



بررسی عددی عملکرد آیرودینامیکی مقطع جدید پره توربین بادی مگنوس

سید علی کاظمی¹، مهدی نیلی احمدآبادی^{2*}، محسن ثقفیان³، احمد صداقت⁴

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

*m.nili@cc.iut.ac.ir، 84156-83111 اصفهان، کدپستی

چکیده

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

نسبت ضریب برآ به ضریب پسا در پره‌های توربین بادی، از پارامترهای تأثیرگذار در ضریب توان توربین بادی است. با توجه به کارایی 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 معرفی شده، 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. قابل ذکر 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 قابل استفاده 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. 84156-83111 Isfahan, 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

تجدید پذیر بیشتر کرده 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 کارایی توربین‌های بادی انجام گرفته است.

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

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

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

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

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:

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

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

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

یا طبق رابطه (8):

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

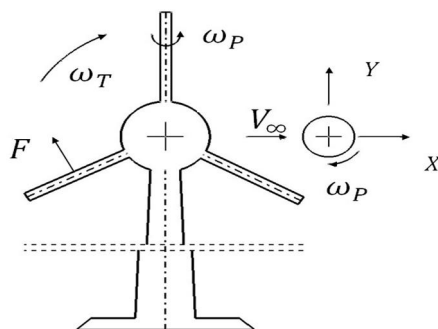
جهت محاسبه نیروی برآ و پسا، از انتگرال‌گیری روی سطح استفاده می‌شود. طبق روابط (9,10) داریم:

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

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

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) قابل محاسبه 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

در کارآیی توربین‌های بادی نسبت ضریب برآ¹ به ضریب پسا² 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 از سرعت 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 ($1-2 \text{ ms}^{-1}$) 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 مگنوس³ 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 متقارن 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:

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

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:

$$\Gamma = \oint V_{\text{rotational}} dl \quad (2)$$

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

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

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

که R طول پره توربین است.

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

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

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:

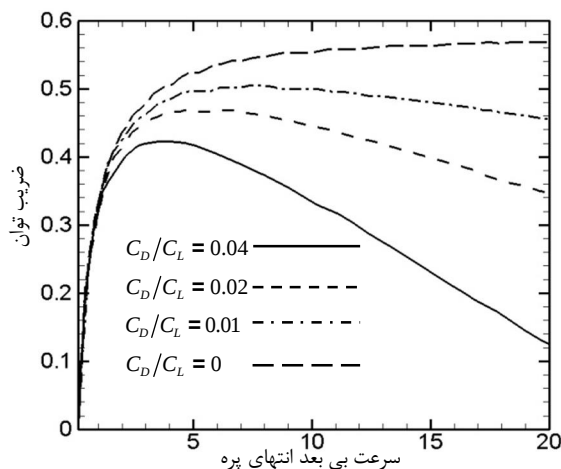
$$\lambda = \frac{R\omega}{V_\infty} \quad (14)$$

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 آل⁴ از باد به دست 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 1/5-82⁵ مگاوات⁶ از پره با طول 39 m و مقطع ایرفویل ناکا 634-221⁶ 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 بر روی استوانه معطوف بوده است که سطح مقطع آن دایره است. مشخصه اصلی جسمی که بتوان اثر مگنوس را بر روی آن بررسی کرد، قابلیت چرخش سطح آن جسم است. ایده اولیه را می‌توان از هندسه تردمیل⁷ الهام گرفت. هندسه تردمیل به گونه‌ای 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

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. سنگوتا [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 ناهموازی ریبلت¹ 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. شیلیس [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 راس² 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 دور³ 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 ساخته شده انجام داد ولی در بهترین شرایط ضریب توانی بیشتر از 0/14 به دست 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 کارایی 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، کارایی 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 به صورت رابطه (11) تعریف می‌گردد:

