مجله مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1394، دوره 15، شماره 1، ص‌ص 163-172

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی عددی عملکرد آیرودینامیکی مقطع جدید پره توربین بادی مگنوس

سید علی کاظمی[1]، مهدی نیلی احمدآبادی[2*]، محسن ثقفیان[3]، احمد صداقت[4]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
4- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
*اصفهان، کدپستی 84156-83111، m.nili@cc.iut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 15 شهریور 1393
پذیرش: 05 آبان 1393
ارائه در سایت: 09 آذر 1393

کلید واژگان:
اثر مگنوس
توربین بادی
سطوح متحرک

چکیده

نسبت ضریب برآ به ضریب پسا در پره‌های توربین بادی، از پارامترهای تأثیرگذار در ضریب توان توربین بادی است. با توجه به کارآیی توربین‌های بادی مگنوس در سرعت‌های کم وزش باد، این نوع توربین‌ها مورد توجه بسیاری از محققین بوده است. در کار حاضر، هندسه جدیدی برای مقطع پره توربین‌های بادی مگنوس معرفی می‌شود. هندسه معرفی‌شده، برپایه هندسه تردمیل است با این تفاوت که قطر دایره ابتدای آن از قطر دایره انتهای آن بیشتر است. در کار حاضر با قرار دادن این هندسه در معرض جریان هوا با سرعت کم و ایجاد سرعت مماسی روی سطح، تأثیر آن بر ضرایب برآ و پسا به روش عددی بررسی می‌شود. اثر ایجاد سرعت مماسی روی سطح در سرعت‌ها و زوایای حمله مختلف بررسی می‌شود و با وضعیت سطح بدون سرعت مقایسه می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد به واسطه سرعت مماسی سطح ، ضرایب برآ و پسا و نسبت این دو ضریب تغییر چشمگیری می‌یابد. در اثر حرکت مماسی سطح، بیش‌ترین نسبت ضریب برآ به پسا مربوط به زاویه حمله صفر درجه بوده که مقدار آن برابر با 109 است. علاوه بر این، بیشینه نسبت ضریب برآ به پسا در زاویه حمله 5 درجه برابر 81، در زاویه حمله 10 درجه برابر 64 و در زاویه حمله 15 درجه برابر 57 است. قابل‌ذکر است که نتایج این روش جهت تعیین سرعت گردش مناسب سطح، با توجه به زاویه حمله و سرعت جریان هوای آزاد، برای رسیدن به بیشترین نسبت ضریب برآ به ضریب پسا قابل‌استفاده خواهد بود.

Numerical investigation of magnus wind turbine new blade section performance

Seyyed Ali Kazemi, Mahdi Nili-Ahmadabadi*, Mohsen Saghafian, Ahmad Sedaghat

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
*P.O.B. 84156-83111Isfahan, Iran, m.nili@cc.iut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 06 September 2014
Accepted 27 October 2014
Available Online 30 November 2014

Keywords:
Magnus Effect
Wind Turbine
Moving Surfaces

ABSTRACT

The ratio of lift to drag coefficient in wind turbine blades is one of the most important parameters affecting the power coefficient of wind turbines. Due to the performance of Magnus wind turbines in low speed air flow, such turbines are attractive for research centers. In the present work, a new geometry for the blades of Magnus wind turbines is defined. The defined geometry is based on the geometry of a Treadmill with the difference being that the diameter of its leading circle is greater than that of its trailing one. In the present work, the body is assumed to have a low speed air flow while a tangential velocity is applied to the airfoil surfaces and then, its effect on the lift and drag coefficient is studied by numerical method. The effect of generated tangential velocity on the surfaces is investigated for different air flow speed and attack angles, and its results are compared with those for stationary surfaces. The results show that generating tangential velocity along the surfaces causes the lift and drag coefficients and their ratio to be varied considerably. By the tangential movement of the surfaces, the maximum ratio of lift to drag coefficient occurs in zero attack angle which is equal to 109. Moreover, maximum magnitude of lift to drag coefficient for attack angles 5, 10, and 15 degrees are 81, 64, and 57, respectively. It should be mentioned that the results of this study can be used for determining the proper tangential velocity according to attack angle and air flow velocity to reach the maximum ratio of lift to drag coefficient.

1- مقدمه

نیاز روزافزون به انرژی در جوامع بشری همراه با کاهش منابع سوخت فسیلی و عواقب زیست محیطی این سوخت‌ها، انگیزه‌ها را برای استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر بیشترکرده است. در این بین انرژی باد به عنوان ارزان‌ترین و در دسترس‌ترین انرژی از اهمیت زیادی برخوردار است. در سال‌های گذشته تحقیقات فراوانی در جهت افزایش کارآیی توربین‌های بادی انجام گرفته است.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
S. A. Kazemi, M. Nili-Ahmadabadi, M. Saghafian, A. Sedaghat, Numerical investigation of magnus wind turbine new blade section performance, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 1, pp. 163-172, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.24.0]

در کارآیی توربین‌های بادی نسبت ضریب برآ[1] به ضریب پسا[2] بسیار مهم است و اکثر تحقیقات بر مبنای افزایش ضریب برآ و کاهش ضریب پسا پره توربین است. همچنین چالش دیگر در توربین‌های بادی حد پایین سرعت وزش باد است. بدین معنی که چنانچه سرعت وزش باد از حد معینی کمتر شود($4\ ms^{-1}$)، به دلیل کاهش شدید نیروی برآ و با توجه به ساختار توربین بادی، توربین باد از حرکت می‌ایستد[1]. به عبارت دیگر، توربین‌های بادی در محدوده مشخصی ازسرعت وزش باد کارآیی لازم را دارند و در سرعتهای خیلی کم و خیلی زیاد باد کارآیی ندارند.

توربین‌های بادی مگنوس در محدوده وسیعی از سرعت‌های وزش باد کارآیی دارند اما در سرعت‌های کم وزش باد ($1\text{-}2\ ms^{-1}$) که توربین‌های بادی با ساختار پره ایرفویل کارآیی ندارند، کارآیی خوبی از خود نشان می‌دهند[2]. شکل 1 نمایی شماتیک از توربین بادی مگنوس را نشان می‌دهد. این توربین‌ها که برپایه اثر مگنوس[3] کار می‌کنند به جای پره با سطح مقطع ایرفویل، پره‌هایی استوانه‌ای شکل دارند. نیروی لیفت در این توربین‌ها در اثر گردش این استوانه‌ها ایجاد می‌شود.

بر پایه تئوری اثر مگنوس چنانچه جسم متقارن یا غیر متقارنی در برابر جریان سیال قرار بگیرد، با به گردش درآمدن سطح جسم مماس بر مختصات هندسه سطح، نیروی آیرودینامیکی جدیدی بر جسم وارد می‌شود یا نیروهای آیرودینامیکی قبلی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تأثیر گردش سطح بر خطوط جریان اطراف جسم و تغییر در شکل آن‌ها و افزایش و کاهش سرعت نسبی جریان در اطراف جسم ، باعث ایجاد تغییر در نیروهای آیرودینامیکی می‌شود. به عبارت دیگر افزایش فشار در سطح پایین جسم و کاهش فشار در سطح بالای جسم موجب ایجاد نیروی جدید می‌شود.

