

Razvoj eksperimentalnog postava za ispitivanje potiska i adhezije cijevnih ventilatora

Brzica, Karlo

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:556519>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Karlo Brzica

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Marko Švaco, dipl. ing.

Student:

Karlo Brzica

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se doc. dr. sc. Marku Švaci na pruženom znanju kroz studiji, uloženom vremenu i savjetima tijekom izrade ovog rada. Također bih se zahvalio Mateju Božiću na stručnim sugestijama i pruženoj pomoći za vrijeme izrade diplomskog rada.

Veliko hvala mojoj obitelji na pruženoj ljubavi, povjerenju i podršci tijekom cijelog studija.

Karlo Brzica



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **KARLO BRZICA** Mat. br.: 0035206500

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Razvoj eksperimentalnog postava za ispitivanje potiska i adhezije cijevnih ventilatora**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Development of an experimental setup for testing thrust and adhesion of electric ducted fans**

Opis zadatka:

Suvremeni robotski sustavi za inspekciju cestovne infrastrukture i nosivih konstrukcija u građevinarstvu koriste raznovrsne metode prijanjanja na ravne vertikalne površine. Jedna od mogućih metoda prijanjanja ostvaruje se koristeći propelere u cijevi tj. cijevne ventilatore (engl. electric ducted fan, EDF), koji ostvaruju velike sile potiska i omogućavaju kombiniranu silu adhezije na podlogu. U ovom diplomskom radu potrebno je razviti i izraditi eksperimentalni postav za ispitivanje vertikalnih (normalnih) sila na podlogu različitih tipova ventilatora u cijevi s različitim tipovima i geometrijama difuzora (engl. shroud).

U radu je također potrebno ispitati mogućnost ostvarivanja kombinirane vertikalne i horizontalne sile prijanjanja konstrukcijom asimetričnih tipova difuzora te postavljanjem ventilatora pod kutom na podlogu. Kao utjecajne parametre u procesu testiranja i validacije potrebno je koristiti jačinu struje, brzinu vrtnje ventilatora, udaljenost difuzora od podloge, kut ventilatora, te različite tipove difuzora preuzete iz dostupne znanstvene i stručne literature. U radu je potrebno ispitati utjecaj vrste podloge na gubitke u sili prijanjanja. Potrebno je ispitati najmanje tri različite podloge od idealnih tj. glatkih i ravnih površina do grubih površina koje se sastoje od većeg granulata kamena ili šljunka simulirajući realne vanjske ovojnice nosivih konstrukcija u građevinarstvu.

Eksperimentalni postav treba omogućiti jednostavnu zamjenu različitih tipova cijevnih ventilatora i prikupljanje svih bitnih parametara kao što su potrošnja električne energije, brzina vrtnje ventilatora, vertikalne i horizontalne sile prijanjanja.

Eksperimentalni postav potrebno je validirati u laboratoriju, a sve je konstrukcijske elemente potrebno oblikovati prema pravilima izrade za tehnologiju aditivne proizvodnje.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
24. rujna 2020.

Rok predaje rada:
26. studenog 2020.

Predviđeni datum obrane:
30. studenog do 4. prosinca 2020.

Zadatak zadao:

doc. dr. sc. Marko Švaco

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Tipovi lokomocije robota penjača.....	2
1.1.1. Lokomocija inspirirana prirodom	2
1.1.2. Lokomocija pomoću kotača ili gusjenica.....	4
1.1.3. Lokomocija pomoću klizeće konstrukcije	4
1.1.4. Lokomocija pomoću kablova ili vodilica	5
1.2. Tipovi adhezijskih mehanizma robota penjača	6
1.2.1. Magnetna adhezija	6
1.2.2. Elektrostatička adhezija	7
1.2.3. Kemijska adhezija	8
1.2.4. Mehanička adhezija.....	8
1.2.5. Adhezija negativnim tlakom i potiskom	9
1.2.5.1. Adhezija vakuumskim kapicama	10
1.2.5.2. Adhezija negativnim tlakom	10
1.2.5.3. Adhezija rotacijskom inercijom zraka	11
1.2.5.4. Adhezija potiskom	12
1.2.5.5. Adhezija potiskom i negativnim tlakom	13
2. MOTIVACIJA I CILJ DIPLOMSKOG RADA	14
3. ADHEZIJA POTISKOM I NEGATIVNIM TLAKOM	15
3.1. Cijevni ventilatori, EDF	15
3.2. Negativni tlak.....	16
4. EKSPERIMENTALNI POSTAV	19
4.1. Cilj eksperimentalnog postava	19
4.2. Konstrukcijski elementi eksperimentalnog postava.....	19
4.3. Uređaji za akviziciju podataka i upravljanje.....	25
4.4. Cijevni ventilatori	28
4.5. Prikupljanje podataka.....	29
4.5.1. Programski kod Arduino UNO	29
4.5.2. Prikaz podataka VESC-a.....	30
4.5.3. Obrada podataka	31
4.6. Shema spajanja.....	32
4.7. Simulacije pomaka eksperimentalnog postava	33
4.8. Prikaz eksperimentalnog postava.....	35
5. PRIKAZ PROVEDENIH ISPITIVANJA, EDF 70mm	36
6. TESTIRANJE RAZLIČITIH GEOMETRIJA DIFUZORA, EDF 70 mm	37
6.1. Uvod u testiranje različitih geometrija difuzora	37
6.2. Testiranje zakrivljenog difuzora	38
6.3. Testiranje horizontalnog difuzora	41
6.4. Testiranje ravnog difuzora	44
6.5. Usporedba rezultata difuzora različite geometrije	47
7. TESTIRANJE UTJECAJA RADIJUSA ZAKRIVLJENOSTI DIFUZORA, EDF 70 mm	48
7.1. Simulacije različitih radijusa zakrivljenosti	48

7.1.1.	Ulazni podatci simulacije.....	48
7.1.2.	Geometrija ispitivanih difuzora	50
7.1.3.	Postavke Ansys Fluent simulacije.....	51
7.1.4.	Rezultati Ansys Fluent simulacija.....	52
7.2.	Testiranje pretpostavke o radijusima zakrivljenosti.....	54
7.2.1.	Udaljenost 7 mm od podloge prijanjanja	54
7.2.2.	Udaljenost 10 mm od podloge prijanjanja	56
7.2.2.1.	Rezultati simulacije u Ansys Fluent-u difuzora različitog radijusa zakrivljenosti pri udaljenosti 10 mm	56
7.2.2.2.	Rezultati testiranja difuzora različitog radijusa zakrivljenosti pri udaljenosti 10 mm	57
7.2.3.	Udaljenost 12 mm od podloge prijanjanja	58
7.2.3.1.	Rezultati simulacije u Ansys Fluent-u difuzora različitog radijusa zakrivljenosti pri udaljenosti 12 mm	58
7.2.3.2.	Rezultati testiranja difuzora različitog radijusa zakrivljenosti pri udaljenosti 12 mm	59
7.3.	Usporedba sila adhezije dobivenih testiranjem s rezultatima simulacije difuzora različitih radijusa zakrivljenosti.....	60
8.	TESTIRANJE DIFUZORA RAZLIČITIH PROMJERA, EDF 70 mm.....	62
8.1.	Testiranje zakrivljenog difuzora promjera d=120mm	62
8.2.	Testiranje zakrivljenog difuzora promjera d=160mm	65
8.3.	Usporedba rezultata zakrivljenih difuzora	68
9.	TESTIRANJE DIFUZORA POD NAGIBOM, EDF 70 mm.....	71
9.1.	Uvod u difuzore pod nagibom	71
9.2.	Testiranje difuzora pod nagibom	73
9.2.1.	Testiranje difuzora kuta nagiba 10° u odnosu na horizontalu.....	74
9.2.2.	Testiranje difuzora kuta nagiba 20° u odnosu na horizontalu.....	77
9.2.3.	Testiranje difuzora kuta nagiba 30° u odnosu na horizontalu.....	80
10.	PRIKAZ PROVEDENIH ISPITIVANJA, EDF 80mm	84
11.	TESTIRANJE DIFUZORA RAZLIČITIH PROMJERA, EDF 80mm.....	85
11.1.	Testiranje zakrivljenog difuzora promjera d=120mm	85
11.2.	Testiranje zakrivljenog difuzora promjera d=140mm	88
11.3.	Testiranje zakrivljenog difuzora promjera d=160mm	91
11.4.	Usporedba rezultata zakrivljenih difuzora EDF-a 80 mm	94
12.	USPOREDBA REZULTATA DIFUZORA EDF-a 70 mm i 80 mm.....	97
13.	TESTIRANJE RAZLIČITIH PODLOGA	99
13.1.	Testirane podloge	99
13.1.1.	Glatka površina – iverica s Melaminskom folijom.....	99
13.1.2.	Površina manjeg granulata	100
13.1.3.	Površina većeg granulata	100
13.2.	Rezultati testiranja.....	101
14.	ZAKLJUČAK.....	103

POPIS SLIKA

Slika 1.	Stickybot, četveronožni bio-inspirirani robot [1]	3
Slika 2.	REST, šestero nožni robot [2]	3
Slika 3.	Robotsko kretanje pomoću kotača (lijevo) [3] i gusjenica (desno) [4]	4
Slika 4.	Sky Cleaner IV, robot s klizećom konstrukcijom [5].....	5
Slika 5.	WSR: Model-I, robot za čišćenje ravnih staklenih površina 105[6]	5
Slika 6.	Robot s elektrostatičkom adhezijom [8].....	7
Slika 7.	Robot koji ostvaruje kretanje pomoću gusjenica i kemijske adhezije [9].....	8
Slika 8.	Roboti koji ostvaruju kretanje mehaničkom adhezijom, više nožni (lijevo) [10] i pomoću kotača (desno) [11]	9
Slika 9.	Robot koji ostvaruje adheziju vakuumskim kapicama na gusjenicama [12]	10
Slika 10.	CROMSCI robot, adhezija negativnim tlakom [13]	11
Slika 11.	Adhezija rotacijskom inercijom [14].....	11
Slika 12.	Podatci ispitivanja rotacijske inercije protoka zraka [14]	12
Slika 13.	VertiGO robot [15]	12
Slika 14.	Manualna inspekcija [16]	14
Slika 15.	Inspekcija pomoću robota [17].....	14
Slika 16.	Dijelovi EDF-a	15
Slika 17.	Presjek difuzora sa zonama tlaka i oznakama dimenzija	16
Slika 18.	Geometrijski parametri EDF-a s difuzorom	17
Slika 19.	Prikaz CAD modela eksperimentalnog postava	19
Slika 20.	Dijelovi eksperimentalnog postava	20
Slika 21.	Stupnjevi slobode eksperimentalno postava.....	20
Slika 22.	Presjek eksperimentalnog postava.....	21
Slika 23.	Prikaz kretanja klizeće konstrukcije.....	21
Slika 24.	Nogare eksperimentalnog postava.....	22
Slika 25.	Nosiva konstrukcija eksperimentalnog postava	22
Slika 26.	Klizeća konstrukcija eksperimentalnog postava	23
Slika 27.	Podešavanje nagiba	23
Slika 28.	Nosač EDF-a 70 mm	24
Slika 29.	Nosač EDF-a 80 mm	24
Slika 30.	Priključni prsten i presjek.....	24
Slika 31.	Uložne matice DIN 562.....	25
Slika 32.	Klizni ležaj LTM.....	25
Slika 33.	Flipsy VESC [21]	25
Slika 34.	VESC Tool [21].....	26
Slika 35.	Arduino uno [22]	26
Slika 36.	Senzor sile [23].....	27
Slika 37.	TCA9548A multiplekser [24]	27
Slika 38.	Dijagram toka programskog koda	29
Slika 39.	Prikaz VESC Tool sučelja prilikom testiranja	31
Slika 40.	Primjerni prikaz podataka u Excel tablici	31
Slika 41.	Shema spajanja	32
Slika 42.	Rubni uvjeti klizeće konstrukcije	33
Slika 43.	Simulacija pomaka klizeće konstrukcije	33
Slika 44.	Rubni uvjeti nosive konstrukcije	34
Slika 45.	Simulacija pomaka nosive konstrukcije	34
Slika 46.	Slike eksperimentalnog postava, EDF 70 mm	35
Slika 47.	Slike eksperimentalnog postava, EDF 80 mm	35

Slika 48.	Prikaz ulazne i izlazne površine EDF-a i difuzora	37
Slika 49.	Dizajn zakrivljenog difuzora radijusa zakrivljenosti $r=36$ mm.....	38
Slika 50.	Grafovi snage i potiska (lijevo) i broja okretaja i potiska (desno) za zakrivljeni difuzor radijusa $r=36$ mm, udaljenosti 7 mm (a), 9 mm (b) i 11 mm (c) od podloge	39
Slika 51.	Usporedba rezultata, s obzirom na visinu, zakrivljenog difuzora radijus zakrivljenosti $r=36$ mm	40
Slika 52.	Dizajn horizontalnog difuzora.....	41
Slika 53.	Grafovi snage i potiska (lijevo) i broja okretaja i adhezije (desno) za horizontalni difuzor, udaljenosti 7 mm (a), 9 mm (b) i 11 mm (c) od podloge.....	42
Slika 54.	Usporedba rezultata, s obzirom na visinu, horizontalnog difuzora	43
Slika 55.	Dizajn ravnog difuzora	44
Slika 56.	Grafovi snage i potiska (lijevo) i broja okretaja i adhezije (desno) za ravni difuzor, udaljenosti 7 mm (1), 9 mm (2) i 11 mm (3) od podloge.....	45
Slika 57.	Usporedba rezultata, s obzirom na visinu, ravnog difuzora	46
Slika 58.	Grafovi usporedbe zakrivljenog, horizontalnog i ravnog difuzora na različitim visinama.....	47
Slika 59.	Područje promatranja simulacija	48
Slika 60.	Prikaz EDF motora s popratnim formulama [25].....	49
Slika 61.	Prikaz promatranog područja s označenim dimenzijama.....	50
Slika 62.	Definiranje površina	51
Slika 63.	Prikaz Mesh-a za područje promatranja radijusa zakrivljenosti $r=45$ mm.....	51
Slika 64.	Rezultati simulacije tlaka za radijus 30 mm (lijevo) i 36 mm (desno).....	52
Slika 65.	Rezultati simulacije tlaka za radijus 40 mm (lijevo) i 45 mm (desno).....	52
Slika 66.	Rezultati simulacije tlaka za radijus 50 mm (lijevo) i 55 mm (desno).....	52
Slika 67.	Rezultati simulacije brzine strujanja zraka za radijus 30 mm (lijevo) i 36 mm (desno).....	52
Slika 68.	Rezultati simulacije brzine strujanja zraka za radijus 40 mm (lijevo) i 45 mm (desno).....	53
Slika 69.	Rezultati simulacije brzine strujanja zraka za radijus 50 mm (lijevo) i 55 mm (desno).....	53
Slika 70.	Prikaz difuzora s radijusom zakrivljenosti $r=50$ mm (lijevo) i $r=36$ mm (desno). ..	54
Slika 71.	Grafovi odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i adhezije (desno) difuzora s radijusom zakrivljenosti $r=36$ mm na udaljenosti 7 mm	54
Slika 72.	Grafovi odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i adhezije (desno) difuzora s radijusom zakrivljenosti $r=50$ mm na udaljenosti 7 mm	55
Slika 73.	Grafička usporedba odnosa snage i potiska (lijevo), broja okretaja i potiska (desno) difuzora radijusa zakrivljenosti $r=36$ mm i $r=50$ mm na udaljenosti 7 mm	55
Slika 74.	Rezultati simulacije tlaka zraka za radijus 36 mm (lijevo) i 50 mm (desno) pri udaljenosti 10 mm	56
Slika 75.	Rezultati simulacije brzine strujanja zraka za radijus 36 mm (lijevo) i 50 mm (desno) pri udaljenosti 10 mm	56
Slika 76.	Grafovi odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i adhezije (desno) difuzora s radijusom zakrivljenosti $r=36$ mm na udaljenosti 10 mm	57
Slika 77.	Grafovi odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i adhezije (desno) difuzora s radijusom zakrivljenosti $r=50$ mm na udaljenosti 10 mm	57
Slika 78.	Rezultati simulacije tlaka zraka za radijus 36 mm (lijevo) i 50 mm (desno) pri udaljenosti 12mm	58
Slika 79.	Rezultati brzine strujanja zraka za radijus 36 mm (lijevo) i 50 mm (desno) pri udaljenosti 12mm	58

Slika 80.	Grafovi odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i adhezije (desno) difuzora s radijusom zakrivljenosti $r=36$ mm na udaljenosti 12 mm	59
Slika 81.	Grafovi odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i adhezije (desno) difuzora s radijusom zakrivljenosti $r=50$ mm na udaljenosti 12 mm	59
Slika 82.	Usporedbe adhezije difuzora s radijusom zakrivljenosti $r=36$ mm i $r=50$ mm pri različitim udaljenostima od podloge prianjanja	60
Slika 83.	Geometrija difuzora $d=120$ mm za EDF 70mm	62
Slika 84.	Grafovi snage i sile adhezije (lijevo) i broja okretaja i sile adhezije (desno) za difuzor $d=120$ mm na udaljenosti 7 mm (a), 10 mm (b) i 12 mm (c) od podloge	63
Slika 85.	Grafička usporedba odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i sile adhezije (desno) difuzora $d=120$ mm na različitim udaljenostima od podloge	64
Slika 86.	Geometrija difuzora $d=160$ mm za EDF 70mm	65
Slika 87.	Grafovi snage i sile adhezije (lijevo) i broja okretaja i adhezije (desno) za difuzor $d=160$ mm na udaljenosti 7 mm (a), 10 mm (b) i 12 mm (c) od podloge	66
Slika 88.	Grafička usporedba odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i sile adhezije(desno) difuzora $d=160$ mm na različitim udaljenostima od podloge	67
Slika 89.	Grafička usporedba odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i sile adhezije(desno) različitih difuzora EDF-a 70 mm	68
Slika 90.	Usporedba difuzora, EDF-a 70 mm, gdje su omjeri A_{iz}/A_{ul} ispisani na vrhu stupaca	69
Slika 91.	Prikaz sila sustava robota penjača	71
Slika 92.	Prikaz sila sustava robota penjača dok je EDF pod nagibom.....	72
Slika 93.	Prikaz sila na eksperimentalnom postavu	73
Slika 94.	Dizajn difuzora kuta nagiba 10°	74
Slika 95.	Grafovi snage i sile adhezije (lijevo) i broja okretaja i adhezije (desno) za difuzor pod nagibom 10° na udaljenosti 7 mm (a), 10 mm (b) i 12 mm (c) od podloge...	75
Slika 96.	Grafička usporedba odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i sile adhezije(desno) difuzora kuta nagiba 10° na različitim udaljenostima od podloge	76
Slika 97.	Dizajn difuzora kuta nagiba 20°	77
Slika 98.	Grafovi snage i sile adhezije (lijevo) i broja okretaja i adhezije (desno) za difuzor pod nagibom 20° na udaljenosti 7 mm (a), 10 mm (b) i 12 mm (c) od podloge...	78
Slika 99.	Grafička usporedba odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i sile adhezije(desno) difuzora kuta nagiba 20° na različitim udaljenostima od podloge	79
Slika 100.	Dizajn difuzora kuta nagiba 30°	80
Slika 101.	Grafovi snage i sile adhezije (lijevo) i broja okretaja i adhezije (desno) za difuzor pod nagibom 30° na udaljenosti 7 mm (a), 10 mm (b) i 12 mm (c) od podloge...	81
Slika 102.	Grafička usporedba odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i sile adhezije(desno) difuzora kuta nagiba 30° na različitim udaljenostima od podloge	82
Slika 103.	Grafička usporedba odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i sile adhezije(desno) difuzora s kutom nagiba.	83
Slika 104.	Usporedba difuzora s kutom nagiba, s maksimalnim vrijednostima ispisanim na vrhovima stupaca.....	83
Slika 105.	Dizajn difuzora $d=120$ mm, EDF 80 mm	85
Slika 106.	Grafovi snage i sile adhezije (lijevo) i broja okretaja i sile adhezije (desno) za difuzor $d=120$ mm, EDF-a 80 mm na udaljenosti 7 mm (a), 10 mm (b) i 12 mm (c) od podloge	86

Slika 107.	Grafička usporedba odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i sile adhezije(desno) difuzora $d=120\text{mm}$, EDF-a 80 mm, na različitim udaljenostima od podloge	87
Slika 108.	Dizajn difuzora $d=140\text{ mm}$, EDF 80 mm.....	88
Slika 109.	Grafovi snage i sile adhezije (lijevo) i broja okretaja i adhezije (desno) za difuzor $d=140\text{mm}$, EDF-a 80 mm na udaljenosti 7 mm (a), 10 mm (b) i 12 mm (c) od podloge	89
Slika 110.	Grafička usporedba odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i sile adhezije(desno) difuzora $d=140\text{mm}$, EDF-a 80 mm, na različitim udaljenostima od podloge	90
Slika 111.	Dizajn difuzora $d=160\text{m}$, EDF 80 mm.....	91
Slika 112.	Grafovi snage i sile adhezije (lijevo) i broja okretaja i adhezije (desno) za difuzor $d=160\text{mm}$, EDF-a 80 mm na udaljenosti 7 mm (a), 10 mm (b) i 12 mm (c) od podloge	92
Slika 113.	Grafička usporedba odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i sile adhezije(desno) difuzora $d=160\text{mm}$, EDF-a 80 mm, na različitim udaljenostima od podloge	93
Slika 114.	Usporedba odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i sile adhezije(desno) različitih difuzora EDF-a 80 mm.....	94
Slika 115.	Usporedba difuzora, EDF-a 80 mm, gdje su omjeri A_{iz}/A_{ul} ispisani na vrhu stupaca	95
Slika 116.	Usporedba odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i sile adhezije(desno) difuzora $d=160\text{mm}$, EDF-a 80 mm i EDF-a 70 mm	97
Slika 117.	Usporedba rezultata bez i s difuzorom	98
Slika 118.	Glatka površina.....	99
Slika 119.	Površina manjeg granulata	100
Slika 120.	Površina većeg granulata.....	100
Slika 121.	Rezultati testiranja glatke površine (lijevo) i površine manjeg granulata (desno)	101
Slika 122.	Rezultati testiranja površine većeg granulata	101
Slika 123.	Usporedba prosječne sile adhezije različitih podloga	101

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prikaz specifikacija cijevnih ventilatora korištenih u eksperimentalnom postavu	28
Tablica 2. Prikaz rezultata zakrivljenog, horizontalnog i ravnog difuzora	47
Tablica 3. Prikaz rezultata simulacija različitih radijusa zakrivljenosti na udaljenosti od 7mm	53
Tablica 4. Prikaz rezultata simulacija i testiranja različitih radijusa zakrivljenosti na udaljenostima 7, 10 i 12 mm	60
Tablica 5. Podatci dobiveni testiranjem difuzora d=120, EDF 70 mm	64
Tablica 6. Podatci dobiveni testiranjem difuzora d=160, EDF 70 mm	67
Tablica 7. Podatci različitih difuzora testiranih na motoru 70 mm	69
Tablica 8. Podatci dobiveni testiranjem difuzora kuta nagiba 10°	74
Tablica 9. Podatci dobiveni testiranjem difuzora kuta nagiba 20°	77
Tablica 10. Podatci dobiveni testiranjem difuzora kuta nagiba 30°	80
Tablica 11. Podatci dobiveni testiranjem difuzora d=120, EDF 80 mm	87
Tablica 12. Podatci dobiveni testiranjem difuzora d=140, EDF 80 mm	90
Tablica 13. Podatci dobiveni testiranjem difuzora d=160, EDF 80 mm	93
Tablica 14. Rezultati testiranja difuzora EDF-a 80 mm	95
Tablica 15. Prikaz rezultata EDF-a 80 mm i EDF-a 70 mm	97
Tablica 16. Rezultati testiranja difuzora EDF-a 80 mm	102

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

BROJ CRTEŽA EP-00-01

POPIS KRATICA

Kratice	Značenje
EDF	eng. Electric Ducted Fan, cijevni ventilator
ABS	akrilonitril butadien stiren
FDM	eng. Fused Deposit Modeling, tehnologija taložnog očvršćivanja
VESC	eng. Vedder Electronic Speed Controler, Vedderov elektronički kontroler brzine
PPM	eng. Pulse Position Modulation, pozicijska impulsna modulacija
PWM	eng. Pulse Width Modulation, širinsko impulsna modulacija
ERPM	eng. Electrical Revolutions per Minute, elektronički broj rotacija po minuti

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
F_p	N	Sila privlačenja
F_m	N	Magnetna sila
A	m^2	Površina
μ_0	H/m	Magnetska permabilnost
H	A/m	Jakost magnetnog polja
B	T	Magnetska indukcija
p_a	Pa	Atmosferski tlak
p	Pa	Tlak
F_t	N	Sila potiska
d_{iz}	m	Izlazni promjer
d_{ul}	m	Ulazni promjer
Q_{ul}	m^3/s	Ulazni protok
Q_{iz}	m^3/s	Izlazni protok
A_{ul}	m^2	Ulazna površina
A_{iz}	m^2	Izlazna površina
v_{ul}, v_o	m/s	Ulazna brzina
v_{iz}, v_e	m/s	Izlazna brzina
h	m	Udaljenost difuzora od podloge
ρ	kg/m^3	Gustoća
q_m	kg/s	Maseni protok
q_v	m^3/s	Volumni protok

SAŽETAK

U diplomskom radu opisani su najčešće korišteni sustavi lokomocije i tipovi adhezijskih mehanizama robota penjača. Detaljnije je obrađena tematika adhezijskog mehanizma potiska u kombinaciji s negativnim tlakom. U diplomskom radu je razvijen eksperimentalni postav, proizveden aditivnom tehnologijom, čiji je cilj ispitivanje komercijalno dostupnih cijevnih ventilatora (eng. electric ducted fan, EDF) kao aktuatora za ostvarivanje adhezije potiskom u kombinaciji s negativnim tlakom. Kroz rad se ispituje utjecaj različitih oblika difuzora na silu adhezije te se ispituje mogućnost ostvarivanja kombinirane vertikalne i horizontalne sile prijanjanja. Prilikom oblikovanja poprečnog presjeka difuzora korišten je program Ansys Fluent pomoću kojeg su izvedeni zaključci o načinima optimizacije difuzora. Na posljetku rada je odabrana kombinacija difuzora i cijevnog ventilatora koji ostvaruje najveće sile adhezije te je provedeno dulje testiranje na glatkoj podlozi, podlozi s manjim i podlozi s većim granulatom kako bi se ispitao utjecaj površine na sile adhezije.

Ključne riječi: cijevni ventilator, EDF, Fluent, negativni tlak, potisak, robot

SUMMARY

The thesis lists the most used locomotion systems and types of adhesion mechanisms of climbing robots. The topic of the adhesive mechanism of thrust in combination with negative pressure is explained in more detail. The thesis describes an experimental setup, produced by additive technology, which aims to test commercially available electric ducted fans (EDF) as actuators for achieving adhesion by thrust in combination with negative pressure. The paper examines the influence of different forms of shrouds on the adhesion force and examines possibility of achieving a combined vertical and horizontal adhesion force. When designing the shape of the shrouds, the program Ansys Fluent was used, to draw conclusions of shroud shape optimization. At the last part of thesis, a combination of shroud and EDF that achieves the highest adhesion forces was selected. With that combination, longer testing was performed on a smooth surface, surface with smaller and larger granules to examine the surface influence on the adhesion forces.

Key words: electric ducted fan, EDF, Fluent, negative pressure, thrust, robot

1. UVOD

Robotski sustavi koji služe za inspekcije vertikalnih površina dobivaju sve veći značaj u današnje vrijeme. Postoji veliki broj različitih vrsta robota koji se kreću po vertikalnim površinama, a njihove karakteristike su određene zahtjevima područja inspekcije. Polja primjene ovakvih robota sežu od zavarivanja i ispitivanja brodskih konstrukcija, inspekcija čeličnih mostova, betonskih nosivih konstrukcija, čišćenja staklenih površina i mnogih drugih. Glavna motivacija za primjenu ovakvih sustava je izvršavanje zadataka gdje direktan manualni rad nije moguć ili je teško izvediv.

Prvi roboti penjači su bili izvedeni pomoću elektromagneta i usisnih čašica te su njihova područja primjene bila ograničena na metalne i vrlo glatke površine. Napretkom tehnologije i istraživanjima je došlo do razvoja novih robotskih sustava i proširenja područja primjene.

Kako bi roboti penjači izvršili željene zadatke, kao i ostali tehnički sustavi, moraju ispunjavati određene zahtjeve koji ovise o pojedinačnoj primjeni robota. Najvažnije karakteristike robota penjača su brzina i mobilnost, nosivost, pouzdanost i iskoristivost.

Brzina kretanja robota i njegova mogućnost da dosegne teško pristupačna mjesta su jedni od najvažnijih zahtjeva ovakvih robota. Ovisno o dimenzijama površina po kojima se ovi roboti kreću potrebno je ostvariti dovoljno veliku brzinu kretanja kako bi cijeli sustav bio isplativ, a ujedno sustav mora biti dovoljno mobilan kako bi dosego teško pristupačna mjesta. Ako se radi o robotima za ispitivanje, oni moraju zadovoljiti određeni stupanj preciznosti kretanja kako bi se inspekcija mogla izvršavati uspješno.

Ovisno o primjeni roboti penjači moraju imati određenu nosivost. Roboti za inspekciju betonskih površina moraju nositi senzore za inspekciju betonskih površina poput Wenner probe, kamere za vizualnu inspekciju, udarni echo bat, što zahtjeva veću nosivost od robota koji mora nositi samo jednostavnu kameru koja teži nekoliko stotina grama. Prema tome dimenzije robota, kao i procesi adhezije na površinu moraju biti u skladu s primjenom.

Važan nefunkcionalni aspekt je robusnost sustava. Ako robot ne uspijeva održati prisanjanje na površinu tijekom izvršavanja zadatka on ne bi bio upotrebljiv u praksi. Zahtjevi na pouzdanost i sigurnost uključuju robusnu opremu koja mora detektirati opasne situacije i prikladno se nositi s njima kako ne bi došlo do pada robota i samim time izazvalo nepredvidive posljedice.

Brzina, mobilnost i nosivost su vrlo važni za ovakav sustav, no oni su samo baza opće operabilnosti sustava. Kako bi sustav bio upotrebljiv u realnim slučajevima mora biti snažniji, efikasniji i bezopasniji od konvencionalnih metoda pristupa izvršavanju određenih zadataka.

U nastavku su navedeni najpoznatijih sustavi lokomocije i načini ostvarivanja adhezije na površinu kretanja.

1.1. Tipovi lokomocije robota penjača

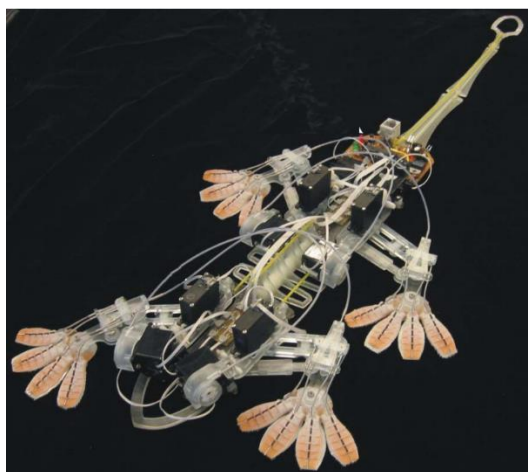
Veliki broj radova opisuju različite načine kretanja s različitim načinima adhezije. Tijekom dizajniranja robotskog sustava potrebno je odrediti koji je način kretanja optimalan za određeni zadatak. Generalno se tipovi lokomocije mogu podijeliti u četiri klase s pojedinim prednostima i nedostacima:

1. Lokomocija inspirirana prirodom (ruke i noge)
2. Lokomocija pomoću kotači ili gusjenica
3. Lokomocija principom klizeće konstrukcije
4. Lokomocija pomoću kablova ili vodilica

1.1.1. Lokomocija inspirirana prirodom

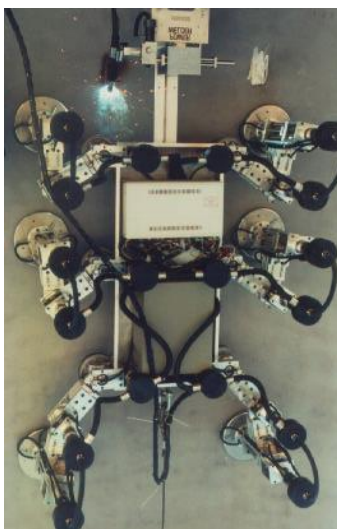
Veliki broj roboti koji se kreću po vertikalnim površinama su dizajnirani prema uzoru na kretanje organizama u prirodi. Najčešća inspiracija za ovakve robote se pronalazi u insektima ili macaklinima. Ovakvi roboti, ovisno o zadatku su izvedeni s različitim brojem udova i stupnjeva slobode. Najčešće izvedbe su dvonožni, četveronožni te šestero nožni, dok je moguće pronaći i sustave s osam nogu ali su nešto rjeđi od ostalih.

Jedan od primjera ovakvih sustava je bio-inspirirani četveronožni robot Stickybot [Slika 1.] koji se kreće po glatkim vertikalnim površinama. Dizajniran je po uzoru na macaklina i druge guštere penjače te koristi slične kretnje i kontrole sile kako bi se kretao po glatkim površinama kao što su staklo, pločice i plastični paneli.



Slika 1. Stickybot, četveronožni bio-inspirirani robot [1]

Primjer šestero nožnih robota penjača je robot REST [Slika 2.] koji je dizajniran za izvršavanje zadataka zavarivanja i inspekcije feromagnetnih površina u industrijskom okruženju. Veći broj nogu mu omogućuje veću nosivost od sustava s manjim brojem nogu.



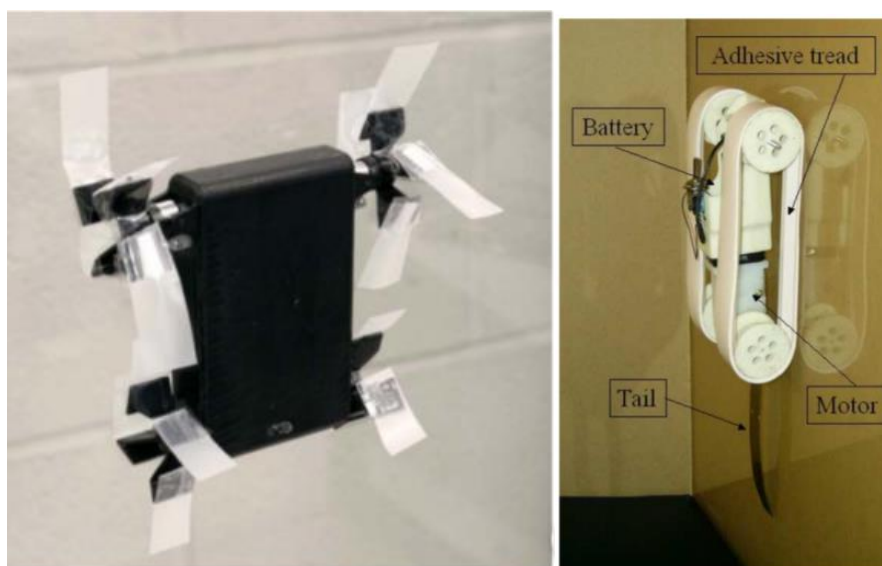
Slika 2. REST, šestero nožni robot [2]

Nedostatak ovakvih načina kretanja je veliki broj stupnjeva slobode što dovodi do kompliciranog upravljanja sustavom u smislu glatke i harmonične kontrole kretanja i ujedno rezultira većom težinom robota. Općenito je brzina kretanja ovih sustava relativno niska u usporedbi s drugim načinima kretanja.

1.1.2. Lokomocija pomoću kotača ili gusjenica

Ako je predviđeno da se robot giba po relativno glatkim i ravnim površinama koriste se kotači i gusjenice. Adhezijski mehanizam kod ovakvog načina kretanja može biti podijeljen na više dijelova oko kotača ili gusjenica ili može biti izveden neovisno o kotačima i gusjenicama. Prianjanje na gumama i gusjenicama je najčešće izvedeno u obliku elektro-adhezije, usisnih čašica i magnetnim putem.

Jedan primjer robota koji se kreće pomoću nekonvencionalnih kotača je Mini-Whegs [Slika 3.]. Ovaj robot koristi mikro strukturirani polimer kao bi ostvario adheziju na površinu kretanja.



Slika 3. Robotsko kretanje pomoću kotača (lijevo) [3] i gusjenica (desno) [4]

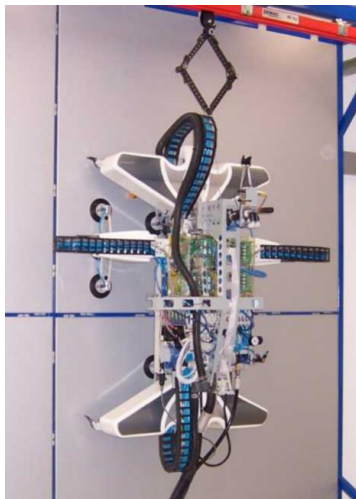
Primjer robota koji ostvaruje kretanje pomoću gusjenica je prikazan na [Slika 3.] desno. Velika prednost ovakvih načina lokomocije je brzo i neprekidno pomicanje sustava te jednostavna mehanička struktura i upravljački elementi.

1.1.3. Lokomocija pomoću klizeće konstrukcije

Kod ovakvog načina kretanja najčešće se koristi pneumatski ili magnetski načini adhezije. Ovakvi sustavi se kreću pomoću dvodijelne konstrukcije koja se može pomicati linearno i/ili rotacijski u odnosu jedna na drugu. Oba okvira konstrukcije su opremljena adhezivnim elementima poput usisavajuće šalice ili magneta. Princip kretanja je sljedeći, jedan okvir ostvaruje kontakt s površinom dok se drugi podiže i pomiče u željenom smjeru. To omogućava

jednostavno kretanjem robota u kombinaciji sa sigurnim prijanjanjem. Prednost sustava je u tome što sustav može testirati prijanjanje jedne osi prije nego što oslobodi drugu os.

Jedan primjer ovakvog načina lokomocije je Sky Cleaner IV [Slika 4.], robot s klizećom konstrukcijom koji ostvaruje adheziju na glatke površine pomoću pneumatike i usisnih čašica.



Slika 4. Sky Cleaner IV, robot s klizećom konstrukcijom [5]

1.1.4. Lokomocija pomoću kablova ili vodilica

Za fiksne primjene robota poput čišćenja ili održavanja fasada zgrada koriste se kablovi i tračnice. Glavna prednost ovakve metode je što je sustav zaštićen te ne može doći do pada robota. Kod ovakvih robota sustav adhezije služi za pozicioniranje robota dok se težina robota prenosi na noseće kablove [Slika 5.]. To uvelike pojednostavljuje izvedbu robota ali zahtjeva vanjsko navođenje i dodatnu opremu ograničavajući mobilnost robota.



Slika 5. WSR: Model-I, robot za čišćenje ravnih staklenih površina 104[6]

1.2. Tipovi adhezijskih mehanizma robota penjača

Isto kao i kod načina kretanja načini adhezije se biraju prema zahtjevima određenog zadatka koji robot treba izvršavati. U nastavku će biti prikazani i ukratko objašnjeni različiti načini osiguravanja kretanja robota po vertikalnim površinama.

U nastavku su prikazani sljedeći načini ostvarivanja adhezije:

1. Magnetna adhezija
2. Elektrostatička adhezija
3. Kemijska adhezija
4. Mehanička adhezija
5. Adhezija potiskom i negativnim tlakom

1.2.1. Magnetna adhezija

Kod magnetske adhezije koriste se elektromagneti i permanentni magneti koji su pozicionirani tako da ostvaruju kontakt s površinom ili su na određenoj udaljenosti od površine. Primjene ovakvog načina adhezije su kod inspekcija, održavanja i građevinskih radova feromagnetnih površina kao što su brodski trupovi, čelični spremnici, dalekovodi i slično.

Magnetna adhezija uvelike ovisi o unutarnjoj strukturi površine kretanja i njenoj feromagnetnoj karakteristici i udaljenosti magneta (permanentnog ili elektromagneta) od površine.

Prema Maxwell-ovoj jednadžbi [7] moguće je izračunati silu privlačenja koju ostvaruje magnet prema sljedećem izrazu

$$F_p = \frac{B^2 A}{2\mu_0} \quad (1)$$

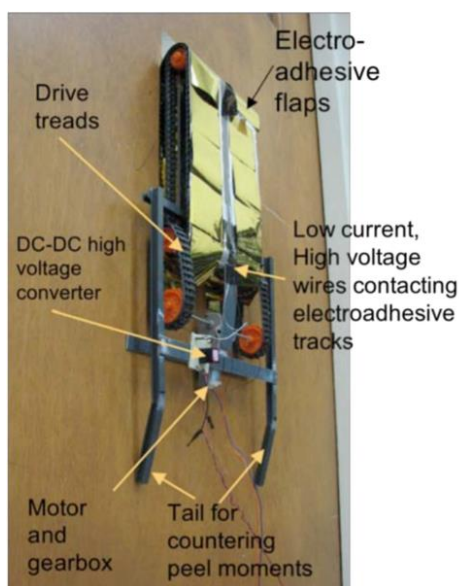
Prema gore navedenom izrazu dobivamo silu privlačenja na kraju magneta. Pretpostavljajući konstantno magnetsko polje prema sljedećem izrazu je moguće dobiti silu koju magnetsku silu F_m koja djeluje na površinu kretanja, gdje je H magnetsko polje (u A/m), M i V magnetizacija (A/m) i gdje snaga magnetne sile varira o udaljenosti.

$$F_m = \frac{1}{2} \mu_0 M V \frac{\delta H}{\delta x} \quad (2)$$

Primjer magnete adhezije je robot REST prikazan na [Slika 2.].

1.2.2. Elektrostatika adhezija

Ovaj princip adhezije je nešto noviji od ostalih te uključuje šira područja znanosti biologije i kemije u robote penjače. Kod ovog principa se elektroadhezijski jastučići koji se sastoje od elektroda i izolacijskog dijela koriste kako bi generirali elektrostatske sile između površine i robota. Trenutno postoji mali broj robota koji koriste ovakve metode adhezije, no ova tehnologija daje obećavajuće rezultate s obzirom na to da je energetske visoko učinkovita [8], ali je nosivost ovakvih sustava [Slika 6.] i dalje mala s obzirom na ostale metode.



Slika 6. Robot s elektrostatičkom adhezijom [8]

Drugi princip elektroadhezije je pasivni macaklin pristup koji se temelji na adheziji Van Der Waalsovih silama koristeći mikroskopsku 'dlakavu' strukturu koja se prijanja na površinu na atomskoj razini. Primjer ovakvog robota je prikazan na Slika 1. Problem ovakvih sustava su zahtjevi za čistoćom površine prijanjanja i mala nosivost.

Generalno većina ovih sustava je specijalizirana za određene uvjete rad i imaju malu nosivost koja onemogućuje da budu optimalno rješenje za upotrebe u industriji.