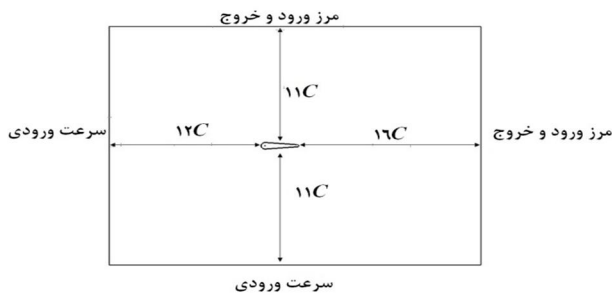
$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A V_\infty^3} \quad (11)$$

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:

$$A = \pi R^2 \quad (12)$$

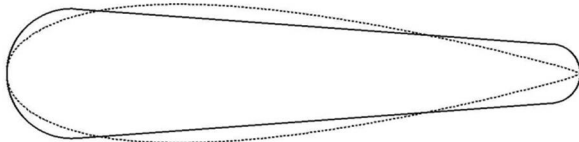
4- Isentropic
5- V82-1.5 MW
6- NACA 634-221
7- Treadmill

1- Riblet
2- SB RAS
3- RPM

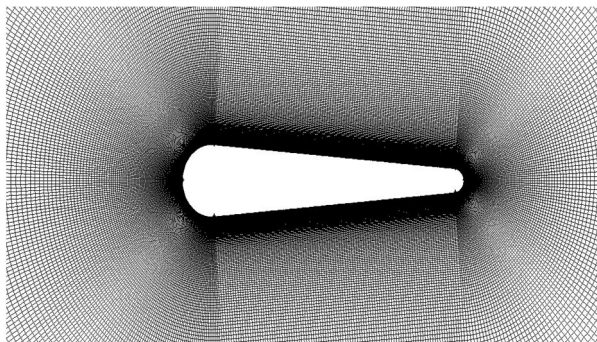


شکل 5 دامنه شبکه و حل

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)	$1/55 \times 10^{-5}$
چگالی	(kg/m ³)	1/18
عدد ماخ	-	0/015
عدد رینولدز	-	93548

نرم‌افزار آنسیس سی‌اف‌ایکس امکان پذیر نیست، به همین جهت هندسه جسم مطابق با شکل 4 از چهار سطح در نظر گرفته شد و به هر سطح و به صورت جداگانه شرط مرزی سرعت⁶، مماس بر سطح داده شده است. در این حالت و مطابق با شکل 4، قطاع‌ها متناسب با شعاع و حول مراکز خود سرعت

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. در شکل 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

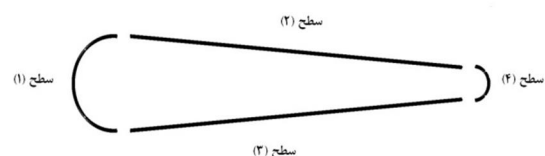
شبیه‌سازی حرکت جریان آزاد هوا بر روی جسم با استفاده از نرم افزار آنسیس سی‌اف‌ایکس¹ انجام می‌شود. در این شبیه‌سازی 2 بعدی، شبکه‌بندی در دامنه‌ای مستطیل شکل اطراف جسم صورت می‌پذیرد. در شکل 5، نمای کلی دامنه و فواصل آن برحسب طول خط وتر² هندسه مورد نظر و شرایط مرزی جهت حل در نرم افزار، مشخص است. در این هندسه 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 0020³ 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 گمبیت⁴ 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 سیال⁵ داده شد. گردش تمامی سطوح به‌صورت یکپارچه در

