



Numerical Simulation and Experimental Evaluation of An Unsteady Flow Around Forced Rotating Cylindrical Prototype with Three Orthogonal Plates

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Kia S M¹,
Nejati Jahromi M^{2*},
Isvand H²

How to cite this article

Kia S M, Nejati Jahromi M, Isvand H. Numerical Simulation and Experimental Evaluation of An Unsteady Flow Around Forced Rotating Cylindrical Prototype with Three Orthogonal Plates. Modares Mechanical Engineering. 2022; 22(11):637-646.

¹ Mechanical Engineering, Tehran

² Department of Aerospace Engineering, Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology, Tehran

*Correspondence

Address: Department of Aerospace Engineering, Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology, Tehran
mansournejati@gmail.com

Article History

Received: April 15, 2022

Accepted: July 03, 2022

ePublished: October 29, 2022

ABSTRACT

In general, rotating objects (antennas, tops, flying birds with tails) always produce different rotational torques according to different dimensions and rotational speeds. In some cases, it can cause a lot of damage to equipment, so it is necessary to be aware of the amount of torque that rotating objects produce at different rotational speeds, as well as in the presence or absence of air flow. Due to the importance of this issue, in this study, numerical and experimental analysis of non-continuous flow around a cylindrical model with vertical plates under forced rotation is performed and its main purpose is to measure the torque of rotating objects in the presence of wind current and also to stabilize rotation. Rotational speeds are constant. First, an aerodynamic torque measuring device was built and then a 3-fin cylindrical model was tested in a wind tunnel, and numerical simulations of 3 and 2 fin models were performed in the same laboratory conditions by Ensys Fluent software. A good agreement was observed between the experimental and numerical results and the maximum error between them was less than 10%, which is acceptable. From the simulation results, it was observed that in every 180 degrees of rotation that the maximum cross section of the models is exposed to direct wind flow, the maximum torque produced by the 2-blade cylindrical model is 30% higher than the maximum torque produced by the 3-blade model. As the wind speed increases from 20 to 60 meters per second, the torque of the 3-fin model increases from 0.4 to 1.2 Nm, which is equivalent to 200%.

Keywords Rotational Torques, Finned Cylindrical Model, Rotational Speed, Wind Tunnel, Wind Flow

CITATION LINKS

1- An Album of Fluid Motion. 2- Numerical investigation of unsteady flow around a circular cylinder at different Reynolds number. 3- Numerical simulations of the transition from laminar to chaotic behavior of the planar vortex flow past a circular cylinder. 4- Large-eddy simulation of the flow past a circular cylinder at sub- to super-critical Reynolds numbers. 5- The representation of sheets of Vorticity by Discrete Vortices. 6- Unsteady RANS computations of flow around a circular cylinder for a wide range of Reynolds numbers. 7- Über integral der hydrodynamischen gleichungen welche den wirbeleueungen entsprechen. 8- Calculation of vortex sheets in unsteady flow and application in ship hydrodynamics. 9- Vortex interaction. 10- Dynamic of vorticity. 11- Vortex methods for flow simulation. 12- Vortex simulation of three-dimensional spotlike disturbances in a laminar boundary layer. 13- Computing three-dimensional incompressible flows with vortex elements. 14- Two studies in three-dimensional vortex dynamics: A perturbed round jet and an inhomogeneous mixing layer. 15- Integrable chaotic and turbulent vortex motion in two dimensional flows. 16- Attached Vortex. 17- The measurement of vortex included effects in flow past stationary and oscillating circular and d-section cylinders. 18- On the vibration of Cylinders caused by Karman Vortex. 19- Electric Machines, Drives.

ارزیابی و پردازش عددی و تجربی جریان غیر دائم حول مدل‌های دوار استوانه‌ای با سه صفحه متعامد تحت دوران اجباری

سید محمود کیا^{۱*} منصور نجاتی جهرمی^۲ حسن عیسوند^۳

^۱ مهندسی مکانیک، تهران

^۲ دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، دانشکده مهندسی برق، تهران

چکیده

در به‌طور کلی اجسام در حال دوران (آنتن‌ها، فرفره‌ها، اجسام پرنده دارای دم) همواره با توجه به ابعاد و سرعت‌های دورانی مختلف، گشتاورهای دورانی متفاوتی تولید می‌کنند. در مواردی نیز موجب وارد شدن خسارات زیادی به دیگر تجهیزات می‌شود، لذا می‌بایست از میزان گشتاوری که اجسام دوار در سرعت‌های دورانی مختلف و همچنین در حضور و یا عدم حضور جریان هوا تولید می‌کنند، مطلع شد. با توجه به اهمیت این موضوع، در این مطالعه به تجزیه و تحلیل عددی و تجربی جریان غیر دائم حول مدل استوانه‌ای دارای صفحات عمودی تحت دوران اجباری پرداخته شده است و هدف اصلی آن، اندازه‌گیری گشتاور اجسام در حال دوران در شرایط حضور جریان باد و همچنین تثبیت دوران در سرعت‌های دورانی ثابت می‌باشد. ابتدا دستگاه اندازه‌گیری گشتاور دورانی آیرودینامیکی ساخته شده و سپس مدل استوانه ۳ باله‌ای در تونل باد تحت آزمایش قرار گرفته و شبیه‌سازی عددی مدل‌های ۳ و ۲ باله‌ای نیز در شرایط یکسان آزمایشگاهی توسط نرم‌افزار انسیس فلونت نت انجام گرفت. تطابق خوبی بین نتایج تجربی و عددی مشاهده گردید و حداکثر خطا بین آن‌ها کمتر از ۱۰ درصد ثبت شد که قابل قبول می‌باشد. از نتایج شبیه‌سازی مشاهده شد در هر ۱۸۰ درجه دوران که بیشترین سطح مقطع مدل‌ها در معرض برخورد مستقیم جریان باد قرار می‌گیرد، بیشینه گشتاور تولیدی مدل استوانه ۲ باله‌ای، ۳۰ درصد بیشتر از بیشینه گشتاور تولید شده توسط مدل ۳ باله‌ای می‌باشد. با افزایش سرعت جریان باد از ۲۰ تا ۶۰ متر بر ثانیه، گشتاور دورانی مدل ۳ باله‌ای از ۰/۴ تا ۱/۲ نیوتن متر که معادل ۲۰۰ درصد می‌باشد، افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی

گشتاور دورانی، مدل استوانه باله‌دار، سرعت دوران، تونل باد، جریان باد

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۲

* نویسنده مسئول: mansournejati@gmail.com

۱- مقدمه

هر در طبیعت تداخل جریان سیال با یک جسم جامد باعث اعمال نیرو و گشتاور به سطح جسم می‌گردد. اگر جسم انعطاف‌پذیر باشد این گشتاور سبب تغییر شکل در جسم می‌شود و در صورتی که جسم صلب باشد، این گشتاور سبب تغییر مکان جسم از موقعیت اولیه خود متناسب با مقدار نیرو می‌گردد و به‌طور مشابه نیروی عکس‌العملی از سطح جسم جامد سبب تغییر شکل در الگوی جریان می‌شود. این مکانیسم عمل و عکس‌العملی بین جریان سیال و جسم جامد باعث می‌شود که هرگونه تغییرات کوچک در

