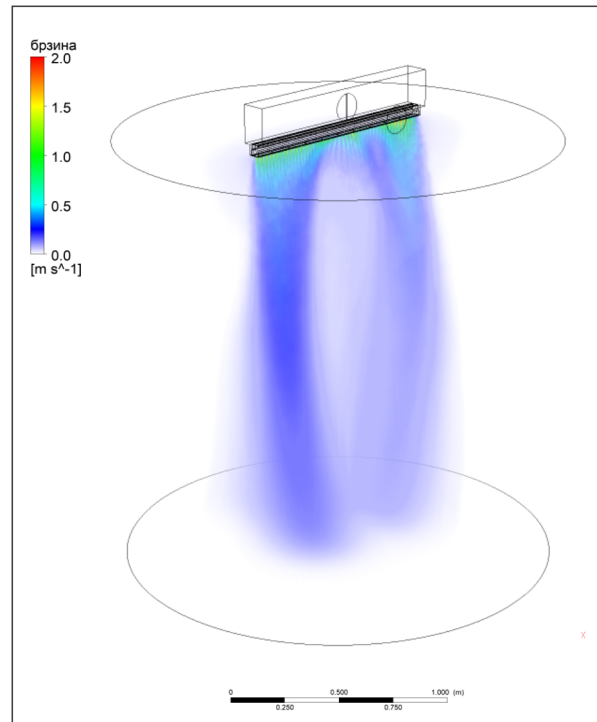
Слика 4.40. Расподела брзине у равни лица линијског дифузора ($\dot{V}=75 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)



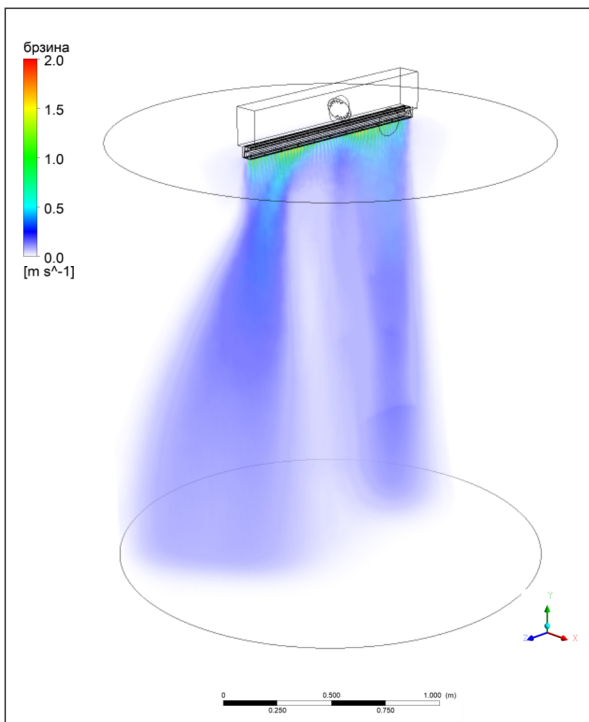
Слика 4.41. Дијаграм расподеле протока кроз карактеристичне зоне линијског дифузора ($\dot{V}=75 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)



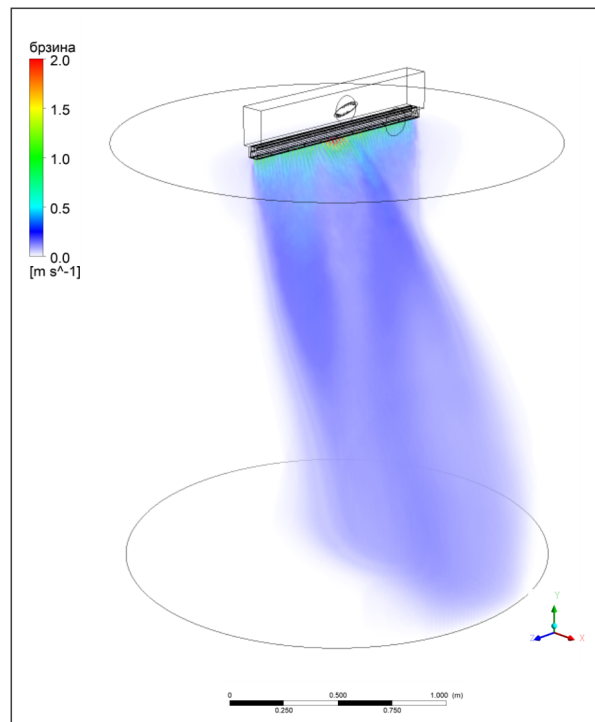
(А) без регулационе
клапне



(Б) клапна отворена под углом 45°,
вертикална оса



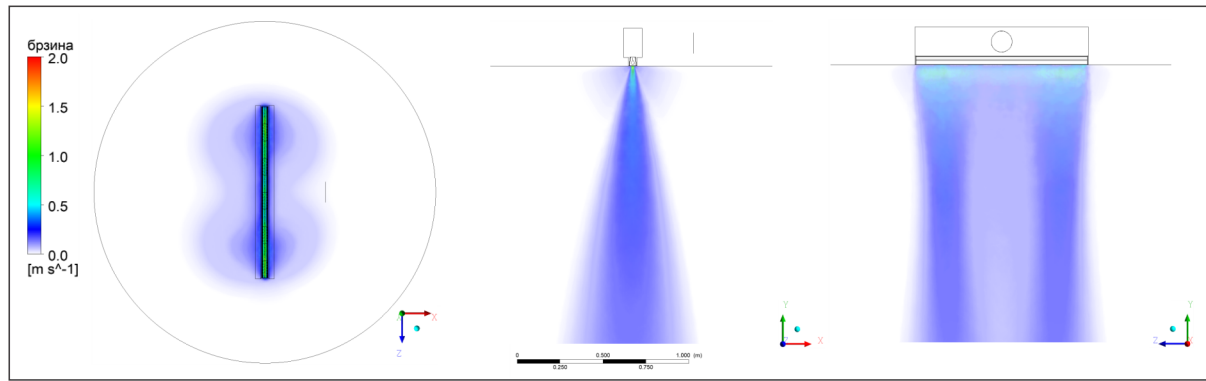
(В) клапна отворена под углом 45°,
хоризонтална оса



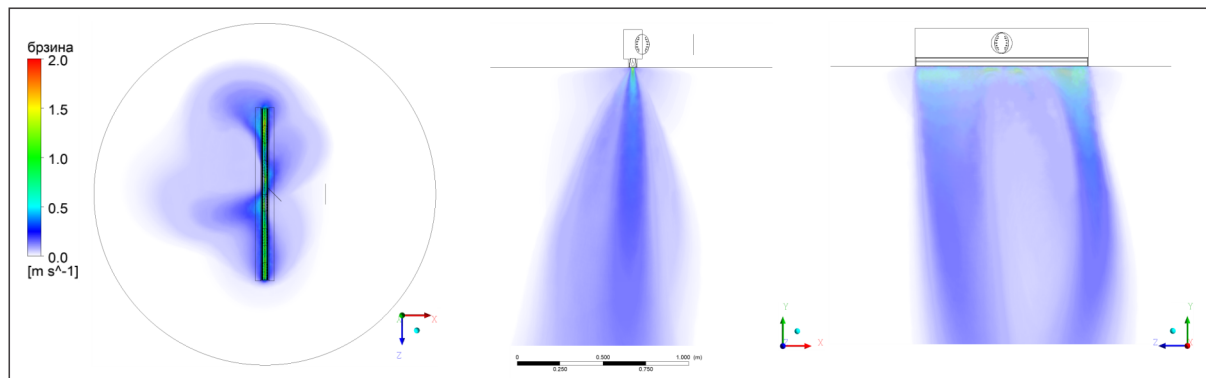
(Г) клапна отворена под углом -45°,
хоризонтална оса

Слика 4.42. Расподела брзине у излазној зони линијског дифузора -
изометријска пројекција ($\dot{V}=75 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)

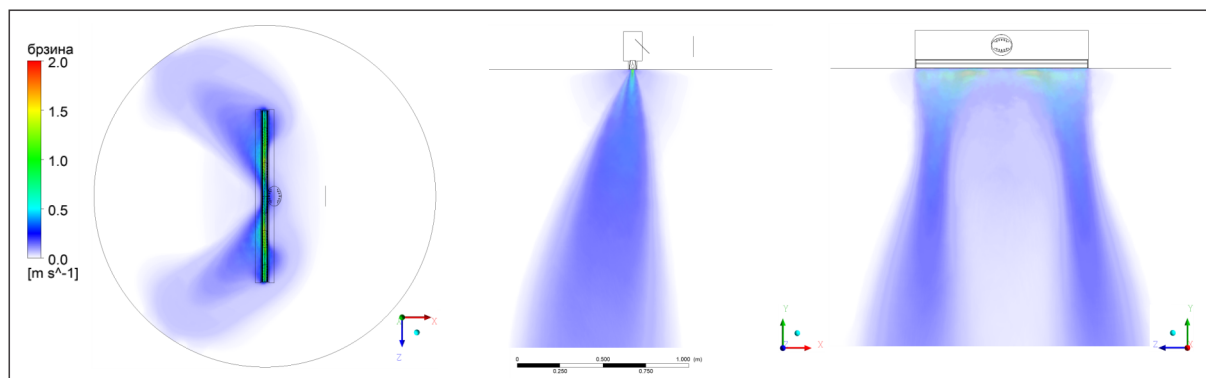
4.4. Утицај регулационе клапне у кутији са бочним прикључком на експанзију млаза код линијских дифузора



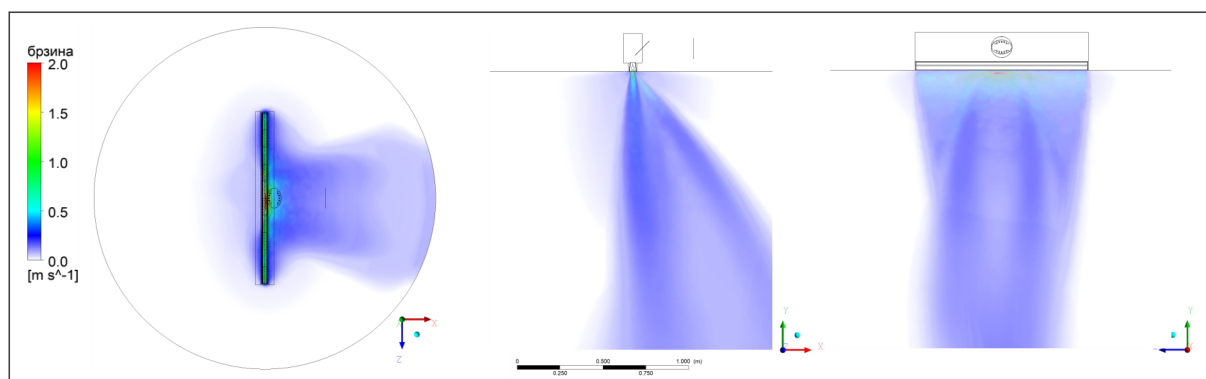
(А) без регулационе клапне



(Б) клапна отворена под углом 45°, вертикална оса

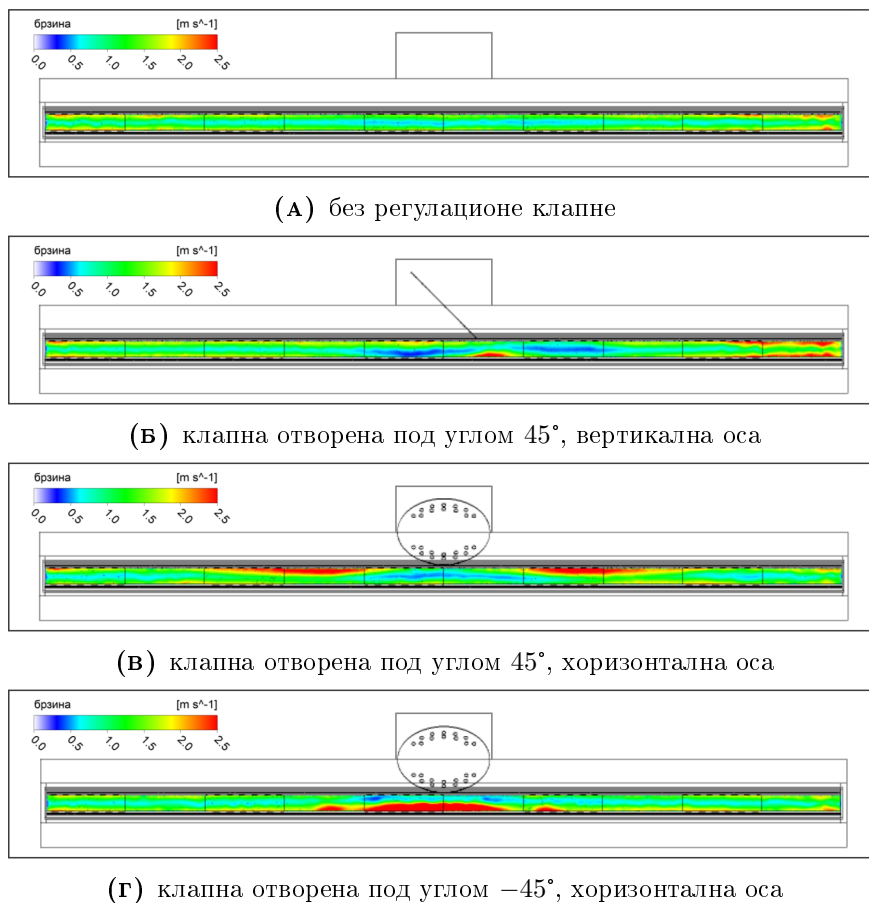


(В) клапна отворена под углом 45°, хоризонтална оса

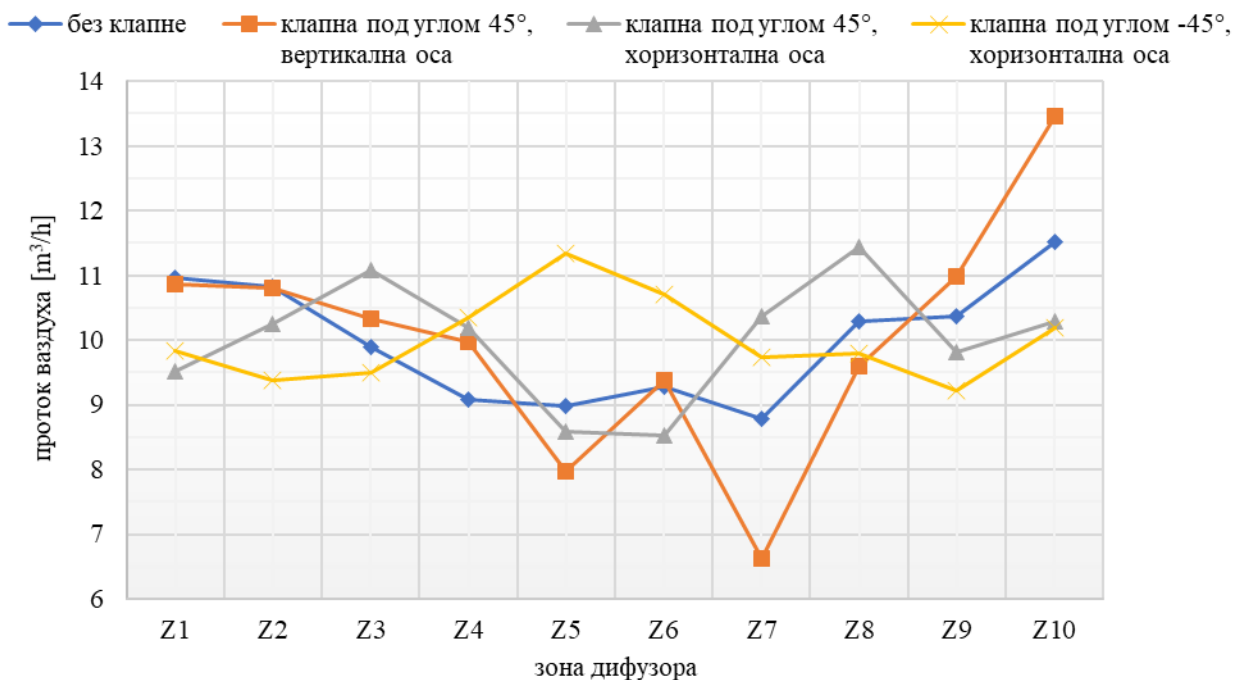


(Г) клапна отворена под углом -45°, хоризонтална оса

Слика 4.43. Распореда брзине у излазној зони линијског дифузора - ортогоналне пројекције ($\dot{V}=75 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)

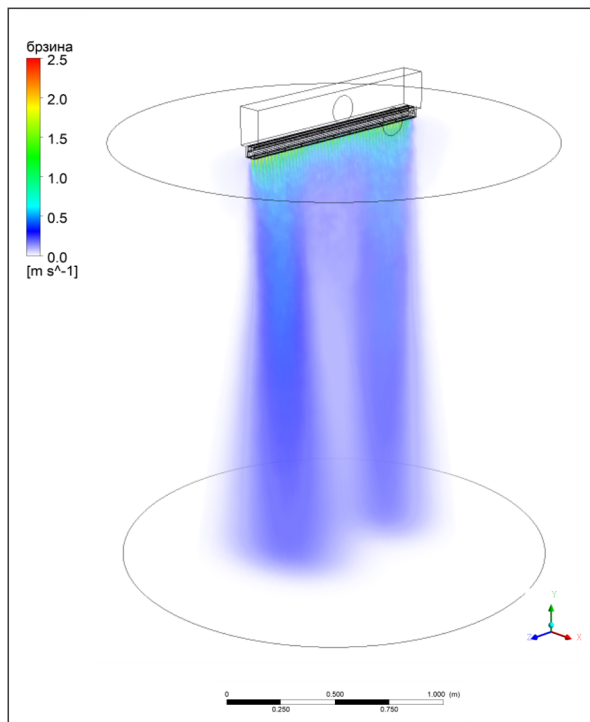


Слика 4.44. Расподела брзине у равни лица линијског дифузора ($\dot{V}=100 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)

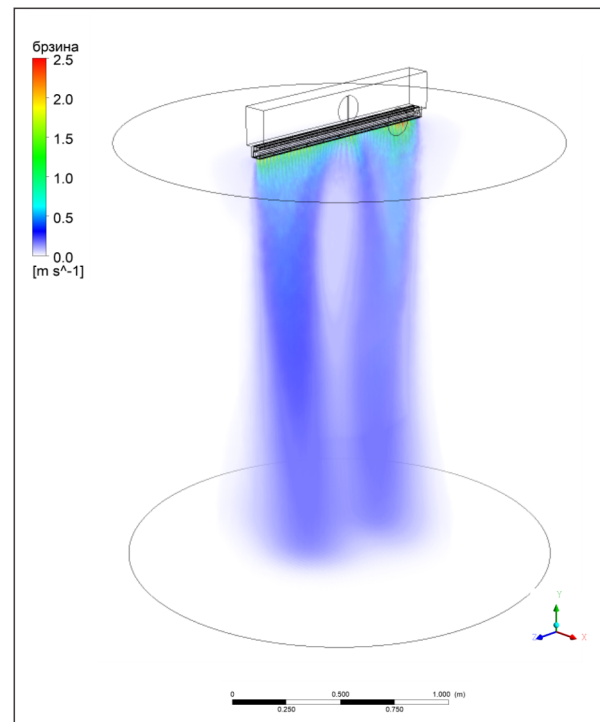


Слика 4.45. Дијаграм расподеле протока кроз карактеристичне зоне линијског дифузора ($\dot{V}=100 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)

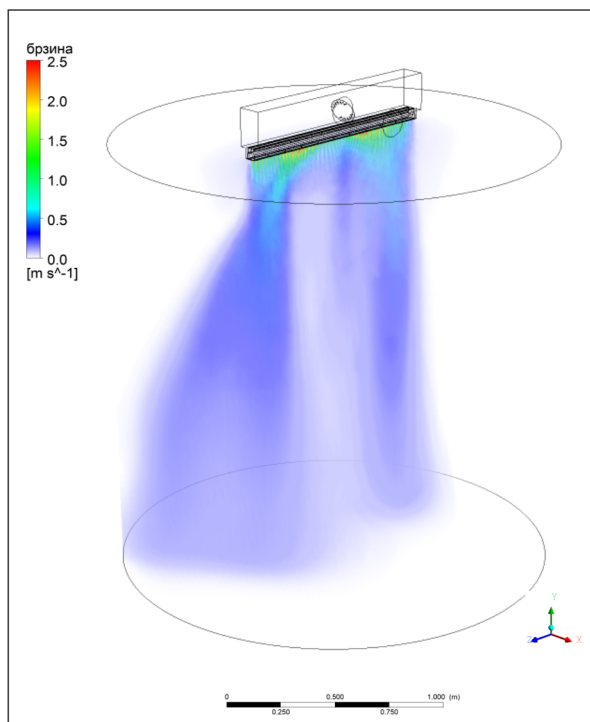
4.4. Утицај регулационе клапне у кутији са бочним прикључком на експанзију млаза код линијских дифузора



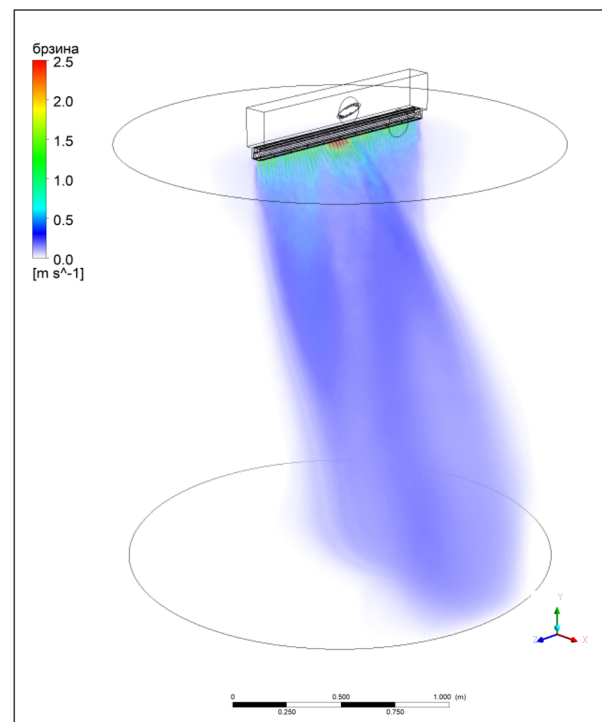
(А) без регулационе клапне



(Б) клапна отворена под углом 45°, вертикална оса

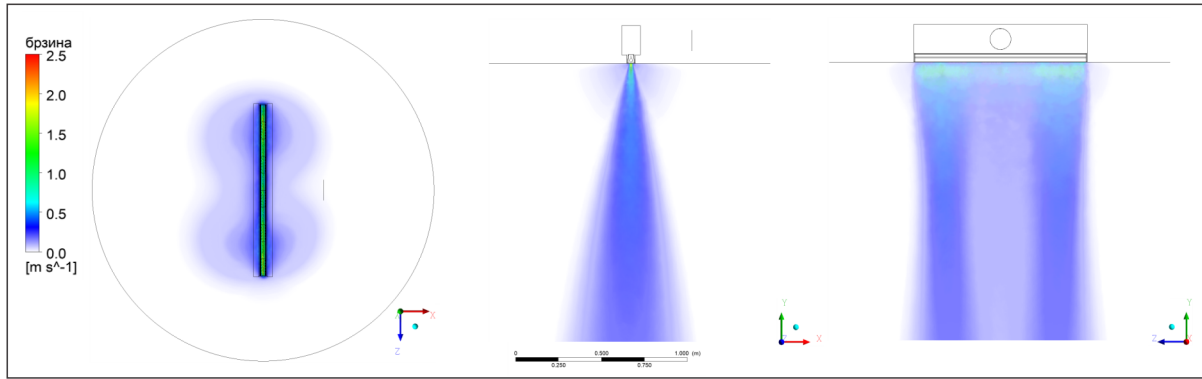


(В) клапна отворена под углом 45°, хоризонтална оса

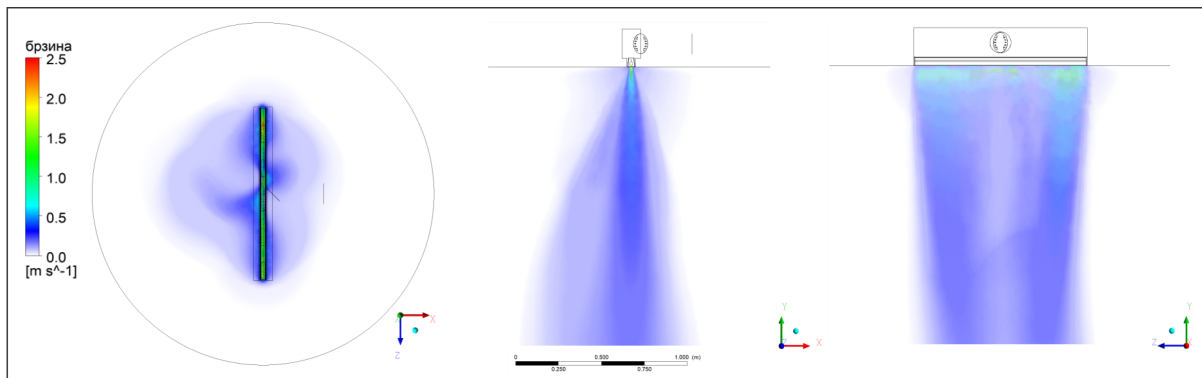


(Г) клапна отворена под углом -45°, хоризонтална оса

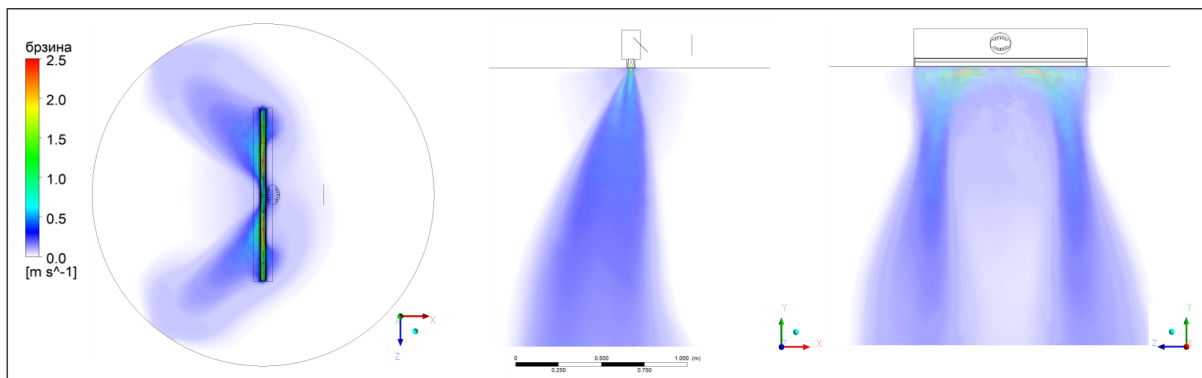
СЛИКА 4.46. Распредела брзине у излазној зони линијског дифузора - изометријска пројекција ($\dot{V}=100 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)



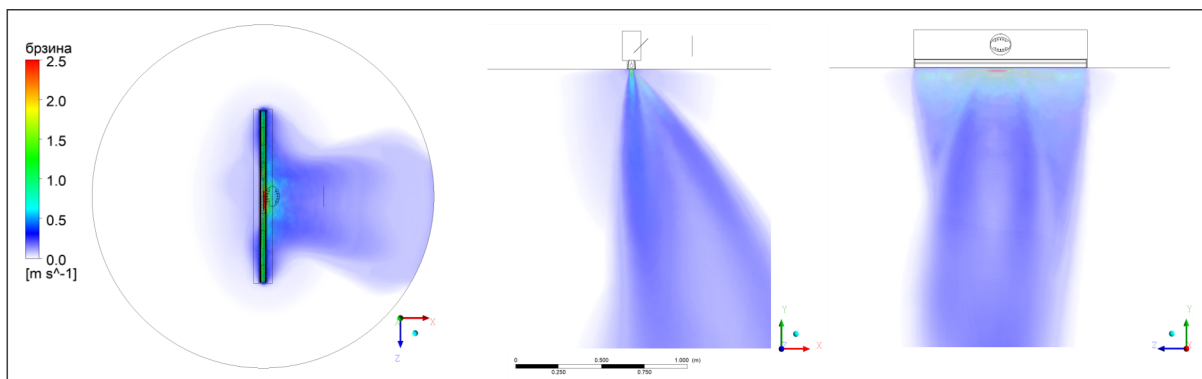
(А) без регулационе клапне



(Б) клапна отворена под углом 45°, вертикална оса



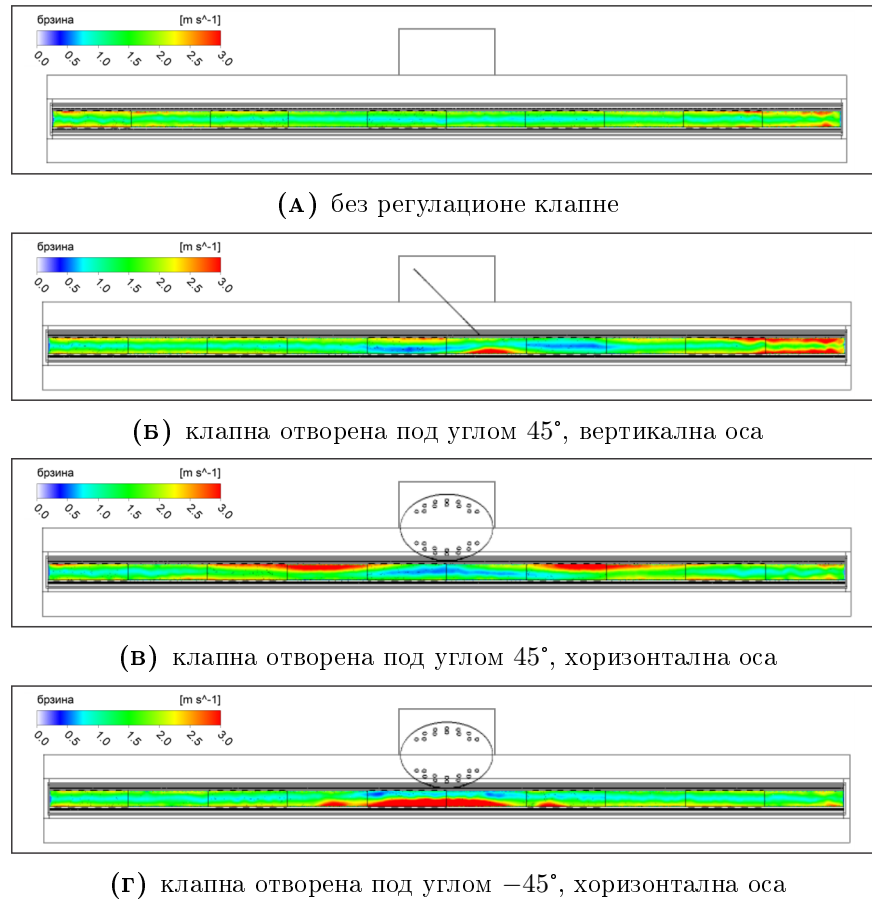
(В) клапна отворена под углом 45°, хоризонтална оса



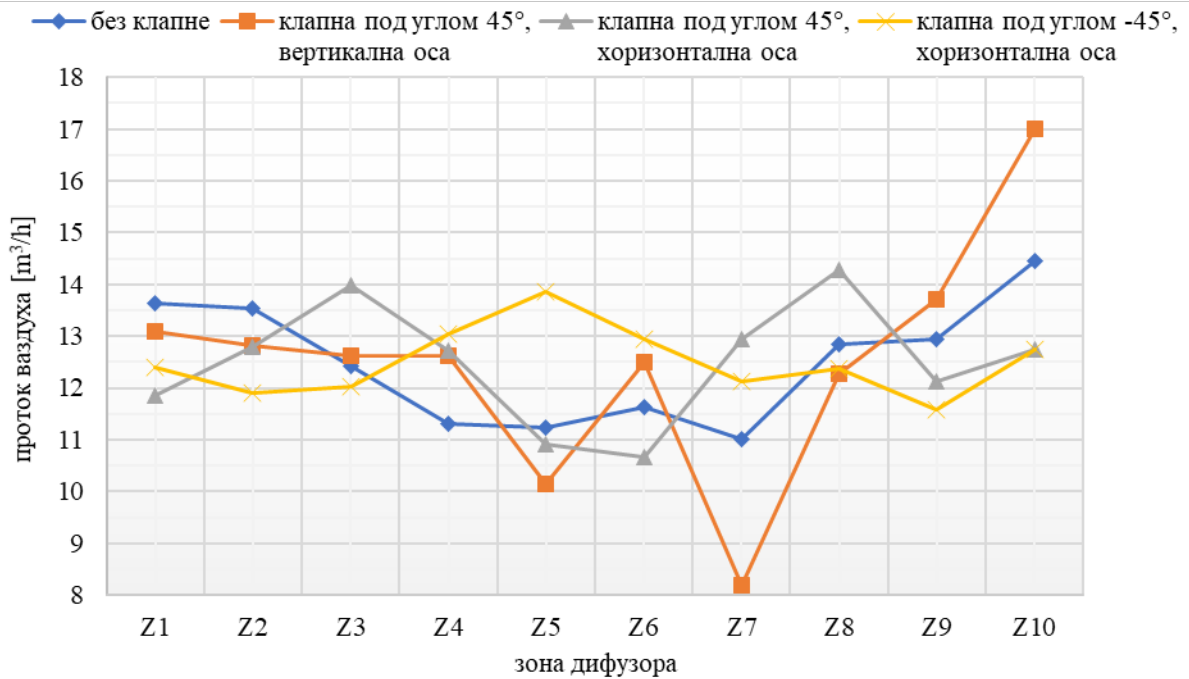
(Г) клапна отворена под углом -45°, хоризонтална оса

Слика 4.47. Расподела брзине у излазној зони линијског дифузора - ортогоналне пројекције ($\dot{V}=100 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)

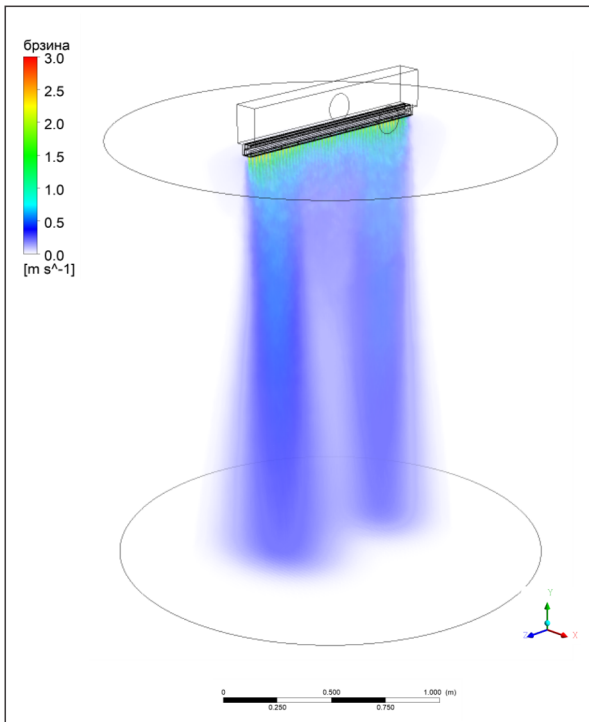
4.4. Утицај регулационе клапне у кутији са бочним прикључком на експанзију млаза код линијских дифузора



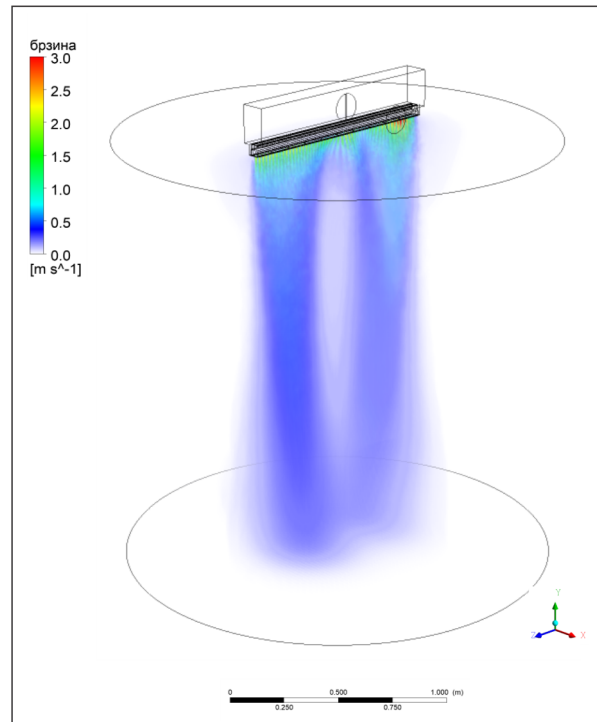
Слика 4.48. Расподела брзине у равни лица линијског дифузора ($\dot{V}=125 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)



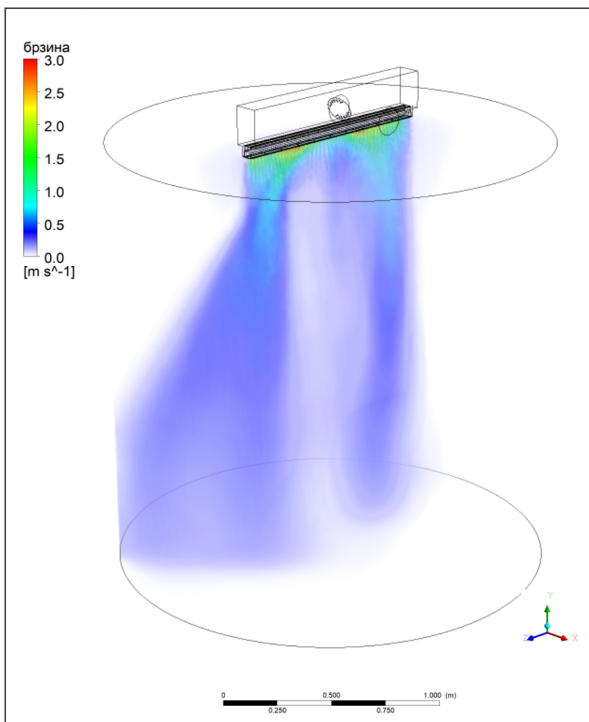
Слика 4.49. Дијаграм расподеле протока кроз карактеристичне зоне линијског дифузора ($\dot{V}=125 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)



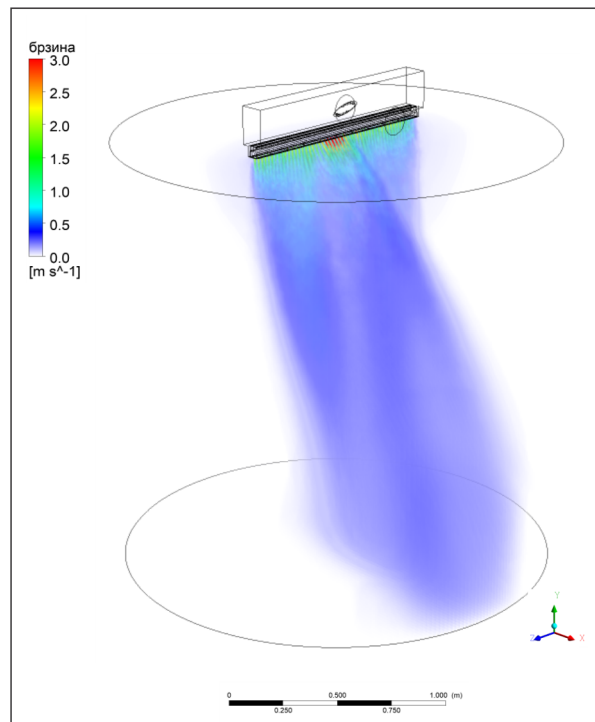
(А) без регулационе
клапне



(Б) клапна отворена под углом 45°,
вертикална оса



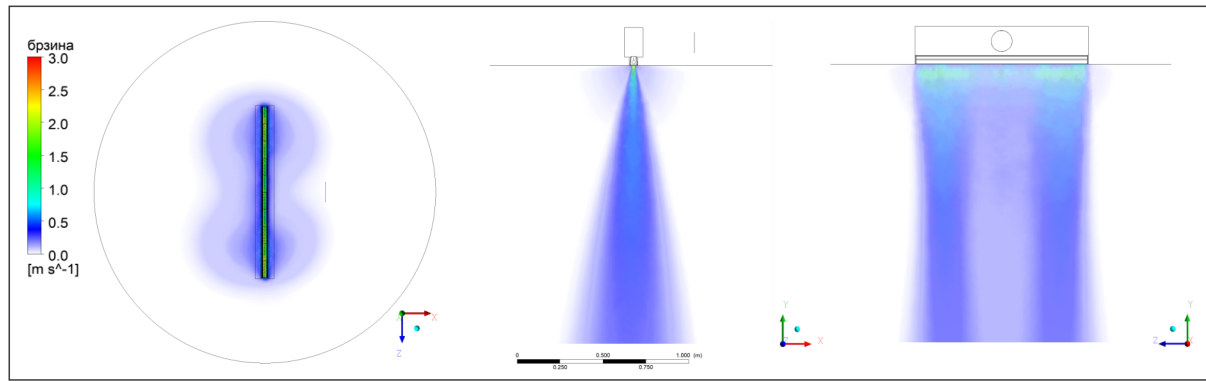
(В) клапна отворена под углом 45°,
хоризонтална оса