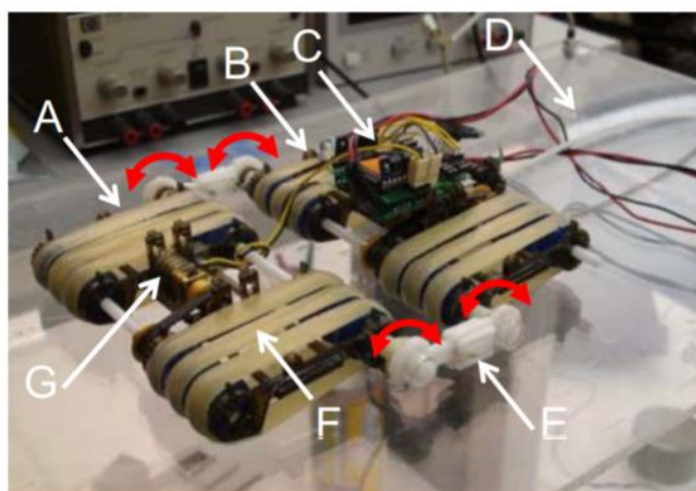
1.2.3. *Kemijska adhezija*

Manje uobičajen način adhezije su kemijske adhezije. Roboti koji koriste ovakav način adhezije su izvedeni pomoću ljepljivih traka u kombinaciji s kotačima (prikazano na [Slika 3.] lijevo), gusjenicama i vise nožnim sustavima opremljenim ljepljivim nogama.

Prednost ovakvih sustava je što imaju nisku potrošnju energije u trenutku mirovanja, dok je tijekom pokretanja potrebna određena količina energije kako bi se adhezijski mehanizam odvojio od površine.

Istraživanje ovakvih načina adhezije dolazi iz znanosti o materijalima i većina robota s ovakvim načinom ostvarivanja adhezije su konceptualne metode koje nemaju praktičnu primjenu u industriji.

Na [Slika 7.] je prikazan robot koji koristi kemijsku adheziju, a sastoji se od dva modula (A i B) upravljačke ploče (C), aktivnog repa (D) i gusjenica napravljenih od ljepljivog polimera (F) pomoću kojih ostvaruje adheziju na površinu kretanja. Nosivost ovakvog robota je 5 N.



Slika 7. Robot koji ostvaruje kretanje pomoću gusjenica i kemijske adhezije [9]

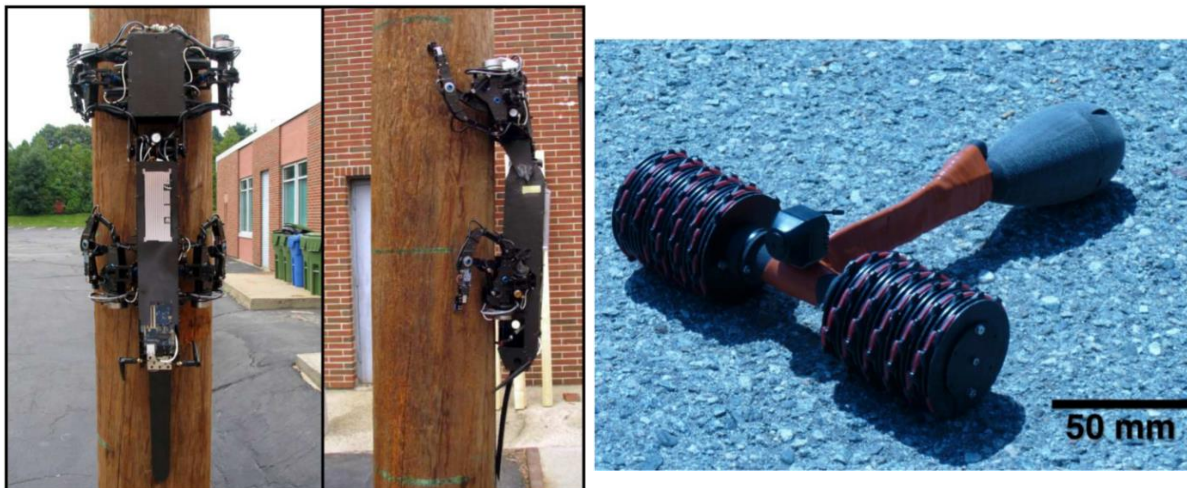
1.2.4. *Mehanička adhezija*

Jedan od najpopularnijih metoda prijanjanja na površinu je putem mehaničke adhezije koja se temelji na principu kandži, hvataljki i stezaljki. Ti sustavi koji se koriste na površinama koje su dovoljno hrapave da se ostvari dovoljno kontaktnih točaka koje mogu preuzeti opterećenje.

Glavna prednost ovakvih sustava leži u potrošnji niskoj energije adhezijskog mehanizma, upotrebljivosti na grubim površinama i njenoj sigurnosti. Roboti koji koriste ovaj način prijanjanja na površinu nemaju potrošnju energije adhezijskog mehanizma i u slučaju gubitka

napajanja nema opasnosti od pada robota (ovisno o izvedbi). Uspoređujući s drugim sustavima ovaj način adhezije onemogućava brzo kretanje i ima nižu nosivost u usporedbi s magnetnom adhezijom.

Najčešća izvedba ovakvih robota je temeljena na mehanizmu kretanja pomoću više nožnog sustava [10], dok postoje i verzije s kotačima [11] prikazane na [Slika 8.].



Slika 8. Roboti koji ostvaruju kretanje mehaničkom adhezijom, vise nožni (lijevo) [10] i pomoću kotača (desno) [11]

1.2.5. Adhezija negativnim tlakom i potiskom

Najviše istraživane i korištene metode adhezije su adhezije koje se temelje na negativnom tlaku i potisku te ih je moguće podijeliti u sljedeće kategorije

1. Vakuum kapice
2. Negativan tlak
3. Rotacijska inercija
4. Potisak
5. Potisak i negativan tlak

Ovi načini ostvarivanja adhezije se koriste u područjima di nema feromagnetnih površina ili neravne geometrije za mehaničku adheziju.

Silu privlačenja je moguće izračunati prema formuli prikazanoj u nastavku, u kojoj p_a je atmosferski tlak dok je p tlak koji se nalazi unutar vakuumske kapice ili komore.

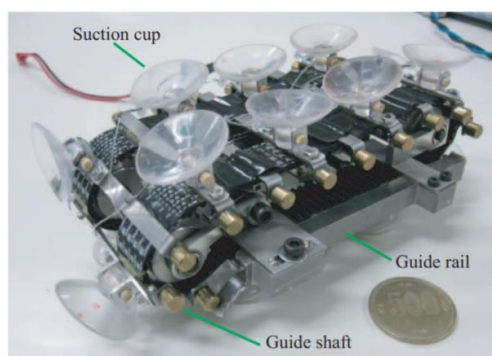
$$F_p = (p_a - p) \cdot A \quad (3)$$

Uobičajeno konstruktori robotskih sustava povećavaju površinu A kako bi ostvarili veću silu prijanjanja sa što manjom razlikom tlakova. To je moguće zbog linearnog odnosa sile F_p , površine A i razlike tlakova.

1.2.5.1. Adhezija vakuumskim kapicama

Ovaj tip adhezije je prikladan samo na vrlo glatkim površinama kao staklo ali pomoću različitih izvedbi načina kretanja može ostvariti bolja pokretljivost robota.

Jedan način izvedbe je prikazan na Sliku 9, gdje su vakuumske kapice postavljene na gusjenice.



Slika 9. Robot koji ostvaruje adheziju vakuumskim kapicama na gusjenicama [12]

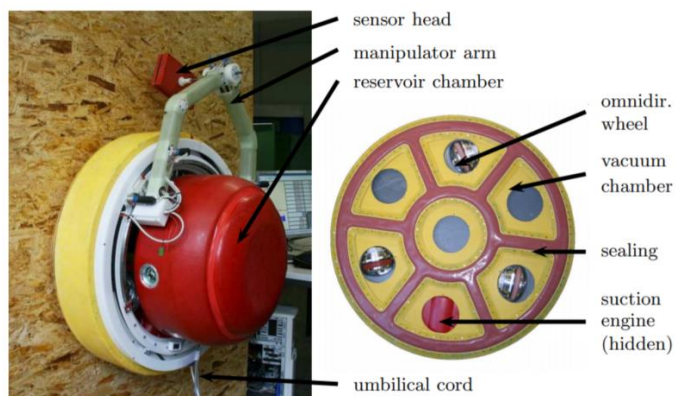
Ovakav način adhezije ima veliku manu, a to je da je osjetljiv na prljavštinu. Ujedno ovakvi roboti se moraju cijelo vrijeme kretati kako ne bi izgubili adheziju zbog gubitaka negativnog tlaka u kapicama. Iz tog razloga ovakav način adhezije nije prikladan za industrijske upotrebe robota.

1.2.5.2. Adhezija negativnim tlakom

Najupotrebljavanija metoda adhezije je adhezija negativnim tlakom. Kombinacijom usisnih komora s električno ostvarenim vakuumom robot ostvaruje adheziju na površinu kretanja. Moguće izvedbe ovakvih robota su s velikim protokom zraka ili velikim negativnim tlakom. Prednost ovakvih sustava je ta da mogu ostvariti adheziju na grubljim površinama od pasivnih vakuumskih kapica te ostvaruju velike sile prijanjanja.

Kako bi ostvarili dovoljan negativni tlak ovi roboti moraju koristiti sustave brtvljenja između vakumske komore i površine prijanjanja. Najčešće se brtvljenje ostvaruje pomoću gumene brtve ili brtve u obliku četki. To je ujedno i mana ovakvih sustava, površina kretanja mora biti dovoljno glatka da bi robot mogao prelaziti preko nje i ujedno ostvarivati dovoljan negativni tlak.

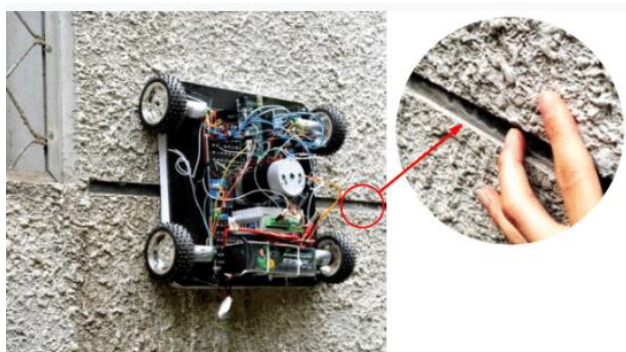
Jedan od najpoznatijih robota koji koristi adheziju negativnim tlakom je CROMSCI [13]. CROMSCI robot koristi višesmjernе kotače koji u kombinaciji sa sedam odvojenih vakumski komora ostvaruje adheziju. Brtvljenje se ostvaruje pomoću samoekspandirajuće brtve koja je prikladna za različite tipove površina.



Slika 10. CROMSCI robot, adhezija negativnim tlakom [13]

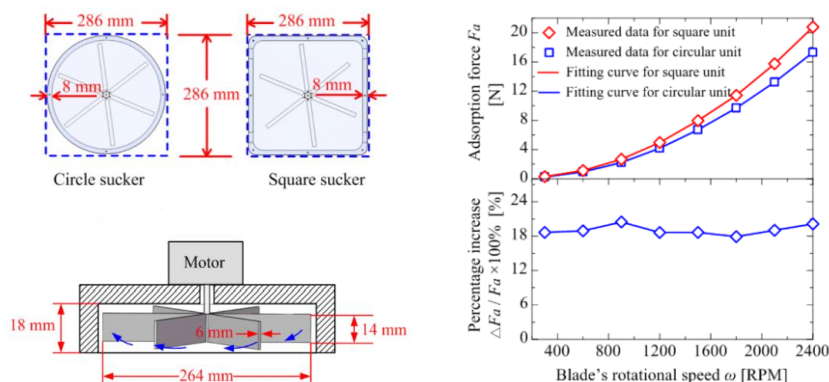
1.2.5.3. Adhezija rotacijskom inercijom zraka

Ovaj način ostvarivanja adhezije na podlogu se temelji na korištenju rotacijske inercije protoka zraka čime se stvara adhezijska sila koja održava robot u kontaktu s površinom kretanja. Glavna prednost ovakve metode je što nije potrebno ostvariti savršeno brtvljenje s podlogom kako bi se ostvarila adhezija.



Slika 11. Adhezija rotacijskom inercijom [14]

Na [Slika 11.] je prikazan robot koji ostvaruje prijanjanje na vrlo grub zid primjenom rotacijske inercije protoka zraka. Prema istraživanju [14] ovim načinom adhezije je moguće ostvariti silu prijanjanja od 20 N pri 2400 okretaja u minuti [Slika 12.].



Slika 12. Podatci ispitivanja rotacijske inercije protoka zraka [14]

1.2.5.4. Adhezija potiskom

Adhezija potiskom se ostvaruje tako da motori vrte propelere koji stvaraju potisak kojim ostvaruju prijanjanje na površinu kretanja, dok je kretanje omogućeno ili usmjeravanjem potiska ili dodatnim pogonom bili to kotači ili gusjenice.

Na [Slika 13.] je prikazan robot koji koristi dva propelera koje može rotirati oko dvije osi čime usmjerava potisak u željenome smjeru. Ujedno potisak propelera služi za pogonjene robota



Slika 13. VertiGO robot [15]

Ovakvim robotima nosivost ovisi o veličini i tipu propelera. Prednost ovakvog načina adhezije je što nema brtvljenja te robot ima mogućnost prelaska s vertikalne na horizontalnu površinu i obrnuto, a mana je mala nosivost.

1.2.5.5. Adhezija potiskom i negativnim tlakom

Problem adhezije negativnim tlakom je ostvarivanje kvalitetnog brtvljenja, ali tim načinom se ostvaruju najveće sile prijanjanja. Kod adhezije potiskom nema brtvljena, ali su sile prijanjanja manje.

Spojem tih dviju metoda želi se postići maksimalna sila prijanjanja bez potrebe za ostvarivanjem kontakta i brtvljenja između površine prijanjanja i sustava.

Adhezija kombinacijom potiska i negativnog tlaka se ispituje u ovom diplomskom radu te je detaljnije objašnjena u nastavku.

2. MOTIVACIJA I CILJ DIPLOMSKOG RADA

Inspekcija cestovne infrastrukture i nosivih konstrukcija u građevinarstvu se još uvijek uvelike izvršava manualno [Slika 14.] pomoću dizalica koje omogućavaju direktan ljudski pristup. Ovakav način ispitivanja je zahtjevan i opasan. Kako bi se umanjila opasnost i olakšala inspekcija razvijaju se robotski sustavi s raznim tipovima adhezijskih mehanizama.



Slika 14. Manualna inspekcija [16]

Suvremeni robotski sustavi za inspekciju cestovne infrastrukture i nosivih konstrukcija u građevinarstvu koriste raznovrsne metode prijanjanja na ravne vertikalne površine [Slika 15.]. Cilj diplomskog rada je ispitati potencijal korištenja komercijalno dostupnih cijevnih ventilatora kao aktuatora robotskog sustava za inspekciju cestovne infrastrukture. Pomoću cijevnih ventilatora ispituje se ostvarivanje adhezije potiskom u kombinaciji s negativnim tlakom.



Slika 15. Inspekcija pomoću robota [17]

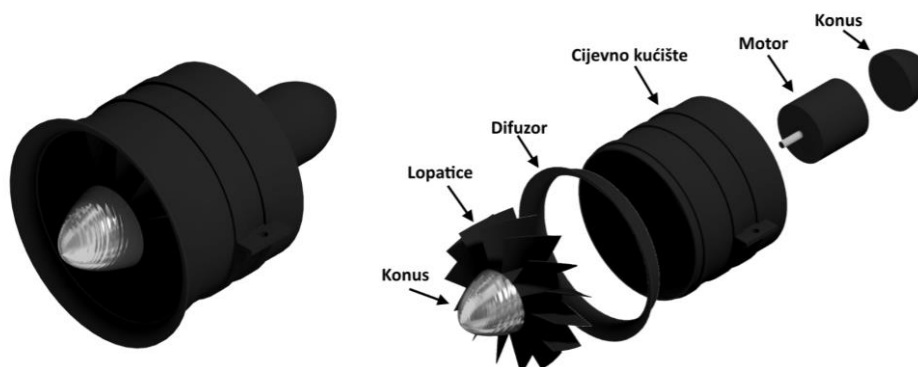
3. ADHEZIJA POTISKOM I NEGATIVNIM TLAKOM

Ovaj diplomski rad prikazuje testiranja koja su provedena kako bi se ispitala mogućnost ostvarivanja adhezije potiskom u kombinaciji s negativnim tlakom. Ispitivanja su provedena po uzoru na istraživački rad "Vortex Actuation via Electric Ducted Fans: an Experimental Study." [18], te je u nastavku objašnjen princip rada adhezije negativnim tlakom i potiskom.

3.1. Cijevni ventilatori, EDF

U ovom poglavlju je opisan cijevni ventilator (engl. Electric ducted fan, EDF) i princip rada sustava koji koristi adheziju potiskom u kombinaciji s negativnim tlakom.

Cijevni ventilatori su najčešće korišteni kao pogonsko sredstvo malih i velikih modela aviona, ali i kao pogonsko sredstvo cepelina, lebdjelica i Jetpack-a. Glavna prednost ovakvih sustava je to što cilindrično kućište EDF-a povećava učinkovitost potiska [18]. Klasični EDF motor, prikazan na [Slika 16.], se sastoji od motora, lopatica zaštićenih cilindričnim kućištem, konusa i difuzora.



Slika 16. Dijelovi EDF-a

Rotacija lopatica oko osi motora dovodi do protoka zraka kroz EDF i samim time dovodi do stvaranja područja nižeg tlaka ispred lopatica i područja višeg tlaka iza lopatica (prema motoru) što dovodi do stvaranja sile koju zovemo potisak. Pošto se lopatice vrte oko osi motora, brzina na vrhu lopatica je veća nego na korijenu lopatica. Tijekom jedne rotacije vrh lopatica mora proputovati veću udaljenost nego korijen lopatice. Kako bi polje tlaka bilo jednoliko po cijeloj površini lopatica potrebno je mijenjati nagib lopatica. Kut nagiba lopatica se mijenja od korijena, gdje je nagib najveći, prema vrhu, gdje je nagib najmanji. Kad bi nagib lopatice bio jednolik po cijeloj površini tlak i potisak bi imali velike varijacije od korijena do vrha. Konusi služe kako bi smanjili turbulencije protoka zraka kroz cilindrično kućište. [19]

3.2. Negativni tlak

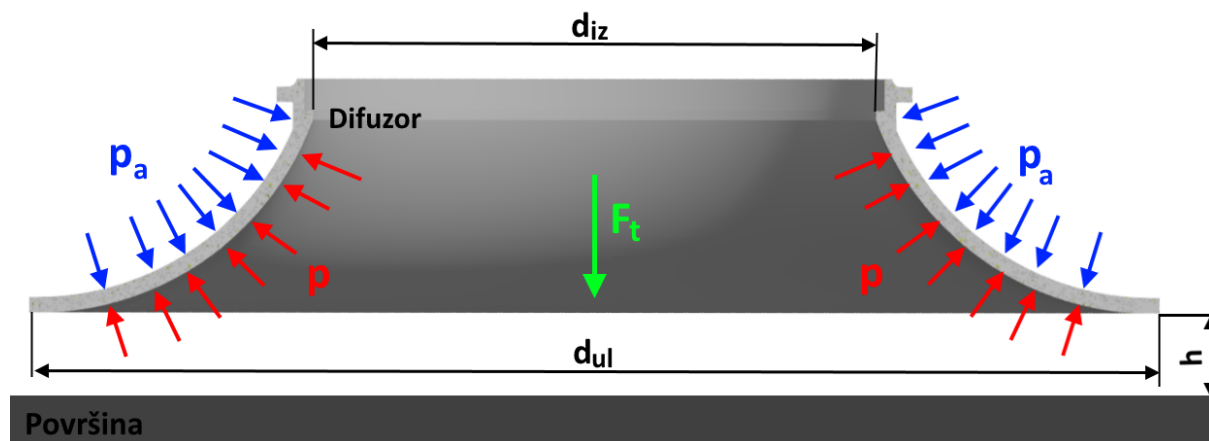
Princip adhezije negativnim tlakom radi tako da se generira polje nižeg tlaka p , unutar šupljine, u odnosu na okolišni tlak p_a . Razlika u tlakovima rezultira silom F_t na površini A prema formuli:

$$F_t = A(p_a - p) \quad (4)$$

Promatrajući slučaj EDF-a polje nižeg tlaka je u difuzoru [Slika 17.] i prema tome je površina A prikazana sljedećom formulom:

$$A = \pi \left(\left(\frac{d_{ul}}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_{iz}}{2} \right)^2 \right) \quad (5)$$

Prema kojoj je d_{iz} promjer izlaza difuzora, a d_{ul} promjer ulaza difuzora. Zakrivljenost površine difuzora je zanemarena.



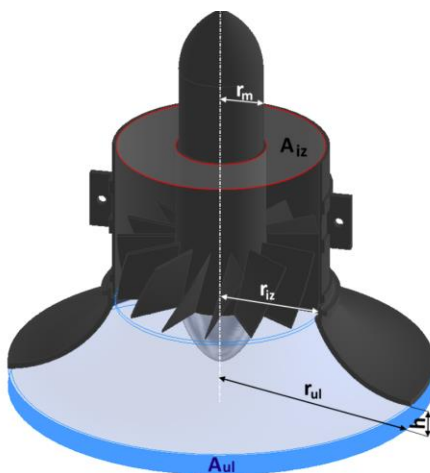
Slika 17. Presjek difuzora sa zonama tlaka i oznakama dimenzija

Silu F_t je moguće povećati smanjenjem tlaka p ili povećanjem površine A . Nadalje, protok zraka kroz zonu niskog tlaka p dolazi kroz prostor visine h koji označava udaljenost između difuzora i testne površine. Ulazni protok Q_{ul} i izlazni protok Q_{iz} su definirani sljedećim formulama:

$$Q_{ul} = A_{ul}v_{ul}, Q_{iz} = A_{iz}v_{iz} \quad (6)$$

Gdje su A_{ul} ulazna i A_{iz} izlazna površina, prikazano na Slika 18., a v_{ul} i v_{iz} ulazna i izlazna brzina zraka. Površine su definirane sljedećim formulama:

$$A_{ul} = 2\pi hr_{ul}, A_{iz} = \pi(r_{iz}^2 - r_m^2) \quad (7)$$



Slika 18. Geometrijski parametri EDF-a s difuzorom

Kako bi se generirao negativni tlak, protok zraka na izlazu difuzora mora biti veći od protoka na ulazu difuzora. Kako se smanjuje tlak p zrak se uvlači kroz prolaz između difuzora i površine prijanjanja i nakon određenog vremena t protok zraka dostigne ravnotežu s konstantom zonom nižeg tlaka. Ravnoteža se definira sljedećom formulom:

$$A_{ul}v_{ul} = A_{iz}v_{iz} \quad (8)$$

Povećanjem EDF-ove brzine rotacije zrak iz A_{iz} izlazi brže nego što zrak ulazi na A_{ul} , to rezultira dodatnim padom tlaka u ulaznoj zoni. Taj pad tlaka će povećati brzinu ulaska zraka kroz površinu A_{ul} sve dok nije dosegnuto stanje ravnoteže. Time će tlak ostati konstantan kao i protok zraka.

Kao dodatak sili koja nastaje negativnim tlakom, EDF generira potisak. Pri malim udaljenostima h , gustoća zraka nije dovoljna da bi EDF generirao veliki potisak, ali povećanjem udaljenosti h protok zraka se povećava kao i generirani potisak.

Strukturalni dizajn difuzora, prema Bernoullijevoj teoriji [20], ima utjecaj na brzinu strujanja fluida. Prema Bernoulliju u trenutku kada brzina protjecanja fluida uzduž strujanja poraste, njegov tlak pada. Prema tome povećanjem brzine vrtnje EDF-a povećava se i brzina strujanja zraka koji protječe kroz difuzor što uzrokuje dodatnim padom tlaka.

4. EKSPERIMENTALNI POSTAV

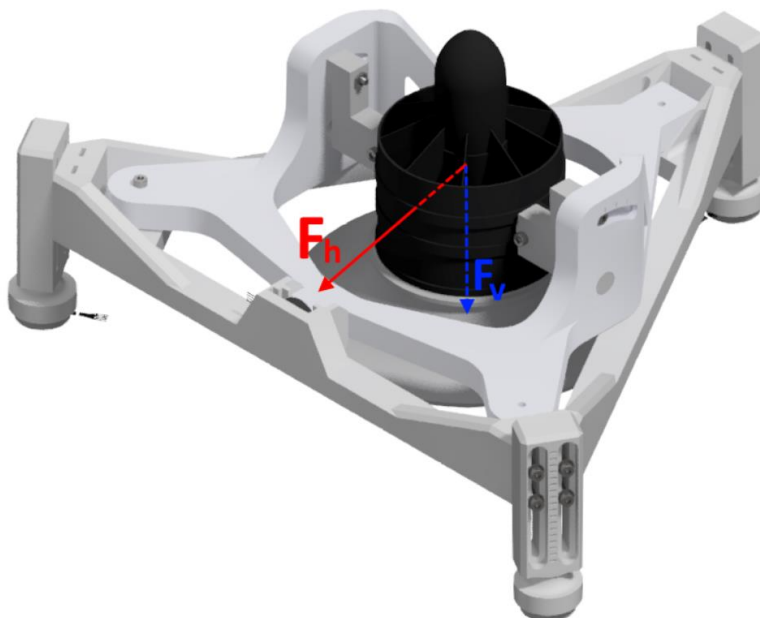
4.1. Cilj eksperimentalnog postava

Kao što je već prije spomenuto ovaj eksperimentalni postav je razvijen po uzoru na [18] i pomoću njega se ispituje potencijal korištenja komercijalno dostupnih cijevnih ventilatora kao aktuatora za ostvarivanje adhezije potiskom u kombinaciji s negativnim tlakom. Eksperimentalno se žele utvrditi s kojim tipom geometrije difuzora se ostvaruju optimalne performanse u vidu adhezije, udaljenosti od podloge i potrošnje energije. Eksperimentalnim postavom se želi postaviti temelj za daljnja ispitivanja u cilju korištenja cijevnih ventilatora kao aktuatora za robote koji se kreću po vertikalnim površinama.

Sve komponente eksperimentalnog postava razvijene su u diplomskom radu, a postav je izrađen primjenom aditivne tehnologije u materijalu ABS, pomoću FDM 3D printera Stratasys F170.

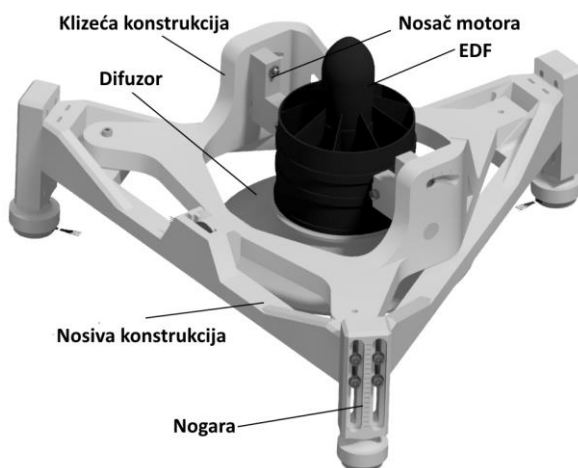
4.2. Konstrukcijski elementi eksperimentalnog postava

Eksperimentalni postav je razvijen kako bi ispitivao vertikalne sile F_v na podlogu različitih EDF-ova s različitim tipovima difuzora (prikazan na [Slika 19.]). Ujedno eksperimentalni postav omogućava ispitivanje horizontalnih sila F_h proizvedenih prilikom postavljanja EDF-a pod određenim nagibom u odnosu na vertikalnu.



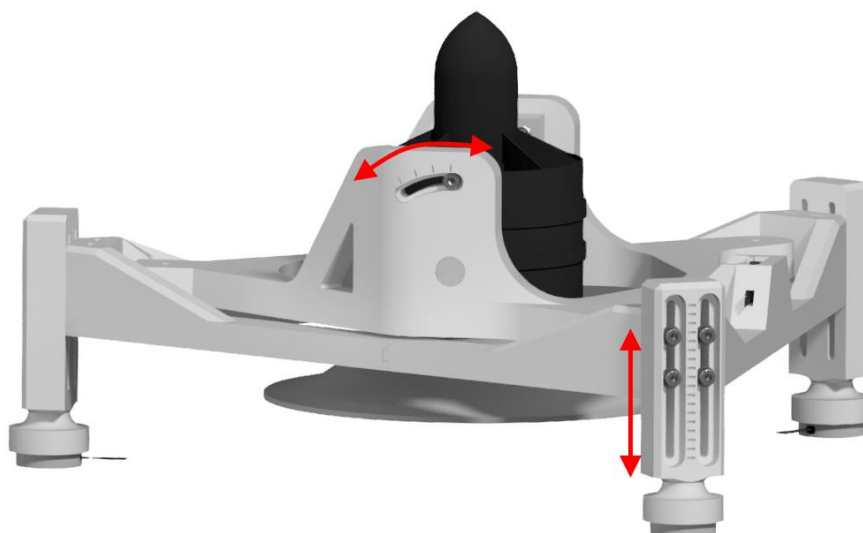
Slika 19. Prikaz CAD modela eksperimentalnog postava

Eksperimentalni postav se sastoji od nosive konstrukcije trokutastog oblika, nosača motora, klizeće konstrukcije, triju nogara koje su vijčano vezane na nosivu konstrukciju i EDF-a s difuzorom [Slika 20].



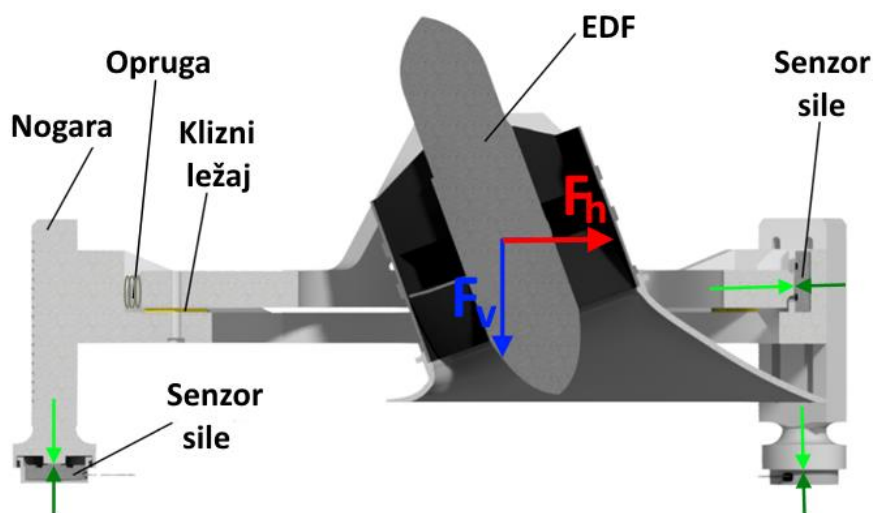
Slika 20. Dijelovi eksperimentalnog postava

Eksperimentalni postav omogućuje jednostavnu zamjenu EDF-a i difuzora, te jednostavno podešavanje udaljenosti difuzora od podloge ispitivanja. Pomoću klizne konstrukcije je moguće jednostavno podešavanje nagiba EDF-a kako bi se ispitala mogućnost ostvarivanja kombiniranih vertikalnih i horizontalnih sila [Slika 21.].



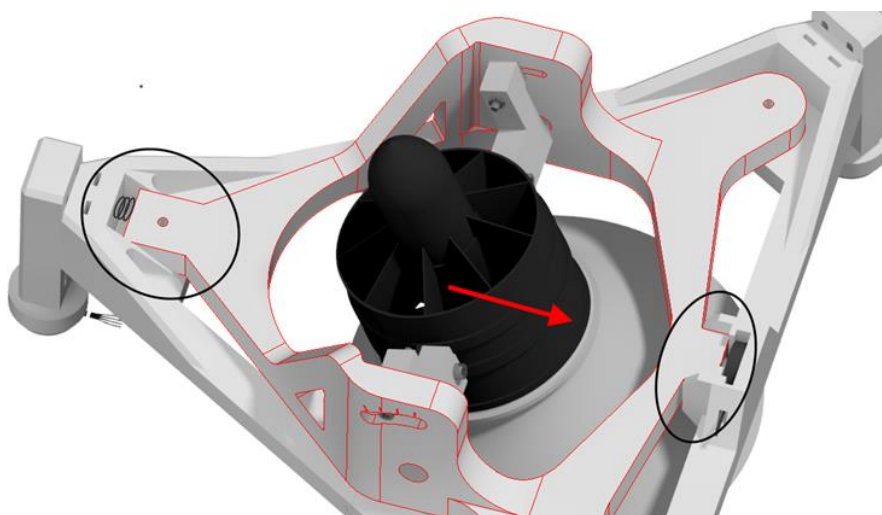
Slika 21. Stupnjevi slobode eksperimentalno postava

Prilikom ispitivanja kombiniranih vertikalnih F_v i horizontalnih sila F_h potrebno je smanjiti utjecaj sile trenja, iz tog razloga se koriste klizni ležaji. Kako bi se osigurao konstantan kontakt klizeće konstrukcije i senzora sile koristi se opruga koja unosi prenaprezanje u sustav. Zahvaljujući opruzi klizeća konstrukcija se naslanja na senzor sile i prijenosi mu opterećenja preko naslona za senzor sile [Slika 22.].



Slika 22. Presjek eksperimentalnog postava

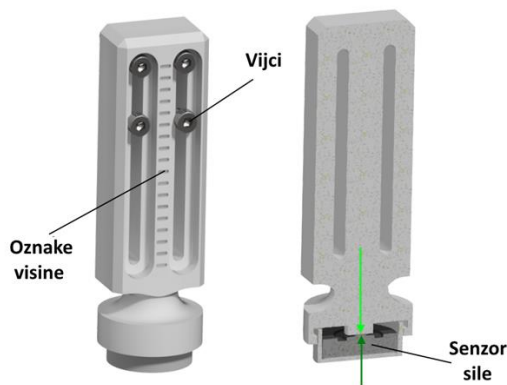
Konstruktivskom izvedbom nosača konstrukcije i klizeće konstrukcije osigurava se pravocrtno gibanje klizeće konstrukcije [Slika 23.].



Slika 23. Prikaz kretanja klizeće konstrukcije

Nogare

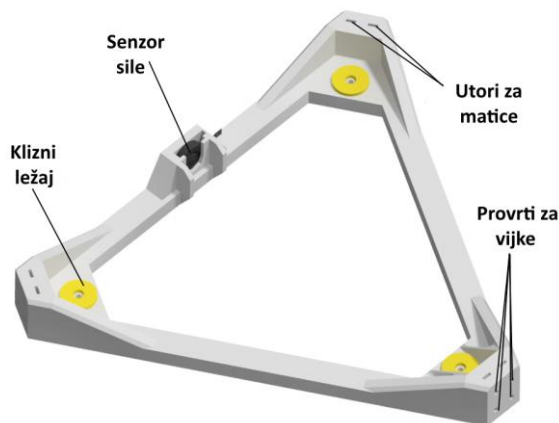
Nogare se sastoje od dva dijela, kliznog dijela s prorezom za vijke i kućišta za se senzor sile (eng. load cell) [Slika 24.]. Pomoću oznaka visine i vijaka, koji se vijčano vežu za nosivu konstrukciju, odabire se željena udaljenost difuzora od površine. Nogare prenose opterećenje nosive konstrukcije na senzore sile.



Slika 24. Nogare eksperimentalnog postava

Nosiva konstrukcija

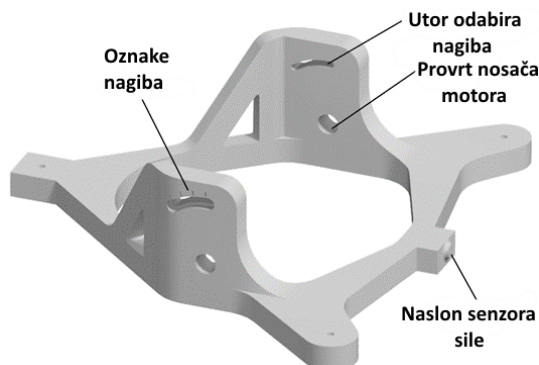
Nosiva konstrukcija se sastoji od prereza za matice, utora za klizne ležajeve i senzora sile (eng. load cell) [Slika 25.]. U prerezima za matice se nalaze matice koje se vijčano vežu na nogare. Klizni ležajevi služe smanjenju sile trenja prilikom ispitivanja horizontalnih sila. Prilikom ispitivanja horizontalnih sila klizeća konstrukcija prenosi opterećenja na senzor sile koji se nalazi na nosivoj konstrukciji.



Slika 25. Nosiva konstrukcija eksperimentalnog postava

Klizeća konstrukcija

Klizeća konstrukcija se sastoji od oznaka nagiba, provrta nosača motora, utora za odabira nagiba, naslona za senzor sile i utora za klizni ležaj [Slika 26].



Slika 26. Klizeća konstrukcija eksperimentalnog postava

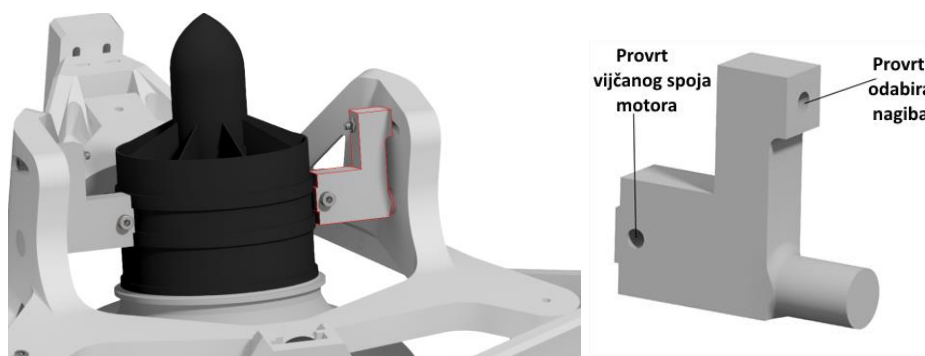
Na eksperimentalnom postavu moguće je podešavati nagib EDF-a od 0 do 30 stupnjeva u odnosu na vertikalu. Oznake nagiba označavaju kutove od 0, 10, 20 i 30 stupnjeva u odnosu na vertikalu. Prilikom odabira nagiba vijak, koji je vijčano povezan s nosačem motora, se postavlja na oznaku željenog kuta [Slika 27.].



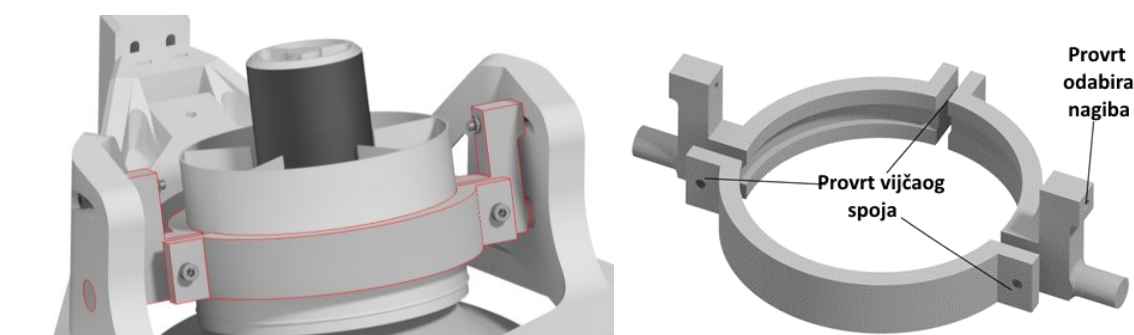
Slika 27. Podešavanje nagiba

Nosač motora

Nosači motora su prilagođeni načinu prihвата motora. U ovom radu su dizajnirana dva nosača motora i prikazana su u nastavku.



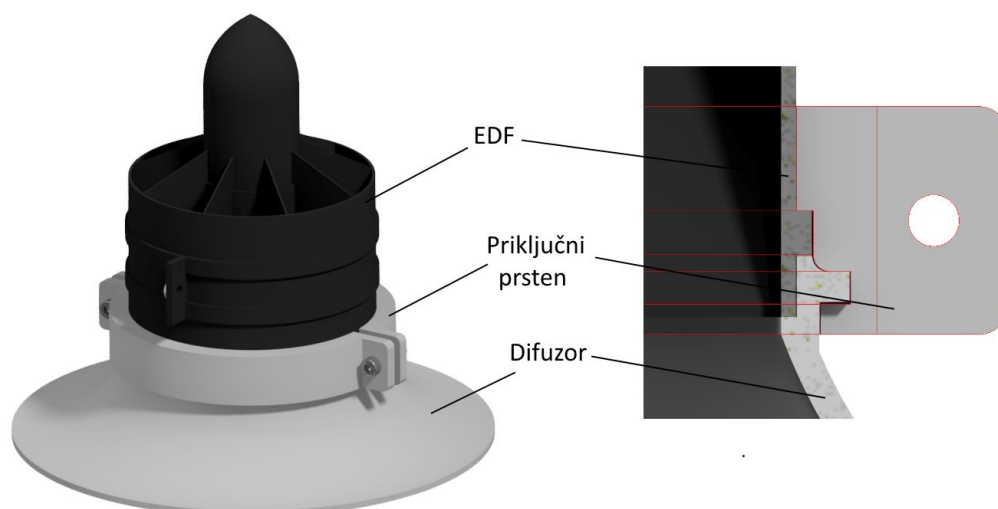
Slika 28. Nosač EDF-a 70 mm



Slika 29. Nosač EDF-a 80 mm

Priključni prsten

Priključni prsten služi za jednostavnu izmjenu difuzora prilikom testiranja. Svojem dvodijelnim oblikom i vijčanom vezom spaja difuzor i EDF.



Slika 30. Priključni prsten i presjek

Standardne komponente

Dijelovi eksperimentalnog postava su povezani vijčanim spojevima vijcima M3 standarda DIN 912 i maticama M3 DIN 934. Dok su kao uložne matice nosive konstrukcije korištene matice M3 standarda DIN 562.



Slika 31. Uložne matice DIN 562

Kako bi sila trenja prilikom ispitivanja horizontalnih sila bilo što manje u nosivoj konstrukciji i kliznoj konstrukciji se nalaze ležajevi LTM-0620-015. Ovakvi ležajevi imaju koeficijent trenja od 0,08 do 0,23.



Slika 32. Klizni ležaj LTM

4.3. Uređaji za akviziciju podataka i upravljanje

VESC

VESC (Vedder's Electronic Speed Controller) je sustav otvorenog softvera (eng. open source), razvijen od švedskog tehničara Benjamina Veddera, koji služi za kontrolu i upravljanje električnih motora. Sustav se sastoji od kontrolera brzine VESC [Slika 33.] i programskog sučelja VESC TOOL [Slika 34.] [21]



Slika 33. Flipsy VESC [21]

Glavna prednost ovakvog kontrolera je programska konfiguracija motora, granica struje i parametara upravljanja motorom što omogućuje sigurno ispitivanje i korištenje motora. Programsko sučelje omogućava prijenos i praćenje podataka uživo [Slika 34.] što je iznimno korisno za eksperimentalni postav.