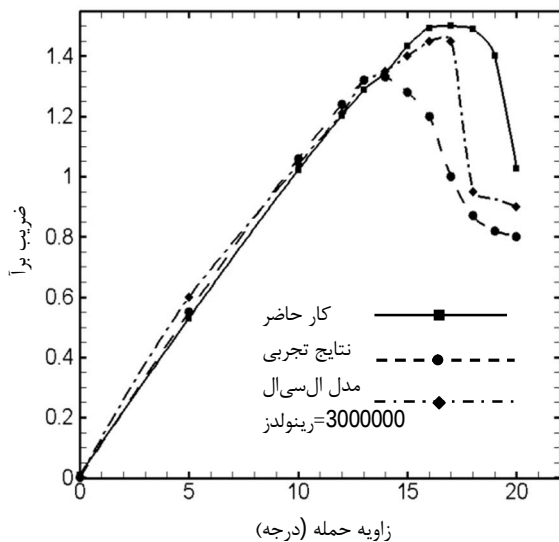


شکل 3 نمونه هندسه تردمیل

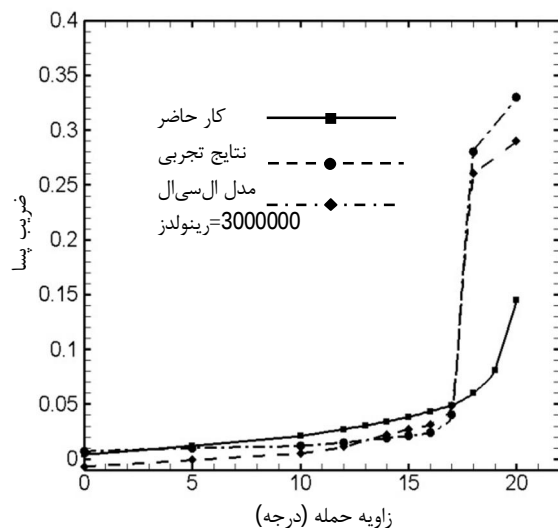


شکل 4 اجزای تشکیل‌دهنده هندسه

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



شکل 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 شبکه بندی های بررسی شده

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

می شود. 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 کارتزین⁹ و به دو قطاع ابتدا و انتها شرط مرزی سرعت چرخشی¹⁰ در دستگاه استوانه ای داده شد. میزان آشفتگی¹¹ جریان نیز 5% در

دورانی می یابند و دو سطح خط مانند در امتداد مسیر خود شرط سرعت می یابند. قابل ذکر است با این کار مرزها سرعت پیدا می کنند و در مکان خود ثابت هستند و جابجایی ندارند بنابراین نیازی به شبکه متحرک¹ وجود ندارد به راحتی حالت گردش تمامی سطح جسم با شرط سرعت سطوح ایجاد می شود. جریان آشفته² فرض شده و از مدل آشفتگی انتقال تنش برشی³ برای مدلسازی آشفتگی استفاده شد. مزیت این مدل نسبت به سایر مدل های حل جریان مغشوش، شبیه سازی کامل جریان است. بنابراین این مدل جدایش جریان را پیش بینی نمی کند بلکه به درستی آن را شبیه سازی می نماید. همچنین در اکثر شبیه سازی های عددی انجام شده بر روی ایرفویل از این مدل استفاده شده است. به عنوان نمونه آقای محمد ساید[17] در تحلیل جریان آرام حول خانواده ایرفویل ریزو⁴ از این مدل آشفتگی استفاده کرد. گسسته سازی معادلات حاکم از دقت مرتبه دوم به بالا است. شرط همگرایی حل رسیدن مقدار باقیمانده ها به کمتر از 10^{-7} است. با توجه به اینکه در بیشتر حالت ها جریان روی سطح جدا شده و ویک⁵ پشت آن نوسانی می شود، جریان در اکثر حالت ها ناپایا فرض شده است.