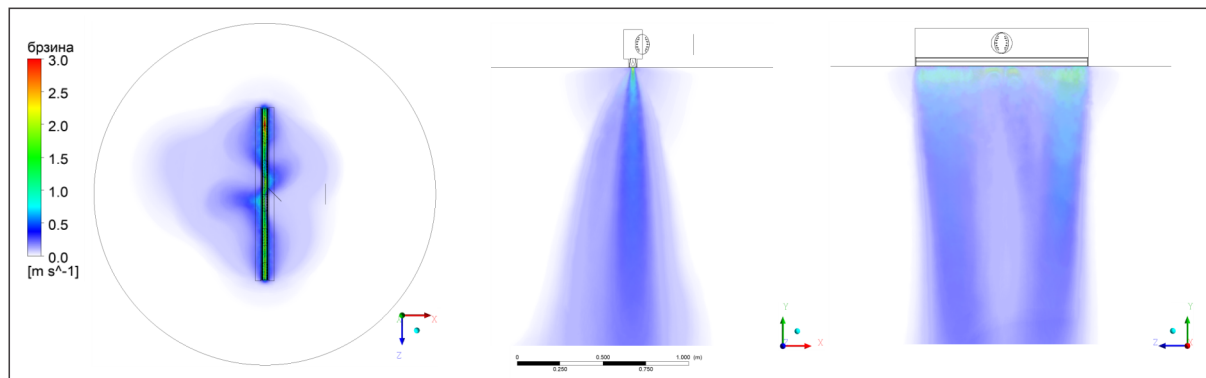
(Г) клапна отворена под углом -45°,
хоризонтална оса

Слика 4.50. Расподела брзине у излазној зони линијског дифузора -
изометријска пројекција ($\dot{V}=125 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)

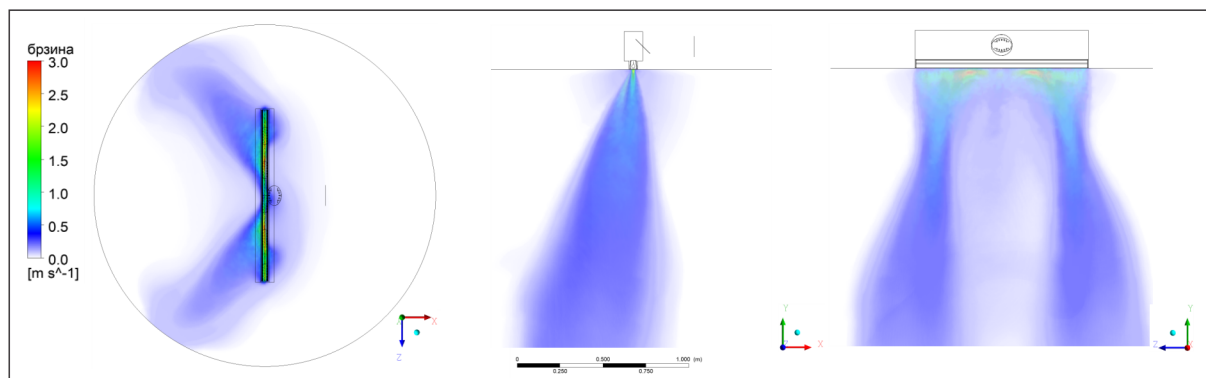
4.4. Утицај регулационе клапне у кутији са бочним прикључком на експанзију млаза код линијских дифузора



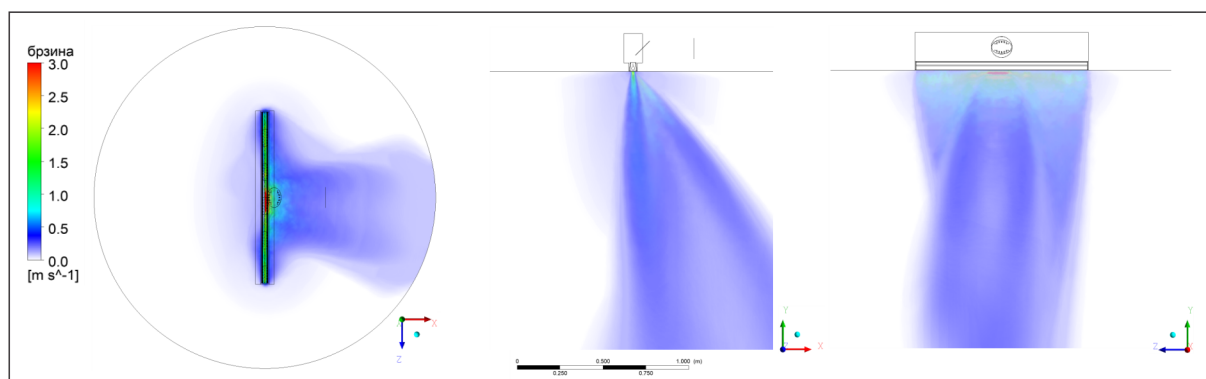
(А) без регулационе клапне



(Б) клапна отворена под углом 45°, вертикална оса



(В) клапна отворена под углом 45°, хоризонтална оса



(Г) клапна отворена под углом -45°, хоризонтална оса

Слика 4.51. Распореда брзине у излазној зони линијског дифузора - ортогоналне пројекције ($\dot{V}=125 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)

4.4.3 Провера квалитета нумеричке мреже

Квалитет нумеричке мреже оцењен је за случај струјања на линијском дифузору са прикључном кутијом и клапном под углом 45° при вертикалној оси ротације, док је проток ваздуха износио $100 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$. Генерисана контролна нумеричка мрежа садржала је око 11,5 милиона ћелија а упоредни резултати су наведени у табели 4.10.

ТАБЕЛА 4.10. Запремински протоци кроз карактеристичне зоне линијског дифузора са стандардном и модификованом мрежом ($\dot{V}=100 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)

ознака зоне линијског дифузора*	Проток ваздуха [m^3/h]		апсолутна грешка $\dot{V}_{stan.} - \dot{V}_{mod.}$ [m^3/h]	релативна грешка $\frac{ \dot{V}_{stan.} - \dot{V}_{mod.} }{\dot{V}_{stan.}}$
	4,7 милиона контр. зап.	11,5 милиона контр. зап.		
Z1	10,87	10,79	0,08	0.0074
Z2	10,81	10,71	0,10	0,0093
Z3	10,33	10,26	0,07	0.0068
Z4	9,98	9,93	0,05	0.0053
Z5	7,98	8,12	-0,14	0.0175
Z6	9,37	9,57	-0,20	0,0213
Z7	6,62	6,78	-0,16	0,0242
Z8	9,60	9,73	-0,13	0,0135
Z9	10,98	10,87	0,11	0,0100
Z10	13,46	13,29	0,17	0,0126

* карактеристичне зоне означене су на слици 4.39

Наведено повећање густине нумеричке мреже са 4,7 на 11,5 милиона контролних запремина даје максималну разлику у протоцима кроз карактеристичне зоне линијског дифузора која износи $0,2 \text{ m}^3/\text{h}$, односно 2,13%, те оно суштински не утиче на тачност добијених резултата.

„Ја осјећам много више но што могу да кажем. Стога вас молим да јачину мојих осјећања не мерите по слабости мојих ријечи. Истргнут сам из послова да амо дођем и још не могу да се ослободим мисли и идеја које ме, ево и овде, прате. У мени има нешто што може бити и обмана, као што чешће бива код младих, одушевљених људи, али ако будем сретан да остварим бар неке од мојих идеала, то ће бити добротинство за цијело човјечанство. Ако се те моје наде испуне, најслађа мисао биће ми та да је то дјело једног Србина. Живило српство!“

Никола Тесла
у Београду, 2. јуна 1892.
на банкету у кафани Смутековац

5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА

5.1 Избор мерне опреме и принципи мерења

Струјо-техничка мерења заузимају важно место у научним и техничким дисциплинама и углавном се базирају на претварању физикалних величина у електрични сигнал помоћу различитих давача, што је коинцидирало са развојем материјала и технологија, применом микромеханике и високог степена интеграције компонената, те великим могућностима у обради информација помоћу средстава микроелектронике (М. Роровић, 2004). У инжењерској пракси, нарочито у области експерименталних истраживања струјања флуида, развијен је велики број мерних метода, техника и уређаја. Експериментална мерења спроведена током овог истраживања извршена су са циљем валидације претходно приказаних резултата нумеричких прорачуна, при чијем извођењу је било неопходно решити проблеме који се односе на избор одговарајуће методологије мерења с обзиром на специфичност појединих случајева што је условило одабиром одговарајуће мерне опреме.

Сходно претходно реченом, релативно мале брзине у зони границе домета млаза код вентилационих решетки мерене су помоћу анемометра са загрејаном жицом (енг. *hot wire anemometer*) будући да је већина доступних метода прилагођена и даје резултате задовољавајуће тачности при мерењу већих брзина. За проверу изотермних услова струјања у наведеном случају мерена је температура ваздуха у каналу 0,5 m испред елемента и у тачкама мерења брзине у млазу. Према упутима из норме SRPS EN 12238 (2010), изотермним струјањем у вентилацији сматра се оно код којег се температура ваздуха не разликује више од 2 °C током периода од 5 минута, пре и за време мерења.

Експериментално одређивање протока кроз карактеристичне зоне четвоространог плафонског анемостата извршено је помоћу протокометра са захватном хаубом при чему су подаци засновани на осредњеном пољу динамичког притиска у зони мерног прстена. Резултати су прикупљани током временског периода од 5 минута са фреквенцијом узорковања 1 Hz а затим је извршено њихово осредњавање. Слично је учињено и у случају одређивања протока кроз означене зоне линијског дифузора где је коришћењем анемометарске сонде са пропелером извршено мерење брзине струјања за дати проток сведен на пречник сонде. Мерење протока у доводном каналу извршено је по методи поља брзина помоћу статичке Питоове сонде према SRPS ISO 3966 (2013).

5.2 Мерни инструменти

Приликом експерименталних испитивања утицаја геометрије дистрибутивних елемената на карактеристике формираног млаза температура и релативна влажност ваздуха у доводном каналу мерени су помоћу каналског термохигрометра произвођача Testo-Немачка, модел 605-Н1. Уређај мери температуру у опсегу -20°C до $+50^{\circ}\text{C}$, са тачношћу $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ и резолуцијом $0,1^{\circ}\text{C}$, док је прецизност читавања релативне влажности $\pm 3\%$ са резолуцијом $0,1\%$ и опсегом мерења од 5% до 95% .

Мерење брзине и температуре у слободном млазу остварено је помоћу телескопске анемометарске сонде са загрејаном жицом, модел Testo 0636 1025, са мултифункционалним инструментом за читавање Testo 435-4. Мерни интервал брзина је 0 до 20 m/s , тачности $\pm 0,03\text{ m/s} \pm 5\%$ од мерне вредности, док је распон мерења температуре -20°C до $+70^{\circ}\text{C}$ са тачношћу $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$. Резолуција уређаја је $0,01\text{ m/s}$ за брзину и $0,1^{\circ}\text{C}$ за температуру. Са овим мерним комплетом коришћена је и анемометарска сонда са пропелером пречника 60 mm , модел Testo 0635 9335, опсега мерења $0,25$ до 20 m/s и тачности $\pm 0,1\text{ m/s} \pm 1,5\%$ од мерене вредности. Инструмент је повезан са рачунаром, а архивирање и обрада података, тј. осредњавање читаних вредности у времену, остварена је помоћу комерцијалног софтвера Comfort Software, верзија 3.4, SP6, шифра 0501 1035, такође произвођача Testo.

За добијање протока ваздуха примењен је протокометар са захватном хаубом, модел DVM610, серијски број 13100889, произвођача КИМО-Француска. У почетном делу, захватна хауба је квадратног пресека димензија $610 \times 610\text{ mm}$, и своди се на базу по чијој површини је распоређено 48 мерних тачака, а разлика осредњених вредности притисака мери се помоћу сензора диференцијалног притиска калибрисаног на температури $20,4^{\circ}\text{C}$ и релативној влажности ваздуха $46,1\%$ при атмосферском притиску $101,9\text{ kPa}$. Такође, у зони струјања ваздуха налази се сензор температуре. Уз наведени сет опреме, за мерење одговарајућих притисака у доводном каналу, коришћена је Пито-статичка сонда L типа, модел 12974, дужине 300 mm и спољашњег пречника $d = 6\text{ mm}$, са елипсоидним носом и шест рупица за мерење статичког притиска удаљених од носа сонде за $8d$. Мерни опсег уређаја при читавању протока је 40 до $3500\text{ m}^3/\text{h}$, а тачност мерења износи $\pm 10\text{ m}^3/\text{h} \pm 3\%$ измерене вредности, при резолуцији $1\text{ m}^3/\text{h}$, док је распон мерења температуре 0 до 50°C са тачношћу $\pm 0,1^{\circ}\text{C} \pm 2\%$ вредности мерења, резолуције читавања $0,1^{\circ}\text{C}$. У

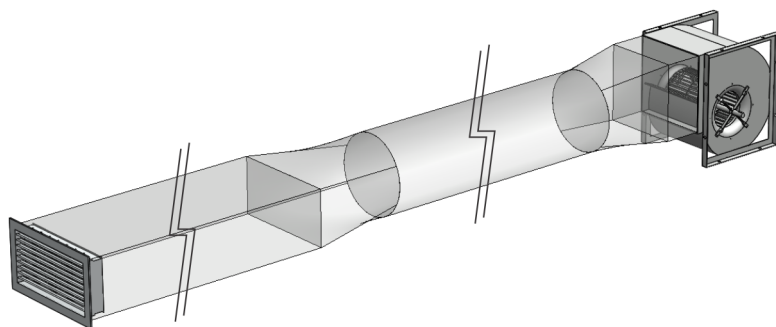


Слика 5.1. Мерна опрема

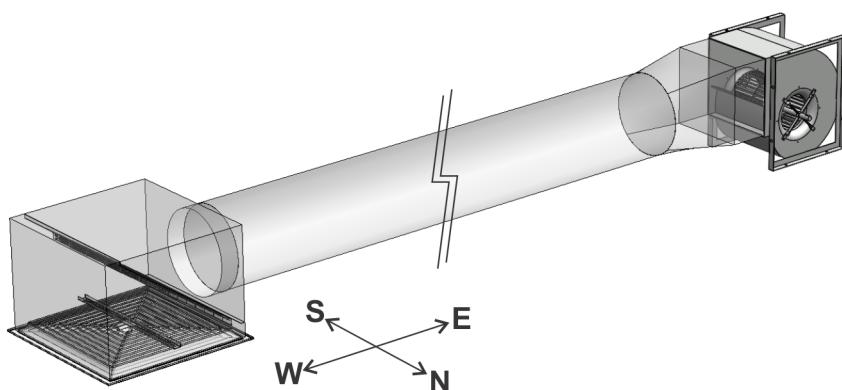
режиму рада микроманометра, уређај мери разлику притисака у интервалу -2500 Pa до 2500 Pa , са тачношћу $\pm 2 \text{ Pa} \pm 0,2 \%$ од мерне вредности и са резолуцијом $0,001$ до $0,1 \text{ Pa}$. Поред свега, инструмент нуди могућност аутоматског осредњавања мерених вредности у времену при чему је брзина узорковања 1 Hz . Описани елементи дати су на слици 5.1.

5.3 Мерне инсталације

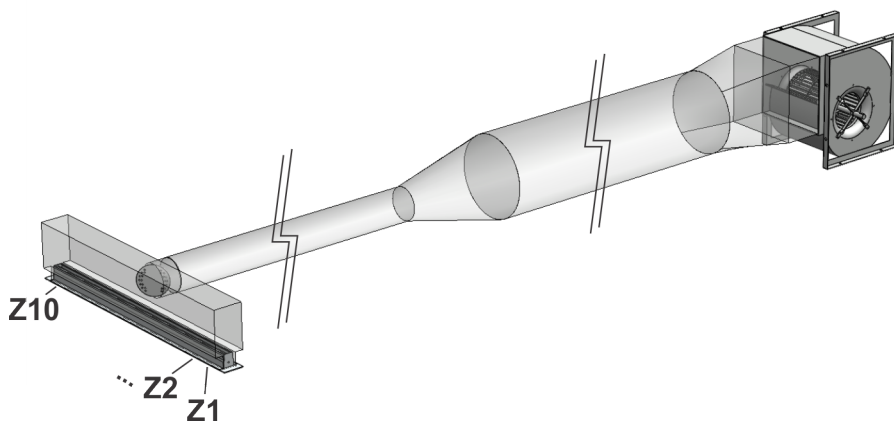
Мерне инсталације генерално се састоје од генератора струјања, доводног канала и испитног елемента. Струјање ваздуха остварено је помоћу центрифугалног вентилатора, тип BDB произвођача S&P-Шпанија, са величином радног кола 200 mm , смештеним у кућиште и погоњеним четворополним трофазним електромотором номиналне снаге $0,75 \text{ kW}$. При мерењу протока кроз карактеристичне зоне плафонског анемостата, доводни канал је целом дужином од 6 m пречника 315 mm (слика 5.26), док је у преостала два случаја први, односно почетни део канала у дужини од 3 m исте димензије, а други је прилагођен испитиваном елементу, при чему је промена геометрије пресека извршена континуално и симетрично у односу на централну осу. Код испитивања млаза на вентилационој решетци завршни део канала је правоугаоног облика димензија $420 \times 220 \text{ mm}$ у дужини 4 m (слика 5.2а), док је при мерењу на линијском дифузору сведен на пречник 125 mm дужине 3 m (слика 5.2в). Непосредно иза вентилатора, на почетку доводног канала, по целој површини његовог пресека постављен је полиуретански филтер са циљем умирења струје ваздуха и што ранијег успостављања развијеног турбулентног профила брзине. Жељени проток постигнут је комбинацијом промене напора помоћу демпера са супротносмерним лопатицама постављеног на усисној страни кутије са вентилатором и променом броја обртаја вентилатора, односно електромотора, који је напајан из фреквентног регулатора типа SINUS M, производње SIEMENS. Једна од инсталација за мерење приказана је на слици 5.3



(А) испитивање млаза на вентилационим решеткама



(Б) испитивање млаза на четвоространом анемостату

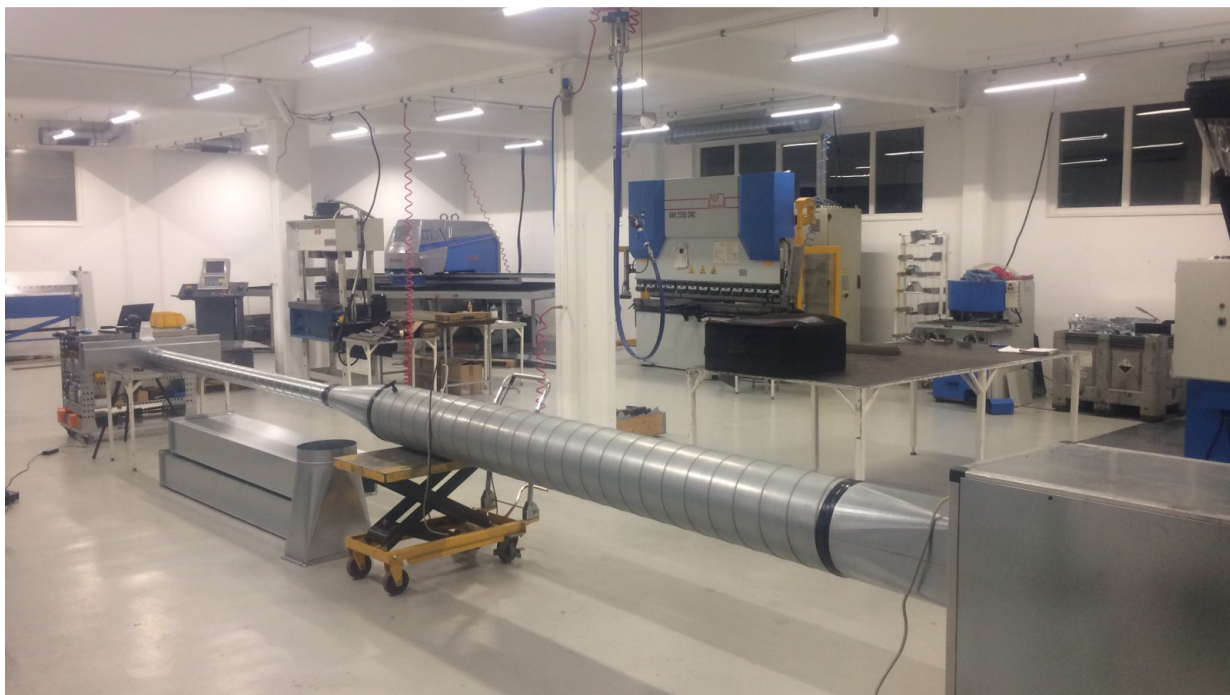


(В) испитивање млаза на линијском дифузору

Слика 5.2. Шеме мерних инсталација

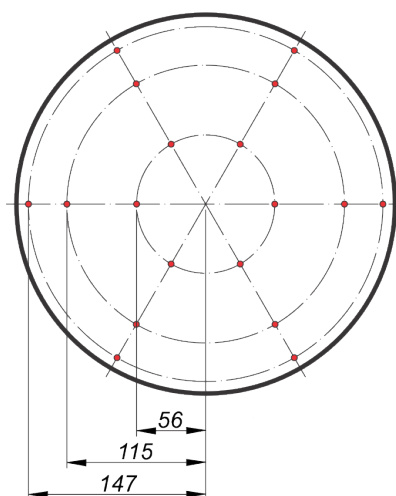
5.4 Поступак мерења

Мерења започињу подешавањем протока на основу протокометра постављеног на усисној страни кућишта вентилатора, док је провера извршена мерењем у доводном каналу које је вршено по log-linear методи помоћу статичке Питоове сонде према стандарду SRPS ISO 3966 (2013). Стандардом је предвиђено да су мерне тачке у мерном пресеку кружног канала распоређене на минимум два мерна пречника постављена под углом од



Слика 5.3. Инсталација за испитивање струјања на линијском дифузору

90°, са по минимум три мерне тачке дуж једног радијуса, што подразумева бар 12 тачака мерења. У оквиру овог рада мерења су спроведена на три мерна пречника постављена под углом од 60°, односно било је укупно 18 мерних тачака које су распоређене као на слици 5.4. На тај начин врши се мерење разлике тоталног и статичког притиска, односно динамички притисак који се користи за одређивање брзине струјања у одређеној мерној тачки. Имајући у виду да сонда не уноси значајан поремећај у струјном простору јер је испуњен стандардом прописани захтев да је $d/D_h=6/315=0,019 < 0,02$, где је D_h хидраулички пречник канала, калибрација није потребна, односно калибрациони



Слика 5.4. Распоред мерних тачака у пресеку доводног канала при одређивању протока

коэффициент је 1. Према томе, локална брзина при континуалном струјању одређена је изразом

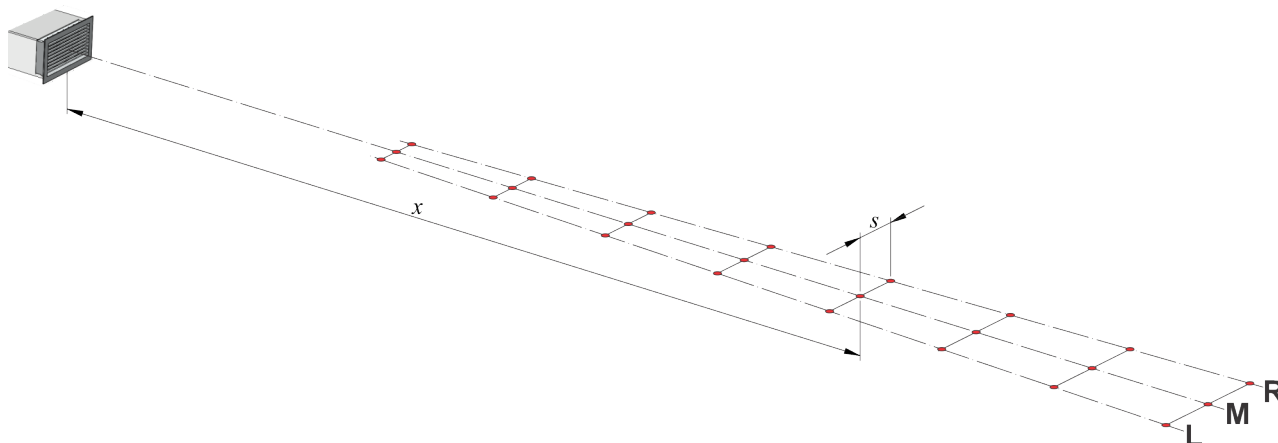
$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \tag{5.1}$$

при чему је густина ваздуха ρ процењена према $h - x$ дијаграму за влажан ваздух на основу измерене температуре и релативне влажности ваздуха за атмосферски притисак 101,3 kPa. Средња брзина дуж посматраног радијуса одређена је као аритметичка средина у мерним тачкама на том радијусу, док је проток израчунат преко укупне средње брзине. У зависности од анализираног случаја, тако добијене вредности протока разликовале су се од предвиђених за максимално 1,73%.

Мерење брзине у млазу формираном на вентилационој решетки при различитим степенима отворености регулатора спроведено је за номинални проток 550 m³/h. Глава телескопске сонде чврсто везане за треножни сталак постављана је на растојањима 3 до 10 m од равни лица решетки, са кораком 1,0 m, при чему је на сваком мерном растојању било по три мерне тачке распоређене у хоризонталној симетралној равни, једна у оси млаза дуж М правца, а друге две дуж праваца L и R симетрично на растојању s како је то наведено у табели 5.1 и приказано на слици 5.5. Свако мерење изведено је у трајању од 60 секунди са фреквенцијом узорковања 1 Hz након чега је извршено временско осредњавање прикупљених резултата, а за брзину у млазу на датом растојању x узета је максимална од тако добијене три вредности.

ТАБЕЛА 5.1. Распоред мерних тачака при мерењу брзине у млазу

растојање x [m]	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
ширина s [m]	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50

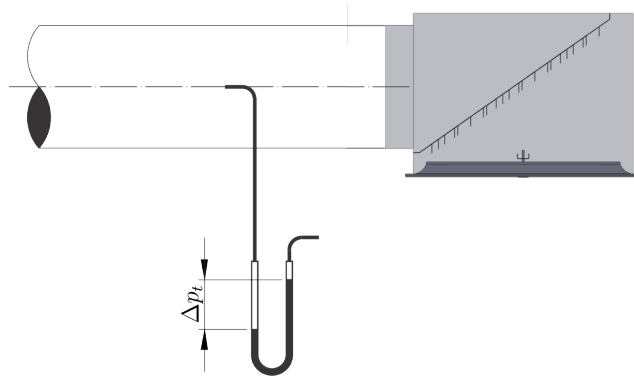


Слика 5.5. Распоред мерних тачака при мерењу брзине у млазу (L, M и R представљају правце мерења)



Слика 5.6. Мерење брзине струјања у млазу на вентилационој решетки

Експериментална анализа равномерности протока кроз карактеристичне зоне четвоространог плафонског дифузора монтираног на прикључну кутију са бочним прикључком изведена је при номиналном протоку $1000 \text{ m}^3/\text{h}$, и то за геометрије приказане на слици 4.20. За потребе мерења, у равни лица дифузора до растојања 700 mm од његових крајњих ивица постављена је чврста површина као део таванице у реалној ситуацији. Симетрично на све четири стране остварена је могућност монтаже угаоног граничника како би се захватна хауба поставила увек у исти положај у односу на посматрану четвртину елемента тако да кроз њу пролази само ваздух који иструјава кроз ту површину, док су преостале три зоне слободне. Прикупљање резултата за сваки од наведених случајева вршено је током периода од 5 минута при фреквенцији 1 Hz , а затим су временски осредњени. За утврђивање и поређење аеродинамичких карактеристика наведених облика дефлектора мерени су падови тоталног притиска помоћу Пито-статичке сонде постављене у оси канала на растојању $0,5 \text{ m}$ испред улазног прикључка. Крај сонде на коме се детектује тотални притисак повезан је са позитивним прикључком микроманометра, док је његов негативан прикључак на атмосферском притиску како је то симболично дато на слици 5.7.



Слика 5.7. Шематски приказ мерења пада тоталног притиска на плафонском дифузору са прикључном кутијом

Код испитивања униформности протока по целој дужини процепа линијског дифузора примењена је аналогија са претходно описаним примером, с тим да је циљани укупан проток $100 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$. За реализацију експеримента направљен је елемент налик захватној хауби којим се целокупан проток на дужини процепа 100 mm , односно кроз једну посматрану зону линијског дифузора, своди на кружни пресек пречника 60 mm на којем је постављена анемометарска сонда са пропелером, слика 5.8. Тако добијени подаци о брзинама струјања прикупљани су у интервалу од 60 секунди, и то по један сваке секунде, а затим су временски осредњени. Проток је израчунат преко средње брзине.



Слика 5.8. Мерење протока дуж отвора на линијском дифузору

5.5 Резултати експерименталних мерења

5.5.1 Брзине у слободном млазу формираном на зидној решетки

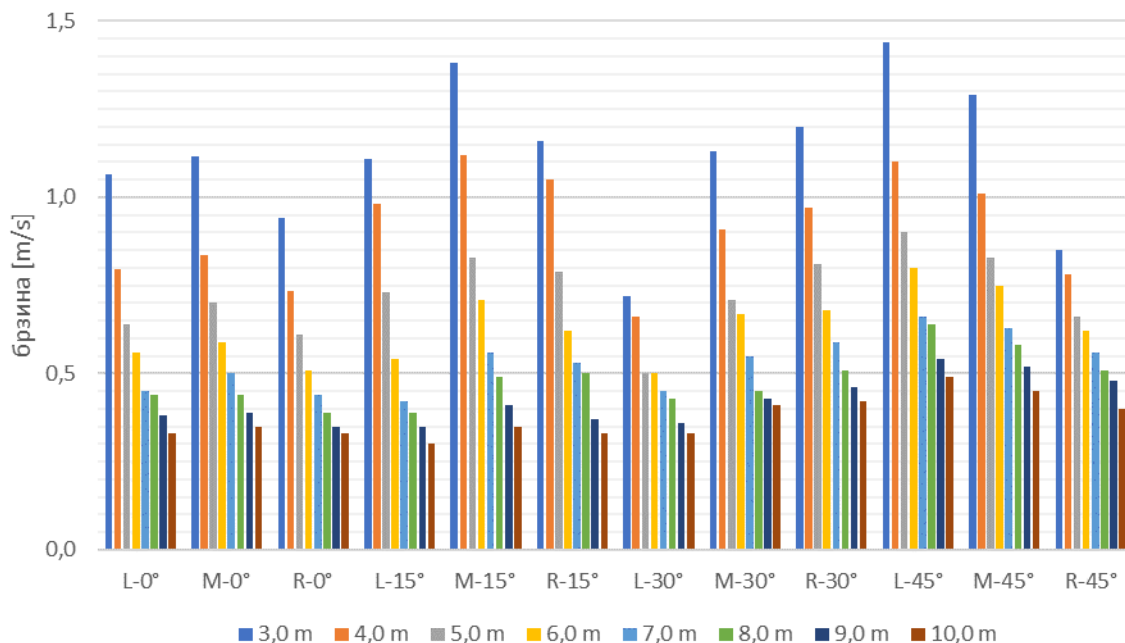
Приказани резултати интензитета брзине у млазу који слободно иструјава на вентилационој решетки при различитим степенима отворености регулатора протока представљају аритметичку средину вредности срачунату на основу извршена два мерења. Максимална разлика измерене вредности протока у доводном каналу према већ описаној процедури разликовала се од номинално задате за највише 1,27% и то у првом мерењу при углу лопатица регулатора 30°. Добијене вредности интензитета брзине у задатим тачкама дуж праваца L, M и R упоредо су приказане у табели 5.2, као и дијаграмом на слици 5.9, док су детаљни подаци о измереним брзинама дати у прилогу I.

ТАБЕЛА 5.2. Измерене вредности интензитета брзине у слободном млазу на вентилационој решетки при различитим угловима отворености демпера ($\dot{V}=550 \text{ m}^3/\text{h}$)

правац мерења*	распојање x[m]							
	3	4	5	6	7	8	9	10
лопатице регулатора под углом 0°								
	**							
L	1,07	0,80	0,64	0,56	0,45	0,44	0,38	0,33
M	1,12	0,84	0,70	0,59	0,50	0,44	0,39	0,35
R	0,94	0,74	0,61	0,51	0,44	0,39	0,35	0,33
лопатице регулатора под углом 15°								
L	1,11	0,98	0,73	0,54	0,42	0,39	0,35	0,30
M	1,38	1,12	0,83	0,71	0,56	0,49	0,41	0,35
R	1,16	1,05	0,79	0,62	0,53	0,50	0,37	0,33
лопатице регулатора под углом 30°								
L	0,72	0,66	0,50	0,50	0,45	0,43	0,36	0,33
M	1,13	0,91	0,71	0,67	0,55	0,45	0,43	0,41
R	1,20	1,05	0,81	0,68	0,59	0,51	0,46	0,42
лопатице регулатора под углом 45°								
L	1,44	1,10	0,90	0,80	0,66	0,64	0,54	0,49
M	1,29	1,01	0,83	0,75	0,63	0,58	0,52	0,45
R	0,85	0,78	0,66	0,62	0,56	0,51	0,48	0,40

* правци мерења приказани су на слици 5.5

** угао лопатица 0° одговара потпуно отвореном демперу



Слика 5.9. Измерене вредности интензитета брзине у слободном млазу на вентилационој решетки при различитим угловима отворености демпера ($\dot{V}=550 \text{ m}^3/\text{h}$)

Приказани резултати потврђују претпоставку о повећању брзине у млазу при смањењу отворености демпера, али указују и на одређену девијацију млаза. Наиме, при потпуно отвореном регулатору, као и код угла лопатица 15° , максималне брзине појављују се дуж правца М, док је то код 30° дуж правца R, односно код 45° дуж правца L. Према томе, може се закључити да регулатор протока не утиче само на повећање брзине у млазу, већ и на његову симетрију. Осом тога, евидентно је да ће у коначном случају веће вредности брзине са смањењем отворености регулатора довести и до повећаног домета.

5.5.2 Протоци кроз карактеристичне зоне четвоространог анемостата и аеродинамичке карактеристике дефлектора

Збир измерених вредности протока кроз означене области анемостата разликовао се од номинално задате за максимално 2,82%, за случај разматрања утицаја неуниформно перфорираног дефлектора. У циљу каснијег поређења експерименталних резултата са нумеричким, добијене вредности су пропорционално кориговане како би њихов збир износио $1000 \text{ m}^3/\text{h}$, а резултати су упоредо наведени у табели 5.3. Нека од мерења су поновљена како би се утврдила поновљивост прикупљених података, којом приликом је констатовано да се они разликују од првобитно измерених за мање од 0,4%.

Подаци о паду тоталног притиска за различите геометрије дефлектора дати су у табели 5.4. Као што је и очекивано, максималан губитак притиска јавља се када је у прикључној кутији постављен неуниформно перфориран дефлектор, док у случајевима

ТАБЕЛА 5.3. Измерене апсолутне и процентуалне вредности протока ваздуха кроз карактеристичне зоне четвоространог анемоштата ($\dot{V}=1000 \text{ m}^3/\text{h}$)

ознака зоне анеомштата *	без дефлектора		униформно перфориран дефлектор		неуниформно перфориран дефлектор		дефлектор са усмеравајућим лопатицама	
	m^3/h	%	m^3/h	%	m^3/h	%	m^3/h	%
E	199	19,9	173	17,3	250	25,0	237	23,7
W	332	33,2	302	30,2	263	26,3	263	26,3
N	230	23,0	263	26,3	246	24,6	246	24,6
S	239	23,9	262	26,2	241	24,1	254	25,4

* карактеристичне зоне означене су на слици 4.23

када нема дефлектора, односно код дефлектора равномерне пропустљивости и плоче са усмеравајућим лопатицама разлика готово да и не постоји.

ТАБЕЛА 5.4. Падови тоталног притиска за различите геометрије дефлектора ($\dot{V}=1000 \text{ m}^3/\text{h}$)

тип дефлектора	пад тоталног притиска $\Delta p_t [\text{Pa}]$
без дефлектора	23
униформно перфориран дефлектор	25
неуниформно перфориран дефлектор	35
дефлектор са усмеравајућим лопатицама	24

5.5.3 Расподела протока дуж иструјног отвора линијског дифузора

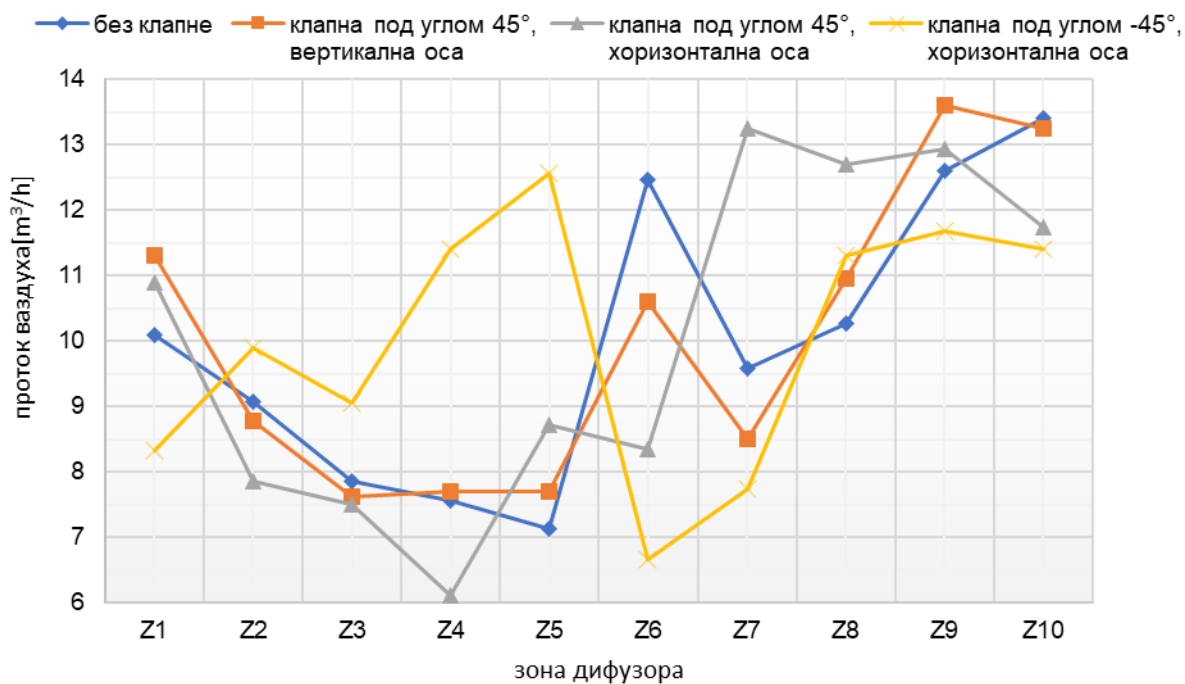
Слично као и у претходно описаном случају, сума протока срачунатих преко осредњене брзине струјања кроз главу сонде са пропелером била је већа од номиналне за максимално 4,26% па су исти процентуално кориговани како би њихов збир износио $100 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}$, а резултати су наведени у табели 5.5 и представљају просечне вредности добијене на основу извршена два мерења. Највећа разлика у резултатима протока добијена у ова два мерења појавила се у случају регулационе клапне постављене под углом 45° при вертикалној оси ротације, и то у зони Z7 за 8,21%, што је мање од грешке мерења услед тачности мерног инструмента која за дато мерење износи $\pm 8,94\%$.