روابط تحلیلی جهت تعیین نیروی مگنوس تنها برای مقطع دایره نوشته شده است. برای جریان تراکم ناپذیر، غیر چرخشی و غیر ویسکوز معادلات لاپلاس جهت تعیین پتانسیل سرعت استفاده می‌شود. حل معادلات لاپلاس به عنوان حل جریان پتانسیل شناخته می‌شود. برای جریان پتانسیل حول استوانه چرخان، ترکیبی از پتانسیل سرعت جریان یکنواخت و جریان چرخشی، در دستگاه مختصات استوانه‌ای که مبدأ آن روی مرکز دایره قرار می‌گیرد، استفاده می‌شود. نتایج تئوری جریان پتانسیل برای پتانسیل سرعت حول استوانه چرخان به صورت رابطه (1) است:

$$\varphi = U_\infty r\left(1+\frac{r_c^2}{r^2}\right)\cos\theta - \frac{\Gamma}{2\pi}\theta \qquad (1)$$

که φ بیانگر پتانسیل سرعت، U_∞ سرعت جریان آزاد یکنواخت سیال، r_c شعاع دایره مقطع استوانه، Γ سیرکولاسیون چرخش ساعتگرد استوانه و (r,θ) مختصات دستگاه استوانه‌ای که مبدأ آن روی مرکز دایره مقطع استوانه قرار می‌گیرد است. در سال‌های اخیر مدل‌های متنوعی جهت محاسبه سیرکولاسیون ارائه شده است که با توجه به نوع مسئله تعیین می‌گردد اما به صورت کلی این کمیت مطابق با رابطه (2) تعیین می‌شود:

$$\Gamma = \oint V_{\text{rotaitional}} \cdot dl \qquad (2)$$

متداول‌ترین رابطه برای سیرکولاسیون استوانه دوار مطابق رابطه (3) عنوان می‌شود:

$$\Gamma = V_{\text{rotational}} 2\pi r_c = 2\pi r_c^{\,2}\omega_{\text{cylinder}} \qquad (3)$$

مؤلفه شعاعی و زاویه‌ای سرعت در دستگاه استوانه‌ای مطابق با روابط (4) و (5) تعیین می‌گردد:

$$u_r = \frac{\partial\varphi}{\partial r} = U_\infty\left(1-\frac{r_c^2}{r^2}\right)\cos\theta \qquad (4)$$

$$u_\theta = \frac{1}{r}\frac{\partial\varphi}{\partial\theta} = -U_\infty\left(1+\frac{r_c^2}{r^2}\right)\sin\theta - \frac{\Gamma}{2\pi r} \qquad (5)$$

مطابق با رابطه (5) و روی سطح استوانه $(r=r_c)$ سرعت شعاعی صفر است و مؤلفه زاویه‌ای سرعت مطابق با رابطه (6) خواهد بود:

$$u_\theta = -2U_\infty\sin\theta - \frac{\Gamma}{2\pi r_c} \qquad (6)$$

با نوشتن معادله برنولی در یک خط جریان بین نقطه‌ای در جریان دوردست و نقطه‌ای روی سطح استوانه رابطه (7)حاصل می‌گردد:

$$p_\infty + \frac{1}{2}\rho U_\infty^2 = p + \frac{1}{2}\rho u_\theta^2 \qquad (7)$$

یا طبق رابطه (8):

$$\Delta p = p - p_\infty = \frac{1}{2}\rho U_\infty^2\left(1-4\sin^2\theta - \frac{2\Gamma\sin\theta}{\pi r_c U_\infty} - \frac{\Gamma^2}{4\pi^2 r_c^2 U_\infty^2}\right) \qquad (8)$$

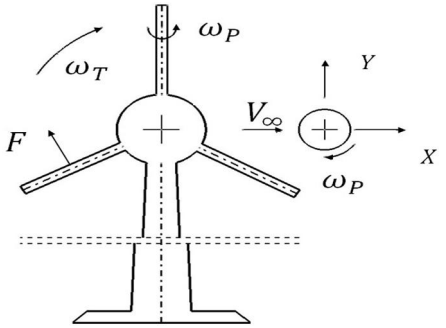
جهت محاسبه نیروی برآ و پسا، از انتگرال‌گیری روی سطح استفاده می‌شود. طبق روابط (9،10) داریم:

$$F_L = -\int_0^{2\pi}\Delta p\sin\theta\, dA = -\int_0^{2\pi}\Delta p\sin\theta\, r_c\, d\theta = \rho U_\infty\Gamma \qquad (9)$$

$$F_D = -\int_0^{2\pi}\Delta p\cos\theta\, dA = -\int_0^{2\pi}\Delta p\cos\theta\, r_c\, d\theta = 0 \qquad (10)$$

در روابط (9) و (10) درون انتگرال، در بعد طولی دیگری نیز ضرب می‌شود که این مقدار در تحلیل دو بعدی برابر با واحد در نظر گرفته می‌شود. مشخص است که نیروی پسا از رابطه (10) قابل‌محاسبه نیست چرا که فرض جریان غیر ویسکوز و تراکم ناپذیر در واقعیت ناممکن است و این نیرو باید اندازه‌گیری یا شبیه‌سازی شود[3].

تا کنون تنها استوانه به عنوان جسم مگنوس مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است[4]. صداقت [5]، در سال 2013، به بررسی انواع ایده‌ها و ادعاهای ارائه شده در زمینه توربین‌های بادی مگنوس پرداخت. ایراد این خانواده از توربین‌های بادی کم بودن نسبت ضریب برآ به ضریب پسا در پره‌های استوانه‌ای شکل است. این نسبت در استوانه دوار و در شرایطی مناسب حداکثر به عدد 10 می‌رسد که مقدار بسیار کمی است[6]. در توربین بادی مگنوس از پره‌های استوانه‌ای شکل استفاده می‌شود.



شکل 1 نمایی از توربین بادی مگنوس

1- Lift Coefficient
2- Drag Coefficient
3- Magnus Effect

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.24.0]

اکثر تحقیقات انجام شده در زمینه اثر مگنوس، به بررسی شرایط مختلف استوانه چرخان معطوف بوده است. اینگهام [7]، در سال 1983، به بررسی جریان با عدد رینولدز کم بر روی استوانه چرخان به روش عددی پرداخت. او از نخستین افرادی بود که به روش عددی به بررسی جریان روی استوانه چرخان پرداخت. سنگوپتا [8]، در سال 2003، پایداری جریان بر روی استوانه چرخان را در سرعت‌های گردشی زیاد به روش عددی بررسی کرد. ان.توا [9]، در سال 2010، با قرار دادن 2 صفحه دیسکی در ابتدا و انتهای استوانه چرخان توانست عملکرد آیرودینامیکی آن را اندکی بهبود ببخشد. هال [10]، در سال 2000، اثر ناهمواری ریبلت[1] بر روی استوانه چرخان را بررسی کرد. کارابلاس [11]، در سال 2012، به روش عددی به بررسی رفتار استوانه چرخان در اعداد رینولدز زیاد (تا 500000) و در سرعت‌های مختلف گردش استوانه پرداخت. شیلس [12]، در سال 1996، به بررسی نیروی درگ در استوانه چرخان با سرعت زاویه‌ای نوسانی پرداخت.

تلاش‌های متعددی برای طراحی توربین‌های بادی مگنوس در سالهای 1924-1936 انجام گرفت [13]. در سال 2005 توربین بادی مگنوس در مؤسسه نظری و کاربردی مکانیک اس‌بی راس[2] مورد بررسی قرار گرفت [14]. نتایج عملکرد توربین بادی مگنوس قابل قبول عنوان شد. مشکل این بررسی آن بود که پره‌های استوانه‌ای شکل توربین بادی مگنوس دور[3] بسیار زیادی داشتند. خیراندیش [15]، در سال 2013، در دانشگاه صنعتی اصفهان توربین بادی مگنوس ساده و در مقیاس کوچکی ساخت. خیراندیش علاوه بر نتایج تجربی شبیه‌سازی عددی نیز بر روی توربین بادی ساخته‌شده انجام داد ولی در بهترین شرایط ضریب توانی بیشتر از 0/14 به‌دست نیاورد. شایان ذکر است در تمامی تحلیل‌های انجام شده بر روی توربین بادی مگنوس، پره‌هایی با مقطع دایره برای توربین بادی مگنوس در نظر گرفته شده است.

مشکل اصلی پره‌های استوانه‌ای شکل (مقطع دایره) دور بسیار زیاد آنها جهت ایجاد نیروی برآی لازم است. این دور زیاد مشکل‌های متعددی مانند ارتعاشات، پایداری، صدای زیاد و ... را ایجاد می‌کند.

معرفی هندسه‌ای جدید برای مقطع پره توربین بادی مگنوس به جای مقطع دایره، با کارآیی آیرودینامیکی بهتر زمینه تحقیقاتی است که تا کنون مورد بررسی قرار نگرفته است. در کار حاضر سعی می‌شود تا با ارائه هندسه مقطع جدید و قابل ساخت به جای مقطع دایره ، کارآیی توربین‌های بادی مگنوس را به طور چشم‌گیری افزایش داد.

