



## شبیه‌سازی و تحلیل آزمایشگاهی سیستم جاذب گردابه‌ای برای ربات‌های دیوار نورد

مسعود رضاسلطانی<sup>1</sup>، علیرضا ریاسی<sup>2\*</sup>، هادی مرادی<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

3- استادیار، مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران

\*تهران، صندوق پستی 11155-4563، ariasi@ut.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 07 بهمن 1392

پذیرش: 18 فروردین 1393

ارائه در سایت: 02 مهر 1393

کلید واژگان:

ربات دیوار نورد

جاذب گردابه‌ای

شبیه‌سازی عددی

### چکیده

در این مقاله یک نوع سیستم جاذب برای ربات‌های دیوار نورد، که به جاذب ورتکسی معروف می‌باشد، بصورت تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. سیستم جاذب ورتکسی شامل محفظه‌ی جاذب، پروانه و موتور محرک می‌باشد که ورتکس درون این جاذب، با استفاده از پروانه (فن سانتریفوژ) تولید می‌شود. بارزترین ویژگی این سیستم جاذب، محصور بودن جریان سیال درون آن می‌باشد که این طراحی باعث افزایش نیروی جاذبه و کاهش توان مصرفی موتور می‌شود. در ابتدا، یک سیستم جاذب مجهز به تجهیزات اندازه‌گیری میدان فشار، دور و توان ورودی ساخته شده و تاثیر پارامترهای مختلف روی نیروی جاذبه تولیدی، اندازه‌گیری و تحلیل شده است. در این بخش مشاهده شد که با افزایش فاصله‌ی جاذب از سطح، توان مصرفی افزایش می‌یابد. شبیه‌سازی عددی سیستم جاذب با استفاده از نرم‌افزار CFX انجام و نتایج حل، از طریق استقلال حل از شبکه و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی راست‌آزمایی شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که بیشترین تفاوت بین نقاط آزمایشگاهی و حل عددی تقریباً برابر 12 درصد می‌باشد. در حل عددی مشاهده شد که بیش‌ترین نیروی تولیدی برای جاذب با اندازه‌های موجود، معادل 13/59 نیوتن برای فاصله پنج میلی‌متری از سطح است. در ادامه مطالعه تحلیلی این سیستم با استفاده از مدل ورتکس رنگین انجام شده است. نتایج تحلیل جریان با استفاده از ورتکس رنگین نشان می‌دهد که نیرو و فشار، هر دو با مربع سرعت دورانی پروانه، رابطه مستقیم دارند.

## Numerical and Experimental Analysis of a Suction Cup Vortex Attractor Used in Wall Climbing Robots

Alireza Riasi<sup>2\*</sup>, Hadi moradi<sup>3</sup> Masoud Rezasoltani<sup>1</sup>,

1- Department of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

3- Department of Electrical and Computer Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

\*P.O.B. 11155-4563 Tehran, Iran, ariasi@ut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 27 January 2014

Accepted 07 April 2014

Available Online 24 September 2014

### Keywords:

Wall climbing robot

Vortex attractor

Numerical simulation

### ABSTRACT

In this work, adhesion system for wall climbing robots, known as "vortex attractor", has been studied analytically, numerically and experimentally. Vortex attractor system consists of the following components: vortex cup, centrifugal fan and an electrical motor. In this design, vortex flow which is generated at the fan impeller eye produces a considerable suction pressure. Knowing this fact that the air flow is trapped inside the cup, the suction force increases and also power consumption is reduced. Firstly, an attractor system is manufactured considering necessary measurement facilities. The effect of different parameters such as rotational speed and gap between system and surface on system performance is investigated. Numerical simulation of vortex attractor system is performed using CFX software. The numerical results were verified through grid independency and validated with comparison with those obtained from measurements. This validation shows that the maximum difference between the experimental and numerical results is approximately 12 percent. Numerical result shows that maximum generated suction force for distance of 5 mm from surface, equivalent to 13.59 N. In the next step analytical study is carried out using Rankine vortex. Experimental results show that as gap increases, power consumption increases. In the case of vortex attractor stick to surface, repulsive force is observed. Analytical results show that generated force and pressure are proportional to square of rotational speed.

### 1- مقدمه

خواه ناخواه، ربات‌ها بخش زیادی از زندگی روزانه‌ی ما را در آینده‌ی نزدیک تشکیل خواهند داد. ربات‌ها را از لحاظ پویایی می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد: بازوهای رباتیک و ربات‌های سیار. ربات‌های سیار برخلاف

با گسترش فناوری رباتیک<sup>1</sup>، ربات‌ها زندگی روزمره‌ی بشر را متحول کرده‌اند.

1- Robotic

Please cite this article using:

M. Rezasoltani, A. Riasi, H. moradi, Numerical and Experimental Analysis of a Suction Cup Vortex Attractor Used in Wall Climbing Robots, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 9, pp. 195-202, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

این روش، معمولاً روش پنوماتیکی گفته می‌شود). با توجه به اینکه اختلاف فشار نسبت به محیط اطراف ربات ایجاد می‌شود، لذا از این روش نمی‌توان در محیط‌های خلاء مانند کاربردهای فضایی بهره برد. اما در محیط‌هایی غیر از محیط خلاء این شیوه یکی از پرکاربردترین روش‌های ایجاد نیروی جاذبه می‌باشد، که خود بر سه قسم می‌باشد: ایجاد اختلاف فشار با استفاده از محفظه خلا برای سطوح صاف و غیر متخلخل، ایجاد اختلاف فشار با استفاده از محفظه مکش<sup>2</sup> و ایجاد اختلاف فشار با استفاده از تولید ورتکس<sup>3</sup>. در روش اول نیروی جاذبه با استفاده از یک پمپ خلاء تولید می‌شود، که به شکل موضعی یا به شکل خارجی و با استفاده از لوله به قسمت مکنده متصل می‌شود. از آنجایی که ربات باید روی سطوحی که معمولاً از جنس فلز زبر و یا سیمان هستند حرکت کند، محفظه نباید با اصطکاک زیادی به سطح بچسبد، از طرفی نباید خلاء ایجاد شده هدر رود لذا در این موارد از یک سیال و یا یک درزگیر برای آببندی ربات استفاده می‌شود. از آنجایی که برای ایجاد خلاء در این ربات‌ها، نیاز به زمان است لذا سرعت حرکتی آن‌ها پایین می‌باشد. از سوی دیگر کوچکترین شکافی می‌تواند باعث از بین رفتن خلاء و در نتیجه افتادن ربات گردد. بنابراین در ربات‌هایی که از این جاذب استفاده می‌کنند، بیش از یک محفظه خلاء وجود دارد که این امر راندمان ربات را کاهش می‌دهد [3]. این مشکلات باعث شده است که این ربات‌ها بیشتر برای سطوح صاف، غیر متخلخل و بدون شکاف بکار روند.