Иако су, осим у случају регулационе клапне постављене под углом 45° у односу на вертикалну осу ротације, сви разматрани проблеми апсолутно симетричне геометрије, те је сходно томе и очекивано да протоци дуж процепа линијског дифузора буду приближно симетрични, резултати добијени мерењима показују изразиту асиметрију што се најбоље може уочити на дијаграму 5.10. Највеће разлике појављују се међу зонама у централној области дифузора и углавном се смањују идући ка крајевима.

ТАБЕЛА 5.5. Измерене апсолутне и процентуалне вредности протока ваздуха кроз карактеристичне зоне линијског дифузора ($\dot{V}=100 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)

ознака зоне линијског дифузора*	без регулационе клапне		клапна отворена под углом 45°, вертикална оса		клапна отворена под углом 45°, хоризонтална оса		клапна отворена под углом -45°, хоризонтална оса	
	m ³ /h	%	m ³ /h	%	m ³ /h	%	m ³ /h	%
Z1	10,09	10,1	11,30	11,3	10,89	10,9	8,33	8,3
Z2	9,08	9,1	8,77	8,8	7,85	7,9	9,89	9,9
Z3	7,86	7,9	7,62	7,6	7,50	7,5	9,06	9,5
Z4	7,56	7,6	7,69	7,7	6,11	6,1	11,40	11,4
Z5	7,13	7,1	7,69	7,7	8,71	8,7	12,56	12,6
Z6	12,47	12,5	10,61	10,6	8,34	8,3	6,66	6,7
Z7	9,58	9,6	8,50	8,5	13,24	13,2	7,73	7,7
Z8	10,27	10,3	10,95	11,0	12,69	12,7	11,30	11,3
Z9	12,60	12,6	13,61	13,6	12,94	12,9	11,67	11,7
Z10	13,40	13,4	13,25	13,3	11,74	11,7	11,40	11,4

* карактеристичне зоне означене су на слици 4.39



Слика 5.10. Измерене вредности протока кроз карактеристичне зоне линијског дифузора ($\dot{V}=100 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)

„Часови, што сам их међу њима провео у Београду, то су заиста најлепши часови живота мога. Велика је била слава моја и у Лондону и у Паризу. Цвијет свијетске аристократије у духу није већ знао како да ме одликује. Али што су ти сви осјећаји према онијем осјећајима што сам их тада осјећао? То ми најбоље казује да ме с онијем људима друге везују везе. Те друге везе јесу везе српске крви моје.“

Никола Тесла,
лета Господњег 1892.
напуштајући Беч на путу за Париз

6

ПОРЕЂЕЊЕ НУМЕРИЧКИХ И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ РЕЗУЛТАТА

6.1 Брзине у слободаном млазу формираном на зидној решетки

У циљу поређења нумеричких и експерименталних вредности брзине струјања у оси млаза који иструјава из вентилационе решетке при различитим степенима отворености регулатора протока, а имајући у виду његово одређено хоризонтално одступање од вертикалне симетралне равни зависно од случаја, за упоредне експерименталне вредности узете су максималне брзине на одговарајућем растојању без обзира на правац у ком су оне измерене. Одговарајуће вредности наведене су у табели 6.1.

ТАБЕЛА 6.1. Симулиране и измерене вредности максималне брзине млаза у зависности од степена отворености демпера ($\dot{V}=550 \text{ m}^3/\text{h}$)

растојање $x[\text{m}]$	Максимална брзина $[\text{m}/\text{s}]$		апсолутна грешка $\bar{v}_{x, \text{sim.}} - \bar{v}_{x, \text{mer.}}$ $[\text{m}/\text{s}]$	релативна грешка $\frac{ \bar{v}_{x, \text{sim.}} - \bar{v}_{x, \text{mer.}} }{\bar{v}_{x, \text{sim.}}}$	апсолутна грешка мерења $[\text{m}/\text{s}]$
	симулирано $\bar{v}_{x, \text{sim.}}$	измерено $\bar{v}_{x, \text{mer.}}$			
лопатице регулатора под углом 0° *					
3	1,28	1,12	0,16	0,1250	$\pm 0,09$
4	0,94	0,84	0,10	0,1064	$\pm 0,07$

Наставак табеле на следећој страни.

* угао лопатица 0° одговара потпуно отвореном демперу

Табела 6.1 – наставак са претходне стране

растојање $x[m]$	Максимална брзина [m/s]		апсолутна грешка $\bar{v}_{x,sim.} - \bar{v}_{x,mer.}$ [m/s]	релативна грешка $\frac{ \bar{v}_{x,sim.} - \bar{v}_{x,mer.} }{\bar{v}_{x,sim.}}$	апсолутна грешка мерења [m/s]
	симулирано $\bar{v}_{x,sim.}$	измерено $\bar{v}_{x,mer.}$			
5	0,73	0,70	0,03	0,0411	$\pm 0,07$
6	0,60	0,59	0,01	0,0167	$\pm 0,06$
7	0,50	0,50	0,00	0,0000	$\pm 0,06$
8	0,44	0,44	0,00	0,0000	$\pm 0,05$
9	0,38	0,39	-0,01	0,0263	$\pm 0,05$
10	0,34	0,35	-0,01	0,0294	$\pm 0,05$

лопатице регулатора под углом 15°

*

3	1,46	1,38	0,08	0,0548	$\pm 0,10$
4	1,04	1,12	-0,08	0,0769	$\pm 0,09$
5	0,81	0,83	-0,02	0,0247	$\pm 0,07$
6	0,66	0,71	-0,05	0,0758	$\pm 0,06$
7	0,55	0,56	-0,01	0,0182	$\pm 0,06$
8	0,48	0,49	-0,01	0,0208	$\pm 0,05$
9	0,42	0,41	0,01	0,0238	$\pm 0,05$
10	0,38	0,35	0,03	0,0789	$\pm 0,05$

лопатице регулатора под углом 30°

*

3	1,38	1,20	0,18	0,1304	$\pm 0,09$
4	1,04	0,97	0,07	0,0673	$\pm 0,08$
5	0,84	0,81	0,03	0,0357	$\pm 0,07$
6	0,71	0,68	0,03	0,0423	$\pm 0,06$
7	0,61	0,59	0,02	0,0328	$\pm 0,06$
8	0,53	0,51	0,02	0,0377	$\pm 0,06$
9	0,47	0,46	0,01	0,0213	$\pm 0,05$
10	0,43	0,42	0,01	0,0233	$\pm 0,05$

лопатице регулатора под углом 45°

*

3	1,71	1,44	0,27	0,1579	$\pm 0,10$
4	1,28	1,10	0,18	0,1406	$\pm 0,09$
5	1,03	0,90	0,13	0,1262	$\pm 0,08$
6	0,86	0,8	0,06	0,0698	$\pm 0,07$
7	0,72	0,66	0,06	0,0833	$\pm 0,06$
8	0,63	0,64	-0,01	0,0159	$\pm 0,06$
9	0,56	0,54	0,02	0,0357	$\pm 0,06$
10	0,51	0,49	0,02	0,0392	$\pm 0,05$

* угао лопатица 0° одговара потпуно отвореном демперу

На основу приказаних резултата, може се рећи да се симулиране вредности добро поклапају са резултатима експеримента осим у почетним деловима млаза који немају

практичан значај. Међутим, ова одступања могу се објаснити чињеницом да су симулиране вредности брзине у оси млаза добијене као максималне које се појављују на одговарајућем растојању у равни паралелној са равни отвора. Наиме, због врло изражене турбуленције те изразите нехомогености млаза у овој области, локални максимуми осредњене брзине појављују се мимо тачака мерења. Да се приметити да се наведене разлике смањују са повећањем растојања од решетке и врло брзо постају безначајне.

6.2 Расподела протока на четвоространом плафонском анемостату

Симулиране и измерене вредности протока ваздуха кроз означене зоне плафонског четвоространог анемостата за различите варијанте дефлектора упоредо су приказане у табели 6.2.

ТАБЕЛА 6.2. Симулиране и измерене вредности протока кроз карактеристичне зоне четвоространог анемостата ($\dot{V}=1000 \text{ m}^3/\text{h}$)

ознака зоне анемостата *	Проток ваздуха [m^3/h]		апсолутна грешка $\dot{V}_{sim.} - \dot{V}_{mer.}$ [m^3/h]	релативна грешка $\frac{ \dot{V}_{sim.} - \dot{V}_{mer.} }{\dot{V}_{sim.}}$	апсолутна грешка мерења [m^3/h]
	симулирано $\dot{V}_{sim.}$	измерено $\dot{V}_{mer.}$			
без дефлектора					
E	184	199	-15	0,0815	$\pm 16,0$
W	350	332	18	0,0514	$\pm 20,0$
N	226	230	-4	0,0177	$\pm 16,9$
S	240	239	1	0,0042	$\pm 17,2$
униформно перфориран дефлектор					
E	179	173	6	0,0335	$\pm 15,2$
W	301	302	-1	0,0033	$\pm 19,1$
N	260	263	-3	0,0115	$\pm 17,9$
S	260	262	-2	0,0077	$\pm 17,9$
неуниформно перфориран дефлектор					
E	246	250	-4	0,0163	$\pm 17,5$
W	249	263	-14	0,0562	$\pm 17,9$
N	253	246	7	0,0277	$\pm 17,4$
S	252	241	11	0,0436	$\pm 17,2$
дефлектор са усмеравајућим лопатицама					
E	253	237	16	0,0632	$\pm 17,1$
W	254	263	-9	0,0354	$\pm 17,9$
N	245	246	-1	0,0041	$\pm 17,4$
S	248	254	-6	0,0242	$\pm 17,6$

* карактеристичне зоне означене су на слици 4.23

Имајући у виду мерну грешку инструмента, односно апсолутне грешке мерења, нумеричке вредности у потпуности се поклапају са резултатима експеримента.

6.3 Расподела протока на отвору линијског дифузора

Нумеричке вредности протока дуж отвора линијског дифузора упоређене су са измереним вредностима у табели 6.3.

ТАБЕЛА 6.3. Симулиране и измерене вредности протока кроз карактеристичне зоне линијског дифузора ($\dot{V}=100 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^{-1}$)

ознака зоне дифузора*	Проток ваздуха [m^3/h]		апсолутна грешка $\dot{V}_{sim.} - \dot{V}_{mer.}$ [m^3/h]	релативна грешка $\frac{ \dot{V}_{sim.} - \dot{V}_{mer.} }{\dot{V}_{sim.}}$	апсолутна грешка мерења [m^3/h]
	симулирано $\dot{V}_{sim.}$	измерено $\dot{V}_{mer.}$			
без регулационе клапне					
Z1	10,09	10,09	0,87	0,0794	$\pm 0,60$
Z2	10,83	9,08	1,75	0,1616	$\pm 0,55$
Z3	9,90	7,86	2,04	0,2061	$\pm 0,49$
Z4	9,08	7,56	1,52	0,1674	$\pm 0,48$
Z5	8,99	7,13	1,86	0,2069	$\pm 0,46$
Z6	9,28	12,47	-3,19	0,3438	$\pm 0,72$
Z7	8,79	9,58	-0,79	0,0899	$\pm 0,58$
Z8	10,28	10,27	0,01	0,0010	$\pm 0,61$
Z9	10,37	12,60	-2,23	0,2150	$\pm 0,73$
Z10	11,52	13,40	-1,88	0,1632	$\pm 0,77$
клапна отворена под углом 45°, вертикална оса					
Z1	10,87	11,30	-0,43	0,0396	$\pm 0,67$
Z2	10,81	8,77	2,04	0,1887	$\pm 0,54$
Z3	10,33	7,62	2,71	0,2623	$\pm 0,48$
Z4	9,98	7,69	2,29	0,2295	$\pm 0,48$
Z5	7,98	7,69	0,29	0,0363	$\pm 0,48$
Z6	9,37	10,61	-1,24	0,1323	$\pm 0,63$
Z7	6,62	8,50	-1,88	0,2840	$\pm 0,53$
Z8	9,60	10,95	-1,35	0,1406	$\pm 0,65$
Z9	10,98	13,61	-2,63	0,2395	$\pm 0,78$
Z10	13,46	13,25	0,21	0,0156	$\pm 0,76$
клапна отворена под углом 45°, хоризонтална оса					
Z1	9,52	10,89	-1,37	0,1439	$\pm 0,64$
Z2	10,24	7,85	2,39	0,2334	$\pm 0,49$
Z3	11,08	7,50	3,58	0,3231	$\pm 0,48$
Z4	10,18	6,11	4,07	0,3998	$\pm 0,41$

Наставак табеле на следећој страни.

* карактеристичне зоне означене су на слици 4.39

Табела 6.3 – наставак са претходне стране

ознака зоне дифузора*	Проток ваздуха [m ³ /h]		апсолутна грешка $\dot{V}_{sim.} - \dot{V}_{mer.}$ [m ³ /h]	релативна грешка $\frac{ \dot{V}_{sim.} - \dot{V}_{mer.} }{\dot{V}_{sim.}}$	апсолутна грешка мерења [m ³ /h]
	симулирано $\dot{V}_{sim.}$	измерено $\dot{V}_{mer.}$			
Z5	8,58	8,71	-0,13	0,0152	±0,54
Z6	8,52	8,34	0,18	0,0211	±0,52
Z7	10,36	13,24	-2,88	0,2780	±0,76
Z8	11,43	12,69	-1,26	0,1102	±0,73
Z9	9,81	12,94	-3,13	0,3191	±0,75
Z10	10,28	11,74	-1,46	0,1420	±0,69

клапна отворена под углом -45° , хоризонтална оса

Z1	9,84	8,33	1,51	0,1535	±0,52
Z2	9,38	9,89	-0,51	0,0544	±0,59
Z3	9,49	9,06	0,43	0,0453	±0,55
Z4	10,34	11,40	-1,06	0,1025	±0,67
Z5	11,33	12,56	-1,23	0,1086	±0,73
Z6	10,71	6,60	4,11	0,3838	±0,43
Z7	9,73	7,37	2,00	0,2055	±0,49
Z8	9,79	11,30	-1,51	0,1542	±0,67
Z9	9,21	11,67	-2,46	0,2671	±0,68
Z10	10,18	11,40	-1,22	0,1198	±0,67

* карактеристичне зоне означене су на слици 4.39

И поред прилично велике грешке мерења у односу на разматране случајеве, поједине разлике симулираног и измереног протока далеко превазилазе ове вредности. Иако су, сасвим разумљиво и очекивано, осим у случају регулационе клапне постављене под углом 45° у односу на вертикалну осу, нумеричке вредности приближно симетричне због потпуне симетрије геометрије елемената, мерења показују драстичну асиметрију. Наведене чињенице говоре да ће млаз који се формира на линијском дифузору имати још изразитију неравномерност него што је то приказано кроз нумеричке симулације.

„Поносан сам што сам потекао из земљорадничког витешког народа, који је у непрестаној љутој борби за своје идеале и европску културу задужио Европу и свуда заслужио част и поштовање читавог света, нарочито велике Америке.“

Никола Тесла

7

ЗАКЉУЧАК

Бројна истраживања указују на чињеницу да људи највећи део свог времена проводе у затвореним просторима. Постизање топлотног комфора има велику важност и пресудан утицај на општи осећај, концентрацију и радну способност, а топлотна непријатност може довести до стања које представља потенцијалну опасност за здравље. Према томе, свакако главни императив при пројектовању КГХ система јесте задовољавање услова топлотне угодности.

Међу најутिकाјнијим факторима локалне топлотне угодности, између осталог, истиче се струјање ваздуха, односно промаја, као најчешћи узрок термичке непријатности у просторијама са механичком вентилацијом. Довод ваздуха у третирани простор остварује се локализовано, путем ваздушног млаза, који има кључни значај на свеукупно кретање ваздуха, а познавање струјне слике од суштинске је важности за предвиђање тог кретања како би се обезбедила задовољавајућа дистрибуција и брзина у зони боравка свела на прихватљиву. Опште је прихваћен став да млаз који се формира у простору поседује одговарајућу симетрију и униформност који су последица извесне симетрије завршних елемената за довод ваздуха, те да искључиво они утичу на његово ширење. Међутим, делови каналске мреже и различита припадајућа опрема за усмеравање и регулацију доприноси да расподела брзине на улазном грлу иструјних елемената у већој или мањој мери буде неравномерна што се даље одражава и на последични млаз. Истраживања која су спроведена и приказана у овој дисертацији посвећена су проблематици асиметрије и неравномерне расподеле протока на дистрибутивним елементима који су у широкој примени код ваздушних КГХ система. Дат је приказ досадашњих истраживања и указано на одређене разлоге због којих примена CFD метода још увек није заступљена у пракси.

У другој глави наведене су основне једначине механике флуида као и постулати који се користе при њиховом извођењу. Наглашене су потешкоће решавања Навије-Стоксових једначина нумеричким путем и приказане конститутивне релације којима се затварају основне једначине кретања. Изложене су основне физичке карактеристике турбулентних струјања, начини њиховог математичког описа и поступак моделирања. Проблем затварања Рејнолдсових једначина које описују статистички осредњено струјање анализиран је кроз концепт двоједначинског $k - \epsilon$ турбулентног модела.

Трећа глава посвећена је основним својствима турбулентног ваздушног млаза. Објашњене су основне карактеристике раванског, осносиметричног и радијалног млаза са акцентом на угао ширења, опадање централне брзине и карактеристичне зоне струјања и описан је интензитет турбуленције као један од најутицајнијих параметара ваздушног тока. Указано је на особине као последице контракције и дивергенције млаза са подсећањем на домет односно дубину продирања. Приказани су профили брзине у изотермном млазу као и утицај температуре на смањење брзине и трајекторију млаза са освртом на температурни профил у неизотермном млазу и укупну запремину ваздуха покренуту млазом. Истакнут је значај Coanda ефекта у припојеном млазу, а говори се и о међусобној интеракцији млазева те утицају величине просторије и унутрашњих ефеката на развој млаза.

Четврта глава односи се на методологију нумеричких прорачуна где су описани поступци дискретизације струјног простора релативно сложене геометрије модела, дефинисани гранични услови, параметри прорачуна и критеријуми конвергенције. Резултати су показали изразито повећање неравномерности расподеле брзине у равни лица решетке као и повећање брзине у млазу са смањењем отворености регулатора протока што има за последицу његову девијацију и у крајњем случају повећање домета. Утицај прикључне кутије са бочним прикључком манифестовао се кроз изразито неравномерну расподелу протока на четвоространом плафонском анемостату, а перфорирана плоча за умирење ваздушне струје која се уобичајено примењује даје само нешто боље резултате. Перфорираним плочама неједнаке пропустљивости постиже се уједначен проток на елементу, али не и очекивана расподела у простору. Потпуни ефекат остварен је предложеним решењем дефлектора са усмеравајућим лопатицама. Оцењено је да при истом углу отворености, а само различитом положају регулационе клапне у прикључној кутији, млаз који иструјава из линијског дифузора има апсолутно различите карактеристике. Показана је инваријантност добијених резултата у односу на варијације протока у оквиру оптималних вредности за изабране случајеве.

Експериментална мерења брзине струјања у слободном млазу на зидној решетки при различитим степенима отворености демпера извршена су у три правца. Констатоване су веће брзине са повећањем угла лопатица регулатора протока у односу на његову потпуну отвореност, а максималне вредности појавиле су се дуж различитих праваца за различите случајеве што недвосмислено указује на извесно скретање, односно одступање млаза од вертикалне симетралне равни. Неравномерност протока кроз карактеристичне зоне четвоространог плафонског дифузора била је највећа код прикључне кутије без дефлектора, а релативно блиски резултати постигнути су и када је постављена

перфорирана плоча једнаке пропустљивости, са појавом највећих вредности у области насупрот доводног прикључка. Драстично побољшање остварено је ефектима перфориране плоче неједнаке пропустљивости и дефлектора са усмеравајућим лопатицама. Показано је да постоји изразита неравномерст протока дуж отвора линијског дифузора што је и било предвидиво у случају регулационе клапне постављене под углом 45° у односу на вертикалну осу. Преостали анализирани, геометријски апсолутно симетрични случајеви, нису дали ни приближно симетричне резултате.

Имајући у виду тачност примењених мерних инструмената, постигнуто је потпуно поклапање нумеричких и експерименталних вредности брзине у слободном млазу формираном на зидној решетки, осим оправдано у почетним деловима који немају практичан значај. Апсолутно су потврђени симулирани резултати који се односе на протоке код плафонског дифузора при различитим геометријама дефлектора. Међутим, приближно очекиване рачунске вредности протока на отвору линијског дифузора углавном нису експериментално доказане.

Изабрана тема представља плод дугогодишњег ангажовања у производњи вентилационе опреме, као и решавања различитих практичних проблема који су се сами по себи наметали. То је свакако представљало изазове који су константно доносили нова искуства и сазнања, али и рађали нове идеје првенствено усмерене ка свеобухватном подизању квалитета финалних производа, што ће свакако бити правац даљег рада.

Литература

- Abramovič, G. (1960). *Teorija turbulentnyh struj*. Gosudarstvennoje Izdatel'stvo fiziko-matematičeskoj literatury.
- ANSYS. (2009). Ansys fluent 12.0. user's guide..
- ASHRAE. (2005). *Ashrae handbook - fundamentals*. American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers.
- Awbi, H. (1991). *Ventilation of buildings*. E & FN Spon; Chapman & Hall.
- Awwad, A., Mohamed, M. H. и Fatouh, M. (2017). Optimal design of a louver face ceiling diffuser using cfd to improve occupant's thermal comfort. *Journal of Building Engineering*, 11, 134-157. Преузето са <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710216303527> doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.04.009>
- Aziz, M. A., Gad, I. A., Mohammed, E. S. F. и Mohammed, R. H. (2012). Experimental and numerical study of influence of air ceiling diffusers on room air flow characteristics. *Energy and Buildings*, 55, 738-746. Преузето са <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877881200480X> doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.027>
- Becher, P. (1949). *Om beregning af indblaesningsaebninger*. Gjellerup.
- Becker, P. (1950). Luftstralen aus ventilationsoeffnungen. *Gesundheits-Ingenieur*, 9(10), 139-145.
- Bragança, P., Sodjavi, K., Meslem, A. и Serres, L. (2016). Airflow characteristics and thermal comfort generated by a multi-cone ceiling diffuser with and without inserted lobes. *Building and Environment*, 108, 143-158. Преузето са <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132316303316> doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.029>
- Bredberg, J. (2000). On the wall boundary conditions for turbulence models. Department of Thermo and Fluid Dynamics, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden.
- Chen, Q. и Srebric, J. (2000, 01). Simplified diffuser boundary conditions for numerical room airflow models. *Final Report for ASHRAE RP-1009*, 96-107.
- Crnojević, C. (2014). *Mehanika fluida*. Mašinski fakultet univerziteta u Beogradu.
- Djunaedy, E. и Cheong, K. (2002). Development of a simplified technique of modelling four-way ceiling air supply diffuser. *Building and Environment*, 37, 393-403.
- Einberg, G., Hagström, K., Mustakallio, P., Koskela, H. и Holmberg, S. (2005). Cfd modelling of an industrial air diffuser—predicting velocity and temperature in the near zone. *Building and Environment*, 40(5), 601-615. Преузето са <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132304002112> doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.03.001>

- doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.08.020
- Elbanna, H., Gahin, S. и Rashed, M. I. I. (1983). Investigation of two plane parallel jets. *AIAA Journal*, 21, 986-991.
- Ergonomics of the thermal environment – analytical determination and interpretation of thermal comfort using the pmv and ppd indices and local thermal comfort criteria* (Standard). (2005). Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- Essel, E. E., Tachie, M. F., Agelin-Chaab, M., Koupriyanov, M. и Tully, B. (2013). Particle image velocimetry measurements in curved turbulent jets produced from a slot diffuser. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 49, 169-184. Преузето са <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0894177713001052> doi: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.04.016>
- Etheridge, D. W. и Sandberg, M. (1996). Building ventilation: Theory and measurement..
- Fanger, P. O. (1970). *Thermal comfort. analysis and applications in environmental engineering*. Copenhagen: Danish Technical Press.
- Fontaine, J., Rapp, R., Koskela, H. и Niemelä, R. (2005). Evaluation of air diffuser flow modelling methods experiments and computational fluid dynamics simulations. *Building and Environment*, 40(3), 377-389. Преузето са <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132304001908> doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.06.021>
- Förthmann, E. (1934). Über turbulente strahleausbreitung. *Ing. Archiv.*, V(1), 42-54.
- Gilbert, B. (1989). Turbulence measurements in a flow generated by the collision of radially flowing wall jets. *Experiments in Fluids*, 7, 103-110.
- Grimitlin, M. (1994). *Air distribution in rooms*.
- Grimitlyn, M. (1970). Zurluftverteilung in raumen. *Luft und Kältetechnik*(5).
- Grimitlyn, M. и Pozin, G. (1993). Fundamentals of optimizing air distribution in ventilated spaces. *ASHRAE Transactions*, 99, 1128-1138.
- Grimitlyn, M. (1969). Modeling and designing of air distribution devices. *In Filtration of Industrial Exhausts and Problems of Air Distribution*.
- Grimitlyn, M. и Pozin, G. (1973). Determination of parameters for the jet in a confined space following blocked- or through flow pattern..
- Grimitlyn, M., Zhivov, A. и Kelina, Y. (1987). Experimental studies of non-isothermal free jet. *Occupational Safety Problems and their Solutions-Collected Papers of the Occupational Safety Institutes under the AUCCTU*.
- Guo, B., Hou, Q., Yu, A., Li, L. и Guo, J. (2013). Numerical modelling of the gas flow through perforated plates. *Chemical Engineering Research and Design*, 91(3), 403 - 408. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2012.10.004>
- Heiselberg, P. (1994). Interaction between flow elements in large enclosure. *Proc. of ROOMVENT '94*, 1, 363-376.
- Helander, L., Yen, S. и Tripp, W. (1957). Outlet characteristics that affect the downthrow of heated air jet. *ASHRAE Transaction*(63).
- Hinze, J. (1975). *Turbulence*.. McGraw-Hill.
- Holmes, M. J. и Sachariewicz, E. (1973). *The effect of ceiling beams and light fittings on ventilating jets* (Tech. Rep. No. Laboratory Report No. 65). Bracknell, UK: Heating

- and Ventilating Research Association.
- Hu, S. (2003). Airflow characteristics in the outlet region of a vortex room air diffuser. *Building and Environment*, 38(4), 553-561. Преузето са <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132302001877> doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00187-7](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00187-7)
- Huo, Y., Haghghat, F., Zhang, J. и Shaw, C. (2000). A systematic approach to describe the air terminal device in cfd simulation for room air distribution analysis. *Building and Environment*, 35(6), 563-576. Преузето са <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132399000475> doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(99\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(99)00047-5)
- Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics* (Standard). (2012). Berlin, Germany: German Institute for Standardization.
- Jackman, P. (1970). *Air movement in rooms with side-wall mounted grilles* (Tech. Rep. No. Laboratory Report No. 65). Heating and Ventilating Research Association.
- Jackman, P. (1971). Air movement in rooms with ceiling-mounted grilles. *Heating and ventilation research association. Laboratory report No.65*.
- Jones, W. P. и Launder, B. E. (1972). The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15, 301-314.
- Karimipannah, T. (1996). *Turbulent jets in confined spaces* (Unpublished doctoral dissertation). Royal Institute of Technology, Centre for Built Environment, Box 88, S-801 02 Gävle Sweden.
- Katz, P. (1973). Der coanda-effect. *Gesundheits-Ingenieur*(6), 169-192.
- Koestel, A. (1957). Jet velocities from radial flow outlets. *ASHRAE Transaction*(63), 505-526.
- Koestel, A., Hermann, P. и Tuve, G. (1950). Comparative study of the ventilating jets from various types of outlets. *Case Inst. of Technology*.
- Launder, B. и Rodi, W. (1981). The turbulent wall-jet. *Prog. Aerospace Sci.*, 19, 81-128.
- Launder, B. E. и Sharma, B. I. (1974). Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. *Letters in Heat and Mass Transfer*, 1, 131-138.
- Lin, Y. F. и Sheu, M. J. (1991). Interaction of parallel turbulent plane jets. *AIAA Journal*, 29(9), 1372-1373.
- Linke, W. (1966). Eigenschaften der strahliiftung (aspects of jet ventilation). *Kaltetechnik Klimatechnik*, 18(3).
- Liu, C., Higuchi, H., Arens, E. и Zhang, H. (2009). Control of the microclimate around the head with opposing jet local ventilation. Syracuse, NY: Proceedings of Healthy Buildings.
- Lorsch, H. G. и Abdou, O. A. (1994). The impact of the building indoor environment on occupant productivity - part 1: Recent studies, measures and costs. *ASHRAE Transactions*, 100, 741-749.
- Malmström, T. G., Kirkpatrick, A. T., Christensen, B. и Knappmiller, K. D. (1997, sep). Centreline velocity decay measurements in low-velocity axisymmetric jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 346(1), 363-377.

- Marsters, G. F. (1977). Interaction of two plane, parallel jets. *AIAA Journal*, 15(12), 1756-1762.
- Martinez-Almansa, J., Fernandez-Gutierrez, A., Parras, L. и del Pino, C. (2014). Numerical and experimental study of a hvac wall diffuser. *Building and Environment*, 80, 1-10. Преузето са <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132314001371> doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.001>
- Merenje protoka fluida u zatvorenim cevovodima - metoda polja brzina pri kojoj se koriste statičke pitoove cevi (Standard). (2013). Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.
- Müller, H. J. (1977). Einfluß der geometrischen verhältnisse auf die raumunstromöng bei der strahliliftung. *Luft und Kältetechnik*(5).
- Murakami, S., Kato, S. и Nakagawa, H. (1991). Numerical prediction of horizontal nonisothermal 3-d jet in room based on k- ϵ model. *ASHRAE Transactions*, 97.
- Nasr, A. и Lai, J. C. S. (1998). A turbulent plane offset jet with small offset ratio. *Experiments in Fluids*, 24, 47-57. Преузето са <https://doi.org/10.1007/s003480050149> doi: 10.1007/s003480050149
- Nielsen, P. (1973). Berechnung der luftbewegung in einem zwangsbelüftete raum. *G I - Gesundheits Ingenieur*, 299.
- Nielsen, P. V. (1997). The box method: a practical procedure for introduction of an air terminal device in cfd calculation. Dept. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University.
- Nielsen, P. V. (2015). Fifty years of cfd for room air distribution. *Building and Environment*, 91, 78-90. Преузето са <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036013231500092X> (Fifty Year Anniversary for Building and Environment) doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.035>
- Nielsen, P. V., Heby, T. и Moller-Jensen, B. (2006). Air distribution in a room with ceiling-mounted diffusers – comparison with wall-mounted diffuser, vertical ventilation, and displacement vetilation. *ASHRAE Transactions*, 112.
- Nosovitsky, A. и Posokhin, V. (1966). Inclined fountains of heated and chilled air, created by non-isothermal jets supply. *Heat, Gas Supply and Ventilation*.
- Nottage, H. (1951). Report on ventilation jets in room air distribution. *Case Inst. of Technology*.
- Omelchuk, V. (1966). Laws of non-isothermal jet development, banded by gravity forces. *Journal of Water Supply and Sanitary Technique*(2).
- Ormandy, D. и Ezratty, V. (2012). Health and thermal comfort: From who guidance to housing strategies. *Energy Policy*, 49, 116-121. Преузето са <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421511006926> (Special Section: Fuel Poverty Comes of Age: Commemorating 21 Years of Research and Policy) doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.003>
- Parsons, K. (2014). *Human thermal environments: The effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort, and performance, third edition*. CRC Press. Преузето са <https://books.google.rs/books?id=xxjSBQAAQBAJ>
- Popović, A. и Serafimov, M. (1985). Indukcija vazдушnih struja pri postavljanju rešetki za izbacivanje klimatizovanog vazduha na noseće stubove sedišta u pozorištu. *Klimatizacija grejanje hlađenje*(2), 79-83.

- Popović, M. (2004). *Senzori i merenja*. Srpsko Sarajevo: Zavod za udžbenike i nastavna sredstva.
- Rajaratnam, N. (1976). *Turbulent jets*. Elsevier.
- Recknagel, H., Sprenger, E., Schramek, E. R. и Čeperković, Z. (2002). *Grejanje i klimatizacija*. Interklima.
- Regenscheit, B. (1959). Luftbewegung in klimatisierten raumen. *Kältetechnik*, 11(1), 3–11.
- Regenscheit, B. (1970). Die archimedes-zahl kennzahl zur beurteilung von raumtrennungen. *Gesundheits Ingenieur*, 91(6).
- Regenscheit, B. (1971). Die berechnung von radial strömenden frei- und wandstrahlen, sowie von rechteckstrahlen. *Gesundheits-Ingenieur*, 92(7), 193-201.
- Regenscheit, B. (1975). Strahlgesetze und raumströmung. *Klima-Kälte-technik*, 6, 147-150.
- Regenscheit, B. (1976). Einfluß der reynoldszahl auf die geschwindigkeitsabnahme turbulenter freistrahlen. *Heizung-Luftung-Haustechnik*, 27(4), 122-126.
- Ren, H., Zhao, B., Li, X., Fan, H. и Yang, X. (2003). Influence of diffuser jet characteristics on indoor air distribution under actual connecting conditions. *Journal of Architectural Engineering*, 9(4), 141-144. doi: 10.1061/(ASCE)1076-0431(2003)9:4(141)
- Roelofsen, P. (2002). The impact of office environments on employee performance: The design of the workplace as a strategy for productivity enhancement. *Journal of Facilities Management*, 1(3), 247–264.
- Rydberg, J. и Norbäck, P. (1946). Inblåsning av ventilationsluft. *VVS*(1).
- Sajadi, B., Saidi, M. и Mohebbian, A. (2011). Numerical investigation of the swirling air diffuser: Parametric study and optimization. *Energy and Buildings*, 43(6), 1329-1333. Преузето са <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811000272> doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.01.018>
- Saljnikov, A. (1980). Koanda efekat i njegova primena u klimatizaciji. *Klimatizacija grejanje hlađenje*(2).
- Sawyer, R. A. (1963). Two-dimensional reattaching jet flows including the effects of curvature on entrainment. *Journal of Fluid Mechanics*, 17, 481–498.
- Schwenke, H. (1975). Über das verhalten ebener horizontaler zuluftstrahlen im begrenzten raum. *Luft und Kältetechnik*, 11(5), 241-246.
- Schwenke, H. (1976). Zur luftstromung in räumen mit wurfluftung. *Luft und Kältetechnik*(1), 11-14.
- Seban, R. и Back, L. (1961). Velocity and temperature profiles in a wall jet. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 3(4), 255-265. Преузето са <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0017931061900412> doi: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(61\)90041-2](https://doi.org/10.1016/0017-9310(61)90041-2)
- Shepelev, I. (1961). Air supply ventilation jets and air fountains. *In proceedings of the academy of construction and Architecture of USSR 4*.
- Shepelev, I. (1978). *Aerodynamics of air flows in rooms*. Stroyizdat.
- Shigeki, I., Satoshi, K., Yasuaki, K. и Takayasu, H. (2006). Flow characteristics of plane wall jet with side walls on both sides. *JSME International Journal*, 49(4), 914-920.
- Sijerčić, M. (1998). *Matematičko modeliranje kompleksnih turbulentnih transportnih procesa*. Jugoslovensko društvo termičara. Institut za nuklearne nauke "Vinča", Beograd.

- Smoljan, D. и Balen, I. (2010). Influence of a plenum box design on uniformity of the radial air jet issuing from a vortex diffuser. *Strojarstvo*, 52(3), 379-386.
- Stein, M. (1953). Studies on air jets. *Journal of the Institute of Heating and Ventilating Engiheers*(21).
- Sun, Y. и Smith, T. F. (2005). Air flow characteristics of a room with square cone diffusers. *Building and Environment*, 40(5), 589-600. Преузето са <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132304001714> doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.07.018>
- Taliev, V. (1963). *Aerodinamika ventiljacii*. Gosstrojizdat.
- Tanaka, T. и Tanaka, E. (1976). Experimental study of a radial turbulent jet. *Bull. J.S.M.E*(19).
- Tavakoli, E. и Hosseini, R. (2013). Large eddy simulation of turbulent flow and mass transfer in far-field of swirl diffusers. *Energy and Buildings*, 59, 194-202. Преузето са <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812006780> doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.029>
- Tennekes, H. и Lumley, J. (1972). *A first course in turbulence*. The MIT Press.
- Thermal environmental conditions for human occupancy* (Standard). (2013). Atlanta: ASHRAE.
- Tollmien, W. (1926). Berechnung turbulenter ausbreitung vorgänge. *Zeitschrift für Angewendete Mathematic und Mechanic*, 6(6), 468-478.
- Tuve, G. (1953). Air velocities in ventilating jets. *Heating, Piping and Air Conditioning*(1).
- Vasic, M., Stevanovic, V. D. и Zivkovic, B. (2020). Uniformity of air flow from the ceiling diffuser by an advanced design of the equalizing element in the plenum box with side entry. *Science and Technology for the Built Environment*, 26(5), 676-686. Преузето са <https://doi.org/10.1080/23744731.2020.1730124> doi: 10.1080/23744731.2020.1730124
- Ventilacija u zgradama - uređaji vazdušnih sistema - aerodinamičko ispitivanje i ocena za primenu sistema sa mešanjem* (Standard). (2010). Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.
- Ventilation for acceptable indoor air quality* (Standard). (2013). Atlanta: ASHRAE.
- Verhoff, A. (1963, 5). *The two-dimensional, turbulent wall jet with and without an external free stream* (No. 626).
- Villafruela, J. M., Sierra-Pallares, J. B., Castro, F., Álvaro, A. и Santiago-Casado, P. (2018). Experimental and numerical study of the influence of the plenum box on the airflow pattern generated by a swirl air diffuser. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 99, 547-557. Преузето са <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0894177718309014> doi: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.08.021>
- Waschke, G. (1974). *Über die läftung mittels isothermer turbulenter radialer deckenstrahlen* (Unpublished doctoral dissertation). Fakultat f. Maschinenwesen der RWTH.
- Wilcox, D. C. et al. (1998). *Turbulence modeling for cfd* (Vol. 2). DCW industries La Canada, CA.
- Woods, J. (1989, 10). Cost avoidance and productivity in owning and operating buildings. *Occupational medicine (Philadelphia, Pa.)*, 4, 753-770.

-
- Yue, Z. (2001). *Air jets in ventilation applications* (Unpublished doctoral dissertation). Royal Institute of Technology.
- Zhang, Z., Zhang, W., Zhai, Z. J. и Chen, Q. Y. (2007). Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by cfd: Part 2—comparison with experimental data from literature. *HVAC&R Research*, 13(6), 871-886. Преузето са <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10789669.2007.10391460> doi: 10.1080/10789669.2007.10391460
- Zhivov, A. M. (1982). Investigation of the interaction of axially symmetric turbulent jets supplied under straight angles to each other. Tallinn: Turbulent Jet Flows - Theses of Reports of Fifth All Union Scientific Conference on Theoretical and Applied Aspects of Turbulent Flows.
- Zhivov, A. M. (1985). The interaction of axially symmetric coaxial jets in free and confined conditions. Tallinn: Turbulent Jet Flows - Theses of Reports of Fifth All Union Scientific Conference on Theoretical and Applied Aspects of Turbulent Flows.