2- روابط کلی حاکم بر توربین بادی

در توربین باد مهم‌ترین پارامتر ضریب توان توربین است. ضریب توان نشان‌دهنده میزان دریافت انرژی توسط توربین از جریان باد مقابل است که به‌صورت رابطه (11) تعریف می‌گردد:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A V_\infty^3} \tag{11}$$

که C_p بیانگر ضریب توان، P توان خروجی توربین باد، V_∞ سرعت جریان دوردست باد و A بیانگر مساحت روبروی توربین باد است. طبق رابطه (12) داریم:

$$A = \pi R^2 \tag{12}$$

1- Riblet
2- SB RAS
3- RPM

که R طول پره توربین است.

ضریب توان حداکثری در توربین باد از رابطه (13) که به صورت تحلیلی به‌دست می‌آید، قابل محاسبه است[16]:

$$C_{p,\max} = \left(\frac{16}{27}\right)\lambda\left[\frac{1.32+\left(\frac{\lambda-8}{20}\right)^2}{B^{2/3}}\right]^{-1} - \frac{(0.57)\lambda^2}{\frac{C_L}{C_D}\left(\lambda+\frac{1}{2B}\right)} \tag{13}$$

در رابطه (13) اهمیت نسبت ضریب برآ به ضریب پسا مشخص است. در این رابطه B بیانگر تعداد پره‌ها و λ بیانگر سرعت بی بعد انتهای پره است. طبق رابطه (14) داریم:

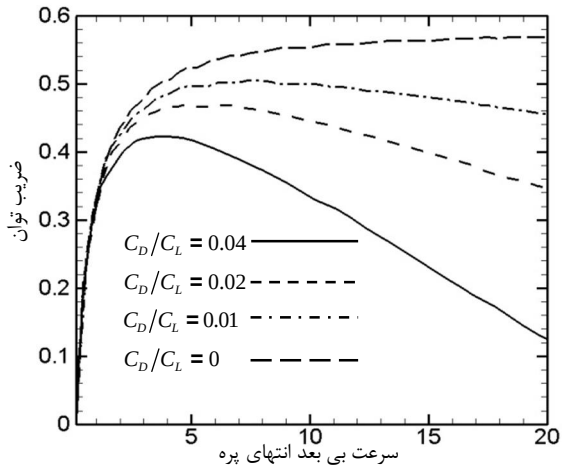
$$\lambda = \frac{R\omega}{V_\infty} \tag{14}$$

در شکل 2 نمودار رابطه (13) برای توربین باد با تعداد پره 3 (B=3) و برحسب ضرایب مختلف برآ به پسا رسم شده است[17]. همان طور که در شکل 2 مشخص است با افزایش نسبت ضریب برآ به پسا، ضریب توان توربین باد به سمت حد بتز نزدیک می‌شود. حد بتز بیشترین میزان انرژی است که یک توربین بادی ایده آل[4] از باد به‌دست می‌آورد. در اکثر توربین‌های بادی نسبت ضریب پسا به ضریب برآ بین اعداد 0/02 و 0/01 است بنابراین در شکل 2 نمودار خط‌چین و خط نقطه به واقعیت نزدیک‌تر هستند. به عنوان نمونه در توربین بادی مدل وی 82-1/5 مگاوات[5] از پره با طول 39 m و مقطع ایرفویل ناکا 221-634[6] استفاده می‌شود که در شرایط وزش باد عادی نسبت ضریب پسا به برآ در حالت بهینه 0/015 است[18].

3- روش شبیه‌سازی عددی

3-1- معرفی هندسه

تاکنون اکثر بررسی‌ها در زمینه اثر مگنوس برروی استوانه معطوف بوده است که سطح مقطع آن دایره است. مشخصه اصلی جسمی که بتوان اثر مگنوس را برروی آن بررسی کرد، قابلیت چرخش سطح آن جسم است.. ایده اولیه را می‌توان از هندسه تردمیل[7] الهام گرفت. هندسه تردمیل به‌گونه‌ای است که سطح آن مماس بر مکان خود حرکت می‌کند، بنابراین می‌تواند مدل خوبی



شکل 2 نمودار ضریب توان برحسب سرعت بی بعد انتهای پره

4- Isentropic
5- V82-1.5 MW
6- NACA 634-221
7- Treadmill

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.24.0]

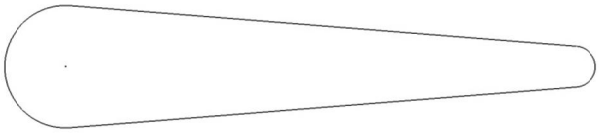
جهت بررسی اثر مگنوس باشد. حال اگر قطر دایره عقب در تردمیل را کوچک‌تر از قطر دایره جلو انتخاب کنیم به هندسه مناسب تری از لحاظ آیرودینامیک دست می‌یابیم. در شکل 3 نمونه این هندسه را می‌بینیم. این هندسه از چهار سطح تشکیل شده است، 2 قطاع دایره و 2 خط یکسان. درشکل 4 این سطوح نشان داده شده است. بدین ترتیب نحوه گردش سطوح نیز مشخص است، سطوح دایره‌ای حول محور خود گردش و خطوط نیز در مسیر خود حرکت می‌کنند.

3-2- روش حل

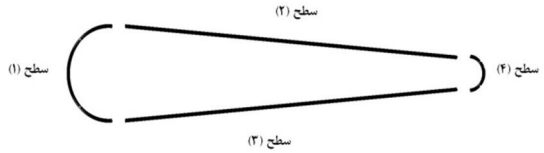
شبیه‌سازی حرکت جریان آزاد هوا برروی جسم با استفاده از نرم افزار انسیس سی‌اف‌ایکس[1] انجام می‌شود. در این شبیه‌سازی 2 بعدی، شبکه‌بندی در دامنه‌ای مستطیل شکل اطراف جسم صورت می‌پذیرد. در شکل 5، نمای کلی دامنه و فواصل آن برحسب طول خط وتر[2]هندسه مورد نظر و شرایط مرزی جهت حل در نرم افزار، مشخص است.در این هندسه طول خط وتر برابر است با مجموع شعاع دایره‌ها و فاصله بین مراکز آنها.

در این شبیه‌سازی، ابعاد هندسه مورد نظر مطابق با جدول 1 در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است این ابعاد به‌گونه‌ای انتخاب شد که قطر قطاع دایره جلو برابر با تقریباً 20% طول خط وتر باشد. این تقریب برای نزدیکی به هندسه ایرفویل‌های ضخیم مانند ناکا 0020[3] است. در شکل 6 مقایسه این هندسه با هندسه ایرفویل ناکا 0020 نشان داده شده است. همچنین شیب خطوط مماس بین دایره جلو و دایره عقب کمتر از 5 درجه انتخاب شده است تا جدایش جریان در حالت بدون چرخش و زاویه حمله صفر روی سطح هندسه رخ ندهد. بنابراین این ابعاد، ابعاد هندسه بهینه نیست بلکه نخستین ابعاد انتخابی جهت تحلیل و بررسی ایده ارائه شده است. همچنین شبکه‌بندی با استفاده از نرم افزار گمبیت[4] انجام می‌شود. مشخصه اصلی این شبکه‌بندی پوشش مناسب سلول‌های شبکه در اطراف جسم جهت شبیه‌سازی لایه مرزی است. در شکل 7 نمای نزدیک به جسم شبکه مشخص است. در کار حاضر سیال عبوری از روی جسم هوا و تراکم ناپذیر در نظر گرفته شد. در جدول 2 مشخصات هوای مورد استفاده آورده شده است.

از آنجایی که هدف بررسی عملکرد هندسه جدیدی جهت استفاده در توربین بادی مگنوس است، سرعت جریان هوا کم در نظر گرفته شد. مطابق شکل 5 به دو ضلع از دامنه شرط سرعت و به دو ضلع دیگر آن شرط آزادی ورود و خروج سیال[5] داده شد. گردش تمامی سطوح به‌صورت یکپارچه در

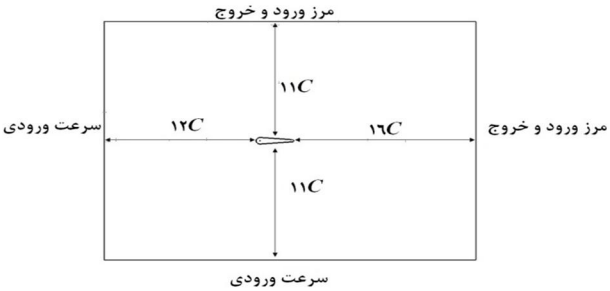


شکل 3 نمونه هندسه تردمیل



شکل 4 اجزای تشکیل‌دهنده هندسه

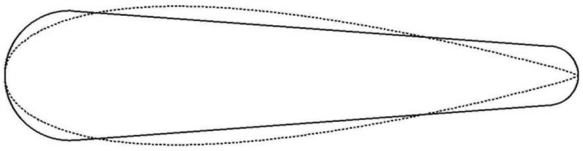
1- ANSYS CFX
2- Chord
3- NACA 0020
4- Gambit
5- Opening



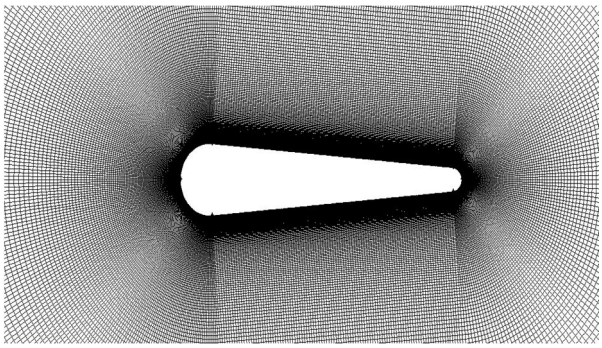
شکل 5 دامنه شبکه و حل

جدول 1 ابعاد هندسه شبیه‌سازی شده

مشخصه هندسه	مقدار(mm)
شعاع قطاع جلو	60
شعاع قطاع عقب	20
فاصله بین مراکز دایره‌ها	250
طول خط وتر	290



شکل 6 مقایسه هندسه انتخابی با هندسه ایرفویل ناکا 0020



شکل 7 شبکه‌بندی دامنه

جدول 2 مشخصات هوا

مشخصه	واحد	مقدار
سرعت	(m/s)	5
ویسکوزیته سینماتیکی	(m^2/s)	$1/55\times10^{-5}$
چگالی	(kg/m^3)	1/18
عدد ماخ	-	0/015
عدد رینولدز	-	93548

نرم‌افزار انسیس سی‌اف‌ایکس امکان پذیر نیست. به همین جهت هندسه جسم مطابق با شکل 4 از چهار سطح درنظر گرفته‌شد و به هر سطح و به‌صورت جداگانه شرط مرزی سرعت[6]، مماس بر سطح داده شده است. در این حالت و مطابق با شکل 4، قطاع‌ها متناسب با شعاع و حول مراکز خود سرعت

6- Wall Velocity

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.24.0]

دورانی می‌یابند و دو سطح خط مانند در امتداد مسیر خود شرط سرعت می‌یابند. قابل‌ذکر است با این کار مرزها سرعت پیدا می‌کنند و در مکان خود ثابت هستند و جابجایی ندارند بنابراین نیازی به شبکه متحرک[1] وجود ندارد به راحتی حالت گردش تمامی سطح جسم با شرط سرعت سطوح ایجاد می‌شود. جریان آشفته[2] فرض شده و از مدل آشفتگی انتقال تنش برشی[3] برای مدلسازی آشفتگی استفاده شد. مزیت این مدل نسبت به سایر مدل‌های حل جریان مغشوش، شبیه سازی کامل جریان است. بنابراین این مدل جدایش جریان را پیش‌بینی نمی‌کند بلکه به درستی آن را شبیه سازی می‌نماید. همچنین در اکثر شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده برروی ایرفویل از این مدل استفاده شده است. به عنوان نمونه آقای محمد ساید[17] در تحلیل جریان آرام حول خانواده ایرفویل ریزو[4] از این مدل آشفتگی استفاده کرد. گسسته سازی معادلات حاکم از دقت مرتبه دوم به بالا است. شرط همگرایی حل رسیدن مقدار باقیمانده‌ها به کمتر از 10^{-7} است. با توجه به اینکه در بیشتر حالت‌ها جریان روی سطح جدا شده و ویک[5] پشت آن نوسانی می‌شود، جریان در اکثر حالت‌ها ناپایا فرض شده است.

3-3- ارزیابی صحت نتایج عددی

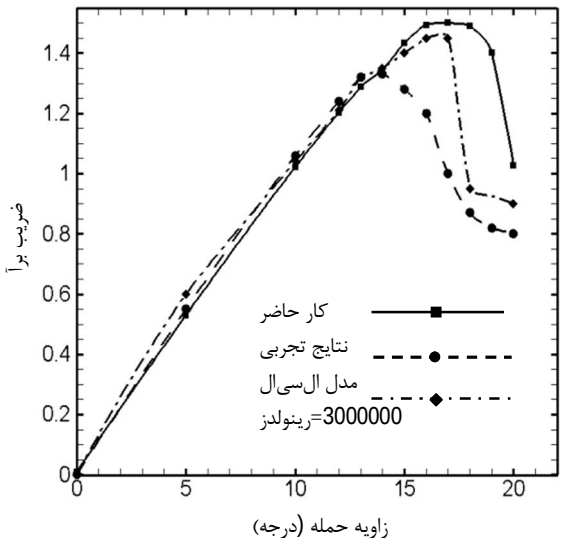
در روش‌های شبیه سازی عددی برای کسب اطمینان از درستی نتایج، آن‌ها را با نتایج بدست آمده آزمایش‌های تجربی در همان موضوع مقایسه می‌کنند و در صورت تطابق نتایج روش عددی مورد تأیید واقع می‌گردد. در کار حاضر به‌دلیل عدم وجود هیچ‌گونه آزمایش تجربی مرتبط امکان چنین مقایسه‌ای وجود ندارد. به همین دلیل برای کسب اطمینان از درستی نتایج عددی بدست آمده، با روش شبیه سازی عددی، اقدام به شبیه سازی ایرفویل ناکا 0012[6] و مقایسه نتایج آن با داده‌های تجربی و سایر کارهای عددی انجام شده گردید. این شبیه سازی از آن جهت انجام شد تا درستی روش کار و شرایط نرم افزار جهت شبیه سازی عددی مورد اطمینان قرار گیرد. در این مقایسه از کار عددی وفایی[19] استفاده گردید. وفایی در کار خود از چندین مدل آشفتگی استفاده نمود که در اینجا مقایسه با مدل آشفتگی ال‌سی‌ال[7] انجام می‌شود. در کار حاضر که نتایج آن در شکل‌های 8 و 9 آورده شده است، پارامتر مهم y^+ در حدود 2 نشان داده شد. مطابق شکل‌های 8 و 9 ، تا قبل از مرحله استال[8] انطباق خوب و قابل قبولی بین نمودارها وجود دارد. اما پس از استال به‌دلیل جدایش شدید جریان، اختلاف نتایج بیشتر می‌شود که دلایلی مانند تفاوت در شرایط آزمایشگاهی و نرم افزار، اختلاف در روش حل، مدل‌های مختلف و نیز سه بعدی بودن کار آزمایشگاهی دارد. برای بررسی استقلال حل از شبکه، سه شبکه‌بندی با تعداد سلول‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفت. اطلاعات مربوط به تعداد سلول‌های این سه شبکه در جدول 3 آمده است. حداکثر اختلاف مقادیر نیروهای برآ و پسا برای این 3 شبکه 1 % است که قابل قبول است.

4- نتایج شبیه سازی

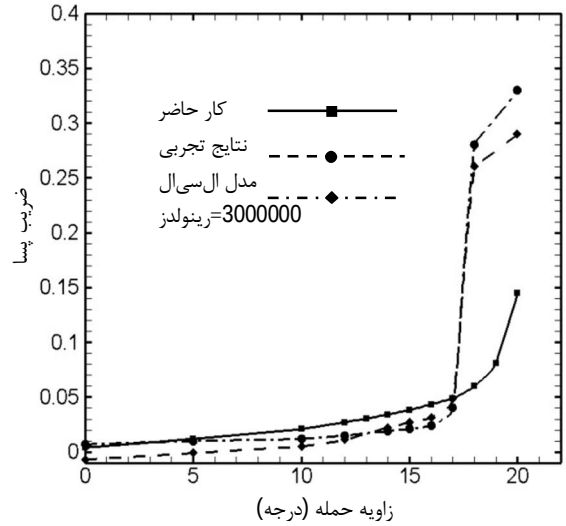
4-1- نتایج شبیه سازی جریان حول مقطع پره جدید

در کار حاضر عملکرد آیرودینامیکی هندسه مورد نظر در دو حالت بررسی

1- Moving Mesh
2- Turbulent
3- SST(Shear Stress Transport)
4- Riso
5- wake
6- NACA 0012
7- LCL Model
8- Stall



شکل 8 مقایسه تغییرات ضریب برآ در زوایای حمله مختلف حول ایرفویل ناکا 0012



شکل 9 مقایسه تغییرات ضریب پسا در زوایای حمله مختلف حول ایرفویل ناکا 0012

جدول 3 تعداد سلول شبکه‌بندی‌های بررسی‌شده

شبکه	تعداد سلول
شبکه 1	162540
شبکه اصلی	216540
شبکه 2	243540

می‌شود. نخست آنکه تمامی سطوح مطابق شکل 10 به صورت ساعتگرد گردش کنند.

در این بررسی ضرایب برآ و پسا و نسبت این دو ضریب به عنوان نتایج مد نظر است. چهار زاویه حمله 0، 5، 10 و 15 درجه به عنوان زوایای انتخابی مورد بررسی قرار گرفت. به خطوط بالا و پایین هندسه، شرط مرزی سرعت در دستگاه کارتزین[9] و به دو قطاع ابتدا و انتها شرط مرزی سرعت چرخشی[10] در دستگاه استوانه‌ای داده شد. میزان آشفتگی[11] جریان نیز 5% در

9- Cartesian
10- Rotating Wall
11- Turbulence

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.24.0]

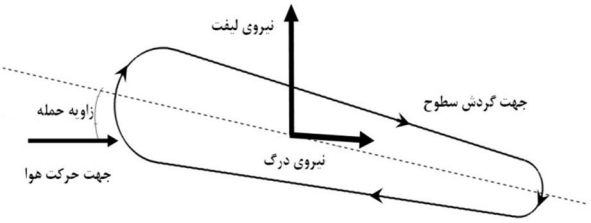
نظر گرفته شد و از انتقال حرارت در جریان صرف‌نظر شد. متغیر y^+ برروی بیشتر سطوح کمتر از یک است.

محاسبه ضریب برآ و پسا مطابق با روابط (15) و (16) انجام می‌شود. سطح مقطع جسم برابر با طول خط وتر ضرب در بعد سوم است. از آنجایی که این تحلیل دو بعدی است جسم به طول دلخواهی در بعد سوم گسترش می‌یابد ولی در شرایط مرزی حل، از شرط مرزی تقارن[1] بین دو صفحه ابتدا و انتها استفاده می‌شود.

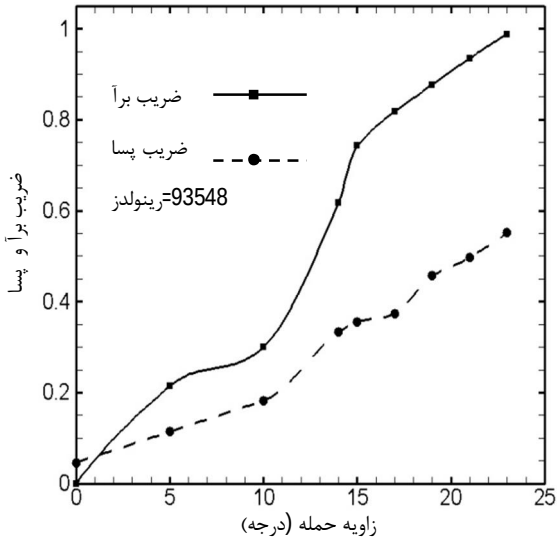
$$C_L = \frac{F_L}{0.5\rho A V_\infty^2} \quad (15)$$

$$C_D = \frac{F_D}{0.5\rho A V_\infty^2} \quad (16)$$

شکل 11 نمودار ضرایب برآ و پسای جسم در حالت بدون گردش سطح را نشان می‌دهد. قابل‌ذکر است در شکل 11 تمامی حل‌ها به جز زاویه 0 و 5 درجه به صورت گذرا و با گام‌های زمانی 0/001 و 0/0005 ثانیه انجام شده است. به‌دلیل پدیده تشکیل خیابان ورتکس[2] که پدیده‌ای ناپایا است، حل عددی به‌صورت گذرا انجام می‌شود. همان طور که در شکل 11 مشاهده می‌شود ضرایب برآ و پسا تا زاویه 23 درجه درحال افزایش می‌باشند که این پدیده به علت فرم غیرآیرودینامیکی هندسه مورد نظر نسبت به یک ایرفویل است. زیرا در هندسه مورد نظر، در تمامی زوایای از صفر به بالا جدایش جریان اتفاق می‌افتد در حالیکه در ایرفویل در زوایای حمله کم تا حدود 13 درجه هیچگونه جدایشی روی سطوح آن رخ نمی‌دهد. مشابه این پدیده در جریان عبوری از روی یک صفحه تخت رخ می‌دهد[20].



شکل 10 جهت گردش سطوح در شبیه سازی اول



شکل 11 تغییرات ضریب برآ و پسا حول جسم به‌ازای زوایای حمله مختلف

1- Symmetry
2- Vortex shedding

شکل12 نسبت ضریب برآ به پسای جسم را در حالت بدون گردش سطح نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل 12 دیده می‌شود نسبت ضریب برآ به ضریب پسای این هندسه در مقایسه با هندسه ایرفویل ، عدد بسیار کوچکی است. البته نسبت ضریب برآ به ضریب پسا در ایرفویل‌ها زمانی به حد مطلوب می‌رسد که سرعت جریان هوا به طور چشمگیری زیاد باشد درحالی که در سرعت‌های کم جریان هوا، ایرفویل‌ها نسبت ضریب برآ به ضریب پسای بسیار کمتری دارند. به‌عنوان نمونه شبیه سازی عددی برای ایرفویل‌های ناکا 0012 و ریزو- بی1- 18[3] با شرایط جریان هوای مطابق با جدول 2 انجام شد که بیشترین مقدار نسبت ضریب برآ به ضریب پسا، در زاویه حمله 10 درجه و برای هر دو ایرفویل برابر با 23 مشخص گردید. به همین دلیل عمده تحقیقات در زمینه طراحی توربین باد، برای رسیدن به نسبت ضریب برآ به ضریب پسای بیشینه، بر روی طراحی هندسه سه بعدی پره توربین متمرکز است.

شکل‌های 13، 14 و 15کانتور سرعت در زوایای حمله 0 و 10و 15درجه و بدون گردش سطح را نشان می‌دهد. در شکل‌های 14 و 15، جدایش شدید جریان و تشکیل خیابان ورتکس در زوایای حمله 10 و 15درجه کاملاً واضح است. شایان ذکر است که سرعت جریان هوا برابر با 5 ms^{-1} است. در شکل 13 که مربوط به زاویه حمله 0 درجه است، جدایش جریان و تشکیل ویک (قسمت‌های بسیار سیاه رنگ) تنها در قسمت پشت تردمیل (دایره کوچک) صورت می‌گیرد. تقارن جریان بالا و پایین جسم واضح است و نشان می‌دهد جریان پایا است.

در شکل 14 که مربوط به زاویه حمله 10 درجه است، جدایش جریان و تشکیل ویک در ناحیه وسیع‌تری صورت می‌گیرد. شبیه‌سازی این حالت به‌صورت گذرا و با گام زمانی 0/001 ثانیه انجام شده است. فرکانس نواسانات جریان (تولید گردآبه) با توجه به نمودار ضریب برآ و پسا برحسب زمان، مقدار 25 محاسبه گردید. به عبارتی در هر ثانیه 25 ویک ایجاد و از سطح جسم جدا می‌شود. بیشینه سرعت که در قسمت جلوی جسم اتفاق می‌افتد برابر با 6/39 ms^{-1} است.

در شکل 15 که مربوط به زاویه حمله 15 درجه است، جدایش جریان و تشکیل ویک در ناحیه وسیع‌تری نسبت به زاویه حمله 10 درجه صورت می‌گیرد. فرکانس نواسانات جریان با توجه به نمودار ضریب برآ و پسا برحسب زمان مقدار 11 محاسبه گردید. به عبارتی فاصله طولی بین دو گردآبه متوالی در زاویه حمله 15 درجه بیشتر از زاویه حمله 10 درجه است. همچنین پهنای خیابان ورتکس نیز با افزایش زاویه حمله افزایش یافته است. قدرت گردابه‌ها نیز با افزایش زاویه حمله افزایش می‌یابد. در زاویه حمله 15 درجه بیشینه سرعت برابر با 7/39 ms^{-1} است.

شکل‌های 16 و 17 نمودار ضرایب برآ و پسا را در زوایای حمله مختلف برحسب سرعت بی‌بعد گردش سطح جسم نشان می‌دهد. سرعت بی‌بعد مطابق رابطه (17) با تقسیم سرعت گردش سطح بر سرعت جریان محاسبه می‌شود:

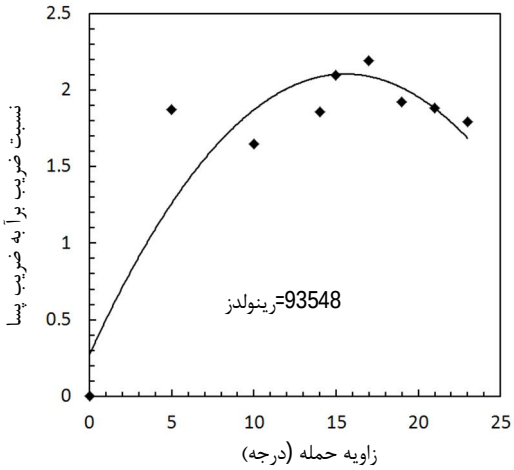
$$U_W = \frac{V_S}{V_\infty} \quad (17)$$

مطابق شکل‌های 16 و 17، گردش سطح اثر بسیار زیادی بر مقادیر ضرایب برآ و پسا دارد به‌گونه‌ای که ضریب برآ تا عدد 10 افزایش می‌یابد. شکل 18 نمودار نسبت ضریب برآ به ضریب پسا برحسب سرعت بی‌بعد گردش سطح را نشان می‌دهد. شکل‌های 19 و 20 خطوط جریان حول جسم

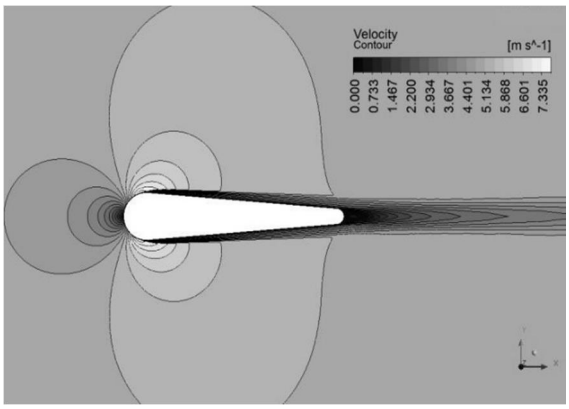
3- Riso-B1-18

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.24.0]

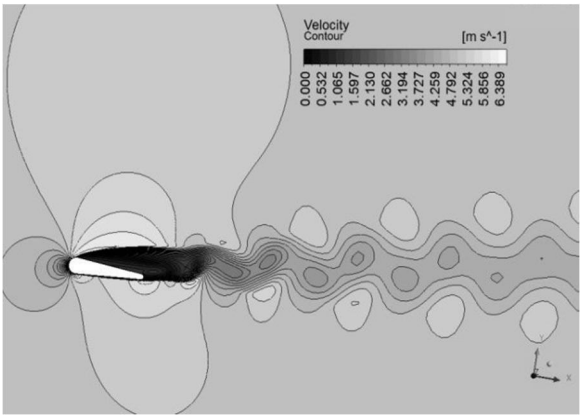
در زاویه حمله 0 و 15 درجه و بدون گردش سطح را نشان می‌دهد. در شکل 19 و به‌خصوص شکل 20 جدایش جریان و تشکیل جریان گردابه‌ای در پشت جسم بسیار چشمگیر است. تأثیر گردش سطوح در از بین بردن جدایش جریان، در شکل‌های 21 و 22 که خطوط جریان را در زاویه حمله 0 و 15 درجه و سرعت گردش بی‌بعد 3 نشان می‌دهد، مشخص است. منظم شدن خطوط جریان و از بین رفتن جریان‌های گردابه‌ای در اثر گردش سطح جسم، در شکل‌های 21 و 22 به وضوح دیده می‌شود.



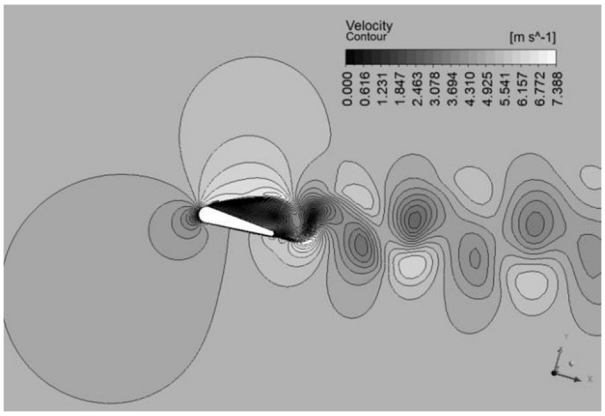
شکل 12 تغییرات ضریب برآ به ضریب پسا حول جسم به‌ازای زوایای حمله مختلف



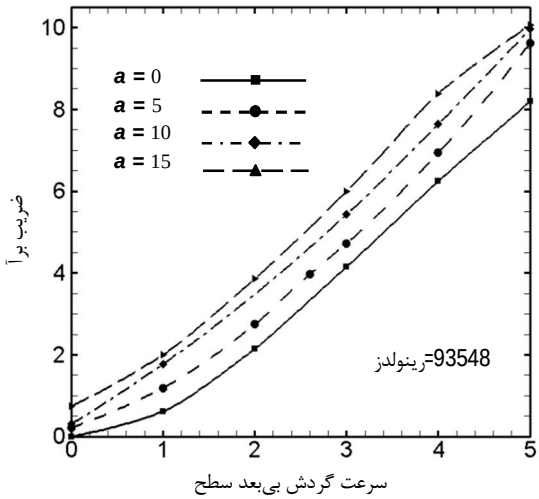
شکل 13 کانتور سرعت جریان حول جسم بدون گردش سطح در زاویه حمله صفر درجه



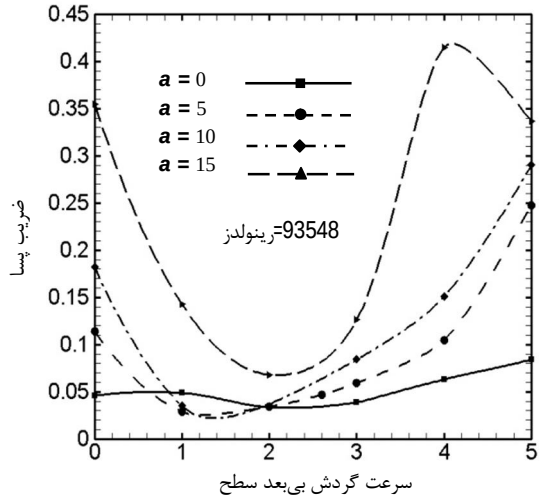
شکل 14 کانتور سرعت جریان حول جسم بدون گردش سطح در زاویه حمله ده درجه