در روش ایجاد اختلاف فشار با استفاده از محفظه مکش، اختلاف فشار از طریق پمپی که در روی محفظه قرار دارد و مدام هوا را به بیرون محفظه پمپ می‌کند تامین می‌شود. شیوه آببندی در این روش با روش قبل متفاوت است؛ به این شکل که در این روش نیاز نیست که مانند حالت قبل محفظه به صورت کامل آببندی شود [4]. البته میزان آببندی نباید خیلی کم باشد در غیر این صورت نشتی هوا زیاد خواهد بود و اختلاف فشار کم، باعث ایجاد نیروی چسبندگی کمی خواهد شد. این شیوه آببندی ربات، این امکان را فراهم می‌آورد که ربات بتواند از روی موانع (با ارتفاع کم) عبور کند و یا از سطوح منحنی (با شعاع انحنای زیاد) بالا برود. بزرگ‌ترین مشکل این شیوه این است که چون اختلاف فشار تولید شده در این شیوه معمولاً کم می‌باشد، با استفاده از افزایش سطح اتاقک، نیروی مورد نیاز برای چسبندگی به سطح تولید می‌شود. لیکن، از آنجایی که سطح اتاقک بزرگ شده است، آببندی مناسب امکان‌پذیر نبوده و به جریان هوای بالایی، برای تولید اختلاف فشار، نیاز است. این جریان زیاد هوا باعث می‌شود که مصرف انرژی برای تولید خلا نسبی مورد نیاز در اتاقک زیاد باشد.

به جاذبی که از طریق ایجاد ورتکس (گردابه)، تولید نیروی جاذبه می‌کند، جاذب گردابه‌ای گفته می‌شود. در این روش با استفاده از نیروی گریز از مرکز درون ورتکس، ناحیه کم فشار ایجاد می‌شود. در واقع این خاصیت شبیه به خاصیت گردباد طبیعی است. در حالت کلی، در این نوع جاذب‌ها، ورتکس (گردابه) از دو طریق ایجاد می‌شود: با استفاده از ورود جت سیال به محفظه‌ی جاذب و یا با استفاده از قرار دادن فن درون محفظه‌ی جاذب.

تولید ورتکس با استفاده از ورود جت سیال برای ایجاد نیروی جاذبه، اولین بار توسط لی<sup>4</sup> و همکارانش [5] (سال 2008 میلادی) و در مقیاس بسیار کوچک ارائه شده و در سال‌های بعد توسط فلاح و همکارانش اصلاحاتی روی آن انجام شده است [6]. البته این شیوه برای ربات طراحی نشده و هدف

بازوهای رباتیک، قادر به حرکت در محیط اطراف خود می‌باشند. در حال حاضر ربات‌های سیار توجه بسیاری از تحقیقات علمی را به خود جلب کرده‌اند.

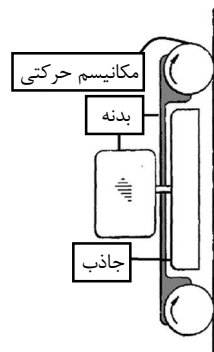
به عنوان یکی از پتانسیل‌های خاص ربات‌های سیار می‌توان از ربات‌های دیوارنوردی نام برد که قادرند در محیط‌هایی با ساختار نامنظم کار کنند. در واقع ربات دیوارنورد، رباتی است که روی سطوح شیب‌دار، گنبدی شکل، عمودی و یا روی سطوح افقی قادر است وظایف ویژه‌ای را انجام دهد. اولین ربات دیوارنورد در سال 1980 میلادی توسط نیشی<sup>1</sup> و همکارانش ساخته شده است [1]. در دو دهه اخیر علاقه روز افزونی در بکارگیری ربات‌های دیوارنورد در کارهای مختلف، همچون شست‌وشوی دیوارها و شیشه‌ها، مشاهده شده است. طی 15 سال اخیر، بکارگیری این ربات‌ها برای کاوش در محیط‌های خطرناک پیشروترین زمینه در استفاده از ربات‌های دیوارنورد سیار می‌باشد [2].

معمولاً از ربات‌های دیوارنورد برای انجام تست غیر مخرب و شناسایی در صنایع هسته‌ای، شیمیایی و صنعت تولید برق، جوشکاری در صنعت ساخت، نظافت و نگهداری از ساختمان‌های بلند در صنعت خدمات، جست‌وجو و نجات شهری در برنامه‌های نظامی و مدنی و غیره استفاده می‌شود [2]. بنابراین کاربرد وسیع این نوع ربات‌ها سبب شده است که انسان‌ها همواره در پی افزایش کارایی‌های آنها باشند.

در حالت کلی می‌توان گفت، ربات‌های دیوار نورد شامل جاذب، بدنه (شامل سنسورها، بازوهای مکانیکی و سایر ملحقات ربات) و مکانیسم حرکتی می‌باشند. در شکل 1 شماتیک یک نمونه ساده از ربات‌های دیوارنورد نمایش داده شده است.

عاملی که باعث می‌شود بتوان از حضور ربات‌ها در محیط‌های مختلف بهره برد ایجاد قابلیت چسبیدن به سطح جسم جامد، در آن‌ها می‌باشد. چسبندگی به سطح برای دیوارنوردی، امری پایه‌ای و اساسی است. نیروی ربایش باید بتواند بر نیروی گرانش حاصل از وزن ربات غلبه کند، بنابراین مهم‌ترین چالش یک ربات دیوارنورد غلبه بر نیروی گرانش است. از اینرو ربات باید قادر باشد نیروی چسبندگی مناسبی، البته بدون قربانی کردن قدرت تحرک ربات و با مکانیزمی که تا حد ممکن سبک باشد، تولید کند.

در حالت کلی جاذب‌ها (روش‌های تولید نیروی جاذبه) را می‌توان به چهار گروه تقسیم کرد: جاذب مغناطیسی، چنگ مکانیکی، جاذب الهام گرفته از طبیعت و جاذب پنوماتیکی، که از ایجاد اختلاف فشار جهت تولید نیروی جاذبه استفاده می‌کند. ربات‌های دیوارنورد زیادی هستند که از ایجاد اختلاف فشار، نسبت به فشار محیط، برای تولید نیروی جاذبه استفاده می‌کنند (به



شکل 1 اجزای یک ربات دیوار نورد

2- Suction cup  
3- Vortex  
4- Li

1- Nishi

ورودی و خروجی از یکدیگر جدا نیستند) و مدام یک حلقه را طی می‌کند. ویژگی دیگر این وسیله این است که به جنس سطح و یا میزان زبری آن حساسیت زیادی ندارد [7]. همچنین از آنجایی که این وسیله می‌تواند فاصله مشخصی از سطح داشته باشد نیازی به آب‌بندی ندارد، لذا اصطکاک کاهش می‌یابد و امکان عبور از موانع کوچک نیز وجود دارد.

## 2- تحلیل آزمایشگاهی

جهت بررسی بهتر جاذب گردابه‌ای نیاز است مقادیر توان مصرفی و توزیع فشار درون محفظه‌ی ورتکس مطالعه شود. به این منظور، در این بخش سعی شده است که با استفاده از نتایج آزمایشگاهی به بررسی این کمیت‌ها پرداخته شود.