3-3- ارزیابی صحت نتایج عددی

در روش های شبیه سازی عددی برای کسب اطمینان از درستی نتایج، آن ها را با نتایج بدست آمده آزمایش های تجربی در همان موضوع مقایسه می کنند و در صورت تطابق نتایج روش عددی مورد تأیید واقع می گردد. در کار حاضر به دلیل عدم وجود هیچ گونه آزمایش تجربی مرتبط امکان چنین مقایسه ای 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 0012⁶ و مقایسه نتایج آن با داده های 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 ال سی ال⁷ انجام می شود. در کار حاضر که نتایج آن در شکل های 8 و 9 آورده شده است، پارامتر مهم y^+ در حدود 2 نشان داده شد. مطابق شکل های 8 و 9، تا قبل از مرحله استال⁸ انطباق خوب و قابل قبولی بین نمودارها وجود دارد. اما پس از استال به دلیل جدایش شدید جریان، اختلاف نتایج بیشتر می شود که دلایلی مانند تفاوت در شرایط آزمایشگاهی و نرم افزار، اختلاف در روش حل، مدل های مختلف و نیز سه بعدی بودن کار آزمایشگاهی دارد. برای بررسی استقلال حل از شبکه، سه شبکه بندی با تعداد سلول های مختلف مورد استفاده قرار گرفت. اطلاعات مربوط به تعداد سلول های 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

9- Cartesian
10- Rotating Wall
11- Turbulence

شکل 12 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-بی 1-18³ 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 15 کانتور سرعت در زوایای حمله 0 و 10 و 15 درجه و بدون گردش سطح را نشان می‌دهد. در شکل‌های 14 و 15، جدایش شدید جریان و تشکیل خیابان ورتکس در زوایای حمله 10 و 15 درجه 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 $6/39 \text{ ms}^{-1}$ 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 گردآبه‌ها نیز با افزایش زاویه حمله افزایش می‌یابد. در زاویه حمله 15 درجه بیشینه سرعت برابر با $7/39 \text{ ms}^{-1}$ 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

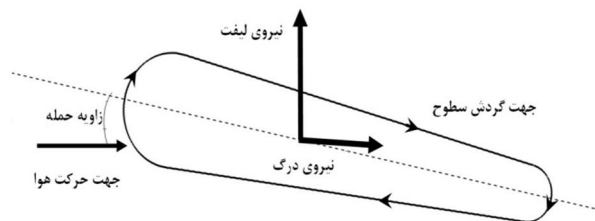
نظر گرفته شد و از انتقال حرارت در جریان صرف‌نظر شد. متغیر Y^+ بر روی بیشتر سطوح کمتر از یک است.

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 تقارن¹ بین دو صفحه ابتدا و انتها استفاده می‌شود.

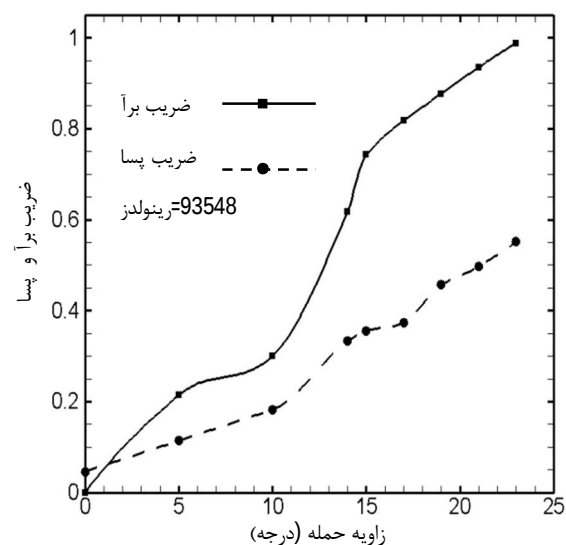
$$C_L = \frac{F_L}{0.5\rho AV_\infty^2} \quad (15)$$

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

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. به دلیل پدیده تشکیل خیابان ورتکس² 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].