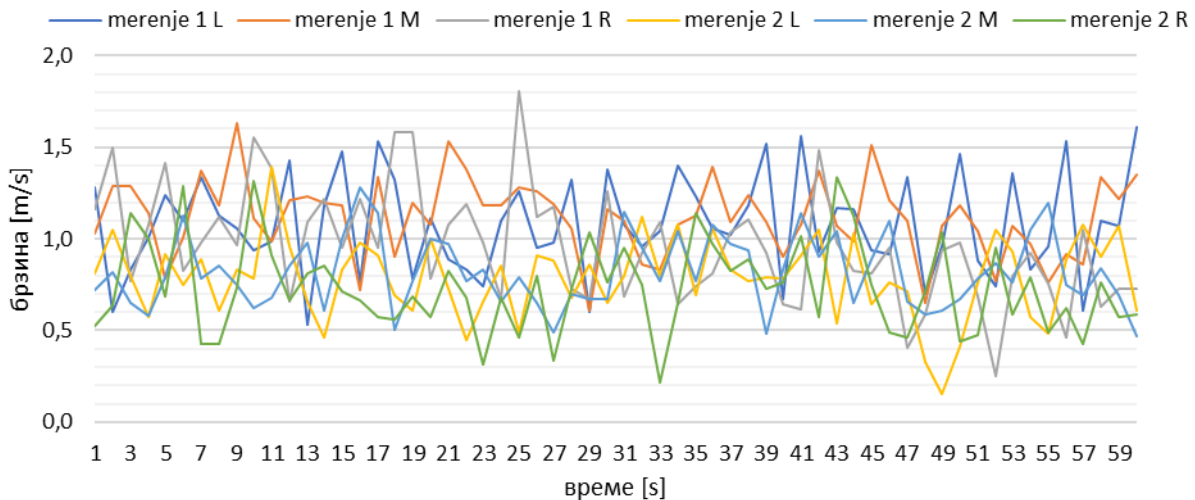


ПОДАЦИ О МЕРЕЊУ БРЗИНЕ У
СЛОБОДНОМ МЛАЗУ НА ЗИДНОЈ
РЕШЕТКИ

Угао лопатица регулатора $0^\circ - x=3m$

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	1,28	1,03	1,16	0,83	1,20	0,78	31	1,08	1,10	0,69	0,82	1,18	1,20
2	0,60	1,29	1,50	1,45	0,99	0,62	32	0,96	0,86	0,92	1,06	1,01	0,85
3	0,83	1,29	0,77	1,61	1,60	1,39	33	1,04	0,83	1,09	0,84	0,98	0,84
4	1,01	1,14	1,08	1,04	1,28	1,47	34	1,40	1,08	0,64	1,00	1,16	1,15
5	1,24	0,78	1,41	1,07	1,66	0,71	35	1,23	1,13	0,74	1,25	1,23	1,29
6	1,10	1,01	0,83	0,95	0,99	0,72	36	1,06	1,39	0,81	0,61	1,35	0,37
7	1,34	1,37	0,98	1,13	1,28	0,92	37	1,02	1,09	1,04	1,26	1,28	1,50
8	1,13	1,18	1,12	1,08	1,14	0,78	38	1,18	1,24	1,11	1,11	0,95	1,56
9	1,06	1,63	0,97	1,15	1,65	0,84	39	1,52	1,09	0,92	0,82	1,36	1,02
10	0,94	1,11	1,55	0,95	1,49	1,43	40	0,67	0,90	0,64	0,90	1,07	0,71
11	0,99	0,99	1,39	1,00	1,00	1,18	41	1,56	1,08	0,62	1,03	1,10	1,03
12	1,43	1,21	0,66	1,03	1,24	0,79	42	0,93	1,37	1,48	0,85	1,12	0,68
13	0,53	1,23	1,09	0,93	1,43	0,85	43	1,17	1,07	0,98	0,85	1,16	1,50
14	1,18	1,20	1,22	1,19	0,83	1,11	44	1,16	0,99	0,83	1,04	1,06	0,92
15	1,48	1,18	0,95	0,69	0,68	1,06	45	0,94	1,51	0,81	1,15	1,22	0,99
16	0,76	0,72	1,22	1,33	0,90	0,88	46	0,92	1,21	0,95	1,14	1,20	1,39
17	1,53	1,34	0,95	1,24	1,04	1,18	47	1,34	1,10	0,41	1,29	1,26	0,58
18	1,32	0,90	1,58	0,97	1,24	1,02	48	0,70	0,65	0,59	1,01	0,50	0,60
19	0,78	1,20	1,58	1,04	0,62	1,22	49	0,96	1,07	0,94	0,87	1,29	0,88
20	1,11	1,08	0,78	1,10	0,62	0,67	50	1,46	1,18	0,98	1,37	1,30	0,89
21	0,89	1,53	1,08	0,88	1,53	0,57	51	0,88	1,04	0,69	0,98	0,67	0,96
22	0,83	1,38	1,19	0,76	1,37	0,60	52	0,74	0,77	0,25	1,04	1,25	0,95
23	0,74	1,18	0,98	1,29	1,26	0,81	53	1,36	1,07	0,80	0,65	0,75	0,62
24	1,10	1,18	0,67	0,84	0,82	0,91	54	0,83	0,97	0,92	1,08	1,11	0,78
25	1,26	1,28	1,81	1,15	1,33	0,89	55	0,96	0,76	0,76	0,61	0,66	0,91
26	0,95	1,26	1,12	1,28	0,89	0,69	56	1,53	0,92	0,46	1,45	1,64	0,65
27	0,98	1,19	1,18	1,34	1,22	0,68	57	0,61	0,86	1,05	0,73	1,03	0,69
28	1,32	1,06	0,73	1,24	1,21	1,05	58	1,10	1,34	0,63	1,17	0,99	0,60
29	0,60	0,61	0,67	1,19	0,91	0,92	59	1,07	1,22	0,73	1,19	1,06	0,68
30	1,38	1,16	1,26	0,96	0,59	1,35	60	1,61	1,35	0,73	1,06	0,88	0,57

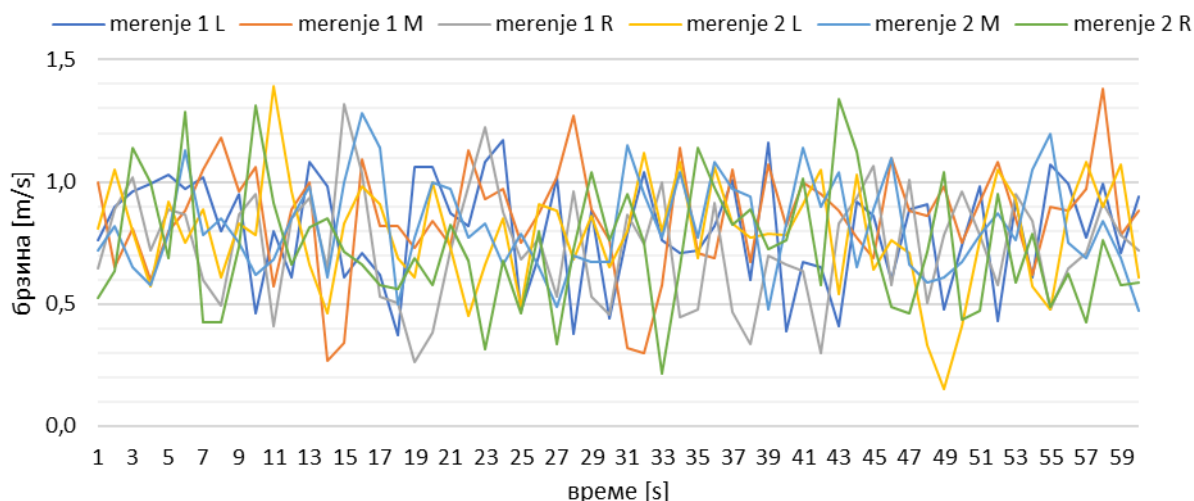
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	1,08	0,53	1,61	$\pm 0,08$	0,27	0,25
	M	1,12	0,61	1,63	$\pm 0,09$	0,21	0,19
	R	0,96	0,25	1,81	$\pm 0,08$	0,31	0,32
мерење 2	L	1,05	0,61	1,61	$\pm 0,08$	0,21	0,20
	M	1,11	0,50	1,66	$\pm 0,09$	0,27	0,24
	R	0,92	0,37	1,56	$\pm 0,08$	0,28	0,30



Угао лопатица регулатора 0° - $x=4\text{m}$

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	0,76	1,00	0,65	0,81	0,72	0,53	31	0,79	0,32	0,86	0,80	1,15	0,95
2	0,90	0,65	0,89	1,05	0,82	0,64	32	1,04	0,30	0,74	1,12	0,95	0,75
3	0,96	0,81	1,02	0,80	0,65	1,14	33	0,76	0,58	1,00	0,80	0,77	0,21
4	0,99	0,60	0,72	0,57	0,58	1,00	34	0,71	1,14	0,44	1,08	1,04	0,65
5	1,03	0,80	0,89	0,92	0,79	0,69	35	0,72	0,71	0,48	0,69	0,77	1,14
6	0,97	0,88	0,86	0,75	1,13	1,29	36	0,82	0,69	0,91	1,06	1,08	0,98
7	1,02	1,05	0,60	0,89	0,78	0,43	37	1,01	1,05	0,47	0,83	0,97	0,83
8	0,80	1,18	0,49	0,61	0,85	0,43	38	0,60	0,67	0,34	0,77	0,94	0,89
9	0,95	0,96	0,86	0,83	0,75	0,74	39	1,16	1,07	0,70	0,79	0,48	0,73
10	0,46	1,06	0,95	0,78	0,62	1,31	40	0,39	0,82	0,66	0,78	0,83	0,76
11	0,80	0,57	0,41	1,39	0,68	0,91	41	0,67	1,00	0,64	0,91	1,14	1,01
12	0,61	0,89	0,85	0,96	0,85	0,66	42	0,65	0,95	0,30	1,05	0,90	0,58
13	1,08	1,00	0,94	0,66	0,98	0,81	43	0,41	0,88	0,83	0,54	1,04	1,34
14	0,98	0,27	0,65	0,46	0,61	0,85	44	0,92	0,77	0,94	1,03	0,65	1,13
15	0,61	0,34	1,32	0,83	1,00	0,71	45	0,86	0,69	1,07	0,64	0,89	0,75
16	0,71	1,09	1,03	0,98	1,28	0,66	46	0,60	1,10	0,58	0,76	1,10	0,49
17	0,62	0,82	0,53	0,91	1,14	0,58	47	0,89	0,88	1,01	0,71	0,66	0,46
18	0,37	0,82	0,50	0,69	0,50	0,56	48	0,91	0,86	0,50	0,33	0,59	0,71
19	1,06	0,73	0,26	0,61	0,77	0,69	49	0,48	0,98	0,78	0,15	0,61	1,04
20	1,06	0,84	0,38	1,00	1,00	0,58	50	0,74	0,75	0,96	0,41	0,67	0,44
21	0,87	0,74	0,72	0,73	0,97	0,83	51	0,98	0,92	0,78	0,76	0,78	0,48
22	0,82	1,13	0,98	0,45	0,77	0,68	52	0,43	1,08	0,58	1,05	0,87	0,95
23	1,08	0,93	1,22	0,66	0,83	0,31	53	0,92	0,85	0,95	0,93	0,76	0,59
24	1,17	0,97	0,88	0,85	0,66	0,68	54	0,61	0,62	0,84	0,57	1,05	0,79
25	0,47	0,75	0,68	0,49	0,79	0,46	55	1,07	0,90	0,48	0,48	1,20	0,49
26	0,70	0,87	0,77	0,91	0,65	0,80	56	0,99	0,88	0,65	0,89	0,75	0,63
27	1,02	1,02	0,53	0,88	0,49	0,34	57	0,77	0,97	0,71	1,08	0,69	0,43
28	0,38	1,27	0,96	0,68	0,70	0,73	58	0,99	1,38	0,91	0,90	0,84	0,76
29	0,88	0,89	0,53	0,86	0,67	1,04	59	0,71	0,78	0,78	1,07	0,69	0,58
30	0,44	0,76	0,46	0,65	0,67	0,76	60	0,94	0,88	0,72	0,61	0,47	0,59

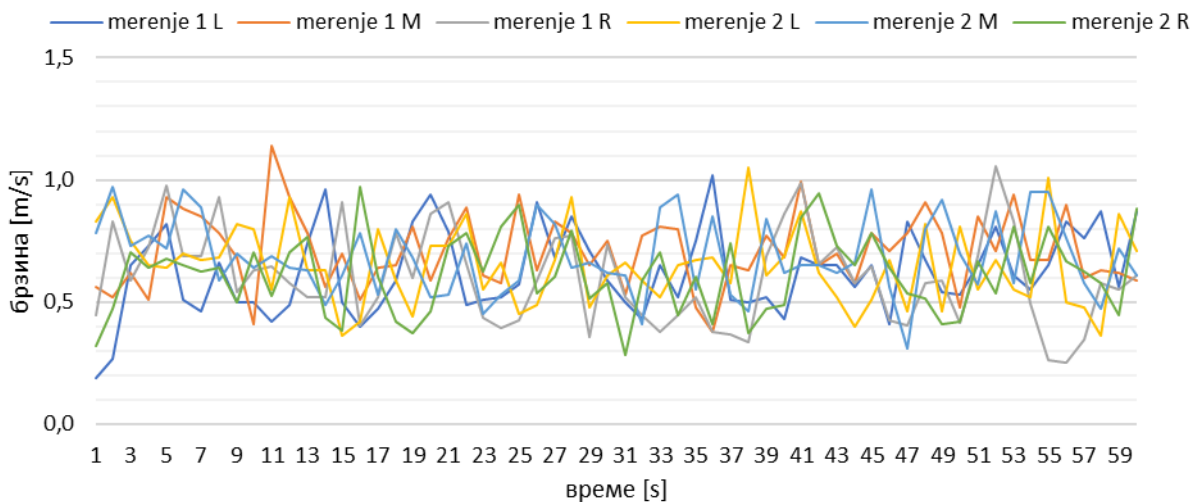
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	0,80	0,37	1,17	0,07	0,22	0,27
	M	0,85	0,27	1,38	0,07	0,22	0,26
	R	0,74	0,26	1,32	0,07	0,23	0,31
мерење 2	L	0,79	0,15	1,39	0,07	0,22	0,28
	M	0,82	0,47	1,28	0,07	0,19	0,24
	R	0,73	0,21	1,34	0,07	0,25	0,34



Угао лопатица регулатора 0° - $x=5m$

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	0,19	0,56	0,45	0,83	0,78	0,32	31	0,50	0,53	0,52	0,66	0,61	0,28
2	0,27	0,52	0,83	0,93	0,97	0,47	32	0,43	0,77	0,45	0,59	0,41	0,59
3	0,65	0,62	0,59	0,75	0,73	0,70	33	0,65	0,81	0,38	0,52	0,89	0,70
4	0,73	0,51	0,72	0,65	0,77	0,64	34	0,52	0,80	0,45	0,65	0,94	0,45
5	0,82	0,93	0,98	0,64	0,72	0,68	35	0,75	0,48	0,52	0,67	0,55	0,60
6	0,51	0,88	0,69	0,70	0,96	0,65	36	1,02	0,38	0,38	0,68	0,85	0,41
7	0,46	0,85	0,69	0,67	0,89	0,63	37	0,51	0,65	0,37	0,58	0,53	0,74
8	0,66	0,78	0,93	0,68	0,59	0,64	38	0,50	0,63	0,33	1,05	0,46	0,37
9	0,50	0,68	0,54	0,82	0,70	0,50	39	0,52	0,77	0,69	0,61	0,84	0,47
10	0,50	0,41	0,63	0,80	0,64	0,70	40	0,43	0,68	0,86	0,69	0,62	0,49
11	0,42	1,14	0,64	0,55	0,69	0,52	41	0,68	0,99	0,99	0,87	0,65	0,84
12	0,49	0,93	0,58	0,93	0,64	0,70	42	0,65	0,65	0,66	0,62	0,65	0,95
13	0,74	0,78	0,52	0,63	0,63	0,77	43	0,65	0,70	0,72	0,52	0,62	0,73
14	0,96	0,56	0,52	0,63	0,49	0,44	44	0,56	0,58	0,58	0,40	0,66	0,65
15	0,50	0,70	0,91	0,36	0,61	0,38	45	0,65	0,78	0,64	0,51	0,96	0,78
16	0,40	0,51	0,40	0,42	0,78	0,97	46	0,41	0,71	0,43	0,67	0,56	0,64
17	0,47	0,64	0,52	0,80	0,53	0,60	47	0,83	0,78	0,40	0,46	0,31	0,54
18	0,59	0,65	0,78	0,59	0,80	0,42	48	0,67	0,91	0,58	0,82	0,80	0,51
19	0,83	0,81	0,60	0,44	0,68	0,37	49	0,54	0,78	0,59	0,46	0,92	0,41
20	0,94	0,59	0,86	0,73	0,52	0,46	50	0,53	0,48	0,41	0,81	0,70	0,42
21	0,79	0,76	0,91	0,73	0,53	0,73	51	0,65	0,85	0,69	0,55	0,57	0,67
22	0,49	0,89	0,66	0,86	0,74	0,78	52	0,81	0,71	1,06	0,67	0,87	0,54
23	0,51	0,61	0,44	0,55	0,45	0,63	53	0,61	0,94	0,83	0,55	0,58	0,81
24	0,52	0,58	0,39	0,66	0,53	0,81	54	0,55	0,67	0,49	0,52	0,95	0,58
25	0,57	0,94	0,43	0,45	0,59	0,90	55	0,65	0,67	0,26	1,01	0,95	0,81
26	0,91	0,63	0,59	0,49	0,90	0,54	56	0,83	0,90	0,25	0,50	0,76	0,67
27	0,68	0,83	0,76	0,67	0,82	0,60	57	0,76	0,60	0,35	0,48	0,58	0,63
28	0,85	0,78	0,77	0,93	0,64	0,79	58	0,87	0,63	0,58	0,36	0,47	0,58
29	0,71	0,65	0,36	0,48	0,66	0,51	59	0,56	0,62	0,55	0,86	0,72	0,45
30	0,59	0,75	0,74	0,61	0,62	0,58	60	0,87	0,59	0,61	0,71	0,61	0,88

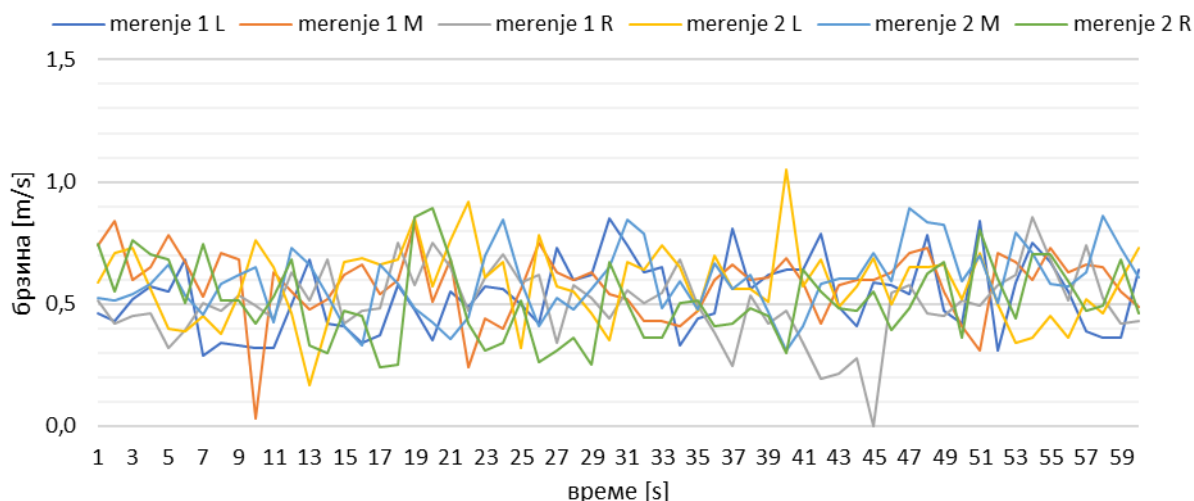
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	0,62	0,19	1,02	0,06	0,17	0,27
	M	0,71	0,38	1,14	0,07	0,15	0,21
	R	0,60	0,25	1,06	0,06	0,19	0,32
мерење 2	L	0,65	0,36	1,05	0,06	0,16	0,25
	M	0,69	0,31	0,97	0,06	0,16	0,23
	R	0,61	0,28	0,97	0,06	0,16	0,26



Угао лопатица регулатора 0° - $x=6m$

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	0,46	0,74	0,51	0,59	0,52	0,75	31	0,74	0,52	0,56	0,67	0,84	0,51
2	0,43	0,84	0,42	0,71	0,51	0,55	32	0,63	0,43	0,50	0,64	0,79	0,36
3	0,52	0,60	0,45	0,73	0,54	0,76	33	0,65	0,43	0,55	0,74	0,49	0,36
4	0,57	0,65	0,46	0,56	0,58	0,70	34	0,33	0,41	0,68	0,65	0,59	0,51
5	0,55	0,78	0,32	0,40	0,66	0,68	35	0,44	0,47	0,49	0,47	0,48	0,52
6	0,68	0,67	0,40	0,39	0,53	0,51	36	0,46	0,60	0,39	0,70	0,67	0,41
7	0,29	0,53	0,50	0,45	0,46	0,75	37	0,81	0,66	0,25	0,56	0,56	0,42
8	0,34	0,71	0,47	0,38	0,58	0,52	38	0,56	0,60	0,54	0,56	0,62	0,48
9	0,33	0,68	0,54	0,54	0,62	0,52	39	0,62	0,61	0,42	0,51	0,47	0,45
10	0,32	0,03	0,49	0,76	0,65	0,42	40	0,64	0,69	0,47	1,05	0,31	0,30
11	0,32	0,63	0,44	0,65	0,43	0,53	41	0,64	0,59	0,34	0,57	0,41	0,64
12	0,50	0,55	0,63	0,46	0,73	0,68	42	0,79	0,42	0,19	0,68	0,58	0,55
13	0,68	0,48	0,51	0,17	0,66	0,33	43	0,49	0,58	0,21	0,49	0,60	0,48
14	0,42	0,52	0,68	0,42	0,53	0,30	44	0,41	0,60	0,28	0,57	0,60	0,47
15	0,41	0,62	0,42	0,67	0,41	0,47	45	0,59	0,60	0,00	0,69	0,71	0,55
16	0,34	0,66	0,47	0,69	0,33	0,45	46	0,58	0,63	0,55	0,50	0,59	0,40
17	0,37	0,54	0,48	0,66	0,66	0,24	47	0,54	0,71	0,58	0,65	0,89	0,48
18	0,58	0,60	0,75	0,68	0,58	0,25	48	0,78	0,73	0,46	0,65	0,83	0,63
19	0,48	0,83	0,58	0,85	0,49	0,86	49	0,47	0,55	0,45	0,66	0,82	0,67
20	0,35	0,51	0,75	0,57	0,43	0,89	50	0,42	0,41	0,51	0,52	0,59	0,36
21	0,55	0,68	0,65	0,76	0,36	0,68	51	0,84	0,31	0,49	0,71	0,70	0,80
22	0,49	0,24	0,47	0,92	0,45	0,42	52	0,31	0,71	0,58	0,50	0,50	0,61
23	0,57	0,44	0,61	0,61	0,70	0,31	53	0,59	0,67	0,62	0,34	0,80	0,44
24	0,56	0,40	0,71	0,67	0,84	0,34	54	0,75	0,60	0,86	0,36	0,71	0,70
25	0,50	0,56	0,59	0,32	0,59	0,52	55	0,67	0,73	0,68	0,45	0,58	0,70
26	0,42	0,75	0,62	0,78	0,41	0,26	56	0,55	0,63	0,51	0,36	0,57	0,59
27	0,73	0,63	0,34	0,57	0,52	0,31	57	0,39	0,66	0,74	0,52	0,63	0,47
28	0,60	0,60	0,58	0,55	0,48	0,36	58	0,36	0,65	0,52	0,46	0,86	0,50
29	0,62	0,63	0,52	0,46	0,56	0,25	59	0,36	0,55	0,42	0,60	0,73	0,68
30	0,85	0,54	0,44	0,35	0,65	0,67	60	0,64	0,49	0,43	0,73	0,61	0,46

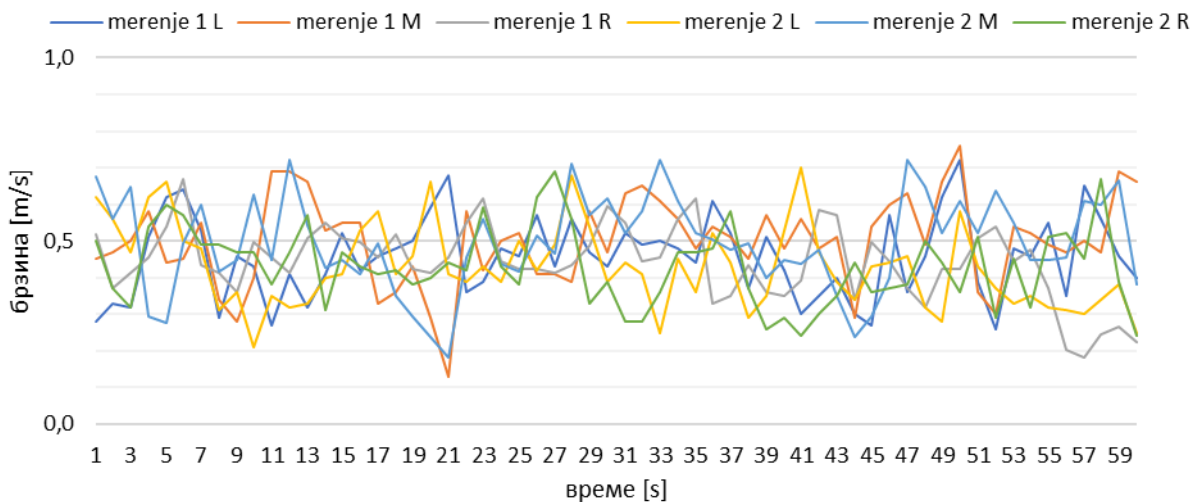
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	0,53	0,29	0,85	0,06	0,15	0,28
	M	0,58	0,03	0,84	0,06	0,14	0,24
	R	0,50	0,00	0,86	0,06	0,15	0,29
мерење 2	L	0,58	0,17	1,05	0,06	0,16	0,27
	M	0,59	0,31	0,89	0,06	0,14	0,23
	R	0,51	0,24	0,89	0,06	0,16	0,31



Угао лопатица регулатора $0^\circ - x=7\text{m}$

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	0,28	0,45	0,52	0,62	0,67	0,50	31	0,52	0,63	0,55	0,44	0,52	0,28
2	0,33	0,47	0,37	0,56	0,56	0,37	32	0,49	0,65	0,45	0,41	0,58	0,28
3	0,32	0,50	0,41	0,47	0,65	0,32	33	0,50	0,61	0,46	0,25	0,72	0,36
4	0,51	0,58	0,46	0,62	0,29	0,54	34	0,48	0,56	0,56	0,45	0,61	0,47
5	0,62	0,44	0,54	0,66	0,28	0,60	35	0,44	0,48	0,61	0,36	0,52	0,47
6	0,64	0,45	0,67	0,50	0,49	0,57	36	0,61	0,54	0,33	0,52	0,50	0,48
7	0,53	0,55	0,43	0,48	0,60	0,49	37	0,52	0,51	0,35	0,44	0,48	0,58
8	0,29	0,34	0,41	0,31	0,42	0,49	38	0,37	0,45	0,43	0,29	0,49	0,37
9	0,46	0,28	0,36	0,36	0,45	0,47	39	0,51	0,57	0,36	0,35	0,40	0,26
10	0,43	0,40	0,50	0,21	0,63	0,47	40	0,42	0,48	0,35	0,53	0,45	0,29
11	0,27	0,69	0,46	0,35	0,45	0,38	41	0,30	0,56	0,39	0,70	0,44	0,24
12	0,41	0,69	0,41	0,32	0,72	0,47	42	0,35	0,48	0,58	0,47	0,48	0,30
13	0,32	0,66	0,51	0,33	0,54	0,57	43	0,40	0,51	0,57	0,39	0,35	0,35
14	0,41	0,53	0,55	0,40	0,43	0,31	44	0,30	0,29	0,34	0,34	0,24	0,44
15	0,52	0,55	0,51	0,41	0,45	0,47	45	0,27	0,54	0,50	0,43	0,29	0,36
16	0,42	0,55	0,50	0,53	0,41	0,43	46	0,57	0,60	0,45	0,44	0,40	0,37
17	0,46	0,33	0,46	0,58	0,49	0,41	47	0,36	0,63	0,37	0,46	0,72	0,38
18	0,48	0,36	0,52	0,41	0,35	0,42	48	0,46	0,49	0,32	0,32	0,65	0,50
19	0,50	0,43	0,42	0,46	0,29	0,38	49	0,62	0,66	0,42	0,28	0,52	0,44
20	0,59	0,29	0,41	0,66	0,24	0,40	50	0,72	0,76	0,42	0,58	0,61	0,36
21	0,68	0,13	0,46	0,41	0,18	0,44	51	0,39	0,36	0,51	0,43	0,52	0,51
22	0,36	0,58	0,55	0,39	0,46	0,42	52	0,26	0,30	0,54	0,37	0,64	0,29
23	0,39	0,42	0,61	0,43	0,56	0,59	53	0,48	0,54	0,45	0,33	0,55	0,45
24	0,48	0,50	0,45	0,39	0,44	0,43	54	0,46	0,52	0,48	0,35	0,45	0,32
25	0,46	0,52	0,42	0,50	0,42	0,38	55	0,55	0,49	0,37	0,32	0,45	0,51
26	0,57	0,41	0,42	0,42	0,51	0,62	56	0,35	0,47	0,20	0,31	0,46	0,52
27	0,43	0,41	0,41	0,49	0,47	0,69	57	0,65	0,50	0,18	0,30	0,61	0,45
28	0,56	0,39	0,43	0,68	0,71	0,56	58	0,56	0,47	0,24	0,34	0,60	0,67
29	0,47	0,58	0,49	0,54	0,57	0,33	59	0,46	0,69	0,27	0,38	0,67	0,39
30	0,43	0,47	0,59	0,39	0,62	0,39	60	0,40	0,66	0,22	0,25	0,38	0,24

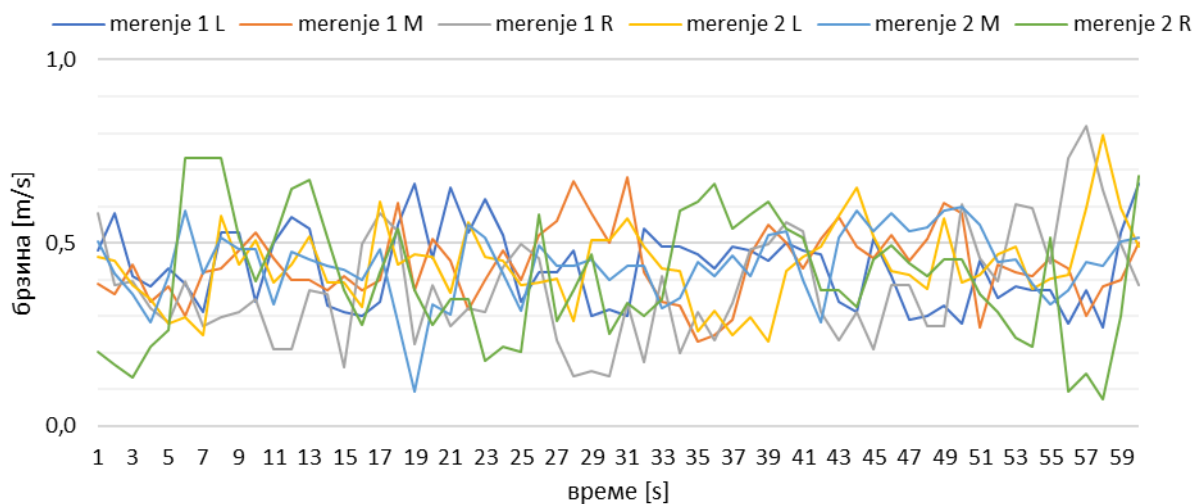
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	0,46	0,26	0,72	0,05	0,11	0,24
	M	0,50	0,13	0,76	0,06	0,12	0,24
	R	0,44	0,18	0,67	0,05	0,10	0,23
мерење 2	L	0,43	0,21	0,70	0,05	0,11	0,26
	M	0,49	0,18	0,72	0,05	0,13	0,26
	R	0,43	0,24	0,69	0,05	0,10	0,24



Угао лопатица регулатора 0° - $x=8m$

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	0,48	0,39	0,58	0,46	0,50	0,20	31	0,30	0,68	0,33	0,57	0,44	0,34
2	0,58	0,36	0,38	0,45	0,42	0,17	32	0,54	0,42	0,17	0,49	0,44	0,30
3	0,41	0,44	0,40	0,38	0,36	0,13	33	0,49	0,34	0,41	0,43	0,32	0,35
4	0,38	0,34	0,32	0,35	0,29	0,22	34	0,49	0,33	0,20	0,42	0,35	0,59
5	0,43	0,38	0,28	0,28	0,41	0,26	35	0,47	0,23	0,31	0,26	0,45	0,61
6	0,39	0,30	0,40	0,30	0,59	0,73	36	0,43	0,25	0,24	0,32	0,41	0,66
7	0,31	0,42	0,27	0,25	0,42	0,73	37	0,49	0,29	0,33	0,25	0,47	0,54
8	0,53	0,43	0,30	0,58	0,51	0,73	38	0,48	0,47	0,48	0,30	0,41	0,58
9	0,53	0,48	0,31	0,44	0,48	0,52	39	0,45	0,55	0,50	0,23	0,52	0,61
10	0,34	0,53	0,35	0,51	0,48	0,40	40	0,50	0,50	0,56	0,42	0,53	0,54
11	0,50	0,46	0,21	0,39	0,33	0,50	41	0,48	0,43	0,53	0,46	0,40	0,52
12	0,57	0,40	0,21	0,44	0,48	0,65	42	0,47	0,51	0,31	0,49	0,29	0,37
13	0,54	0,40	0,37	0,52	0,46	0,67	43	0,34	0,57	0,24	0,58	0,51	0,37
14	0,33	0,37	0,36	0,39	0,44	0,52	44	0,31	0,49	0,31	0,65	0,59	0,32
15	0,31	0,41	0,16	0,39	0,43	0,37	45	0,51	0,46	0,21	0,52	0,53	0,46
16	0,30	0,37	0,50	0,33	0,40	0,28	46	0,41	0,52	0,38	0,42	0,58	0,49
17	0,34	0,40	0,58	0,61	0,48	0,42	47	0,29	0,45	0,38	0,41	0,53	0,44
18	0,55	0,61	0,53	0,44	0,29	0,54	48	0,30	0,51	0,27	0,37	0,54	0,41
19	0,66	0,37	0,22	0,47	0,10	0,37	49	0,33	0,61	0,27	0,57	0,59	0,46
20	0,46	0,51	0,38	0,46	0,33	0,28	50	0,28	0,58	0,61	0,39	0,60	0,46
21	0,65	0,45	0,27	0,36	0,30	0,35	51	0,45	0,27	0,46	0,41	0,55	0,36
22	0,53	0,32	0,32	0,56	0,55	0,35	52	0,35	0,44	0,40	0,47	0,45	0,31
23	0,62	0,40	0,31	0,46	0,51	0,18	53	0,38	0,42	0,61	0,49	0,46	0,24
24	0,52	0,48	0,43	0,45	0,42	0,22	54	0,37	0,41	0,59	0,37	0,39	0,22
25	0,34	0,40	0,50	0,38	0,31	0,20	55	0,37	0,46	0,45	0,40	0,33	0,52
26	0,42	0,52	0,46	0,39	0,49	0,58	56	0,28	0,43	0,73	0,41	0,37	0,10
27	0,42	0,56	0,24	0,40	0,44	0,29	57	0,37	0,30	0,82	0,59	0,45	0,14
28	0,48	0,67	0,14	0,29	0,44	0,37	58	0,27	0,38	0,64	0,80	0,44	0,07
29	0,30	0,58	0,15	0,51	0,46	0,47	59	0,53	0,40	0,50	0,59	0,50	0,30
30	0,32	0,50	0,14	0,51	0,40	0,25	60	0,66	0,50	0,38	0,49	0,51	0,68

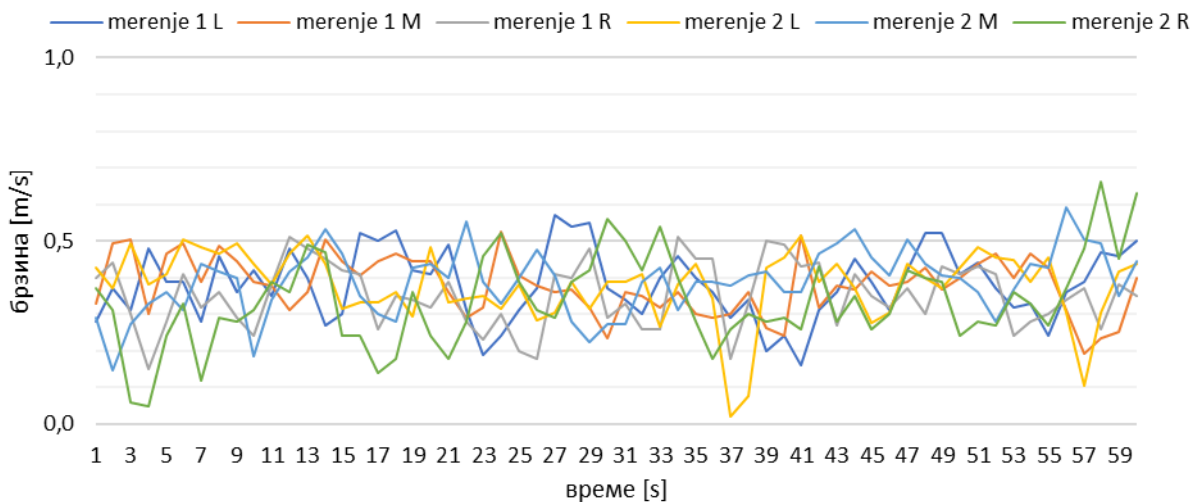
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	0,43	0,27	0,66	0,05	0,10	0,24
	M	0,44	0,23	0,68	0,05	0,10	0,22
	R	0,38	0,14	0,82	0,05	0,15	0,39
мерење 2	L	0,44	0,23	0,80	0,05	0,11	0,24
	M	0,44	0,10	0,60	0,05	0,09	0,21
	R	0,40	0,07	0,73	0,05	0,17	0,42