شکل15 کانتور سرعت جریان حول جسم بدون گردش سطح در زاویه حمله پانزده درجه



شکل16 تغییرات ضریب برآ بر حسب سرعت بی‌بعد گردش سطح

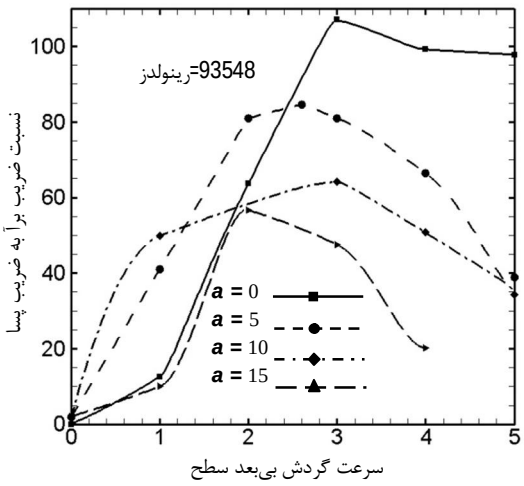


شکل 17 تغییرات ضریب پسا برحسب سرعت بی‌بعد گردش سطح

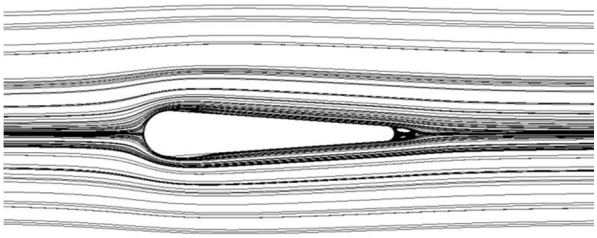
4-2- توان مصرفی جهت گردش سطح هندسه

توان مصرف‌شده جهت به‌گردش درآوردن سطح جسم و انرژی دریافتی از باد در توربین بادی، از آن جهت حائز اهمیت است که مشخص می‌کند آیا این کار مقرون به صرفه است یا نه؟ این مطلب تابع چندین متغیر است که تمامی آنها می‌بایست یکجا دیده شود. طراحی و انتخاب نوع و ابعاد توربین باد،

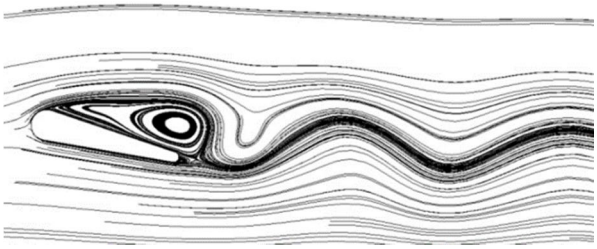
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.24.0]



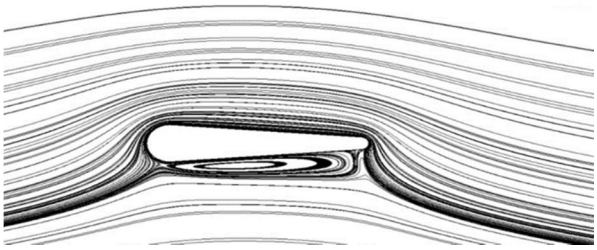
شکل 18 تغییرات نسبت ضریب برآ به ضریب پسا برحسب سرعت بی‌بعد گردش سطح



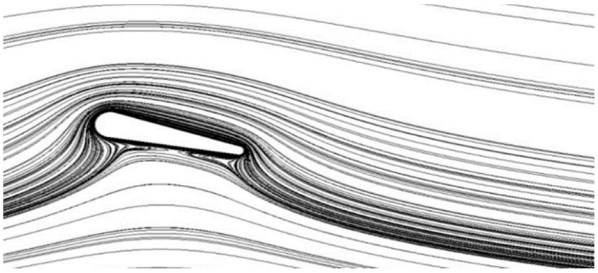
شکل 19 خطوط جریان حول جسم بدون گردش سطح در زاویه حمله صفر درجه



شکل 20 خطوط جریان حول جسم بدون گردش سطح در زاویه حمله پانزده درجه



شکل 21 خطوط جریان حول جسم با سرعت گردش بی‌بعد سه در زاویه حمله صفر درجه



شکل 22 خطوط جریان حول جسم با سرعت گردش بی‌بعد سه در زاویه حمله پانزده درجه

طراحی مکانیزم گردش سطح پره توربین با این مقطع، نحوه ساخت و پیش بار اولیه سفتی بر روی سطح متحرک پره، انتخاب ابعاد سطح پره متحرک و بسیار موارد دیگر در محاسبه توان مصرفی و توان به‌دست آمده دخیل است که مشخصاً خارج از حوصله یک یا چند مقاله بوده و می‌بایست در سطح یک پروژه ساخت توربین باد دیده شود. در کار حاضر توان مصرفی ناشی از تحمیل تنش برشی هوا بر روی سطح کل جسم محاسبه گردید. در این محاسبه مطابق با شکل 4، توان تحمیلی سطوح خطی و سطوح قطاع شکل به‌صورت مجزا محاسبه گردید. روابط (18) و (19) توان مصرفی را به‌ترتیب برای سطوح خطی و قطاع شکل نشان می‌دهد:

$$\text{توان} = (\tau_{ave} \cdot V_S) A_S \tag{18}$$

در رابطه (18)، تنش برشی میانگین بر روی سطح در سرعت سطح ضرب داخلی می‌شود و سپس ضرب در مساحت سطح می‌شود.

$$\text{توان} = \left[(\tau_{ave} \times R_C) \cdot \omega_S\right] A_S \tag{19}$$

در رابطه (19)، تنش برشی میانگین بر روی سطح قطاع ابتدا در شعاع قطاع ضرب خارجی شده، سپس حاصل در سرعت دورانی سطح ضرب داخلی شده و در نهایت در مساحت سطح ضرب می‌شود. در روابط (18) و (19) علامت منفی به معنای توان مصرفی و علامت مثبت به معنای کمک جریان به چرخش سطح است که در محاسبات هر دو علامت دیده شد. محاسبه توان مجموع برحسب واحد سطح جسم مطابق با رابطه (20) انجام شد:

$$\text{توان مجموع} = \frac{\sum \text{Power}_{\text{Surface}}}{\sum \text{Area}_{\text{Surface}}} \tag{20}$$

توان به‌دست آمده مطابق با رابطه (20) بیانگر توان سیالاتی مصرفی برحسب واحد سطح جسم است. سطح خارجی جسم در شکل 23 به‌صورت هاشور خورده نشان داده شده است. شکل 24 نمودار توان مصرفی بر حسب زاویه حمله و در سرعت‌های مختلف گردش سطح را نشان می‌دهد.

مطابق با شکل 24 توان مصرفی برحسب واحد سطح جسم عدد بزرگی را نشان نمی‌دهد. البته این محاسبات برای هندسه ارائه شده است و در مورد سایر ابعاد انتخابی، این اعداد تغییر می‌کند.

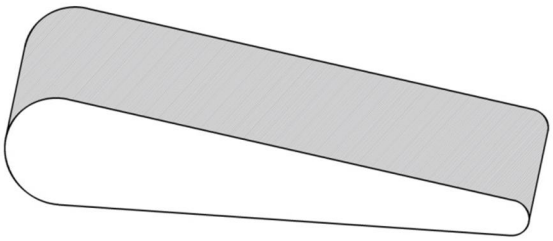
5- نتیجه‌گیری

در این مقاله، نوع هندسه جدیدی جهت استفاده در مقطع پره توربین بادی مگنوس معرفی شد. مشخصه این هندسه امکان ساخته‌شدن و آزمایش است و صرفاً یک ایده ذهنی نیست. این هندسه برپایه هندسه تردمیل است با این تفاوت که شعاع دایره‌ها در ابتدا و انتهای آن تفاوت می‌کند. همچنین عملکرد آیرودینامیکی این هندسه، به روش شبیه سازی عددی و به صورت 2 بعدی، مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی که هیچ‌گونه نمونه مشابه تجربی جهت مقایسه داده‌ها شبیه سازی عددی و آزمایشگاهی وجود نداشت، جهت ارزیابی نتایج، با استفاده از شبیه سازی عددی عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل ناکا 0012 مورد بررسی قرار گرفت و با سایر نتایج تجربی و عددی مقایسه گردید.