مشخصه‌های جریان، باعث تغییرات نسبی در دیگر مشخصه‌های دینامیکی گردد^[1]. شبیه‌سازی جریان سیال حول اجسام و تحلیل نیروهای وارد شده بر آن‌ها از دیرباز در دیدگاه مهندسی بسیار حائز اهمیت بوده است. حل جریان حول بدنه یک وسیله نقلیه مانند کشتی، هواپیما، اتومبیل و محاسبه نیروی آیرودینامیکی وارد شده بر آن‌ها به‌منظور کاهش نیروی پسا وارد شده به بدنه وسیله نقلیه و در نتیجه کم کردن توان مصرفی از مهم‌ترین کاربردهای شبیه‌سازی جریان حول وسایل نقلیه می‌باشد. بررسی جریان سیال حول استوانه و دسته استوانه‌ها کاربرد فراوانی در مهندسی دارد که از جمله آن می‌توان به کنترل ارتعاشات القاء شده به سازه‌ها در جریان حول پایه‌های استوانه‌ای شکل سازه‌های دریایی، جریان حول دسته‌ای از کابل‌ها، جریان حول دودکش‌های استوانه‌ای نیروگاه‌ها و پالایشگاه‌ها و همچنین افزایش آشفتگی جریان و در نتیجه افزایش نرخ انتقال حرارت در جریان حول دسته لوله‌ها در مبدل‌های حرارتی اشاره کرد. در این زمینه تحقیقات مطالعات فراوانی انجام شده است که چند مورد از آن‌ها اشاره می‌شود^[2]. مطالعه جریان حول دسته لوله‌ها مانند بررسی جریان عبوری از دسته کابل‌ها و دودکش‌های نیروگاه‌ها و پالایشگاه‌ها و همچنین افزایش نرخ انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی به‌واسطه آشفتگی شدن جریان سیال حول لوله‌ها از مهم‌ترین کاربردهای آن می‌باشد^[3,4].

در حوزه دیگر فن‌آوری‌ها نیز مطالعه جریان غیر دائم حول اجسام و صفحات در حال چرخش یا نوسان آنتن‌ها، فرفره‌ها و پرنده‌های دارای دم از اهمیت خاصی برخوردار است. به‌منظور تأمین الزامات عملکردی این‌گونه وسایل، لازم است رفتار آن‌ها تحت درجات آزادی مختلف و با مشخصات هندسی گوناگون مورد بررسی قرار گرفته و نیز جهت‌گیری آن‌ها در جریان به‌دقت پیش‌بینی گردد^[5]. از خصوصیات این‌گونه اجسام ایجاد توزیع پیچیده گردابه‌های حاصل از جدایی جریان در لبه‌های تیز و از دست دادن پایداری لایه گردابه‌ای است به‌علاوه، تأثیر متقابل مابین جریان و خود جسم در حال حرکت نیز وجود دارد. تولید، توسعه و اثر متقابل لایه‌های گردابه آزاد از معضلات بسیاری از جریان‌های آیرودینامیکی حول بال‌ها، اجسام غیر آیرودینامیکی و اجزاء آن‌هاست. لایه گردابه تولید شده و به وجود آمده در دنباله اجسام با دهانه محدود در پرواز، نمونه‌ای از گردابه‌های حلقوی است. بال‌ها با پس‌گرایی زیاد و لبه‌های تیز، اجسام نازک، پیکره‌های با هندسه پیچیده در زوایای حمله نسبتاً بالا، دارای میدان جریان گردابه‌ای پیچیده‌ای حول جسم و همچنین دنباله آن می‌باشند^[6]. عکس‌العمل گردابه‌ها با سطوح کنترلی از مسائل جدی در کنترل می‌باشد؛ بنابراین مسأله مدل‌سازی جریان‌های گردابه‌ای از مسائل مهم عملی و قابل‌توجه است که بسیاری از تحقیقات را به خود اختصاص داده است. هلمهلتز در سال ۱۸۵۸ مدل‌سازی جریان پیوسته را با استفاده از

۲- روابط حاکم

در طراحی دستگاه موردنظر به منظور به منظور بالا بردن ضریب ایمنی، طراحی سازه خریا با در نظر گرفتن بیشترین مقدار نیرو و گشتاوری که در شرایط بحرانی از جانب صفحه دوار بر سازه وارد می‌شود، انجام گرفته است. بدین منظور سرعت جریان هوا تونل باد را حداکثر سرعت ممکن که $V = 0.0 \text{ m/s}$ می‌باشد فرض کرده و همچنین صفحه دوار مورد آزمایش را مربع ای با بیشترین ابعاد $\Delta A = 30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ که متناسب با ابعاد مقطع آزمایش می‌باشد در نظر گرفته و داریم:

$$\Delta P = P_{\infty} + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (1)$$

در رابطه فوق ΔP اختلاف فشار وارده بر صفحه دوار، P_{∞} فشار محیط که با توجه به اینکه فشار محیط در دو طرف صفحه دوار یکسان است از رابطه فوق حذف می‌شود، $V = 0.0 \text{ m/s}$ حداکثر سرعت جریان سیال و $\rho = 1/2 \text{ kg/m}^3$ چگالی هوا می‌باشد. با توجه به اختلاف فشار به دست آمده از رابطه ۲، برای نیروی اعمال شده بر صفحه داریم:

$$F = \Delta P \times \Delta A \quad (2)$$

که در رابطه فوق F ، نیرو وارد شده از جریان باد بر صفحه می‌باشد. در نهایت میزان گشتاور دورانی اعمال شده بر موتور و سیستم به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta M = R \times F \quad (3)$$

در رابطه ۳، $R = 10 \text{ cm}$ بازوی گشتاور و ΔM میزان گشتاور می‌باشد. با توجه به روابط فوق و معلومات مسأله حداکثر گشتاوری که به موتور و سازه وارد می‌شود مقدار ۲۰ نیوتن متر محاسبه می‌شود که در طراحی و ساخت دستگاه با در نظر گرفتن این مقدار انجام می‌گیرد.

۳- تجهیزات آزمایش

۳-۱- تونل باد مادون صوت

کلیه آزمایش‌ها، در تونل باد مادون صوت صورت گرفته است. این تونل باد، مدار بسته بوده و سرعت جریان از ۰ تا ۵۰ متر بر ثانیه قابل تغییر است. مقطع آزمون این تونل باد دایره‌ای شکل بوده و دارای قطر ۵۰ سانتیمتر می‌باشد. فاصله بین دو دهانه تونل باد حدود ۱ متر می‌باشد. شدت اغتشاش این تونل بسیار ناچیز بوده و کمتر از ۰/۱ درصد می‌باشد.

۳-۲- مدل آزمایشگاهی

مدل آزمایشگاهی موردنظر، یک استوانه به طول ۱۶ سانتیمتر و قطر ۱۰ سانتیمتر و از جنس پلکسی گلاس می‌باشد. بر روی بدنه استوانه و در راستای طولی شیارهایی با ضخامت ۲ میلی‌متر به منظور اتصال صفحات به آن ایجاد شده است. صفحات از جنس آلومینیوم با طول ۱۶ سانتی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر با زاویه‌های یکسان ۱۲۰ درجه بر روی بدنه استوانه و داخل شیارهای تعبیه شده قرار گرفته است.