Угао лопатица регулатора $0^\circ - x=9\text{m}$

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	0,28	0,33	0,40	0,43	0,29	0,37	31	0,34	0,36	0,33	0,39	0,27	0,50
2	0,37	0,49	0,44	0,37	0,15	0,31	32	0,30	0,35	0,26	0,41	0,39	0,42
3	0,31	0,50	0,30	0,49	0,27	0,06	33	0,40	0,32	0,26	0,27	0,43	0,54
4	0,48	0,30	0,15	0,38	0,33	0,05	34	0,46	0,36	0,51	0,38	0,31	0,40
5	0,39	0,47	0,28	0,41	0,36	0,24	35	0,40	0,30	0,45	0,44	0,39	0,28
6	0,39	0,49	0,41	0,50	0,31	0,33	36	0,36	0,29	0,45	0,34	0,39	0,18
7	0,28	0,39	0,32	0,48	0,44	0,12	37	0,29	0,30	0,18	0,02	0,38	0,26
8	0,46	0,49	0,36	0,47	0,42	0,29	38	0,34	0,36	0,33	0,08	0,41	0,30
9	0,36	0,45	0,29	0,49	0,40	0,28	39	0,20	0,26	0,50	0,43	0,42	0,28
10	0,42	0,39	0,24	0,44	0,18	0,31	40	0,24	0,24	0,49	0,46	0,36	0,29
11	0,35	0,38	0,38	0,38	0,34	0,39	41	0,16	0,51	0,43	0,51	0,36	0,26
12	0,48	0,31	0,51	0,47	0,42	0,36	42	0,31	0,32	0,44	0,39	0,47	0,43
13	0,40	0,36	0,48	0,51	0,46	0,49	43	0,36	0,38	0,27	0,44	0,49	0,28
14	0,27	0,50	0,45	0,44	0,53	0,47	44	0,45	0,37	0,41	0,37	0,53	0,35
15	0,30	0,45	0,42	0,31	0,47	0,24	45	0,39	0,42	0,35	0,28	0,46	0,26
16	0,52	0,41	0,41	0,33	0,35	0,24	46	0,31	0,38	0,32	0,30	0,41	0,30
17	0,50	0,45	0,26	0,33	0,30	0,14	47	0,42	0,39	0,37	0,44	0,50	0,42
18	0,53	0,47	0,35	0,36	0,28	0,18	48	0,52	0,43	0,30	0,40	0,44	0,40
19	0,42	0,45	0,34	0,29	0,43	0,36	49	0,52	0,37	0,43	0,37	0,41	0,39
20	0,41	0,45	0,32	0,48	0,44	0,24	50	0,41	0,40	0,41	0,43	0,40	0,24
21	0,49	0,36	0,39	0,33	0,40	0,18	51	0,44	0,44	0,43	0,48	0,36	0,28
22	0,31	0,29	0,28	0,34	0,55	0,28	52	0,37	0,47	0,41	0,46	0,28	0,27
23	0,19	0,32	0,23	0,35	0,39	0,46	53	0,32	0,40	0,24	0,45	0,37	0,36
24	0,24	0,52	0,30	0,31	0,33	0,52	54	0,33	0,47	0,28	0,39	0,44	0,33
25	0,31	0,41	0,20	0,38	0,40	0,39	55	0,24	0,43	0,30	0,46	0,43	0,27
26	0,37	0,38	0,18	0,29	0,48	0,31	56	0,36	0,31	0,34	0,30	0,59	0,37
27	0,57	0,36	0,41	0,30	0,41	0,29	57	0,39	0,19	0,37	0,10	0,50	0,48
28	0,54	0,37	0,40	0,39	0,28	0,39	58	0,47	0,23	0,26	0,30	0,49	0,66
29	0,55	0,32	0,48	0,31	0,22	0,42	59	0,46	0,25	0,38	0,42	0,35	0,45
30	0,37	0,23	0,29	0,39	0,27	0,56	60	0,50	0,40	0,35	0,44	0,45	0,63

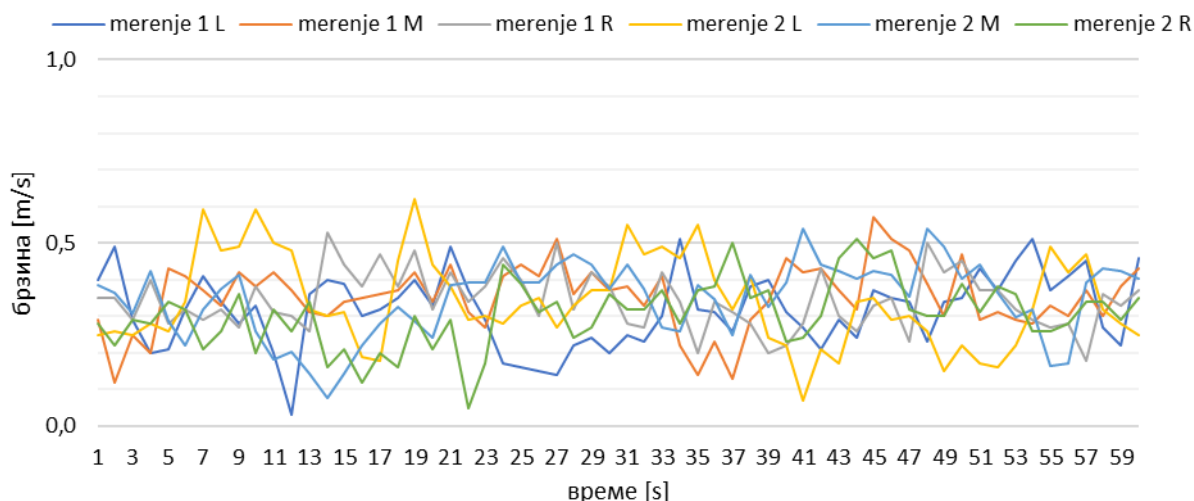
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	0,38	0,16	0,57	0,05	0,10	0,25
	M	0,38	0,19	0,52	0,05	0,08	0,20
	R	0,35	0,15	0,51	0,05	0,09	0,25
мерење 2	L	0,38	0,02	0,51	0,05	0,10	0,25
	M	0,39	0,15	0,59	0,05	0,09	0,22
	R	0,34	0,05	0,66	0,05	0,12	0,36



Угао лопатица регулатора 0° - $x=10\text{m}$

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	0,40	0,29	0,35	0,25	0,38	0,28	31	0,25	0,38	0,28	0,55	0,44	0,32
2	0,49	0,12	0,35	0,26	0,36	0,22	32	0,23	0,33	0,27	0,47	0,37	0,32
3	0,29	0,25	0,29	0,25	0,31	0,29	33	0,30	0,41	0,42	0,49	0,27	0,37
4	0,20	0,20	0,40	0,28	0,42	0,28	34	0,51	0,22	0,34	0,46	0,26	0,28
5	0,21	0,43	0,28	0,26	0,29	0,34	35	0,32	0,14	0,20	0,55	0,38	0,37
6	0,32	0,41	0,32	0,34	0,22	0,32	36	0,31	0,23	0,34	0,40	0,35	0,38
7	0,41	0,37	0,29	0,59	0,32	0,21	37	0,26	0,13	0,31	0,32	0,25	0,50
8	0,34	0,33	0,32	0,48	0,37	0,26	38	0,38	0,29	0,28	0,41	0,41	0,35
9	0,28	0,42	0,27	0,49	0,41	0,36	39	0,40	0,34	0,20	0,24	0,33	0,37
10	0,33	0,38	0,38	0,59	0,26	0,20	40	0,31	0,46	0,22	0,22	0,39	0,23
11	0,20	0,42	0,31	0,50	0,18	0,32	41	0,27	0,42	0,28	0,07	0,54	0,24
12	0,03	0,37	0,30	0,48	0,20	0,26	42	0,21	0,43	0,43	0,21	0,44	0,30
13	0,36	0,31	0,26	0,32	0,14	0,34	43	0,29	0,37	0,30	0,17	0,42	0,46
14	0,40	0,30	0,53	0,30	0,08	0,16	44	0,24	0,32	0,26	0,34	0,40	0,51
15	0,39	0,34	0,44	0,31	0,14	0,21	45	0,37	0,57	0,33	0,35	0,42	0,46
16	0,30	0,35	0,38	0,19	0,22	0,12	46	0,35	0,51	0,35	0,29	0,41	0,48
17	0,32	0,36	0,47	0,18	0,28	0,20	47	0,34	0,48	0,23	0,30	0,36	0,32
18	0,35	0,37	0,38	0,45	0,33	0,16	48	0,23	0,39	0,50	0,26	0,54	0,30
19	0,40	0,42	0,48	0,62	0,29	0,30	49	0,34	0,30	0,42	0,15	0,49	0,30
20	0,33	0,34	0,32	0,44	0,24	0,21	50	0,35	0,47	0,45	0,22	0,40	0,39
21	0,49	0,44	0,42	0,38	0,38	0,29	51	0,43	0,29	0,37	0,17	0,44	0,31
22	0,37	0,31	0,34	0,29	0,39	0,05	52	0,37	0,31	0,37	0,16	0,36	0,38
23	0,29	0,27	0,38	0,30	0,39	0,17	53	0,45	0,29	0,32	0,22	0,30	0,36
24	0,17	0,41	0,46	0,28	0,49	0,44	54	0,51	0,28	0,29	0,32	0,32	0,26
25	0,16	0,44	0,40	0,33	0,39	0,39	55	0,37	0,33	0,27	0,49	0,16	0,26
26	0,15	0,41	0,30	0,35	0,39	0,31	56	0,41	0,30	0,28	0,42	0,17	0,28
27	0,14	0,51	0,50	0,27	0,44	0,34	57	0,45	0,37	0,18	0,47	0,39	0,34
28	0,22	0,36	0,32	0,33	0,47	0,24	58	0,27	0,30	0,36	0,32	0,43	0,34
29	0,24	0,42	0,42	0,37	0,44	0,27	59	0,22	0,38	0,33	0,28	0,42	0,29
30	0,20	0,37	0,38	0,37	0,37	0,36	60	0,46	0,43	0,37	0,25	0,40	0,35

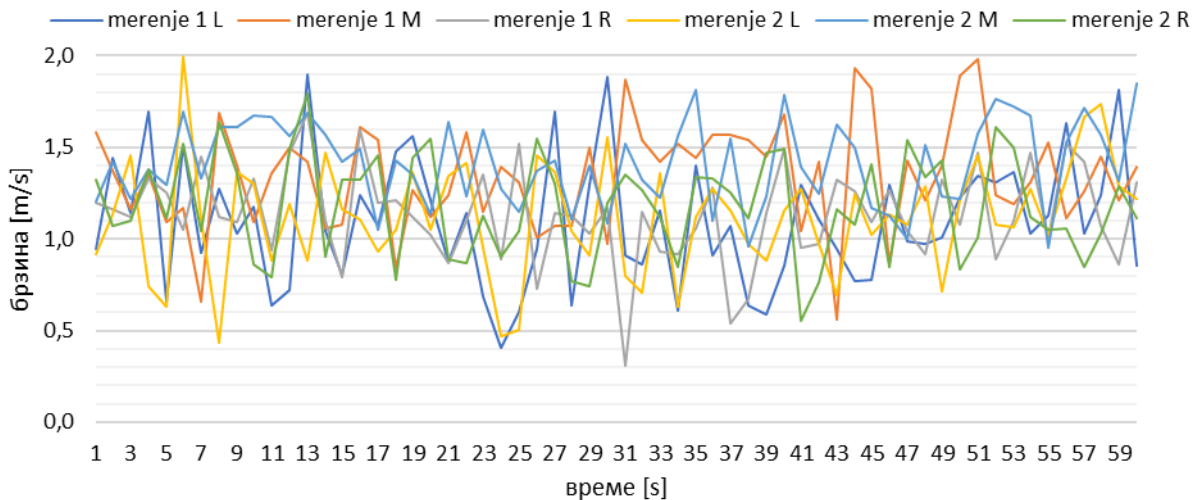
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	0,32	0,03	0,51	0,05	0,10	0,31
	M	0,35	0,12	0,57	0,05	0,09	0,25
	R	0,34	0,18	0,53	0,05	0,08	0,23
мерење 2	L	0,34	0,07	0,62	0,05	0,12	0,36
	M	0,35	0,08	0,54	0,05	0,10	0,29
	R	0,31	0,05	0,51	0,05	0,09	0,29



Угао лопатица регулатора 15° - $x=3m$

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	0,95	1,58	1,20	0,92	1,21	1,32	31	0,91	1,87	0,31	0,80	1,52	1,35
2	1,44	1,37	1,16	1,13	1,42	1,07	32	0,86	1,54	1,15	0,71	1,32	1,27
3	1,14	1,16	1,12	1,46	1,22	1,10	33	1,15	1,42	0,93	1,36	1,23	1,12
4	1,69	1,35	1,33	0,74	1,38	1,38	34	0,61	1,52	0,92	0,63	1,56	0,85
5	0,66	1,09	1,25	0,63	1,29	1,11	35	1,40	1,44	1,06	1,12	1,81	1,34
6	1,51	1,17	1,05	1,99	1,70	1,52	36	0,91	1,57	1,28	1,28	1,10	1,33
7	0,92	0,66	1,45	1,11	1,33	1,04	37	1,07	1,57	0,54	1,15	1,55	1,25
8	1,27	1,69	1,12	0,44	1,61	1,64	38	0,64	1,54	0,67	0,97	0,96	1,11
9	1,03	1,40	1,09	1,37	1,61	1,36	39	0,59	1,45	1,14	0,88	1,23	1,47
10	1,18	1,09	1,33	1,30	1,68	0,86	40	0,85	1,68	1,49	1,15	1,78	1,49
11	0,64	1,36	0,94	0,88	1,67	0,79	41	1,30	1,04	0,95	1,28	1,39	0,55
12	0,72	1,50	1,47	1,19	1,56	1,49	42	1,10	1,42	0,97	0,97	1,24	0,76
13	1,90	1,42	1,69	0,88	1,69	1,79	43	0,95	0,56	1,32	0,69	1,63	1,16
14	1,04	1,06	1,10	1,47	1,57	0,90	44	0,77	1,93	1,26	1,24	1,50	1,08
15	0,80	1,08	0,79	1,16	1,42	1,32	45	0,78	1,82	1,09	1,02	1,17	1,41
16	1,24	1,61	1,60	1,11	1,49	1,32	46	1,30	0,87	1,27	1,13	1,13	0,85
17	1,07	1,54	1,20	0,93	1,05	1,46	47	0,98	1,43	1,04	1,08	1,00	1,54
18	1,48	0,84	1,21	1,05	1,43	0,78	48	0,97	1,21	0,92	1,29	1,51	1,34
19	1,56	1,27	1,12	1,37	1,35	1,44	49	1,01	1,40	1,32	0,72	1,23	1,43
20	1,21	1,12	1,02	1,05	1,14	1,55	50	1,22	1,89	1,08	1,21	1,22	0,83
21	0,88	1,24	0,87	1,34	1,64	0,89	51	1,34	1,98	1,47	1,46	1,58	1,01
22	1,14	1,58	1,10	1,41	1,23	0,87	52	1,31	1,24	0,89	1,08	1,76	1,61
23	0,68	1,15	1,35	0,95	1,60	1,13	53	1,37	1,19	1,10	1,06	1,72	1,50
24	0,41	1,39	0,89	0,47	1,27	0,90	54	1,03	1,31	1,47	1,28	1,68	1,12
25	0,60	1,31	1,52	0,50	1,15	1,04	55	1,13	1,53	1,01	1,02	0,95	1,05
26	0,95	1,01	0,73	1,46	1,37	1,55	56	1,63	1,11	1,52	1,33	1,53	1,06
27	1,69	1,07	1,14	1,37	1,43	1,30	57	1,03	1,26	1,42	1,67	1,72	0,85
28	0,64	1,07	1,13	1,04	1,11	0,77	58	1,24	1,45	1,07	1,74	1,57	1,03
29	1,30	1,50	1,03	0,91	1,40	0,74	59	1,81	1,21	0,86	1,29	1,31	1,29
30	1,88	0,97	1,17	1,56	1,09	1,20	60	0,85	1,39	1,31	1,22	1,85	1,11

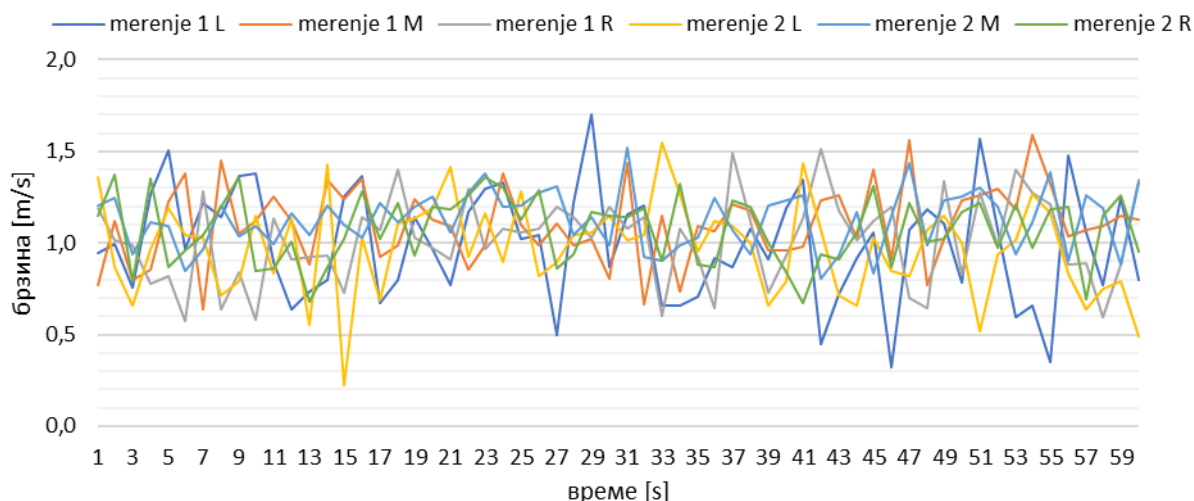
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	1,10	0,41	1,90	0,08	0,34	0,31
	M	1,34	0,56	1,98	0,10	0,29	0,22
	R	1,13	0,31	1,69	0,09	0,25	0,23
мерење 2	L	1,12	0,44	1,99	0,09	0,31	0,27
	M	1,41	0,95	1,85	0,10	0,23	0,16
	R	1,18	0,55	1,79	0,09	0,27	0,23



Угао лопатица регулатора 15° - x=4m

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	0,94	0,77	1,19	1,36	1,21	1,15	31	1,16	1,44	1,08	1,02	1,52	1,14
2	0,99	1,12	1,02	0,87	1,24	1,37	32	1,21	0,67	1,14	1,04	0,92	1,19
3	0,76	0,80	0,99	0,66	0,94	0,79	33	0,66	1,15	0,60	1,54	0,90	0,90
4	1,27	0,86	0,77	0,96	1,11	1,35	34	0,66	0,73	1,08	1,27	0,99	1,32
5	1,50	1,22	0,82	1,19	1,09	0,87	35	0,71	1,09	0,92	0,95	1,03	0,88
6	0,97	1,38	0,57	1,04	0,85	0,96	36	0,92	1,06	0,65	1,12	1,24	0,87
7	1,22	0,64	1,28	1,03	0,97	1,04	37	0,87	1,21	1,49	1,10	1,07	1,23
8	1,14	1,45	0,64	0,71	1,21	1,20	38	1,08	1,18	1,12	1,00	0,94	1,20
9	1,37	1,05	0,84	0,79	1,04	1,36	39	0,91	0,96	0,73	0,66	1,21	1,00
10	1,38	1,12	0,58	1,15	1,09	0,85	40	1,19	0,96	0,93	0,79	1,24	0,84
11	0,89	1,25	1,13	0,83	1,00	0,86	41	1,34	0,98	1,13	1,44	1,26	0,67
12	0,63	1,12	0,91	1,14	1,16	1,01	42	0,45	1,23	1,52	1,07	0,81	0,94
13	0,73	0,88	0,92	0,55	1,05	0,68	43	0,72	1,26	1,18	0,71	0,93	0,91
14	0,80	1,34	0,93	1,43	1,21	0,87	44	0,92	1,02	1,02	0,66	1,17	1,06
15	1,26	1,24	0,73	0,22	1,10	1,02	45	1,06	1,40	1,12	1,03	0,84	1,31
16	1,37	1,35	1,14	1,03	1,03	1,28	46	0,32	0,91	1,20	0,84	1,15	0,87
17	0,67	0,92	1,07	0,69	1,22	1,02	47	1,07	1,56	0,70	0,82	1,43	1,22
18	0,80	0,99	1,40	1,11	1,11	1,22	48	1,18	0,77	0,65	1,07	0,99	1,01
19	1,14	1,24	1,03	1,14	1,20	0,93	49	1,11	1,02	1,34	1,15	1,24	1,02
20	0,97	1,13	0,98	1,19	1,25	1,20	50	0,78	1,23	0,83	1,00	1,25	1,17
21	0,77	1,09	0,91	1,41	1,05	1,18	51	1,57	1,26	1,27	0,51	1,30	1,22
22	1,17	0,86	1,29	0,92	1,27	1,26	52	1,07	1,30	0,99	0,94	1,20	0,97
23	1,29	0,99	0,96	1,16	1,38	1,36	53	0,60	1,18	1,40	1,02	0,94	1,21
24	1,33	1,38	1,08	0,90	1,20	1,30	54	0,66	1,59	1,27	1,27	1,11	0,97
25	1,02	1,10	1,06	1,28	1,21	1,13	55	0,35	1,33	1,21	1,16	1,39	1,18
26	1,04	0,99	1,08	0,82	1,27	1,29	56	1,48	1,03	0,88	0,83	0,90	1,20
27	0,50	1,11	1,20	0,90	1,31	0,86	57	1,06	1,07	0,89	0,63	1,26	0,69
28	1,22	0,99	1,14	1,04	1,05	0,94	58	0,77	1,09	0,59	0,75	1,19	1,15
29	1,70	1,02	1,03	1,06	1,14	1,17	59	1,24	1,15	0,88	0,79	0,88	1,26
30	0,87	0,81	1,20	1,15	0,99	1,15	60	0,80	1,13	1,35	0,49	1,33	0,95

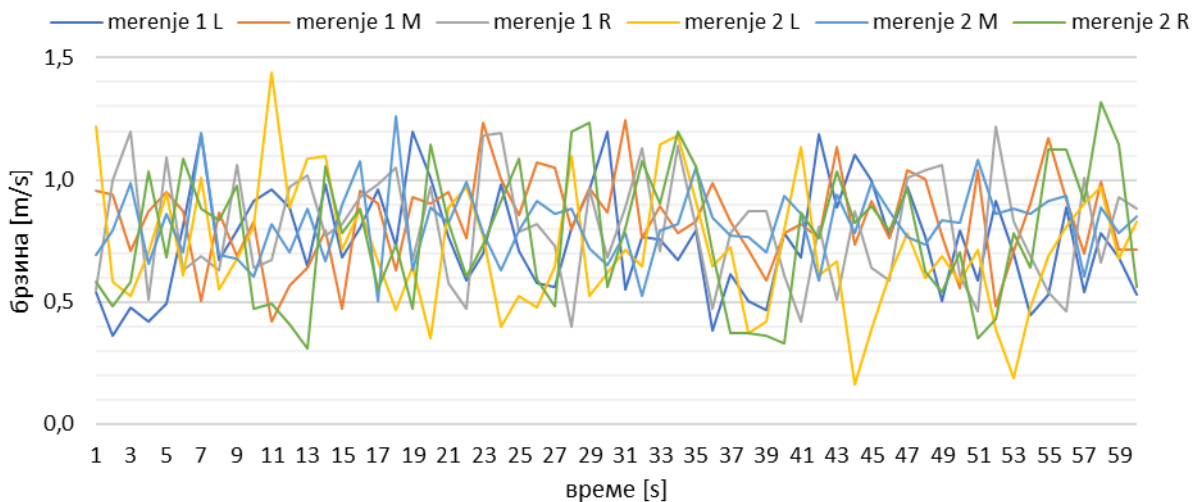
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	0,99	0,32	1,70	0,08	0,30	0,30
	M	1,10	0,64	1,59	0,09	0,21	0,19
	R	1,02	0,57	1,52	0,08	0,23	0,23
мерење 2	L	0,97	0,22	1,54	0,08	0,25	0,26
	M	1,13	0,81	1,52	0,09	0,16	0,14
	R	1,07	0,67	1,37	0,08	0,18	0,17



Угао лопатица регулатора 15° - $x=5m$

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	0,54	0,96	0,55	1,22	0,69	0,58	31	0,55	1,25	0,89	0,71	0,78	0,80
2	0,36	0,94	1,00	0,59	0,79	0,48	32	0,77	0,76	1,13	0,64	0,52	1,08
3	0,48	0,71	1,20	0,53	0,99	0,58	33	0,76	0,89	0,71	1,15	0,79	0,90
4	0,42	0,87	0,51	0,70	0,66	1,03	34	0,67	0,78	1,14	1,18	0,82	1,20
5	0,49	0,95	1,09	0,95	0,86	0,68	35	0,79	0,83	0,81	0,91	1,05	1,06
6	0,82	0,87	0,63	0,61	0,70	1,09	36	0,38	0,99	0,47	0,64	0,84	0,70
7	1,19	0,50	0,69	1,01	1,19	0,88	37	0,61	0,83	0,78	0,73	0,77	0,37
8	0,67	0,86	0,63	0,55	0,69	0,84	38	0,50	0,72	0,87	0,37	0,76	0,37
9	0,79	0,69	1,06	0,68	0,68	0,98	39	0,47	0,59	0,87	0,42	0,70	0,36
10	0,91	0,83	0,64	0,81	0,60	0,47	40	0,78	0,78	0,61	0,80	0,93	0,33
11	0,96	0,42	0,67	1,44	0,82	0,50	41	0,68	0,82	0,42	1,13	0,86	0,87
12	0,89	0,57	0,97	0,89	0,70	0,41	42	1,19	0,76	0,81	0,61	0,59	0,76
13	0,65	0,64	1,02	1,09	0,88	0,31	43	0,89	1,13	0,51	0,67	0,94	1,03
14	0,98	0,79	0,77	1,10	0,67	1,06	44	1,10	0,73	0,87	0,16	0,78	0,83
15	0,68	0,47	0,82	0,71	0,90	0,78	45	1,00	0,91	0,64	0,39	0,99	0,89
16	0,80	0,96	0,93	0,88	1,08	0,88	46	0,77	0,76	0,59	0,61	0,87	0,79
17	0,96	0,90	0,98	0,67	0,51	0,55	47	0,97	1,04	1,01	0,78	0,76	0,97
18	0,73	0,63	1,05	0,47	1,26	0,74	48	0,77	1,00	1,04	0,60	0,74	0,63
19	1,20	0,93	0,67	0,64	0,63	0,47	49	0,50	0,77	1,06	0,69	0,84	0,54
20	1,01	0,90	0,97	0,35	0,89	1,14	50	0,79	0,56	0,61	0,59	0,83	0,70
21	0,77	0,95	0,58	0,89	0,83	0,83	51	0,59	1,04	0,46	0,71	1,08	0,35
22	0,59	0,76	0,47	0,97	1,00	0,61	52	0,91	0,48	1,22	0,39	0,86	0,43
23	0,70	1,24	1,18	0,77	0,78	0,74	53	0,70	0,71	0,83	0,19	0,88	0,78
24	0,98	1,00	1,19	0,40	0,63	0,91	54	0,44	0,90	0,69	0,48	0,86	0,64
25	0,71	0,86	0,79	0,53	0,79	1,09	55	0,53	1,17	0,54	0,69	0,92	1,12
26	0,58	1,07	0,82	0,48	0,92	0,59	56	0,89	0,92	0,46	0,81	0,93	1,12
27	0,56	1,05	0,73	0,64	0,86	0,48	57	0,54	0,70	1,01	0,90	0,60	0,91
28	0,80	0,80	0,40	1,10	0,88	1,20	58	0,78	1,00	0,66	0,97	0,89	1,32
29	0,96	0,97	0,96	0,53	0,72	1,23	59	0,68	0,72	0,93	0,68	0,78	1,14
30	1,20	0,86	0,68	0,62	0,65	0,56	60	0,53	0,72	0,88	0,83	0,85	0,56

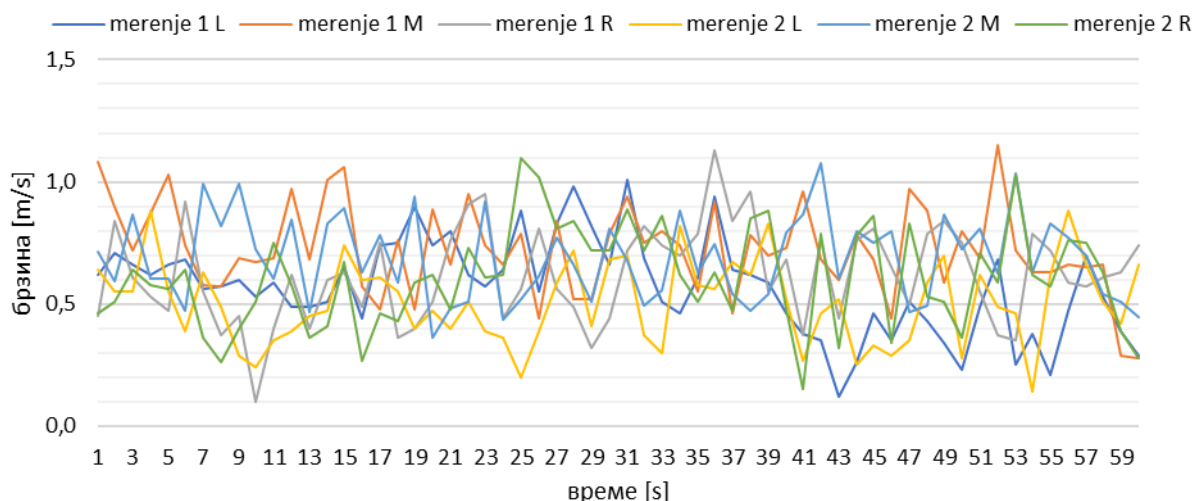
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	0,75	0,36	1,20	0,07	0,21	0,28
	M	0,84	0,42	1,25	0,07	0,18	0,21
	R	0,80	0,40	1,22	0,07	0,22	0,28
мерење 2	L	0,72	0,16	1,44	0,07	0,26	0,36
	M	0,82	0,51	1,26	0,07	0,15	0,18
	R	0,77	0,31	1,32	0,07	0,27	0,35



Угао лопатица регулатора 15° - x=6m

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	0,62	1,08	0,45	0,64	0,72	0,46	31	1,01	0,94	0,72	0,70	0,68	0,89
2	0,71	0,90	0,84	0,55	0,60	0,51	32	0,69	0,75	0,82	0,37	0,49	0,72
3	0,66	0,72	0,61	0,55	0,86	0,64	33	0,51	0,80	0,74	0,30	0,56	0,86
4	0,62	0,87	0,53	0,88	0,60	0,58	34	0,46	0,74	0,70	0,82	0,88	0,62
5	0,66	1,03	0,47	0,55	0,60	0,56	35	0,61	0,55	0,79	0,58	0,63	0,51
6	0,68	0,74	0,92	0,39	0,47	0,64	36	0,94	0,92	1,13	0,56	0,74	0,63
7	0,56	0,58	0,55	0,63	1,00	0,36	37	0,64	0,46	0,84	0,67	0,54	0,47
8	0,57	0,57	0,37	0,49	0,82	0,26	38	0,62	0,78	0,96	0,62	0,47	0,85
9	0,60	0,69	0,45	0,29	1,00	0,40	39	0,59	0,70	0,55	0,83	0,54	0,88
10	0,53	0,67	0,10	0,24	0,73	0,51	40	0,46	0,73	0,68	0,52	0,79	0,48
11	0,59	0,69	0,40	0,35	0,60	0,75	41	0,38	0,96	0,37	0,27	0,86	0,15
12	0,49	0,97	0,62	0,39	0,85	0,58	42	0,35	0,68	0,76	0,46	1,08	0,79
13	0,49	0,68	0,40	0,45	0,47	0,36	43	0,12	0,60	0,44	0,52	0,60	0,32
14	0,51	1,01	0,60	0,47	0,83	0,41	44	0,26	0,78	0,76	0,25	0,80	0,78
15	0,65	1,06	0,63	0,74	0,89	0,67	45	0,46	0,68	0,81	0,33	0,75	0,86
16	0,44	0,57	0,49	0,60	0,63	0,27	46	0,35	0,44	0,65	0,29	0,80	0,34
17	0,74	0,48	0,75	0,61	0,78	0,46	47	0,51	0,97	0,50	0,35	0,47	0,83
18	0,75	0,76	0,36	0,55	0,59	0,43	48	0,43	0,88	0,79	0,59	0,49	0,53
19	0,90	0,48	0,40	0,40	0,94	0,59	49	0,34	0,59	0,84	0,70	0,86	0,51
20	0,74	0,89	0,51	0,47	0,36	0,62	50	0,23	0,80	0,75	0,28	0,73	0,36
21	0,80	0,66	0,76	0,40	0,48	0,48	51	0,49	0,69	0,55	0,62	0,81	0,71
22	0,62	0,95	0,91	0,51	0,51	0,73	52	0,68	1,15	0,37	0,49	0,62	0,59
23	0,57	0,74	0,95	0,39	0,92	0,61	53	0,25	0,72	0,35	0,46	1,03	1,03
24	0,64	0,66	0,44	0,36	0,44	0,62	54	0,38	0,63	0,79	0,14	0,63	0,62
25	0,88	0,79	0,56	0,20	0,52	1,10	55	0,21	0,63	0,72	0,62	0,83	0,57
26	0,55	0,44	0,81	0,39	0,61	1,02	56	0,47	0,66	0,59	0,88	0,77	0,76
27	0,83	0,84	0,56	0,59	0,77	0,81	57	0,70	0,65	0,57	0,66	0,70	0,75
28	0,98	0,52	0,49	0,72	0,66	0,84	58	0,53	0,66	0,61	0,51	0,54	0,63
29	0,82	0,52	0,32	0,41	0,51	0,72	59	0,39	0,29	0,63	0,42	0,51	0,39
30	0,66	0,79	0,44	0,68	0,81	0,72	60	0,29	0,28	0,74	0,66	0,45	0,28

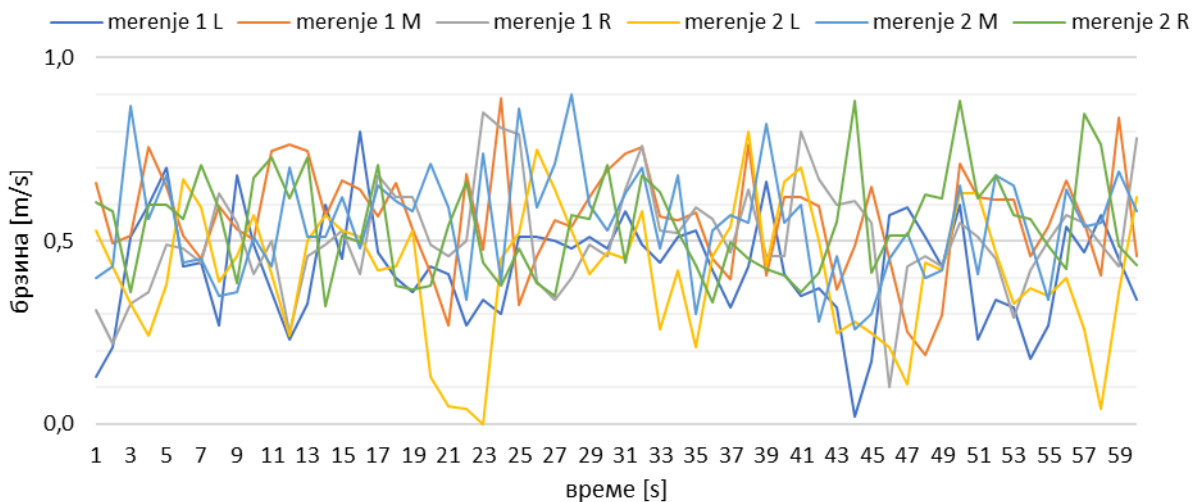
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	0,57	0,12	1,01	0,06	0,19	0,34
	M	0,72	0,28	1,15	0,07	0,19	0,26
	R	0,62	0,10	1,13	0,06	0,19	0,31
мерење 2	L	0,51	0,14	0,88	0,06	0,17	0,33
	M	0,69	0,36	1,08	0,06	0,17	0,25
	R	0,61	0,15	1,10	0,06	0,20	0,33



Угао лопатица регулатора 15° - $x=7\text{m}$

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	0,13	0,657	0,31	0,53	0,40	0,61	31	0,58	0,738	0,64	0,45	0,63	0,44
2	0,21	0,495	0,22	0,43	0,43	0,58	32	0,49	0,756	0,76	0,58	0,70	0,68
3	0,51	0,513	0,33	0,33	0,87	0,36	33	0,44	0,567	0,53	0,26	0,48	0,63
4	0,60	0,756	0,36	0,24	0,56	0,60	34	0,51	0,558	0,52	0,42	0,68	0,52
5	0,70	0,648	0,49	0,38	0,68	0,60	35	0,53	0,576	0,59	0,21	0,30	0,43
6	0,43	0,513	0,48	0,67	0,44	0,56	36	0,42	0,45	0,56	0,46	0,53	0,33
7	0,44	0,45	0,44	0,59	0,45	0,71	37	0,32	0,396	0,47	0,54	0,57	0,50
8	0,27	0,594	0,63	0,39	0,35	0,59	38	0,43	0,765	0,64	0,80	0,55	0,45
9	0,68	0,531	0,55	0,46	0,36	0,39	39	0,66	0,405	0,46	0,43	0,82	0,42
10	0,49	0,504	0,41	0,57	0,51	0,67	40	0,41	0,621	0,46	0,66	0,55	0,40
11	0,36	0,747	0,50	0,41	0,43	0,73	41	0,35	0,621	0,80	0,70	0,60	0,36
12	0,23	0,765	0,25	0,24	0,70	0,62	42	0,37	0,594	0,67	0,50	0,28	0,41
13	0,33	0,747	0,46	0,50	0,51	0,73	43	0,32	0,369	0,60	0,25	0,46	0,55
14	0,60	0,567	0,49	0,57	0,51	0,32	44	0,02	0,486	0,61	0,28	0,26	0,88
15	0,45	0,666	0,53	0,53	0,62	0,52	45	0,17	0,648	0,55	0,25	0,30	0,41
16	0,80	0,639	0,41	0,51	0,48	0,50	46	0,57	0,45	0,10	0,21	0,45	0,52
17	0,47	0,567	0,68	0,42	0,65	0,71	47	0,59	0,252	0,43	0,11	0,52	0,52
18	0,40	0,657	0,62	0,43	0,61	0,38	48	0,51	0,189	0,46	0,44	0,40	0,63
19	0,36	0,531	0,62	0,53	0,58	0,37	49	0,43	0,297	0,43	0,42	0,42	0,62
20	0,43	0,414	0,49	0,13	0,71	0,38	50	0,60	0,711	0,55	0,63	0,65	0,88
21	0,41	0,27	0,46	0,05	0,59	0,54	51	0,23	0,621	0,51	0,63	0,41	0,62
22	0,27	0,684	0,50	0,04	0,34	0,66	52	0,34	0,612	0,45	0,47	0,68	0,68
23	0,34	0,477	0,85	0,00	0,74	0,44	53	0,32	0,612	0,29	0,33	0,65	0,57
24	0,30	0,891	0,81	0,45	0,39	0,38	54	0,18	0,459	0,42	0,37	0,50	0,56
25	0,51	0,324	0,79	0,52	0,86	0,48	55	0,27	0,54	0,50	0,35	0,34	0,49
26	0,51	0,459	0,39	0,75	0,59	0,39	56	0,54	0,666	0,57	0,40	0,64	0,42
27	0,50	0,558	0,34	0,64	0,71	0,35	57	0,47	0,549	0,55	0,26	0,54	0,85
28	0,48	0,54	0,40	0,53	0,90	0,57	58	0,57	0,405	0,49	0,04	0,55	0,76
29	0,51	0,621	0,49	0,41	0,60	0,56	59	0,45	0,837	0,43	0,36	0,69	0,49
30	0,48	0,693	0,46	0,47	0,53	0,71	60	0,34	0,459	0,78	0,62	0,58	0,43