Slika 34. VESC Tool [21]

U ovom diplomskom radu VESC i VESC Tool se koriste kako bi se prikupili podatci o snazi, struji i brzini vrtnje motora kao i podatci o naponu baterije odnosno izvoru napajanja.

Arduino Uno

Arduino Uno je elektronička prototipna platforma, proizvedena u Italiji, namijenjena kreiranju elektroničkih projekata. Posebna je po svojoj jednostavnosti upotrebe i širokom području namjene. Arduino Uno se sastoji od mikročipa ATmega328P sa svojim setom od 14 digitalnih ulazno izlaznih pinova, 6 analognih ulaza, 16MHz kvarcnog kristala, USB konektora i konektor za napajanje. [22]

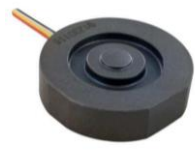


Slika 35. Arduino uno [22]

Senzor sile (eng. Load cell)

Za praćenje horizontalne i vertikalne sile koje se pojavljuju tijekom testiranja koristi se kompresijski senzor sile FX292X-100A-0025-L.

CONNECTIONS INFORMATION:



PIN	WIRE COLOR	OUTPUT SIGNAL		
		mV	0.5~4.5V	I ² C
4	RED	V+	V+	V+
3	YELLOW	O+	O+	SCL
2	WHITE	O-	N/A	SDA
1	BLACK	V-	COMMON	V-

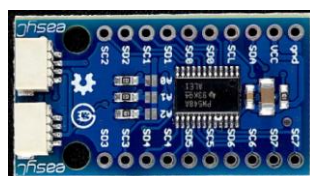
Slika 36. Senzor sile [23]

FX29 je kompaktan kompresijski senzor sile koji ima sposobnost mjerenja mase od 0 do 12 kilograma (125 N) [23]. Senzor ima linearnu karakteristiku te komunicira s ostalim uređajima preko I2C komunikacije. Kako bi se ostvarila kvalitetna komunikacija potrebno je na postaviti pull up otpornik od 10 k Ω na SCL i SDA pin.

Prilikom kalibracije senzora testirane su različite mase na svakom od senzora sile. Pošto su senzori linearne karakteristike kalibrirani su množenjem izlazne vrijednosti senzora s konstantom vrijednošću kako bi se uklonilo odstupanje. Testiranje točnosti senzora sile je provedeno nakon što su senzori sile ugrađeni na eksperimentalni postav te se utvrdilo odstupanje od 3 % pri masama od 2 kg.

I2C multiplekser

Pošto svaki od senzora sile sadrži istu I2C adresu potrebno je koristiti multiplekser. TCA9548A je multiplekser koji omogućuje I2C komunikaciju s više uređaja koji dijele istu I2C adresu. U slučaju ovog diplomskog rada, uređaji koji dijele istu adresu su senzori sile. [24]



Slika 37. TCA9548A multiplekser [24]

4.4. Cijevni ventilatori

Cijevni ventilatori pomoću kojih su provedena testiranja su prikazani u nastavku

Tablica 1. Prikaz specifikacija cijevnih ventilatora korištenih u eksperimentalnom postavu

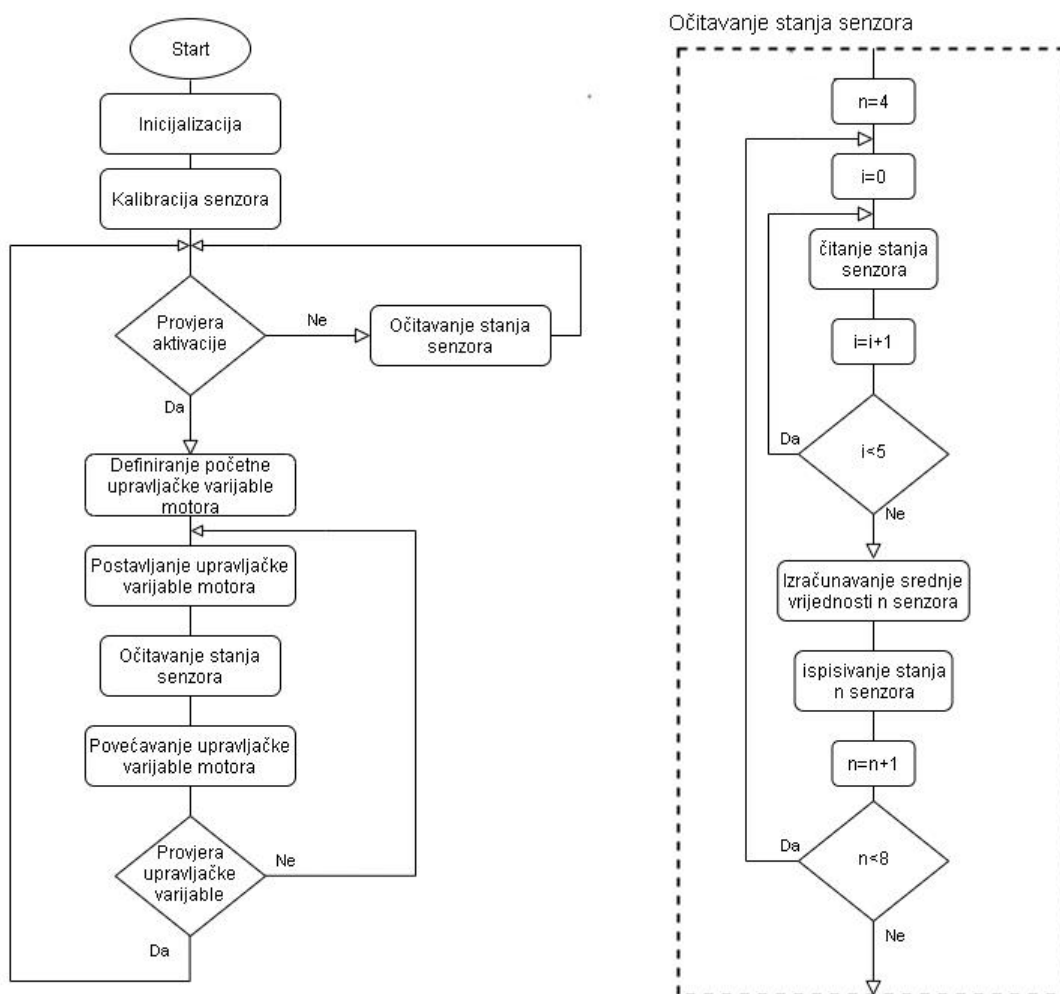
Naziv i prikaz	Changesun XRP 14 Blade 70mm Ducted Fan + 2600KV Motor 4s (EDF 70 mm) 	EDF Ducted Fan RC Lander DPS 80mm 10 blade + 1800KV Motor 6s (EDF 80 mm) 
Masa [g]	185	475
Smjer vrtnje	CCW	CCW
Promjer ulaza [mm]	70	80
Tip motora	vanjski rotor (eng. Outrunner)	vanjski rotor (eng. Outrunner)
Predviđeni broj serijskih baterija – napon [V]	4s – 14,8	6s - 22,2
Okreti motora u odnosu na napon [Kv]	2600	1800
Broj lopatica	14	10

4.5. Prikupljanje podataka

Uređaji koji omogućuju prikupljanje su Arduino UNO sa svojim programskim kodom i VESC sa svojim sučeljem. Prilikom provedbe eksperimenta preko Arduina i programskog koda se prikupljaju podatci o vrijednostima koje očitavaju senzori sile te se ti podatci ispisuju na ekranu. Pomoću VESC-a se prikupljaju podatci o snazi motora, brzini vrtnje motora i izvoru napajanja, te se ti podaci prikazuju na ekranu. Tijekom eksperimenta se snimaju podatci koje prikazuju Arduino UNO i VESC te se oni upisuju u Excel tablicu i zatim grafički prikazuju pomoću programa Matlab.

4.5.1. Programski kod Arduino UNO

U nastavku je opisan programski kod napisan u Arduino (prilagođeni C++) programskom jeziku. Kod je prikazan pomoću dijagrama toka dok se kompletan programski kod se nalazi u prilogu.



Slika 38. Dijagram toka programskog koda

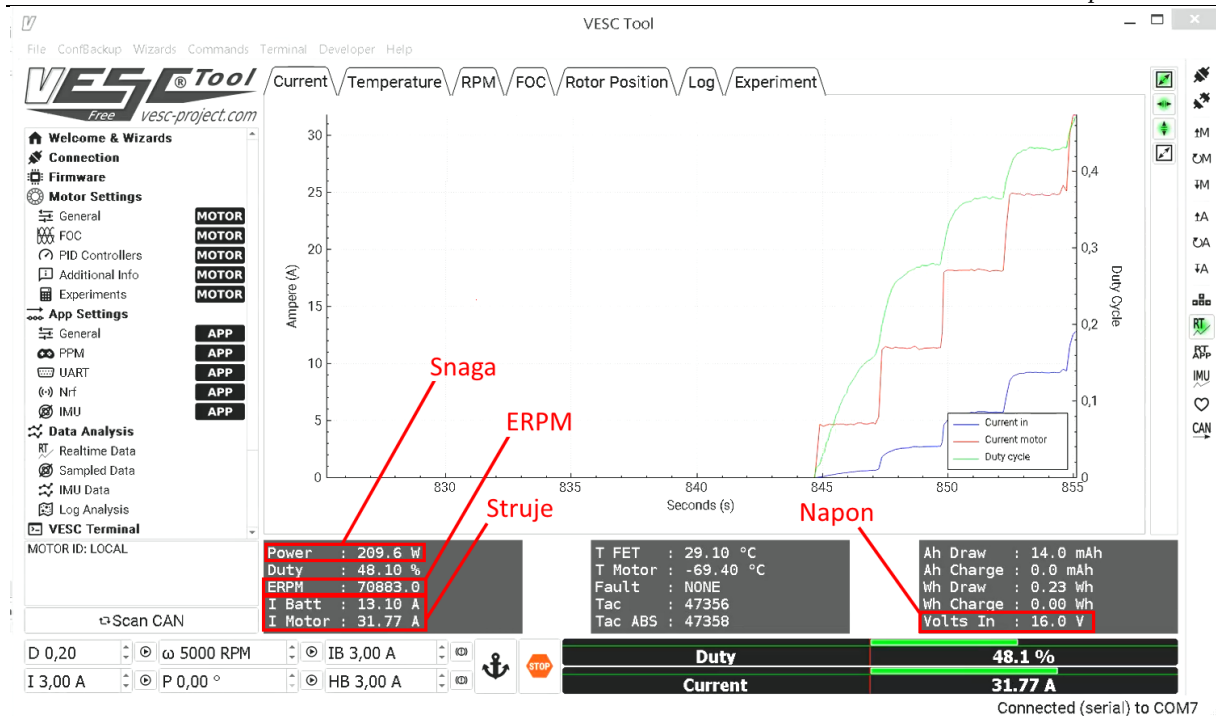
Prilikom uključivanja upravljačke jedinice (mikrokontrolera) inicijaliziraju se datoteke, definiraju pomoćne varijable i adrese senzora sile. Nakon inicijalizacije mikrokontroler čita glavnu petlju programa koja kreće kalibracijom senzora i podešavanjem njihove početna vrijednosti. Zatim, program ulazi u petlju očitavanja stanja senzora, u kojoj ispisuje stanje senzora na ekranu, dok operater ne aktivira testiranje. Prilikom aktivacije postavlja se početna vrijednost upravljačke varijable motora te se ona šalje na VESC. Zatim se očitavaju stanja senzora i ispisuju na ekranu. Stanje senzora se iščitava pet puta u intervalima od 100 ms, te se iz tih vrijednosti dobiva srednja vrijednost koja se ispisuje na ekranu. Nakon očitano stanja senzora povećava se upravljačka varijabla motora te se šalje na VESC. Zatim se ponovo očitavaju stanja senzora. Postupak se ponavlja sve dok se ne dostigne željena vrijednost upravljačke varijable motora čime završava programska petlja testiranja.

4.5.2. Prikaz podataka VESC-a

Prilikom konfiguracije kontrolera koji upravlja motorom potrebno je namjestiti granice struje i način upravljanja motorom. Sigurno upravljanje je ostvareno postavljanjem granice struje na 50A, dok je način upravljanja ostvaren pomoću PPM-a.

PPM je vrsta PWM signala koja se koristi pri upravljanju servo motora. Kod upravljanja servo motora širina impulsa označava kut zakreta servo motora, dok u slučaju eksperimentalnog postava širina impulsa koju šalje mikrokontroler Arduino UNO predstavlja postotak snage upravljanog motora. Prilikom inicijalizacije VESC-a konfigurira se maksimalna i minimalna vrijednost impulsa koju šalje mikrokontroler te se prema njoj prilagođava postotak snage upravljanog motora.

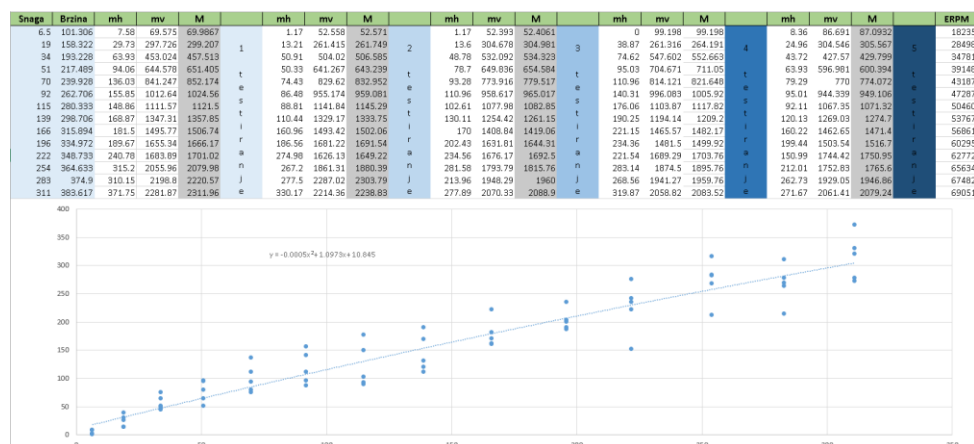
U nastavku je prikazan izgled VESC Tool sučelja prilikom testiranja eksperimentalnog postava. Na slici su prikazane vrijednosti potrošnje, struje na izlazu napajanja, struje na motoru, napon i ERPM (eng. Electrical Rotations per Minute). Preko ERPM-a je izračunata vrijednost broja okretaja u sekundi tako da je vrijednost ERPM-a podijeljena s brojem pari polova motora koji se testira na eksperimentalnom postavu. Snaga koja se prikazuje na ekranu, a koja je kasnije u radu prikazivana u grafovima, je potrošna energije računata pomoću struje i napona napajanja.



Slika 39. Prikaz VESC Tool sučelja prilikom testiranja

4.5.3. Obrada podataka

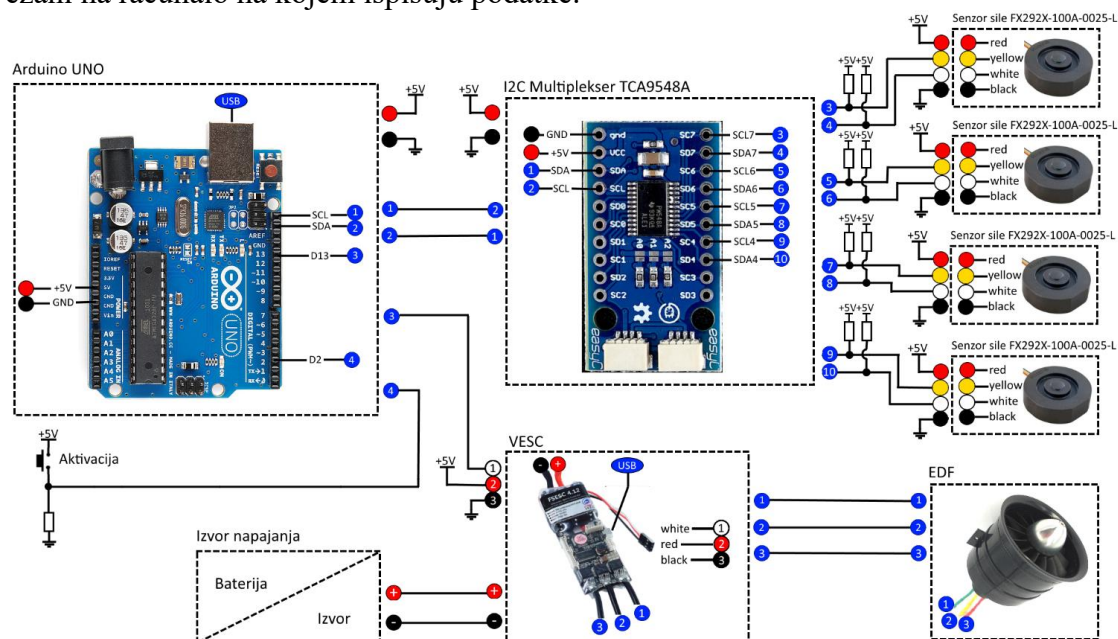
Podatci dobiveni od mikrokontrolera i VESC Tool-a se zapisuju u Excel tablicu, te se preračunavaju u mjerne jedinice koje su pogodne za prikazivanje i uspoređivanje. Pomoću Excel tablice se dobivaju aproksimirane krivulje vrijednosti te se ti podatci pomoću programa Matlab prikazuju u grafičkom obliku.



Slika 40. Primjerni prikaz podataka u Excel tablici

4.6. Shema spajanja

Na slici je prikaza shema spajanja komponenti. Arduino UNO i VESC su preko USB-a povezani na računalo na kojem ispisuju podatke.



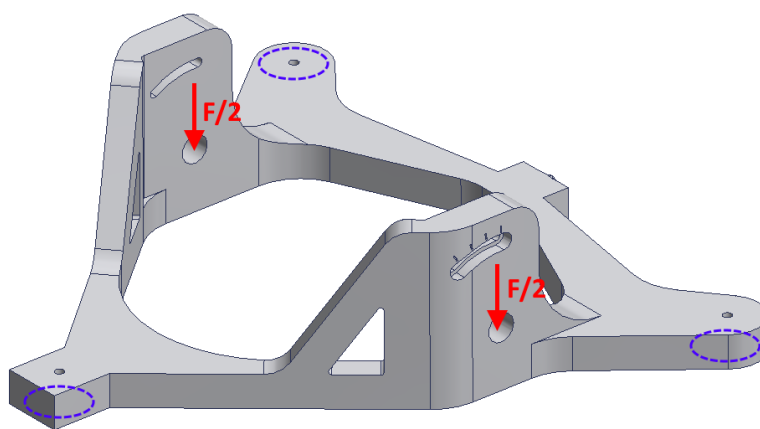
Slika 41. Shema spajanja

4.7. Simulacije pomaka eksperimentalnog postava

U ovom poglavlju su prikazane simulacije pomaka komponenata eksperimentalnog postava prilikom opterećenja.

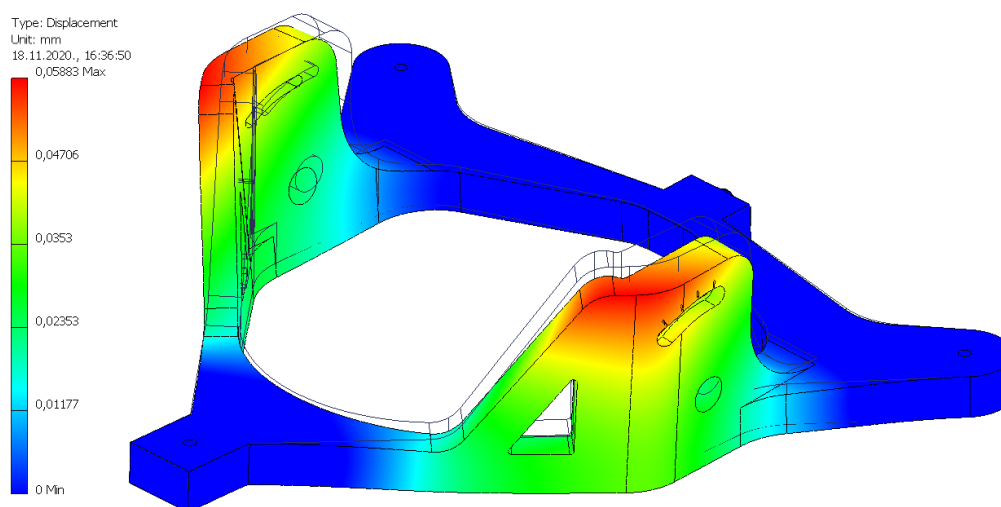
Prilikom testiranja sila adhezije se prenosi s nosača motora na klizeću konstrukciju, a zatim preko kliznih ležajeva na nosivu konstrukciju i na kraju na nogare i senzore sile. Komponente koje su promatrane simulacijama su klizeća konstrukcija i nosiva konstrukcija.

Kao rubni uvjeti simulacija (prikazano na [Slika 42.]) klizeće konstrukcije postavljene su 'Fixed' na mjesta predviđena za klizne ležaje (označeno plavom bojom) dok je očekivana sila $F=22\text{ N}$ postavljena u provrte nosača motora (označeno crvenom bojom)



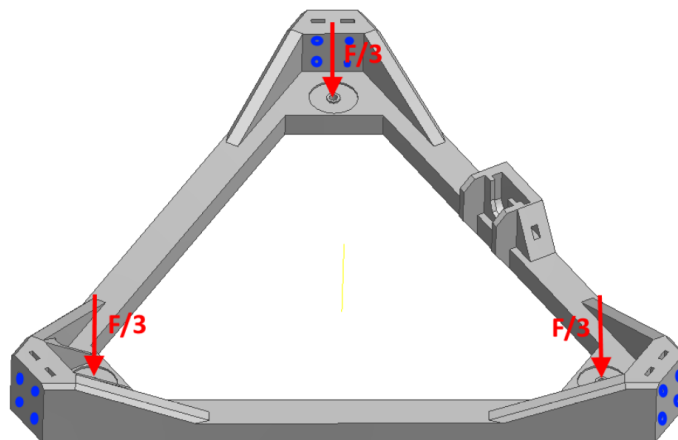
Slika 42. Rubni uvjeti klizeće konstrukcije

Dobiveni su sljedeći rezultati.



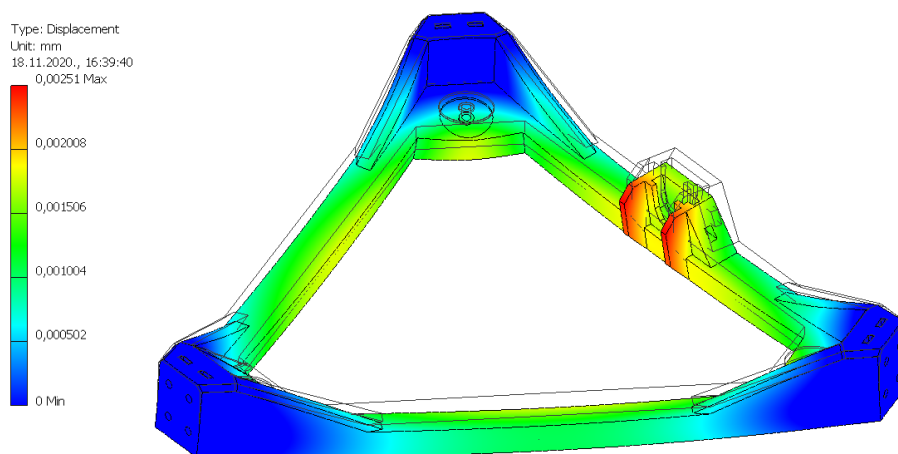
Slika 43. Simulacija pomaka klizeće konstrukcije

Kao rubni uvjeti simulacija (prikazano na [Slika 44.] klizeće konstrukcije postavljene su 'Fixed' na mjesta predviđena za vijčane veze nogara (označeno plavom bojom) dok je očekivana sila $F=22\text{ N}$ postavljena u mjesta predviđena za klizne ležaje (označeno crvenom bojom).



Slika 44. Rubni uvjeti nosive konstrukcije

Dobiveni su sljedeći rezultati.

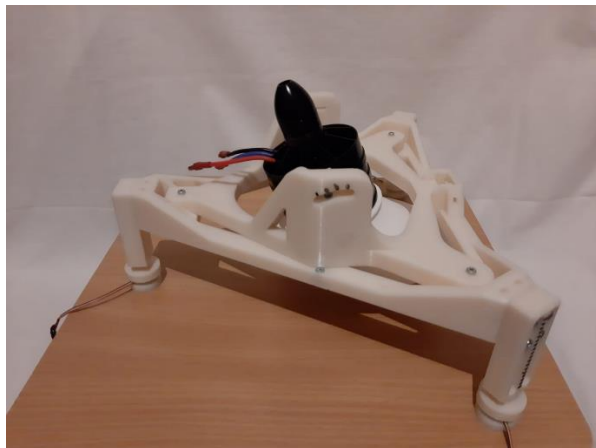
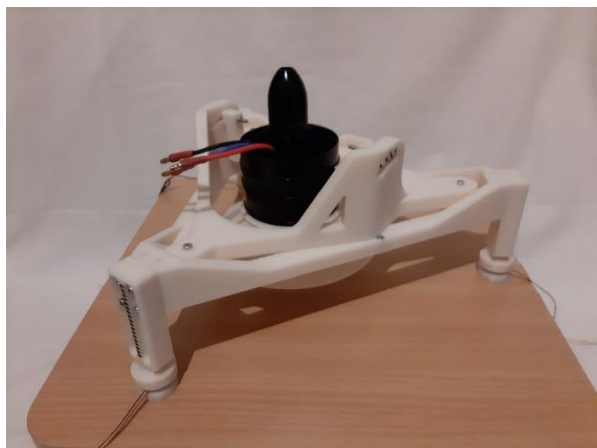


Slika 45. Simulacija pomaka nosive konstrukcije

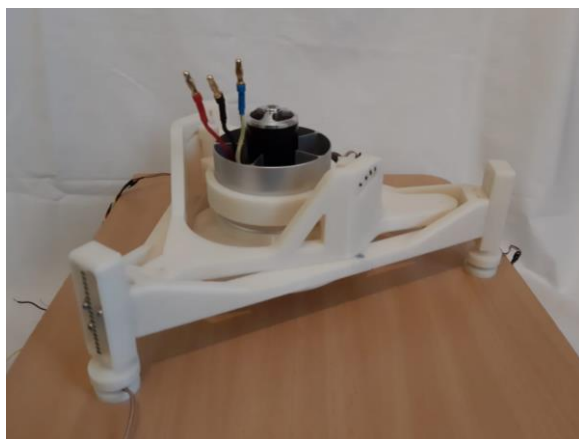
Iz rezultata simulacije ([Slika 43.] i [Slika 45.]) je vidljivo kako su maksimalni pomaci klizeće konstrukcije 0,059 mm dok su maksimalni pomaci nosive konstrukcije 0,003 mm. Bitno je napomenuti da simulacija prikazuje rezultate za konstrukciju pune ispune ABS-om, dok su realne komponente izrađene aditivnom tehnologijom. Prilikom izrade aditivnom tehnologijom se ne koristi puna ispuna komponenata kako bi se smanjio utrošak materijala.

4.8. Prikaz eksperimentalnog postava

U nastavku su prikazane slike eksperimentalnog postava EDF 70 mm i EDF 80 mm



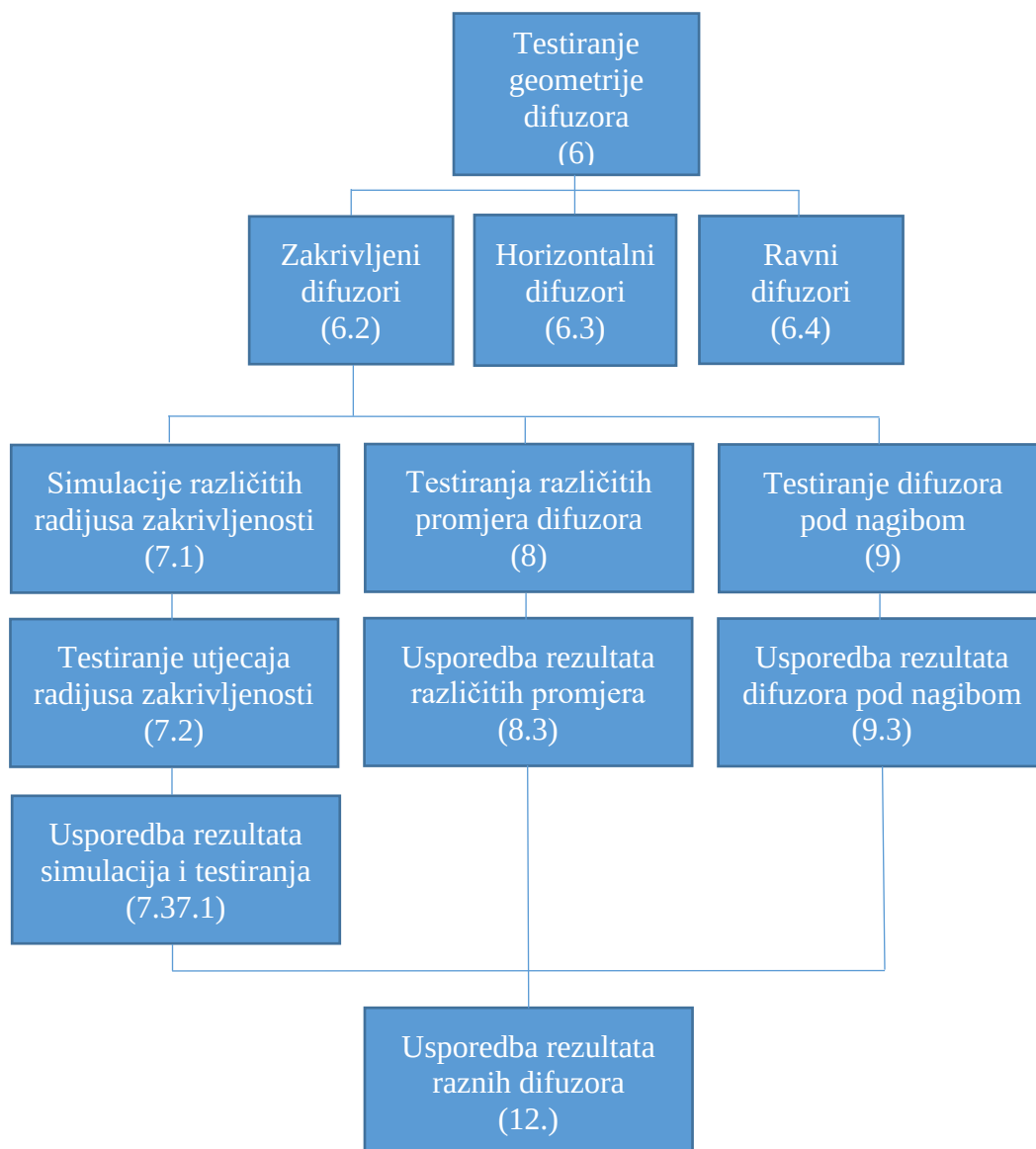
Slika 46. Slike eksperimentalnog postava, EDF 70 mm



Slika 47. Slike eksperimentalnog postava, EDF 80 mm

5. PRIKAZ PROVEDENIH ISPITIVANJA, EDF 70mm

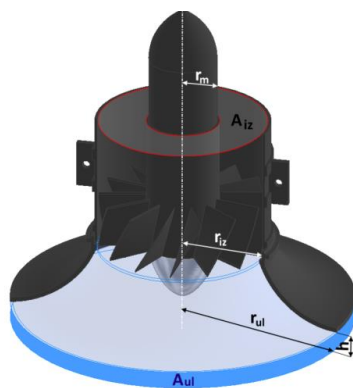
Zbog velike količine podataka i broja testiranja u nastavku je prikazan dijagram toka ispitivanja s poglavljima u kojima su prikazani rezultati pojedinih ispitivanja za EDF 70mm.



6. TESTIRANJE RAZLIČITIH GEOMETRIJA DIFUZORA, EDF 70 mm

6.1. Uvod u testiranje različitih geometrija difuzora

U eksperimentalnom radu "Vortex Actuation via Electric Ducted Fans: an Experimental Study" [18] korišteni su EDF-ovi ulaznog radijusa 70 mm i 80 mm. Kao zaključak ispitivanja izvedeno da su najbolje sile adhezije dobivene kad je omjer izlazne i ulazne površine, $A_{izl}/A_{ul} = \pi(r_{iz}^2 - r_m^2)/2\pi hr_{ul}$, jednaka 0,8. U eksperimentalnom radu se navodi kako je pomoću omjera tih površina moguće predvidjeti optimalnu udaljenost difuzora od površine prianjanja kako bi se dobila maksimalna sila adhezije.



Slika 48. Prikaz ulazne i izlazne površine EDF-a i difuzora

Testirani oblici difuzora u [18] su izlaznih radijusa 50, 60, 70 i 80 mm, konstruirani sljedeći profil zakrivljenosti prema van s konstantnom debljinom stijenke 2 mm.

U ovom diplomskom radu su prva testiranja provedena s ciljem pronalaženja najboljeg geometrijskog oblika difuzora. Kako bi se ispitala najbolja geometrija difuzora konstruirana su tri oblika difuzora naziva horizontalni, ravni i zakrivljeni. Ulazni radijus sva tri difuzora je 70 mm dok je visina 25 mm. U nastavku je izračunata predložena optimalna udaljenost difuzora.

$$A_{iz}/A_{ul} = \pi(r_{iz}^2 - r_m^2)/2\pi hr_{ul}, \quad (9)$$

$$0,8 = \pi(35^2 - 14,7^2)/(2\pi h \cdot 70), \quad (10)$$

$$h = 9,01 \text{ mm} \quad (11)$$

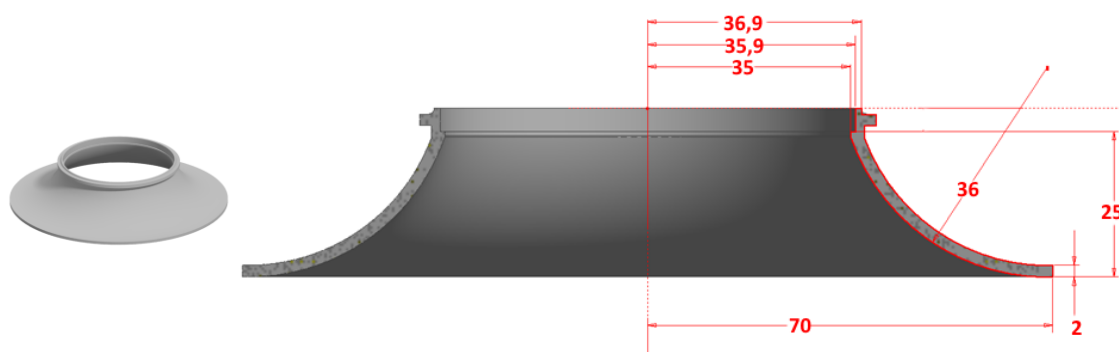
Prema omjeru ulazne i izlazne površine i podataka iz eksperimentalnog rada, visina na kojoj bi zakrivljeni difuzor trebao davati najbolje rezultate iznosi približno 9 mm. Iz tog razloga će se

testiranja provesti na visinama 7, 9 i 11 mm. Najbolji rezultati smatrat će se oni koji ostvaruju najveću silu adhezije.

Testiranja različitih geometrijskih oblika su provedena na EDF-u 70 mm pomoću VESC-a s ograničenjem struje motora na 50A. Kao izvor napajanja ovih testiranja koristila se LiPo baterija od 4600 mAh s nominalnim naponom od 14,8 V. Za svaki difuzor baterija je napunjena na 16 V, te je za svako testiranje ponovljeno pet puta na udaljenostima 7, 9 i 11 mm. U nastavku su prikazane geometrije difuzora i rezultati koji su dobiveni testiranjem.

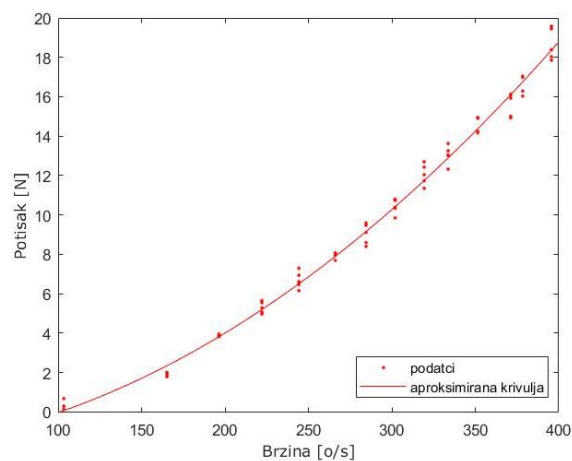
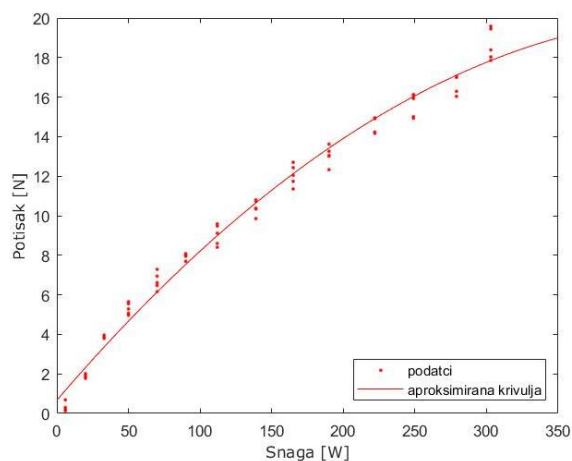
6.2. Testiranje zakrivljenog difuzora

Zakrivljeni difuzor je napravljen po uzoru na difuzore ispitane u eksperimentalnom radu [18]. Na [Slika 49.] u nastavku su prikazane dimenzije difuzora.

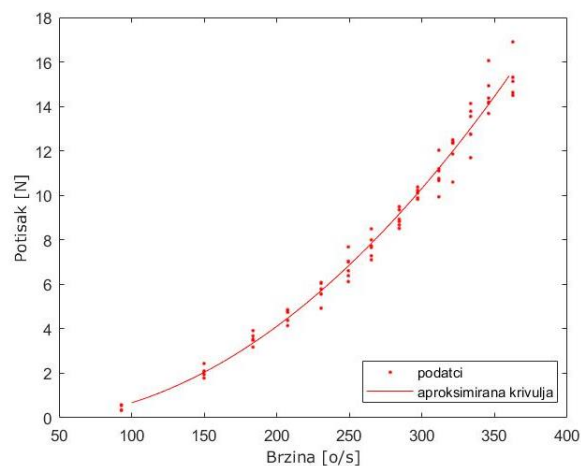
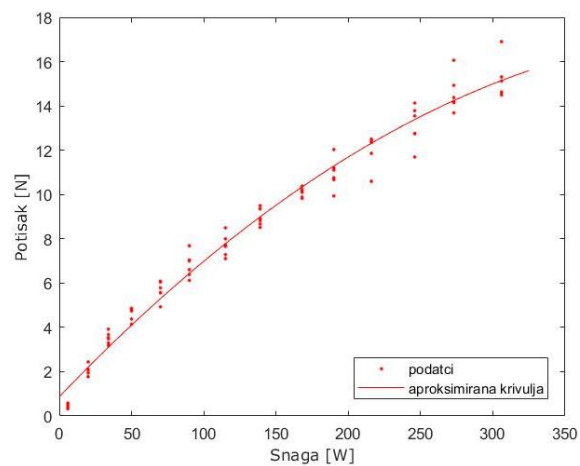


Slika 49. Dizajn zakrivljenog difuzora radijusa zakrivljenosti $r=36$ mm

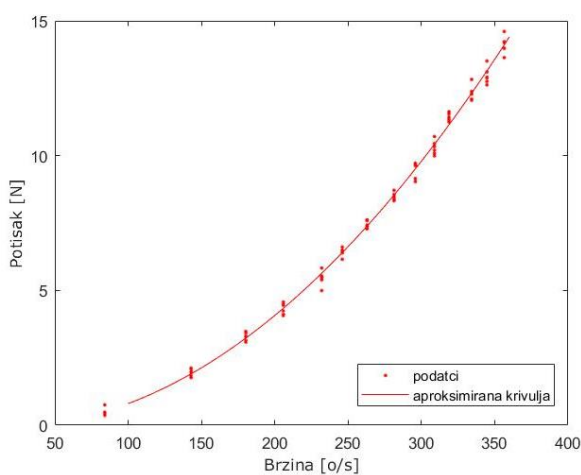
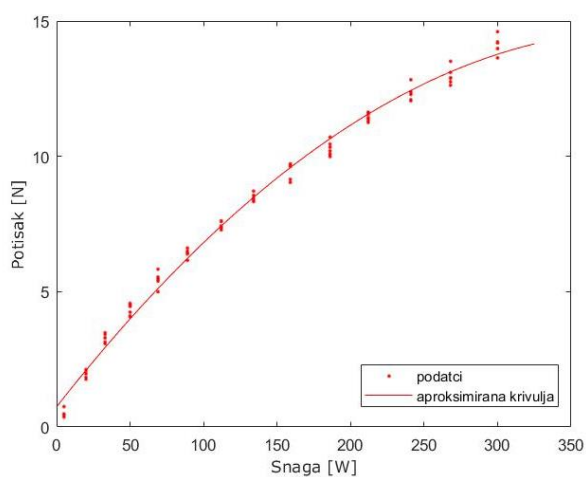
U nastavku su prikazani rezultati testiranja na udaljenostima 7, 9 i 11 mm od podloge. Na [Slika 50.] su prikazani grafovi odnosa snage i sile adhezije (lijevo) te broja okretaja i adhezije (desno) na visinama 7, 9 i 11 mm. Grafovi prikazuju podatke dobivene testiranjem i aproksimirane krivulje dobivene iz podataka.