خطوط گردابه بنیان‌گذاری نموده^[7] و روش‌های متنوعی نیز برای حل جریان از زمان ون کارمن در سال ۱۹۱۱ و روزن هید در سال ۱۹۲۲ ابداع گردیده است. بسیاری از نتایج به دست آمده را که امروزه در حکم علم در خصوص روش‌های گردابه‌ای شناخته می‌شود، می‌توان با مروری بر کارهای دانشمندی چون کلمنت و مائل در سال ۱۹۷۵^[5]، فینک و سوخ در سال ۱۹۷۴^[8]، سافمن و بیگر در سال ۱۹۷۹^[9]، سافمن در سال ۱۹۸۱^[10]، لئونارد در سال‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۸۵^[11-14] و عارف در سال ۱۹۸۳^[15] پیدا نمود. در سال ۱۹۴۸ ژوکوفسکی مسأله سقوط صفحه تخت مستطیلی را در هوا و همچنین مسأله چرخش فرفره به شکل صفحه تخت را در جریان هوا مورد بررسی قرار داده است. مشاهده شد با افزایش سرعت دوران چرخش فرفره، گشتاور تولید شده نیز افزایش می‌یابد^[16]. همچنین بلوینز در سال ۱۹۷۷ ارتباط بین عدد رینولدز و استروهاال را برای استوانه چرخان پیدا کردند نتایج نشان داد که عدد استروهاال ۰/۲ برای جریان آرام و لایه‌ای می‌باشد و در حالتی که جریان به سمت آشفتگی می‌رود عدد استروهاال دیگر دارای مقادیر متفاوتی می‌باشد و با زیاد شدن عدد رینولدز، عدد استروهاال نیز تغییر می‌کند^[17]. آمورا و همکارانش در سال ۱۹۷۳ در آزمایش‌هایی مشاهده کردند که فاکتور میرایی آیرودینامیکی برای یک استوانه تحت نوسانات آزاد به صورت یک نیروی میرایی منفی برای عدد استروهاال ۰/۲ می‌باشد. آن‌ها به طور تقریبی دریافتند که مشخصه‌های نوسانی یا ارتعاشی برای یک استوانه تنها زمانی که نیروی میرایی منفی باشد، ظاهر می‌گردد؛ بنابراین شرط اضافی را برای این حرکت خود القاشده به وجود می‌آورد^[18].

در این مقاله ابتدا دستگاه اندازه‌گیری گشتاور دورانی آیرودینامیکی در دو بخش مکانیکی و سخت‌افزار و بخش دریافت داده‌ها و تحلیل و نمایش داده‌ها طراحی و ساخته شده است و سپس مطالعه تجربی روی مدل استوانه‌ای با سه صفحه عمود بر آن با زوایای مساوی در تونل باد انجام شده است. این مدل دارای یک درجه آزادی چرخشی حول محور تقارن عرضی است. مدل روی دستگاه نصب می‌شود و تحت سرعت‌های دورانی مختلفی قرار می‌گیرد ضمن اینکه سرعت جریان هوای تونل نیز در مقادیر از پیش تعیین شده‌ای تنظیم گردیده است. در این حالت در هر سرعت دورانی و هر سرعت جریان آزاد، گشتاور دورانی حاصل از نیروهای آیرودینامیکی روی مدل در محدوده زمانی مشخصی اندازه‌گیری می‌شود. دستگاه ساخته شده توانایی اندازه‌گیری گشتاور دورانی آیرودینامیکی اجسام با هندسه‌ها و سرعت‌های دورانی مختلف در مدت زمان دوران و یا تعداد دورهای مختلفی که از کاربر دریافت می‌کند را داشته و همچنین قابلیت عملکرد در شرایط حضور و یا عدم حضور جریان هوای تونل باد را دارد.

چرخشی را به صورت داده‌های الکترونیکی به درون رایانه جهت بررسی و تحلیل منتقل نماید لذا می‌بایست ابزاری یافت شود که حرکات دورانی و تغییرات زاویه‌ای را به ولتاژ (آنالوگ) و یا کد دیجیتال تبدیل نماید. این دستگاه، زاویه‌سنج الکترونیکی نام دارد. در طراحی سیستم جهت محاسبه دقیق موقعیت دقیق موتور از زاویه‌سنج الکترونیکی ۱۰۲۴ پالس استفاده شده است. جهت کوپل کردن زاویه‌سنج الکترونیکی با موتور گیربکس از سامانه پولی تایمینگ (پولی XL) ۴۰ و تسمه استفاده شده است.

۳-۳-۲- مازول موتور درایور

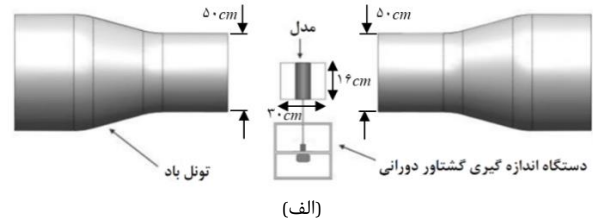
ماژول‌های درایور موتور، جهت راه‌اندازی موتورهای DC بوده و با استفاده از ریزپردازنده می‌توان سرعت و جهت حرکت موتور را کنترل و تنظیم کرد. در پروژه حال حاضر نیز جهت بررسی تغییرات گشتاور در سرعت‌های دورانی مختلف و جهت‌های ساعت‌گرد و پادساعت‌گرد از مازول موتور درایور DC تک کاناله ۴۳ آمپر BTS7960 استفاده شده است.

۳-۳-۳- حسگر جریان

سامانه به‌طور مستقیم گشتاور را اندازه‌گیری نمی‌کند بلکه در واقع با جریان موتور و نسبت خطی‌ای که بین جریان موتور و گشتاور وجود دارد گشتاور اندازه‌گیری می‌شود. نحوه عملکرد این حسگر به این صورت می‌باشد که جریان الکتریکی را تشخیص داده و آن را به ولتاژی متناسب با جریان تشخیص داده شده، تبدیل می‌کند. هنگامی که جریانی از مدار عبور می‌کند، افت ولتاژی در مسیر عبوری جریان رخ می‌دهد. علاوه بر این، یک میدان مغناطیسی در اطراف مسیر عبوری جریان نیز تشکیل می‌شود. حسگرهای جریان، با استفاده از این دو قضیه، جریان را حس می‌کنند. در این سامانه گشتاور از طریق تغییرات جریان محاسبه می‌شود، لذا به دلیل اینکه بتوان تغییرات جریان را به‌طور دقیق مشاهده کرد؛ از حسگر جریان جهت اندازه‌گیری دقیق جریان برای مانیتور کردن گشتاور استفاده شده است.

۳-۳-۴- برد پردازنده اصلی

ریزپردازنده یک تراشه آی سی است که برای کنترل دستگاه‌های دیگر برنامه‌ریزی شده است. دلیل نام‌گذاری این تراشه به ریزپردازنده سایز و اندازه‌ی آن و کنترل دستگاه‌ها و ماشین‌آلات است. ریزپردازنده از اجزایی تشکیل می‌شود که مهم‌ترین آن پردازنده است و به‌طور کلی هر وسیله‌ای که اطلاعاتی را ذخیره و اندازه‌گیری می‌کند، از ریزپردازنده در آن استفاده شده است. در دستگاه اندازه‌گیری گشتاور دورانی آیرودینامیکی موردنظر نیز از برد STM32F3DISCOVERY استفاده شده است. تمامی اطلاعات خروجی از زاویه‌سنج الکترونیکی و حسگر جریان، در این برد پردازش می‌شود و نتایج نهایی به کامپیوتر منتقل می‌شود و با دستور گرفتن از کامپیوتر مقدار سرعت دورانی را بر اساس آنچه کاربر تعیین می‌کند، تنظیم می‌کند و هر نیروی خارجی‌ای که مانع



(الف)



(ب)

شکل ۱) بلوک دیاگرام مجموعه سیستم، (ب) مدل نصب شده بر دستگاه اندازه‌گیری گشتاور دورانی