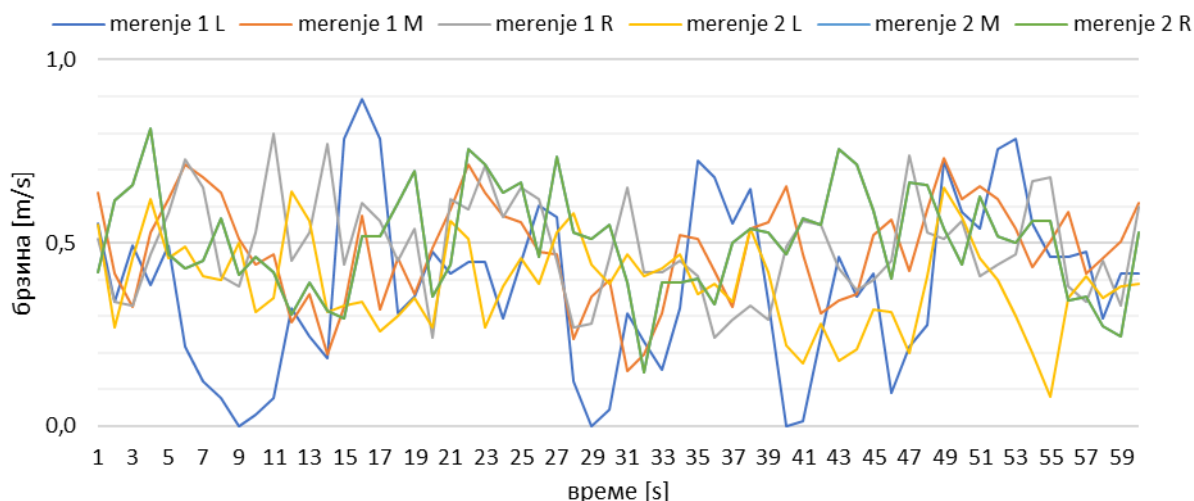
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	0,43	0,02	0,80	0,05	0,15	0,34
	M	0,56	0,19	0,89	0,06	0,14	0,26
	R	0,51	0,10	0,85	0,06	0,15	0,28
мерење 2	L	0,42	0,00	0,80	0,05	0,18	0,43
	M	0,55	0,26	0,90	0,06	0,15	0,27
	R	0,54	0,32	0,88	0,06	0,14	0,26



Угао лопатица регулатора 15° - $x=8m$

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	0,55	0,64	0,51	0,55	0,42	0,42	31	0,31	0,15	0,65	0,47	0,39	0,39
2	0,34	0,42	0,34	0,27	0,62	0,62	32	0,23	0,19	0,42	0,41	0,15	0,15
3	0,49	0,33	0,33	0,46	0,66	0,66	33	0,15	0,31	0,42	0,43	0,39	0,39
4	0,39	0,53	0,47	0,62	0,81	0,81	34	0,32	0,52	0,45	0,47	0,39	0,39
5	0,49	0,62	0,58	0,46	0,47	0,47	35	0,72	0,51	0,41	0,36	0,40	0,40
6	0,22	0,72	0,73	0,49	0,43	0,43	36	0,68	0,42	0,24	0,39	0,33	0,33
7	0,12	0,68	0,65	0,41	0,45	0,45	37	0,55	0,33	0,29	0,34	0,50	0,50
8	0,08	0,64	0,41	0,40	0,57	0,57	38	0,65	0,54	0,33	0,54	0,54	0,54
9	0,00	0,51	0,38	0,50	0,41	0,41	39	0,34	0,56	0,29	0,42	0,53	0,53
10	0,03	0,44	0,53	0,31	0,46	0,46	40	0,00	0,65	0,49	0,22	0,47	0,47
11	0,08	0,47	0,80	0,35	0,42	0,42	41	0,02	0,47	0,56	0,17	0,57	0,57
12	0,32	0,28	0,45	0,64	0,30	0,30	42	0,25	0,31	0,55	0,28	0,55	0,55
13	0,25	0,36	0,53	0,56	0,39	0,39	43	0,46	0,34	0,43	0,18	0,75	0,75
14	0,18	0,19	0,77	0,31	0,31	0,31	44	0,35	0,36	0,37	0,21	0,72	0,72
15	0,79	0,33	0,44	0,33	0,29	0,29	45	0,42	0,52	0,40	0,32	0,59	0,59
16	0,89	0,57	0,61	0,34	0,52	0,52	46	0,09	0,57	0,45	0,31	0,40	0,40
17	0,79	0,32	0,56	0,26	0,52	0,52	47	0,22	0,42	0,74	0,20	0,67	0,67
18	0,31	0,46	0,45	0,30	0,61	0,61	48	0,28	0,59	0,53	0,41	0,66	0,66
19	0,35	0,36	0,54	0,35	0,70	0,70	49	0,72	0,73	0,51	0,65	0,54	0,54
20	0,48	0,49	0,24	0,27	0,35	0,35	50	0,59	0,62	0,56	0,57	0,44	0,44
21	0,42	0,59	0,62	0,56	0,44	0,44	51	0,54	0,65	0,41	0,46	0,63	0,63
22	0,45	0,72	0,59	0,51	0,75	0,75	52	0,75	0,62	0,44	0,40	0,52	0,52
23	0,45	0,64	0,71	0,27	0,72	0,72	53	0,79	0,54	0,47	0,30	0,50	0,50
24	0,29	0,57	0,57	0,38	0,64	0,64	54	0,55	0,43	0,67	0,20	0,56	0,56
25	0,45	0,56	0,65	0,46	0,67	0,67	55	0,46	0,50	0,68	0,08	0,56	0,56
26	0,60	0,48	0,62	0,39	0,46	0,46	56	0,46	0,58	0,38	0,35	0,34	0,34
27	0,57	0,47	0,45	0,53	0,74	0,74	57	0,48	0,42	0,34	0,41	0,35	0,35
28	0,12	0,24	0,27	0,58	0,53	0,53	58	0,29	0,46	0,45	0,35	0,27	0,27
29	0,00	0,35	0,28	0,44	0,51	0,51	59	0,42	0,50	0,33	0,38	0,25	0,25
30	0,05	0,40	0,46	0,39	0,55	0,55	60	0,42	0,61	0,60	0,39	0,53	0,53

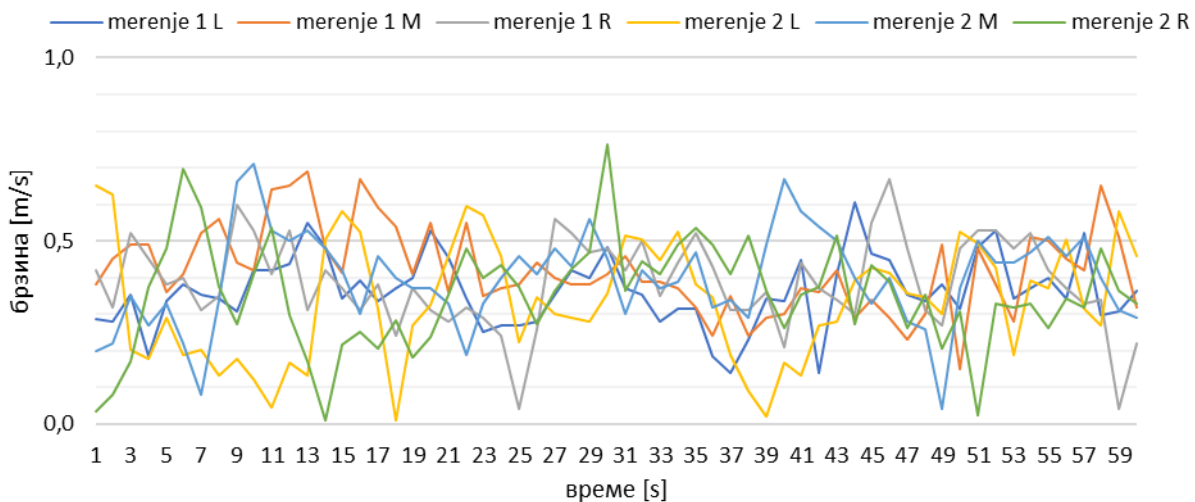
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	0,38	0,00	0,89	0,05	0,23	0,59
	M	0,48	0,15	0,73	0,05	0,14	0,29
	R	0,49	0,24	0,80	0,05	0,14	0,28
мерење 2	L	0,39	0,08	0,65	0,05	0,12	0,31
	M	0,50	0,15	0,81	0,06	0,14	0,28
	R	0,50	0,15	0,81	0,06	0,14	0,28



Угао лопатица регулатора 15° - $x=9m$

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	0,29	0,38	0,42	0,65	0,20	0,03	31	0,37	0,46	0,42	0,52	0,30	0,36
2	0,28	0,45	0,32	0,63	0,22	0,08	32	0,35	0,39	0,50	0,50	0,42	0,44
3	0,35	0,49	0,52	0,20	0,35	0,17	33	0,28	0,39	0,35	0,45	0,37	0,41
4	0,19	0,49	0,45	0,18	0,27	0,38	34	0,32	0,37	0,44	0,53	0,39	0,49
5	0,33	0,36	0,38	0,29	0,33	0,48	35	0,32	0,32	0,52	0,38	0,47	0,54
6	0,38	0,41	0,40	0,19	0,22	0,70	36	0,19	0,24	0,43	0,35	0,32	0,49
7	0,35	0,52	0,31	0,20	0,08	0,59	37	0,14	0,35	0,31	0,19	0,34	0,41
8	0,34	0,56	0,35	0,13	0,34	0,38	38	0,23	0,24	0,31	0,09	0,29	0,51
9	0,31	0,44	0,60	0,18	0,66	0,27	39	0,34	0,29	0,36	0,02	0,49	0,36
10	0,42	0,42	0,53	0,12	0,71	0,41	40	0,33	0,30	0,21	0,17	0,67	0,26
11	0,42	0,64	0,41	0,04	0,53	0,54	41	0,45	0,37	0,44	0,13	0,58	0,35
12	0,44	0,65	0,53	0,17	0,50	0,30	42	0,14	0,36	0,37	0,27	0,54	0,38
13	0,55	0,69	0,31	0,13	0,53	0,17	43	0,41	0,42	0,34	0,28	0,50	0,51
14	0,48	0,48	0,42	0,50	0,48	0,01	44	0,60	0,29	0,30	0,39	0,40	0,27
15	0,34	0,41	0,37	0,58	0,42	0,22	45	0,47	0,34	0,55	0,43	0,33	0,43
16	0,39	0,67	0,31	0,53	0,30	0,25	46	0,45	0,29	0,67	0,41	0,40	0,39
17	0,33	0,59	0,38	0,31	0,46	0,21	47	0,35	0,23	0,48	0,36	0,28	0,26
18	0,37	0,54	0,24	0,01	0,40	0,29	48	0,33	0,30	0,31	0,35	0,26	0,35
19	0,40	0,41	0,37	0,27	0,37	0,18	49	0,38	0,49	0,27	0,30	0,04	0,21
20	0,53	0,55	0,31	0,32	0,37	0,24	50	0,32	0,15	0,48	0,53	0,37	0,31
21	0,46	0,36	0,28	0,46	0,33	0,35	51	0,48	0,48	0,53	0,49	0,50	0,02
22	0,34	0,55	0,32	0,59	0,19	0,48	52	0,53	0,38	0,53	0,43	0,44	0,33
23	0,25	0,35	0,29	0,57	0,33	0,40	53	0,34	0,28	0,48	0,19	0,44	0,32
24	0,27	0,37	0,24	0,46	0,40	0,43	54	0,37	0,51	0,52	0,39	0,47	0,33
25	0,27	0,38	0,04	0,22	0,46	0,38	55	0,40	0,50	0,42	0,37	0,51	0,26
26	0,28	0,44	0,26	0,35	0,41	0,27	56	0,34	0,45	0,37	0,50	0,46	0,34
27	0,35	0,40	0,56	0,30	0,48	0,36	57	0,52	0,42	0,33	0,31	0,51	0,32
28	0,42	0,38	0,52	0,29	0,43	0,42	58	0,30	0,65	0,34	0,27	0,40	0,48
29	0,40	0,38	0,47	0,28	0,56	0,47	59	0,31	0,51	0,04	0,58	0,31	0,36
30	0,48	0,41	0,48	0,36	0,45	0,76	60	0,36	0,32	0,22	0,46	0,29	0,33

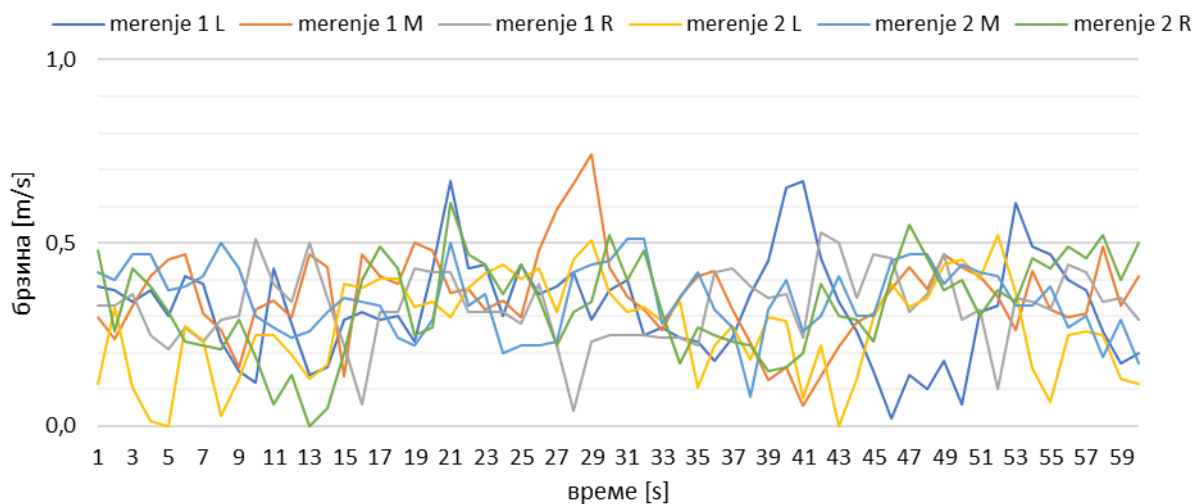
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	0,36	0,14	0,60	0,05	0,09	0,26
	M	0,42	0,15	0,69	0,05	0,11	0,27
	R	0,39	0,04	0,67	0,05	0,12	0,31
мерење 2	L	0,34	0,01	0,65	0,05	0,16	0,47
	M	0,40	0,04	0,71	0,05	0,13	0,32
	R	0,35	0,01	0,76	0,05	0,14	0,41



Угао лопатица регулатора 15° - $x=10\text{m}$

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	0,38	0,30	0,33	0,12	0,42	0,48	31	0,40	0,35	0,25	0,31	0,51	0,40
2	0,37	0,24	0,33	0,33	0,40	0,26	32	0,25	0,32	0,25	0,33	0,51	0,48
3	0,34	0,33	0,36	0,10	0,47	0,43	33	0,27	0,26	0,24	0,29	0,28	0,31
4	0,37	0,41	0,25	0,01	0,47	0,38	34	0,24	0,35	0,24	0,34	0,35	0,17
5	0,30	0,46	0,21	0,00	0,37	0,31	35	0,23	0,41	0,22	0,10	0,42	0,27
6	0,41	0,47	0,27	0,27	0,38	0,23	36	0,18	0,42	0,42	0,22	0,32	0,25
7	0,39	0,31	0,23	0,23	0,41	0,22	37	0,24	0,32	0,43	0,27	0,27	0,23
8	0,23	0,26	0,29	0,03	0,50	0,21	38	0,36	0,23	0,38	0,18	0,08	0,22
9	0,15	0,16	0,30	0,13	0,43	0,29	39	0,45	0,13	0,35	0,30	0,32	0,15
10	0,12	0,32	0,51	0,25	0,30	0,19	40	0,65	0,16	0,36	0,29	0,40	0,16
11	0,43	0,34	0,39	0,25	0,27	0,06	41	0,67	0,06	0,24	0,08	0,26	0,20
12	0,28	0,30	0,34	0,20	0,24	0,14	42	0,46	0,14	0,53	0,22	0,30	0,39
13	0,14	0,47	0,50	0,13	0,26	0,00	43	0,34	0,22	0,50	0,00	0,41	0,30
14	0,16	0,43	0,35	0,17	0,31	0,05	44	0,26	0,29	0,35	0,13	0,30	0,29
15	0,29	0,14	0,22	0,39	0,35	0,20	45	0,15	0,31	0,47	0,30	0,30	0,23
16	0,31	0,47	0,06	0,38	0,34	0,40	46	0,02	0,38	0,46	0,39	0,45	0,41
17	0,29	0,41	0,31	0,40	0,33	0,49	47	0,14	0,43	0,31	0,33	0,47	0,55
18	0,30	0,39	0,31	0,40	0,24	0,43	48	0,10	0,38	0,36	0,35	0,47	0,46
19	0,23	0,50	0,43	0,33	0,22	0,25	49	0,18	0,47	0,47	0,44	0,39	0,37
20	0,43	0,48	0,42	0,34	0,29	0,27	50	0,06	0,43	0,29	0,46	0,44	0,40
21	0,67	0,36	0,42	0,30	0,50	0,61	51	0,31	0,41	0,32	0,40	0,42	0,30
22	0,43	0,38	0,31	0,38	0,33	0,47	52	0,33	0,35	0,10	0,52	0,41	0,37
23	0,44	0,32	0,31	0,42	0,36	0,44	53	0,61	0,26	0,35	0,36	0,33	0,34
24	0,30	0,34	0,31	0,44	0,20	0,36	54	0,49	0,42	0,34	0,16	0,33	0,46
25	0,44	0,30	0,28	0,40	0,22	0,44	55	0,47	0,32	0,32	0,07	0,38	0,43
26	0,36	0,48	0,39	0,43	0,22	0,35	56	0,40	0,30	0,44	0,25	0,27	0,49
27	0,38	0,59	0,22	0,31	0,23	0,22	57	0,37	0,31	0,42	0,26	0,30	0,46
28	0,42	0,66	0,04	0,46	0,42	0,31	58	0,26	0,49	0,34	0,25	0,19	0,52
29	0,29	0,74	0,23	0,51	0,44	0,34	59	0,17	0,33	0,35	0,13	0,29	0,40
30	0,37	0,43	0,25	0,36	0,45	0,52	60	0,20	0,41	0,29	0,12	0,17	0,50

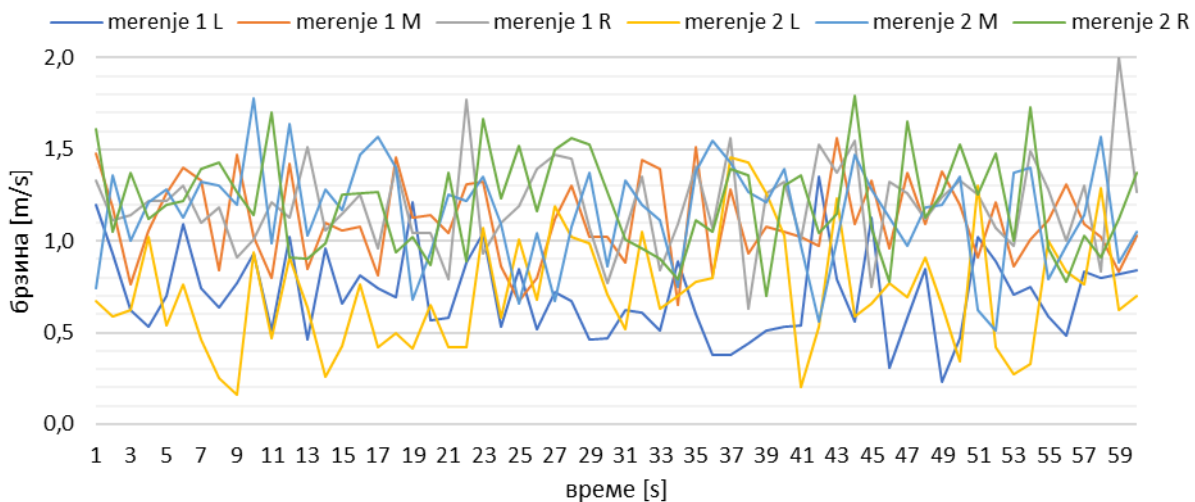
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	0,32	0,02	0,67	0,05	0,14	0,44
	M	0,36	0,06	0,74	0,05	0,12	0,34
	R	0,33	0,04	0,53	0,05	0,10	0,31
мерење 2	L	0,27	0,00	0,52	0,04	0,13	0,49
	M	0,35	0,08	0,51	0,05	0,10	0,27
	R	0,33	0,00	0,61	0,05	0,13	0,40



Угао лопатица регулатора 30° - $x=3m$

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	1,20	1,48	1,33	0,67	0,74	1,61	31	0,62	0,88	1,06	0,52	1,33	1,01
2	0,93	1,18	1,11	0,59	1,36	1,05	32	0,61	1,44	1,35	1,05	1,20	0,96
3	0,62	0,76	1,14	0,62	1,00	1,37	33	0,51	1,39	0,84	0,63	1,11	0,90
4	0,53	1,06	1,22	1,02	1,21	1,12	34	0,89	0,65	1,09	0,70	0,75	0,79
5	0,70	1,26	1,22	0,54	1,28	1,20	35	0,60	1,51	1,41	0,78	1,38	1,11
6	1,09	1,40	1,30	0,76	1,13	1,22	36	0,38	0,81	1,07	0,80	1,55	1,05
7	0,74	1,33	1,10	0,46	1,32	1,39	37	0,38	1,28	1,56	1,46	1,43	1,39
8	0,64	0,84	1,18	0,25	1,30	1,43	38	0,44	0,93	0,63	1,43	1,27	1,36
9	0,77	1,47	0,91	0,16	1,20	1,27	39	0,51	1,08	1,26	1,26	1,21	0,70
10	0,93	1,02	1,01	0,94	1,78	1,14	40	0,53	1,05	1,32	1,03	1,39	1,30
11	0,51	0,80	1,21	0,47	0,99	1,70	41	0,54	1,02	1,01	0,20	0,97	1,36
12	1,02	1,42	1,13	0,91	1,64	0,91	42	1,35	0,97	1,53	0,53	0,56	1,04
13	0,46	0,85	1,51	0,64	1,03	0,90	43	0,79	1,56	1,37	1,23	1,00	1,15
14	0,96	1,10	1,06	0,26	1,28	0,99	44	0,56	1,09	1,55	0,59	1,47	1,79
15	0,66	1,06	1,15	0,43	1,17	1,25	45	1,13	1,33	0,75	0,66	1,28	1,07
16	0,81	1,08	1,25	0,76	1,47	1,26	46	0,31	0,96	1,32	0,77	1,13	0,78
17	0,74	0,81	0,96	0,42	1,57	1,27	47	0,58	1,37	1,26	0,69	0,97	1,65
18	0,69	1,46	1,41	0,50	1,40	0,94	48	0,85	1,09	1,12	0,91	1,18	1,13
19	1,21	1,13	1,04	0,41	0,68	1,02	49	0,23	1,38	1,24	0,65	1,20	1,26
20	0,57	1,14	1,04	0,65	0,94	0,87	50	0,47	1,20	1,33	0,34	1,35	1,53
21	0,58	1,04	0,79	0,42	1,25	1,37	51	1,02	0,91	1,25	1,30	0,62	1,25
22	0,88	1,31	1,77	0,42	1,22	0,89	52	0,89	1,21	1,07	0,42	0,51	1,48
23	1,04	1,32	0,93	1,07	1,35	1,67	53	0,71	0,86	0,97	0,27	1,37	1,00
24	0,53	0,86	1,10	0,58	1,09	1,23	54	0,75	1,01	1,49	0,33	1,40	1,73
25	0,85	0,67	1,19	1,01	0,66	1,52	55	0,59	1,11	1,28	1,00	0,79	0,96
26	0,52	0,80	1,39	0,68	1,04	1,16	56	0,48	1,31	1,00	0,83	0,97	0,78
27	0,72	1,12	1,47	1,19	0,67	1,50	57	0,83	1,09	1,30	0,76	1,14	1,03
28	0,67	1,30	1,45	1,02	1,08	1,56	58	0,80	1,02	0,83	1,29	1,57	0,91
29	0,46	1,02	1,07	0,99	1,37	1,53	59	0,82	0,83	2,00	0,62	0,88	1,12
30	0,47	1,02	0,77	0,71	0,86	1,27	60	0,84	1,03	1,27	0,70	1,05	1,37

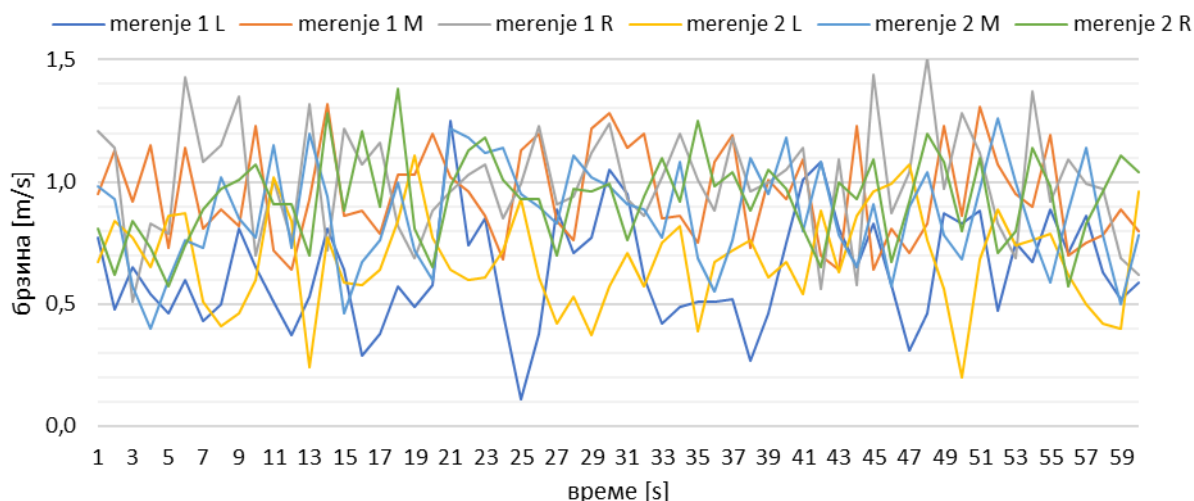
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	0,71	0,23	1,35	0,07	0,23	0,33
	M	1,11	0,65	1,56	0,09	0,23	0,20
	R	1,20	0,63	2,00	0,09	0,25	0,21
мерење 2	L	0,72	0,16	1,46	0,07	0,31	0,43
	M	1,15	0,51	1,78	0,09	0,28	0,24
	R	1,21	0,70	1,79	0,09	0,26	0,22



Угао лопатица регулатора 30° - $x=4m$

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	0,77	0,95	1,21	0,67	0,98	0,81	31	0,95	1,14	0,93	0,71	0,91	0,76
2	0,48	1,13	1,14	0,84	0,93	0,62	32	0,61	1,20	0,86	0,57	0,89	0,94
3	0,65	0,92	0,51	0,77	0,57	0,84	33	0,42	0,85	1,02	0,75	0,77	1,10
4	0,54	1,15	0,83	0,65	0,40	0,73	34	0,49	0,86	1,20	0,82	1,08	0,92
5	0,46	0,73	0,79	0,86	0,60	0,57	35	0,51	0,75	1,01	0,39	0,69	1,25
6	0,60	1,14	1,43	0,87	0,76	0,74	36	0,51	1,08	0,88	0,67	0,55	0,98
7	0,43	0,81	1,08	0,51	0,73	0,89	37	0,52	1,19	1,18	0,72	0,76	1,04
8	0,50	0,89	1,15	0,41	1,02	0,97	38	0,27	0,73	0,96	0,76	1,10	0,88
9	0,81	0,82	1,35	0,46	0,85	1,01	39	0,46	1,01	1,00	0,61	0,95	1,05
10	0,65	1,23	0,70	0,60	0,77	1,07	40	0,75	0,93	1,05	0,67	1,18	0,97
11	0,51	0,72	1,01	1,02	1,15	0,91	41	1,01	1,09	1,14	0,54	0,80	0,81
12	0,37	0,64	0,76	0,84	0,73	0,91	42	1,08	0,70	0,56	0,88	1,08	0,65
13	0,53	0,93	1,32	0,24	1,20	0,70	43	0,81	0,64	1,09	0,63	0,78	1,00
14	0,81	1,32	0,72	0,77	0,94	1,28	44	0,65	1,23	0,58	0,86	0,65	0,93
15	0,64	0,86	1,22	0,59	0,46	0,88	45	0,83	0,64	1,44	0,96	0,91	1,09
16	0,29	0,88	1,07	0,58	0,67	1,21	46	0,58	0,81	0,87	0,99	0,57	0,67
17	0,38	0,79	1,16	0,64	0,76	0,90	47	0,31	0,71	1,04	1,07	0,90	0,92
18	0,57	1,03	0,82	0,84	1,00	1,38	48	0,46	0,83	1,51	0,76	1,04	1,20
19	0,49	1,03	0,69	1,11	0,72	0,81	49	0,87	1,23	0,97	0,56	0,78	1,08
20	0,58	1,20	0,88	0,77	0,60	0,65	50	0,83	0,86	1,28	0,20	0,68	0,80
21	1,25	1,02	0,96	0,64	1,22	0,98	51	0,88	1,31	1,12	0,68	0,97	1,10
22	0,74	0,96	1,03	0,60	1,18	1,13	52	0,47	1,07	0,83	0,89	1,26	0,71
23	0,85	0,86	1,07	0,61	1,12	1,18	53	0,75	0,95	0,69	0,74	1,00	0,80
24	0,46	0,68	0,85	0,72	1,14	1,01	54	0,67	0,90	1,37	0,76	0,78	1,14
25	0,11	1,13	0,99	0,93	0,95	0,93	55	0,89	1,19	0,92	0,79	0,59	0,98
26	0,38	1,20	1,23	0,61	0,90	0,93	56	0,71	0,70	1,09	0,62	0,88	0,57
27	0,89	0,84	0,91	0,42	0,83	0,70	57	0,86	0,75	0,99	0,50	1,14	0,83
28	0,71	0,76	0,94	0,53	1,11	0,97	58	0,63	0,78	0,97	0,42	0,78	0,96
29	0,77	1,22	1,12	0,37	1,02	0,96	59	0,52	0,89	0,69	0,40	0,50	1,11
30	1,05	1,28	1,24	0,57	0,98	0,99	60	0,59	0,80	0,62	0,96	0,78	1,04

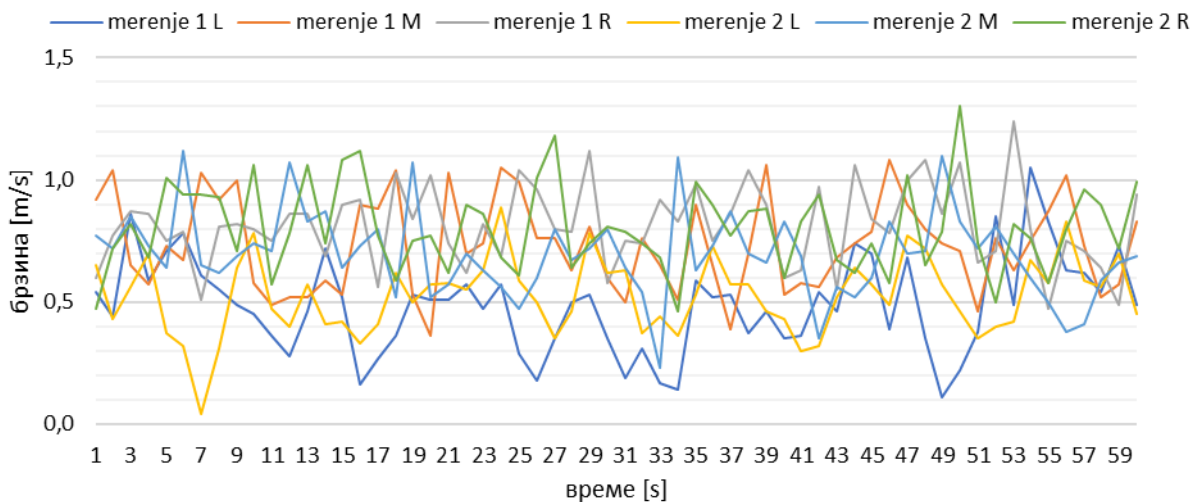
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	0,64	0,11	1,25	0,06	0,22	0,34
	M	0,95	0,64	1,32	0,08	0,19	0,20
	R	1,00	0,51	1,51	0,08	0,22	0,22
мерење 2	L	0,68	0,20	1,11	0,06	0,19	0,29
	M	0,87	0,40	1,26	0,07	0,21	0,24
	R	0,93	0,57	1,38	0,08	0,18	0,19



Угао лопатица регулатора 30° - x=5m

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	0,54	0,92	0,60	0,65	0,77	0,47	31	0,19	0,50	0,75	0,63	0,64	0,79
2	0,44	1,04	0,77	0,43	0,72	0,72	32	0,31	0,76	0,74	0,37	0,54	0,74
3	0,86	0,65	0,87	0,56	0,85	0,82	33	0,17	0,65	0,92	0,44	0,23	0,68
4	0,59	0,57	0,86	0,70	0,73	0,68	34	0,14	0,51	0,83	0,36	1,09	0,46
5	0,71	0,73	0,75	0,37	0,64	1,01	35	0,59	0,90	0,98	0,53	0,63	0,99
6	0,78	0,67	0,79	0,32	1,12	0,94	36	0,52	0,65	0,75	0,73	0,73	0,90
7	0,61	1,03	0,51	0,04	0,65	0,94	37	0,53	0,39	0,86	0,57	0,87	0,77
8	0,55	0,92	0,81	0,31	0,62	0,93	38	0,37	0,70	1,04	0,57	0,70	0,87
9	0,49	1,00	0,82	0,64	0,69	0,71	39	0,46	1,06	0,90	0,46	0,66	0,88
10	0,45	0,58	0,80	0,78	0,74	1,06	40	0,35	0,53	0,60	0,43	0,83	0,60
11	0,36	0,49	0,75	0,47	0,71	0,57	41	0,36	0,58	0,63	0,30	0,69	0,83
12	0,28	0,52	0,86	0,40	1,07	0,78	42	0,54	0,56	0,97	0,32	0,35	0,94
13	0,46	0,52	0,86	0,57	0,83	1,06	43	0,46	0,68	0,55	0,52	0,56	0,67
14	0,72	0,59	0,69	0,41	0,87	0,74	44	0,74	0,74	1,06	0,64	0,52	0,62
15	0,52	0,53	0,90	0,42	0,64	1,08	45	0,70	0,79	0,84	0,57	0,60	0,74
16	0,16	0,90	0,92	0,33	0,73	1,12	46	0,39	1,08	0,78	0,49	0,83	0,58
17	0,27	0,88	0,56	0,41	0,80	0,77	47	0,68	0,90	1,00	0,77	0,70	1,02
18	0,36	1,04	1,03	0,62	0,52	0,59	48	0,35	0,80	1,08	0,72	0,71	0,65
19	0,53	0,53	0,84	0,50	1,07	0,75	49	0,11	0,74	0,86	0,57	1,10	0,79
20	0,51	0,36	1,02	0,57	0,52	0,77	50	0,22	0,71	1,07	0,46	0,83	1,30
21	0,51	1,03	0,74	0,58	0,57	0,62	51	0,38	0,46	0,66	0,35	0,72	0,74
22	0,57	0,70	0,62	0,55	0,70	0,90	52	0,85	0,76	0,71	0,40	0,81	0,50
23	0,47	0,74	0,82	0,63	0,63	0,86	53	0,49	0,63	1,24	0,42	0,70	0,82
24	0,57	1,05	0,69	0,89	0,56	0,68	54	1,05	0,75	0,80	0,67	0,60	0,76
25	0,29	0,99	1,04	0,59	0,47	0,61	55	0,83	0,87	0,47	0,58	0,50	0,58
26	0,18	0,76	0,96	0,50	0,60	1,01	56	0,63	1,02	0,75	0,83	0,38	0,80
27	0,35	0,76	0,80	0,35	0,80	1,18	57	0,62	0,73	0,71	0,59	0,41	0,96
28	0,50	0,63	0,79	0,46	0,67	0,64	58	0,54	0,52	0,64	0,56	0,59	0,90
29	0,53	0,81	1,12	0,78	0,72	0,74	59	0,73	0,57	0,49	0,70	0,66	0,72
30	0,35	0,60	0,58	0,62	0,80	0,81	60	0,49	0,83	0,94	0,45	0,69	0,99

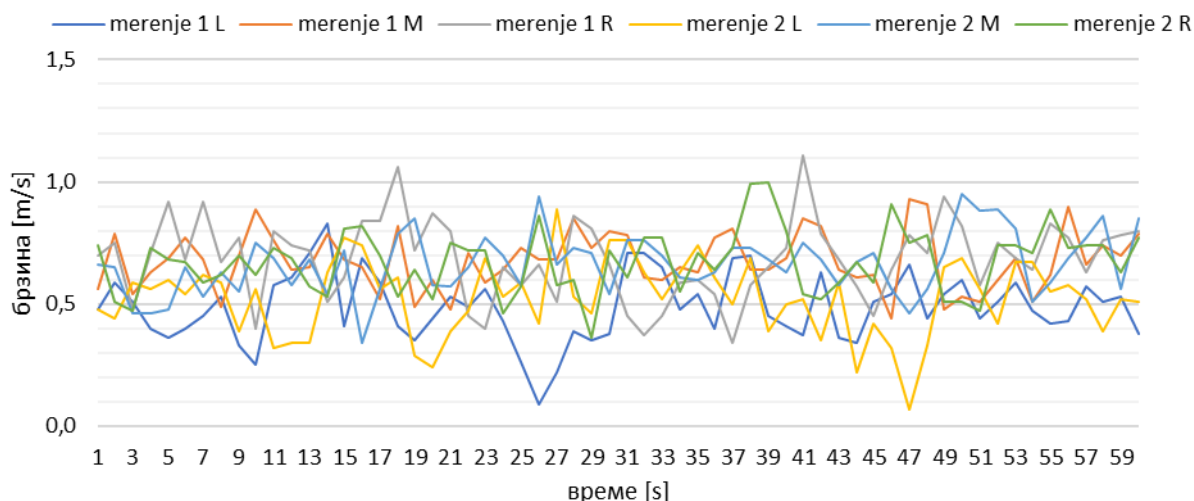
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	0,49	0,11	1,05	0,05	0,19	0,40
	M	0,73	0,36	1,08	0,07	0,19	0,26
	R	0,81	0,47	1,24	0,07	0,17	0,20
мерење 2	L	0,52	0,04	0,89	0,06	0,15	0,29
	M	0,69	0,23	1,12	0,06	0,18	0,25
	R	0,80	0,46	1,30	0,07	0,18	0,22