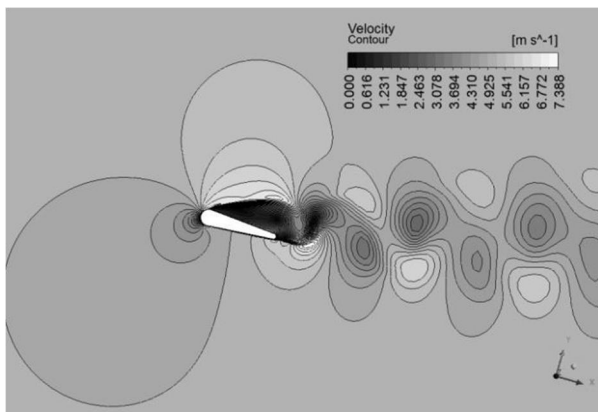


شکل 10 جهت گردش سطوح در شبیه سازی اول

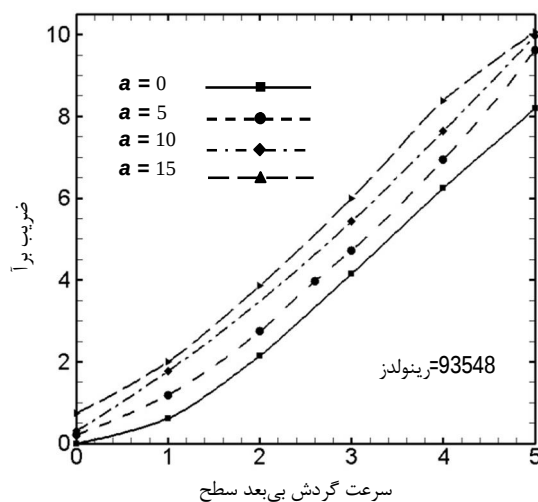


شکل 11 تغییرات ضریب برآ و پسا حول جسم به‌ازای زوایای حمله مختلف

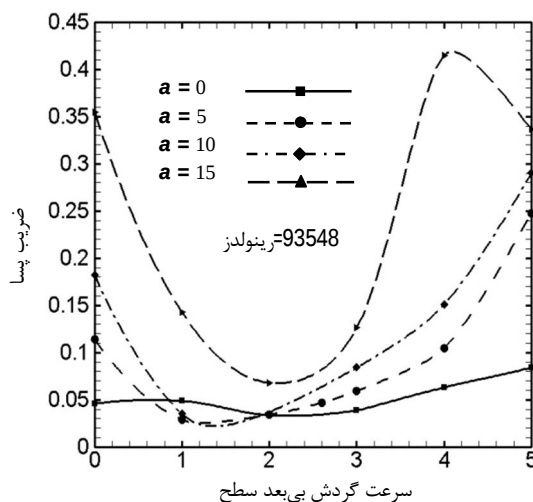
1- Symmetry
2- Vortex shedding



شکل 15 کانتور سرعت جریان حول جسم بدون گردش سطح در زاویه حمله پانزده درجه



شکل 16 تغییرات ضریب برآ بر حسب سرعت بی بعد گردش سطح

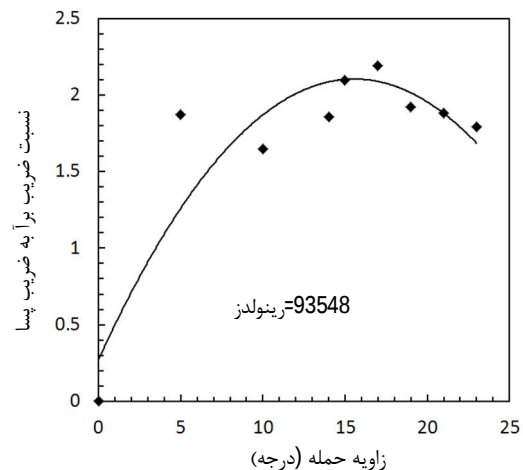


شکل 17 تغییرات ضریب پسا بر حسب سرعت بی بعد گردش سطح

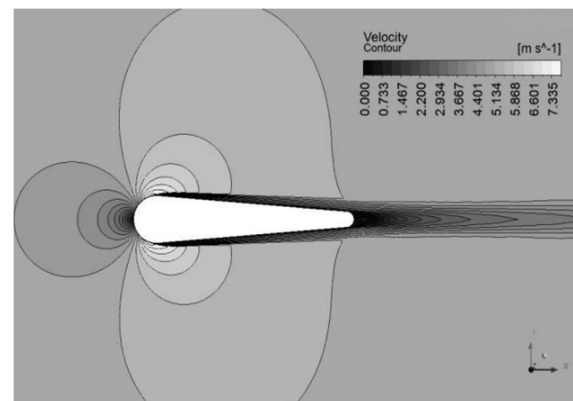
2-4- توان مصرفی جهت گردش سطح هندسه

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

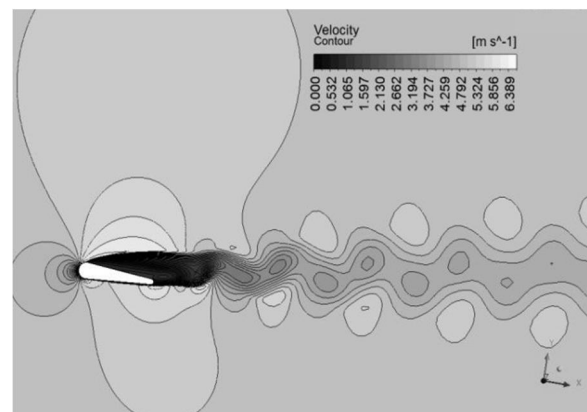
در زاویه حمله 0 و 15 درجه و بدون گردش سطح را نشان می دهد. در شکل 19 و به خصوص شکل 20 جدایش جریان و تشکیل جریان گردابه ای در پشت جسم بسیار چشمگیر است. تأثیر گردش سطوح در از بین بردن جدایش جریان، در شکل های 21 و 22 که خطوط جریان را در زاویه حمله 0 و 15 درجه و سرعت گردش بی بعد 3 نشان می دهد، مشخص است. منظم شدن خطوط جریان و از بین رفتن جریان های گردابه ای در اثر گردش سطح جسم، در شکل های 21 و 22 به وضوح دیده می شود.