۳-۳-۳- دستگاه اندازه گشتاور دورانی و روابط حاکم

دستگاه طراحی و ساخته شده قابلیت اندازه‌گیری گشتاور دورانی مدل‌های مختلف را دارد. مدل روی محور بالانس دورانی متصل می‌گردد و توسط آن به مدل سرعت دورانی ثابت داده می‌شود. با برقراری جریان هوا روی مدل، نیروهای آیرودینامیکی وارده به مدل باعث ایجاد گشتاور دورانی حول محور چرخش می‌گردد. سرعت دورانی قابل تنظیم است و می‌توان به مدل سرعت‌های دورانی معینی را اعمال نمود. مقدار گشتاور اندازه‌گیری شده، حاصل از نیروهای آیرودینامیکی و نیروی اصطکاکی سامانه مکانیکی است. لذا قبل از آزمایش گشتاور اصطکاکی اندازه‌گیری می‌شود تا با اعمال آن روی گشتاور اندازه‌گیری شده در هنگام آزمایش، گشتاور خالص آیرودینامیکی حاصل شود. همانند شکل ۱، دستگاه از دو بخش الکترونیکی و مکانیکی تشکیل گردیده است. بخش مکانیکی وظیفه نگه‌داشتن مدل و دوران آن در سرعت‌های دورانی ثابت و انتقال رفتار آن را دارد و قسمت الکترونیکی وظیفه تبدیل رفتار و جابجایی مدل از حالت مکانیکی به الکترونیکی و انتقال داده‌ها را به رایانه دارد. در نهایت داده‌ها در رایانه مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

در ادامه تعدادی از تجهیزات مرتبط با دریافت، سنجش و پردازش دیتا که در سیستم به‌کاررفته است معرفی می‌گردد.

۳-۳-۱- دستگاه زاویه‌سنج الکترونیکی

در طراحی دستگاه موردنظر می‌بایست یک سامانه الکترونیکی تعبیه گردد تا بتواند حرکات مکانیکی صفحه با درجه آزادی

پذیرفته است. مدل به میله رابط با شفت اصلی دستگاه متصل می‌گردد به طوری که دقیقاً میله بر خط مرکزی مدل منطبق گردد. دقت در این مرحله از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و خطا در آن سبب بروز اثرات نامطلوبی بر روی نتایج خواهد داشت. همچنین نیاز است دستگاه مورد کالیبراسیون قرار گیرد و کالیبراسیون دستگاه بدین صورت است که ابتدا به دقت بر روی مکان نگه‌دارنده در اتاق آزمون نصب شده به طوری که به موازات یکدیگر باشند. سپس صفحه مورد آزمایش بر روی آن نصب شده و می‌بایست دقت داشت خط عبوری از مرکز و لبه فوقانی صفحه بر خط عبوری از مرکز دهانه تونل باد منطبق گردد. در این حالت لوله رابط نیز در مرکز تونل قرار خواهد گرفت. با این عمل دستگاه در دو محور مختلف مورد کالیبراسیون قرار می‌گیرد. پس از انجام این عمل، اتصالات کامل شده و ارتباط با رایانه صورت می‌گیرد.

کالیبراسیون بخش الکترونیکی نیز می‌بایست صورت گیرد. با توجه به رابطه ثابت موتورهای الکتریکی داریم [19]:

$$T_m - T_L = B\omega + jz \quad (۴)$$

در رابطه فوق T_m گشتاور موتور $(N.m)$ ، T_L گشتاور بار اعمالی $(N.m)$ ، ω سرعت زاویه‌ای (rpm) ، z ممان اینرسی (m^2) ، ω شتاب زاویه‌ای (rad/s^2) و B مقدار ویسکوز و یا به بیان دیگر نسبت گشتاور به سرعت $(N.s)$ می‌باشد. با توجه به ثابت بودن سرعت زاویه‌ای، مشتق آن صفر می‌گردد ($\dot{\omega}=0$) و لذا عبارت $\dot{\omega}z$ در رابطه فوق حذف می‌گردد. در رابطه (۴) مقادیر T_m و ω به واسطه حسگر جریان و زاویه‌سنج الکترونیکی مشخص می‌باشد ولی مقدار ویسکوز همچنان مجهول می‌باشد لذا برای محاسبه این عامل و کالیبره کردن دستگاه، قبل از عملیات دیتا برداری از نمونه از مدل؛ دستگاه را یک مرتبه بدون اعمال بار بر موتور در سرعت دورانی دلخواه تنظیم و راه‌اندازی می‌شود. در این راه‌اندازی با توجه به اینکه هیچ بار و نیروی خارجی بر موتور وارد نمی‌شود مقدار $T_L = 0$ می‌شود. با مشخص بودن مقدار T_m و ω ، مقدار ویسکوز در هر زاویه‌ای مشخص می‌شود. در مرتبه دوم با شروع عملیات دیتا برداری و اعمال بار روی موتور با توجه به اینکه در مرحله قبل (کالیبراسیون) مقدار ویسکوز به دست آمده است اکنون با توجه به رابطه (۴) مقدار گشتاور آیرودینامیکی خالص به دست می‌آید. پس از انجام مراحل کالیبراسیون می‌توان آزمایش‌ها را تحت سرعت‌های مختلف جریان هوا بر روی مدل مورد نظر انجام داد. در این مطالعه سرعت تونل باد بر روی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ متر بر ثانیه و در هر سرعت تونل باد، مقدار سرعت دورانی موتور بر روی سرعت‌های دورانی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ دور بر دقیقه تنظیم گردیده است.

۴- نتایج آزمایشگاهی آزمون استوانه ۳ باله‌ای

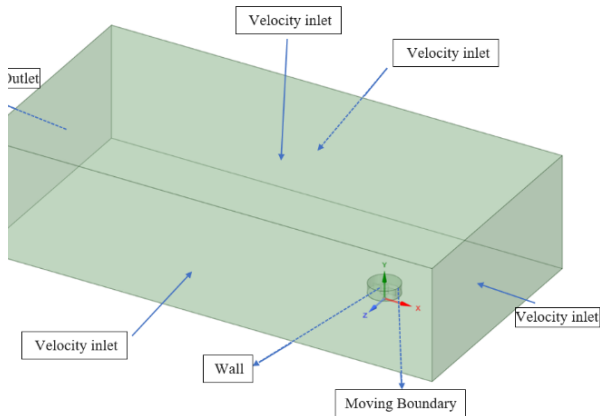
در این آزمایش سرعت تونل باد بر روی ۲۰ متر بر ثانیه و سرعت دورانی موتور بر روی سرعت‌های دورانی ۳۰ دور بر دقیقه تنظیم گردیده است.

دوران مدل گردد، بازهم اطلاعات خود را تنظیم و کنترل می‌کند و سرعت را روی همان سرعت تعیین توسط کاربر نگه می‌دارد.

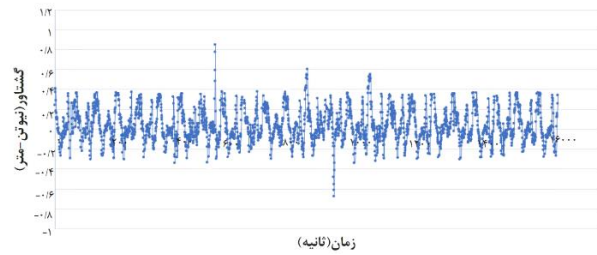
۳-۳-۵- پردازش داده‌ها

سخت‌افزارها به خودی خود قابلیت پردازش و ثبت داده و اطلاعات را ندارند. رایانه‌ها بدون وجود نرم‌افزارها فقط یک ابزار بدون تأثیر و بی‌روح و جان به شمار می‌آیند. لذا می‌بایست ابزار دیگری به کاررفته شود تا این سخت‌افزارها کاربرد عملی به دست آورند. نرم‌افزار این قابلیت را به کاربر می‌دهد تا با رایانه ارتباط برقرار کند. در واقع نرم‌افزار یک رابط گرافیکی بوده که قابلیت‌های سخت‌افزاری رایانه را به نمایش می‌گذارد. بدون وجود نرم‌افزارهای متنوع عملاً استفاده از سخت‌افزار عملی نیست. در این مقاله نیز جهت ارتباط بین دستگاه و رایانه از نرم‌افزار torque که در محیط نرم‌افزار کارگاه تصویری ماکروسافت (Microsoft visual studio) با زبان برنامه‌نویسی سی شارپ طراحی شده است. نحوه استخراج داده از سیستم و پردازش آن که شامل نحوه ثابت نگه‌داشتن دور موتور، کالیبراسیون بخش مکانیکی و الکترونیکی می‌باشد. از مهم‌ترین قسمت‌های طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری گشتاور دورانی آیرودینامیکی است. دور موتور توسط زاویه‌سنج الکترونیکی موجود در داخل موتور حس می‌شود و همچنین به وسیله زاویه‌سنج الکترونیکی که توسط پولی-تسمه به شفت کوپل شده، زاویه به دست می‌آید و از طریق مشتق آن سرعت به دست می‌آید. کاربر نیز سرعت دوران دلخواه را به کامپیوتر وارد می‌کند. در پی آی (PI) مقدار این ورودی‌ها را به هم می‌خوراند و دور را ثابت نگه می‌دارد بدین گونه که خروجی در پی آر به صورت ولتاژ بوده و به ماژول موتور درایور داده می‌شود و دور ثابت نگه‌داشته می‌شود. سامانه به طور مستقیم گشتاور را اندازه‌گیری نمی‌کند بلکه در واقع با جریان موتور و نسبت خطی‌ای که بین جریان موتور و گشتاور وجود دارد گشتاور اندازه‌گیری می‌شود. لذا از حسگر جریان برای اندازه‌گیری تغییرات جریان موتور و در نتیجه تغییرات مقدار گشتاور استفاده شده است. پیش از انجام آزمایش و به دست آوردن نتایج حاصل از آن، می‌بایست تونل باد دقت مورد بررسی و کالیبراسیون صورت گیرد.

جهت کالیبراسیون دستگاه از لوله پیتوت استفاده می‌گردد. با استفاده از این دستگاه امکان کالیبراسیون سرعت جریان بر حسب دور موتور فن (دور در دقیقه) وجود خواهد داشت. ابتدا دستگاه کالیبراسیون بر روی نگه‌دارنده قرار گرفته و همچنین نوک لوله پیتوت دقیقاً در مرکز لوله تونل باد و در دهانه لوله قرار داده می‌شود. اتصالات لوله‌ها به دستگاه صورت گرفته و سپس در دوره‌های مختلف (از ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ دور بر دقیقه)، اختلاف ارتفاع آب درون لوله‌ها اندازه‌گیری گردیده است. در هنگام رؤیت و یادداشت داده‌ها می‌بایست دقت گردد که اختلاف ارتفاع نقاط تقعر آب در نظر گرفته شود. پس از انجام عملیات فوق و قرار گرفتن دستگاه آزمون بر روی مکان نگه‌دارنده، آزمایش بر روی مدل صورت



شکل ۳) مدل استوانه ۳ باله‌ای طراحی شده



شکل ۲) نمودار تغییرات گشتاور برحسب زاویه برای دوران مدل به تعداد ۸ دور در سرعت جریان باد ۲۰ متر بر ثانیه و سرعت دوران ۳۰ دور بر دقیقه

با توجه به شکل ۲ بازه تغییرات گشتاور تولیدشده توسط مدل استوانه ۳ باله‌ای در سرعت جریان باد ۲۰ متر بر ثانیه و سرعت دوران ۳۰ دور بر دقیقه مابین $+0/37$ تا $-0/28$ نیوتن-متر می‌باشد. همان‌طور که انتظار می‌رفت با توجه به این‌که پره‌های مدل ۳ باله‌ای با زاویه‌ی یکسان 120 درجه به بدنه استوانه متصل شده‌اند، لذا مقدار بیشینه گشتاور در هر 120 درجه دوران مدل که بیشترین سطح مقطع مدل در معرض برخورد مستقیم جریان باد قرار می‌گیرد، رخ می‌دهد. تحلیل نمودارهای گشتاور می‌توان نتیجه گرفت مقادیر منفی گشتاور، نشان‌دهنده این است که گشتاور وارده از مدل به موتور در جهت حرکت موتور بوده و مقادیر مثبت گشتاور نشان‌دهنده این نکته است که گشتاور وارده از مدل به موتور در خلاف جهت حرکت موتور می‌باشد.

۵- شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی دستگاه اندازه‌گیری گشتاور دورانی

در این مرحله در ابتدا شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی مدل استوانه ۳ باله‌ای در نرم‌افزار انسیس فلونت در شرایط کاملاً یکسان با آزمایشگاه انجام می‌شود و نتایج عددی با نتایج تجربی مقایسه می‌شوند. در صورت تطابق نتایج، به‌منظور مشاهده اثر هندسه و شرایط کاری مختلف که امکان آزمایش آن در آزمایشگاه وجود ندارد؛ توسط شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی انجام می‌گردد.

۱-۵- طراحی مدل دوار و شرایط مرزی

در ابتدا طراحی مدل استوانه ۳ باله‌ای در نرم‌افزار طراحی مهندسی ورکبنچ (workbench) انجام می‌شود. با توجه به شکل ۳ مقطع آزمایش به‌صورت مکعب مستطیل به ابعاد $1/5 \times 3 \times 6$ متر و به‌صورت متقارن (symmetric) انجام شده و فاصله تا مرکز دوران جسم $1/5$ متر هست.

شبیه‌سازی مدل استوانه ۳ باله‌ای در شرایط سرعت جریان باد ۲۰ متر بر ثانیه و سرعت دوران ۳۰ دور بر دقیقه انجام شده است. لذا با توجه به شکل ۳ شرط مرزی ورودی جریان هوا با سرعت ۲۰ متر بر ثانیه در خلاف جهت محور x می‌باشد.

۵-۲- شبکه‌بندی

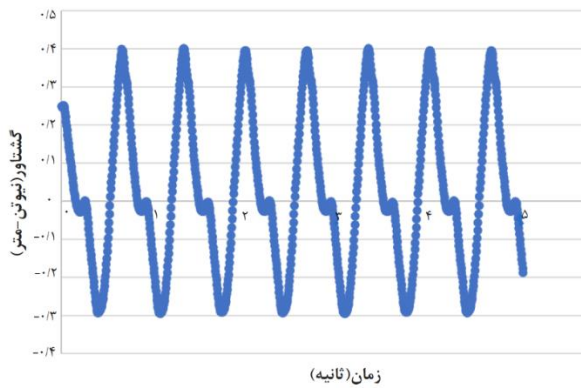
شبکه‌بندی در این پروژه توسط انسیس مشینگ (ANSYS Meshing 17) انجام شده است. اجزا از نوع نیمه سازمان‌یافته هست. در نزدیکی مدل که تغییرات ممنتوم و فشار بیشتر است شبکه‌بندی ریزتر بوده و رفته‌رفته با فاصله گرفتن از مدل شبکه‌بندی بزرگ‌تر می‌شود. همچنین در اطراف مدل به دلیل بااهمیت بودن لایه‌مرزی در نتایج، از مش لایه‌مرزی استفاده شده است. در نواحی‌ای که سل زون (cell zone) تغییر می‌کند، اجزا در بهینه‌ترین و دقیق‌ترین حالت و مطابق با لایه‌مرزی تغییر می‌کند. با توجه به اینکه در این پروژه مدل در حال دوران می‌باشد، در ناحیه‌ای که مدل دوران می‌کند از شبکه‌بندی از نوع مش متحرک (dynamic mesh) استفاده شده است. با توجه به استقلال نتایج از مش در نهایت تعداد $2/8$ میلیون جزء جهت شبیه‌سازی انتخاب شده است (جدول ۱).

جدول ۱) استقلال شبکه از مش مدل استوانه ۳ باله‌ای

تعداد المان	سرعت (متر بر ثانیه)
۷۰۰۰۰	۷/۲
۱۷۰۰۰۰	۱۵/۶۲
۲۳۰۰۰۰	۱۸/۰۴
۲۸۰۰۰۰	۱۹

۶- شبیه‌سازی و نتایج

در این مرحله شبیه‌سازی مدل توسط نرم‌افزار انسیس فلونت انجام می‌گردد. سیال به‌کاررفته هوا بوده و از روش عددی حجم محدود مرتبه دو و حل گر از نوع پایه فشار (pressure based) استفاده شده است. این شبیه‌سازی به‌صورت پایا (steady) و ناپایا (unsteady/transient) بوده و دوران مدل‌ها نیز مدل‌سازی می‌شود. بدین گونه که ابتدا به‌صورت پایا شبیه‌سازی شده و سپس به‌صورت ناپایا با گام زمانی $0/05$ ثانیه انجام می‌شود. کل زمان شبیه‌سازی ناپایا ۵ ثانیه می‌باشد. مدل آشفتگی کی-اِپسیلن ($k-\epsilon$), مدلی دو معادله‌ای است. مدل‌های آشفتگی دو



شکل ۵) بردار سرعت اطراف مدل استوانه ۳ باله‌ای

همان‌طور که از شکل ۵ مشاهده می‌شود بازه تغییرات گشتاور در شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی برای استوانه ۳ باله مابین $+0/۳۷$ تا $-0/۲۸$ می‌باشد که با نتایج تجربی تطابق بسیار خوبی دارد (جدول ۱). همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد با توجه به این‌که پره‌های مدل ۳ باله‌ای با زاویه‌ی یکسان ۱۲۰ درجه به بدنه استوانه متصل شده‌اند، لذا مقدار بیشینه گشتاور در هر ۱۲۰ درجه دوران مدل که بیشترین سطح مقطع مدل در معرض برخورد مستقیم جریان باد قرار می‌گیرد، رخ می‌دهد.

جدول ۲) مقایسه داده‌های تجربی و عددی مدل استوانه ۳ باله‌ای

نتایج تجربی مدل استوانه ۳ باله‌ای	نتایج عددی مدل استوانه ۳ باله‌ای
ماکزیمم گشتاور (نیوتن متر)	$0/۳۷$
مینیمم گشتاور (نیوتن متر)	$-0/۲۸$

همان‌طور که از نتایج مشاهده می‌شود، تطابق بسیار خوبی بین نتایج تجربی و عددی برقرار است و این موضوع بیانگر این موضوع می‌باشد که شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی به‌درستی انجام شده است. لذا در این مرحله می‌توان با استفاده از این شبیه‌سازی امکان‌سنجی انجام آزمایش بر روی مدل‌هایی با ابعاد گوناگون بررسی کرد تا از خطرات ناخواسته جلوگیری کرده و در هزینه‌ها صرفه‌جویی گردد. به همین منظور در این مرحله جهت مشاهده اثر تغییر هندسه مدل دوار بر گشتاور تولیدی، مدل استوانه ۲ باله‌ای طراحی گردید و در شرایط یکسان آزمایشگاهی و مطابق با شرایط استوانه ۳ باله‌ای انجام گردید تا بتوان نتایج را باهم مقایسه کرد. سرعت جریان باد ۲۰ متر بر ثانیه و سرعت دوران مدل ۳۰ دور بر دقیقه است.

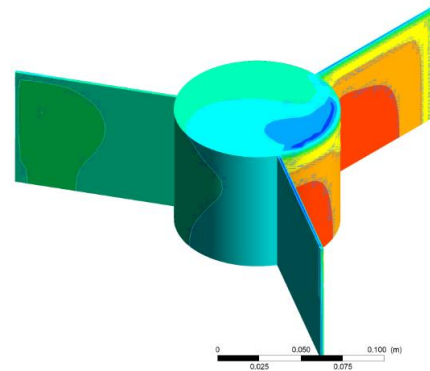
با توجه به شکل ۶ همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد با توجه به این‌که پره‌های مدل ۲ باله‌ای با زاویه‌ی یکسان ۱۸۰ درجه به بدنه استوانه متصل شده‌اند، لذا مقدار ماکزیمم گشتاور در هر ۱۸۰ درجه دوران مدل که بیشترین سطح مقطع مدل در معرض برخورد مستقیم جریان باد قرار می‌گیرد، رخ می‌دهد و بازه تغییرات آن مابین

معادله‌ای را می‌توان زیربنای بسیاری از مطالعات در حوزه جریان‌های توربولانس نامید. مدل کی-اِپسیلون در عین ساده بودن، تطبیق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد که منجر به استفاده از آن در اغلب شبیه‌سازی‌ها می‌شود. مدل توربولانسی کی-اِپسیلون نسبت به مدل‌های دیگر خانواده کی-اِپسیلون، در زمانی که جریان دارای گرادیان معکوس یا جدایش است بسیار عالی کار می‌کند به همین دلیل در این مقاله از مدل آشفتگی کی-اِپسیلون ($k-\epsilon$) برای شبیه‌سازی استفاده شده است. الگوریتم کوپل (coupled) جهت حل معادلات کوپلینگ سرعت و فشار استفاده شده است. از جمله توانمندی‌های این الگوریتم می‌توان به دست آوردن نتایج دقیق‌تر در مسائل گذرا و مشاهده بهتر گردابه‌ها، پشت استوانه اشاره کرد. حد همگرایی معادلات حاکم بر مسأله $0/001$ تعیین گردید بدین منظور که معادلات تا سه رقم اعشار حل می‌گردند. روابط (۵) و (۶) معادلات پیوستگی و ممنوم حاکم بر این مسأله می‌باشد:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i^2} \quad (6)$$

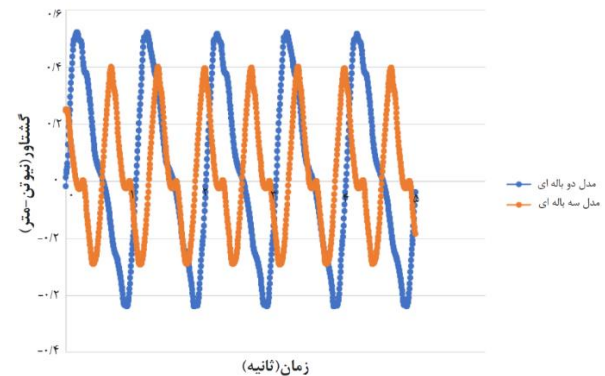
در شکل ۴ کانتور فشار برای مدل استوانه ۳ باله‌ای آورده شده است.