Угао лопатица регулатора 30° - $x=6m$

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	0,48	0,56	0,70	0,48	0,66	0,74	31	0,71	0,78	0,45	0,76	0,76	0,61
2	0,59	0,79	0,75	0,44	0,65	0,51	32	0,71	0,61	0,37	0,63	0,76	0,77
3	0,51	0,54	0,48	0,59	0,46	0,47	33	0,65	0,60	0,45	0,52	0,70	0,77
4	0,40	0,63	0,71	0,56	0,46	0,73	34	0,48	0,65	0,59	0,63	0,61	0,55
5	0,36	0,69	0,92	0,60	0,48	0,68	35	0,54	0,63	0,60	0,74	0,60	0,71
6	0,40	0,77	0,68	0,54	0,65	0,67	36	0,40	0,77	0,54	0,61	0,63	0,64
7	0,45	0,68	0,92	0,62	0,53	0,59	37	0,69	0,81	0,34	0,50	0,73	0,73
8	0,53	0,49	0,67	0,59	0,63	0,62	38	0,70	0,64	0,58	0,69	0,73	0,99
9	0,33	0,70	0,77	0,39	0,55	0,70	39	0,45	0,64	0,65	0,39	0,68	1,00
10	0,25	0,89	0,40	0,56	0,75	0,62	40	0,41	0,69	0,73	0,50	0,63	0,80
11	0,58	0,76	0,80	0,32	0,69	0,73	41	0,37	0,85	1,11	0,52	0,75	0,54
12	0,61	0,64	0,74	0,34	0,58	0,69	42	0,63	0,82	0,79	0,35	0,68	0,52
13	0,71	0,65	0,72	0,34	0,68	0,57	43	0,36	0,64	0,68	0,59	0,58	0,59
14	0,83	0,79	0,51	0,63	0,54	0,53	44	0,34	0,61	0,57	0,22	0,67	0,67
15	0,41	0,68	0,61	0,77	0,72	0,81	45	0,51	0,62	0,45	0,42	0,71	0,59
16	0,69	0,65	0,84	0,74	0,34	0,82	46	0,54	0,44	0,64	0,32	0,56	0,91
17	0,59	0,52	0,84	0,56	0,56	0,70	47	0,66	0,93	0,78	0,07	0,46	0,75
18	0,41	0,82	1,06	0,61	0,79	0,53	48	0,44	0,91	0,71	0,33	0,56	0,78
19	0,35	0,49	0,72	0,29	0,85	0,64	49	0,54	0,48	0,94	0,65	0,71	0,51
20	0,44	0,60	0,87	0,24	0,58	0,52	50	0,60	0,53	0,82	0,69	0,95	0,51
21	0,53	0,48	0,80	0,39	0,57	0,75	51	0,44	0,51	0,58	0,56	0,88	0,47
22	0,49	0,71	0,45	0,47	0,65	0,72	52	0,51	0,60	0,75	0,42	0,89	0,74
23	0,56	0,59	0,40	0,69	0,77	0,72	53	0,59	0,69	0,69	0,67	0,81	0,74
24	0,43	0,64	0,65	0,53	0,70	0,46	54	0,47	0,51	0,64	0,67	0,51	0,71
25	0,26	0,73	0,58	0,59	0,58	0,57	55	0,42	0,62	0,83	0,55	0,59	0,89
26	0,09	0,68	0,66	0,42	0,94	0,86	56	0,43	0,90	0,77	0,58	0,69	0,73
27	0,22	0,68	0,51	0,89	0,66	0,58	57	0,57	0,66	0,63	0,52	0,77	0,74
28	0,39	0,85	0,86	0,53	0,73	0,60	58	0,51	0,74	0,76	0,39	0,86	0,74
29	0,35	0,73	0,81	0,46	0,71	0,36	59	0,53	0,70	0,78	0,52	0,56	0,63
30	0,38	0,80	0,66	0,76	0,54	0,72	60	0,38	0,79	0,80	0,51	0,85	0,77

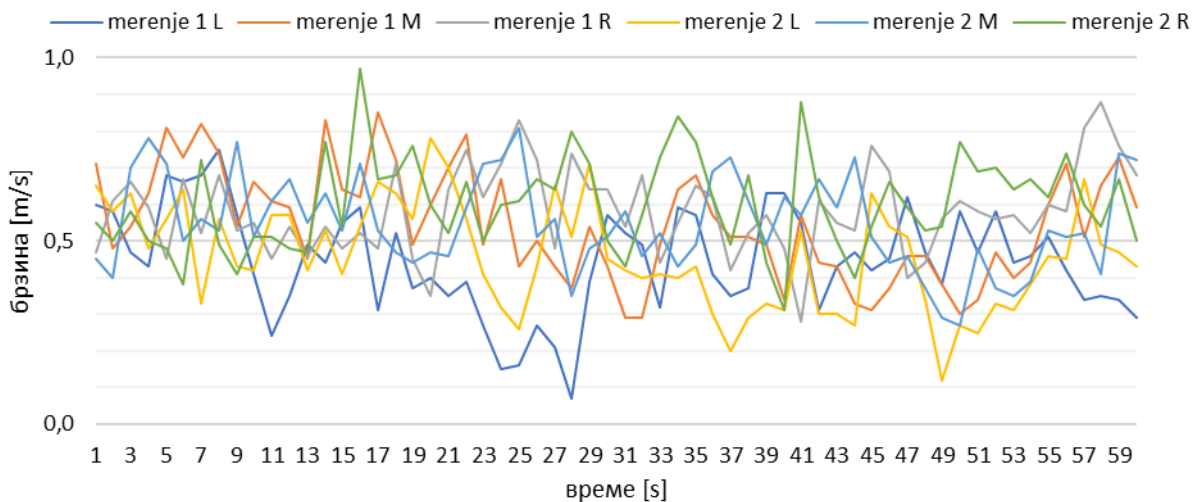
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	0,49	0,09	0,83	0,05	0,14	0,28
	M	0,68	0,44	0,93	0,06	0,12	0,17
	R	0,69	0,34	1,11	0,06	0,16	0,23
мерење 2	L	0,52	0,07	0,89	0,06	0,15	0,29
	M	0,66	0,34	0,95	0,06	0,12	0,19
	R	0,67	0,36	1,00	0,06	0,13	0,19



Угао лопатица регулатора 30° - $x=7m$

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	0,60	0,71	0,47	0,65	0,45	0,55	31	0,52	0,29	0,54	0,42	0,58	0,43
2	0,58	0,48	0,61	0,58	0,40	0,50	32	0,49	0,29	0,68	0,40	0,46	0,57
3	0,47	0,54	0,66	0,63	0,70	0,58	33	0,32	0,49	0,44	0,41	0,52	0,73
4	0,43	0,63	0,59	0,48	0,78	0,50	34	0,59	0,64	0,55	0,40	0,43	0,84
5	0,68	0,81	0,45	0,56	0,71	0,48	35	0,57	0,68	0,65	0,43	0,49	0,77
6	0,66	0,73	0,67	0,64	0,50	0,38	36	0,41	0,57	0,62	0,30	0,69	0,62
7	0,68	0,82	0,52	0,33	0,56	0,72	37	0,35	0,51	0,42	0,20	0,73	0,49
8	0,75	0,74	0,68	0,56	0,53	0,49	38	0,37	0,51	0,52	0,29	0,61	0,68
9	0,57	0,54	0,53	0,43	0,77	0,41	39	0,63	0,49	0,57	0,33	0,49	0,44
10	0,41	0,66	0,55	0,42	0,51	0,51	40	0,63	0,34	0,48	0,31	0,62	0,31
11	0,24	0,61	0,45	0,57	0,61	0,51	41	0,55	0,57	0,28	0,53	0,57	0,88
12	0,35	0,59	0,54	0,57	0,67	0,48	42	0,31	0,44	0,61	0,30	0,67	0,62
13	0,49	0,45	0,46	0,42	0,55	0,47	43	0,43	0,43	0,55	0,30	0,59	0,50
14	0,44	0,83	0,54	0,53	0,63	0,77	44	0,47	0,33	0,53	0,27	0,73	0,40
15	0,55	0,64	0,48	0,41	0,53	0,54	45	0,42	0,31	0,76	0,63	0,51	0,54
16	0,59	0,62	0,52	0,54	0,71	0,97	46	0,45	0,37	0,69	0,54	0,44	0,66
17	0,31	0,85	0,48	0,66	0,53	0,67	47	0,62	0,46	0,40	0,51	0,46	0,59
18	0,52	0,72	0,71	0,63	0,47	0,68	48	0,47	0,46	0,44	0,34	0,37	0,53
19	0,37	0,49	0,45	0,56	0,44	0,76	49	0,38	0,38	0,56	0,12	0,29	0,54
20	0,40	0,60	0,35	0,78	0,47	0,60	50	0,58	0,30	0,61	0,27	0,27	0,77
21	0,35	0,70	0,64	0,70	0,46	0,52	51	0,47	0,34	0,58	0,25	0,48	0,69
22	0,39	0,79	0,75	0,56	0,59	0,66	52	0,58	0,47	0,56	0,33	0,37	0,70
23	0,27	0,49	0,62	0,41	0,71	0,50	53	0,44	0,40	0,57	0,31	0,35	0,64
24	0,15	0,67	0,71	0,32	0,72	0,60	54	0,46	0,44	0,52	0,38	0,39	0,67
25	0,16	0,43	0,83	0,26	0,81	0,61	55	0,51	0,60	0,60	0,46	0,53	0,62
26	0,27	0,50	0,72	0,43	0,51	0,67	56	0,42	0,71	0,58	0,45	0,51	0,74
27	0,21	0,43	0,48	0,65	0,56	0,64	57	0,34	0,51	0,81	0,67	0,52	0,60
28	0,07	0,37	0,74	0,51	0,35	0,80	58	0,35	0,65	0,88	0,49	0,41	0,54
29	0,39	0,54	0,64	0,71	0,48	0,71	59	0,34	0,73	0,76	0,47	0,74	0,67
30	0,57	0,43	0,64	0,45	0,51	0,50	60	0,29	0,59	0,68	0,43	0,72	0,50

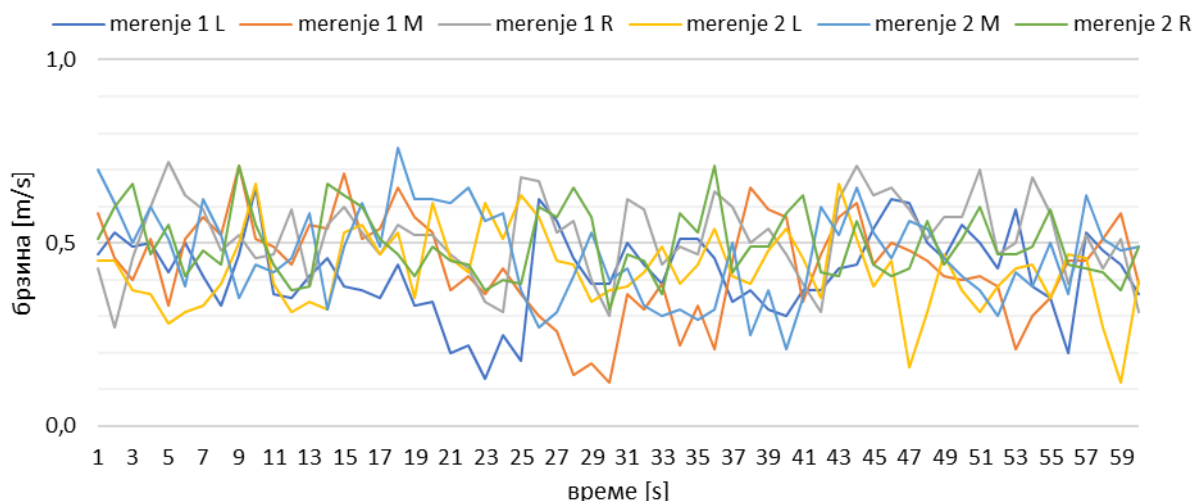
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	0,44	0,07	0,75	0,05	0,14	0,32
	M	0,55	0,29	0,85	0,06	0,15	0,27
	R	0,58	0,28	0,88	0,06	0,12	0,20
мерење 2	L	0,46	0,12	0,78	0,05	0,14	0,31
	M	0,55	0,27	0,81	0,06	0,13	0,23
	R	0,60	0,31	0,97	0,06	0,13	0,21



Угао лопатица регулатора 30° - $x=8m$

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	0,47	0,58	0,43	0,45	0,70	0,51	31	0,50	0,36	0,62	0,38	0,43	0,47
2	0,53	0,46	0,27	0,45	0,61	0,60	32	0,44	0,32	0,59	0,42	0,33	0,45
3	0,49	0,40	0,46	0,37	0,50	0,66	33	0,39	0,39	0,44	0,49	0,30	0,36
4	0,50	0,51	0,60	0,36	0,60	0,47	34	0,51	0,22	0,49	0,39	0,32	0,58
5	0,42	0,33	0,72	0,28	0,51	0,55	35	0,51	0,33	0,47	0,44	0,29	0,53
6	0,50	0,51	0,63	0,31	0,38	0,41	36	0,46	0,21	0,64	0,54	0,32	0,71
7	0,41	0,57	0,59	0,33	0,62	0,48	37	0,34	0,45	0,60	0,41	0,50	0,42
8	0,33	0,52	0,48	0,39	0,52	0,44	38	0,37	0,65	0,50	0,39	0,25	0,49
9	0,47	0,71	0,52	0,50	0,35	0,71	39	0,32	0,59	0,54	0,48	0,37	0,49
10	0,65	0,51	0,46	0,66	0,44	0,55	40	0,30	0,57	0,47	0,54	0,21	0,58
11	0,36	0,49	0,47	0,39	0,42	0,44	41	0,37	0,34	0,39	0,46	0,35	0,63
12	0,35	0,44	0,59	0,31	0,46	0,37	42	0,37	0,47	0,31	0,35	0,60	0,42
13	0,41	0,55	0,38	0,34	0,58	0,38	43	0,43	0,57	0,62	0,66	0,52	0,41
14	0,46	0,54	0,55	0,32	0,32	0,66	44	0,44	0,61	0,71	0,51	0,65	0,56
15	0,38	0,69	0,60	0,53	0,49	0,63	45	0,54	0,44	0,63	0,38	0,53	0,44
16	0,37	0,51	0,53	0,55	0,61	0,60	46	0,62	0,50	0,65	0,45	0,46	0,41
17	0,35	0,54	0,47	0,47	0,49	0,51	47	0,61	0,48	0,59	0,16	0,56	0,43
18	0,44	0,65	0,55	0,53	0,76	0,47	48	0,50	0,45	0,51	0,31	0,54	0,56
19	0,33	0,57	0,52	0,35	0,62	0,41	49	0,46	0,41	0,57	0,47	0,46	0,44
20	0,34	0,53	0,52	0,61	0,62	0,49	50	0,55	0,40	0,57	0,37	0,41	0,51
21	0,20	0,37	0,47	0,46	0,61	0,45	51	0,50	0,41	0,70	0,31	0,37	0,60
22	0,22	0,41	0,43	0,42	0,65	0,44	52	0,43	0,38	0,47	0,38	0,30	0,47
23	0,13	0,36	0,34	0,61	0,56	0,37	53	0,59	0,21	0,50	0,43	0,42	0,47
24	0,25	0,43	0,31	0,51	0,58	0,40	54	0,38	0,30	0,68	0,44	0,38	0,49
25	0,18	0,36	0,68	0,63	0,37	0,39	55	0,35	0,35	0,58	0,35	0,50	0,59
26	0,62	0,30	0,67	0,57	0,27	0,60	56	0,20	0,45	0,39	0,47	0,36	0,44
27	0,56	0,26	0,53	0,45	0,31	0,57	57	0,53	0,45	0,52	0,46	0,63	0,43
28	0,46	0,14	0,56	0,44	0,41	0,65	58	0,48	0,51	0,43	0,27	0,51	0,42
29	0,39	0,17	0,40	0,34	0,53	0,57	59	0,44	0,58	0,51	0,12	0,48	0,37
30	0,39	0,12	0,30	0,37	0,40	0,32	60	0,36	0,39	0,31	0,40	0,49	0,49

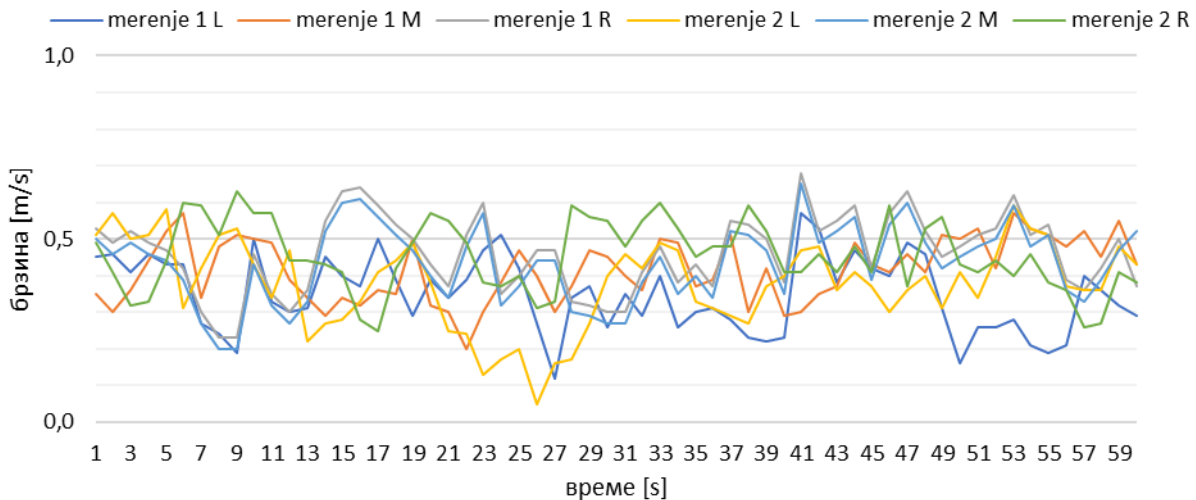
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	0,42	0,13	0,65	0,05	0,11	0,26
	M	0,44	0,12	0,71	0,05	0,13	0,30
	R	0,52	0,27	0,72	0,06	0,11	0,21
мерење 2	L	0,43	0,12	0,66	0,05	0,11	0,25
	M	0,47	0,21	0,76	0,05	0,12	0,26
	R	0,50	0,32	0,71	0,05	0,09	0,19



Угао лопатица регулатора 30° - $x=9m$

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	0,45	0,35	0,53	0,51	0,50	0,49	31	0,35	0,40	0,30	0,46	0,27	0,48
2	0,46	0,30	0,49	0,57	0,46	0,41	32	0,29	0,36	0,41	0,42	0,38	0,55
3	0,41	0,36	0,52	0,50	0,49	0,32	33	0,40	0,50	0,48	0,49	0,45	0,60
4	0,46	0,44	0,49	0,51	0,46	0,33	34	0,26	0,49	0,38	0,47	0,35	0,53
5	0,43	0,52	0,47	0,58	0,44	0,44	35	0,30	0,37	0,43	0,33	0,40	0,45
6	0,43	0,57	0,42	0,31	0,39	0,60	36	0,31	0,39	0,37	0,31	0,34	0,48
7	0,27	0,34	0,30	0,42	0,27	0,59	37	0,28	0,51	0,55	0,29	0,52	0,48
8	0,24	0,48	0,23	0,51	0,20	0,51	38	0,23	0,30	0,54	0,27	0,51	0,59
9	0,19	0,51	0,23	0,53	0,20	0,63	39	0,22	0,42	0,50	0,37	0,47	0,52
10	0,50	0,50	0,46	0,43	0,43	0,57	40	0,23	0,29	0,38	0,40	0,35	0,41
11	0,33	0,49	0,35	0,34	0,32	0,57	41	0,57	0,30	0,68	0,47	0,65	0,41
12	0,30	0,39	0,30	0,47	0,27	0,44	42	0,53	0,35	0,52	0,48	0,49	0,46
13	0,31	0,34	0,36	0,22	0,33	0,44	43	0,38	0,37	0,55	0,36	0,52	0,41
14	0,45	0,29	0,55	0,27	0,52	0,43	44	0,47	0,49	0,59	0,41	0,56	0,48
15	0,40	0,34	0,63	0,28	0,60	0,41	45	0,42	0,43	0,42	0,37	0,39	0,41
16	0,37	0,32	0,64	0,33	0,61	0,28	46	0,40	0,41	0,57	0,30	0,54	0,59
17	0,50	0,36	0,59	0,41	0,56	0,25	47	0,49	0,46	0,63	0,36	0,60	0,37
18	0,39	0,35	0,54	0,44	0,51	0,42	48	0,46	0,41	0,52	0,40	0,49	0,53
19	0,29	0,50	0,50	0,49	0,47	0,49	49	0,31	0,51	0,45	0,31	0,42	0,56
20	0,39	0,32	0,43	0,38	0,40	0,57	50	0,16	0,50	0,48	0,41	0,45	0,43
21	0,34	0,30	0,37	0,25	0,34	0,55	51	0,26	0,53	0,51	0,34	0,48	0,41
22	0,39	0,20	0,51	0,24	0,48	0,49	52	0,26	0,42	0,53	0,45	0,50	0,44
23	0,47	0,30	0,60	0,13	0,57	0,38	53	0,28	0,57	0,62	0,59	0,59	0,40
24	0,51	0,38	0,35	0,17	0,32	0,37	54	0,21	0,53	0,51	0,53	0,48	0,46
25	0,42	0,47	0,40	0,20	0,37	0,40	55	0,19	0,51	0,54	0,51	0,51	0,38
26	0,27	0,40	0,47	0,05	0,44	0,31	56	0,21	0,48	0,39	0,37	0,36	0,36
27	0,12	0,30	0,47	0,16	0,44	0,33	57	0,40	0,52	0,36	0,36	0,33	0,26
28	0,34	0,37	0,33	0,17	0,30	0,59	58	0,36	0,45	0,42	0,36	0,39	0,27
29	0,37	0,47	0,32	0,27	0,29	0,56	59	0,32	0,55	0,50	0,48	0,47	0,41
30	0,26	0,45	0,30	0,40	0,27	0,55	60	0,29	0,43	0,37	0,43	0,52	0,38

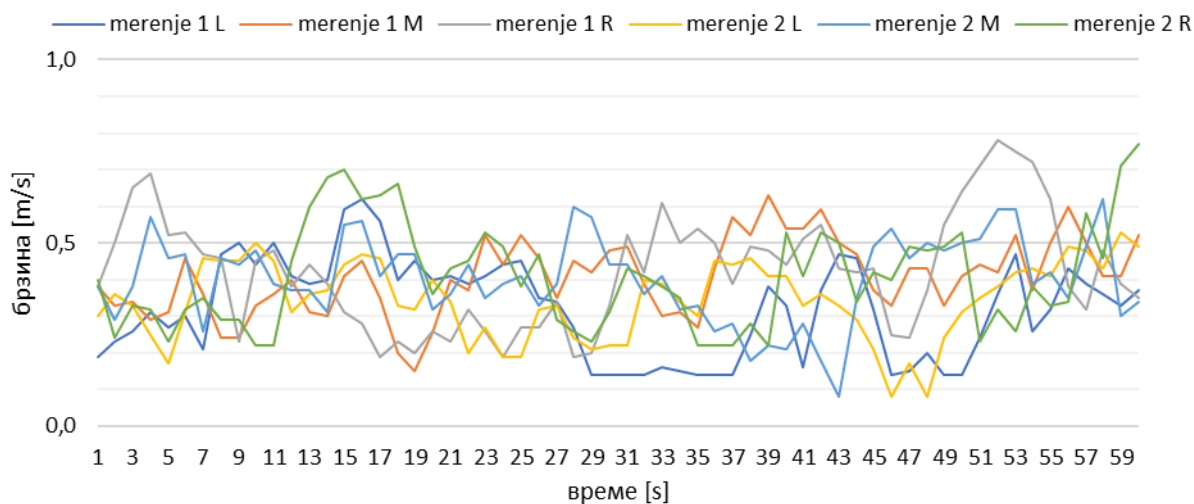
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	0,35	0,12	0,57	0,05	0,10	0,29
	M	0,42	0,20	0,57	0,05	0,09	0,20
	R	0,46	0,23	0,68	0,05	0,10	0,23
мерење 2	L	0,38	0,05	0,59	0,05	0,12	0,31
	M	0,43	0,20	0,65	0,05	0,10	0,24
	R	0,45	0,25	0,63	0,05	0,09	0,21



Угао лопатица регулатора 30° - $x=10m$

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	0,19	0,38	0,38	0,30	0,38	0,40	31	0,14	0,49	0,52	0,22	0,44	0,43
2	0,23	0,33	0,50	0,36	0,29	0,24	32	0,14	0,39	0,42	0,40	0,36	0,41
3	0,26	0,34	0,65	0,33	0,38	0,33	33	0,16	0,30	0,61	0,39	0,41	0,38
4	0,31	0,29	0,69	0,25	0,57	0,32	34	0,15	0,31	0,50	0,34	0,32	0,35
5	0,27	0,31	0,52	0,17	0,46	0,23	35	0,14	0,27	0,54	0,30	0,33	0,22
6	0,30	0,46	0,53	0,31	0,47	0,32	36	0,14	0,43	0,50	0,45	0,26	0,22
7	0,21	0,36	0,47	0,46	0,26	0,35	37	0,14	0,57	0,39	0,44	0,28	0,22
8	0,47	0,24	0,46	0,45	0,46	0,29	38	0,25	0,52	0,49	0,46	0,18	0,28
9	0,50	0,24	0,23	0,45	0,44	0,29	39	0,38	0,63	0,48	0,41	0,22	0,22
10	0,44	0,33	0,45	0,50	0,48	0,22	40	0,33	0,54	0,44	0,41	0,21	0,53
11	0,50	0,36	0,48	0,45	0,39	0,22	41	0,16	0,54	0,51	0,33	0,28	0,41
12	0,41	0,40	0,38	0,31	0,37	0,45	42	0,37	0,59	0,55	0,36	0,18	0,53
13	0,39	0,31	0,44	0,36	0,37	0,60	43	0,47	0,50	0,43	0,33	0,08	0,50
14	0,40	0,30	0,39	0,37	0,31	0,68	44	0,46	0,47	0,42	0,29	0,35	0,34
15	0,59	0,41	0,31	0,44	0,55	0,70	45	0,32	0,37	0,43	0,21	0,49	0,42
16	0,62	0,45	0,28	0,47	0,56	0,62	46	0,14	0,33	0,25	0,08	0,54	0,40
17	0,56	0,35	0,19	0,46	0,41	0,63	47	0,15	0,43	0,24	0,17	0,46	0,49
18	0,40	0,20	0,23	0,33	0,47	0,66	48	0,20	0,43	0,37	0,08	0,50	0,48
19	0,45	0,15	0,20	0,32	0,47	0,49	49	0,14	0,33	0,55	0,24	0,48	0,49
20	0,40	0,25	0,26	0,40	0,32	0,36	50	0,14	0,41	0,64	0,31	0,50	0,53
21	0,41	0,40	0,23	0,34	0,36	0,43	51	0,24	0,44	0,71	0,35	0,51	0,23
22	0,39	0,37	0,32	0,20	0,44	0,45	52	0,36	0,42	0,78	0,38	0,59	0,32
23	0,41	0,52	0,26	0,27	0,35	0,53	53	0,47	0,52	0,75	0,42	0,59	0,26
24	0,44	0,44	0,19	0,19	0,39	0,49	54	0,26	0,37	0,72	0,43	0,39	0,38
25	0,45	0,52	0,27	0,19	0,41	0,38	55	0,32	0,50	0,62	0,41	0,42	0,33
26	0,35	0,46	0,27	0,32	0,33	0,47	56	0,43	0,60	0,38	0,49	0,35	0,34
27	0,34	0,35	0,34	0,33	0,39	0,29	57	0,39	0,50	0,32	0,48	0,49	0,58
28	0,27	0,45	0,19	0,24	0,60	0,26	58	0,36	0,41	0,48	0,43	0,62	0,46
29	0,14	0,42	0,20	0,21	0,57	0,23	59	0,33	0,41	0,39	0,53	0,30	0,71
30	0,14	0,48	0,33	0,22	0,44	0,31	60	0,37	0,52	0,35	0,49	0,34	0,77

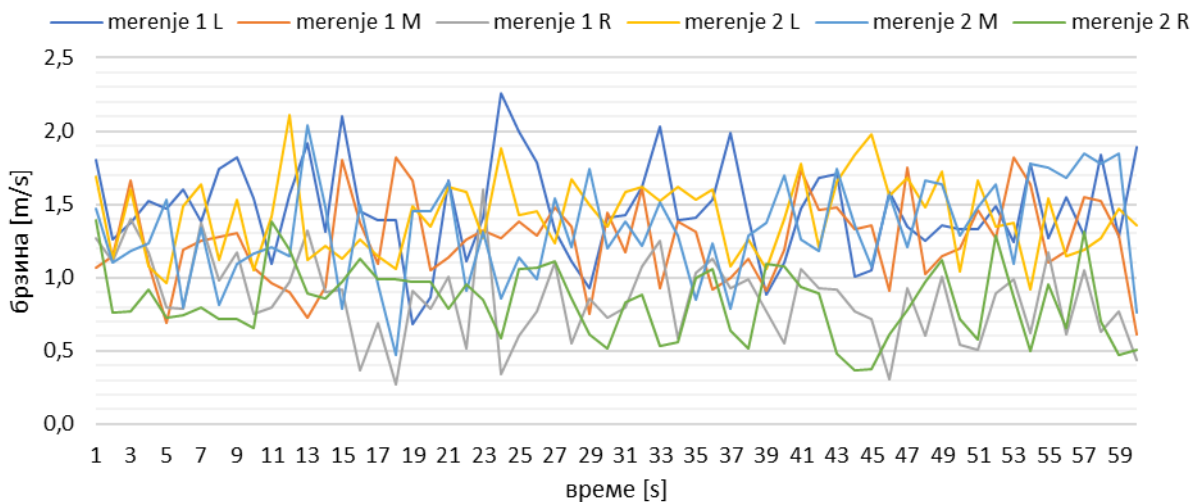
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	0,32	0,14	0,62	0,05	0,13	0,41
	M	0,41	0,15	0,63	0,05	0,10	0,25
	R	0,42	0,19	0,78	0,05	0,15	0,36
мерење 2	L	0,34	0,08	0,53	0,05	0,11	0,31
	M	0,40	0,08	0,62	0,05	0,11	0,29
	R	0,41	0,22	0,77	0,05	0,14	0,35



Угао лопатица регулатора 45° - $x=3m$

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	1,80	1,07	1,27	1,69	1,47	1,39	31	1,43	1,17	0,80	1,58	1,38	0,83
2	1,26	1,15	1,11	1,13	1,10	0,76	32	1,62	1,61	1,08	1,62	1,22	0,88
3	1,37	1,66	1,40	1,60	1,18	0,77	33	2,03	0,93	1,25	1,52	1,51	0,53
4	1,52	1,09	1,17	1,08	1,23	0,92	34	1,39	1,38	0,59	1,62	1,29	0,56
5	1,47	0,69	0,80	0,96	1,53	0,73	35	1,41	1,31	1,03	1,53	0,85	1,00
6	1,60	1,19	0,79	1,49	0,80	0,74	36	1,53	0,92	1,13	1,60	1,23	1,06
7	1,38	1,25	1,37	1,64	1,34	0,80	37	1,99	1,00	0,93	1,08	0,79	0,64
8	1,74	1,28	0,98	1,12	0,81	0,72	38	1,41	1,13	0,99	1,26	1,29	0,52
9	1,82	1,30	1,17	1,53	1,09	0,72	39	0,88	0,91	0,77	1,06	1,37	1,09
10	1,54	1,07	0,75	1,05	1,16	0,66	40	1,10	1,19	0,55	1,40	1,70	1,08
11	1,09	0,96	0,80	1,42	1,21	1,38	41	1,47	1,73	1,06	1,78	1,26	0,94
12	1,57	0,90	0,97	2,11	1,15	1,19	42	1,68	1,46	0,93	1,21	1,18	0,89
13	1,92	0,73	1,32	1,12	2,04	0,89	43	1,71	1,48	0,92	1,65	1,74	0,48
14	1,31	0,94	0,90	1,22	1,48	0,86	44	1,01	1,33	0,77	1,84	1,36	0,37
15	2,10	1,80	0,92	1,13	0,79	0,97	45	1,05	1,36	0,72	1,98	1,08	0,38
16	1,45	1,37	0,37	1,26	1,50	1,13	46	1,58	0,91	0,31	1,56	1,57	0,61
17	1,39	1,09	0,69	1,15	0,95	0,99	47	1,35	1,75	0,93	1,68	1,21	0,78
18	1,39	1,82	0,27	1,06	0,47	0,99	48	1,25	1,02	0,60	1,48	1,66	0,97
19	0,68	1,66	0,91	1,49	1,45	0,97	49	1,36	1,15	1,01	1,72	1,64	1,12
20	0,87	1,05	0,79	1,35	1,45	0,97	50	1,33	1,20	0,54	1,04	1,29	0,72
21	1,66	1,14	1,01	1,62	1,65	0,79	51	1,33	1,46	0,51	1,66	1,48	0,58
22	1,11	1,26	0,52	1,58	0,91	0,95	52	1,49	1,27	0,89	1,35	1,64	1,29
23	1,41	1,32	1,60	1,27	1,31	0,85	53	1,24	1,82	0,99	1,37	1,09	0,87
24	2,26	1,27	0,34	1,88	0,86	0,59	54	1,78	1,64	0,62	0,92	1,78	0,50
25	2,00	1,38	0,60	1,43	1,14	1,06	55	1,27	1,10	1,17	1,54	1,75	0,95
26	1,79	1,29	0,77	1,45	0,99	1,07	56	1,55	1,18	0,61	1,15	1,68	0,66
27	1,32	1,48	1,10	1,23	1,54	1,11	57	1,29	1,55	1,05	1,19	1,85	1,31
28	1,11	1,35	0,55	1,67	1,21	0,86	58	1,84	1,52	0,63	1,27	1,78	0,70
29	0,93	0,75	0,86	1,50	1,74	0,61	59	1,28	1,29	0,77	1,47	1,85	0,47
30	1,41	1,44	0,73	1,35	1,20	0,52	60	1,89	0,61	0,44	1,36	0,76	0,51

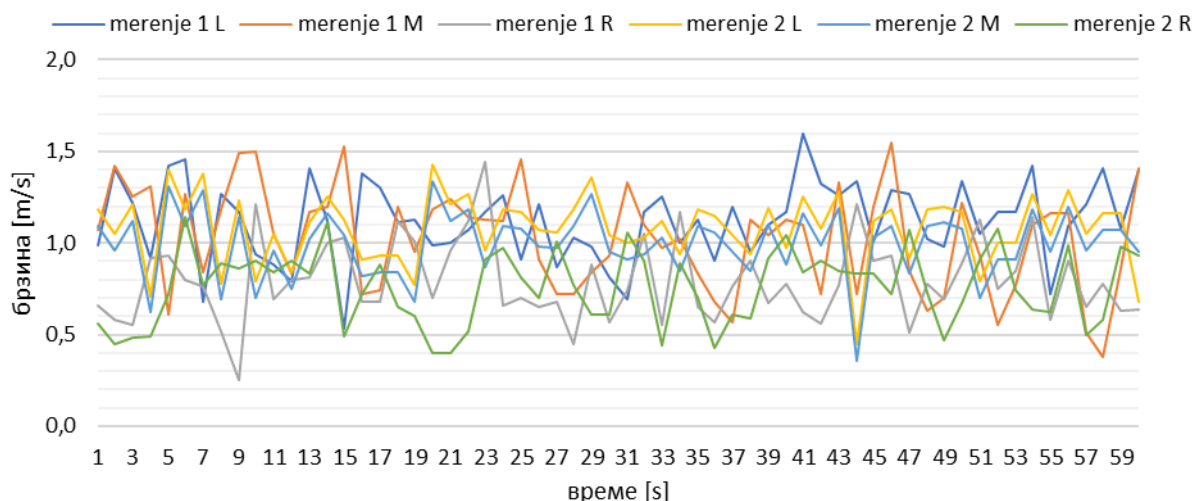
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	1,46	0,68	2,26	0,10	0,32	0,22
	M	1,25	0,61	1,82	0,09	0,29	0,23
	R	0,86	0,27	1,60	0,07	0,28	0,33
мерење 2	L	1,42	0,92	2,11	0,10	0,26	0,18
	M	1,32	0,47	2,04	0,10	0,33	0,25
	R	0,84	0,37	1,39	0,07	0,24	0,29



Угао лопатица регулатора 45° - x=4m

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	0,99	1,07	0,66	1,18	1,09	0,56	31	0,69	1,33	0,74	1,00	0,91	1,06
2	1,41	1,42	0,58	1,05	0,96	0,45	32	1,17	1,10	1,05	1,03	0,94	0,90
3	1,22	1,25	0,55	1,21	1,12	0,48	33	1,25	0,97	0,55	1,12	1,03	0,44
4	0,92	1,31	0,92	0,71	0,62	0,49	34	1,00	1,02	1,17	0,94	0,85	0,89
5	1,42	0,61	0,93	1,40	1,31	0,72	35	1,13	0,83	0,65	1,18	1,09	0,70
6	1,46	1,27	0,80	1,18	1,09	1,14	36	0,90	0,68	0,57	1,15	1,06	0,43
7	0,68	0,84	0,76	1,38	1,29	0,77	37	1,20	0,57	0,76	1,04	0,95	0,61
8	1,27	1,18	0,52	0,78	0,69	0,89	38	0,95	1,13	0,90	0,94	0,85	0,59
9	1,17	1,49	0,25	1,23	1,14	0,86	39	1,10	1,04	0,67	1,19	1,10	0,92
10	0,94	1,50	1,21	0,79	0,70	0,90	40	1,17	1,13	0,78	0,97	0,88	1,04
11	0,88	1,05	0,69	1,05	0,96	0,84	41	1,60	1,10	0,62	1,25	1,16	0,84
12	0,79	0,83	0,80	0,84	0,75	0,90	42	1,32	0,72	0,56	1,08	0,99	0,90
13	1,41	1,17	0,81	1,11	1,02	0,83	43	1,26	1,33	0,77	1,28	1,19	0,85
14	1,12	1,20	1,00	1,25	1,16	1,11	44	1,34	0,72	1,21	0,45	0,36	0,83
15	0,53	1,53	1,03	1,13	1,04	0,49	45	1,01	1,20	0,90	1,12	1,03	0,83
16	1,38	0,72	0,68	0,91	0,82	0,72	46	1,29	1,55	0,93	1,18	1,09	0,72
17	1,30	0,74	0,68	0,93	0,84	0,88	47	1,27	0,85	0,51	0,92	0,83	1,07
18	1,11	1,20	1,12	0,93	0,84	0,65	48	1,02	0,63	0,78	1,18	1,09	0,73
19	1,13	0,95	1,01	0,77	0,68	0,60	49	0,98	0,70	0,69	1,20	1,11	0,47
20	0,99	1,18	0,70	1,43	1,34	0,40	50	1,34	1,22	0,89	1,17	1,08	0,67
21	1,00	1,24	0,96	1,21	1,12	0,40	51	1,05	0,93	1,13	0,79	0,70	0,91
22	1,07	1,14	1,12	1,27	1,18	0,52	52	1,17	0,55	0,75	1,00	0,91	1,08
23	1,17	1,13	1,44	0,96	0,87	0,91	53	1,17	0,77	0,85	1,00	0,91	0,74
24	1,26	1,12	0,66	1,18	1,09	0,97	54	1,42	1,10	1,14	1,27	1,18	0,64
25	0,91	1,46	0,70	1,17	1,08	0,81	55	0,72	1,16	0,58	1,04	0,95	0,62
26	1,21	0,91	0,65	1,07	0,98	0,70	56	1,09	1,16	0,90	1,29	1,20	0,99
27	0,87	0,72	0,68	1,06	0,97	1,01	57	1,21	0,51	0,65	1,05	0,96	0,50
28	1,03	0,72	0,45	1,18	1,09	0,77	58	1,41	0,38	0,78	1,16	1,07	0,58
29	0,98	0,84	0,88	1,36	1,27	0,61	59	1,08	0,86	0,63	1,16	1,07	0,98
30	0,81	0,93	0,57	1,04	0,95	0,61	60	1,40	1,41	0,64	0,68	0,95	0,93

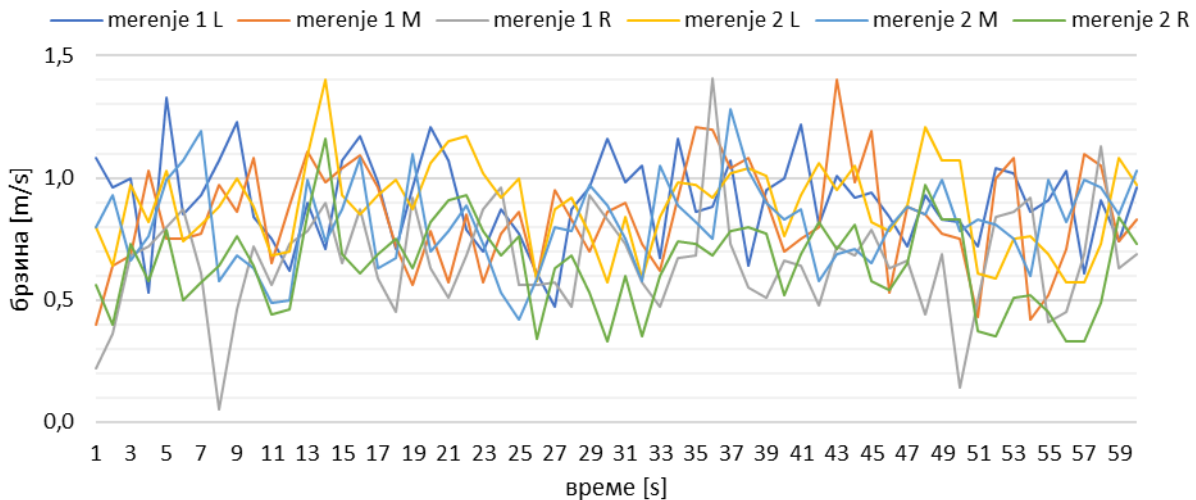
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	1,12	0,53	1,60	0,09	0,22	0,19
	M	1,02	0,38	1,55	0,08	0,28	0,28
	R	0,79	0,25	1,44	0,07	0,22	0,28
мерење 2	L	1,08	0,45	1,43	0,08	0,19	0,17
	M	0,99	0,36	1,34	0,08	0,18	0,18
	R	0,76	0,40	1,14	0,07	0,20	0,26