(a)



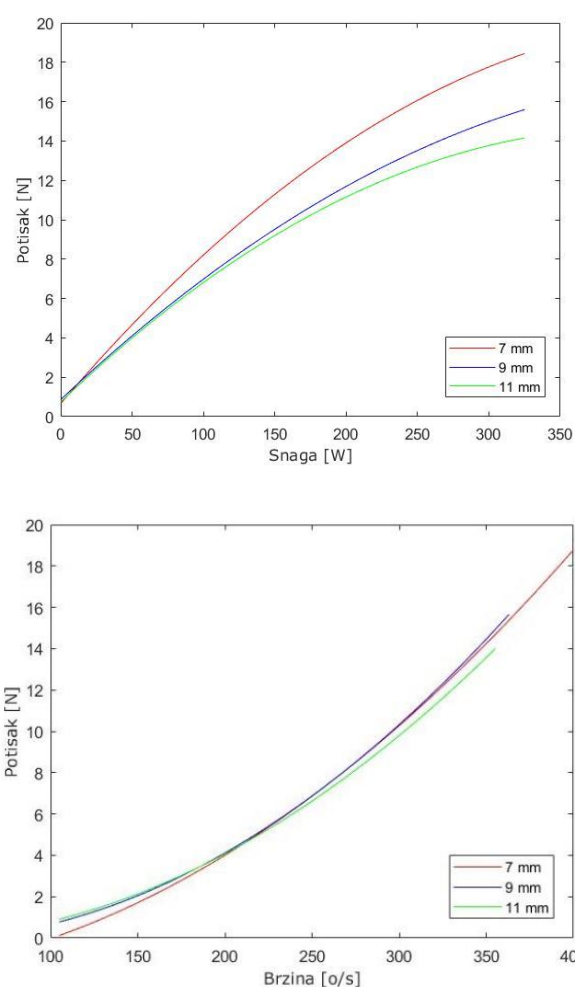
(b)



(c)

Slika 50. Grafovi snage i potiska (lijevo) i broja okretaja i potiska (desno) za zakrivljeni difuzor radijusa $r=36$ mm, udaljenosti 7 mm (a), 9 mm (b) i 11 mm (c) od podloge

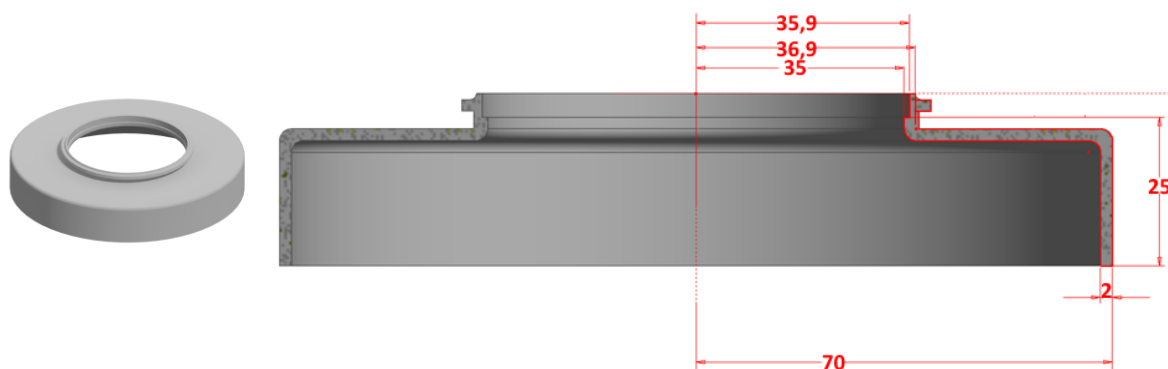
Na [Slika 51.] je prikazana usporedba rezultata testiranja s obzirom na visinu. Iz toga je moguće vidjeti kako najbolje rezultate zakrivljeni difuzor ostvaruje na udaljenosti 7 mm od podloge. Pri udaljenosti 7 mm od podloge ostvarena je prosječna sila adhezije od 17,46 N pri snazi od 303 W i brzini od 396 o/s. Na udaljenosti od 9 mm dobivamo prosječnu silu adhezije od 15,29 N pri snazi od 306 W i brzini od 362 o/s, što je smanjenje sile od 12,43 % za povećanje ulazne površine (ujedno i udaljenosti) od 28,57 %. Pri udaljenosti od 11 mm prosječna sila adhezije iznosi 14,65 N, pri 300 W i brzini 356 o/s od što je smanjenje sile od 16,09 % u odnosu na silu adhezije pri 7 mm, a povećanje ulazne površine (ujedno i udaljenosti od podloge) od 57,14 %.



Slika 51. Usporedba rezultata, s obzirom na visinu, zakrivljenog difuzora radijus zakrivljenosti $r=36$ mm

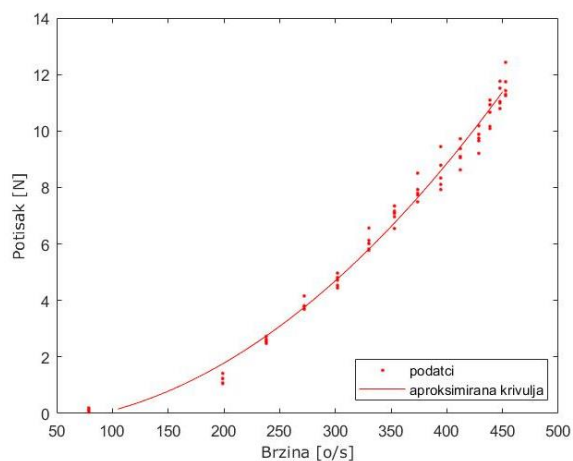
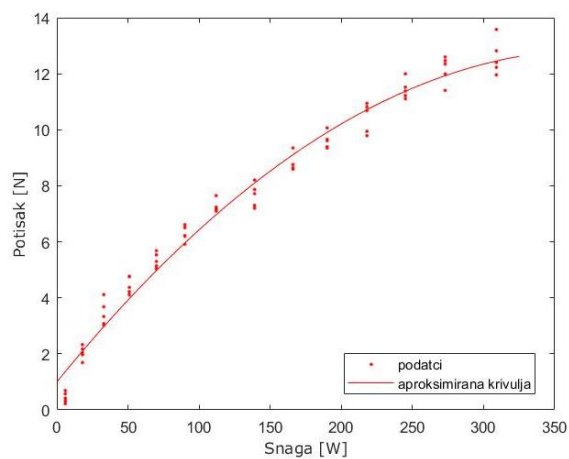
6.3. Testiranje horizontalnog difuzora

Horizontalni difuzor je konstruiran kako bi se testirao drugačiji oblik difuzora od onih u eksperimentalnom radu [18], s ciljem pronalaska optimalnog difuzora. Na [Slika 52.] su prikazane dimenzije horizontalnog difuzora.

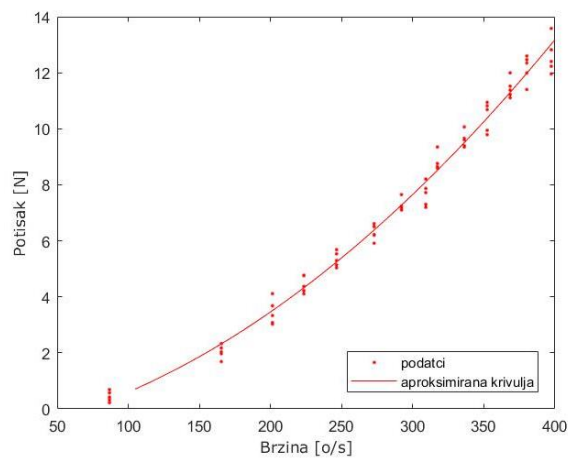
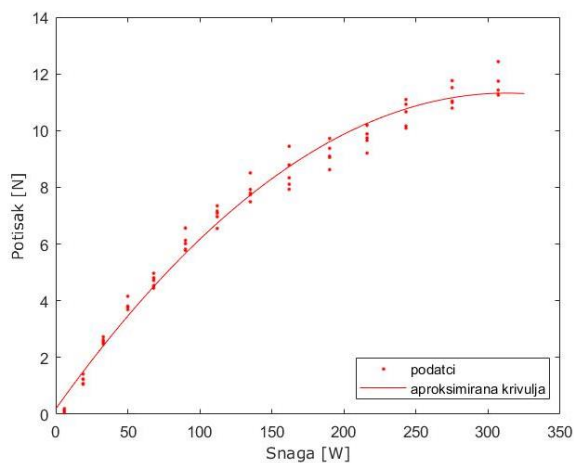


Slika 52. Dizajn horizontalnog difuzora.

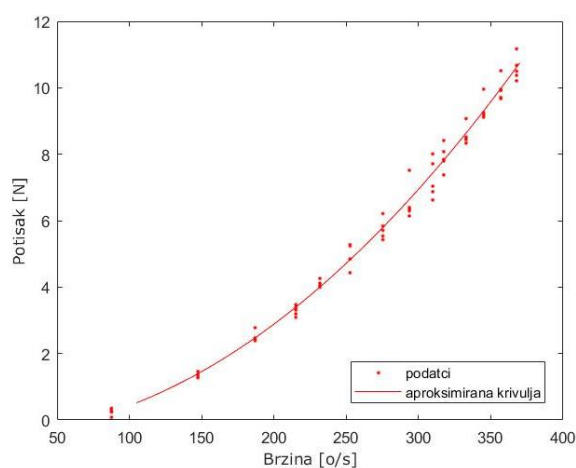
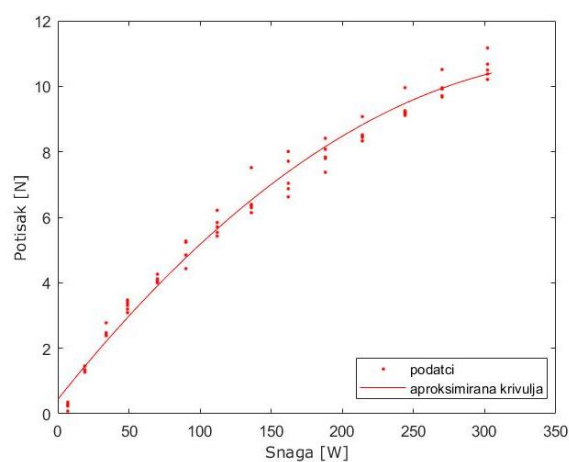
U nastavku su prikazani rezultati testiranja na udaljenostima 7, 9 i 11 mm od podloge. Na [Slika 53.] su prikazani grafovi odnosa snage i sile adhezije (lijevo) te broja okretaja i adhezije (desno) na visinama 7, 9 i 11 mm. Grafovi prikazuju podatke dobivene testiranjem i aproksimirane krivulje dobivene iz podataka.



(a)



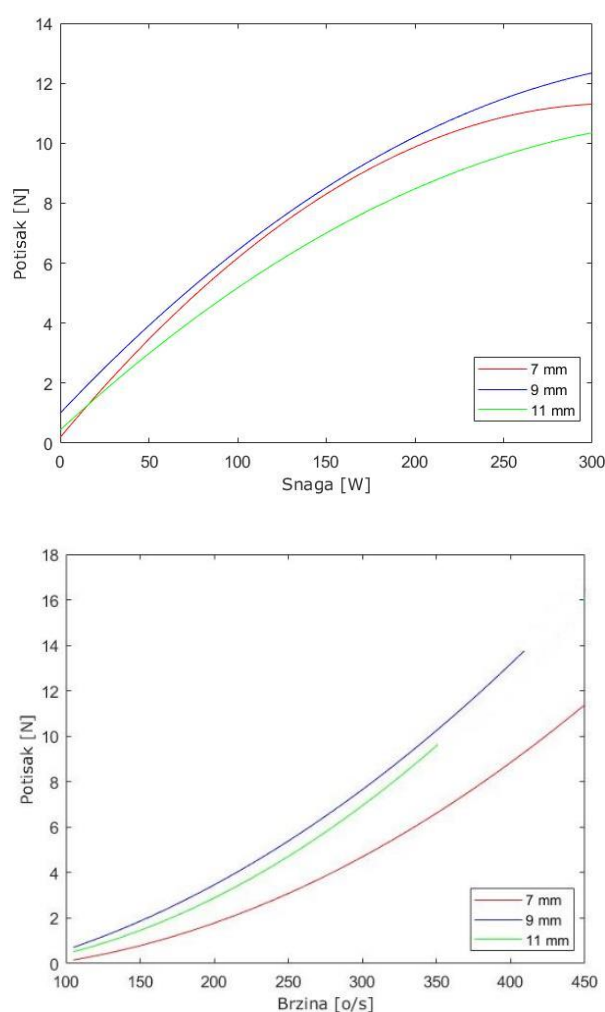
(b)



(c)

Slika 53. Grafovi snage i potiska (lijevo) i broja okretaja i adhezije (desno) za horizontalni difuzor, udaljenosti 7 mm (a), 9 mm (b) i 11 mm (c) od podloge

Na [Slika 54.] je prikazana usporedba rezultata testiranja s obzirom na visinu. Iz toga je moguće vidjeti kako najbolje rezultate horizontalni difuzor ostvaruje na udaljenosti 9 mm od podloge. Pri udaljenosti 9 mm od podloge ostvarena je prosječna sila od 12,59 N pri snazi od 309 W i brzini od 397 o/s. Na udaljenosti od 7 mm dobivamo prosječnu silu adhezije od 11,62 N pri snazi od 307 W i brzini od 452 o/s, što je smanjenje sile od 7% za smanjenje ulazne površine (ujedno i udaljenosti) od 28,57 %. Pri udaljenosti od 11 mm prosječna sila adhezije iznosi 10,58 N, pri 302 W i brzini 367 o/s od što je smanjenje sile od 15,97 % u odnosu na silu adhezije pri 9 mm, a povećanje ulazne površine (ujedno i udaljenosti od podloge) od 28,57 %.

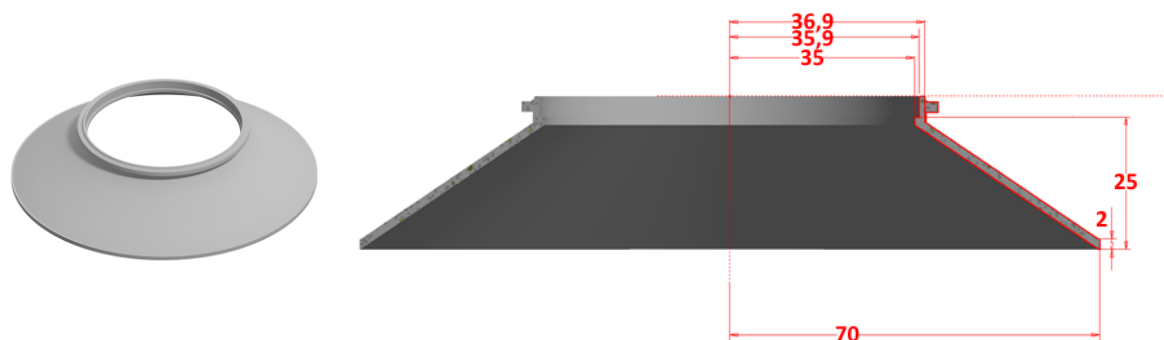


Slika 54. Usporedba rezultata, s obzirom na visinu, horizontalnog difuzora

6.4. Testiranje ravnog difuzora

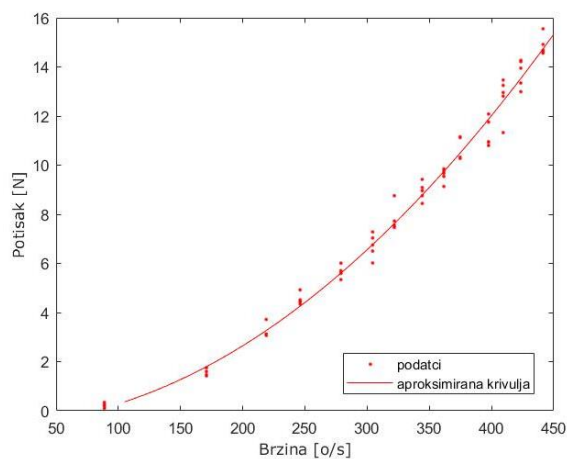
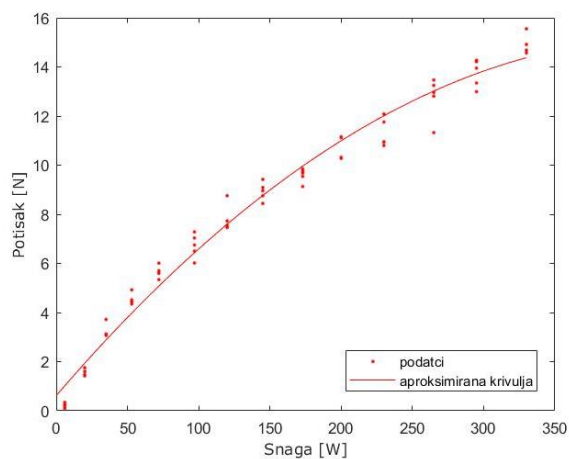
Ravni difuzor je konstruiran kako bi se testirao drugačiji oblik difuzora od onih u eksperimentalnom radu [18], s ciljem pronalaska optimalnog difuzora.

Na [Slika 55.] su prikazane dimenzije horizontalnog difuzora.

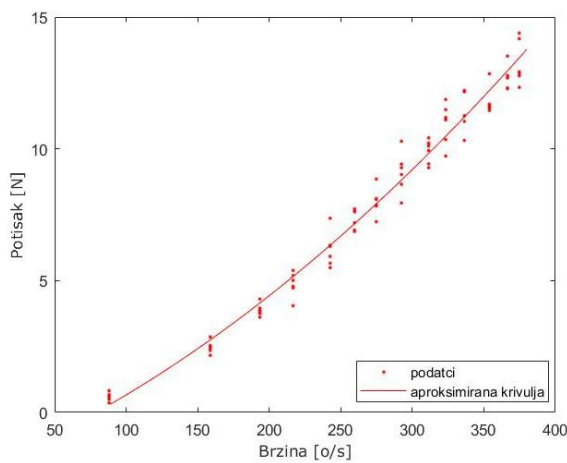
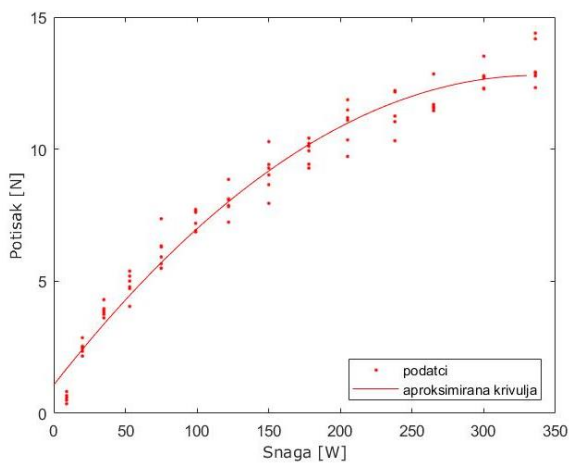


Slika 55. Dizajn ravnog difuzora

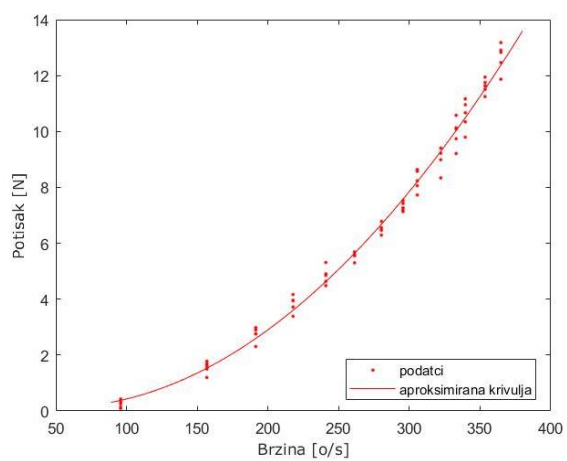
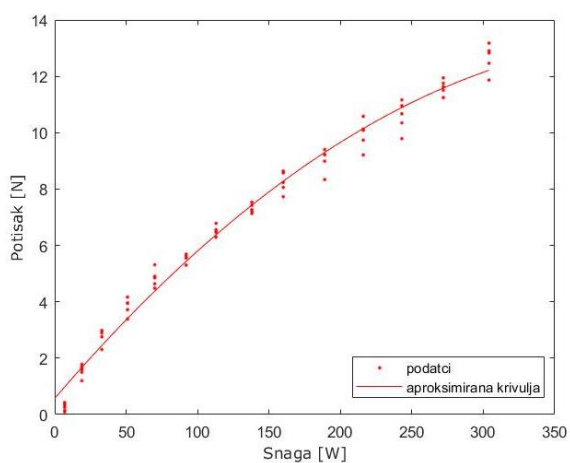
U nastavku su prikazani rezultati testiranja na udaljenostima 7, 9 i 11 mm od podloge. Na [Slika 56.] su prikazani grafovi odnosa snage i sile adhezije (lijevo) i broja okretaja i adhezije (desno) na visinama 7, 9 i 11 mm. Grafovi prikazuju podatke dobivene testiranjem i aproksimirane krivulje dobivene iz podataka.



(a)



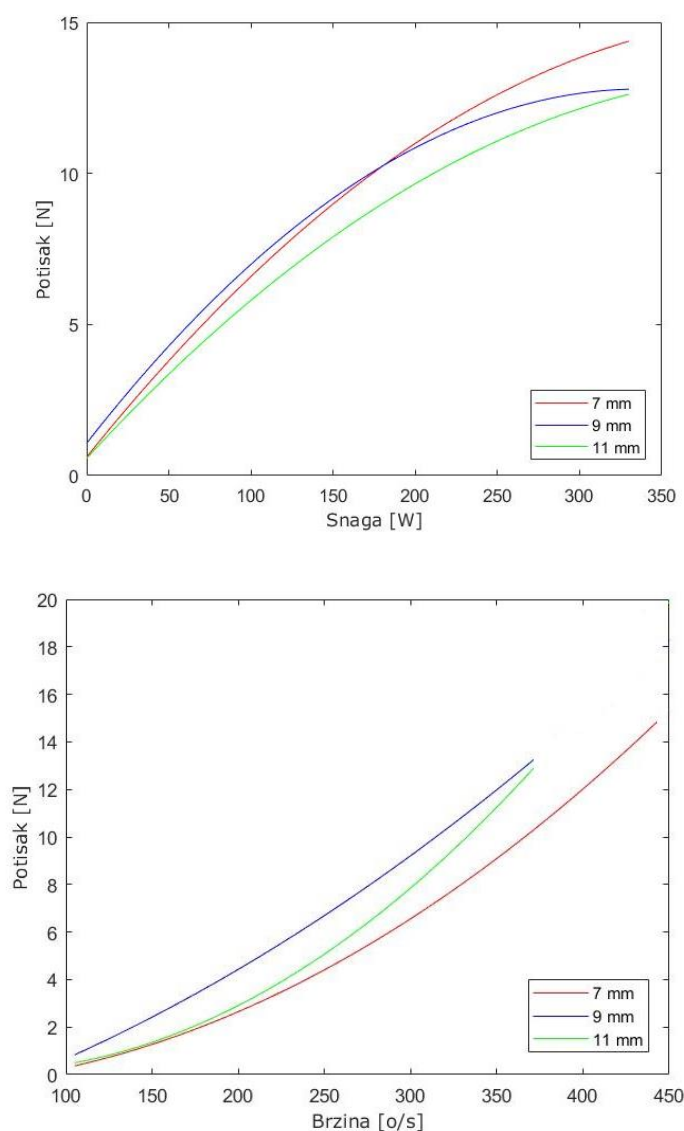
(b)



(c)

Slika 56. Grafovi snage i potiska (lijevo) i broja okretaja i adhezije (desno) za ravni difuzor, udaljenosti 7 mm (1), 9 mm (2) i 11 mm (3) od podloge

Na [Slika 57.] je prikazana usporedba rezultata testiranja s obzirom na visinu. Iz toga je moguće vidjeti kako najbolje rezultate horizontalni difuzor ostvaruje na udaljenosti 7 mm od podloge. Pri udaljenosti 7 mm od podloge ostvarena je prosječna sila od 14,88 N pri snazi od 330 W i brzini od 441 o/s. Na udaljenosti od 9 mm dobivamo prosječnu silu adhezije od 13,24 N pri snazi od 336 W i brzini od 374 o/s, što je smanjenje sile od 11,02 % za povećanje ulazne površine (ujedno i udaljenosti) od 28,57 %. Pri udaljenosti od 11 mm prosječna sila adhezije iznosi 12,64 N, pri 304 W i brzini 364 o/s od što je smanjenje sile od 14,85 % u odnosu na silu adhezije pri 7 mm, a povećanje ulazne površine (ujedno i udaljenosti od podloge) od 57,14 %. Zanimljivo je da pri manjim snagama difuzor na udaljenosti 9 mm ostvaruje veće sile adhezije nego difuzor na udaljenosti 7 mm, dok je pri većim snagama obrnuto.



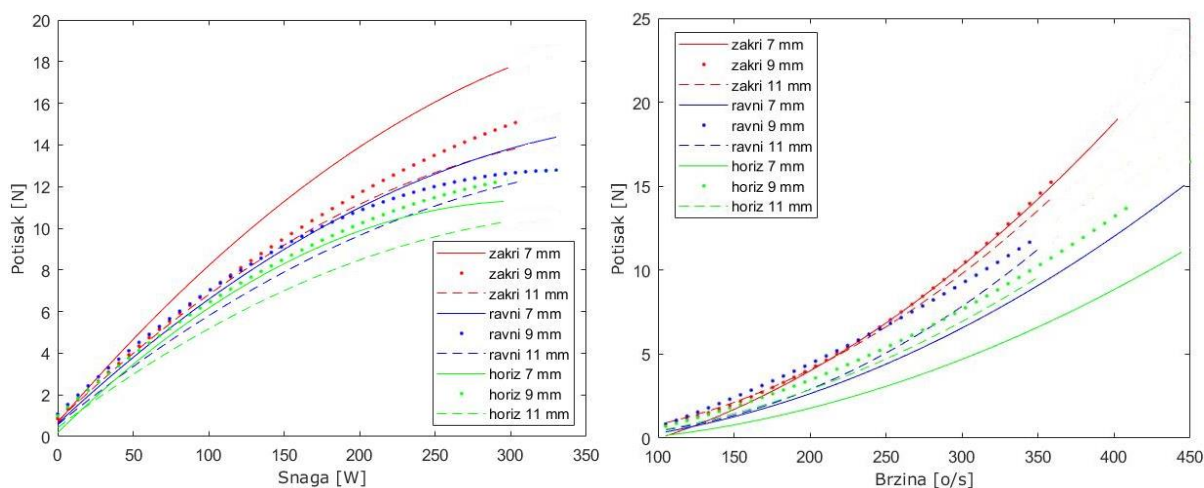
Slika 57. Usporedba rezultata, s obzirom na visinu, ravnog difuzora

6.5. Usporedba rezultata difuzora različite geometrije

U [Tablica 2] su prikazani slučajevi u kojima je ostvarena najveća sila adhezije, dok su na [Slika 58.] prikazani svi slučajevi zakrivljenog, horizontalnog i ravnog difuzora.

Tablica 2. Prikaz rezultata zakrivljenog, horizontalnog i ravnog difuzora

	Zakrivljeni (7 mm)	Horizontalni (9 mm)	Ravni (7 mm)
Sila adhezije [N]	17,46	12,59	14,88
Snaga [W]	303	309	330
Broj okretaja [o/s]	396	397	441
Gustoća snage [N/W]	0,058	0,041	0,045



Slika 58. Grafovi usporedbe zakrivljenog, horizontalnog i ravnog difuzora na različitim visinama

Iz tablice i grafova je vidljivo da najveću silu adhezije (17,46 N) pri najmanjem utrošku snage (303 W) ostvarena je sa zakrivljenim difuzorom na udaljenosti 7 mm od podloge. Također je vidljivo da zakrivljeni difuzor pri većim udaljenostima (9 mm) ostvaruje veće sile adhezije od ostalih difuzora. Iz tog razloga su u nastavku rada razvijani difuzori zakrivljenog tipa te su provedena ispitivanja sa zakrivljenim tipom difuzora.

7. TESTIRANJE UTJECAJA RADIJUSA ZAKRIVLJENOSTI DIFUZORA, EDF 70 mm

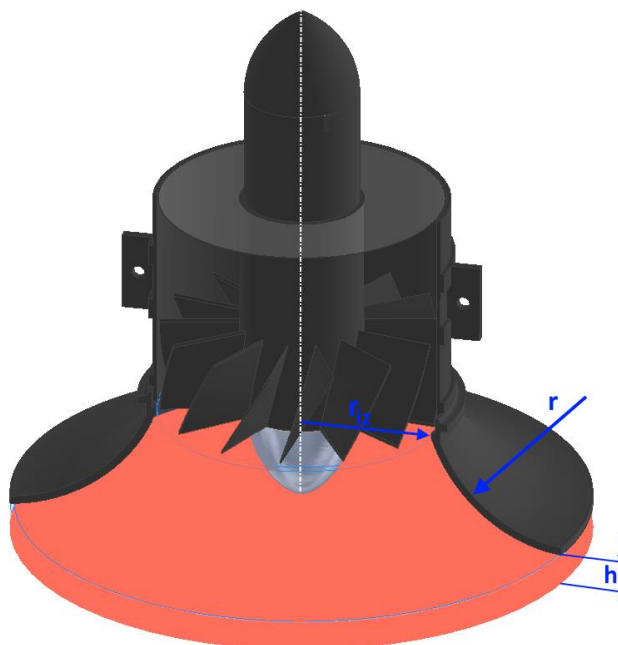
U prošlom poglavlju je prikazano kako zakrivljeni tip difuzora s radijusom zakrivljenosti ostvaruje najveće sile adhezije u usporedbi s ravnim i horizontalnim tipom difuzora. Nakon tog testiranja se postavlja pitanje hoće li promjena radijusa zakrivljenosti utjecati na promjenu rezultata testiranja.

S ciljem smanjenja troškova aditivne proizvodnje različitih difuzora s različitim radijusima zakrivljenosti provedene su simulacije različitih oblika difuzora u programu Ansys Fluent, te su postavljene pretpostavke koje su testirane.

7.1. Simulacije različitih radijusa zakrivljenosti

7.1.1. Ulazni podatci simulacije

Za uspješno simuliranje protoka zraka potrebno je odrediti područje promatranja. Područje promatranja je prikazano na [Slika 59.] označeno crvenom bojom. Crvena boja označava područje zraka koji se nalazi između površine prijanjanja i difuzora na visini h i zrak koji se nalazi u difuzoru.

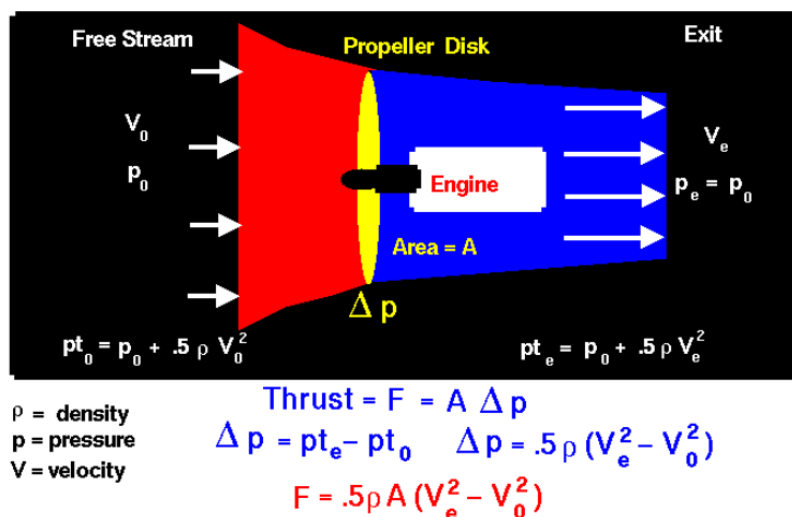


Slika 59. Područje promatranja simulacija

Simulacijom u Ansys Fluent programu moguće je odrediti brzine i tlak unutar označenog područja. Kao ulazni podatak u simulaciju korišten je maseni protok zraka koji je određen eksperimentalnom metodom.

Prilikom izračunavanja masenog protoka zraka potrebno je eksperimentalno odrediti silu potiska. Testiranje sile potiska je provedeno postavljanjem EDF-a na eksperimentalni postav bez difuzora i mjerenjem sile koja se javlja na senzorima sile pri potrošnji od 230 W. Utvrđeno je da se javlja sila potiska od $F_t=2,446$ N.

Potrebno je utvrditi određene pretpostavke koje će olakšati izračun. Promatranjem slučaja EDF-a pretpostavljeno je da brzina zraka na ulasku u EDF $V_0=0$ m/s, dok je gustoću zraka konstanta vrijednost $\rho=1,225$ kg/m³. Nadalje, pomoću sile potiska i formula prikazanih u nastavku [Slika 60.] moguće je izračunati brzinu zraka na izlasku iz EDF-a. [25]



Slika 60. Prikaz EDF motora s popratnim formulama [25]

Gdje je F_t – sila, A – površina propelera, V_e – brzina zraka na izlasku iz EDF-a, V_0 – brzina zraka na ulasku u EDF.

$$F = 0,5\rho A(V_e^2 - V_0^2) \quad (12)$$

$$2,446 = 0,5 \cdot 1,225 \cdot 0,00058(V_e^2 - 0) \quad (13)$$

$$V_e = 82 \text{ m/s} \quad (14)$$

Sljedeći korak je određivanje pretpostavki koje omogućuju simulaciju protoka zraka kroz različite oblike difuzora. Pretpostavka je da brzina na izlasku EDF-a je jednaka brzini na izlasku difuzora, odnosno na izlasku područja promatranja [Slika 59.].

Prema tome je moguće izračunati volumni, a zatim i maseni protok zraka kroz izlaz difuzora prema sljedećim formulama. Gdje je q_v – volumni protok zraka, q_m – maseni protok zraka, A_{iz} – izlazna površina promatranog područja.

$$A_{iz} = r_{iz}^2 \pi \quad (15)$$

$$q_v = AV_e = r_{iz}^2 \pi V_e \quad (16)$$

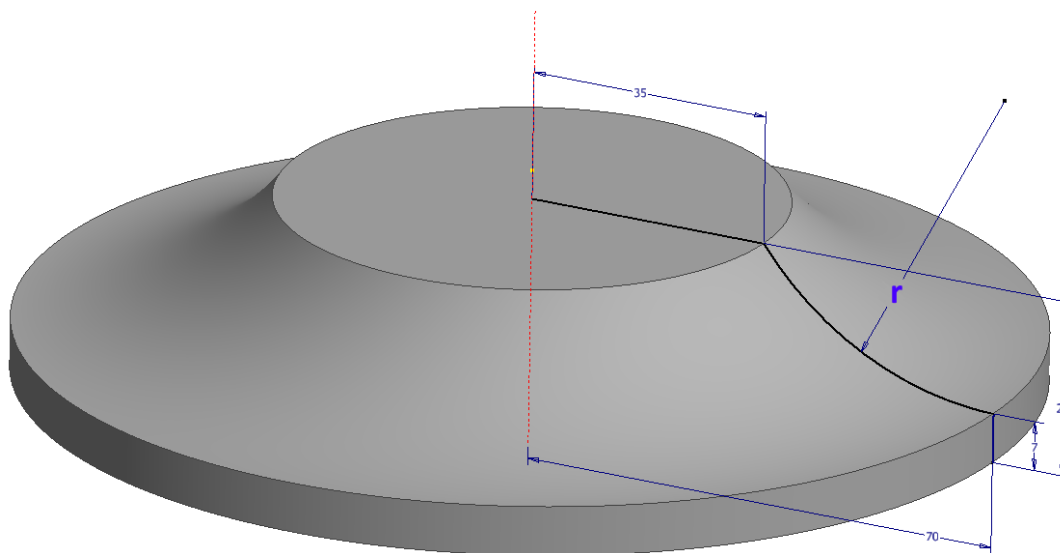
$$q_m = q_v \rho = r_{iz}^2 \pi V_e \rho \quad (17)$$

$$q_m = 0,0035^2 \cdot \pi \cdot 82 \cdot 1,225 \quad (18)$$

$$q_m = 0,3865 \text{ kg/s} \quad (19)$$

7.1.2. Geometrija ispitivanih difuzora

Kako bi se pronašao optimalni radijus zakrivljenosti difuzora ulazni i izlazni promjer difuzora kao i udaljenost od podloge ostaju konstantni, a mijenja se radijus zakrivljenosti r .

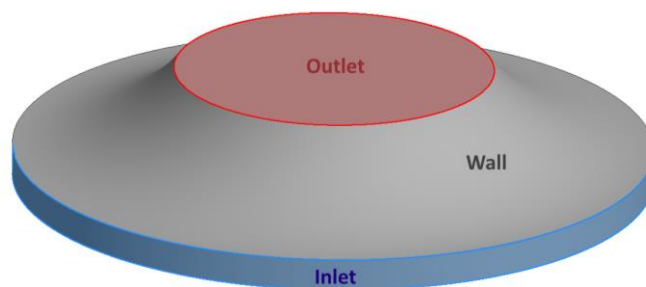


Slika 61. Prikaz promatranog područja s označenim dimenzijama

Ispitivani radijusi zakrivljenosti su 30 mm, 36 mm (pošto je taj oblik difuzora već proizveden aditivnom tehnologijom), 40 mm, 45 mm, 50 mm i 55 mm.

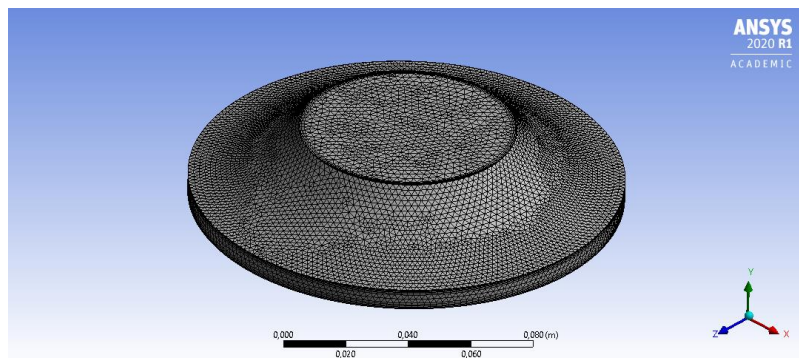
7.1.3. Postavke Ansys Fluent simulacije

Na početku su definirane površine kao što su prikazane na [Slika 62.]. Kao 'Outlet' je definirana izlazna površina područja promatranja, kao 'Inlet' ulazna površina područja promatranja, a ostale površine su definirane kao zid odnosno 'Wall'.



Slika 62. Definiranje površina

Zatim je za svaku simulaciju napravljen Mesh s 'Adaptive Sizingom' rezolucije 7, visoke kvalitete 'Smoothing' efekta i 'Inflation' po površinama naziva 'Wall'. Na [Slika 61.] je prikazan primjerni izgled Mesh-a na području promatranja radijusa zakrivljenosti $r=45$ mm.



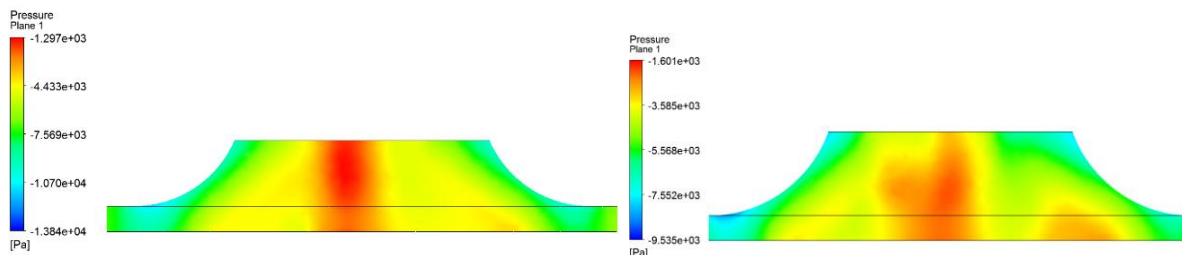
Slika 63. Prikaz Mesh-a za područje promatranja radijusa zakrivljenosti $r=45$ mm

Simulacije u Fluentu su provedene s Double Precision opcijom, dok je metoda odabrana 'k-omega SST'. Kao rubni uvjeti za Inlet je odabran 'pressure-inlet' s apsolutnom tlakom 0 Pa, dok je za Outlet odabran 'mass-flow-outlet' s masenim protokom od 0,3865 kg/s. Za Wall je odabran 'Stationary Wall' s 'No slip' uvjetom. Za metode rješavanja 'Momentum', 'Turbulent Kinetic Energy' i 'Specific Dissipation Rate' je odabrana 'Second Order Upwind' metoda.

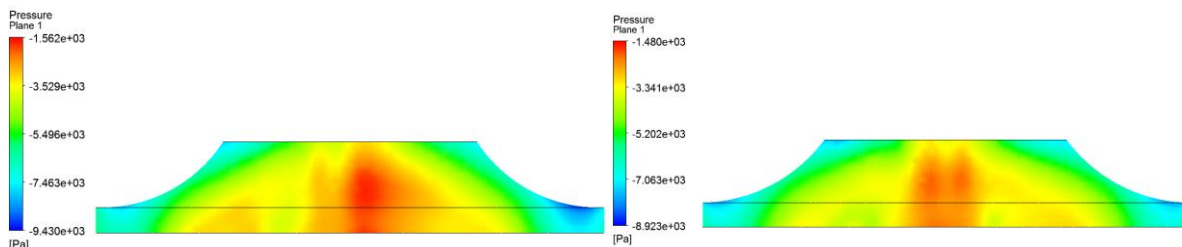
U nastavku su prikazani rezultati.

7.1.4. Rezultati Ansys Fluent simulacija

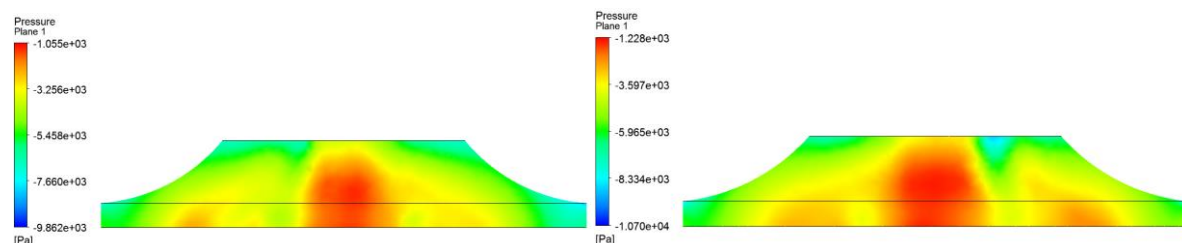
Na slikama u nastavku su prikazani rezultati simulacija za različite radijuse zakrivljenosti difuzora ulaznog radijusa 70 mm na udaljenosti 7 mm od površine pranja.



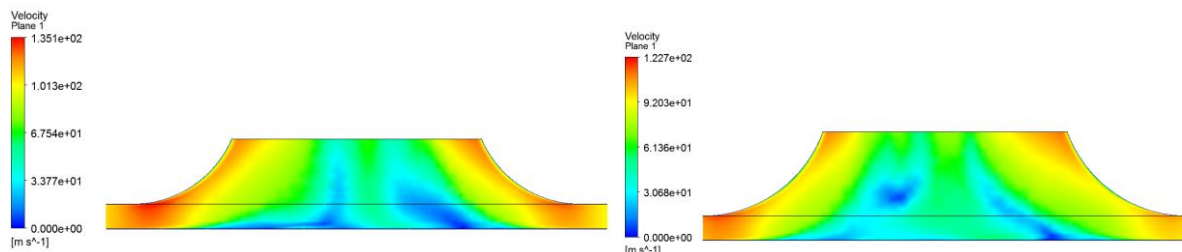
Slika 64. Rezultati simulacije tlaka za radijus 30 mm (lijevo) i 36 mm (desno)



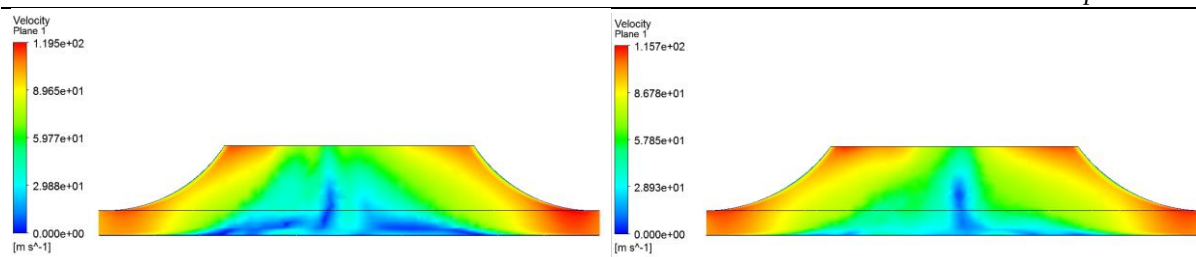
Slika 65. Rezultati simulacije tlaka za radijus 40 mm (lijevo) i 45 mm (desno)



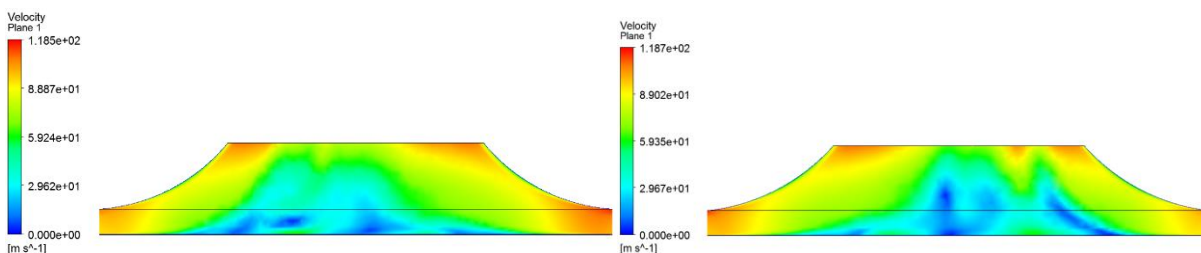
Slika 66. Rezultati simulacije tlaka za radijus 50 mm (lijevo) i 55 mm (desno)



Slika 67. Rezultati simulacije brzine strujanja zraka za radijus 30 mm (lijevo) i 36 mm (desno)



Slika 68. Rezultati simulacije brzine strujanja zraka za radijus 40 mm (lijevo) i 45 mm (desno)



Slika 69. Rezultati simulacije brzine strujanja zraka za radijus 50 mm (lijevo) i 55 mm (desno)

U nastavku je prikazana tablica koja prikazuje brzine strujanja zraka i tlakove koji se javljaju u unutar difuzora prilikom simulacija.

Tablica 3. Prikaz rezultata simulacija različitih radijusa zakrivljenosti na udaljenosti od 7mm

Radijus zakrivljenosti [mm]	Minimalni tlak [Pa]	Maksimalna brzina [m/s]
30	-1297	135,1
36	-1601	122,7
40	-1562	119,5
45	-1480	115,7
50	-1055	118,5
55	-1228	118,7

Prema podacima dobivenim u simulacijama, a prikazanim u tablici je vidljivo da je najveći podtlak (-1601 Pa) ostvaren pomoću difuzora radijusa zakrivljenosti $r=36$ mm, dok je najmanji (-1055 Pa) ostvaren pomoću radijusa zakrivljenosti $r=50$ mm. Iz dobivenih rezultata je moguće postaviti pretpostavku da će sila adhezije (pri udaljenosti $h=7$ mm) koju ostvaruje difuzor radijusa $r=36$ mm biti veća nego što ju ostvaruje difuzor radijusa zakrivljenosti $r=50$ mm. Razlog tome je što na istoj površini djeluje veća razlika tlakova, što stvara veću silu na difuzor.

7.2. Testiranje pretpostavke o radijusima zakrivljenosti

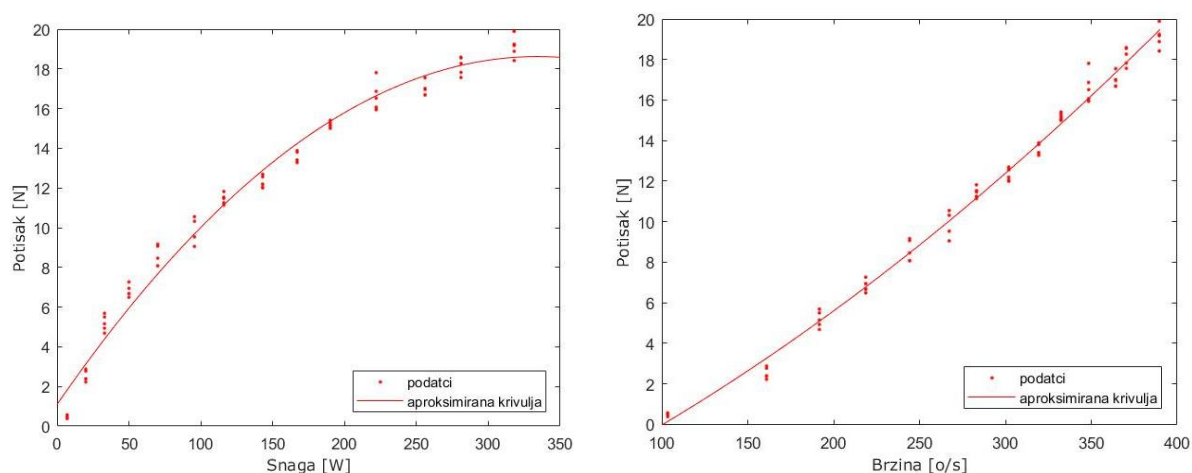
7.2.1. Udaljenost 7 mm od podloge prijanjanja

Kako je prije navedeno pretpostavka je da će difuzor s radijusom zakrivljenosti $r=36$ mm imati ostvarivati veće sile adhezije od difuzora radijusa zakrivljenosti $r=50$ mm. S ciljem dokazivanja pretpostavke testirani su difuzori s radijusom zakrivljenosti $r=36$ mm i $r=50$ mm.

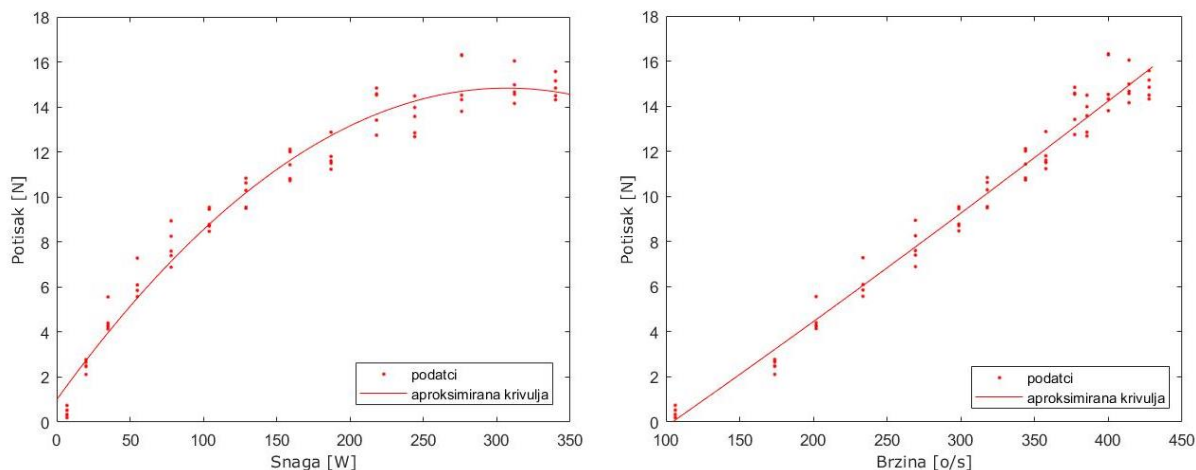


Slika 70. Prikaz difuzora s radijusom zakrivljenosti $r=50$ mm (lijevo) i $r=36$ mm (desno)

Testiranje je provedeno pomoću izvora napajanja s konstantnim naponom od 13V i VESC-om s ograničenjem struje motora na 50A. Testiranje je provedeno na udaljenosti 7 mm od površine prijanjanja i rezultati su prikazani u nastavku. Testiranje je provedeno na glatkoj površini prikazanoj na [Slika 118.].

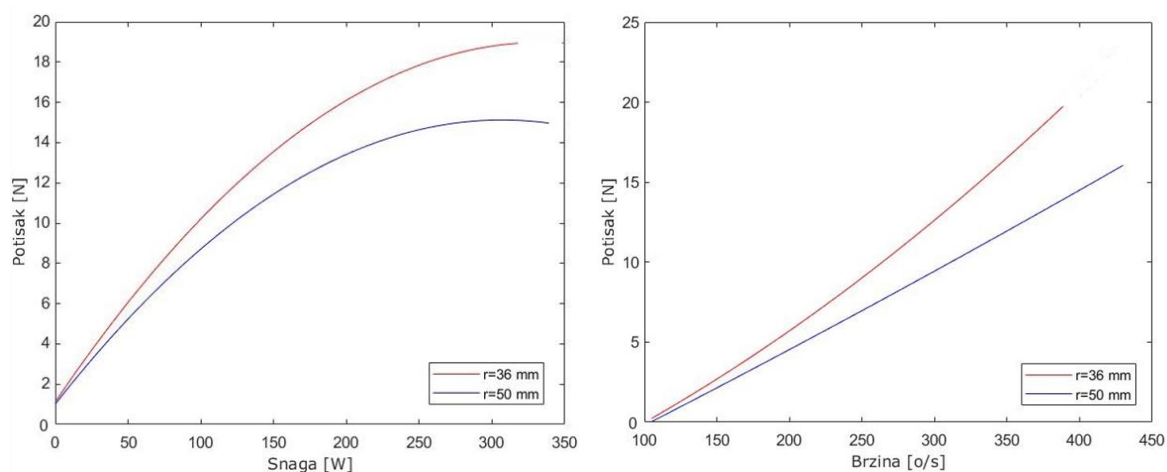


Slika 71. Grafovi odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i adhezije (desno) difuzora s radijusom zakrivljenosti $r=36$ mm na udaljenosti 7 mm



Slika 72. Grafovi odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i adhezije (desno) difuzora s radijusom zakrivljenosti $r=50$ mm na udaljenosti 7 mm

U nastavku je prikazana grafička usporedba dvaju difuzora.



Slika 73. Grafička usporedba odnosa snage i potiska (lijevo), broja okretaja i potiska (desno) difuzora radijusa zakrivljenosti $r=36$ mm i $r=50$ mm na udaljenosti 7 mm

Iz grafova je jasno vidljivo da difuzor radijusa zakrivljenosti $r=36$ mm ostvaruje veće sile adhezije. Prema tome je moguće zaključiti da je pretpostavka bila točna i potvrđuje da veća razlika tlakova (razlika podtlaka unutar difuzora i atmosferskog tlaka) ostvaruje veću silu na difuzor. Bitno je napomenuti da je iz grafova na [Slika 72.] vidljivo kako difuzor radijusa zakrivljenosti $r=50$ mm pri snazi od 275 W ulazi u područje zasićenja nakon kojeg povećanjem brzine i potrošnje snage sila adhezije ne raste. Pretpostavka koja opisuje tu pojavu je da gustoća zraka nije dovoljno velika da bi se povećanjem brzine vrtnje ostvario veći potisak.

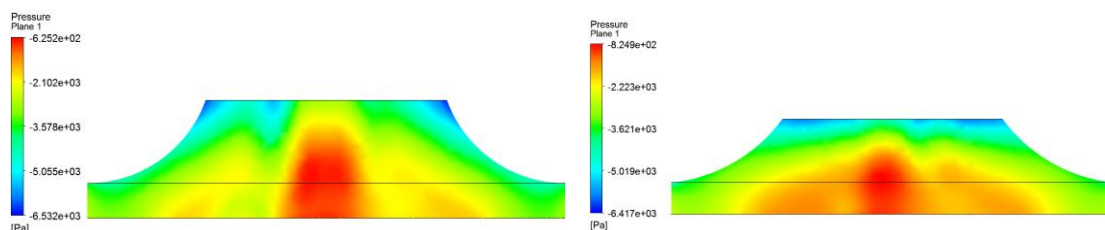
S ciljem dodatnog potvrđivanja pretpostavke, da veća razlika tlakova ostvaruje veću silu, u nastavku su prikazane simulacije i testiranja ovih dvaju difuzora (radijusa zakrivljenosti $r=36$ mm i $r=50$ mm) na udaljenostima 10 i 12 mm od podloge prijanjanja.

Udaljenosti (7, 10 i 12 mm) su odabrane jer se nalaze u optimalnom rasponu udaljenosti za konstrukciju robota. Udaljenosti manje od 7 mm ne ostvaruju dovoljan razmak od površine prijanjanja te bi postojala opasnost od kolizije difuzora i površine kretanja, dok na udaljenostima većim od 12 mm očekujemo znatan pad komponente negativnog tlaka u sili adhezije.

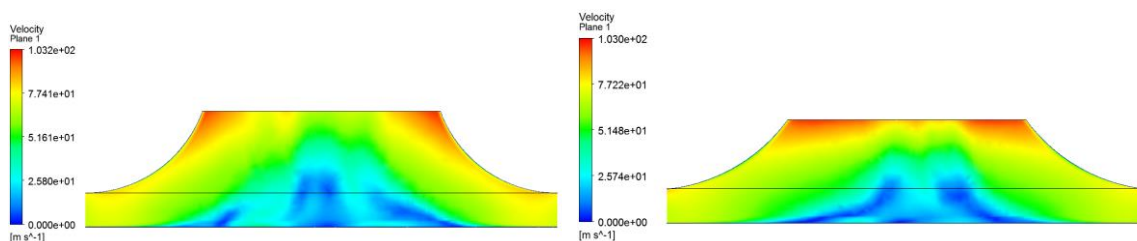
7.2.2. Udaljenost 10 mm od podloge prijanjanja

7.2.2.1. Rezultati simulacije u Ansys Fluent-u difuzora različitog radijusa zakrivljenosti pri udaljenosti 10 mm

Postavke simulacija su iste kao što je ranije u tekstu navedeno. Parametar koji se promijenio je udaljenost od podloge prijanjanja i sada iznosi 10 mm. Rezultati simulacija su prikazani u nastavku.



Slika 74. Rezultati simulacije tlaka zraka za radijus 36 mm (lijevo) i 50 mm (desno) pri udaljenosti 10 mm

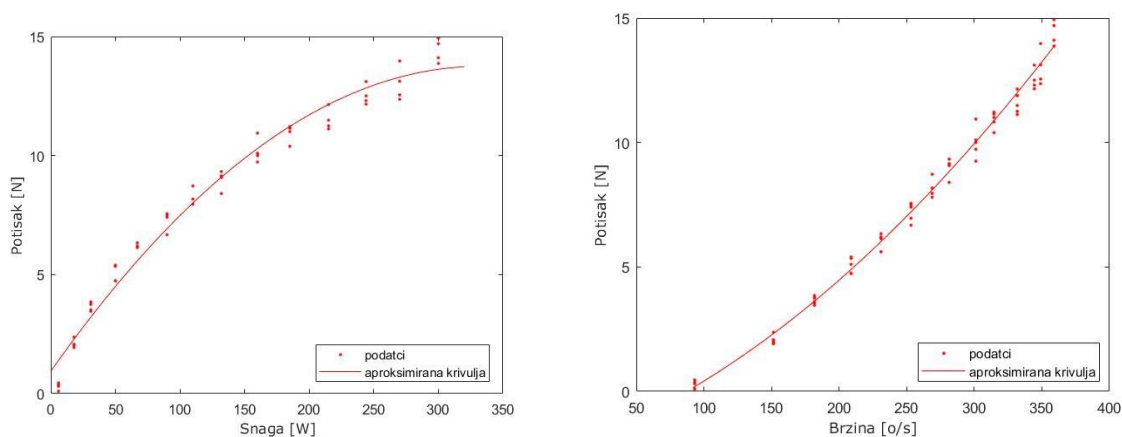


Slika 75. Rezultati simulacije brzine strujanja zraka za radijus 36 mm (lijevo) i 50 mm (desno) pri udaljenosti 10 mm

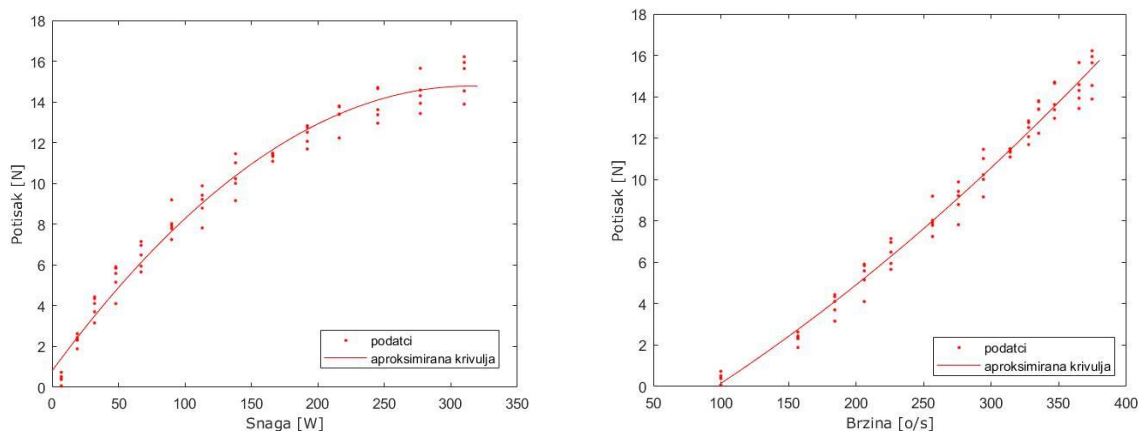
Rezultati su tablično prikazani u [Tablica 4.]

7.2.2.2. Rezultati testiranja difuzora različitog radijusa zakrivljenosti pri udaljenosti 10 mm

Testiranje je provedeno pomoću izvora napajanja s konstantnim naponom od 13V i VESC-om s ograničenjem struje motora na 50 A. Testiranje je provedeno na udaljenosti 10 mm od površine prijanjanja i rezultati su prikazani u nastavku. Testiranje je provedeno na glatkoj površini prikazanoj na [Slika 118.].



Slika 76. Grafovi odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i adhezije (desno) difuzora s radijusom zakrivljenosti $r=36$ mm na udaljenosti 10 mm



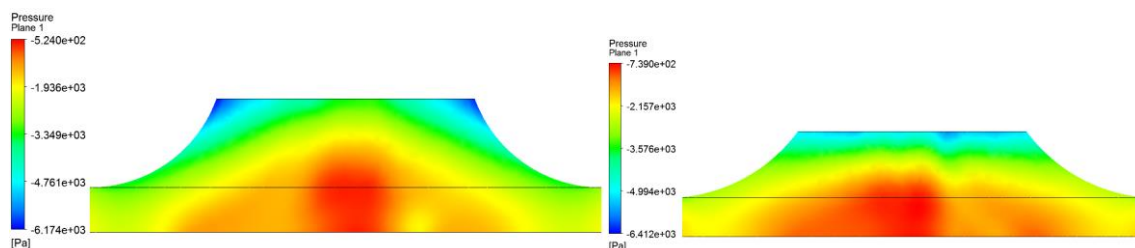
Slika 77. Grafovi odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i adhezije (desno) difuzora s radijusom zakrivljenosti $r=50$ mm na udaljenosti 10 mm

Usporedba je grafički prikazana na [Slika 82.].

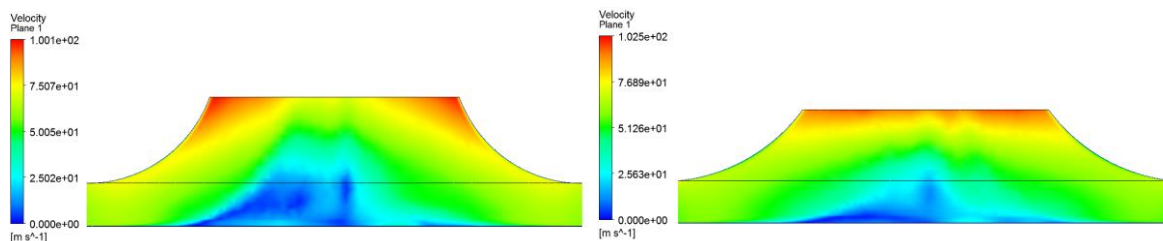
7.2.3. Udaljenost 12 mm od podloge prijanjanja

7.2.3.1. Rezultati simulacije u Ansys Fluent-u difuzora različitog radijusa zakrivljenosti pri udaljenosti 12 mm

Postavke simulacija su iste kao što je ranije u tekstu navedeno. Parametar koji se promijenio je udaljenost od podloge prijanjanja i sada iznosi 12 mm.



Slika 78. Rezultati simulacije tlaka zraka za radijus 36 mm (lijevo) i 50 mm (desno) pri udaljenosti 12mm

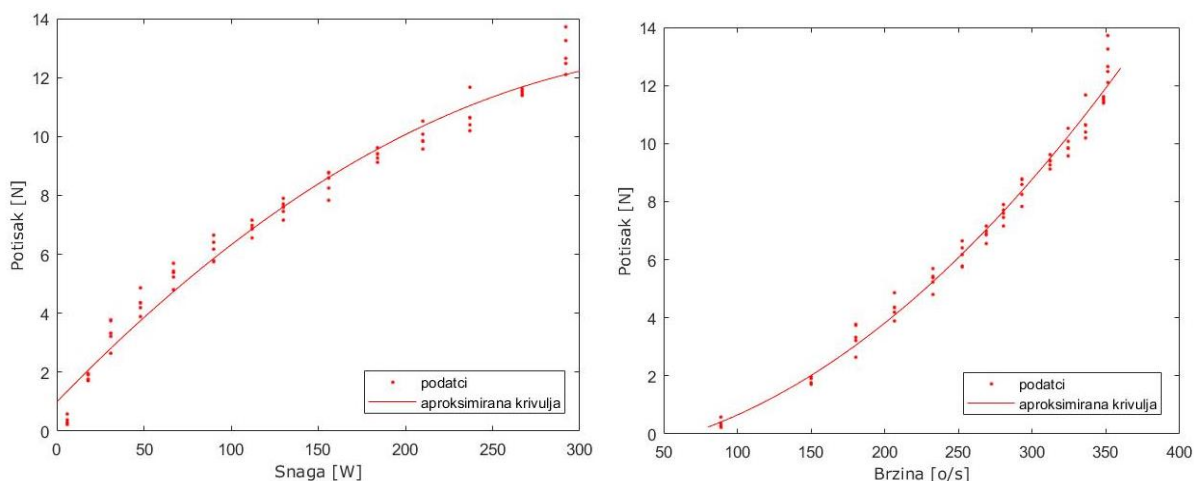


Slika 79. Rezultati brzine strujanja zraka za radijus 36 mm (lijevo) i 50 mm (desno) pri udaljenosti 12mm

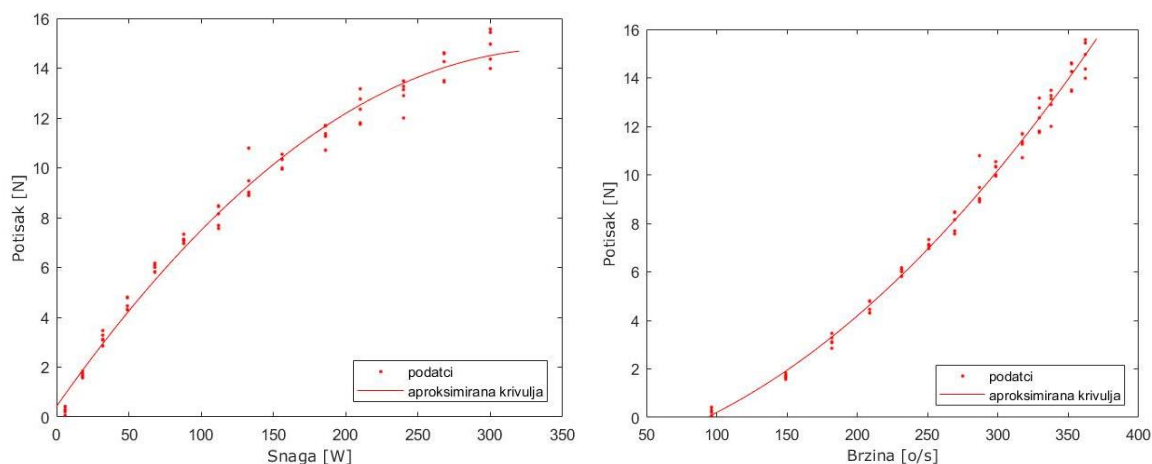
Rezultati su tablično prikazani u [Tablica 4.]

7.2.3.2. Rezultati testiranja difuzora različitog radijusa zakrivljenosti pri udaljenosti 12 mm

Testiranje je provedeno pomoću izvora napajanja s konstantnim naponom od 13V i VESC-om s ograničenjem struje motora na 50A. Testiranje je provedeno na udaljenosti 12 mm od površine prijanjanja i rezultati su prikazani u nastavku. Testiranje je provedeno na glatkoj površini prikazanoj na [Slika 118.].



Slika 80. Grafovi odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i adhezije (desno) difuzora s radijusom zakrivljenosti $r=36$ mm na udaljenosti 12 mm

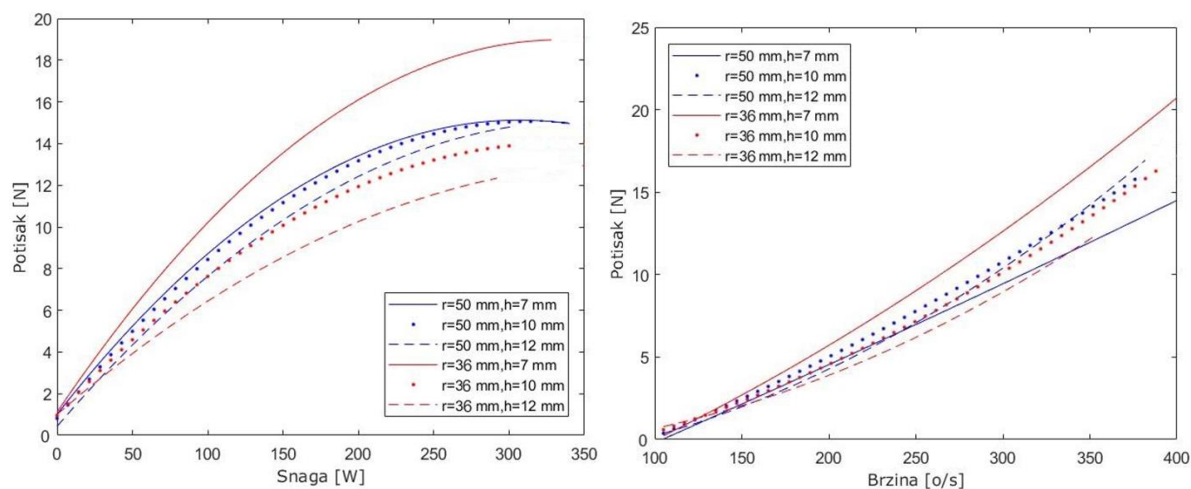


Slika 81. Grafovi odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i adhezije (desno) difuzora s radijusom zakrivljenosti $r=50$ mm na udaljenosti 12 mm

Usporedba je grafički prikazana na [Slika 82.].

7.3. Usporedba sila adhezije dobivenih testiranjem s rezultatima simulacije difuzora različitih radijusa zakrivljenosti

U nastavku je grafički prikazana usporedba difuzora s radijusima zakrivljenosti $r=36$ mm i $r=50$ mm na udaljenostima 7, 10 i 12 mm od podloge prijanjanja.



Slika 82. Usporedbe adhezije difuzora s radijusom zakrivljenosti $r=36$ mm i $r=50$ mm pri različitim udaljenostima od podloge prijanjanja

Dok su u tablici prikazane ostvarene prosječne maksimalne sile adhezije, te tlakovi i brzine koje su dobivene simulacijom. Podatci u tablici su poredani od najveće sile adhezije prema najmanjoj.

Tablica 4. Prikaz rezultata simulacija i testiranja različitih radijusa zakrivljenosti na udaljenostima 7, 10 i 12 mm

	Sila adhezije [N]	Minimalni tlak [Pa]	Maksimalna brzina [m/s]
$r=36$ mm, $h=7$ mm	19,12	-1601	135,1
$r=50$ mm, $h=10$ mm	15,25	-824	103
$r=50$ mm, $h=7$ mm	14,88	-1055	118,5
$r=50$ mm, $h=12$ mm	14,86	-739	102,5
$r=36$ mm, $h=10$ mm	14,46	-625	103,2
$r=36$ mm, $h=12$ mm	12,84	-524	100,1

Prema rezultatima u [Tablica 4.] vidljivo je da je najveća sila adhezije u slučajevima najvećeg podtlaka uz jednu iznimku, a to je pri radijusu zakrivljenosti $r=50$ mm, $h=10$ mm. Tu iznimku je moguće objasniti promatrajući lijevi graf na [Slika 82.]. Simulacije su provedene prema podacima testiranja gdje je potrošna snaga motora iznosila 230W. Moguće je primijetiti kako je pri toj snazi sila adhezije $r=50$ mm, $h=7$ mm veća od $r=50$ mm, $h=10$ mm.

Iz ovoga je moguće potvrditi zaključak da je sila adhezije veća kad je podtlak unutar difuzora veći. Prema tome je moguće zaključiti da je simulacijom moguće optimirati radijus zakrivljenosti kako bi ostvarivali najbolje rezultate za određenu udaljenost od podloge prianjanja. Promatrajući rezultate $r=36$ mm, $h=7$ mm i $r=50$ mm, $h=7$ mm vidljivo je kako je optimizacijom difuzora pri istoj udaljenosti od površine moguće dobiti poboljšanje od 28% maksimalne sile adhezije.

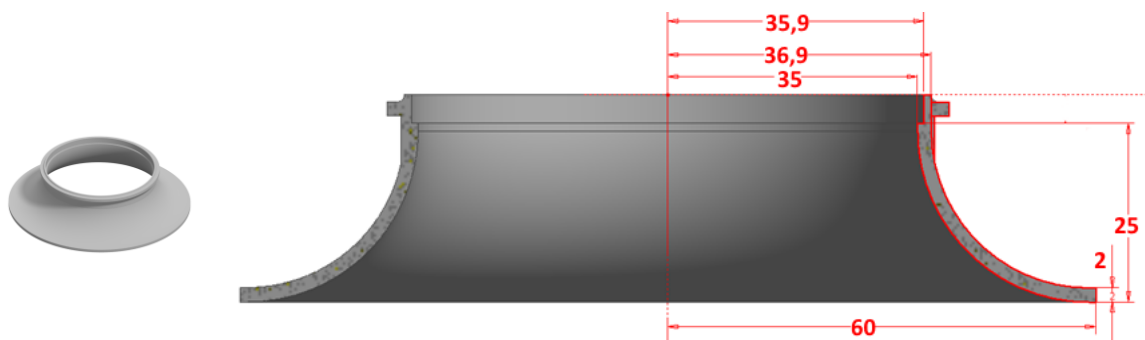
8. TESTIRANJE DIFUZORA RAZLIČITIH PROMJERA, EDF 70 mm

U nastavku je prikazana geometrija i rezultati testiranja difuzora različitih promjera. Difuzori koji su testirani su promjera $d=120$ mm i $d=160$ mm. Promjer difuzora je odabran kao 20 mm veći i 20 mm manji od difuzora koji se koristio u testiranju različitih radijusa zakrivljenosti ($d=140$ mm). Difuzori su testirani na udaljenostima $h=7$, 10 i 12 mm kako bi bili usporedivi s rezultatima testiranih zakrivljenih difuzora

Testiranja su provedena pod istim uvjetima kao i testiranje različitih radijusa zakrivljenosti, odnosno testiranje je provedeno pomoću izvora napajanja s konstantnim naponom od 13V i VESC-om s namještenom granicom struje motora od 50 A. Testiranje je provedeno na glatkoj površini prikazanoj na [Slika 118.].

8.1. Testiranje zakrivljenog difuzora promjera $d=120$ mm

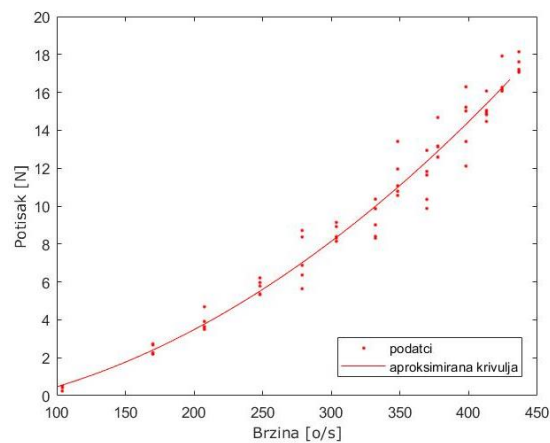
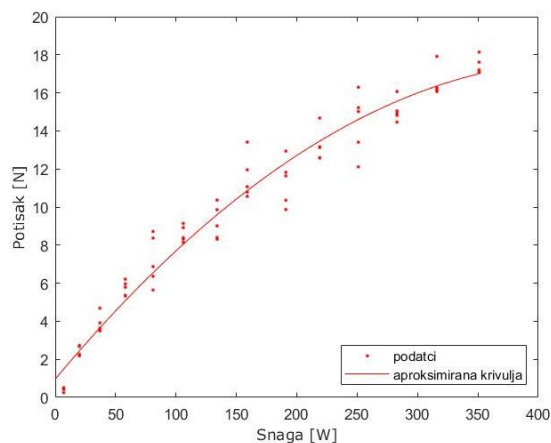
Geometrija difuzora promjera $d=120$ mm je prikazana u nastavku.



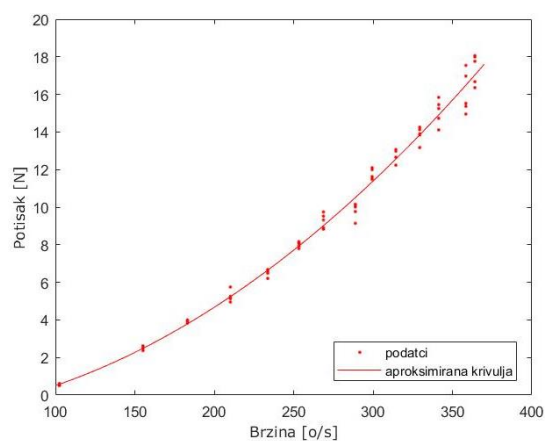
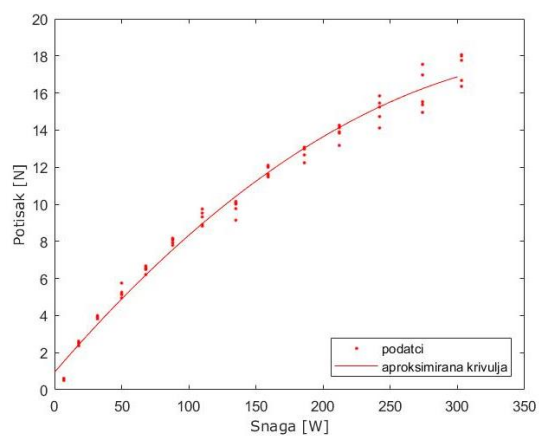
Slika 83. Geometrija difuzora $d=120$ mm za EDF 70mm

U nastavku su grafički prikazani odnosi potrošnje snage motora i sile adhezije kao i odnosi broja okretaja motora i sile adhezije [Slika 84.] dobiveni testiranjem na udaljenostima $h=7$, 10 i 12 mm.

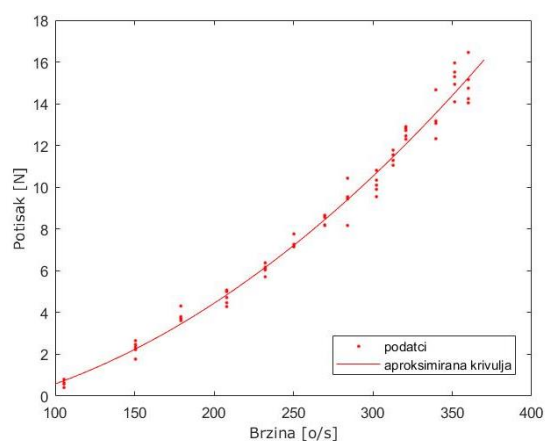
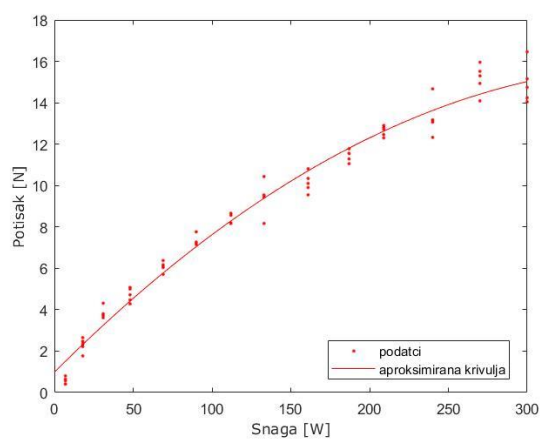
Promatrajući rezultate na [Slika 84.] vidljivo je da se pri udaljenosti $h=7$ mm javlja veliko rasipanje podataka. Razlog tom rasipanju su mehaničke vibracije postava. Vidljivo je da je rasipanje podataka, a ujedno i vibracije manje pri većim udaljenostima od podloge.



(a)



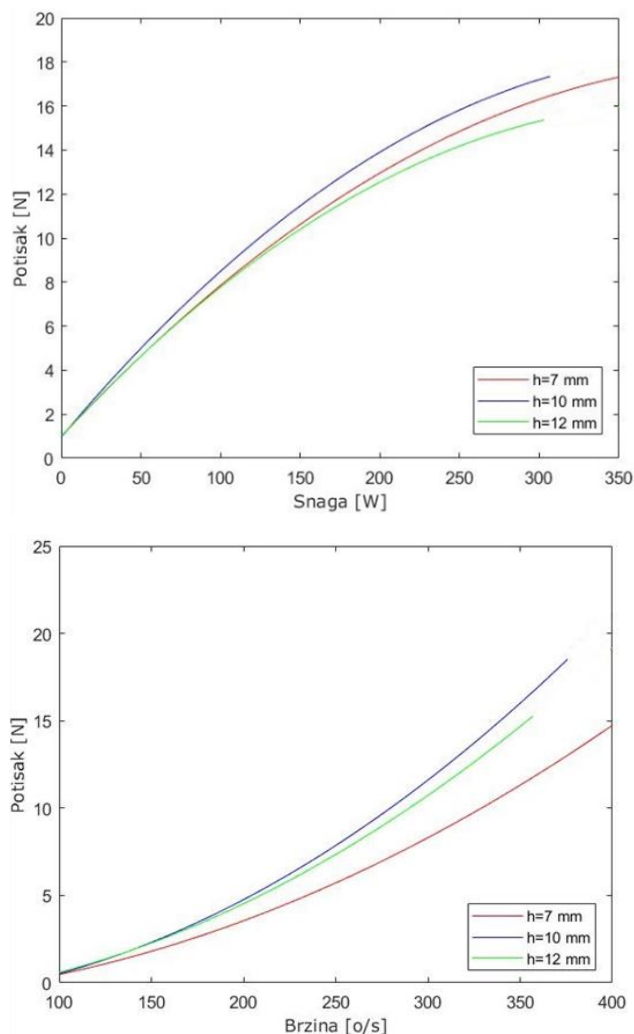
(b)



(c)

Slika 84. Grafovi snage i sile adhezije (lijevo) i broja okretaja i sile adhezije (desno) za difuzor $d=120$ mm na udaljenosti 7 mm (a), 10 mm (b) i 12 mm (c) od podloge

Na [Slika 85.] je prikazana grafička usporedba rezultata difuzora $d=120$ mm na različitim udaljenostima od podloge.



Slika 85. Grafička usporedba odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i sile adhezije (desno) difuzora $d=120$ mm na različitim udaljenostima od podloge

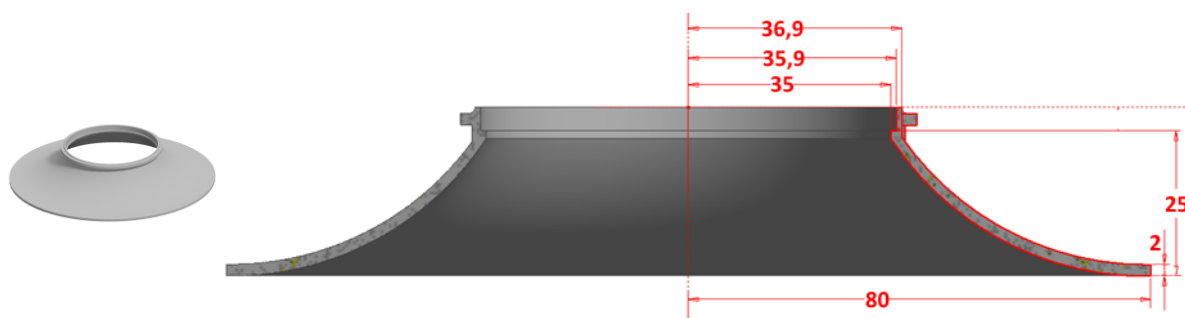
Tablica 5. Podatci dobiveni testiranjem difuzora $d=120$, EDF 70 mm

	Sila adhezije [N]	Snaga [W]	Broj okretaja [o/s]	Gustoća snage [N/W]	Omjer A_{iz}/A_{ul}
$d=120\text{mm}$, $h=7$ mm	16,52	300	436	0,055	1,2
$d=120\text{mm}$, $h=10$ mm	17,37	303	364	0,057	0,84
$d=120\text{mm}$, $h=12$ mm	14,93	300	360	0,050	0,7

Najveća sila adhezije difuzora $d=120$ mm je ostvarena pri udaljenosti $h=10$ mm te iznosi 17,37 N, pri potrošnji snage 303 W, 364 o/s i omjeru A_{iz}/A_{ul} 0,84.

8.2. Testiranje zakrivljenog difuzora promjera $d=160\text{mm}$

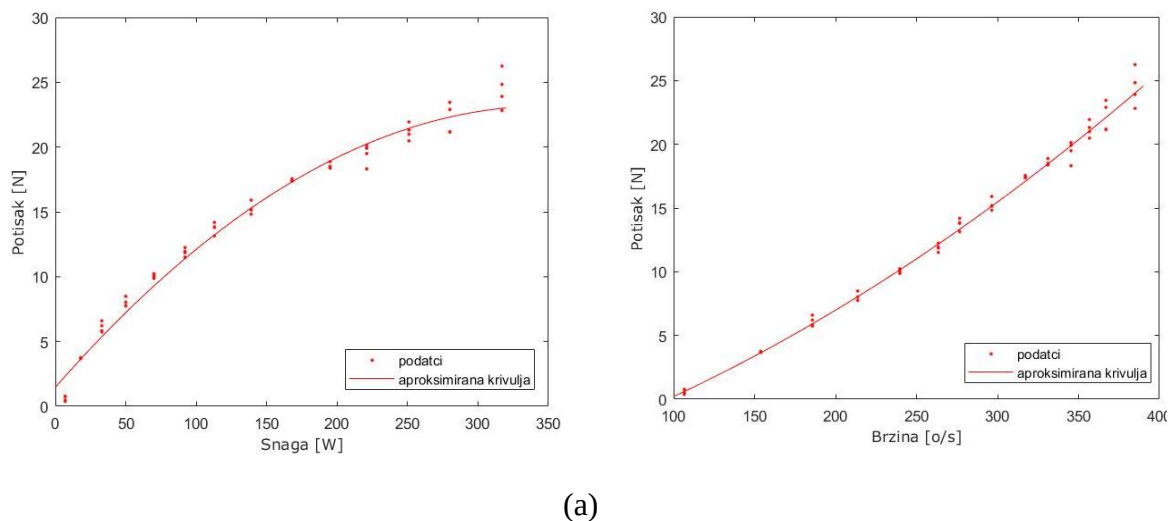
Geometrija difuzora promjera $d=120\text{ mm}$ je prikazana u nastavku.