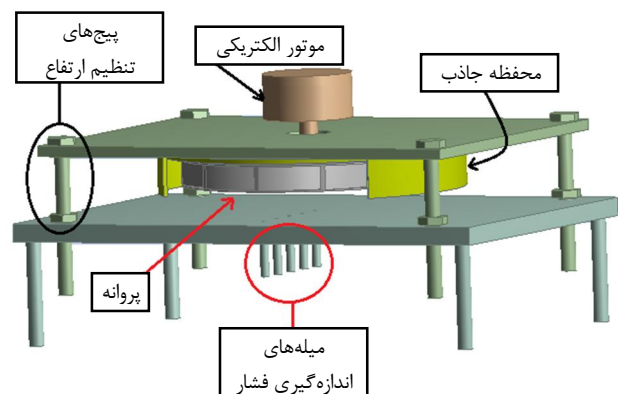
### 2-1- اجزای مختلف جاذب

جاذب ساخته شده، از سه قسمت اصلی (محفظه‌ی جاذب، پروانه و موتور الکتریکی) تشکیل شده است. برای تنظیم ارتفاع جاذب از سطح و همچنین اندازه‌گیری توزیع فشار، این جاذب روی سیستمی که در شکل 3 نمایش داده شده، نصب گردیده است. معرفی اجزای جاذب، در شکل شماتیک 4 انجام شده است.

مطابق شکل 5 محفظه جاذب بکار برده شده در این سیستم، به شکل استوانه‌ای است که یک سمت آن توسط صفحه‌ای پوشانده شده است. قطر این استوانه 178 میلی‌متر و ارتفاع آن 25 میلی‌متر است و جهت عبور شفتی که موتور را به پروانه متصل می‌کند، سوراخی روی صفحه پشتی ایجاد شده است.



شکل 3 دستگاه ساخته شده جهت آزمایش جاذب گردابه‌ای



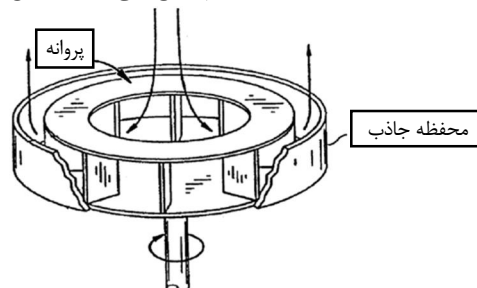
شکل 4 شکل شماتیک دستگاه ساخته شده جهت آزمایش جاذب گردابه‌ای

اصلی آن استفاده در صنایع الکترونیک با قطعات حساسی است که باید بدون تماس جابجا شوند. در این شیوه هوا از طریق یک نازل با سرعت بالا به داخل محفظه و به شکل مماسی وارد می‌شود و در محفظه شروع به چرخش می‌کند و این چرخش (ورتکس) باعث ایجاد اختلاف فشار درون محفظه نسبت به محیط می‌شود. یکی از مشکلات اساسی در این روش تامین جریان ورودی به نازل است، از آنجایی که نیاز است این جریان دارای فشار بالایی باشد لذا برای تامین آن نیاز به تجهیزات خاص می‌باشد. مهم‌ترین ویژگی این روش عدم نیاز به آب‌بندی و ایجاد نیروی جاذبه بدون تماس با سطح می‌باشد.

تولید ورتکس با استفاده از قرار دادن پروانه درون محفظه جاذب برای ایجاد نیروی جاذبه، اولین بار توسط الینگوس<sup>1</sup> و همکارانش در سال 2005 میلادی [7] مطرح شد. سپس ربات آلیشیا وی تی ایکس<sup>2</sup> در دانشگاه دوک<sup>3</sup> و نمونه‌ی دیگری از این ربات در سال 2008 میلادی در دانشگاه کاتانیا<sup>4</sup> [8]، با استفاده از این روش ساخته شدند. بنابر ادعای سازندگان این ربات، این شیوه، به علت نداشتن هوای خروجی دارای بازده سه برابری نسبت به ربات ساخته شده بر مبنای روش محفظه مکش می‌باشد.

مطابق شکل 2، این جاذب از دو قسمت پوسته و پروانه<sup>5</sup> (پره‌ها) تشکیل شده است. پره‌ها، درون پوسته‌ای حلقوی شکل قرار می‌گیرند که مطابق شکل، یک طرف این پوسته توسط یک صفحه پوشیده شده و سمت دیگر آن باز است. پوسته ممکن است به پره‌ها متصل باشد و همراه با آن بچرخد یا از پره‌ها جدا باشد. سیالی که در این دستگاه استفاده می‌شود می‌تواند شامل هر نوع گاز، مایع و هر ترکیب وابسته به آن‌ها و یا مایع شامل ذرات معلق جامد باشد [7].

پره‌ها حول محور دیواره‌ی حلقوی می‌چرخند (این محور بر محور شفتی که صفحه پشتی را می‌چرخاند منطبق است). پره‌ها معمولاً صاف یا منحنی شکل می‌باشند. شفت محرک را می‌توان توسط یک موتور الکتریکی با جریان مستقیم و یا متناوب به حرکت درآورد. با چرخش پره‌ها جریان سیال از انتهای باز پوسته وارد فضای اطراف محور پوسته می‌شود و از بین پره‌ها به سمت دیواره‌ی حلقوی شکل هدایت می‌شود، سپس جریان روی دیواره‌ی حلقوی به صورت مماسی و به سمت بالا جریان پیدا می‌کند. در حالت کلی مسیر حرکت سیال به صورت حلقه‌ای مارپیچ شکل است [7]، که این حرکت سیال باعث ایجاد منطقه‌ای کم فشار در نزدیکی محور پره‌ها می‌شود. در این مسیر ضمن اینکه جریان از برخورد با سیال خارج از مسیر، سرعتش کاهش می‌یابد مجدداً به سمت ورودی پره‌ها برگشت داده می‌شود. در واقع یکی از ویژگی‌های بارز جاذب گردابه‌ای که باعث صرف انرژی کمتر در آن می‌شود، این است که جریان سیال از سیستم خارج نمی‌شود (در واقع جریان‌های



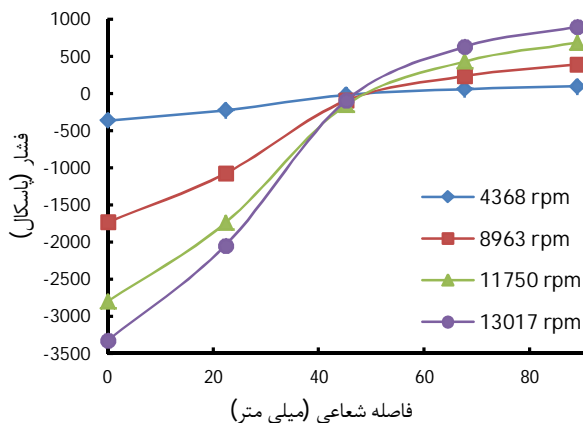
شکل 2 محفظه ورتکس به همراه پروانه [7]