Угао лопатица регулатора 45° - $x=5m$

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	1,08	0,4	0,22	0,80	0,80	0,56	31	0,98	0,9	0,73	0,84	0,75	0,60
2	0,96	0,64	0,36	0,64	0,93	0,40	32	1,05	0,73	0,57	0,59	0,58	0,35
3	1,00	0,68	0,68	0,97	0,66	0,73	33	0,67	0,62	0,47	0,84	1,05	0,60
4	0,53	1,03	0,72	0,82	0,76	0,58	34	1,16	0,92	0,67	0,98	0,89	0,74
5	1,33	0,75	0,80	1,03	0,99	0,79	35	0,86	1,21	0,68	0,97	0,82	0,73
6	0,85	0,75	0,87	0,74	1,07	0,50	36	0,88	1,20	1,41	0,92	0,75	0,68
7	0,93	0,77	0,61	0,81	1,19	0,57	37	1,07	1,04	0,73	1,02	1,28	0,78
8	1,07	0,97	0,05	0,88	0,58	0,64	38	0,64	1,08	0,55	1,04	1,03	0,80
9	1,23	0,86	0,46	1,00	0,68	0,76	39	0,95	0,91	0,51	1,01	0,90	0,77
10	0,84	1,08	0,72	0,88	0,63	0,64	40	1,00	0,70	0,66	0,76	0,83	0,52
11	0,75	0,65	0,56	0,68	0,49	0,44	41	1,22	0,75	0,64	0,93	0,87	0,69
12	0,62	0,89	0,73	0,70	0,50	0,46	42	0,81	0,80	0,48	1,06	0,58	0,82
13	0,90	1,11	0,78	1,09	0,99	0,85	43	1,01	1,40	0,72	0,95	0,69	0,71
14	0,71	0,98	0,90	1,40	0,74	1,16	44	0,92	0,98	0,68	1,05	0,71	0,81
15	1,07	1,04	0,65	0,93	0,87	0,69	45	0,94	1,19	0,79	0,82	0,65	0,58
16	1,17	1,09	0,87	0,85	1,08	0,61	46	0,84	0,53	0,63	0,78	0,80	0,54
17	0,98	0,96	0,59	0,93	0,63	0,69	47	0,72	0,88	0,66	0,89	0,88	0,65
18	0,71	0,72	0,45	0,99	0,67	0,75	48	0,93	0,85	0,44	1,21	0,85	0,97
19	0,96	0,56	0,92	0,87	1,10	0,63	49	0,83	0,77	0,69	1,07	0,99	0,83
20	1,21	0,78	0,63	1,06	0,70	0,82	50	0,82	0,75	0,14	1,07	0,78	0,83
21	1,07	0,57	0,51	1,15	0,78	0,91	51	0,72	0,43	0,50	0,61	0,83	0,37
22	0,79	0,85	0,68	1,17	0,89	0,93	52	1,04	1,00	0,84	0,59	0,81	0,35
23	0,70	0,57	0,87	1,02	0,73	0,78	53	1,02	1,08	0,86	0,75	0,75	0,51
24	0,87	0,77	0,96	0,92	0,53	0,68	54	0,86	0,42	0,92	0,76	0,60	0,52
25	0,77	0,86	0,56	1,00	0,42	0,76	55	0,91	0,52	0,41	0,69	0,99	0,45
26	0,61	0,59	0,56	0,58	0,59	0,34	56	1,03	0,71	0,45	0,57	0,82	0,33
27	0,47	0,95	0,57	0,87	0,80	0,63	57	0,61	1,10	0,69	0,57	0,99	0,33
28	0,87	0,83	0,47	0,92	0,78	0,68	58	0,91	1,05	1,13	0,73	0,96	0,49
29	0,96	0,70	0,93	0,77	0,97	0,53	59	0,74	0,74	0,63	1,08	0,85	0,84
30	1,16	0,86	0,83	0,57	0,89	0,33	60	0,96	0,83	0,69	0,97	1,03	0,73

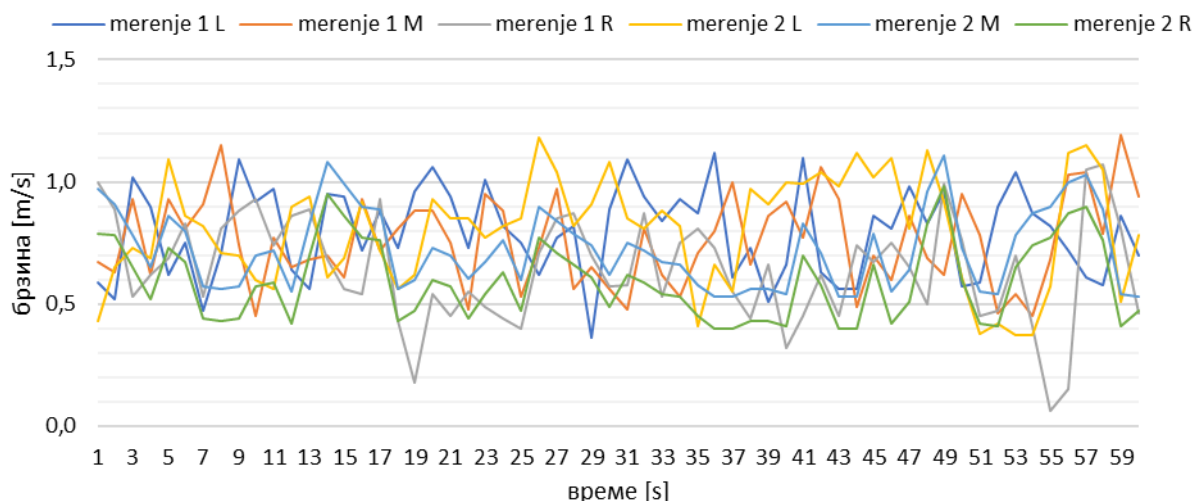
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	0,90	0,47	1,33	0,08	0,18	0,20
	M	0,84	0,40	1,40	0,07	0,21	0,25
	R	0,66	0,05	1,41	0,06	0,22	0,33
мерење 2	L	0,89	0,57	1,40	0,07	0,18	0,20
	M	0,81	0,42	1,28	0,07	0,18	0,22
	R	0,65	0,33	1,16	0,06	0,18	0,27



Угао лопатица регулатора 45° - $x=6m$

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	0,59	0,67	1,00	0,43	0,97	0,79	31	1,09	0,48	0,58	0,85	0,75	0,62
2	0,52	0,63	0,89	0,65	0,91	0,78	32	0,94	0,81	0,87	0,81	0,72	0,59
3	1,02	0,93	0,53	0,73	0,78	0,65	33	0,84	0,62	0,53	0,88	0,67	0,54
4	0,90	0,62	0,62	0,69	0,65	0,52	34	0,93	0,53	0,75	0,82	0,66	0,53
5	0,62	0,93	0,69	1,09	0,86	0,73	35	0,87	0,71	0,81	0,41	0,58	0,45
6	0,75	0,81	0,83	0,86	0,80	0,67	36	1,12	0,80	0,73	0,66	0,53	0,40
7	0,47	0,91	0,53	0,82	0,57	0,44	37	0,61	1,00	0,55	0,55	0,53	0,40
8	0,71	1,15	0,81	0,71	0,56	0,43	38	0,73	0,66	0,44	0,97	0,56	0,43
9	1,09	0,74	0,88	0,70	0,57	0,44	39	0,51	0,86	0,66	0,91	0,56	0,43
10	0,92	0,45	0,93	0,60	0,70	0,57	40	0,66	0,92	0,32	1,00	0,54	0,41
11	0,97	0,77	0,74	0,56	0,72	0,59	41	1,10	0,77	0,45	0,99	0,83	0,70
12	0,64	0,65	0,86	0,90	0,55	0,42	42	0,63	1,06	0,62	1,04	0,71	0,58
13	0,56	0,68	0,89	0,94	0,83	0,70	43	0,56	0,93	0,45	0,98	0,53	0,40
14	0,95	0,70	0,68	0,61	1,08	0,95	44	0,56	0,49	0,74	1,12	0,53	0,40
15	0,94	0,61	0,56	0,69	0,99	0,86	45	0,86	0,70	0,67	1,02	0,79	0,66
16	0,72	0,93	0,54	0,92	0,90	0,77	46	0,81	0,60	0,75	1,10	0,55	0,42
17	0,88	0,72	0,93	0,72	0,89	0,76	47	0,98	0,86	0,65	0,81	0,64	0,51
18	0,73	0,81	0,43	0,56	0,56	0,43	48	0,83	0,69	0,50	1,13	0,96	0,83
19	0,96	0,88	0,18	0,62	0,60	0,47	49	0,96	0,62	0,99	0,92	1,11	0,98
20	1,06	0,88	0,54	0,93	0,73	0,60	50	0,57	0,95	0,76	0,61	0,73	0,60
21	0,94	0,75	0,45	0,85	0,70	0,57	51	0,59	0,78	0,45	0,38	0,55	0,42
22	0,73	0,48	0,55	0,85	0,60	0,44	52	0,90	0,46	0,47	0,42	0,54	0,41
23	1,01	0,95	0,49	0,77	0,67	0,54	53	1,04	0,54	0,70	0,37	0,78	0,65
24	0,82	0,88	0,44	0,82	0,76	0,63	54	0,87	0,45	0,41	0,37	0,87	0,74
25	0,75	0,53	0,40	0,85	0,60	0,47	55	0,82	0,68	0,06	0,57	0,90	0,77
26	0,62	0,73	0,71	1,18	0,90	0,77	56	0,72	1,03	0,15	1,12	1,00	0,87
27	0,77	0,97	0,85	1,04	0,84	0,71	57	0,61	1,04	1,05	1,15	1,03	0,90
28	0,82	0,56	0,87	0,82	0,79	0,66	58	0,58	0,79	1,07	1,05	0,89	0,76
29	0,36	0,65	0,70	0,91	0,74	0,61	59	0,86	1,19	0,81	0,51	0,54	0,41
30	0,89	0,56	0,57	1,08	0,62	0,49	60	0,70	0,94	0,46	0,78	0,53	0,47

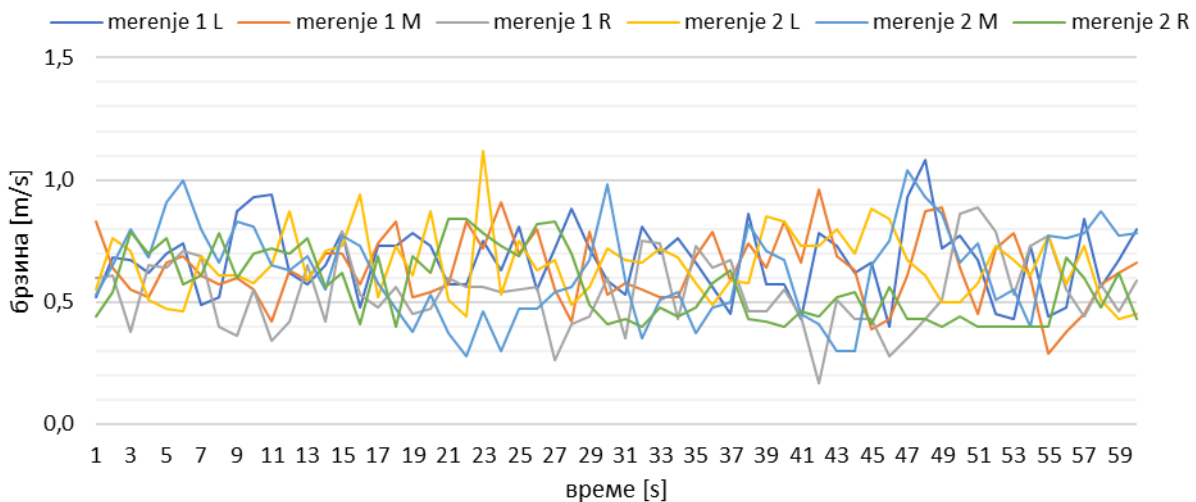
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	0,79	0,36	1,12	0,07	0,18	0,23
	M	0,76	0,45	1,19	0,07	0,18	0,24
	R	0,64	0,06	1,07	0,06	0,22	0,34
мерење 2	L	0,80	0,37	1,18	0,07	0,22	0,27
	M	0,73	0,53	1,11	0,07	0,16	0,22
	R	0,60	0,40	0,98	0,06	0,16	0,26



Угао лопатица регулатора 45° - $x=7m$

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	0,52	0,83	0,60	0,55	0,53	0,44	31	0,53	0,58	0,35	0,67	0,59	0,43
2	0,68	0,64	0,61	0,76	0,65	0,54	32	0,81	0,55	0,75	0,66	0,35	0,40
3	0,67	0,55	0,38	0,71	0,80	0,79	33	0,70	0,52	0,74	0,72	0,51	0,48
4	0,62	0,52	0,65	0,51	0,68	0,70	34	0,76	0,52	0,43	0,68	0,54	0,44
5	0,70	0,66	0,64	0,47	0,91	0,76	35	0,66	0,69	0,73	0,58	0,37	0,48
6	0,74	0,69	0,71	0,46	1,00	0,57	36	0,56	0,79	0,64	0,49	0,48	0,58
7	0,49	0,61	0,69	0,69	0,80	0,61	37	0,45	0,59	0,67	0,59	0,50	0,63
8	0,52	0,57	0,40	0,61	0,66	0,78	38	0,86	0,74	0,46	0,58	0,82	0,43
9	0,87	0,60	0,36	0,61	0,83	0,60	39	0,57	0,64	0,46	0,85	0,71	0,42
10	0,93	0,55	0,55	0,58	0,81	0,70	40	0,57	0,83	0,55	0,83	0,67	0,40
11	0,94	0,42	0,34	0,65	0,65	0,72	41	0,43	0,66	0,44	0,73	0,45	0,46
12	0,62	0,63	0,42	0,87	0,63	0,70	42	0,78	0,96	0,17	0,73	0,41	0,44
13	0,57	0,59	0,65	0,59	0,69	0,76	43	0,73	0,69	0,51	0,80	0,30	0,52
14	0,65	0,70	0,42	0,71	0,55	0,56	44	0,62	0,63	0,43	0,70	0,30	0,54
15	0,79	0,70	0,79	0,73	0,77	0,62	45	0,66	0,39	0,43	0,88	0,65	0,41
16	0,48	0,57	0,53	0,94	0,73	0,41	46	0,40	0,43	0,28	0,84	0,75	0,56
17	0,73	0,74	0,48	0,52	0,58	0,69	47	0,93	0,61	0,35	0,67	1,04	0,43
18	0,73	0,83	0,56	0,73	0,47	0,40	48	1,08	0,87	0,43	0,61	0,93	0,43
19	0,78	0,52	0,45	0,61	0,38	0,69	49	0,72	0,89	0,51	0,50	0,86	0,40
20	0,73	0,54	0,47	0,87	0,53	0,62	50	0,77	0,64	0,86	0,50	0,66	0,44
21	0,57	0,57	0,60	0,51	0,37	0,84	51	0,67	0,45	0,89	0,58	0,74	0,40
22	0,57	0,83	0,56	0,44	0,28	0,84	52	0,45	0,72	0,79	0,73	0,51	0,40
23	0,75	0,72	0,56	1,12	0,46	0,78	53	0,43	0,78	0,53	0,67	0,55	0,40
24	0,63	0,91	0,54	0,53	0,30	0,73	54	0,73	0,60	0,73	0,61	0,40	0,40
25	0,81	0,70	0,55	0,75	0,47	0,69	55	0,44	0,29	0,77	0,77	0,77	0,40
26	0,55	0,80	0,56	0,63	0,47	0,82	56	0,48	0,38	0,55	0,57	0,76	0,68
27	0,72	0,55	0,26	0,67	0,54	0,83	57	0,84	0,45	0,44	0,73	0,78	0,60
28	0,88	0,42	0,41	0,49	0,56	0,70	58	0,56	0,57	0,57	0,51	0,87	0,48
29	0,72	0,79	0,44	0,56	0,67	0,49	59	0,67	0,62	0,46	0,43	0,77	0,62
30	0,59	0,53	0,60	0,72	0,98	0,41	60	0,80	0,66	0,59	0,45	0,78	0,43

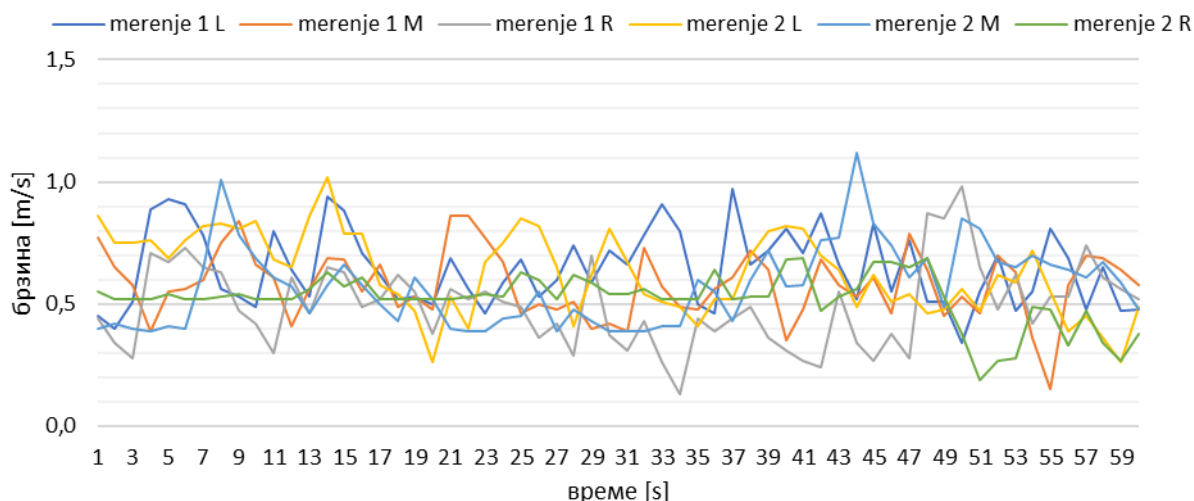
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	0,67	0,40	1,08	0,06	0,15	0,22
	M	0,63	0,29	0,96	0,06	0,14	0,22
	R	0,54	0,17	0,89	0,06	0,15	0,28
мерење 2	L	0,65	0,43	1,12	0,06	0,14	0,21
	M	0,63	0,28	1,04	0,06	0,19	0,30
	R	0,57	0,40	0,84	0,06	0,14	0,25



Угао лопатица регулатора 45° - x=8m

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	0,45	0,77	0,44	0,86	0,40	0,55	31	0,66	0,39	0,31	0,67	0,39	0,54
2	0,40	0,65	0,34	0,75	0,42	0,52	32	0,78	0,73	0,43	0,54	0,39	0,56
3	0,51	0,58	0,28	0,75	0,40	0,52	33	0,91	0,57	0,26	0,51	0,41	0,52
4	0,89	0,39	0,71	0,76	0,39	0,52	34	0,80	0,49	0,13	0,49	0,41	0,52
5	0,93	0,55	0,67	0,69	0,41	0,54	35	0,50	0,48	0,44	0,41	0,60	0,52
6	0,91	0,56	0,73	0,76	0,40	0,52	36	0,46	0,56	0,39	0,52	0,55	0,64
7	0,78	0,60	0,65	0,82	0,64	0,52	37	0,97	0,61	0,44	0,52	0,43	0,52
8	0,56	0,75	0,63	0,83	1,01	0,53	38	0,66	0,72	0,49	0,70	0,60	0,53
9	0,53	0,84	0,47	0,81	0,78	0,54	39	0,72	0,64	0,36	0,80	0,72	0,53
10	0,49	0,66	0,42	0,84	0,69	0,52	40	0,81	0,35	0,31	0,82	0,57	0,68
11	0,80	0,61	0,30	0,68	0,61	0,52	41	0,71	0,48	0,27	0,81	0,58	0,69
12	0,64	0,41	0,61	0,65	0,57	0,52	42	0,87	0,68	0,24	0,70	0,76	0,47
13	0,53	0,56	0,46	0,86	0,46	0,56	43	0,66	0,58	0,55	0,64	0,77	0,53
14	0,94	0,69	0,65	1,02	0,58	0,63	44	0,52	0,53	0,34	0,49	1,12	0,56
15	0,88	0,68	0,63	0,79	0,66	0,57	45	0,83	0,61	0,27	0,62	0,83	0,67
16	0,71	0,55	0,49	0,79	0,58	0,61	46	0,55	0,46	0,38	0,51	0,74	0,67
17	0,62	0,66	0,52	0,58	0,50	0,52	47	0,76	0,79	0,28	0,54	0,61	0,65
18	0,52	0,49	0,62	0,54	0,43	0,52	48	0,51	0,64	0,87	0,46	0,69	0,69
19	0,53	0,53	0,55	0,47	0,61	0,52	49	0,51	0,45	0,85	0,48	0,49	0,53
20	0,50	0,48	0,38	0,26	0,52	0,52	50	0,34	0,53	0,98	0,56	0,85	0,38
21	0,69	0,86	0,56	0,53	0,40	0,52	51	0,55	0,46	0,65	0,47	0,81	0,19
22	0,56	0,86	0,52	0,40	0,39	0,53	52	0,70	0,70	0,48	0,62	0,67	0,27
23	0,46	0,77	0,55	0,67	0,39	0,54	53	0,47	0,63	0,62	0,59	0,65	0,28
24	0,59	0,67	0,51	0,75	0,44	0,53	54	0,55	0,36	0,42	0,72	0,70	0,49
25	0,68	0,46	0,49	0,85	0,45	0,63	55	0,81	0,15	0,53	0,55	0,66	0,48
26	0,53	0,50	0,36	0,82	0,55	0,60	56	0,69	0,58	0,53	0,39	0,64	0,33
27	0,60	0,48	0,42	0,65	0,39	0,52	57	0,48	0,70	0,74	0,45	0,61	0,47
28	0,74	0,51	0,29	0,41	0,48	0,62	58	0,65	0,69	0,61	0,36	0,67	0,34
29	0,59	0,40	0,70	0,62	0,43	0,59	59	0,47	0,64	0,56	0,26	0,59	0,27
30	0,72	0,42	0,37	0,81	0,39	0,54	60	0,48	0,58	0,52	0,49	0,48	0,38

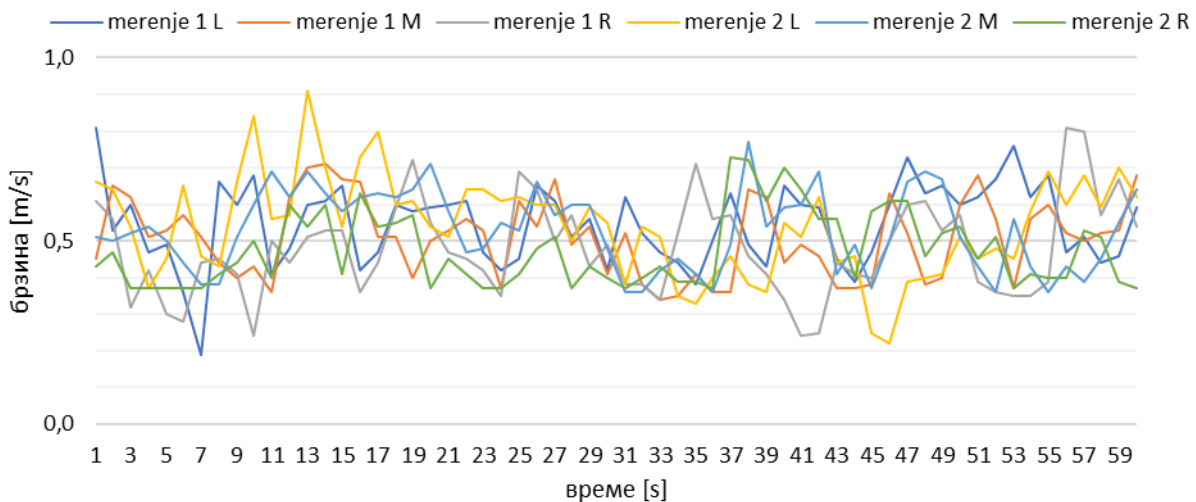
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	0,64	0,34	0,97	0,06	0,15	0,24
	M	0,58	0,15	0,86	0,06	0,14	0,23
	R	0,49	0,13	0,98	0,05	0,17	0,34
мерење 2	L	0,63	0,26	1,02	0,06	0,16	0,26
	M	0,57	0,39	1,12	0,06	0,16	0,28
	R	0,52	0,19	0,69	0,06	0,10	0,20



Угао лопатица регулатора 45° - $x=9m$

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	0,81	0,45	0,61	0,66	0,51	0,43	31	0,62	0,52	0,38	0,38	0,36	0,37
2	0,53	0,65	0,56	0,64	0,50	0,47	32	0,52	0,38	0,38	0,54	0,36	0,40
3	0,60	0,62	0,32	0,54	0,52	0,37	33	0,47	0,34	0,34	0,51	0,42	0,43
4	0,47	0,51	0,42	0,37	0,54	0,37	34	0,44	0,35	0,52	0,35	0,45	0,39
5	0,49	0,53	0,30	0,45	0,50	0,37	35	0,38	0,41	0,71	0,33	0,41	0,39
6	0,36	0,57	0,28	0,65	0,44	0,37	36	0,50	0,36	0,56	0,40	0,36	0,37
7	0,19	0,51	0,44	0,46	0,38	0,37	37	0,63	0,36	0,57	0,46	0,49	0,73
8	0,66	0,44	0,45	0,43	0,38	0,41	38	0,49	0,64	0,46	0,38	0,77	0,72
9	0,60	0,40	0,41	0,66	0,51	0,44	39	0,43	0,62	0,41	0,36	0,54	0,61
10	0,68	0,43	0,24	0,84	0,60	0,50	40	0,65	0,44	0,34	0,55	0,59	0,70
11	0,41	0,36	0,50	0,56	0,69	0,40	41	0,60	0,49	0,24	0,51	0,60	0,64
12	0,48	0,62	0,44	0,57	0,62	0,60	42	0,59	0,46	0,25	0,62	0,69	0,56
13	0,60	0,70	0,51	0,91	0,69	0,54	43	0,45	0,37	0,44	0,44	0,41	0,56
14	0,61	0,71	0,53	0,70	0,63	0,60	44	0,39	0,37	0,41	0,46	0,49	0,40
15	0,65	0,67	0,53	0,54	0,58	0,41	45	0,47	0,38	0,40	0,25	0,37	0,58
16	0,42	0,66	0,36	0,73	0,62	0,63	46	0,60	0,63	0,50	0,22	0,50	0,61
17	0,47	0,51	0,44	0,80	0,63	0,54	47	0,73	0,52	0,60	0,39	0,66	0,61
18	0,60	0,51	0,59	0,60	0,62	0,55	48	0,63	0,38	0,61	0,40	0,69	0,46
19	0,58	0,40	0,72	0,61	0,64	0,57	49	0,65	0,40	0,53	0,41	0,67	0,52
20	0,59	0,50	0,55	0,54	0,71	0,37	50	0,60	0,60	0,57	0,51	0,51	0,54
21	0,60	0,53	0,47	0,51	0,58	0,45	51	0,62	0,68	0,39	0,45	0,43	0,45
22	0,61	0,56	0,45	0,64	0,47	0,41	52	0,67	0,56	0,36	0,48	0,36	0,51
23	0,47	0,53	0,42	0,64	0,48	0,37	53	0,76	0,37	0,35	0,45	0,56	0,37
24	0,42	0,37	0,35	0,61	0,55	0,37	54	0,62	0,56	0,35	0,58	0,43	0,41
25	0,45	0,61	0,69	0,62	0,53	0,41	55	0,68	0,60	0,39	0,69	0,36	0,40
26	0,65	0,54	0,64	0,60	0,66	0,48	56	0,47	0,52	0,81	0,60	0,43	0,40
27	0,61	0,67	0,50	0,60	0,57	0,51	57	0,51	0,50	0,80	0,68	0,39	0,53
28	0,51	0,49	0,57	0,50	0,60	0,37	58	0,44	0,52	0,57	0,59	0,45	0,51
29	0,56	0,54	0,43	0,59	0,60	0,43	59	0,46	0,53	0,67	0,70	0,55	0,39
30	0,42	0,41	0,49	0,55	0,48	0,40	60	0,59	0,68	0,54	0,62	0,64	0,37

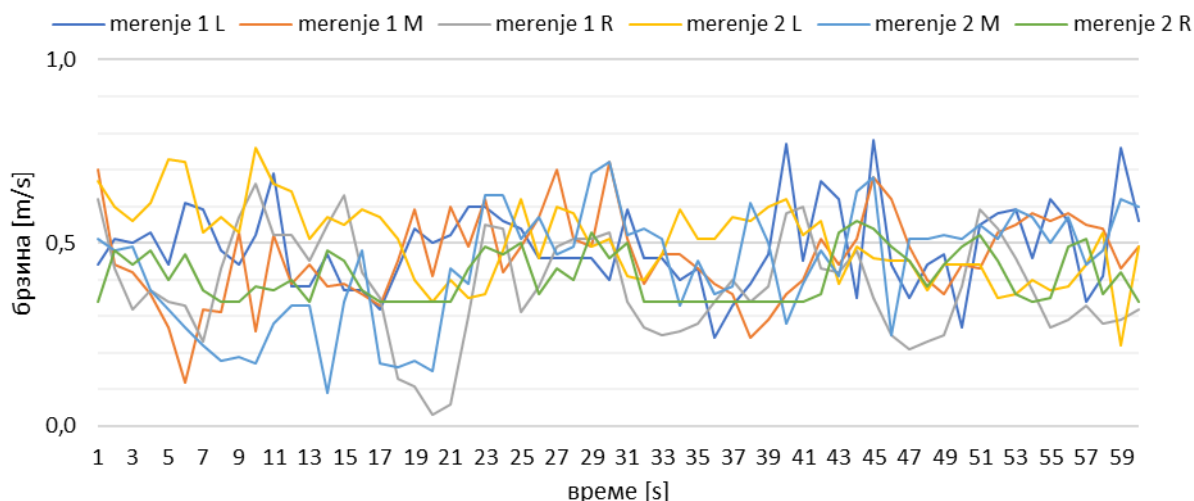
		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	0,55	0,19	0,81	0,06	0,11	0,20
	M	0,51	0,34	0,71	0,06	0,11	0,21
	R	0,48	0,24	0,81	0,05	0,13	0,27
мерење 2	L	0,54	0,22	0,91	0,06	0,13	0,25
	M	0,53	0,36	0,77	0,06	0,11	0,20
	R	0,47	0,37	0,73	0,05	0,10	0,21



Угао лопатица регулатора 45° - $x=10m$

Ред. бр.	мерење 1			мерење 2			Ред. бр.	мерење 1			мерење 2		
	L	M	R	L	M	R		L	M	R	L	M	R
1	0,44	0,70	0,62	0,67	0,51	0,34	31	0,59	0,51	0,34	0,41	0,52	0,50
2	0,51	0,44	0,43	0,60	0,48	0,48	32	0,46	0,39	0,27	0,40	0,54	0,34
3	0,50	0,42	0,32	0,56	0,49	0,44	33	0,46	0,47	0,25	0,47	0,51	0,34
4	0,53	0,36	0,37	0,61	0,37	0,48	34	0,40	0,47	0,26	0,59	0,33	0,34
5	0,44	0,27	0,34	0,73	0,32	0,40	35	0,43	0,43	0,28	0,51	0,45	0,34
6	0,61	0,12	0,33	0,72	0,27	0,47	36	0,24	0,39	0,34	0,51	0,36	0,34
7	0,59	0,32	0,23	0,53	0,22	0,37	37	0,33	0,36	0,40	0,57	0,38	0,34
8	0,48	0,31	0,43	0,57	0,18	0,34	38	0,39	0,24	0,34	0,56	0,61	0,34
9	0,44	0,53	0,57	0,53	0,19	0,34	39	0,47	0,29	0,38	0,60	0,50	0,34
10	0,52	0,26	0,66	0,76	0,17	0,38	40	0,77	0,36	0,58	0,62	0,28	0,34
11	0,69	0,52	0,52	0,66	0,28	0,37	41	0,45	0,40	0,60	0,52	0,39	0,34
12	0,38	0,39	0,52	0,64	0,33	0,40	42	0,67	0,51	0,43	0,56	0,48	0,36
13	0,38	0,44	0,45	0,51	0,33	0,34	43	0,62	0,44	0,42	0,39	0,41	0,53
14	0,47	0,38	0,55	0,57	0,09	0,48	44	0,35	0,51	0,48	0,49	0,64	0,56
15	0,37	0,39	0,63	0,55	0,34	0,45	45	0,78	0,68	0,35	0,46	0,68	0,54
16	0,37	0,36	0,42	0,59	0,48	0,37	46	0,44	0,62	0,25	0,45	0,25	0,49
17	0,32	0,33	0,35	0,57	0,17	0,34	47	0,35	0,49	0,21	0,45	0,51	0,45
18	0,43	0,45	0,13	0,51	0,16	0,34	48	0,44	0,40	0,23	0,37	0,51	0,38
19	0,54	0,59	0,11	0,40	0,18	0,34	49	0,47	0,36	0,25	0,44	0,52	0,44
20	0,50	0,41	0,03	0,34	0,15	0,34	50	0,27	0,44	0,38	0,44	0,51	0,49
21	0,52	0,60	0,06	0,40	0,43	0,34	51	0,55	0,43	0,59	0,44	0,55	0,52
22	0,60	0,49	0,30	0,35	0,39	0,43	52	0,58	0,53	0,54	0,35	0,51	0,45
23	0,60	0,62	0,55	0,36	0,63	0,49	53	0,59	0,55	0,46	0,36	0,59	0,36
24	0,56	0,42	0,54	0,48	0,63	0,47	54	0,46	0,58	0,37	0,40	0,57	0,34
25	0,54	0,49	0,31	0,62	0,51	0,50	55	0,62	0,56	0,27	0,37	0,50	0,35
26	0,46	0,57	0,38	0,46	0,57	0,36	56	0,56	0,58	0,29	0,38	0,57	0,49
27	0,46	0,70	0,49	0,60	0,47	0,43	57	0,34	0,55	0,33	0,44	0,44	0,51
28	0,46	0,51	0,51	0,58	0,49	0,40	58	0,41	0,54	0,28	0,53	0,48	0,36
29	0,46	0,49	0,51	0,49	0,69	0,53	59	0,76	0,43	0,29	0,22	0,62	0,42
30	0,40	0,72	0,53	0,51	0,72	0,46	60	0,56	0,49	0,32	0,49	0,60	0,34

		\bar{v}	min	max	ε	σ_v	I_t
мерење 1	L	0,49	0,24	0,78	0,05	0,11	0,23
	M	0,46	0,12	0,72	0,05	0,12	0,26
	R	0,38	0,03	0,66	0,05	0,14	0,37
мерење 2	L	0,50	0,22	0,76	0,06	0,11	0,22
	M	0,43	0,09	0,72	0,05	0,15	0,36
	R	0,41	0,34	0,56	0,05	0,07	0,17



Биографија аутора

Михаило Васић рођен је 14.3.1988. године у Лозници. Основну школу „Јован Цвијић“ завршио је са одличним успехом, по чијем завршетку је награђен дипломом „Вук Караџић“, а због бројних диплома освојених на такмичењима, као и због спортског ангажовања, понео је још пет посебних диплома. Током овог периода нарочито је заинтересован за кошарку, прошао је кроз све млађе клупске селекције у родном граду, редовно учествовао на летњим кошаркашким камповима. Године 2003. школовање наставља у београдској Математичкој гимназији, где се, између осталог, интензивно бави програмирањем. Студије на Машинском факултету у Београду започиње 2007. године. Основни степен завршава са просечном оценом 9,73, а две године другог степена студија наставља на модулу за термотехнику. Дипломира 2012. године са просечном оценом 9,55, са дипломским радом на тему *Елементи и процеси у клима коморама*, у оквиру кога је самостално развио први и за сада једини домаћи софтвер за избор и прорачун клима комора. У свакој години студија био је награђиван поводом дана факултета, а у последњој години и добитник стипендије *Доситеја* за хиљаду најбољих студената у Републици Србији. Са тимом студената добија прву награду на глобалном такмичењу у Бриселу априла 2011. године. По повратку из Белгије, на пријему у Ректорату универзитета у Београду бива награђен од министра просвете и ректора, а у истом периоду у Скупштини града Београда прима и Награду града Београда за стваралаштво младих. По завршетку студија враћа се у Лозницу, где наставља да буде окупиран породичним послом, у кога је укључен од самог почетка средином 90-их година прошлог века, и чему је апсолутно подредио и свој начин живљења. Улажући неисцрпну енергију, интензивно се бави развојем, конструкцијом и производњом компоненти за вентилационе системе. И поред свих обавеза, жеља за кошарком не посустаје, па се активно враћа тренинзима и утакмицама у градском клубу. У спектру његових интересовања готово да нема области коју није дотакао, на себи својствен начин, чиме су га природа и ум обдарили, омогућивши му да свој креативни потенцијал афирмише у средини која га је изнедрила, и којој се на најбољи начин одужује. Природно је што своје креације реализује у својој отаџбини, јер су аксиолошки систем вредности и патриотизам доминантне особине његовог карактера, и то би требало прихватити као чињеницу вишег реда.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Име и презиме аутора: **Михаило Васић**

Број индекса: **D33/2013**

ИЗЈАВЉУЈЕМ

да је докторска дисертација под насловом

**УТИЦАЈ ГЕОМЕТРИЈЕ ЕЛЕМЕНАТА ЗА ДИСТРИБУЦИЈУ ВАЗДУХА
НА ЕКСПАНЗИЈУ ВАЗДУШНОГ МЛАЗА У СИСТЕМИМА МЕШАЈУЋЕ
ВЕНТИЛАЦИЈЕ**

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Београду, 7. јуна 2021.

Потпис аутора



ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ ДОКТОРСКОГ РАДА

Име и презиме аутора: **Михаило Васић**

Број индекса: **D33/2013**

Студијски програм: ДОКТОРСКЕ АКАДЕМСКЕ СТУДИЈЕ
МАШИНСКО ИНЖЕЊЕРСТВО

Наслов рада: УТИЦАЈ ГЕОМЕТРИЈЕ ЕЛЕМЕНАТА ЗА ДИСТРИБУЦИЈУ ВА-
ЗДУХА НА ЕКСПАНЗИЈУ ВАЗДУШНОГ МЛАЗА У СИСТЕМИМА
МЕШАЈУЋЕ ВЕНТИЛАЦИЈЕ

Ментори: др **ВЛАДИМИР СТЕВАНОВИЋ**, редовни професор
др **АЛЕКСАНДРА СРЕТЕНОВИЋ**, доцент

ИЗЈАВЉУЈЕМ

да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао ради похрањивања у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду. Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада. Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

У Београду, 7. јуна 2021.

Потпис аутора



ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом

УТИЦАЈ ГЕОМЕТРИЈЕ ЕЛЕМЕНАТА ЗА ДИСТРИБУЦИЈУ ВАЗДУХА НА ЕКСПАНЗИЈУ ВАЗДУШНОГ МЛАЗА У СИСТЕМИМА МЕШАЈУЋЕ ВЕНТИЛАЦИЈЕ

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
- 3** Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

У Београду, 7. јуна 2021.

Потпис аутора



1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода