

بررسی عددی عملکرد اثرات میله نصب شده در جلو پره توربین بادی عمود محور با مقطع پره نامتقارن

جواد فرهمند امین^۱ و محمد جواد مغربی^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

^۲ استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۱۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۳۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۴

چکیده

توربین داریوس مبتنی بر نیروی برآ است که به دلیل طراحی ساده و عدم وابستگی به جهت باد مورد توجه محققان قرار گرفته است. در این پژوهش، اثر میله نصب شده جلو لبه حمله پره بر عملکرد آیرودینامیکی توربین مورد بررسی قرار گرفته شده است و پارامترهای مختلفی از جمله ضریب گشتاور و ضریب توان مورد مطالعه عددی قرار می‌گیرد. از نرم افزار آنسیس فلوئنت به منظور شبیه سازی توربین استفاده شده است. علاوه بر این، از روش دینامیک سیالات محاسباتی به صورت دو بعدی و همچنین از مدل آشفتگی $k-\omega$ SST بهره گرفته شده است. با توجه به نتایج، وجود میله با ایجاد تاخیر در جدایش جریان، موجب افزایش گشتاور و توان توربین شده است. این پدیده در پره متقارن، باعث افزایش گشتاور در نسبت سرعت های نوک بالا در محدوده ۲/۵ تا ۳/۵ می‌شود که افزایش ضریب توان را در پی دارد. همچنین وجود میله سبب افزایش ۲۳ درصدی ضریب توان تولیدی در نسبت سرعت نوک پره ۳/۲ در مقایسه با حالت بدون میله شده است و نسبت سرعت بهینه از ۲/۷ به ۳/۲ منتقل می‌شود که به افزایش بازده توربین می‌انجامد. استفاده از میله در جلوی پره های نامتقارن علاوه بر رفع مشکل بازدهی کم توربین عمود محور نوع داریوس، مشکل راه اندازی اولیه توربین را تا حدی رفع می‌نماید.

کلمات کلیدی: توربین بادی داریوس؛ میله؛ جدایش جریان؛ عملکرد توربین.

Numerical Investigation of Installed Rod Effects in Front of an Asymmetric Blade section of Vertical Axis Wind Turbine

J. Farahmand Amin¹, M. J. Maghrebi^{2*}

¹ M.sc. Student, Mech. Eng. Dept, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, I.R. Iran.

² Prof, Mech. Eng. Dept, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, I.R. Iran.

Abstract

The Darrieus wind turbine is a lift-based vertical axis wind turbine which has been considered because of simplicity in design and its independency from wind direction. In this study, the effect of a rod mounted on the blade leading edge on the aerodynamic performance of the turbine has been investigated, and various parameters such as torque coefficient and power coefficient have been studied. Ansys Fluent software is used to simulate the turbine. Furthermore, two-dimensional computational fluid dynamics method and $k-\omega$ SST turbulence model are used. According to the results, the presence of the rod causes a delay in flow separation and increases the output torque and power of the turbine. This phenomenon in symmetrical blades can increase the torque at high tip speed ratios between 2.5 to 3.5, which results in an increase in the power coefficient. Also using this rod, the generating power increases by 23% at the tip speed ratio of 3.2, and the optimum tip speed ratio is shifted from 2.7 to 3.2, which results in an increase in turbine efficiency. Applying rod on asymmetric blades as opposed to symmetric blades not only improves the low power efficiency but also solves the problem of turbine self-starting Darrieus turbine.

Keywords: Vertical Axis Wind Turbine, CFD, Power Coefficient, Self-Starting Torque.

۱- مقدمه

در دهه گذشته، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر^۱ به دلیل تهدیدات گرمایش جهانی، کاهش منابع سوخت فسیلی و قوانین سخت‌گیرانه محیط زیست در بازار انرژی و جامعه جهانی تسریع شده است. در میان تمام انرژی‌های تجدید پذیر، انرژی باد به عنوان یکی از کم هزینه‌ترین منابع انرژی در نظر گرفته می‌شود و رشد سریع در سطح جهانی را تجربه کرده است [۱].

استفاده از انرژی باد پیشینه دراز مدتی داشته و به حدود سده ۲ پیش از میلاد در ایران باستان بازمی‌گردد. برای نخستین بار، ایرانیان موفق شدند با استفاده از نیروی باد، دلو (دولاب) یا چرخ چاه را به گردش درآورده و آب را از چاه‌ها به سطح مزارع برسانند. نخستین ماشینی که با استفاده از نیروی باد به حرکت درآمد، چرخ بادی هرون بود؛ ولی نخستین آسیاب بادی عملی، در سده ۷ میلادی در سیستان ساخته شد. پیدایش آسیاب‌های بادی در اروپا مربوط به سده‌های میانه است. نخستین مورد ثبت شده در مورد استفاده از آسیاب‌های بادی در انگلستان مربوط به سده‌های ۱۱ و ۱۲ میلادی است. نخستین توربین بادی با کاربرد تولید برق، یک ماشین شارژ باتری بود که در ژوئیه ۱۸۸۷ توسط یک مهندس اسکاتلندی به نام جیمز بلایت ساخته شد [۱].