1- Illingworth  
2- Alicia VTX  
3- Duke university  
4- Catania  
5- Impeller

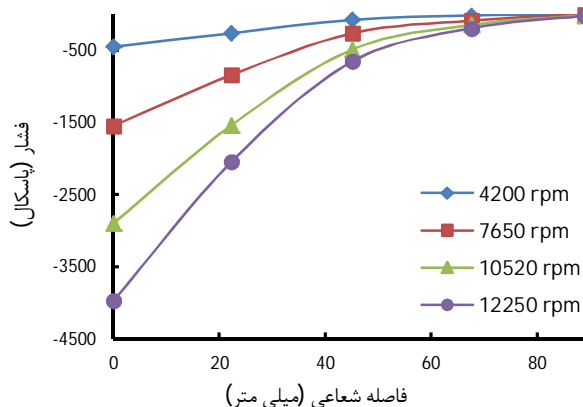
میلی‌متر) و در چهار دور مختلف موتور انجام شده است. توزیع فشار در دورهای مختلف و در حالاتی که جاذب در فاصله‌های صفر و پنج میلی‌متری از سطح قرار گرفته است، در شکل‌های 7 و 8 نمایش داده شده‌اند (برای فواصل 10 و 15 میلی‌متری جاذب از سطح نیز، سیر توزیع فشار مشابه فاصله پنج میلی‌متر از سطح می‌باشد، به همین دلیل از نمایش این دو نمودار صرف‌نظر شده است).

مطابق شکل 8 وقتی جاذب در فاصله‌ی پنج میلی‌متری از سطح قرار دارد، در تمامی سطح درونی محفظه، فشار منفی داریم (برای فاصله‌های 10 و 15 میلی‌متری هم نتایج شبیه به این حالت می‌باشد) ولی در حالتی که محفظه کاملاً به سطح می‌چسبد (شکل 7) از فاصله‌ی مشخصی به بعد (در راستای شعاعی) در محفظه، فشار مثبت مشاهده می‌شود. این موضوع باعث می‌شود که نیروی جاذبه به شدت کاهش یابد، و یا حتی در برخی موارد نیروی دافعه ایجاد شود.

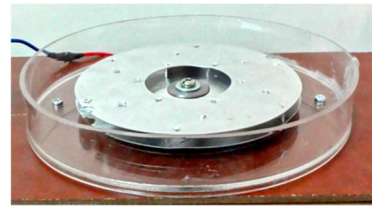
همانطور که در بخش قبل اشاره شد، توان ورودی به سیستم توسط وات‌متری با دقت اندازه‌گیری یک وات اندازه‌گیری شده است. در شکل 9 مشاهده می‌شود که توان ورودی، با افزایش فاصله‌ی جاذب از سطح بیشتر می‌شود. این موضوع به این دلیل است که با افزایش فاصله از سطح، مقدار بیشتری از جریان موجود در محفظه‌ی ورتکس از آن خارج می‌شود و در ضمن جریان سیال درون محفظه، با سیال محیط، بیشتر در ارتباط قرار



شکل 7 توزیع فشار بر حسب فاصله تا محور در دورهای مختلف و در فاصله صفر میلی‌متری جاذب از سطح



شکل 8 توزیع فشار بر حسب فاصله تا محور در دورهای مختلف و در فاصله پنج میلی‌متری جاذب از سطح



شکل 5 محفظه ورتکس به همراه پروانه

همانطور که اشاره شد در این جاذب، از پروانه شعاعی استفاده شده است (شکل 6). این پروانه، از نوع بکوارد<sup>1</sup> با سرعت مخصوصی نزدیک به 40 در واحد SI می‌باشد که معمولاً در جاروبرقی‌ها از آن استفاده می‌شود. برای انتخاب این پروانه، پنج نمونه پروانه‌ی جاروبرقی با قطر خارجی تقریباً برابر، تست شده و پروانه‌ای که نتایج بهتری داشته، برای انجام آزمایش انتخاب شده است. قطر دهانه این پروانه 47 میلی‌متر و قطر خارجی آن 121 میلی‌متر می‌باشد.

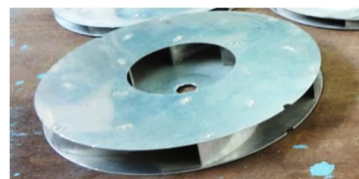
برای چرخاندن پروانه از یک موتور الکتریکی تکفاز، استفاده شده است. سرعت و توان نامی این موتور در ولتاژ 220 ولت<sup>2</sup>، به ترتیب 13000 دور در دقیقه و 185 وات<sup>3</sup> می‌باشد.

از آنجایی که یکی از روش‌های کنترل دور موتورهای الکتریکی تکفاز، از طریق کنترل ولتاژ می‌باشد، در اینجا از یک دیمر<sup>4</sup> جهت کنترل دور موتور الکتریکی استفاده شده است. دیمر وسیله‌ای است که در مدار به صورت سری قرار می‌گیرد و می‌تواند ولتاژ را کنترل کند.

برای اندازه‌گیری توزیع فشار، سرعت چرخش پروانه و توان مصرفی به ترتیب از مانومتر، دورسنج و وات‌متر استفاده شده است که در جدول 1، دقت اندازه‌گیری هر یک از این وسایل آمده است.

## 2-2- نتایج تحلیل آزمایشگاهی

جهت تعیین توزیع فشار، پنج سوراخ روی صفحه‌ای که جاذب روی آن قرار می‌گیرد، ایجاد شده است. از آنجایی که مقطع محفظه جاذب دایروی است این سوراخ‌ها روی یک شعاع از دایره زده شده‌اند و با استفاده از شلنگ‌های رابط، هر یک از این سوراخ‌ها به یکی از ستون‌های مانومتر متصل شده است. مکان قرارگیری این نقاط به نحوی انتخاب شده است که، با فاصله‌های تقریباً مساوی روی شعاع استوانه (محفظه ورتکس) واقع شوند. آزمایش در چهار فاصله‌ی مختلف محفظه‌ی جاذب از سطح (فاصله‌های صفر، پنج، 10 و 15

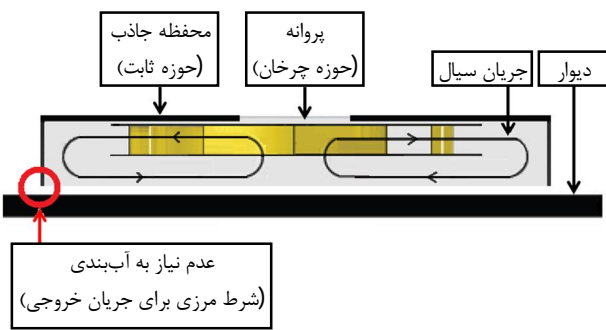


شکل 6 پروانه شعاعی بکار برده شده در جاذب گردابه‌ای

جدول 1 دقت وسایل اندازه‌گیری

وسيله‌ی اندازه‌گیری	دقت اندازه‌گیری
مانومتر	2 میلی‌متر آب
دورسنج	1 دور در دقیقه
وات‌متر	2 وات

1- Backward  
2- Volt  
3- Watt  
4- Dimer



شکل 10 شماتیک جاذب گردابه‌ای

### 3-1- عدم وابستگی حل عددی به شبکه

جهت بررسی عدم وابستگی حل عددی به شبکه، از چهار عدد شبکه با اندازه‌های مختلف استفاده شده است. اضلاع هر عدد مش از این شبکه‌ها، با نسبت 1/4 نسبت به شبکه‌ی دیگر ریز شده‌اند. عدم وابستگی شبکه، برای نیرویی که جاذب تولید می‌کند مورد بررسی قرار گرفته است. تعداد مش هر شبکه و نیروی تولید شده در هر مورد در جدول 2 آمده است. لازم به ذکر است که تمامی حل‌ها در دور 12500 دور در دقیقه و در فاصله‌ی پنج میلی‌متری جاذب از سطح انجام شده است. محفظه‌ی جاذب نیز دارای همان شکل و ابعادی است که در فصل نتایج آزمایشگاهی معرفی شد. با توجه به جدول می‌توان گفت که 807204 عدد مش برای توصیف جریان درون جاذب کافی می‌باشد.

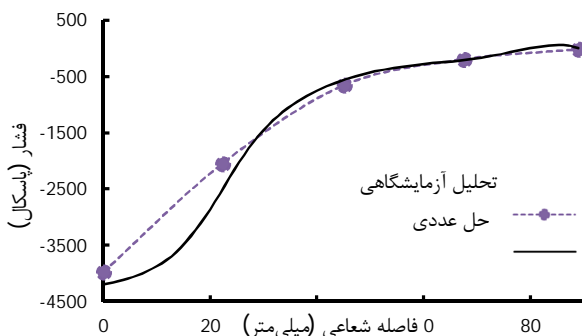
### 3-2- مقایسه‌ی حل عددی و نتایج آزمایشگاهی

مقایسه در دو فاصله مختلف جاذب از سطح (فاصله‌ی صفر و پنج میلی‌متر) و در سرعت مشخص صورت گرفته است. نتایج در شکل‌های 11 و 12 نمایش داده شده‌اند.

شکل‌های 11 و 12 نشان می‌دهند که نتایج آزمایشگاهی انطباق خوبی با

جدول 2 بررسی عدم وابستگی حل عددی به شبکه

تعداد مش	نیروی تولید شده (نیوتن)	درصد تغییرات (%)
139244	15/075	
334150	14/7026	2/5
807204	14/432	1/875
1981523	14/186	1/73



شکل 11 مقایسه‌ی نتایج عددی و آزمایشگاهی برای فاصله پنج میلی‌متری جاذب از سطح، در سرعت 12250 دور در دقیقه

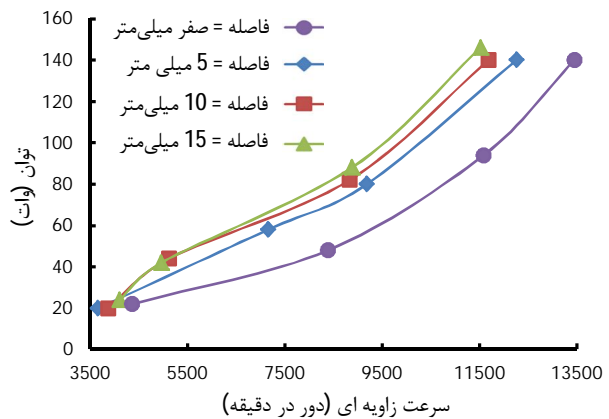
می‌گیرد، در نتیجه توان مصرفی موتور بیشتر می‌شود. با افزایش سرعت چرخش پروانه نیز توان مورد نیاز موتور بیشتر می‌شود.

### 3- شبیه‌سازی عددی

در این بخش، سیستم جاذبی که در بخش قبل آزمایش شد، توسط نرم‌افزارهای مربوطه شبیه‌سازی شده و نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. جاذب مدنظر (همانگونه که در بخش قبل هم نمایش داده شد) از یک محفظه‌ی ثابت و یک فن شعاعی تشکیل شده است.

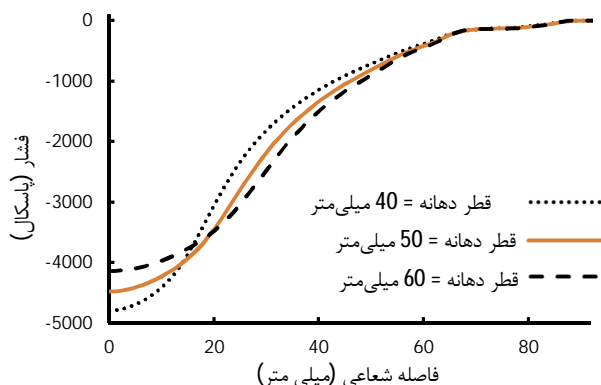
شبیه‌سازی جاذب با استفاده از نرم افزار تجاری CFX و شبکه‌بندی آن با استفاده از نرم افزار ICEM CFD انجام شده است. برای شبیه‌سازی، جاذب به دو حوزه تقسیم شده است، یک حوزه ثابت است و حوزه‌ی دیگر با سرعت زاویه‌ای ثابت درون آن می‌چرخد. اگرچه حل ناپایایی که براساس حرکت مش<sup>1</sup> است، از لحاظ فیزیکی مدل محاسباتی دقیق تری می‌باشد ولی هزینه محاسباتی بالایی دارد [9]. به همین دلیل، برای اکثر مسائل مهندسی از تکنیک حوزه چرخان<sup>2</sup> استفاده می‌شود (مانند مراجع [9] و [10]). حوزه‌های ثابت و دوار توسط صفحات رابط<sup>3</sup> با هم تبادل اطلاعات می‌کنند که به جهت مقارن بودن هندسه، برای تحلیل از شرط مرزی تناوبی<sup>4</sup> استفاده شده است. در واقع حوزه‌ی ثابت محفظه‌ی جاذب را شامل می‌شود و حوزه‌ی دوار پروانه را دربر می‌گیرد. مش استفاده شده در حوزه‌ی ثابت، مش سازمان یافته<sup>5</sup> در حوزه‌ی دوار نیز از مش بی‌سازمان<sup>6</sup> استفاده شده است، البته در این حوزه برای نواحی نزدیک به دیواره چند لایه مش سازمان یافته بکار رفته است. در شکل 10 حوزه ثابت، حوزه دوار و مسیر حرکت سیال به صورت شماتیک نمایش داده شده است.

در تمامی تحلیل‌های عددی انجام شده از مدل توربولانسی انتقال تنش برشی<sup>7</sup> استفاده شده است. با مقایسه حل‌های عددی انجام شده توسط مدل‌های توربولانسی میانگین رینولدز<sup>8</sup> با نتایج آزمایشگاهی مشخص شد که مدل انتقال تنش برشی می‌تواند تخمین خوبی از جریان درون جاذب بزند.