شکل ۴) کانتور فشار بر روی مدل استوانه ۳ باله‌ای

در شکل ۵ نمودار تغییرات گشتاور تولید شده توسط مدل استوانه ۳ باله‌ای که در شرایط سرعت جریان باد ۲۰ متر بر ثانیه و سرعت دوران ۳۰ دور بر دقیقه در نرم‌افزار انسیس فلونت شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی شده است، قابل مشاهده می‌باشد.

می‌باشد که به مراتب بیشتر از بازه تغییرات مدل استوانه ۳ باله‌ای می‌باشد. در شکل ۶ گشتاور تولید شده برای هر دو مدل استوانه‌ای ۲ و ۳ باله‌ای در قالب یک نمودار آورده شده است.

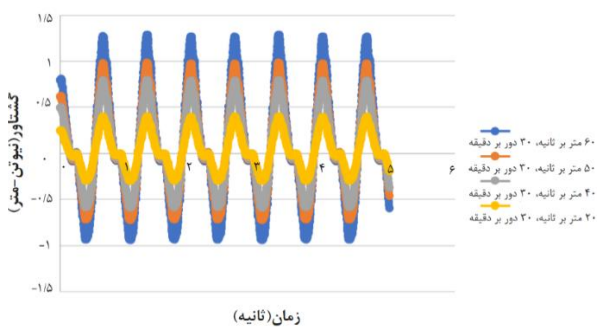


شکل ۶) نمودار نتایج عددی تغییرات گشتاور برحسب زمان برای دوران مدل استوانه ۲ باله‌ای به مدت ۵ ثانیه

همان‌طور که از نمودار شکل ۶ قابل مشاهده است مدل استوانه ۲ باله‌ای دارای بازه گشتاور بیشتری نسبت به مدل استوانه ۳ باله‌ای است. این رفتار به این دلیل می‌باشد که در مدل استوانه ۲ باله‌ای به دلیل اینکه دارای بیشینه سطح مقطع بزرگ‌تری نسبت به مدل استوانه ۳ باله‌ای است. لذا مدل استوانه ۲ باله‌ای در هر ۱۸۰ درجه دوران که بیشترین سطح مقطع آن در معرض برخورد مستقیم جریان باد قرار می‌گیرد، گشتاور بیشتری نسبت به مدل استوانه ۳ باله‌ای در همان شرایط (در هر دوران ۱۲۰ درجه که بیشترین سطح مقطع آن در معرض جریان باد قرار دارد) تولید می‌کند؛ که با توجه به شکل ۶ این افزایش به میزان ۳۰ درصد می‌باشد.

همان‌طور که بیان شد با استفاده از شبیه‌سازی می‌توان با شبیه‌سازی میزان گشتاوری که اجسام مختلف مانند رادار دورانی تولید می‌کنند را به دست آورد و آن را معیاری برای انتخاب دیگر تجهیزات مانند نوع موتور و یا قطر شفت مورد نیاز و بقیه تجهیزات قرارداد. علاوه بر این می‌توان با توجه به اطلاعات به دست آمده از شبیه‌سازی، آن را به‌عنوان مرجعی برای شبیه‌سازی‌ها و دیگر آزمایش‌ها و مقالات قرارداد. همچنین چنانچه هزینه اعمال تغییرات پیشنهادی زیاد باشد، شبیه‌سازی می‌تواند بسیار مفید بوده و حتی در مواردی که هنوز سامانه در عمل خلق نشده و فقط درباره روابط نظری آن اطلاعاتی در دسترس است، این ابزار تنها راه حل است. همچنین در مواردی که محاسبه گشتاور دورانی اجسام دوار در شرایط آزمایشگاه مقدور نباشد و یا انجام آن هزینه زیادی داشته باشد شبیه‌سازی عددی کارآمدترین راه می‌باشد. تونل باد موجود در آزمایشگاه آیرودینامیک دانشگاه هوایی شهید ستاری دارای حداکثر سرعت جریان باد ۴۰ متر بر ثانیه می‌باشد لذا عملاً در شرایط آزمایشگاه امکان اندازه‌گیری گشتاور دورانی مدل‌ها

برای سرعت‌های جریان باد ۴۰ متر بر ثانیه و بیشتر وجود ندارد و حتی به دلیل جلوگیری از آسیب رسیدن به تجهیزات تونل باد، هیچ‌گاه سرعت جریان باد بر روی بیشینه مقدار یعنی ۴۰ متر بر ثانیه قرار داده نمی‌شود. به همین منظور پس از مشاهده تطابق بسیار خوب نتایج عددی و تجربی، شبیه‌سازی مدل استوانه ۳ باله‌ای برای سرعت جریان باد ۵۰ و ۶۰ متر بر ثانیه انجام گردید تا بتوان نتایجی که در شرایط آزمایشگاهی امکان دستیابی نداشت را از طریق عددی مشاهده کرد. به منظور درک بهتر تأثیر سرعت‌های مختلف جریان باد بر گشتاور، در نمودار شکل ۷ تغییرات گشتاور ایجاد شده توسط مدل استوانه ۳ باله‌ای دوار برای ۴ سرعت مختلف ۲۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ متر بر ثانیه آورده شده است.



شکل ۷) نمودار تغییرات گشتاور دورانی برای مدل استوانه ۳ باله‌ای در ۴ سرعت مختلف جریان باد

همان‌طور که از شکل ۷ مشاهده می‌شود با افزایش سرعت جریان باد، گشتاور دورانی افزایش می‌یابد. به طوری که در سرعت ۶۰ متر بر ثانیه این افزایش بسیار چشمگیر است. این رفتار با توجه به روابط ۱ تا ۳ نیز قابل توجیه است. بدین گونه که با توجه به رابطه ۱ با افزایش سرعت جریان باد، اختلاف فشار در دو طرف مدل افزایش می‌یابد. طبق رابطه ۲ با افزایش میزان فشار نیروی تولید شده افزایش می‌یابد؛ که در نتیجه با توجه به رابطه ۳ با افزایش نیرو، گشتاور تولید شده نیز افزایش می‌یابد. همچنین طبق رابطه ۲ هر چه سطح در معرض جریان باد مدل بیشتر باشد، میزان نیروی ایجاد شده بیشتر می‌شود و به همین خاطر در نمودار شکل ۷ مشاهده می‌شود که مدل استوانه ۲ باله‌ای نسبت به مدل استوانه ۳ باله‌ای، به دلیل داشتن سطح در معرض برخورد جریان باد بیشتر دارای گشتاور تولید شده بیشتری نیز است.

با افزایش سرعت جریان باد، میزان گشتاور تولید شده توسط مدل دوار نیز افزایش می‌یابد به گونه‌ای که با افزایش سرعت جریان باد از ۲۰ متر بر ثانیه تا ۶۰ متر بر ثانیه، گشتاور دورانی مقدار بیشینه گشتاور از ۰/۴ تا ۱/۲ نیوتن متر که معادل ۲۰۰ درصد می‌باشد، افزایش می‌یابد.

مقادیر منفی گشتاور، نشان‌دهنده گشتاور وارده از مدل به موتور در جهت حرکت موتور و مقادیر مثبت گشتاور نشان‌دهنده گشتاور وارده از مدل به موتور در خلاف جهت حرکت موتور می‌باشد.