شکل 12 تغییرات ضریب برآ به ضریب پسا حول جسم به ازای 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

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 به دست آمده دخیل است که مشخصاً خارج از حوصله یک یا چند مقاله بوده و می بایست 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 به صورت مجزا محاسبه گردید. روابط (18) و (19) توان مصرفی را به ترتیب برای سطوح خطی و قطاع شکل نشان می دهد:

$$(18) \quad \text{توان} = (\tau_{ave} \cdot V_s) A_s$$

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

$$(19) \quad \text{توان} = [(\tau_{ave} \times R_c) \cdot \omega_s] A_s$$

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 می شود. 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 مطابق با رابطه (20) انجام شد:

$$(20) \quad \text{توان مجموع} = \frac{\sum \text{Power}_{\text{Surface}}}{\sum \text{Area}_{\text{Surface}}}$$

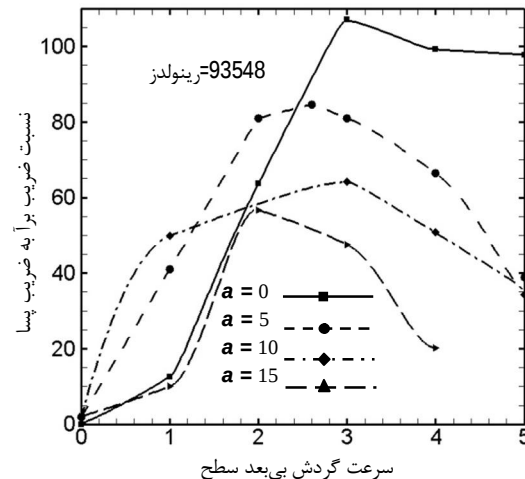
توان به دست آمده مطابق با رابطه (20) بیانگر توان سیالاتی مصرفی برحسب واحد سطح جسم است. سطح خارجی جسم در شکل 23 به صورت هاشور خورده نشان داده شده است. شکل 24 نمودار توان مصرفی بر حسب زاویه حمله و در سرعت های مختلف گردش سطح را نشان می دهد.