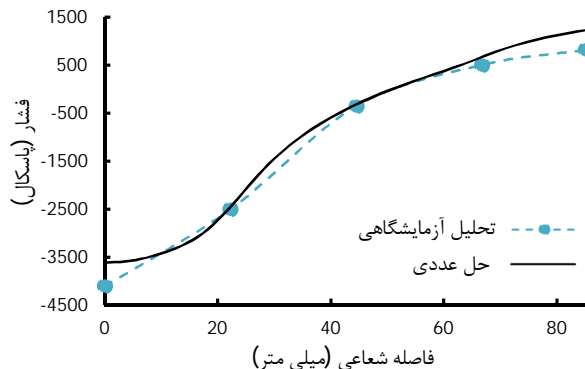


شکل 9 تغییرات توان ورودی بر حسب سرعت دورانی، در فاصله‌های مختلف جاذب از سطح

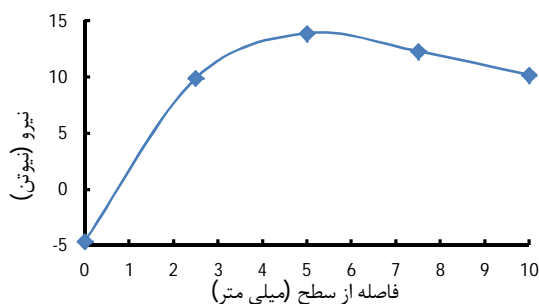
- 1- Mesh
- 2- Rotational domain
- 3- Interface
- 4- Periodic
- 5- Structured
- 6- Unstructured
- 7- Shear stress transport
- 8- Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)



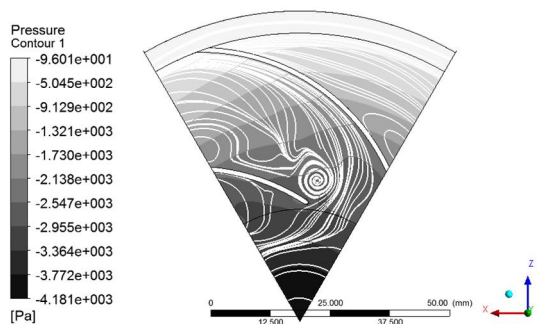
شکل 13 بررسی تاثیر قطر ورودی پروانه روی توزیع فشار در سرعت 12500 دور در دقیقه



شکل 12 مقایسه‌ی نتایج عددی و آزمایشگاهی برای فاصله صفر میلی‌متری جاذب از سطح، در سرعت 13700 دور در دقیقه



شکل 14 نیروی جاذبه تولیدی جاذب بر حسب فاصله از سطح در سرعت 12250 دور در دقیقه



شکل 15 کانتور فشار استاتیکی و خطوط جریان در یک بخش از پروانه، در فاصله پنج میلی‌تری جاذب از سطح

نیز کانتور فشار استاتیکی به همراه خطوط جریان را، برای یک بخش از پروانه در حل عددی نشان می‌دهد.

#### 4- تخمین نیروی تولیدی با استفاده از ورتکس رنگین

ورتكس رنگین مدل ساده‌ای از ورتکس است (رنگین در سال 1858 میلادی [11]) که حرکت جریان غیر لزج را در راستای افق فرض می‌کند، در حالی که هیچ جریانی در راستای شعاعی و محوری وجود ندارد. لذا هیچ مکانیزمی برای تولید چنین جریانی در حالت واقعی وجود ندارد. با این وجود، این مدل توصیف خوبی از جریان گردابه به ما می‌دهد. رنگین فرض کرده است که هر جریان چرخشی از یک بخش اجباری و یک بخش آزاد تشکیل شده باشد، از این رو ورتکس رنگین را با ورتکس ترکیبی رنگین هم می‌شناسند. توزیع سرعت و فشار در این مدل، مطابق معادلات 1 و 2 می‌باشد [11].

نتایج حل عددی دارند. بیشترین اختلافی که نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی در دو شکل مذکور دارند، 12 درصد می‌باشد (این خطا براساس مقایسه پنج نقطه موجود در تحلیل آزمایشگاهی با نقاط نظیرشان در تحلیل عددی بدست آمده است) و اختلافی که در فاصله نزدیک به 10 میلی‌متر از مرکز جاذب در شکل 11 مشاهده می‌شود، ناشی از عدم وجود نقطه آزمایشگاهی در این منطقه است.

#### 3-3- نتایج شبیه‌سازی عددی

منحنی توزیع فشار بدست آمده از شبیه‌سازی عددی (شکل‌های 11 و 12) شکل واقعی توزیع فشار درون محفظه جاذب را مشخص می‌کند. با استفاده از این منحنی علاوه بر محاسبه نیروی جاذبه تولیدی، می‌توان به تحلیل رفتار جریان سیال درون جاذب پرداخت.

با توجه به توزیع فشار بدست آمده از طریق شبیه‌سازی عددی می‌توان گفت که این منحنی دارای نقطه عطفی می‌باشد که دو بخش، یکی با تقعر مثبت و دیگری با تقعر منفی، را از هم جدا می‌کند. جهت بررسی تاثیر قطر دهانه ورودی پروانه روی توزیع فشار، سیستم جاذب با همان ابعاد معرفی شده در بخش‌های قبل در نظر گرفته شده و برای سه قطر مختلف دهانه پروانه، نتایج با هم مقایسه شده است. مطابق شکل 13 با تغییر قطر دهانه پروانه مکان نقطه عطف نیز تغییر می‌کند. با دقت بیشتر در این شکل (و همچنین بررسی قطرهای بیشتر)، می‌توان گفت که با تقریب خوبی نقطه عطف منحنی فشار، منطبق بر قطر دهانه پروانه می‌باشد. البته این موضوع وابسته به ارتفاع محفظه جاذب و همچنین فاصله جاذب از سطح نیز می‌باشد، ولی از آنجایی که در جاذب‌های ورتکسی هر دو دارای مقادیر کمی هستند، می‌توان از این فرض استفاده کرد.

در نتایج آزمایشگاهی مشخص شد که با نزدیک شدن جاذب به سطح، تماس جریان ورتکس با سیال محیط کم‌تر می‌شود، در نتیجه موتور الکتریکی به توان کمتری برای چرخاندن پروانه نیاز پیدا می‌کند. متعاقباً انتظار می‌رود که با نزدیک شدن جاذب به سطح قدرت ورتکس بیش‌تر شود و سیستم نیروی جاذبه‌ی بیش‌تری را تولید کند. ولی توزیع فشار بدست آمده از طریق آزمایش نشان داد، در حالتی که محفظه جاذب کاملاً به سطح بچسبد، از فاصله‌ی مشخصی به بعد در محفظه، فشار مثبت داریم. این موضوع نشان می‌دهد که وقتی جاذب از فاصله مشخصی، بیشتر به سطح نزدیک شود نیروی جاذبه افت می‌کند. شکل 14 نتایج حاصل از حل عددی جاذب، در فاصله‌های مختلف از سطح می‌باشد که موبد همین موضوع است. شکل 15

بدست می‌آید:

$$F = \int_0^{R_0} \Delta p \times (2\pi r) dr = \int_0^R \left( c \times \omega^2 \times \left( -R^2 + \frac{1}{2} r^2 \right) \right) \times (2\pi r) dr + \int_R^{R_0} \left( -c \times \omega^2 r^2 \right) \times (2\pi r) dr = -c \times \pi \omega^2 R^4 \left( \frac{3}{4} + \ln \left( \frac{R_0}{R} \right) \right) \quad (6)$$

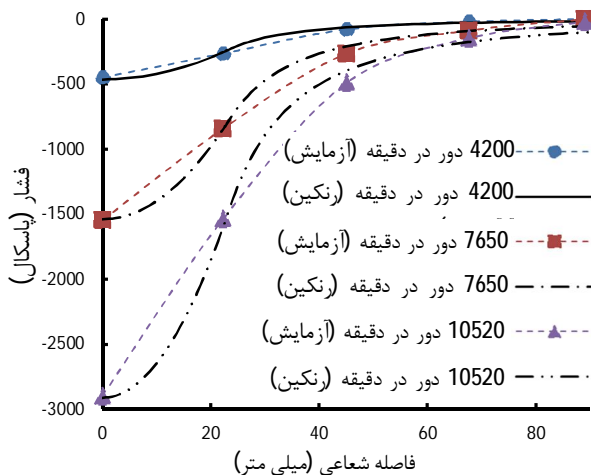
مطابق معادله‌ی فوق، نیرو ( $F$ ) با مربع سرعت زاویه‌ای رابطه‌ی مستقیم دارد. با استفاده از معادله 6 و همچنین با توجه به معادله 5، معادله نیرو بر حسب سرعت دورانی برای جاذب، با ابعاد معرفی شده به صورت رابطه (7) است:

$$F = -8.723 \times 10^{-6} \omega^2 \quad (N) \quad (7)$$

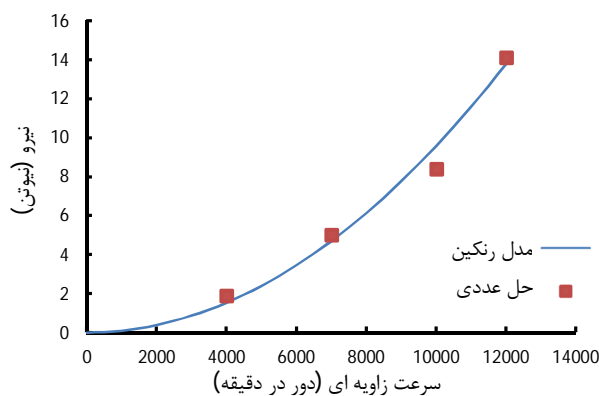
جهت تحقیق صحت جواب‌های بدست آمده از تخمین نیرو، با استفاده از ورتکس رنگین، می‌توان نیروی بدست آمده با استفاده از این مدل را با نتایج حل عددی مقایسه کرد. مطابق شکل 17 این مدل بخوبی توانسته است نیروی جاذبه تولیدی را تخمین بزند. بیشترین خطا در این نمودار حدود 12 درصد می‌باشد (این خطا براساس مقایسه نقاط حاصل از حل عددی با نقاط نظیرشان در مدل ورتکس رنگین بدست آمده است).

### 5- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک نوع سیستم جاذب برای ربات‌های دیوار نورد، که بر اساس



شکل 16 مقایسه‌ی توزیع فشار حاصل از نتایج آزمایشگاهی و توزیع فشار رنگین



شکل 17 مقایسه‌ی نیروی جاذبه تخمین زده شده توسط مدل ورتکس رنگین و نتایج حل عددی در دوره‌های مختلف

$$v_{\theta} = \begin{cases} \omega r & (0 < r < R) \\ \frac{\omega R^2}{r} & (R < r < R_0) \end{cases} \quad (1)$$

$$\Delta p(r) = \begin{cases} -\rho \omega^2 R^2 + \frac{\rho}{2} \omega^2 r^2 & (0 < r < R) \\ -\frac{\rho}{2} \omega^2 r^2 & (R < r < R_0) \end{cases} \quad (2)$$

با مقایسه توزیع سرعت و فشار حاصل از مدل رنگین و نتایج شبیه‌سازی عددی، مشاهده شد که با اضافه کردن یک ثابت به مدل رنگین، این مدل می‌تواند توزیع فشار درون محفظه جاذب را تخمین بزند. بنابراین معادله‌ی تخمینی توزیع فشار درون جاذب به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\Delta p(r) = \begin{cases} c \times \omega^2 \left( -R^2 + \frac{1}{2} r^2 \right) & (0 < r < R) \\ -c \times \omega^2 r^2 & (R < r < R_0) \end{cases} \quad (3)$$

در معادله فوق،  $\omega$  سرعت دورانی پروانه،  $R$  شعاع دهانه ورودی پروانه (طبق نتیجه‌ای که از شکل 13 حاصل شد)،  $C$  ثابت و  $R_0$  شعاع محفظه جاذب می‌باشد. مطابق این معادله اختلاف فشار درون جاذب با مربع سرعت زاویه‌ای رابطه مستقیم دارد. لازم به ذکر است که توزیع سرعت درون محفظه جاذب را نیز می‌توان به همین روش تخمین زد، ولی از آنجایی که در اینجا هدف محاسبه نیروی جاذبه می‌باشد تنها به بررسی توزیع فشار بسنده شده است.

برای مشخص شدن مقدار ثابت معادله 3 لازم است که مقدار فشار در نقطه مشخصی از محفظه جاذب در یک سرعت دورانی، توسط آزمایش مشخص شود. با توجه به معادله 3 بیشترین اختلاف فشار در مرکز ورتکس ایجاد می‌شود که به صورت رابطه (4) بدست می‌آید:

$$\Delta p_{\min} = -c \times \omega^2 R^2 \quad (4)$$

با مشخص شدن مقدار ثابت معرفی شده در معادله 3، توزیع فشار درون محفظه‌ی جاذب بدست می‌آید. در واقع با استفاده از این معادلات و با داشتن فشار در مرکز جاذب (در یک سرعت دورانی) می‌توان توزیع فشار در کل محفظه (و در نتیجه نیرو) را در هر سرعت دورانی بدست آورد.