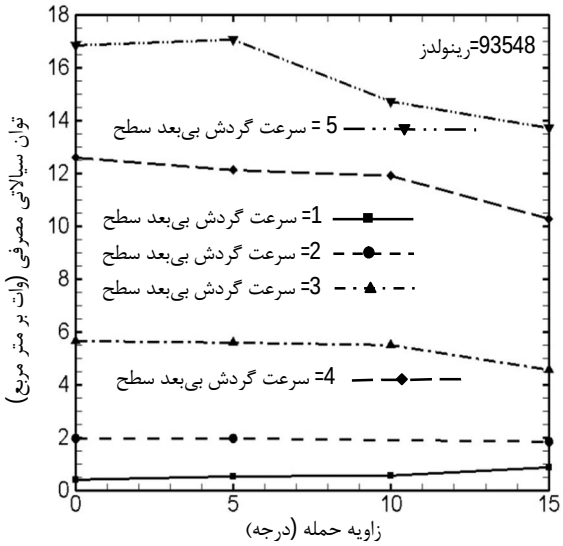
نتایج به‌دست آمده از عملکرد آیرودینامیکی هندسه مورد نظر در نوع خود بسیار قابل‌توجه است. اهمیت این مطالعه آنجایی است که سرعت جریان بسیار کم است و بهبود ضرایب برآ و پسا کوچک‌ترین ارتباطی با عدد بالای سرعت جریان ندارد. این نتایج را می‌توان در چند دسته تقسیم‌بندی کرد:

- هندسه تردمیل به تنهایی و به‌عنوان یک جسم هیچ‌گونه مشخصه آیرودینامیکی مطلوبی ندارد و همانطور که بیان شد نسبت ضریب برآ به پسای آن در مرتبه یک باقی می‌ماند.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.24.0]



شکل 23 سطح خارجی جسم



شکل 24 تغییرات توان مصرفی برحسب زاویه حمله

- گردش سطح هندسه تردمیل به شدت در عملکرد آیرودینامیکی آن تأثیرگذار است و می‌تواند ضریب برآ را به‌صورت خطی تا چند برابر (در یک زاویه حمله مشخص) افزایش دهد. همچنین کاهش ضریب پسای جسم با گردش سطح آن و سپس افزایش آن قابل‌توجه است.
- تأثیر چشمگیر گردش سطح بر نسبت ضریب برآ به پسای جسم مهمترین نتیجه و هدف این مطالعه است. افزایش قابل‌توجه نسبت ضریب برآ به ضریب پسا در اثر گردش سطح نتیجه قابل‌توجهی است که موفقیت این هندسه را به عنوان سطح مقطع جدید پره توربین بادی مگنوس نشان می‌دهد.
- بیشترین نسبت افزایش ضریب برآ و نسبت ضریب برآ به پسا در اثر گردش سطح، در زاویه حمله صفر درجه رخ می‌دهد. گردش سطح جسم در زاویه حمله صفر درجه ضریب برآ را از صفر تا 8 و نسبت ضریب برآ به پسا را تا عدد 109 افزایش می‌دهد که بسیار قابل توجه است.
- بیشینه نسبت ضریب برآ به پسا در زاویه حمله 5 درجه برابر 81، در زاویه حمله 10 درجه برابر 64 و در زاویه حمله 15 درجه برابر 57 است.
- تا کنون در توربین بادی مگنوس تنها از پره‌هایی با مقطع دایره استفاده شده است که در بهترین شرایط عملکرد نسبت ضریب برآ به پسای 10 را دارند. همچنین سرعت گردش بی‌بعد پره‌های با مقطع دایره در حدود عدد 5 تا 10 است. این در حالی است که هندسه تردمیل معرفی‌شده در سرعت گردش بی‌بعد بین 2 تا 3 ، نسبت ضریب برآ به پسای بسیار بالاتری (تا عدد 109) دارد . همچنین مقدار ضریب برآ در استوانه دوار از عدد 3 بیشتر نمی‌شود درحالی‌که هندسه تردمیل در اثر گردش سطح ضریب برآی تا عدد 10 را نشان می‌دهد.
- توان سیالاتی مصرفی جهت گردش سطح هندسه بر واحد سطح آن عدد بزرگی را نشان نمی‌دهد و این عدد در بیشترین مقدار از 18 وات بر متر مربع تجاوز نمی‌کند که نشان از صرفه اقتصادی این هندسه مقطع پره توربین بادی می‌دهد.

6- تقدیر و تشکر

در پایان نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از زحمات و همکاری آقای مهندس امید اطلس چیان تقدیر و تشکر به عمل آورند.

7- فهرست علائم

p	فشار (Nm^{-2})
C_P	ضریب توان توربین باد
C_L	ضریب برآ
C_D	ضریب پسا
F_L	نیروی برآ
F_D	نیروی پسا
V_∞	سرعت جریان آزاد هوا (ms^{-1})
V_S	سرعت سطح
U_W	سرعت گردش بی بعد سطح
A_S	مساحت سطح
R_C	شعاع قطاع

علائم یونانی

φ	پتانسیل سرعت
Γ	سیرکولاسیون
ρ	چگالی (kgm^{-3})
a	زاویه حمله (درجه °)
τ_{ave}	تنش برشی میانگین ($N.m^{-2}$)
ω_S	سرعت گردش زاویه‌ای سطح ($rad.s^{-1}$)

8- مراجع

[1] T. Pau Chang, S. Ping Cheng, F .Jiao Liu, L. Chung Sun, Y. Pin Chang, Site matching study of pitch-controlled wind turbine generator, *Energy conversion and Management,* Vol 85, pp. 664-669, 2014.
[2] N.M. Bychkov, Magnus wind turbine results of model testing , *Thermophysics and aeromechanics,* Vol 11, pp. 567-580, 2004.
[3] BR. Munson, AP. Rothmayer ,Th. Okiishi, W.W. Huebsch , *Fundamentals of fluid mechanics,* 7th ed. Asia:John Wiley&Sons,Ltd;2012.
[4] N. Komatinovic, *Investigation of the savonius-type magnus wind turbine,* Master thesis, MEK Technical University of Denmark, , October 2006.
[5] A. Sedaghat, Magnus type wind turbines: Prospectus and challenges in design and modelling, *Renewable Energy* , Vol. 62, pp. 619-628,February 2014.
[6] R.W. Fox, Alan.T. McDonald, P.J. Pritchard , *Introduction to fluid mechanics,* 6th ed. C2004.
[7] D.B.Ingham, Steady flow past a rotating cylinder, *Computers & Fluids,* Vol. 11, No 4, pp. 351-366,1983.
[8] T.K.Sengupta, A.Kasliwal, S.De, M.Nair , Temporal flow instability for magnus-robins effect at high rotation rates, *Journal of Fluids and Structures,* Vol 17, pp. 941-953, 2003.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.24.0]

[9] N. Thouault, C. Breistsamter, J. Seifert, C. Badalamenti, S.A. Prince, N.A. Adams, Numerical analysis of rotating cylinder with spanwise discs, *in The 27TH International Congress of the Aeronautical Sciences,* ICAS 2010.
[10] T. Hall, D. Joseph, Rotating cylinder drag balance with application to riblets, *Experiments in Fluids,*Vol 29, pp. 215-227, 2000.
[11] S.J. Karabelas, B.C. Koumroglou, C.D. Argyropoulos, N.C. Markatos, High reynolds number turbulent flow past a rotating cylinder, *Applied Mathematical Modelling,* Vol36, pp. 379-398 , 2012.
[12] D. Shiels, A. Leonard, A. Stagg, Computational investigation of drag reduction on a rotationally oscillating cylinder, *Esaim:Proceedings,* Vol 1, pp. 307-323, 1996.
[13] N.M. Bychkov, A.V. Dovgal, V.V. Kozlov, Magnus wind turbine as an alternative to the blade ones , *journal of physics: conference series,* Vol *75* , pp. 1-7, 012004, 2004.
[14] N.M. Bychkov, Magnus wind turbine characteristics of rotating cylinder, *Thermophysics and aeromechanics,* Vol 12, pp. 151-166, 2005.
[15] H.R. Kheirandish, *Design and manufacturing of a modified magnus wind turbine,* Master thesis,Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, 2013.(In Persian)
[16] A. Sedaghat, M. Mirhosseini, Aerodynamic design of a 300 Kw horizontal axis wind turbine for province of semnan, *Energy Conversion and Management,* Vol 63, pp. 87-94, 2012.
[17] M. Sayed, H .Kandil, A. Shaltot, Aerodynamic analysis of different wind-turbine-blade profiles using finite-volume method, *Energy conversion and Management,* Vol 64, pp. 541-550, 2012.
[18] N. Tenguria, N.D. Mittal, S. Ahmed, Modal analysis for blade of horizontal axis wind turbine , *Asian journal of scientific research,* Vol 4, pp. 326-340, 2011.
[19] M.J. Vafaee Rostami, *Numericalinvestigation of turbulent over a stationary and oscillatory NACA0012 airfoil using overest grids method* ,Master thesis, Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, 2007.(In Persian)
[20] J.F. Manwell, J.G. McGowan, *Wind energy explained Theory, Design and Application,* 2th ed. USA : John Wiley & Sons, Ltd; 2009.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.24.0]