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

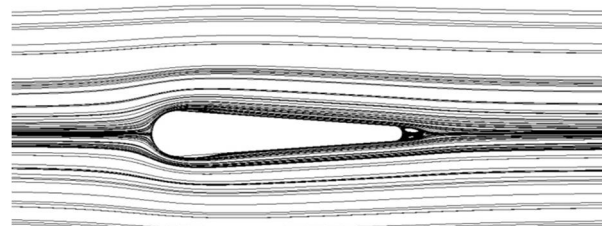
5- نتیجه گیری

در این مقاله، نوع هندسه جدیدی جهت استفاده در مقطع پره توربین بادی مگنوس معرفی شد. مشخصه این هندسه امکان ساخته شدن و آزمایش است و صرفاً یک ایده ذهنی نیست. این هندسه برپایه هندسه تردمیل است با این تفاوت که شعاع دایره ها در ابتدا و انتهای آن تفاوت می کند. همچنین عملکرد آیرودینامیکی این هندسه، به روش شبیه سازی عددی و به صورت 2 بعدی، مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی که هیچ گونه نمونه مشابه تجربی جهت مقایسه داده ها 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 به دست آمده از عملکرد آیرودینامیکی هندسه مورد نظر در نوع خود بسیار قابل توجه است. اهمیت این مطالعه آنجایی است که سرعت جریان بسیار کم است و بهبود ضرایب برآ و پسا کوچک ترین ارتباطی با عدد بالایی سرعت جریان ندارد. این نتایج را می توان در چند دسته تقسیم بندی کرد:

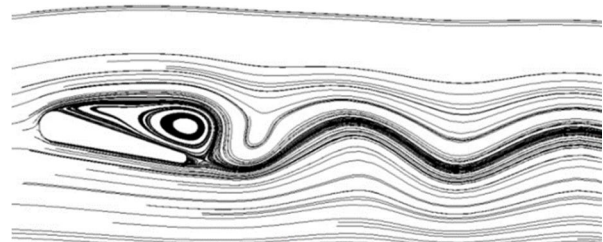
- هندسه تردمیل به تنهایی و به عنوان یک جسم هیچ گونه مشخصه آیرودینامیکی مطلوبی ندارد و همانطور که بیان شد نسبت ضریب برآ به پسای آن در مرتبه یک باقی می ماند.



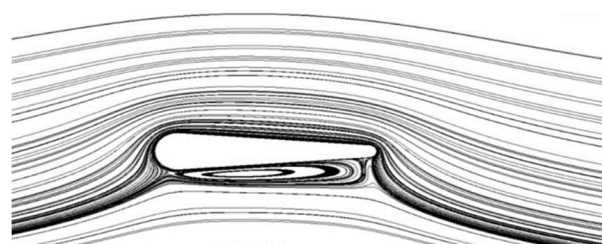
شکل 18. تغییرات نسبت ضریب برآ به ضریب پسا برحسب سرعت بی بعد گردش سطح



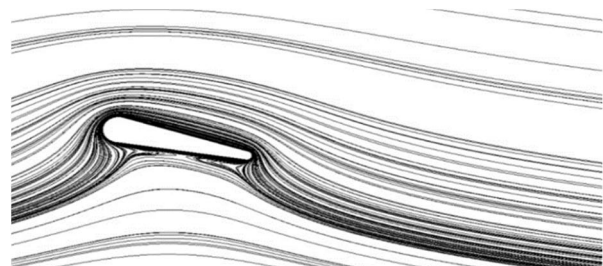
شکل 19. خطوط جریان حول جسم بدون گردش سطح در زاویه حمله صفر درجه