جهت تحقیق صحت جواب‌های بدست آمده از تخمین توزیع فشار، با استفاده از ورتکس رنگین، می‌توان توزیع فشار بدست آمده با استفاده از این مدل را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرد. در نتایج آزمایش، برای حالتی که فاصله جاذب از سطح پنج میلی‌متر باشد، برای چهار سرعت دورانی، توزیع فشار اندازه‌گیری شده است. کمترین فشار ایجاد شده درون محفظه برای سرعت 12250 دور در دقیقه، 3947/89- پاسکال می‌باشد، لذا ثابت معادله-ی توزیع فشار به صورت رابطه (5) بدست می‌آید:

$$\omega = 12250 \text{ rpm} = 1282.817 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, \quad R = 0.0235 \text{ m} \rightarrow -c \times \omega^2 R^2 = -3974.89 \rightarrow c = 4.3738 \quad (5)$$

با بدست آمدن ثابت معادله، می‌توان توزیع فشار را در دور 12250 دور در دقیقه رسم کرد. همانگونه که معادله‌ی توزیع فشار رنگین نشان می‌دهد، توزیع فشار با مربع سرعت زاویه‌ای رابطه مستقیم دارد، لذا توزیع فشار، در سایر دوره‌ها را نیز می‌توان بدست آورد. این توزیع فشار برای سه سرعت دورانی، در شکل 16 رسم شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. این شکل نشان می‌دهد که مدل ورتکس رنگین به خوبی نقاط بدست آمده از طریق آزمایش را دنبال می‌کند؛ بنابراین می‌توان گفت که ورتکس رنگین می‌تواند تخمین خوبی از توزیع فشار درون محفظه‌ی جاذب بزند.

بر اساس معادله 3، نیروی حاصل از اختلاف فشار ایجاد شده درون جاذب به واسطه حضور جریان چرخشی، روی سطح دایروی (مثل سطح محفظه جاذب در مدلی که در این مقاله بکار برده شده) به صورت رابطه (6)

مربع سرعت دورانی پروانه، رابطه‌ی مستقیم دارند). با بدست آمدن رابطه‌ای که نیروی جاذبه را براساس سرعت دورانی تعریف می‌کند، می‌توان سنسورهایی که بر اساس نیروی مورد نیاز جاذب، سرعت دورانی پروانه را تنظیم می‌کنند، را روی ربات نصب کرد. این کار باعث می‌شود که توان مصرفی جاذب، به میزان قابل توجهی کاهش یابد.

## 6- مراجع

- [1] A. Nishi, Y. Wakasugi, K. Watanabe, Design of a robot capable of moving on a vertical wall, *Advanced Robotics*, Vol. 1, pp. 33-45, 1986.
- [2] H. Zhang, *Integration of biological inspirations and modular approach for designing climbing robots*, Habilitation Thesis, Department Informatics Faculty of Mathematics, Informatics and Natural Sciences, University of Hamburg, Germany, 2010.
- [3] D. Longo, G. Muscato, Modular approach for the design of the alicia3 climbing robot for industrial inspection, *Industrial Robot: an International Journal*, Vol. 31, No. 2, pp. 148-158, 2004.
- [4] J. Xiao, A. Sadegh, City-climber: a new generation wall-climbing robots, *Climbing & Walking Robots: towards New Applications*, Houxiang Zhang (Ed.), ISBN: 978-3-902613-16-5, InTech, DOI: 10.5772/5090, 2007.
- [5] X. Li, K. Kawashima, T. Kagawa, Analysis of vortex levitation, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 32, pp. 1448-1454, 2008.
- [6] A. Fallah, M. Rezasoltani, A. Riasi, H. Moradi, Numerical analysis of a non-contact surface adhesion system based on vortex cup for wall climbing robots, in *First RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics*, Tehran, Iran, pp. 368 - 373, 2013.
- [7] L. Illingworth, NH. Kensington, D. Reinfield, NJ. Englewood, *Suction cup vortex attractor*, US Patent No. 6881025, 2005.
- [8] F. Bonaccorso, C. Bruno, D. Longo, G. Muscato, Structure and model identification of vortex-based suction cup, in *11th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, Coimbra, Portugal, pp. 303-310, 2008.
- [9] M. Zdravec, S. Basic, M. Hribersek, The Influence of rotating domain size in rotating frame of reference approach for simulation of rotating impeller in a mixing vessel, *Engineering Science and Technology*, Vol. 2, No. 2, pp. 126 - 138, 2007.
- [10] Y. R. Pathak, B. D. Baloni, Dr.S.A. Channiwala, Numerical simulation of centrifugal blower using CFX, *International Journal of Electronics, Communication & Soft Computing Science and Engineering*, ISSN: 2277-9477, pp. 242-247, 2012.
- [11] W. J. M. Rankine, *A Manual of Applied Mechanics*, 9th Edition, C. Griffin and Co., London, UK, 1858.

تولید ورتکس کار می‌کند (ورتکسی که با استفاده از یک فن سانتریفوژ تولید می‌شود) مورد بررسی قرار گرفته است. بارزترین ویژگی این سیستم، محصور بودن جریان سیال درون آن می‌باشد که این طراحی باعث افزایش نیروی جاذبه و کاهش توان مصرفی موتور می‌شود.

در ابتدا سیستم جاذب، به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت و در ادامه جریان درون جاذب شبیه‌سازی شد و نتایج حل، با نتایج آزمایشگاهی راست‌آزمایی شد. در انتها نیز مطالعه تحلیلی این سیستم با استفاده از مدل ورتکس رنگین انجام شده است.

در بخش آزمایشگاهی مشاهده شد که با افزایش سرعت دورانی پروانه، اختلاف فشار بیشتری درون جاذب تولید می‌شود. در حالتی که فاصله جاذب از سطح صفر است، مشاهده شد که نیروی جاذبه افت می‌کند و حتی ممکن است نیروی دافعه درون جاذب ایجاد شود. با افزایش فاصله‌ی جاذب از سطح نیز، توان مصرفی موتور بیشتر می‌شود.

در بخش شبیه‌سازی عددی، پروفیل فشار درون محفظه جاذب مشخص شد؛ این موضوع با استفاده از پنج نقطه‌ای که در تحلیل آزمایشگاهی به کار برده شد قابل تحقق نبود. با بدست آمدن پروفیل فشار، می‌توان نیروی جاذبه‌ی تولیدی توسط جاذب را محاسبه کرد؛ با محاسبه این نیرو مشاهده شد که در فاصله‌های بسیار کم از سطح، جاذب نیروی دافعه تولید می‌کند. با استفاده از پروفیل‌های فشار بدست آمده از حل عددی می‌توان گفت که جریان درون جاذب از یک ورتکس آزاد و یک ورتکس اجباری تشکیل شده که قطر دهانه فن سانتریفوژ، تعیین کننده محدوده این ورتکس‌ها می‌باشد.

از مقایسه‌ی توزیع فشار مدل ورتکس رنگین و توزیع فشار درون جاذب که با استفاده از حل عددی بدست آمد، مشاهده شد که این مدل می‌تواند به خوبی توزیع فشار درون جاذب را تخمین بزند. در واقع با داشتن فشار یک نقطه از سیال درون جاذب و با کمک ورتکس رنگین، می‌توان توزیع فشار و نیرو را در تمامی سرعت‌های دورانی پروانه تخمین زد (نیرو و فشار، هر دو با