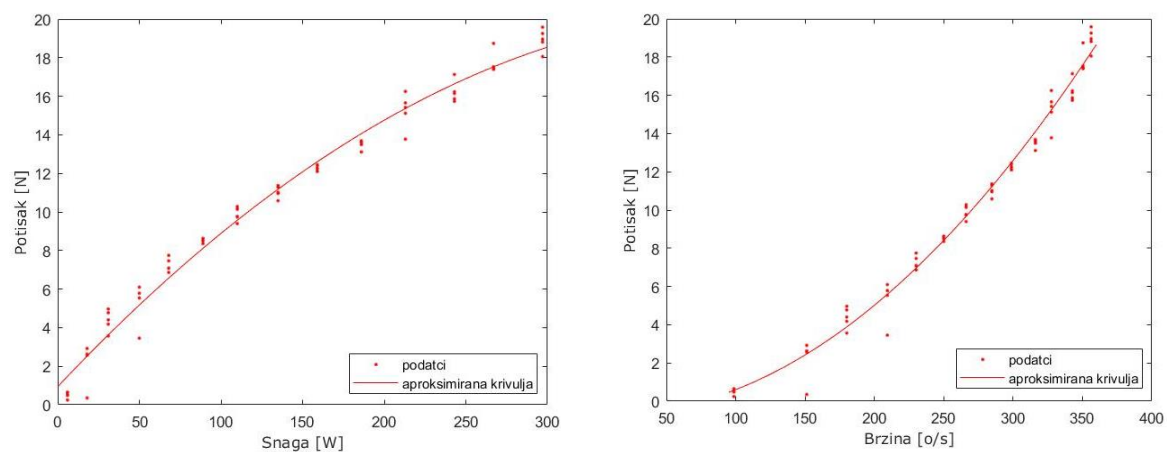
Slika 86. Geometrija difuzora $d=160\text{ mm}$ za EDF 70mm

U nastavku su grafički prikazani odnosi potrošnje snage motora i sile adhezije kao i odnosi broja okretaja motora i sile adhezije [Slika 87.] dobiveni testiranjem na udaljenostima $h=7, 10$ i 12 mm .

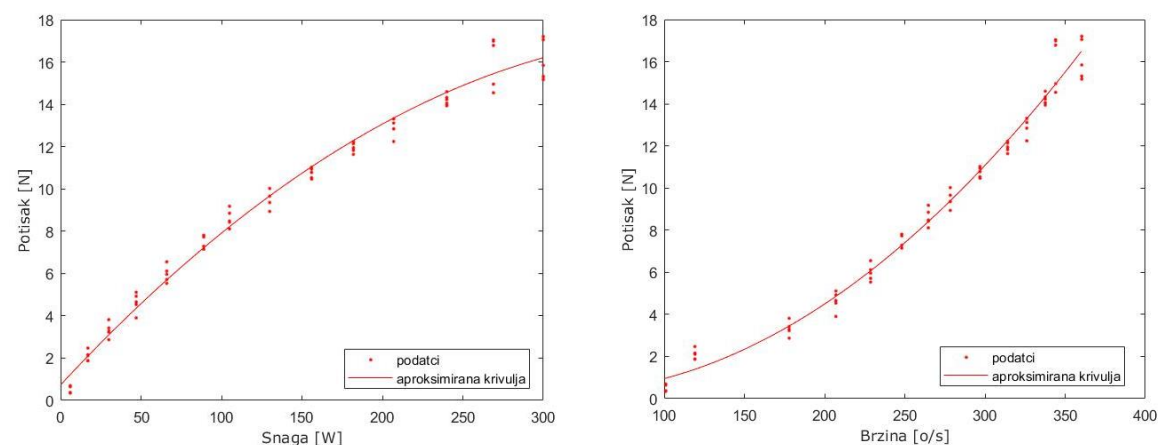
Na grafovima [Slika 87.] nema rasipanja podataka kao kod difuzora $d=120\text{ mm}$, razlog tome je što su vibracije manje.



(a)



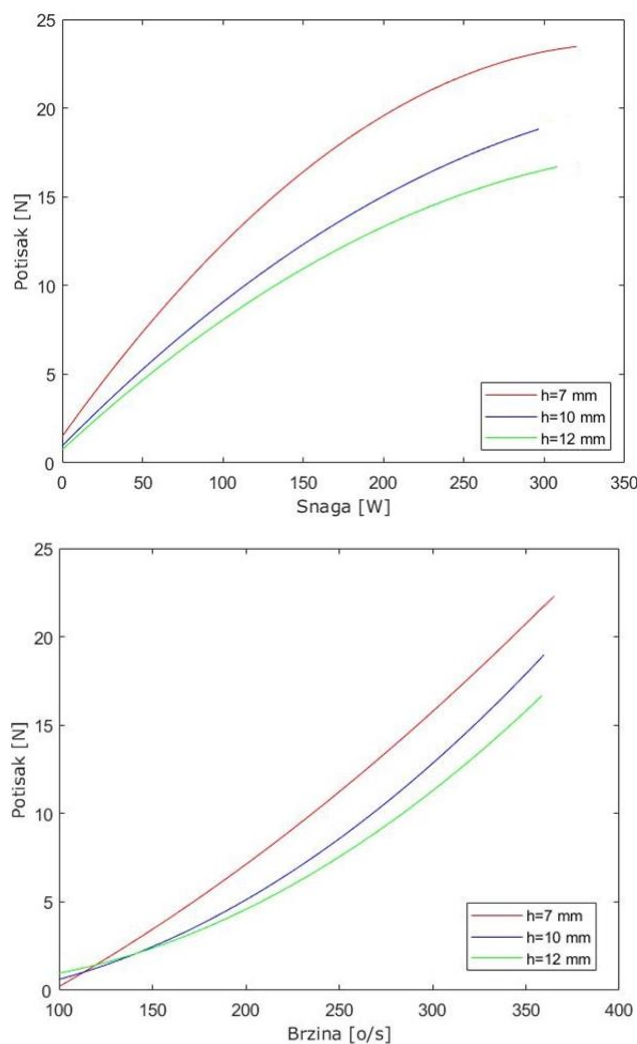
(b)



(c)

Slika 87. Grafovi snage i sile adhezije (lijevo) i broja okretaja i adhezije (desno) za difuzor $d=160$ mm na udaljenosti 7 mm (a), 10 mm (b) i 12 mm (c) od podloge

Na [Slika 88.] je prikazana grafička usporedba rezultata difuzora $d=160$ mm na različitim udaljenostima od podloge.



Slika 88. Grafička usporedba odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i sile adhezije(desno) difuzora $d=160$ mm na različitim udaljenostima od podloge

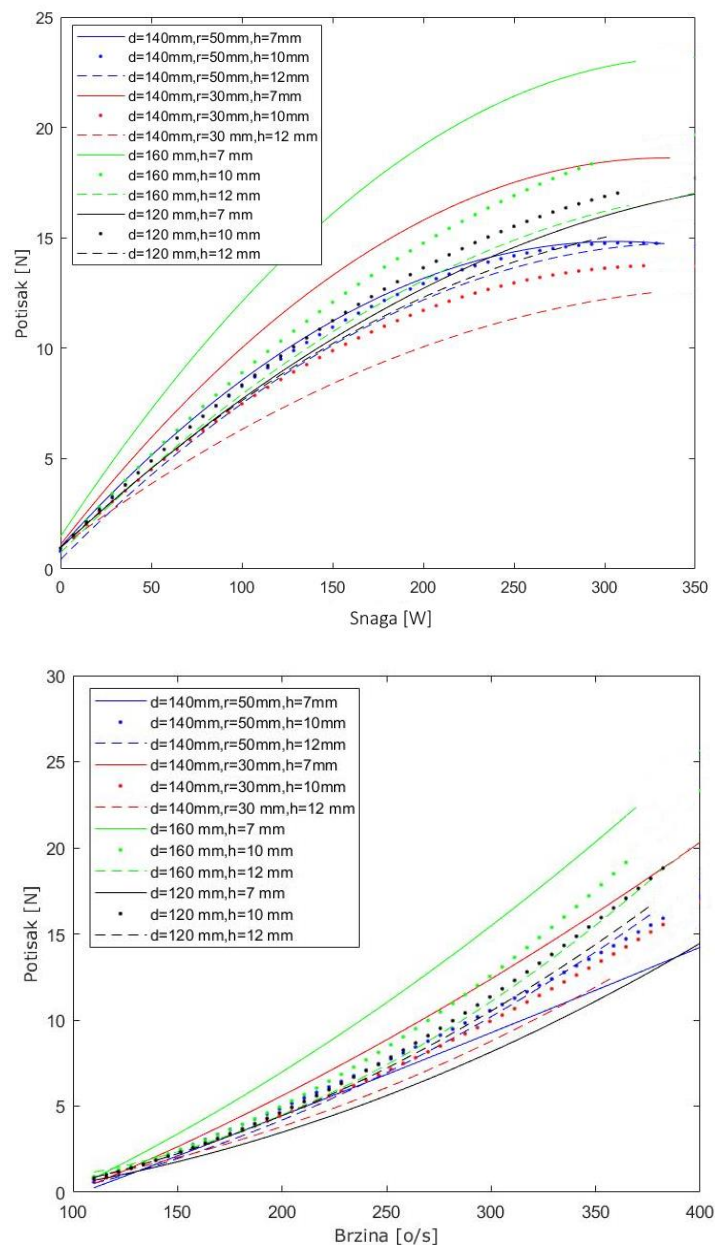
Tablica 6. Podatci dobiveni testiranjem difuzora $d=160$, EDF 70 mm

	Sila adhezije [N]	Snaga [W]	Broj okretaja [o/s]	Gustoća snage [N/W]	Omjer A_{iz}/A_{ul}
$d=160$ mm, $h=7$ mm	24,51	317	384	0,077	0,9
$d=160$ mm, $h=10$ mm	18,93	297	356	0,064	0,63
$d=160$ mm, $h=12$ mm	16,12	300	360	0,054	0,53

Najveća sila adhezije difuzora $d=160$ mm je ostvarena pri udaljenosti $h=7$ mm te iznosi 24,51 N, pri potrošnji snage 317 W, 384 o/s i omjeru A_{iz}/A_{ul} 0,9.

8.3. Usporedba rezultata zakrivljenih difuzora

U nastavku je grafički i tablično prikazana usporedba rezultata zakrivljenih difuzora različitog promjera d kao i usporedba s različitim radijusima zakrivljenosti r .



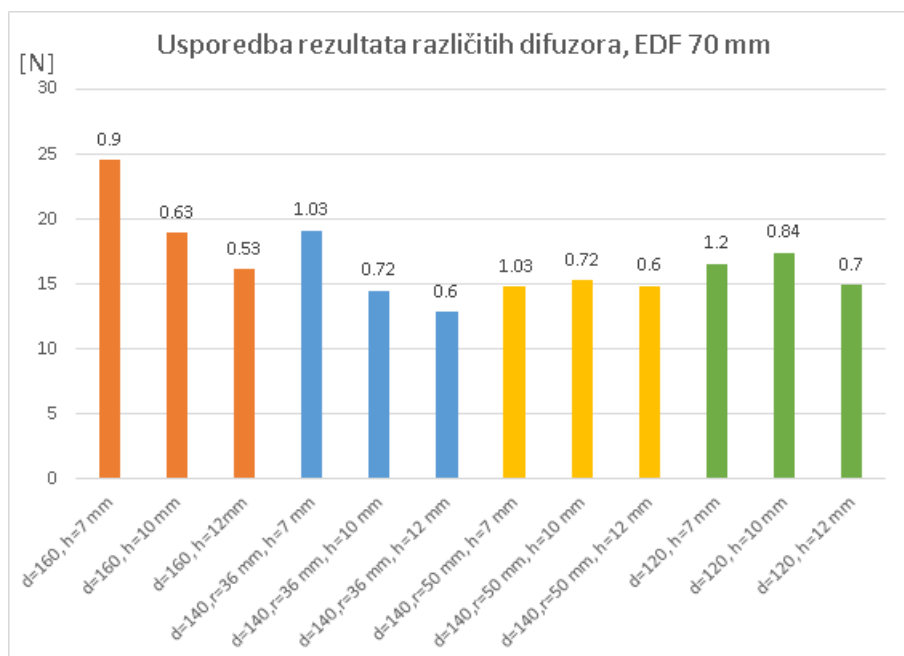
Slika 89. Grafička usporedba odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i sile adhezije(desno) različitih difuzora EDF-a 70 mm

U [Tablica 7.] su prikazani rezultati poredani od maksimalne prema minimalnoj ostvarenoj sili adhezije.

Tablica 7. Podatci različitih difuzora testiranih na motoru 70 mm

	Sila adhezije [N]	Snaga [W]	Broj okretaja [o/s]	Gustoća snage [N/W]	Omjer A_{iz}/A_{ul}
d=160, h=7 mm	24,51	317	384	0,077	0,90
d=140,r=36 mm, h=7 mm	19,12	318	389	0,060	1,03
d=160, h=10 mm	18,932	297	356	0,064	0,63
d=120, h=10 mm	17,37	303	364	0,057	0,84
d=120, h=7 mm	16,52	300	436	0,055	1,20
d=160, h=12 mm	16,12	300	360	0,054	0,53
d=140,r=50 mm, h=10 mm	15,25	310	374	0,049	0,72
d=120, h=12 mm	14,93	300	360	0,049	0,70
d=140,r=50 mm, h=7 mm	14,88	312	413	0,047	1,03
d=140,r=50 mm, h=12 mm	14,86	300	362	0,049	0,60
d=140,r=36 mm, h=10 mm	14,46	300	359	0,047	0,72
d=140,r=36 mm, h=12 mm	12,84	292	351	0,044	0,60

Na [Slika 90.] je zornije prikazana usporedba različitih difuzora s ispisanim omjerima A_{iz}/A_{ul} na vrhovima stupaca.



Slika 90. Usporedba difuzora, EDF-a 70 mm, gdje su omjeri A_{iz}/A_{ul} ispisani na vrhu stupaca
 Prema ovim prikazima rezultata jasno moguće je vidjeti kako, pri udaljenosti $h=7$ mm, difuzor promjera $d=160$ mm ostvaruje najveću silu adhezije (24,51 N). Pri udaljenosti difuzora $h=10$

mm također difuzor $d=160$ mm ostvaruje najveću silu (18,932 N). Pri udaljenosti difuzora $h=12$ mm difuzor $d=160$ mm ostvaruje najveću silu (16,12 N).

Cilj ovih testiranja je pronaći najbolji difuzor koji će ostvarivati najveću silu adhezije uz najveću udaljenost od podloge. Iz rezultata je moguće vidjeti kako sila adhezije za difuzore $d=160$ mm i $d=140$ mm, $r=36$ mm pada povećanjem udaljenosti od podloge. Razlog tome je smanjenje podtlaka koji se javlja unutar difuzora.

Isto tako je moguće vidjeti da za difuzore $d=120$ mm i $d=140$ mm, $r=36$ mm povećanjem udaljenosti sila adhezije raste, a zatim pada. Razlog toj pojavi je taj da u ovom sustavu ne djeluje samo sila koja se javlja pojavom razlike tlakova u difuzoru. U ovom sustavu djeluje i sila potiska koju stvara EDF. Povećanjem udaljenosti omogućuje se veći protok zraka što dovodi do povećanja sile potiska, a ujedno i većeg podtlaka. Prevelikim povećanjem udaljenosti smanjuje se komponenta podtlaka i samim time se smanjuje sila adhezije.

Potrebno je napomenuti da je tijekom testiranja difuzora primijećeno da se pri nižim udaljenostima h od podloge javljaju vibracije. Isto tako je primijećeno da su na difuzorima manjeg promjera te vibracije veće nego na difuzorima većeg promjera.

Prema ovim rezultatima optimalan difuzor je $d=160$ mm, razlog tome je taj što za testirane udaljenosti daje najveće sile adhezije. Odabir udaljenosti od podloge prilikom upotrebe ovog difuzora će ovisiti o konstrukcijskim zahtjevima robota. Potrebno je razmotriti je li isplativo smanjenje sile adhezije od 22,7 % za povećanje udaljenosti od 42,8 % (od $h=7$ mm na $h=10$ mm), odnosno smanjenje sile adhezije od 14,9 % za povećanje udaljenosti od 20 % (od $h=10$ mm na $h=12$ mm).

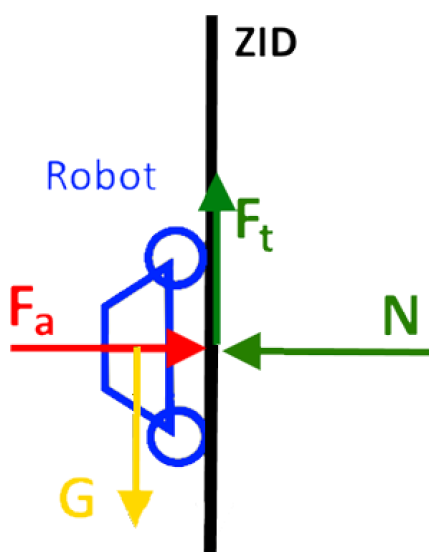
9. TESTIRANJE DIFUZORA POD NAGIBOM, EDF 70 mm

Sljedeće poglavlje prikazuje motivaciju i cilj dizajniranja i testiranja difuzora pod nagibom.

9.1. Uvod u difuzore pod nagibom

Prilikom kretanja po vertikalnim površinama robot se oslanja na silu adhezije koja uzrokuje normalne sile, odnosno sile trenja koje omogućavaju robotu kretanje po vertikalnim površinama.

Slika prikazuje sustav ako je sila adhezije okomita na površinu kretanja, gdje je F_a – sila adhezije, F_t – sila trenja, N – normalna sila i G – težina



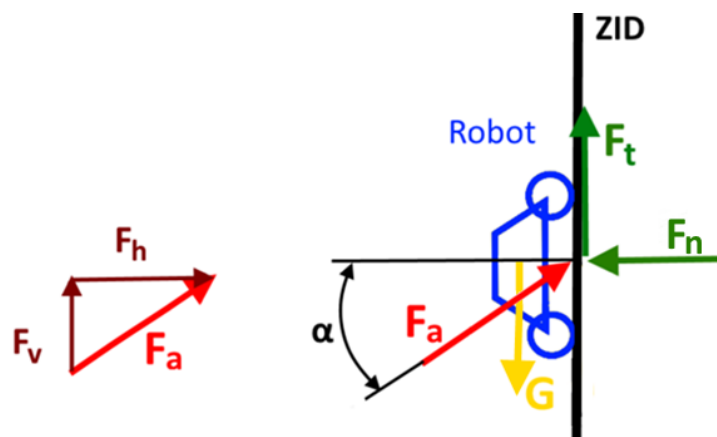
Slika 91. Prikaz sila sustava robota penjača

$$F_t = F_a \cdot \mu \quad (20)$$

Iz [Slika 91.] i formule (19) je moguće vidjeti kako nosivost robota ovisi dvije komponente, a to su sila adhezije, koju je moguće mijenjati optimiranjem difuzora i odabirom motora. Dok je druga komponenta koeficijent trenja, koji je moguće odrediti testiranjem i poboljšati odabirom materijala, ali uvijek postoji nesigurnost koja se javlja zbog okolišnih uvjeta (npr. nečistoće, vlaga, temperatura).

Ukoliko bi postavili EDF pod nagibom α u odnosu na površinu kretanja dobili bi komponentu sile koja se odupire težini F_v , što bi trebalo pomoći u ostvarivanju veće nosivosti robota [Slika

92.]. Ostvarivanje vertikalne sile F_v koja se odupirala sili teži dolazi s cijenom smanjenja horizontalne F_h sile koja stvara trenje, što automatski dovodi do pada sile trenja.



Slika 92. Prikaz sila sustava robota penjača dok je EDF pod nagibom

Pretpostavka isplativosti ove metode se temelji na vektorskom zbroju sila. Pošto se horizontalna i vertikalna sila ne zbrajaju po formuli $F_a = F_h + F_v$ nego prema vektorskom zbroju sila prikazanom u nastavku.

$$F_a = \sqrt{F_v^2 + F_h^2} \quad (21)$$

U idealnom slučaju ostvarena se sila od $F_a = 20 \text{ N}$ uz nagib EDF-a $\alpha = 30^\circ$. Prema tome sile F_v i F_h su sljedeće:

$$F_v = \sin(30) \cdot F_a = 10 \text{ N} \quad (22)$$

$$F_h = \cos(30) \cdot F_a = 17,32 \text{ N} \quad (23)$$

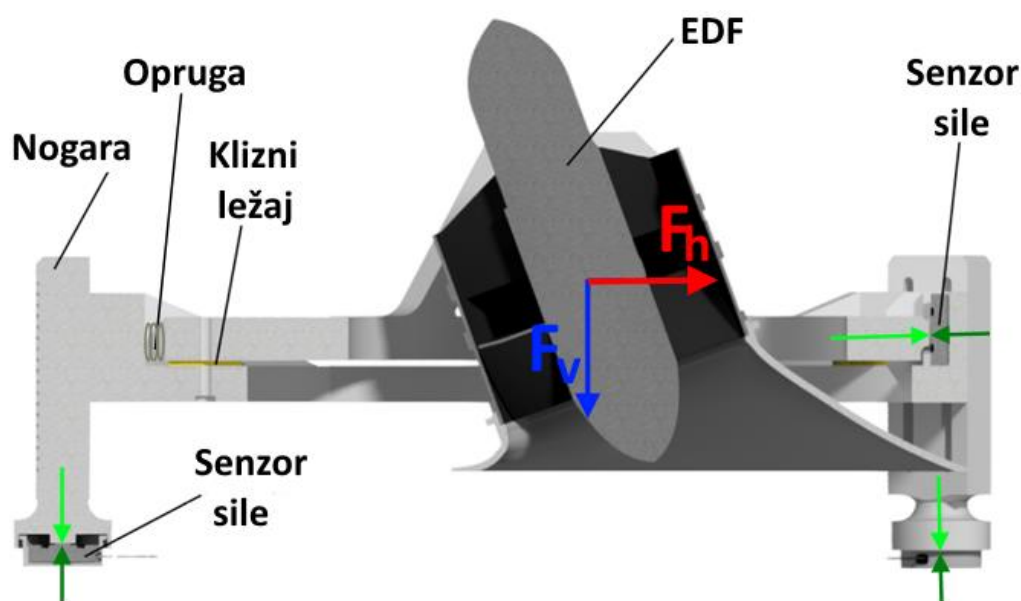
Prema tome sa silom F_a od 20 N bi ostvarili horizontalnu silu od 17,32 N (što je smanjenje od 86,6 %) i vertikalnu silu od 10 N.

Ali u realnom slučaju to nije tako jer se sila adhezije se sastoji od potiska kojeg je moguće usmjeravati pod željenim kutom i sile negativnog tlaka, koju nije moguće usmjeravati jer djeluje na površinu difuzora.

9.2. Testiranje difuzora pod nagibom

Testiranja su provedena pod istim uvjetima kao i testiranje različitih radijusa zakrivljenosti, odnosno testiranje je provedeno pomoću izvora napajanja s konstantnim naponom od 13V i VESC-om granicom struje motora od 50 A. Testiranje je provedeno na glatkoj površini prikazanoj na [Slika 118.].

U nastavku testiranja pod difuzora pod nagibom koristi će se oznake sile prikazane na [Slika 93.].



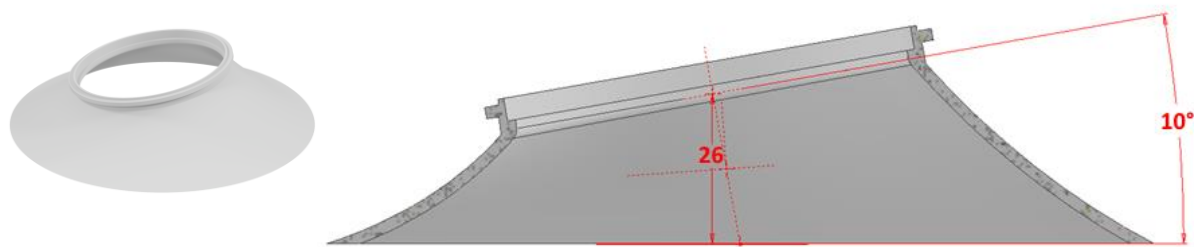
Slika 93. Prikaz sile na eksperimentalnom postavu

Kako bi se umanjio utjecaj sile trenja prilikom testiranja horizontalnih sila koriste se klizni ležajevi i opruga koja unosi prenaprezanje u sustav. Time osiguravamo da je klizeća konstrukcija u kontaktu sa senzorom sile i uklanjamo pomake klizeće konstrukcije. Prema tome silu trenja ćemo zanemariti.

Kutovi odabrani za testiranje su 10° , 20° i 30° . Difuzori su konstruirani pod odabranim kutovima i svi imaju zakrivljenu geometriju i ulazni promjer od $d=140$ mm, te je svaki testiran na udaljenostima $h=7$ mm, 10 mm i 12 mm.

9.2.1. Testiranje difuzora kuta nagiba 10° u odnosu na horizontalu

Na [Slika 94.] je prikazan dizajn difuzora kuta nagiba 10° .

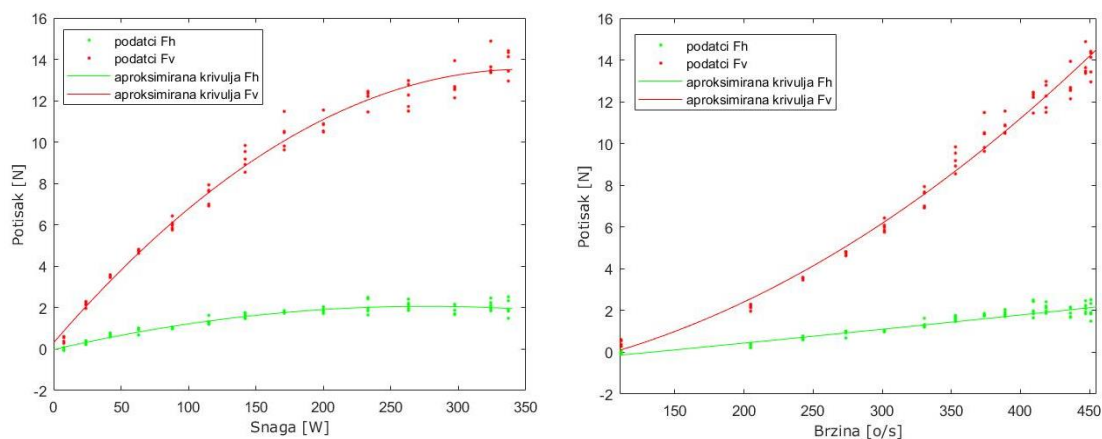


Slika 94. Dizajn difuzora kuta nagiba 10°

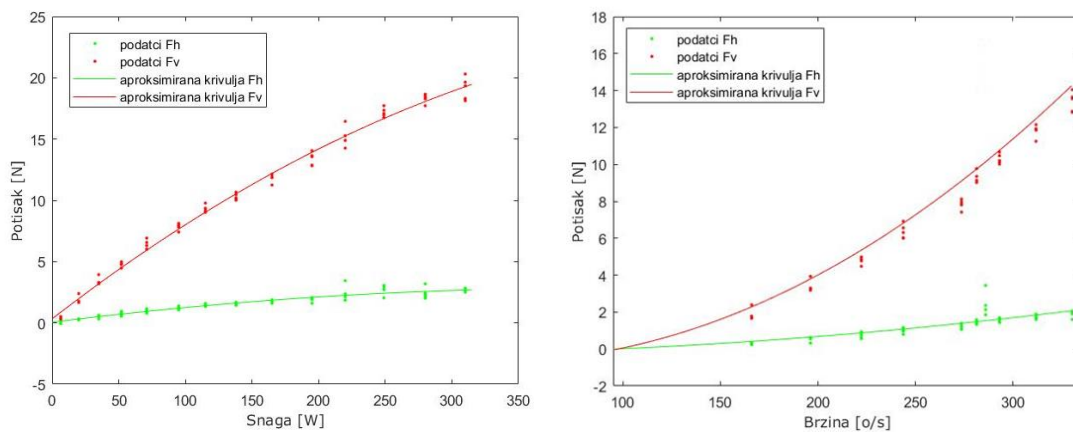
U nastavku su prikazani rezultati testiranja difuzora kuta nagiba 10° na različitim udaljenostima od podloge.

Tablica 8. Podatci dobiveni testiranjem difuzora kuta nagiba 10°

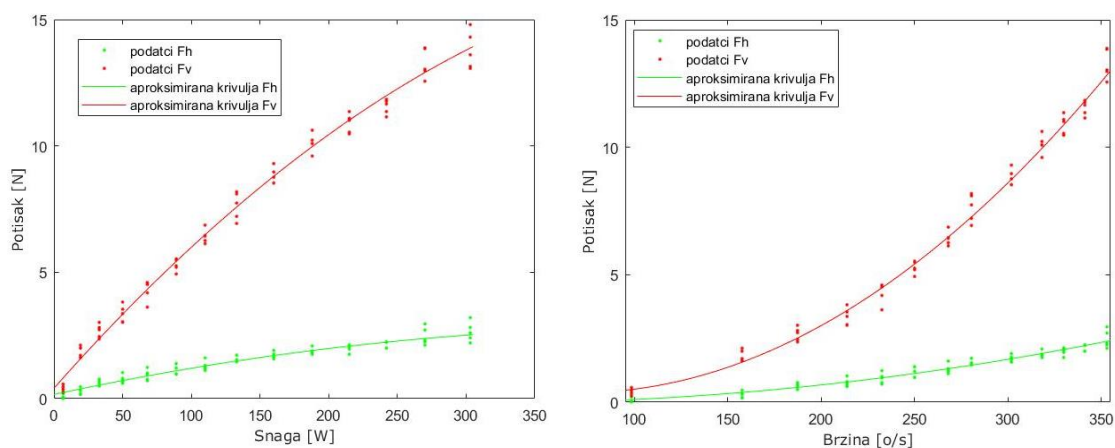
	F_v [N]	F_h [N]	Snaga [W]	Gustoća snage [N/W]	Broj okretaja [o/s]
10° , $h=7$ mm	13,74	2,11	324	0,043	447
10° , $h=10$ mm	19,15	2,62	310	0,062	379
10° , $h=12$ mm	13,78	2,64	303	0,045	365



(a)



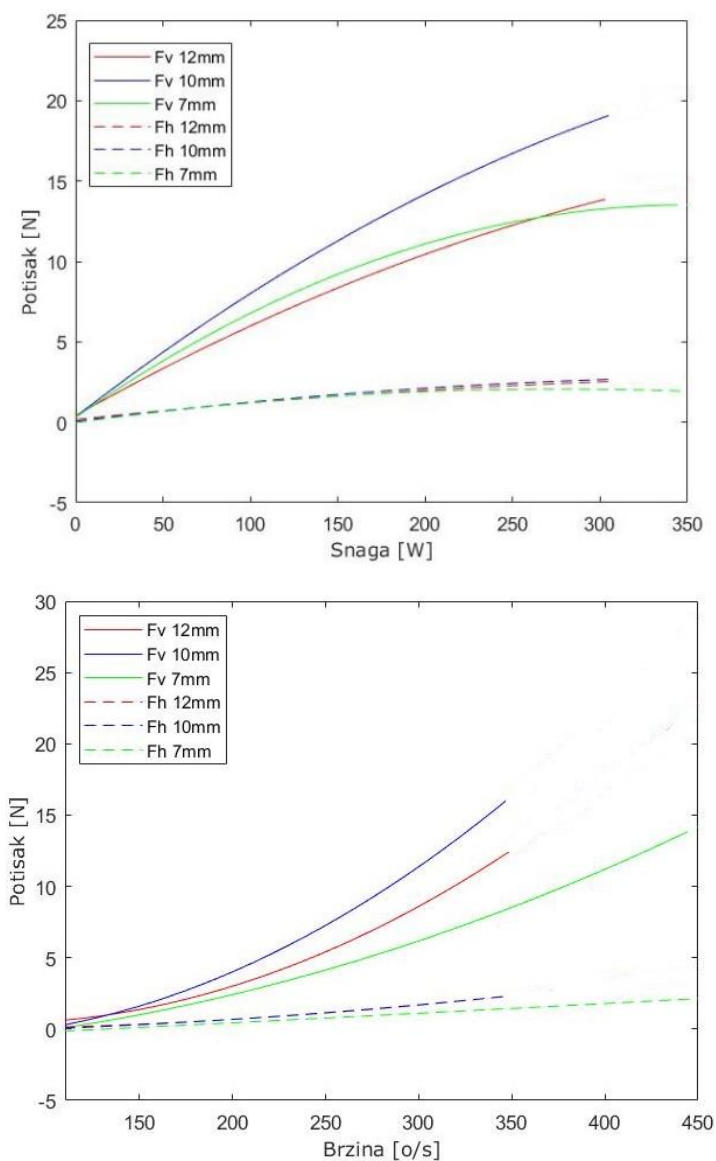
(b)



(c)

Slika 95. Grafovi snage i sile adhezije (lijevo) i broja okretaja i adhezije (desno) za difuzor pod nagibom 10° na udaljenosti 7 mm (a), 10 mm (b) i 12 mm (c) od podloge

Na [Slika 96.] je prikazana grafička usporedba rezultata difuzora kuta nagiba 10° na različitim udaljenostima od podloge.

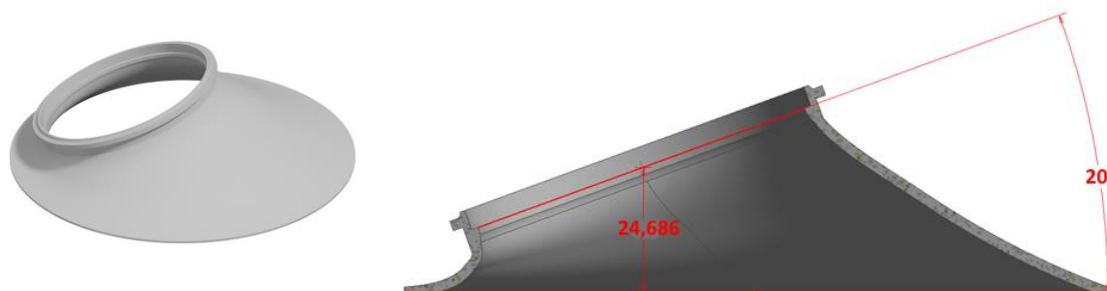


Slika 96. Grafička usporedba odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i sile adhezije(desno) difuzora kuta nagiba 10° na različitim udaljenostima od podloge

Iz grafova na [Slika 94.] i [Tablica 6.] je vidljivo kako najveću vertikalnu silu, od 19,15 N, difuzor kuta nagiba 10° ostvaruje na udaljenosti $h=10$ mm. Pri tome je horizontalna sila 2,62 N, a snaga 310 W s brzinom vrtnje od 397 o/s.

9.2.2. Testiranje difuzora kuta nagiba 20° u odnosu na horizontalu

Na [Slika 97.] je prikazan dizajn difuzora kuta nagiba 20° .

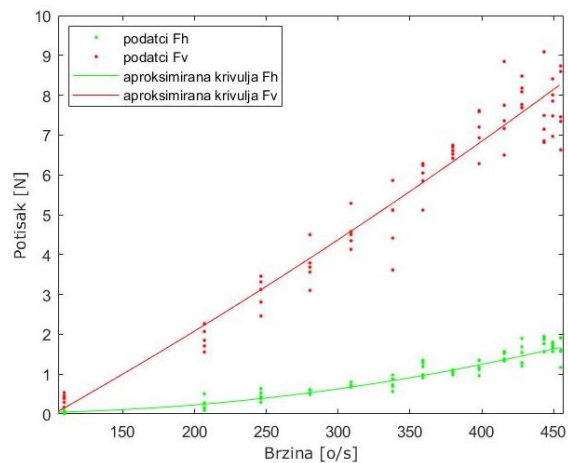
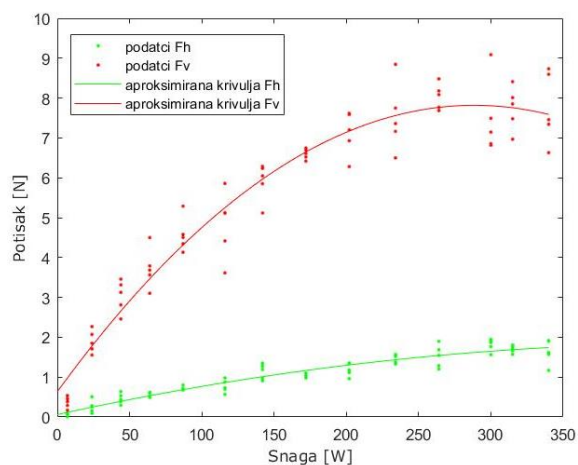


Slika 97. Dizajn difuzora kuta nagiba 20°

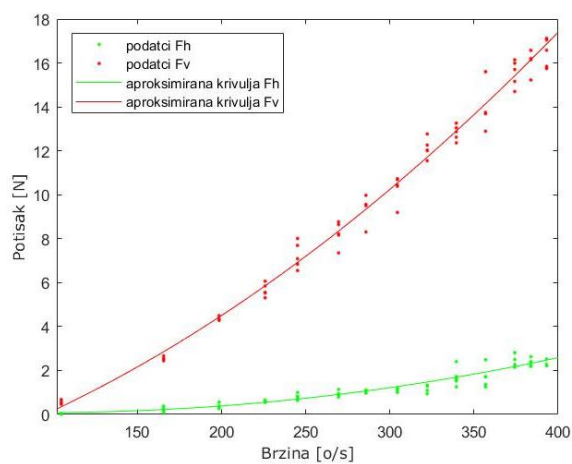
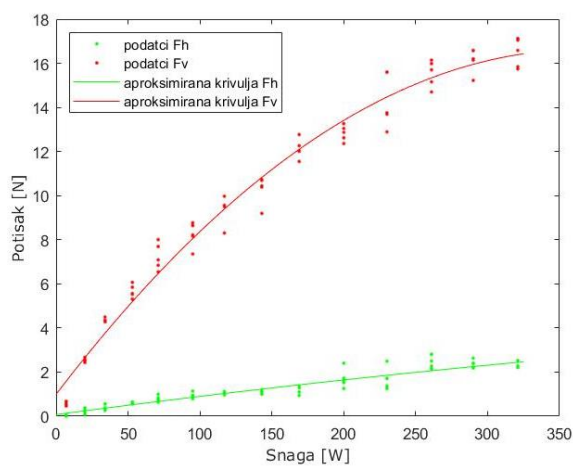
U nastavku su prikazani rezultati testiranja difuzora kuta nagiba 20° na različitim udaljenostima od podloge.

Tablica 9. Podatci dobiveni testiranjem difuzora kuta nagiba 20°

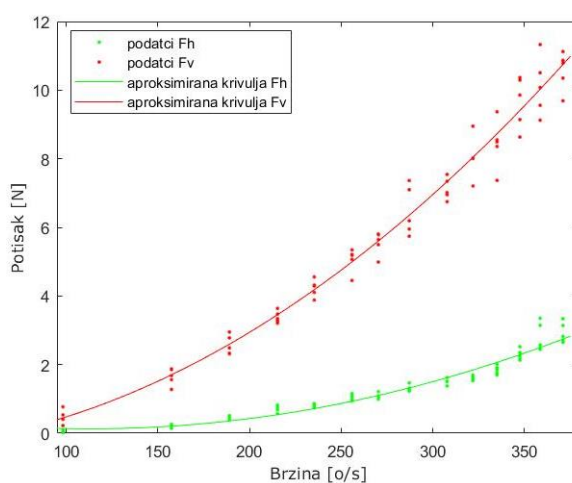
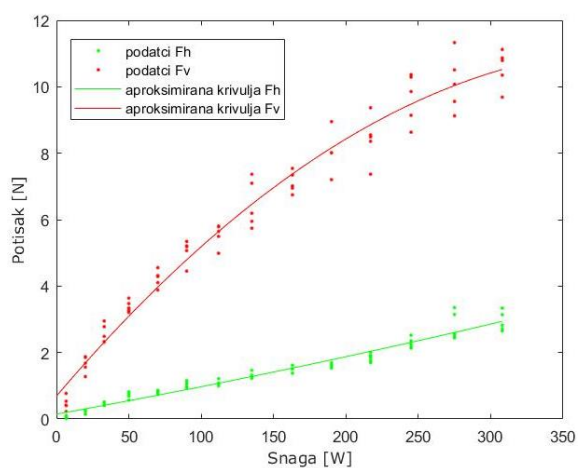
	F_v [N]	F_h [N]	Snaga [W]	Gustoća snage [N/W]	Broj okretaja [o/s]
20° , $h=7$ mm	7,75	1,48	340	0,023	454
20° , $h=10$ mm	16,46	2,30	320	0,052	393
20° , $h=12$ mm	10,56	2,58	308	0,035	371



(a)



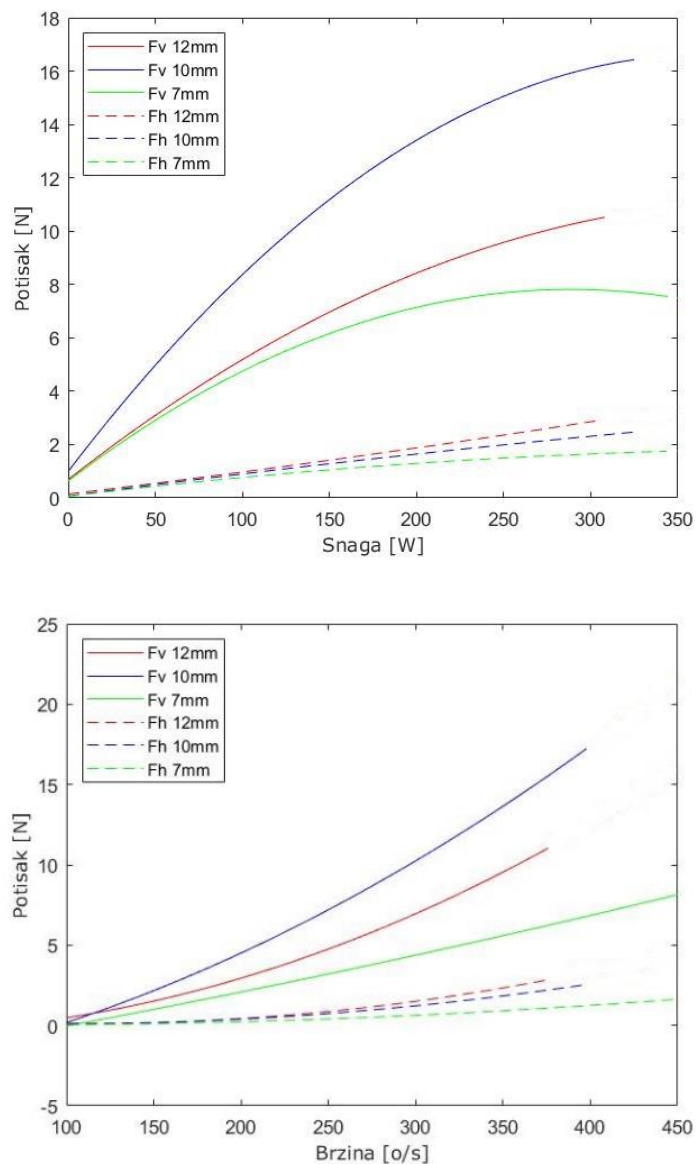
(b)



(c)

Slika 98. Grafovi snage i sile adhezije (lijevo) i broja okretaja i adhezije (desno) za difuzor pod nagibom 20° na udaljenosti 7 mm (a), 10 mm (b) i 12 mm (c) od podloge

Na [Slika 99.] je prikazana grafička usporedba rezultata difuzora kuta nagiba 20° na različitim udaljenostima od podloge.