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



شکل 21. خطوط جریان حول جسم با سرعت گردش بی بعد سه در زاویه حمله صفر درجه



شکل 22. خطوط جریان حول جسم با سرعت گردش بی بعد سه در زاویه حمله پانزده درجه

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

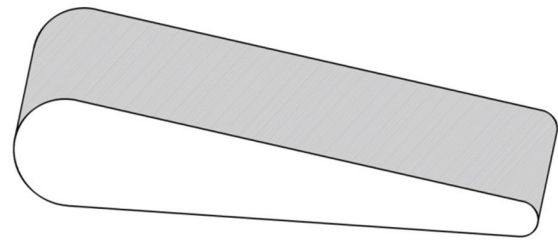
در پایان نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از زحمات و همکاری آقای مهندس امید اطلس چیان تقدیر و تشکر به عمل آورند.

7- فهرست علائم

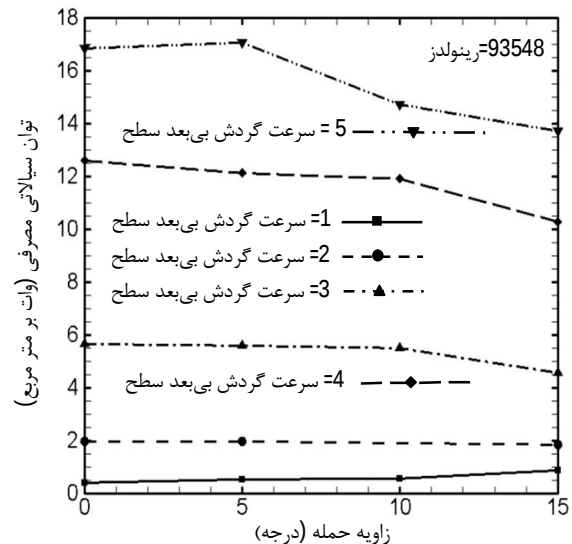
p	فشار (Nm^{-2})
C_p	ضریب توان توربین باد
C_L	ضریب برآ
C_D	ضریب پسا
F_L	نیروی برآ
F_D	نیروی پسا
V_∞	سرعت جریان آزاد هوا (ms^{-1})
V_S	سرعت سطح
U_W	سرعت گردش بی بعد سطح
A_S	مساحت سطح
R_C	شعاع قطاع
علائم یونانی	
φ	پتانسیل سرعت
Γ	سیرکولاسیون
ρ	چگالی (kgm^{-3})
α	زاویه حمله (درجه °)
τ_{ave}	تنش برشی میانگین ($N.m^{-2}$)
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-robin effect at high rotation rates, *Journal of Fluids and Structures*, Vol 17, pp. 941-953, 2003.



شکل 23 سطح خارجی جسم



شکل 24 تغییرات توان مصرفی بر حسب زاویه حمله

- گردش سطح هندسه تردمیل به شدت در عملکرد آیرودینامیکی آن تأثیرگذار است و می‌تواند ضریب برآ را به صورت خطی تا چند برابر (در یک زاویه حمله مشخص) افزایش دهد. همچنین کاهش ضریب پسای جسم با گردش سطح آن و سپس افزایش آن قابل توجه است.
- تأثیر چشمگیر گردش سطح بر نسبت ضریب برآ به پسای جسم مهمترین نتیجه و هدف این مطالعه است. افزایش قابل توجه نسبت ضریب برآ به ضریب پسا در اثر گردش سطح نتیجه قابل توجهی 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 پرهایی با مقطع دایره استفاده شده است که در بهترین شرایط عملکرد نسبت ضریب برآ به پسای 10 را دارند. همچنین سرعت گردش بی بعد پرهایی با مقطع دایره در حدود عدد 5 تا 10 است. این در حالی است که هندسه تردمیل معرفی شده در سرعت گردش بی بعد بین 2 تا 3، نسبت ضریب برآ به پسای بسیار بالاتری (تا

- 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. Vafaei Rostami, *Numerical investigation 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*, 2nd ed. USA : John Wiley & Sons, Ltd; 2009.
- [9] N. Thouault, C. Breitsamter, 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*, Vol 36, 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*