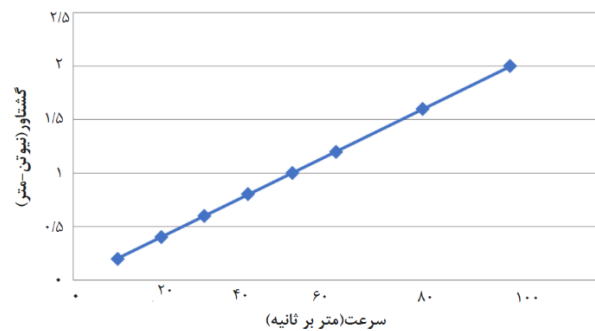
تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان بوده و صحت نتایج آن نیز بر عهده ایشان است.

تعارض منافع: مقاله حاضر با هیچ شخص یا سازمانی تعارض منافع ندارد.

منابع مالی: توسط نویسندگان تامین شده است.

۸- مراجع و منابع

- 1- Van Dyke M, Van Dyke M. An album of fluid motion. Stanford: Parabolic Press; 1982.
- 2- Rahman MM, Karim MM, Alim MA. Numerical investigation of unsteady flow past a circular cylinder using 2-D finite volume method. Journal of Naval Architecture and Marine Engineering. 2007;4(1):27-42.
- 3- Durante D, Rossi E, Colagrossi A, Graziani G. Numerical simulations of the transition from laminar to chaotic behaviour of the planar vortex flow past a circular cylinder. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2017; 48:18-38.
- 4- Yeon SM, Yang J, Stern F. Large-eddy simulation of the flow past a circular cylinder at sub-to super-critical Reynolds numbers. Applied Ocean Research. 2016; 59:663-75.
- 5- Clements RR, Maull DJ. The representation of sheets of vorticity by discrete vortices. Progress in Aerospace Sciences. 1975;16(2):129-46.
- 6- Stringer RM, Zang J, Hillis AJ. Unsteady RANS computations of flow around a circular cylinder for a wide range of Reynolds numbers. Ocean Engineering. 2014; 87:1-9.
- 7- Ferrari S, Ambrogio S, Walker A, Verma P, Narracott AJ, Wilkinson I, Fenner JW. The ring vortex: concepts for a novel complex flow phantom for medical imaging. Open Journal of Medical Imaging. 2017;7(1):28-41.
- 8- Fink PT, Soh WK. Calculation of vortex sheets in unsteady flow and applications in ship hydrodynamics. In Symposium on Naval Hydrodynamics, 10th, Proceedings, Pap and Discuss, Cambridge, Massachusetts, 1974. 1976 (No. Proceeding).
- 9- Saffman PG, Baker GR. Vortex interactions. Annual Review of Fluid Mechanics. 1979;11(1):95-121.
- 10- Saffman PG. Dynamics of vorticity. Journal of Fluid Mechanics. 1981;106:49-58.
- 11- Leonard A. Vortex methods for flow simulation. Journal of Computational Physics. 1980;37(3):289-335.
- 12- Leonard A. Vortex simulation of three-dimensional, spotlike disturbances in a laminar boundary layer. In Symp. on Turbulent Shear Flows 1979 (No. A-7789).
- 13- Leonard A. Computing three-dimensional incompressible flows with vortex elements. Annual review of fluid mechanics. 1985;17(1):523-59.



شکل ۸) نمودار تغییرات گشتاور دورانی برحسب تغییرات سرعت جریان هوای تونل باد برای مدل استوانه ۳ باله‌ای

با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود افزایش سرعت جریان هوای تونل باد رابطه مستقیمی با گشتاور تولید شده در برخورد جریان هوا با مدل دوار دارد.

۷- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

با بررسی و تحلیل نتایج مدل استوانه ۳ باله‌ای مشاهده شد، تطابق بسیار خوبی بین نتایج تجربی و عددی برقرار است و این موضوع بیانگر این مطلب می‌باشد که شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی به‌درستی انجام شده است. همچنین مشاهده شد با افزایش سرعت جریان هوای تونل باد، بازه تغییرات مقدار گشتاور اندازه‌گیری شده توسط دستگاه افزایش می‌یابد. این رفتار با توجه به روابط ۱ تا ۳ نیز قابل توجیه است. بدین گونه که با توجه به رابطه ۱ با افزایش سرعت جریان باد، اختلاف فشار در دو طرف مدل افزایش می‌یابد. طبق رابطه ۲ با افزایش میزان فشار نیروی تولید شده افزایش می‌یابد؛ که در نتیجه با توجه به رابطه ۳ با افزایش نیرو، گشتاور تولید شده نیز افزایش می‌یابد.

همچنین طبق رابطه ۲ هر چه سطح در معرض جریان باد مدل بیشتر باشد، میزان نیروی ایجاد شده بیشتر می‌شود. همان‌طور که انتظار می‌رفت با توجه به این‌که پره‌های مدل استوانه ۳ باله‌ای با زاویه‌ی یکسان ۱۲۰ درجه متصل شده‌اند، لذا مقدار بیشینه گشتاور در هر ۱۲۰ درجه دوران مدل که بیشترین سطح مقطع مدل در معرض برخورد مستقیم جریان باد قرار می‌گیرد، رخ می‌دهد بازه تغییرات مابین ۰/۳۷+ تا ۰/۲۸- نیوتن متر می‌باشد. در مدل استوانه ۲ باله‌ای که پره‌های مدل ۲ باله‌ای با زاویه‌ی یکسان ۱۸۰ درجه به بدنه استوانه متصل شده‌اند، بیشینه گشتاور در هر ۱۸۰ درجه دوران مدل که بیشترین سطح مقطع مدل در معرض برخورد مستقیم جریان باد قرار می‌گیرد، رخ می‌دهد و بازه تغییرات آن مابین ۰/۵۲+ تا ۰/۴۴- می‌باشد که به‌مراتب بیشتر از بازه تغییرات مدل استوانه ۳ باله‌ای می‌باشد. به‌منظور مشاهده اثر سرعت‌های جریان باد بالاتر از حد مجاز تونل باد بر گشتاور، در شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی سرعت جریان باد بر ۴۰، ۵۰ و ۶۰ متر بر ثانیه تنظیم گردید و نتایج حاکی از افزایش ۲۰۰ درصدی گشتاور در اثر افزایش سرعت جریان باد از ۲۰ تا ۶۰ متر بر ثانیه می‌باشد.

- 14- Leonard, A., and Conet, B., 1985. "Two studies in three-dimensional vortex dynamics: A perturbed round jet and an inhomogeneous mixing layer", the Norwegian Inst, Vol. 22, pp. 362-278.
- 15- Aref H. Integrable, chaotic, and turbulent vortex motion in two-dimensional flows. Annual review of fluid mechanics. 1983;15(1):345-89.
- 16- Joukovski, N. E., 1948. "Attached Vortex", gas mechanic, Vol. 2, pp. 149-168.
- 17- Feng CC. The measurement of vortex induced effects in flow past stationary and oscillating circular and D-section cylinders (Doctoral dissertation, University of British Columbia).
- 18- UMEMURA S, YAMAGUCHI T, SHIRAKI K. On the vibration of Cylinders caused by Karman Vortex. Bulletin of JSME. 1971;14(75):929-37.
- 19- Z, Zabar. Electric Machines, Drives, Encyclopedia of Physical Science and Technology, Encyclopedia of Physical Science and Technology .2003; pp.69-95.