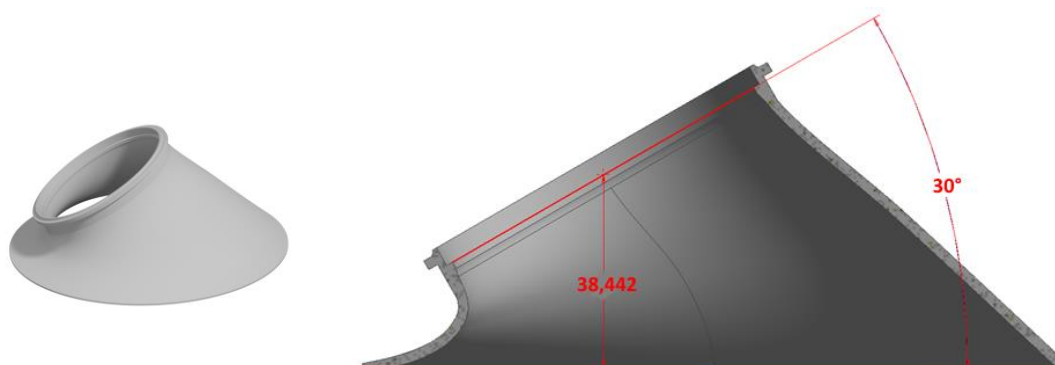


Slika 99. Grafička usporedba odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i sile adhezije(desno) difuzora kuta nagiba 20° na različitim udaljenostima od podloge

Iz grafova na [Slika 99.] i [Tablica 7.] je vidljivo kako najveću vertikalnu silu, od 16,46 N, difuzor kuta nagiba 20° ostvaruje na udaljenosti $h=10$ mm. Pri tome je horizontalna sila 2,32 N, a snaga 320 W s brzinom vrtnje od 393 o/s.

9.2.3. Testiranje difuzora kuta nagiba 30° u odnosu na horizontalu

Na [Slika 100.] je prikazan dizajn difuzora kuta nagiba 30° .

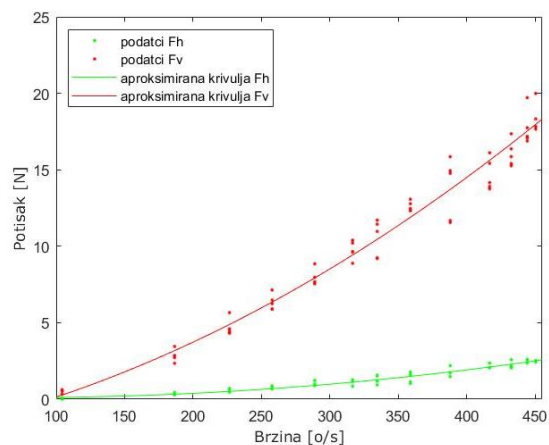
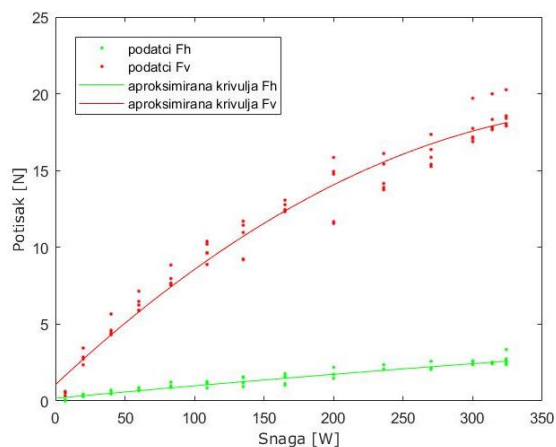


Slika 100. Dizajn difuzora kuta nagiba 30°

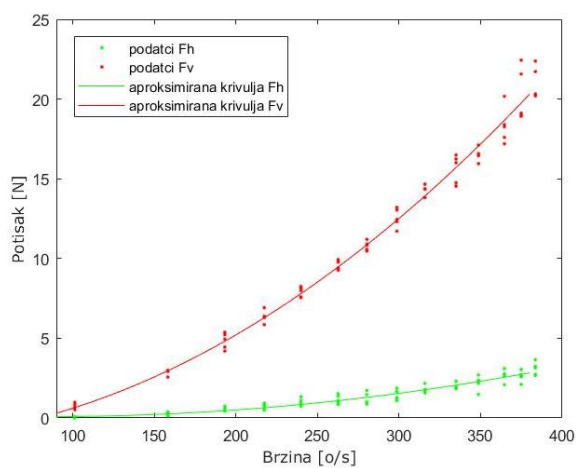
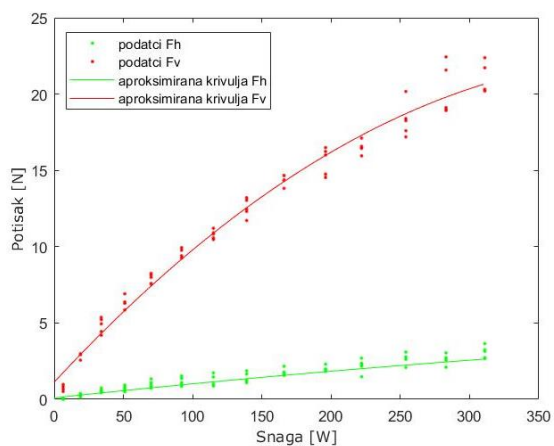
U nastavku su prikazani rezultati testiranja difuzora kuta nagiba 20° na različitim udaljenostima od podloge.

Tablica 10. Podatci dobiveni testiranjem difuzora kuta nagiba 30°

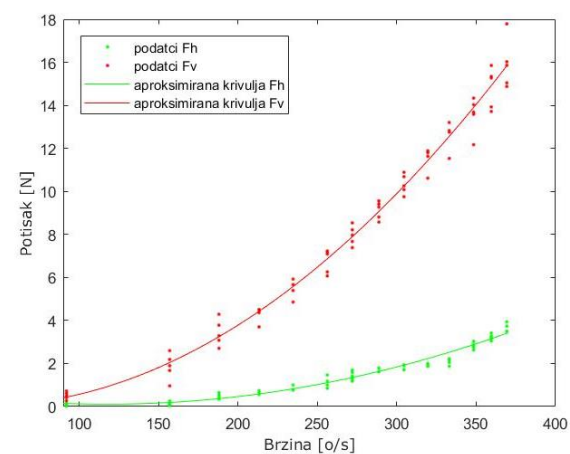
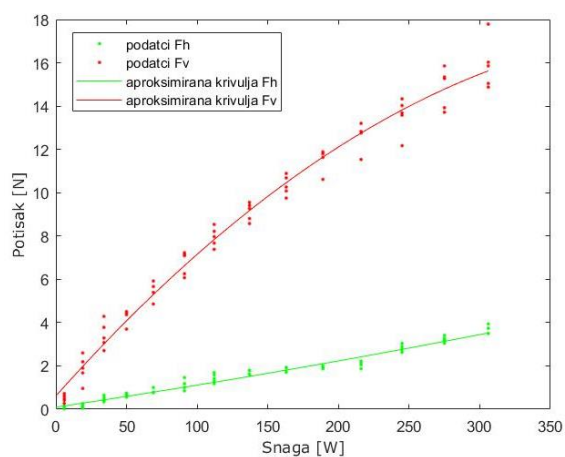
	F_v [N]	F_h [N]	Snaga [W]	Gustoća snage [N/W]	Broj okretaja [o/s]
30° , $h=7$ mm	18,64	2,74	324	0,058	455
30° , $h=10$ mm	20,97	3,08	311	0,068	383
30° , $h=12$ mm	15,92	3,63	306	0,053	369



(a)



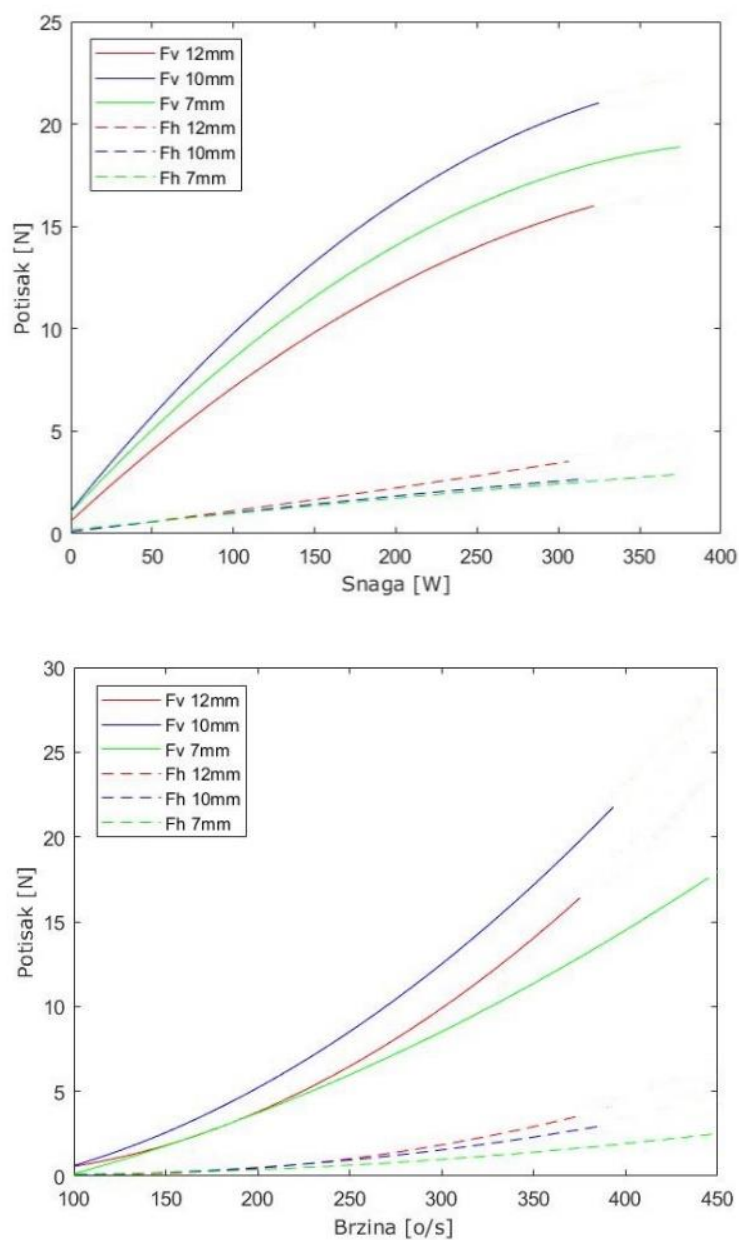
(b)



(c)

Slika 101. Grafovi snage i sile adhezije (lijevo) i broja okretaja i adhezije (desno) za difuzor pod nagibom 30° na udaljenosti 7 mm (a), 10 mm (b) i 12 mm (c) od podloge

Na [Slika 102.] je prikazana grafička usporedba rezultata difuzora kuta nagiba 30° na različitim udaljenostima od podloge.

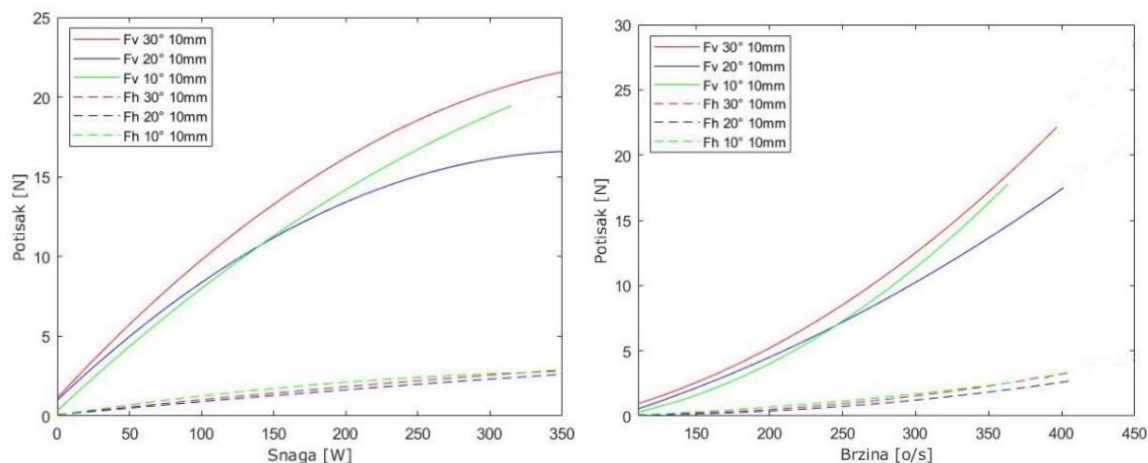


Slika 102. Grafička usporedba odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i sile adhezije(desno) difuzora kuta nagiba 30° na različitim udaljenostima od podloge

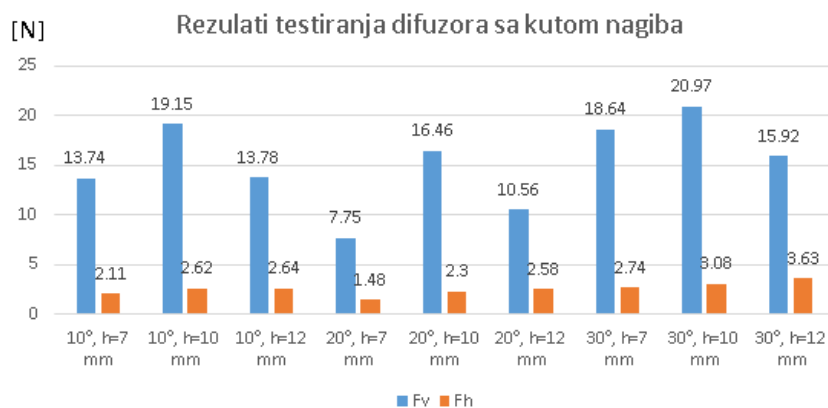
Iz grafova na [Slika 102.] i [Tablica 8.] je vidljivo kako najveću vertikalnu silu, od 20,97 N, difuzor kuta nagiba 30° ostvaruje na udaljenosti $h=10$ mm. Pri tome je horizontalna sila 3,08 N, a snaga 311 W s brzinom vrtnje od 383 o/s.

9.3. Usporedba rezultata difuzora s kutom nagiba

Na [Slika 103.] je prikazana usporedba difuzora s kutovima nagiba 10° , 20° i 30° na udaljenostima pri kojima su ostvarili najveće sile adhezije.



Slika 103. Grafička usporedba odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i sile adhezije (desno) difuzora s kutom nagiba.

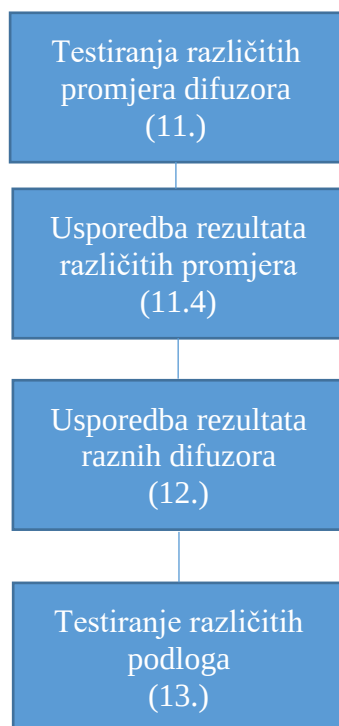


Slika 104. Usporedba difuzora s kutom nagiba, s maksimalnim vrijednostima ispisanim na vrhovima stupaca

Kako je vidljivo iz [Slika 103.] i [Slika 104.] sile koje se ostvaruju u horizontalnom smjeru su manje od 4 N. Izvedba difuzora pod kutom na robotu penjaču bi zakomplicirala dizajn konstrukcije. Razlog tome je što bi dizajn bio koristan samo prilikom vertikalnog kretanja robota, a ukoliko bi željeno kretanje robota bilo pod kutom bilo bi potrebno izvesti mehanizam zakretanja difuzora. Iz rezultata je vidljivo da su horizontalne sile male u usporedbi s vertikalnim. Razlog tome je da se sila adhezije sastoji od potiska kojeg je moguće usmjeravati pod željenim kutom i sile negativnog tlaka, koju nije moguće usmjeravati. Prema tome moguće je zaključiti da difuzori pod nagibom nisu optimalni za primjenu kod robota penjača.

10. PRIKAZ PROVEDENIH ISPITIVANJA, EDF 80mm

Zbog velike količine podataka i broja testiranja u nastavku je prikazan dijagram toka ispitivanja s poglavljima u kojima su prikazani rezultati pojedinih ispitivanja za EDF 80mm

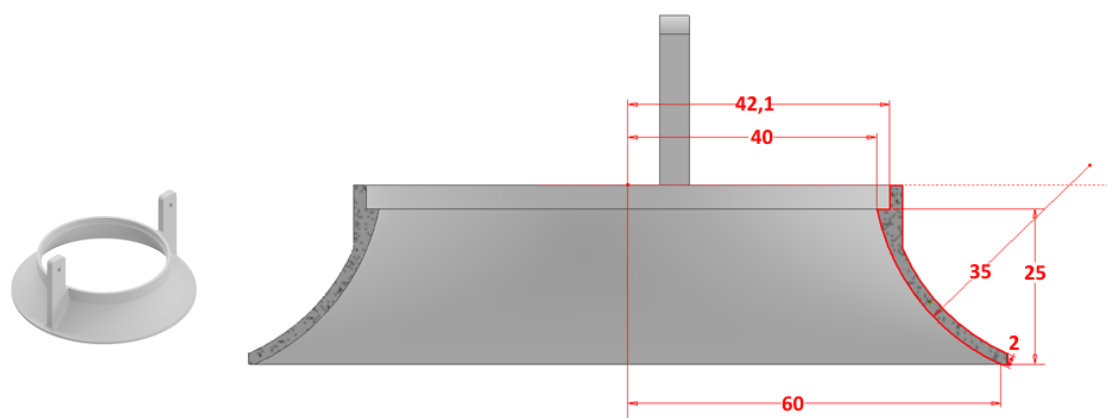


11. TESTIRANJE DIFUZORA RAZLIČITIH PROMJERA, EDF 80mm

Testiranja su provedena pod istim uvjetima kao i testiranje difuzora EDF-a 70 mm, odnosno testiranje je provedeno pomoću izvora napajanja s konstantnim naponom od 13V i VESC-om s namještenim graničnom strujom od 50 A. Tim postavkama omogućujemo usporedivost rezultata difuzora EDF-a 70 mm i 80 mm. Testiranje je provedeno na glatkoj površini prikazanoj na [Slika 118.].

11.1. Testiranje zakrivljenog difuzora promjera $d=120\text{mm}$

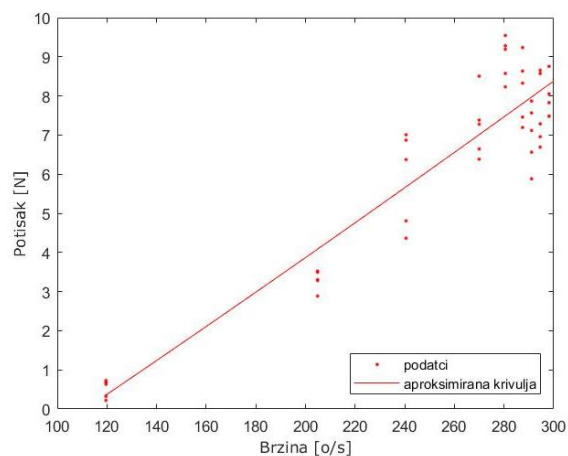
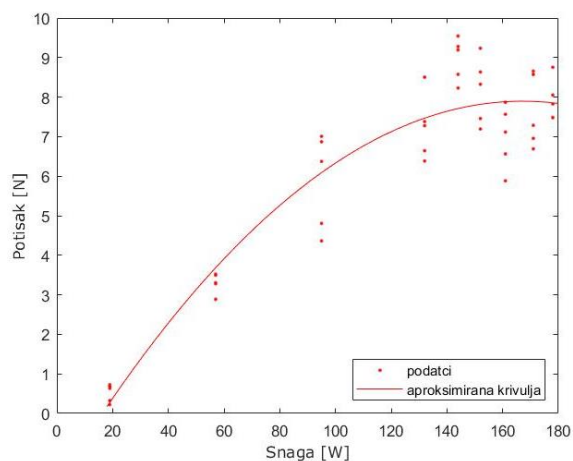
Na je prikazan dizajn difuzora promjera $d=120\text{ mm}$.



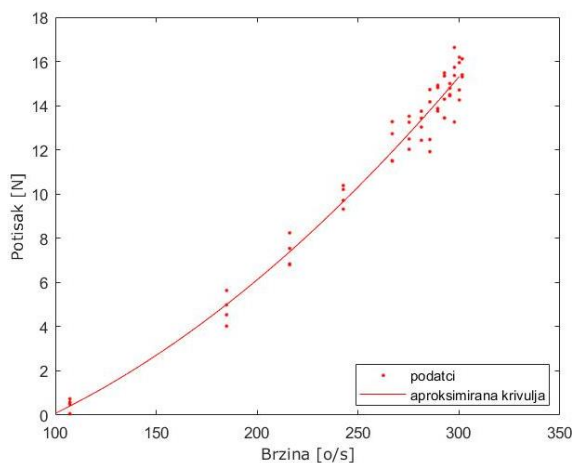
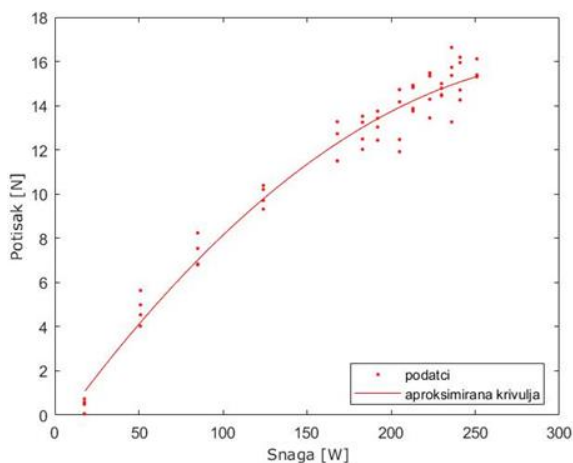
Slika 105. Dizajn difuzora $d=120\text{ mm}$, EDF 80 mm

U nastavku su grafički prikazani odnosi potrošnje snage motora i sile adhezije, kao i odnosi broja okretaja motora i sile adhezije [Slika 106.] dobiveni testiranjem na udaljenostima $h=7, 10$ i 12 mm .

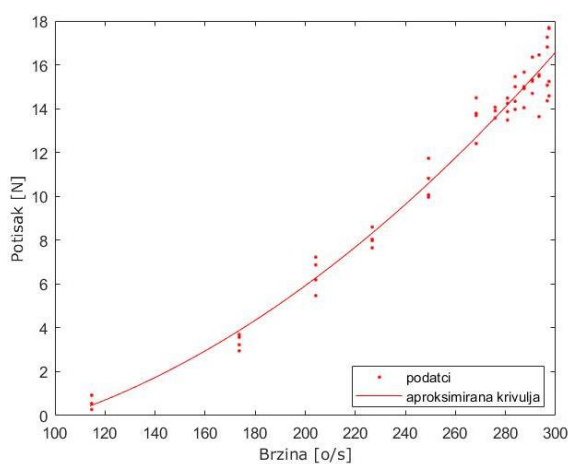
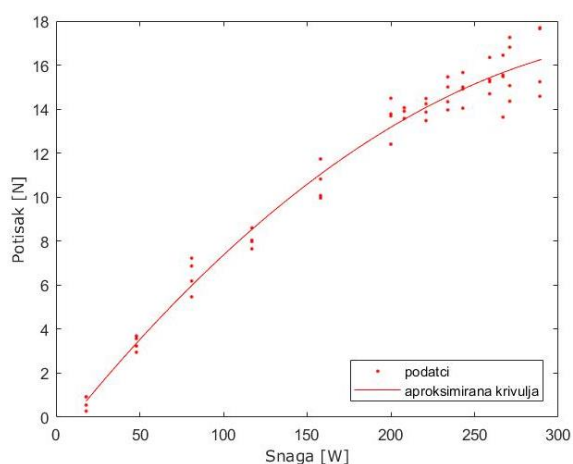
Promatrajući rezultate na [Slika 106.], vidljivo je da se pri udaljenosti $h=7\text{ mm}$ javlja veliko rasipanje podataka. Razlog tom rasipanju su mehaničke vibracije postava. Ujedno je vidljivo da maksimalna potrošnja u pojedinim slučajevima je manja od potrošnje EDF-a 70 mm. Motor EDF-a 80 mm je predviđen za veće napone napajanja i samim time mu je maksimalni broj okretaja koji se postiže ovim napajanjem manji, kao i potrošnja kojom se postiže taj broj okretaja. Iz tog razloga je u pojedinim slučajevima potrošnja manja. Vidljivo je da je rasipanje podataka, a ujedno i vibracije manje pri većim udaljenostima od podloge.



(a)



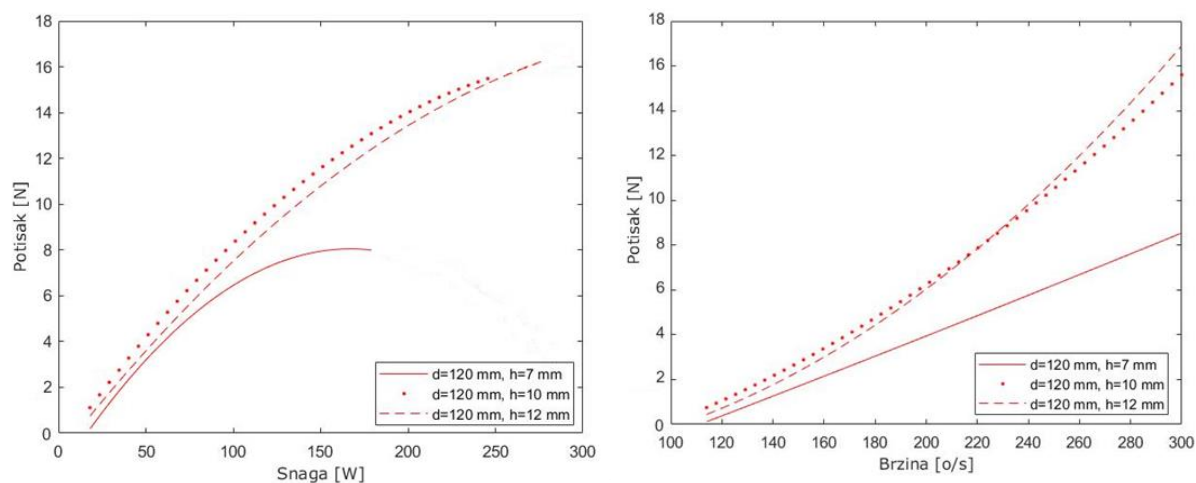
(b)



(c)

Slika 106. Grafovi snage i sile adhezije (lijevo) i broja okretaja i sile adhezije (desno) za difuzor $d=120\text{mm}$, EDF-a 80 mm na udaljenosti 7 mm (a), 10 mm (b) i 12 mm (c) od podloge

Na [Slika 107.] je prikazana grafička usporedba rezultata difuzora $d=120$ mm, EDF-a 80 mm na različitim udaljenostima od podloge.



Slika 107. Grafička usporedba odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i sile adhezije(desno) difuzora $d=120$ mm, EDF-a 80 mm, na različitim udaljenostima od podloge

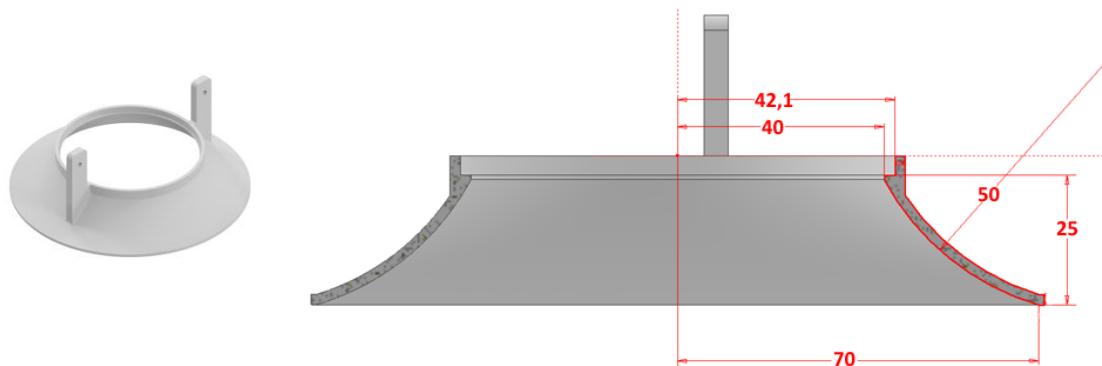
Tablica 11. Podatci dobiveni testiranjem difuzora $d=120$, EDF 80 mm

	Sila adhezije [N]	Snaga [W]	Gustoća snage [N/W]	Broj okretaja [o/s]	Omjer A_{iz}/A_{ul}
$d=120$ mm, $h=7$ mm	7,91	178	0,044	298	1,475
$d=120$ mm, $h=10$ mm	15,53	251	0,062	301	1,03
$d=120$ mm, $h=12$ mm	16,29	289	0,056	297	0,86

Najveća sila adhezije difuzora $d=120$ mm je ostvarena pri udaljenosti $h=12$ mm te iznosi 16,29 N, pri potrošnji 289 W, 297 o/s i omjeru A_{iz}/A_{ul} 1,11.

11.2. Testiranje zakrivljenog difuzora promjera $d=140\text{ mm}$

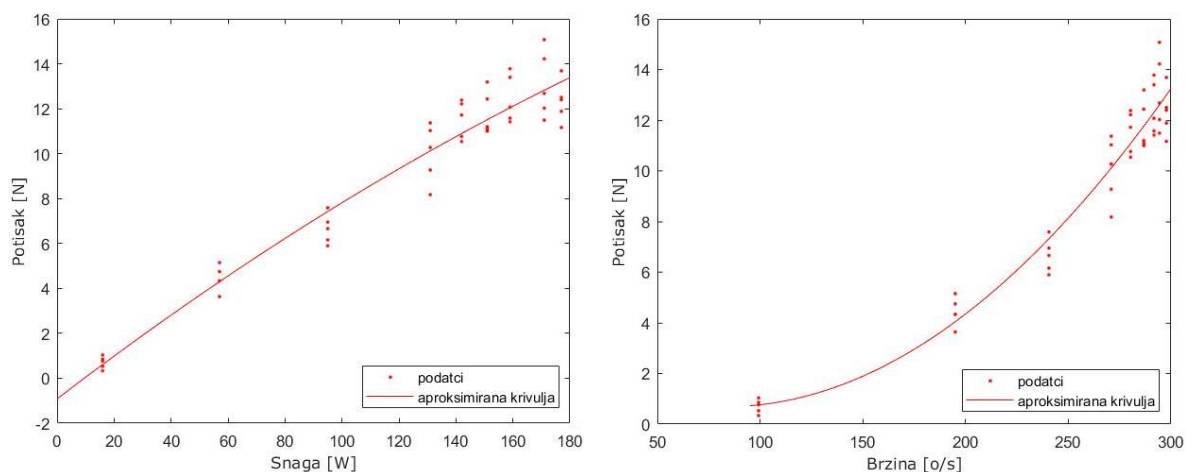
Na je prikazan dizajn difuzora promjera $d=140\text{ mm}$, radijusa zakrivljenosti $r=50\text{ mm}$.



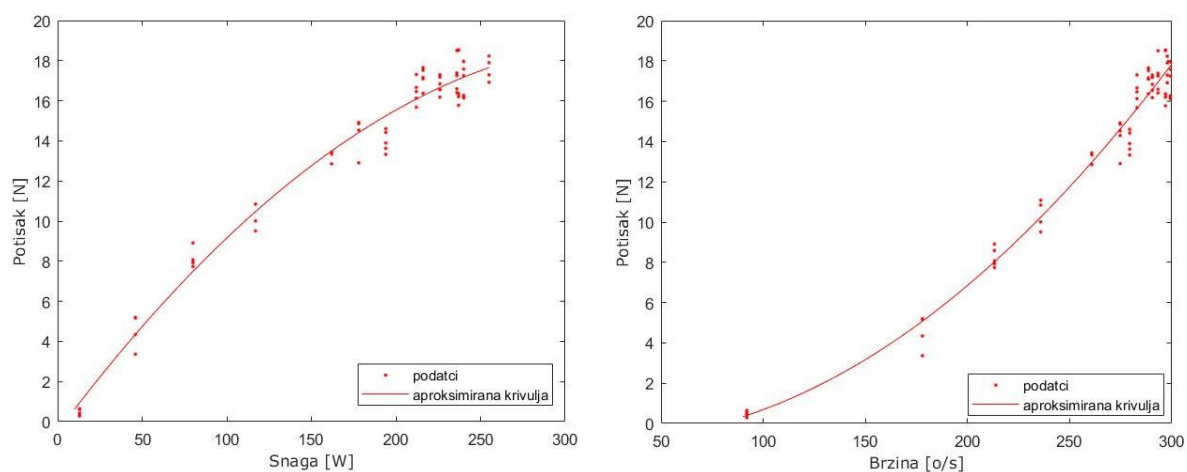
Slika 108. Dizajn difuzora $d=140\text{ mm}$, EDF 80 mm

U nastavku su grafički prikazani odnosi potrošnje snage motora i sile adhezije, kao i odnosi broja okretaja motora i sile adhezije [Slika 109.] , dobiveni testiranjem na udaljenostima $h=7$, 10 i 12 mm .

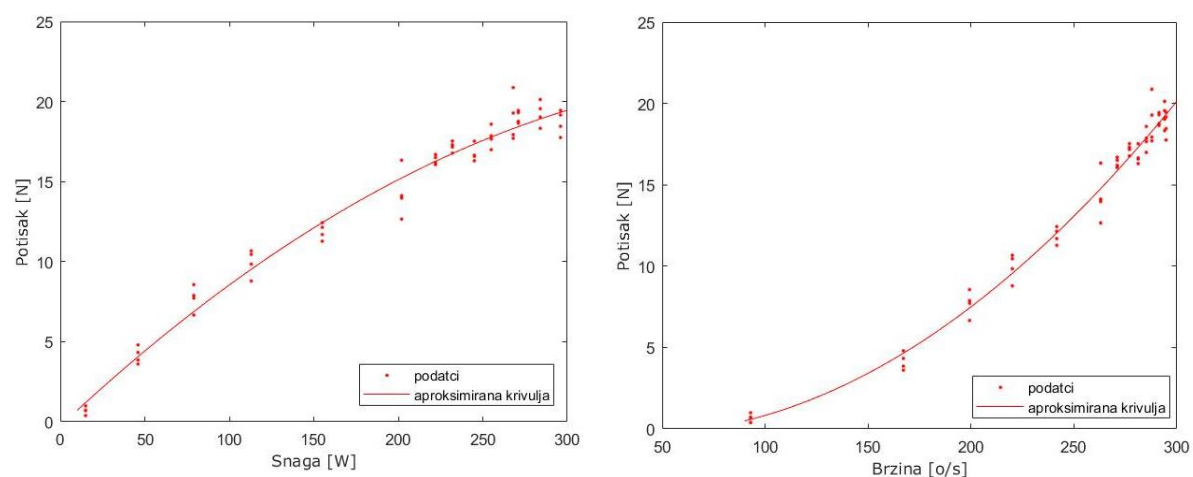
Kao i kod difuzora $d=120\text{ mm}$ vidljivo je rasipanje podataka pri udaljenosti od 7 mm . Razlog tome su mehaničke vibracije. Kao i kod difuzora $d=120\text{ mm}$ u pojedinim slučajevima potrošnja je manja. Vidljivo je da je rasipanje podataka, a ujedno i vibracije manje pri većim udaljenostima od podloge.



(a)



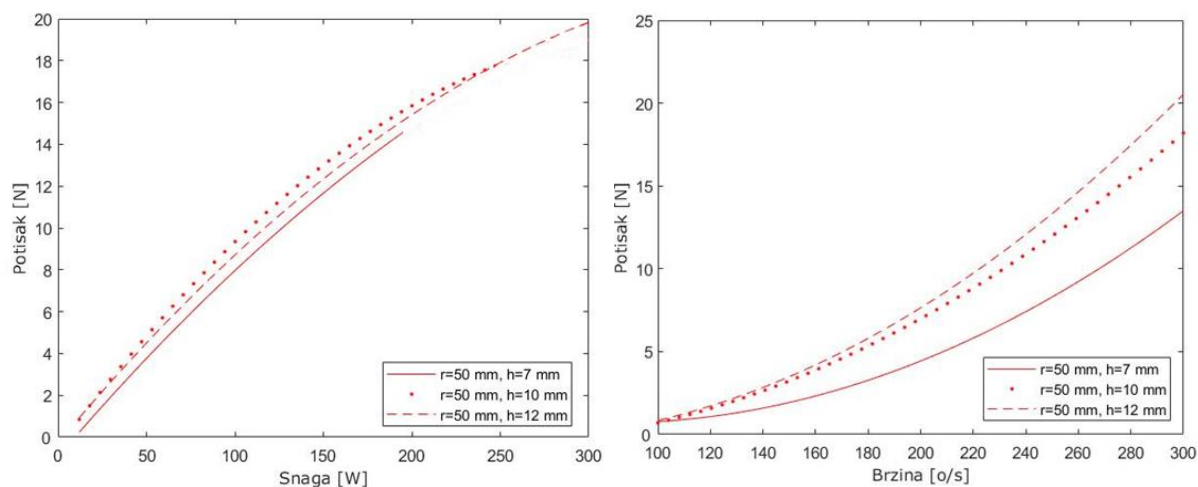
(b)



(c)

Slika 109. Grafovi snage i sile adhezije (lijevo) i broja okretaja i adhezije (desno) za difuzor $d=140\text{mm}$, EDF-a 80 mm na udaljenosti 7 mm (a), 10 mm (b) i 12 mm (c) od podloge

Na [Slika 110.] je prikazana grafička usporedba rezultata difuzora $d=140$ mm, EDF-a 80 mm na različitim udaljenostima od podloge.



Slika 110. Grafička usporedba odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i sile adhezije(desno) difuzora $d=140$ mm, EDF-a 80 mm, na različitim udaljenostima od podloge

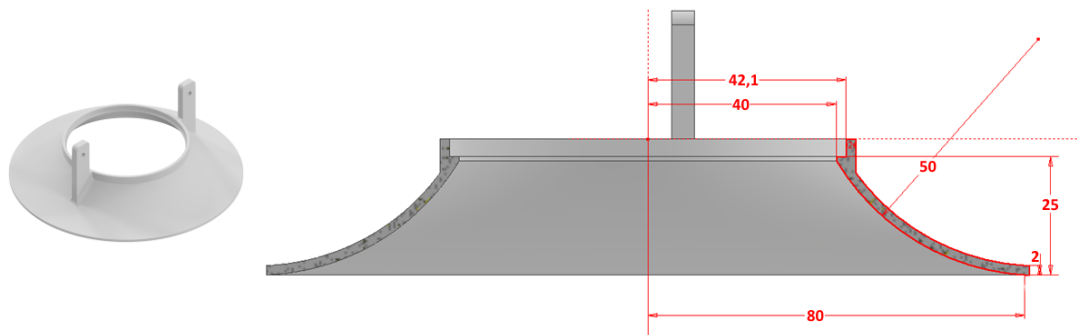
Tablica 12. Podatci dobiveni testiranjem difuzora $d=140$, EDF 80 mm

	Sila adhezije [N]	Snaga [W]	Gustoća snage [N/W]	Broj okretaja [o/s]	Omjer A_{iz}/A_{ul}
$d=140$ mm, $h=7$ mm	12,33	177	0,069	297	1,26
$d=140$ mm, $h=10$ mm	17,45	255	0,068	297	0,88
$d=140$ mm, $h=12$ mm	19,25	296	0,065	294	0,73

Najveća sila adhezije difuzora $d=140$ mm je ostvarena pri udaljenosti $h=12$ mm te iznosi 19,25 N, pri potrošnji snage 296 W, 294 o/s i omjeru A_{iz}/A_{ul} 0,95.

11.3. Testiranje zakrivljenog difuzora promjera $d=160\text{mm}$

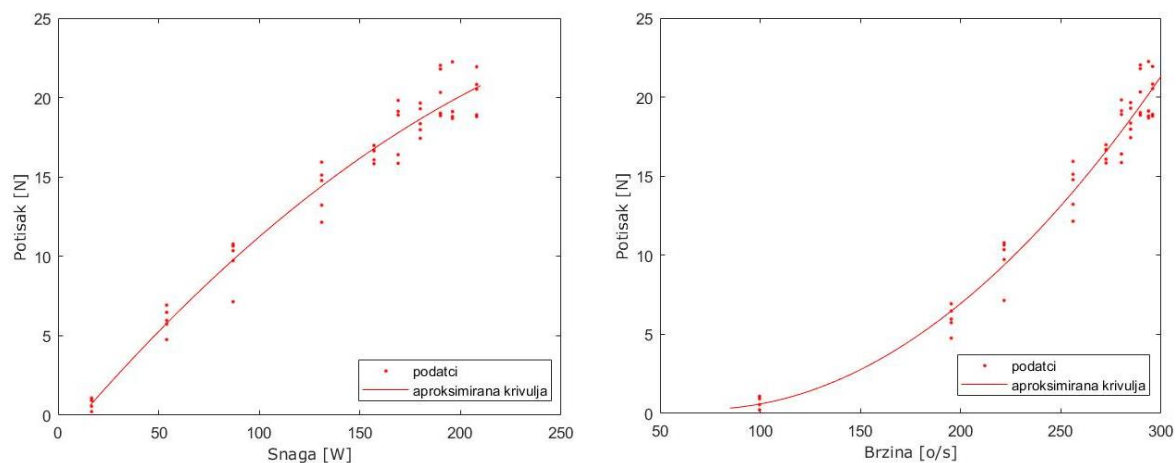
Na je prikazan dizajn difuzora promjera $d=160\text{ mm}$.



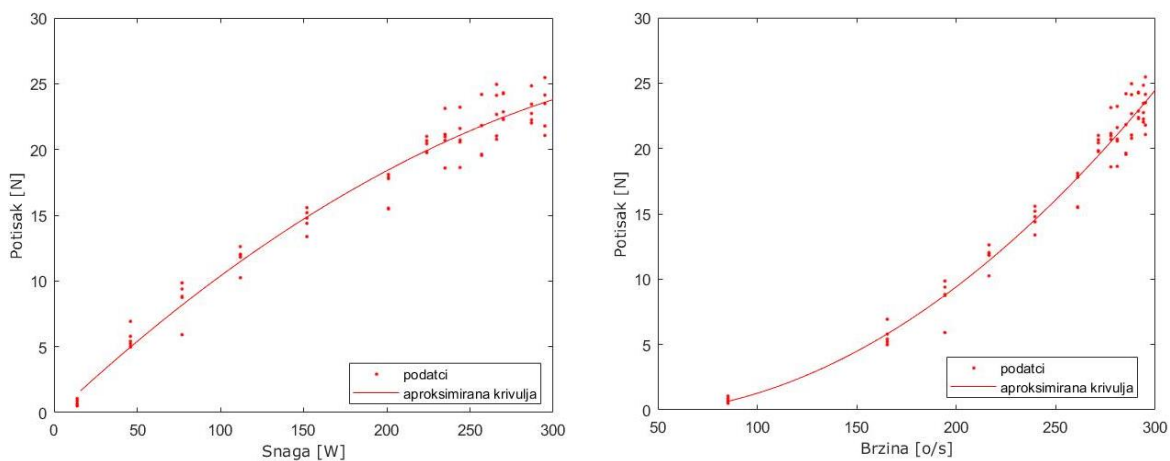
Slika 111. Dizajn difuzora $d=160\text{m}$, EDF 80 mm

U nastavku su grafički prikazani odnosi potrošnje snage motora i sile adhezije, kao i odnosi broja okretaja motora i sile adhezije [Slika 112.], dobiveni testiranjem na udaljenostima $h=7$, 10 i 12 mm.

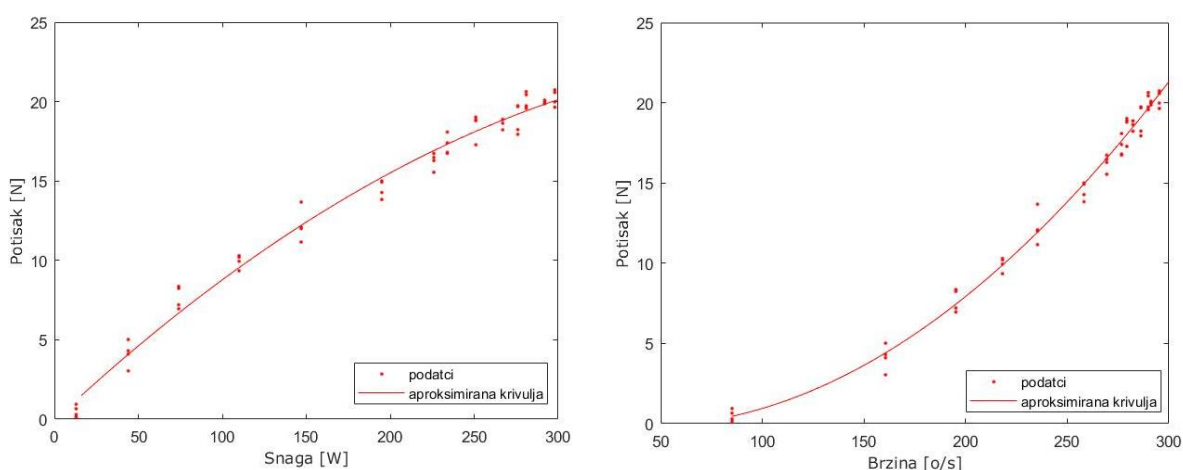
Kao i kod prijašnja dva difuzora vidljivo je rasipanje podataka pri udaljenosti od 7 mm, ali kod ovog difuzora su vibracije nešto manje te se postiže sila adhezije. Vidljivo je da je rasipanje podataka, a ujedno i vibracije manje pri većim udaljenostima od podloge.



(a)



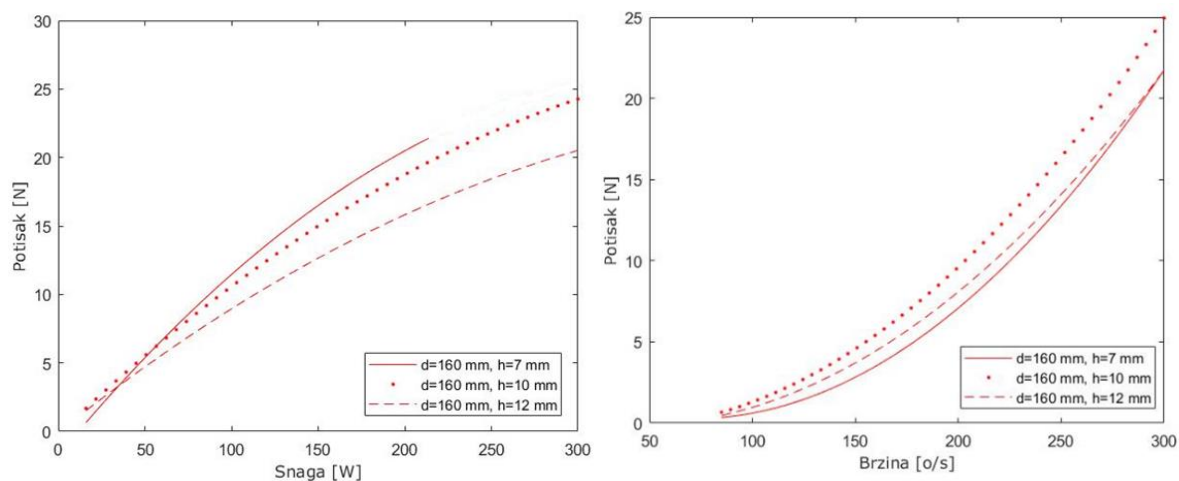
(b)



(c)

Slika 112. Grafovi snage i sile adhezije (lijevo) i broja okretaja i adhezije (desno) za difuzor $d=160\text{mm}$, EDF-a 80 mm na udaljenosti 7 mm (a), 10 mm (b) i 12 mm (c) od podloge

Na [Slika 113.] je prikazana grafička usporedba rezultata difuzora $d=160$ mm, EDF-a 80 mm na različitim udaljenostima od podloge.



Slika 113. Grafička usporedba odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i sile adhezije(desno) difuzora $d=160$ mm, EDF-a 80 mm, na različitim udaljenostima od podloge

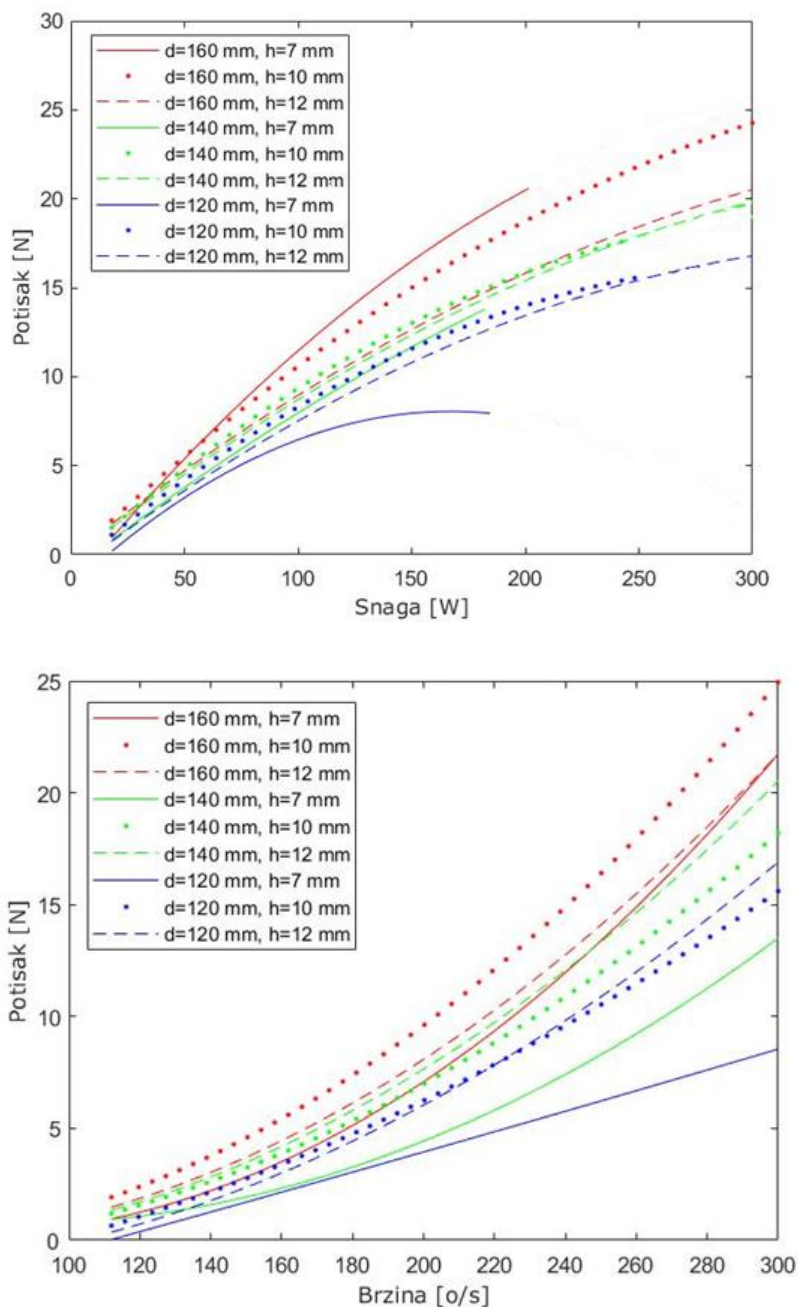
Tablica 13. Podatci dobiveni testiranjem difuzora $d=160$, EDF 80 mm

	Sila adhezije [N]	Snaga [W]	Gustoća snage [N/W]	Broj okretaja [o/s]	Omjer A_{iz}/A_{ul}
$d=160$ mm, $h=7$ mm	20,20	208	0,097	295	1,10
$d=160$ mm, $h=10$ mm	22,60	295	0,077	294	0,77
$d=160$ mm, $h=12$ mm	20,23	298	0,068	295	0,64

Najveća sila adhezije difuzora $d=160$ mm je ostvarena pri udaljenosti $h=10$ mm te iznosi 22,6 N, pri potrošnji snage 295 W, 294 o/s i omjeru A_{iz}/A_{ul} 0,77.

11.4. Usporedba rezultata zakrivljenih difuzora EDF-a 80 mm

U nastavku je grafički i tablično prikazana usporedba rezultata zakrivljenih difuzora različitog promjera d .



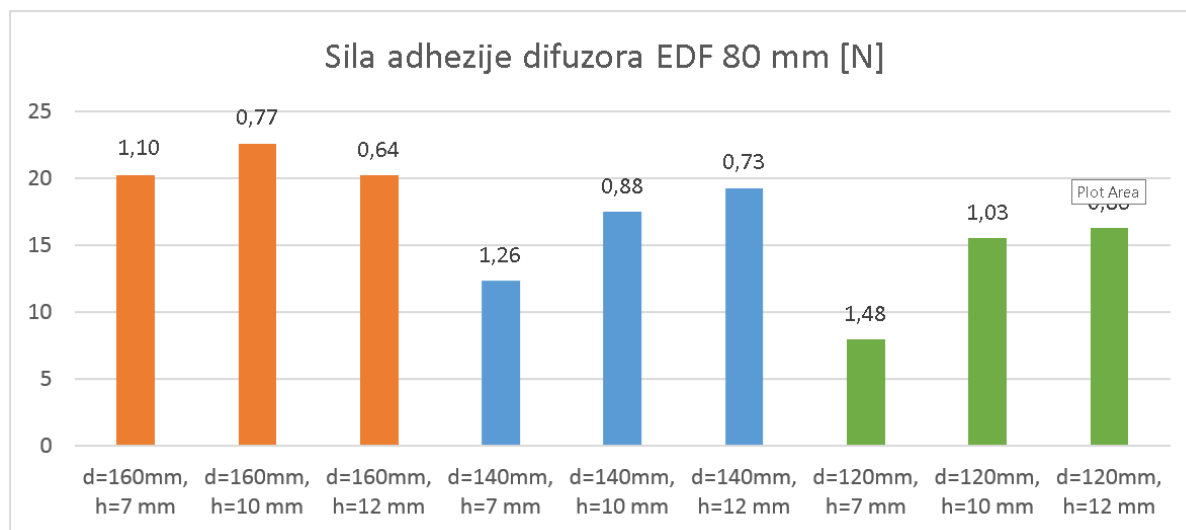
Slika 114. Usporedba odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i sile adhezije(desno) različitih difuzora EDF-a 80 mm

U [Tablica 14.] su prikazani rezultati poredani od maksimalne prema minimalnoj ostvarenoj sili adhezije.

Tablica 14. Rezultati testiranja difuzora EDF-a 80 mm

	Sila adhezije [N]	Snaga [W]	Gustoća snage [N/W]	Broj okretaja [o/s]	Omjer A_{iz}/A_{ul}
d=160mm, h=10 mm	22,6	295	0,077	294	0,77
d=160mm, h=12 mm	20,23	298	0,068	295	0,64
d=160mm, h=7 mm	20,2	208	0,097	295	1,10
d=140mm, h=12 mm	19,25	296	0,065	294	0,73
d=140mm, h=10 mm	17,45	255	0,068	297	0,88
d=120mm, h=12 mm	16,29	289	0,056	297	0,86
d=120mm, h=10 mm	15,53	251	0,062	301	1,03
d=140mm, h=7 mm	12,33	177	0,069	297	1,26
d=120mm, h=7 mm	7,91	178	0,044	298	1,48

Na [Slika 115.] je zornije prikazana usporedba različitih difuzora s ispisanim omjerima A_{iz}/A_{ul} na vrhovima stupaca.



Slika 115. Usporedba difuzora, EDF-a 80 mm, gdje su omjeri A_{iz}/A_{ul} ispisani na vrhu stupaca

Prema ovim prikazima rezultata moguće je vidjeti kako, pri udaljenosti $h=10$ mm, difuzor promjera $d=160$ mm ostvaruje najveću silu adhezije (22,6N). Pri udaljenosti difuzora $h=7$ mm

također difuzor $d=160$ mm ostvaruje najveću silu (20,2 N). Dok pri udaljenosti difuzora $h=12$ mm difuzor $d=160$ mm ostvaruje najveću silu (20,23 N).

Prisjetimo se da je cilj ovih testiranja pronaći najbolji difuzor koji će ostvarivati najveću silu adhezije uz najveću udaljenost od podloge. Iz rezultata je moguće vidjeti kako sila adhezije za difuzore $d=120$ mm i $d=140$ mm, raste povećanjem udaljenosti od podloge. Razlog tome je povećanje protoka zraka kojim dobivamo veći potisak, a time veću silu adhezije.

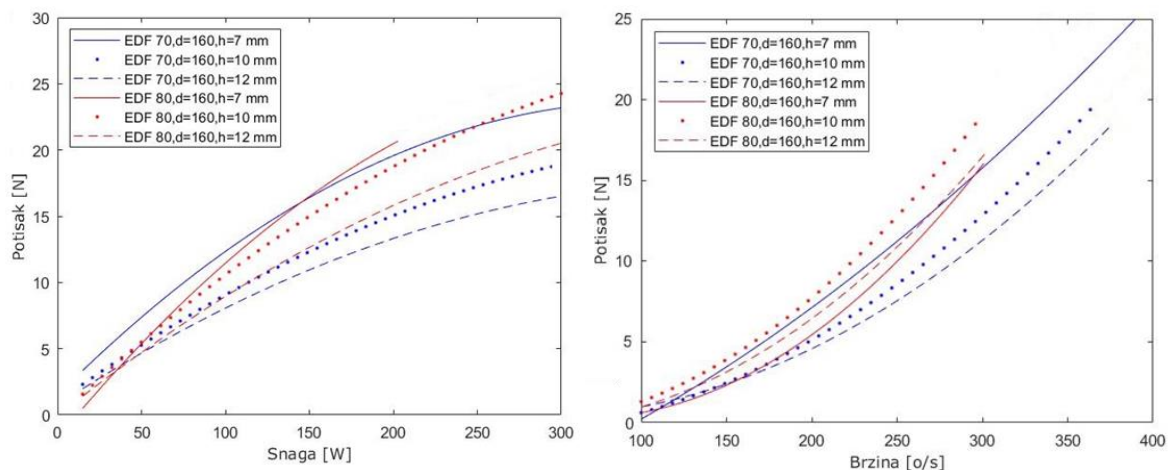
Isto tako je moguće vidjeti da za difuzor $d=160$ mm povećanjem udaljenosti sila adhezije raste, a zatim pada. Razlog toj pojavi je taj da u ovom sustavu ne djeluje samo sila koja se javlja pojavom razlike tlakova u difuzoru. U ovom sustavu djeluje i sila potiska koju stvara EDF. Povećanjem udaljenosti omogućuje se veći protok zraka što dovodi do povećanja sile potiska, a ujedno i većeg podtlaka. Prevelikim povećanjem udaljenosti smanjuje se podtlak i samim time se smanjuje sila adhezije.

Potrebno je napomenuti da je tijekom testiranja difuzora primijećeno da se pri nižim udaljenostima h od podloge javljaju vibracije. Isto tako je primijećeno da su na difuzorima manjeg promjera te vibracije veće nego na difuzorima većeg promjer, što je isto kao i kod EDF-a 70 mm

Prema ovim rezultatima optimalan difuzor je $d=160$ mm, razlog tome je taj što za testirane udaljenosti daje najveće sile adhezije. Usporedimo li testirane udaljenosti zaključit ćemo da je optimalna udaljenost $h=10$ mm, jer se pri toj udaljenosti ostvaruje najveća sila adhezije.

12. USPOREDBA REZULTATA DIFUZORA EDF-a 70 mm i 80 mm

Pregledamo li omjere izlazne i ulazne površine za svaki pojedini difuzor na [Slika 115.] [Slika 90.] primijetiti ćemo da je prosječna vrijednost na koji se postiže maksimalna sila adhezije, EDF-a 70 mm, jednaka $A_{iz}/A_{ul}=0,87$, dok je za EDF-a 80 mm A_{iz}/A_{ul} 0,76. U nastavku su prikazani rezultati difuzora koji su dali najbolje rezultate za pojedine visine.



Slika 116. Usporedba odnosa snage i sile adhezije (lijevo), broja okretaja i sile adhezije (desno) difuzora d=160mm, EDF-a 80 mm i EDF-a 70 mm

U [Tablica 15.] su prikazane vrijednosti najboljih difuzora za pojedini EDF i zelenom bojom su označene vrijednosti u kojima se postiže najveća sila adhezije za pojedini EDF. U tablici je također prikazana maksimalna sila adhezije dobivena EDF-om bez difuzora.

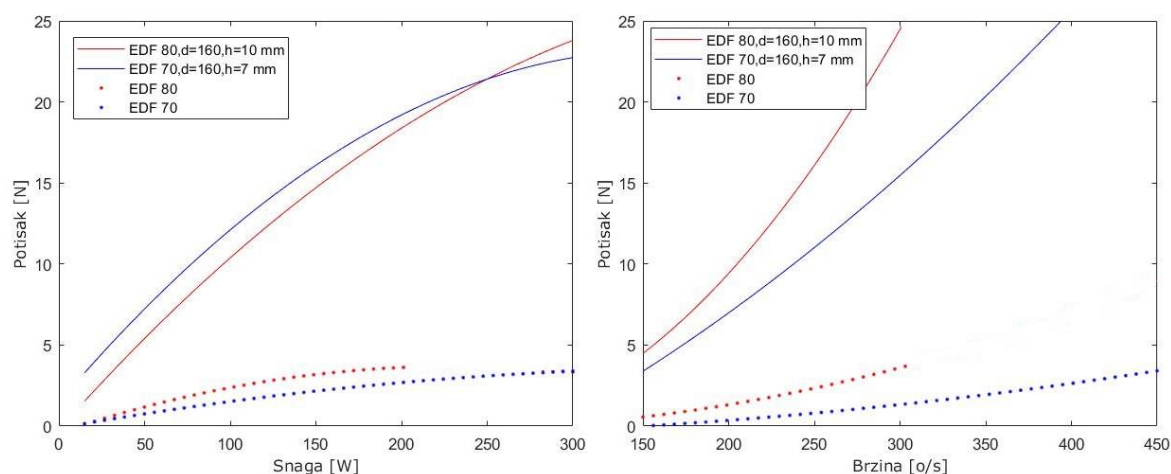
Tablica 15. Prikaz rezultata EDF-a 80 mm i EDF-a 70 mm

		Sila adhezije [N]	Snaga [W]	Gustoća snage [N/W]	Broj okretaja [o/s]	Omjer A_{iz}/A_{ul}
EDF 80 mm	d=160mm, h=7 mm	20,20	208	0,097	295	1,10
	d=160mm, h=10 mm	22,60	295	0,077	294	0,77
	d=160mm, h=12 mm	20,23	298	0,068	295	0,64
	Bez difuzora	3,67	200	0,018	305	x
EDF 70 mm	d=160mm, h=7 mm	24,51	317	0,077	384	0,9
	d=160mm, h=10 mm	18,932	297	0,063	356	0,63
	d=160mm, h=12 mm	16,12	300	0,054	360	0,53
	Bez difuzora	3,43	311	0,011	457	x

Vidljivo je kako upotrebom difuzora se dobiva povećanje sile adhezije od 551 % za EDF 80 mm i 614 % za EDF 70 mm. Na [Slika 117.] je prikazana usporedba rezultata s i bez difuzora.

Prema rezultatima u [Tablica 15.] vidljivo je da najveću silu adhezije (24,51 N) ostvaruje difuzor, EDF-a 70 mm, d=160 mm pri udaljenosti h=7 mm. U slučaju robota penjača je izrazito bitna i udaljenost difuzora od podloge. Poželjno je da udaljenost difuzora od podloge bude što veća kako bi osigurali da robot koji će koristiti ovaj sustav adhezije ima dovoljno prostora za prelazak preko određenih prepreka. Iz tog razloga je difuzor d=160, EDF-a 80 mm, na udaljenosti h=10 mm je najbolji izbor. Za povećanje udaljenosti od 42 % dobivena je 7 % manja sila adhezije.

Vrijednosti koje su prikazane u tablicama su maksimalne vrijednosti koje ovi EDF-ovi ostvaruju. Za očekivati je da prilikom upotrebe ovakvih sustava oni neće raditi pri maksimalnim vrijednostima, ali isto tako se očekuje da će u određenom trenutku EDF-ovi morati kratkotrajno raditi na maksimalnoj vrijednosti.



Slika 117. Usporedba rezultata bez i s difuzorom

13. TESTIRANJE RAZLIČITIH PODLOGA

Cilj testiranja različitih podloga je ispitati utjecaj vrste podloge na gubitke u sili adhezije. U nastavku su prikazane tri podloge na kojima je izvršeno testiranje u trajanju od pet minuta. Testiranje je provedeno pomoću EDF-a 80 mm s difuzorom $d=160$ mm na udaljenosti $h=10$ mm. Ograničenje struje na VESC-u je namješteno na 50A, dok je napajanje izvedeno pomoću izvora napajanja konstantnog napona 13 V.

Sva testiranja su provedena na okolišnoj temperaturi 14°C . Svaka od testnih površina je očišćena kako ne bi bilo nečistoća koje bi oštetile EDF tijekom testiranja.

13.1. Testirane podloge

Testne podloge su odabrane kao glatke (iverica s Melaminskom folijom), betonska ploča s manjim granulatom i s većim granulatom.

13.1.1. Glatka površina – iverica s Melaminskom folijom

Iverica s Melaminskom folijom je testna podloga kojoj je primarna primjena uredski stol. [Slika 118.] u nastavku prikazuje testnu podlogu.



Slika 118. Glatka površina

13.1.2. Površina manjeg granulata

Površina manjeg granulata je prikazana na [Slika 119.]. Površina je prosječne razlike visine 2 mm.



Slika 119. Površina manjeg granulata

13.1.3. Površina većeg granulata

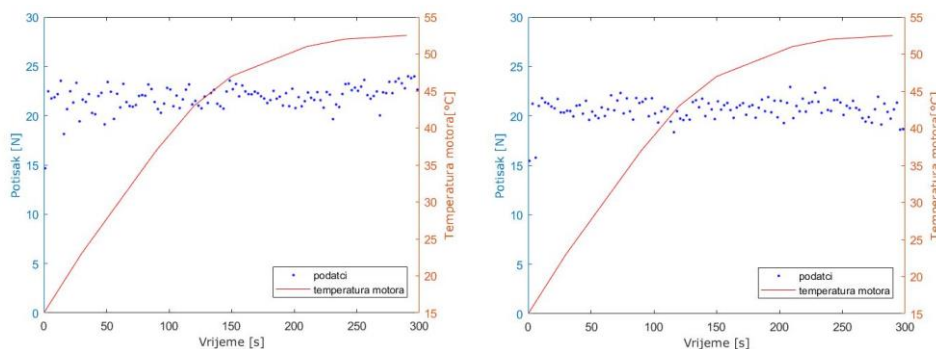
Površina većeg granulata je prikazana na [Slika 120.]. Površina je prosječne razlike visine 5 mm.



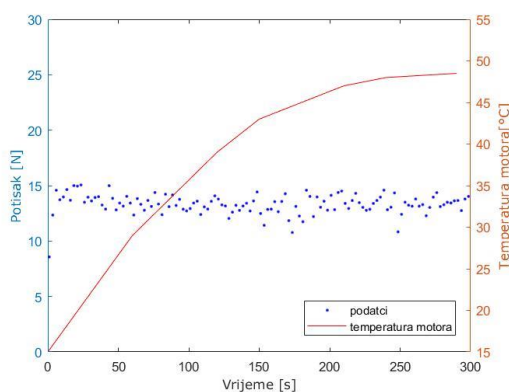
Slika 120. Površina većeg granulata

13.2. Rezultati testiranja

Rezultati testiranja različitih podloga su prikazani u nastavku. U grafovima na [Slika 121.][Slika 122.] su prikazani podatci sile adhezije i temperature motora prikupljeni tijekom testiranja.

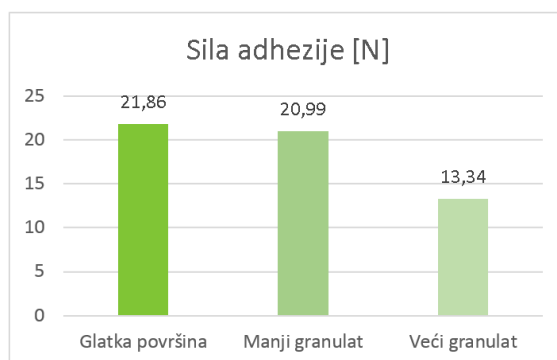


Slika 121. Rezultati testiranja glatke površine (lijevo) i površine manjeg granulata (desno)



Slika 122. Rezultati testiranja površine većeg granulata

Na [Slika 123.] je prikazana usporedba prosječne sile adhezije koja se javlja tijekom testiranja na različitim podlogama. Na vrhovima stupaca je ispisana prosječna vrijednost sile adhezije.



Slika 123. Usporedba prosječne sile adhezije različitih podloga

U [Tablica 16.] su prikazane srednje vrijednosti sile adhezije, potrošnje snage i broja okretaja motora tijekom ispitivanja

Tablica 16. Rezultati testiranja difuzora EDF-a 80 mm

	Sila adhezije [N]	Snaga [W]	Broj okretaja [o/s]	Smanjenje sile adhezije [%]
Glatka površina	21,86	240	275	x
Manji granulati	20,99	246	275	4
Veći granulati	13,34	243	275	39

Grafički i tablični prikaz nam ukazuje da je najveća sila adhezije ostvarena na glatkoj površini i iznosi 21,86 N, ta vrijednost će nam služiti kao referentna. Na površini s manjim granulatom prosječna vrijednost iznosi 96 % referentne vrijednosti što je smanjenje od 4 %. Na površini s većim granulatom ostvarena je 61 % referentne vrijednosti, što je pogoršanje od 39%.

Jasno je vidljivo da na grubim podlogama sustav ostvaruje manju silu adhezije u odnosu na glatke površine. Razlog tome je taj što udaljenost difuzora od podloge nije konstantna. Pošto udaljenost od podloge nije jednaka onoj pri idealno glatkim površinama sustav ne može ostvariti istu vrijednost podtlaka kao na idealno glatkim površinama i samim time se smanjuje sila adhezije.

14. ZAKLJUČAK

Kroz ovaj diplomski rad eksperimentalno je testiran adhezijski mehanizam negativnog tlaka u kombinaciji s potiskom. Razvijen je eksperimentalni postav pomoću kojeg su testirani različiti EDF motori te su razvijeni i testirani različiti tipovi difuzora. Eksperimentalni postav omogućava jednostavno izmjenjivanje cijevnih ventilatora i difuzora te podešavanje udaljenosti difuzora od podloge testiranja

Testiranjem ravnih, horizontalnih i zakrivljenih difuzora se utvrdilo da difuzori zakrivljene geometrije ostvaruju najveće sile adhezije i time su optimalni tip difuzora za daljnje ispitivanje. Provedbom simulacija različitih radijusa zakrivljenosti, a zatim i eksperimentalnim testiranjem zaključilo se da je moguće optimirati radijus zakrivljenosti difuzora kako bi postigli povećanje sile adhezije.

Usporedbom sile adhezije EDF-a bez difuzora i s difuzorom utvrđeno je da se korištenjem difuzora izlaznog promjera 160 mm postiže povećanje sile adhezije od 551 % za EDF 80 mm i 614 % za EDF 70 mm. Najveće sile adhezije postignute korištenje difuzora izlaznog promjera 160 mm su 24,51 N, za EDF 70 mm, na udaljenosti 7 mm i 22,6 N, na udaljenosti 10 mm, za EDF 80 mm.

Pomoću eksperimentalnog postava i asimetričnih tipova difuzora ispitala se mogućnost ostvarivanja kombinirane vertikalne i horizontalne sile prijanjanja te se došlo do zaključaka da upotreba difuzora pod nagibom nije prikladna za primjenu kod robota penjača. Razlog tome je taj da bi izvedba difuzora pod nagibom zakomplicirala konstrukciju robota, a sile koje se suprotstavljaju gravitaciji nisu dovoljno značajne.

Testiranje utjecaja podloge je provedeno na glatkoj površini, pri potrošni snage od 240W, te je ostvarena sila adhezije od 21,86 N, a zatim na površini s manjim granulatom gdje je zabilježeno pogoršanje od 4 % , te na kraju na površini s većim granulatom gdje je zabilježeno pogoršanje od 39 %.

Iz diplomskog rada je vidljivo kako je adhezija potiskom u kombinaciji s negativnim tlakom metoda adhezije koja ostvaruje dobre rezultate te ima potencijala za primjenu na robotima penjačima. Dobra strana ove metode je ta što ne zahtijeva direktan kontakt s površinom te je što se optimizacijom parametara ostvaruju veće sile adhezije. Nedostatci ovakve metode su velike potrošnje energije i potreba za osiguravanjem robota u slučaju oštećivanja lopatica cijevnih ventilatora kao i visoka razina buke.

LITERATURA

- [1] O. Unver, A. Uneri, A. Aydemir, M. Sitti, Geckobot: a gecko inspired climbing robot using elastomer adhesives, in: Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation, ICRA, IEEE, Orlando, Florida, USA, 2006
- [2] J. Grieco, M. Prieto, M. Armada, P. Gonzalez de Santos, A six-legged climbing robot for high payloads, in: Proceedings of the International Conference on Control Applications, CCA, Trieste, Italy, 1998
- [3] K. Daltorio, S. Gorb, A. Peressadko, A.D. Horchler, R.E. Ritzmann, R.D. Quinn, A robot that climbs walls using micro-structured polymer feet, in: 8th International Conference on Climbing and Walking Robots, CLAWAR, 2006
- [4] C. Menon, M. Murphy, M. Sitti, Gecko inspired surface climbing robots, in: Proceedings of the International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO, Shenyang, China, 2004
- [5] H. Zhang, W. Wang, J. Zhang, High stiffness pneumatic actuating scheme and improved position control strategy realization of a pneumatic climbing robot, in: Proceedings of the International Conference on Robotics and Biomimetics, IEEE, Bangkok, Thailand, 2009,
- [6] Z.-Y. Qian, Y.-Z. Zhao, Z. Fu, Development of wall-climbing robots with sliding suction cups, in: Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS, IEEE, Beijing, China, 2006
- [7] <http://info.ee.surrey.ac.uk/Workshop/advice/coils/force.html>, pristupljeno 24.6.2020.
- [8] H. Prahlaad, M. John, S. Scott, R. Pelrine, R. Kornbluh, Electrodeposited robots—wall climbing robots enabled by a novel, robust, and electrically controllable adhesion technology, in: Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation, ICRA, Pasadena, USA, 2008
- [9] T. Seo, M. Sitti, Under-actuated tank-like climbing robot with various transitioning capabilities, in: Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation, ICRA, Shanghai, China, 2011
- [10] G. Haynes, A. Khripin, G. Lynch, J. Amory, A. Saunders, A. Rizzi, D. Koditschek, Rapid pole climbing with a quadrupedal robot, in: International Conference on Robotics and Automation, ICRA, IEEE, 2009
- [11] McKenzie, C., & Parness, A., "Video summary of D.R.O.P. the Durable Reconnaissance and Observation Platform", 2012

- [12] Y. Yoshida, S. Ma, Design of a wall-climbing robot with passive suction cups, in: Proceedings of the International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO, IEEE, Tianjin, China, 2010
- [13] D. Schmidt, C. Hillenbrand, K. Berns, Omnidirectional locomotion and traction control of the wheel-driven, wall-climbing robot, CROMSCI, Robotica Journal 29 (7) (2011)
- [14] W. Brockmann, Towards low cost climbing robots, in: Proceedings of the 7th International Conference on Climbing and Walking Robots, CLAWAR, Springer-Verlag, Vienna, Austria, 2004
- [15] <https://www.vertigoproject.ch/index.php> , pristupljeno 28.6.2020.
- [16] <https://www.winnipegfreepress.com/local/audit-flags-gap-in-manitoba-bridge-inspections-387830001.html>, pristupljeno 22.11.2020.
- [17] <https://ethz.ch/en/news-and-events/eth-news/news/2014/08/d2d2-fighting-corrosion.html>, pristupljeno 22.11.2020.
- [18] G. Andrikopoulos, G. Nikolakopoulos, Vortex Actuation Via Electric Ducted Fans: an Experimental Study, Jurnal of Intelligent & Robotic Systems, 2018
- [19] <https://innovationdiscoveries.space/how-a-propeller-generates-thrust/> , pristupljeno 2.11.2020.
- [20] https://hr.wikipedia.org/wiki/Bernoullijeva_jednad%C5%BEba , pristupljeno 5.10.2020.
- [21] <https://flipsky.net/collections/electronic-products/products/torque-esc-vesc-%C2%AE-bldc-electronic-speed-controller> , pristupljeno 1.11.2020.
- [22] <https://www.arduino.cc/> , pristupljeno 1.11.2020.
- [23] <https://www.te.com/usa-en/product-20009605-05.html> , pristupljeno 1.11.2020.
- [24] <https://e-radionica.com/hr/i2c-multiplekser-made-by-e-radionica.html#> , pristupljeno 1.11.2020.
- [25] <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/proph.html>, pristupljeno 16.11.2020.

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Programski kod
- III. Tehnička dokumentacija

II. Prilog

```

#include <Wire.h>
#include <Servo.h>
#define DAddress 0x28          // Definiranje adrese senzora sile
Servo ESC;

//*****DEFINIRANJE VARIJABLI*****//

int n=0;                        // Postavljanje početnog stanja pomoćne varijable
int x=0;                        // Postavljanje početnog stanja pomoćne varijable
int aktivacija=0;              // Postavljanje početnog stanja pomoćne varijable
int output = 0;                // Postavljanje početnog stanja varijable izlaza senzora u 0
float g = 9.81;                // Postavljanje varijablje akceleracije sile teže [m/s^2]
float force,force_h = 0;        // Postavljanje početnog stanja varijabli sile [N]
float force_s,force_hs=0;       // Postavljanje početnog stanja varijable srednjih sila
float mass = 0;                // Postavljanje početnog stanja varijabli mase [g]
float nulh,nul1,nul2,nul3=0;    // Postavljanje početnog stanja varijablama za nuliranje
senzora

void setup()
{
  Wire.begin();                // Inicijalizacija Wire library
  Serial.begin(9600);           // Uključivanje serijskog slanja podataka
  delay(100);                   // Čekanje
  ESC.attach(13,1000,2000);     // Definiranje pina 13 kao izlaznog pina kontrole VESC-a
  aktivacija = digitalRead(2);  // Definiranje pina 2 kao aktivacijski pin
}

//*****NULIRANJE SENZORA*****//

void loop()
{

```

```
while (x==0)
{
    for (n=4;n<8;n++)                // Petlja za odabir pina multipleksera
    {
        Wire.beginTransmission(0x70);    // Definiranje adrese TCA9548A multipleksera
        Wire.write(1 << n);              // Slanje bajta na željenu adresu multipleksera
        Wire.endTransmission();          // Završetak slanja
        Wire.beginTransmission(DAddress); // Početak slanja na adresu senzora sile
        Wire.requestFrom(DAddress,2);    // Zahtjev za transmisiju dva bajta
        if(Wire.available() <= 2)        // Spremanje početne vrijednosti senzora sile u varijablu nulx
        {
            if (n==4)
            {
                nulh= (Wire.read() << 8 | Wire.read()); // Početna vrijednost senzora horizontalne sile
            }
            if (n==5)
            {
                nul1= (Wire.read() << 8 | Wire.read()); // Početna vrijednost prvog senzora vertikalne sile
            }
            if (n==6)
            {
                nul2= (Wire.read() << 8 | Wire.read()); // Početna vrijednost drugog senzora vertikalne sile
            }
            if (n==7)
            {
                nul3= (Wire.read() << 8 | Wire.read()); // Početna vrijednost trećeg senzora vertikalne sile
            }
        }
        x=1;
    }
}

//*****MJERENJE POČETNOG STANJA SENZORA*****//

//*****MJERENJE POČETNOG STANJA SENZORA*****//
```

```
while (aktivacija==LOW)                // Aktivacija petlje
{

    delay(100);
    for (n=4;n<8;n++)
    {
        mass, force ,force_s= 0;
        output = 0;
        for (int i=0;i<5;i++)            // Petlja ponovog očitavanja stanja senzora
        {
            Wire.beginTransmission(0x70);    // Definiranje adrese TCA9548A multipleksera
            Wire.write(1 << n);              // Slanje bajta na željenu adresu multipleksera
            Wire.endTransmission();          // Završetak slanja
            Wire.beginTransmission(DAddress); // Početak slanja na adresu senzora sile
            Wire.requestFrom(DAddress,2);    // Zahtjev za transmisiju dva bajta
            if(Wire.available() <= 2)       // Očitavanje stanja senzora sile
            {
                output = (Wire.read() << 8 | Wire.read());
                if (n==4)
                {
                    force = ((float(output) -nulh)/14000)*25 * 4.4482216; // Preračunavanje vrijednosti u silu za
horizontalni senzor
                    force=force*1.2;                // Podešavanje vrijednosti sile
                }
                if (n==5)
                {
                    force = ((float(output) -nul1)/14000)*25 * 4.4482216; // Preračunavanje vrijednosti u silu za prvi
senzor vertikalne senzor
                    force=force*1.2;                // Podešavanje vrijednosti sile
                }
                if (n==6)
                {
                    force = ((float(output) -nul2)/14000)*25 * 4.4482216; // Preračunavanje vrijednosti sile za drugi
senzor vertikalne sile
                    force=force*0.9;
                }
                if (n==7)
```

```
{
    force = ((float(output) -nul3)/14000)*25 * 4.4482216; // Preračunavanje vrijednosti sile za treći
senzor vertikalne sile
    force=force*1;
}
}
Wire.endTransmission();          // Završetak slanja
delay(100);
force_s=force_s+force;           // Zbrajanje vrijednost sila pojedinih mjerenja
}
force=force_s/5;                 // Računanje srednje vrijednosti sile
mass = force/g * 1000;           // Preračunavanje sile u masu
Serial.print(mass);              // Ispisivanje vrijednosti mase
Serial.print("\t");
}
Serial.print("\n");
delay(500);
aktivacija = digitalRead(2);
}

//*****//

//*****UPRAVLJANJE MOTOROM*****//

for(int i=90;i<181;i=i+5)         // Petlja upravljanja VESCom
{
    ESC.write(i);                 // Slanje vrijednosti na VESC
    Serial.print(i);              // Ispisivanje vrijednosti koja se šalje na VESC
    Serial.print("\t");
    delay(500);
    for (n=4;n<8;n++)
    {
        mass, force ,force_s= 0;
        output = 0;
        for (int i=0;i<5;i++)     // Petlja ponovnog očitavanja stanja senzora
        {
```

```
Wire.beginTransaction(0x70);           // Definiranje adrese TCA9548A multipleksera
Wire.write(1 << n);                     // Slanje bajta na željenu adresu multipleksera
Wire.endTransmission();                 // Završetak slanja
Wire.beginTransaction(DAddress);       // Početak slanja na adresu senzora sile
Wire.requestFrom(DAddress,2);           // Zahtjev za transmisiju dva bajta
if(Wire.available() <= 2)               // Očitavanje stanja senzora sile
{
    output = (Wire.read() << 8 | Wire.read());
    if (n==4)
    {
        force = ((float(output) -nulh)/14000)*25 * 4.4482216; // Preračunavanje vrijednosti u silu za
horizontalni senzor
        force=force*1.2;                                     // Podešavanje vrijednosti sile
    }
    if (n==5)
    {
        force = ((float(output) -nul1)/14000)*25 * 4.4482216; // Preračunavanje vrijednosti u silu za prvi
senzor vertikalne senzor
        force=force*1.2;                                     // Podešavanje vrijednosti sile
    }
    if (n==6)
    {
        force = ((float(output) -nul2)/14000)*25 * 4.4482216; // Preračunavanje vrijednosti sile za drugi
senzor vertikalne sile
        force=force*0.9;
    }
    if (n==7)
    {
        force = ((float(output) -nul3)/14000)*25 * 4.4482216; // Preračunavanje vrijednosti sile za treći
senzor vertikalne sile
        force=force*1;
    }
}
Wire.endTransmission();                 // Završetak slanja
delay(100);
force_s=force_s+force;                  // Zbrajanje vrijednost sila pojedinih mjerenja
}
```

```
    force=force_s/5;           // Računanje srednje vrijednosti sile
    mass = force/g * 1000;      // Preračunavanje sile u masu
    Serial.print(mass);         // Ispisivanje vrijednosti mase
    Serial.print("\t");
  }
  Serial.print("\n");
  delay(500);
}

//*****
}
```