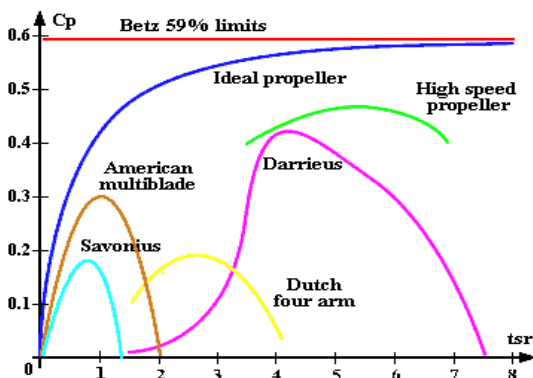
۱-۱- توربین‌های بادی

با توجه به اصول آئرودینامیک، توربین بادی محور عمودی‌های کوچک را می‌توان به توربین‌های مبتنی بر برآ^۲ و مبتنی بر پسا^۳ [۲] طبقه‌بندی نمود. توربین بادی داریوس، یک توربین مبتنی بر برآ بوده که معمولاً شامل تعدادی از ایرفویل‌های منحنی شکل است [۳]. داریوس ماشینی با سرعت بالا و گشتاور پایین است که معمولاً برای شروع کارکرد، به مقداری گشتاور راه‌انداز نیاز دارد. اگرچه این گشتاور مورد نیاز اندک است ولی یکی از معایب این نوع توربین باد محسوب می‌شود. برای استفاده از توربین داریوس، باید یک منبع توان خارجی داشته باشید که گشتاور راه‌انداز را تأمین کند. بهتر است از

توربینی استفاده شود که حداقل سه پره داشته باشد [۴]. با توجه به شکل ۱ توربین‌های داریوس عموماً از ۲ یا ۳ پره مستقیم یا دارای انحنا تشکیل شده اند که برای تولید برق بسیار مناسب تر هستند زیرا سرعت بالا و گشتاور کمتری تولید می‌کنند.

۱-۲- پیشینه پژوهش

تاکنون مطالعات بسیاری به صورت عددی و تجربی بر روی پره و اجزای مؤثر توربین عمودی داریوس برای افزایش ضریب توان خروجی یا نیروی برا و استفاده همزمان از دو نیروی برآ و پسا برای بهبود عملکرد ایرودینامیکی توربین انجام شده است. المان‌های کمکی قطعات کوچکی هستند که بر روی سطح ایرودینامیکی نصب می‌شوند و اشکال هندسی مختلفی از جمله مستطیلی، مثلثی، دایره ای و... دارند. از این قطعات می‌توان در پره‌های توربین بادی به منظور کنترل پدیده ی واماندگی، استفاده کرد و یکی از روش‌های به تأخیر انداختن جدایش جریان و به تبع افزایش عملکرد توربین بادی می‌باشد. با استفاده از این روش، هوای در حال حرکت بر روی سطح، سریع تر به لایه ی مرزی کشیده می‌شود که این امر باعث بازگشت انرژی جریان از طریق تبادل مومنتوم می‌گردد. با افزایش انرژی جنبشی در جهت جریان، نقطه ی واژگونی جریان به تعویق می‌افتد و به تبع واماندگی به تأخیر می‌افتد و می‌توان بر گرادیان‌های فشار معکوس غلبه کرد. المان‌های کمکی با تأخیر زاویه ی واماندگی، پیشینه ضریب برآ را افزایش می‌دهند [۶].



شکل ۱- مقایسه ضریب توان توربین‌های بادی مختلف بر حسب سرعت نوک پره [۵]

^۱ Renewable Energy

^۲ Lift

^۳ Drag

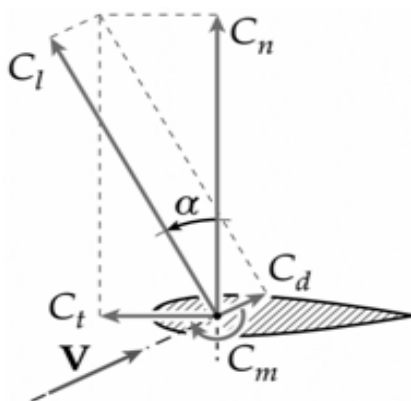
پژوهش نسبت به پژوهش های پیشین استفاده از میله در جلوی لبه ی حمله پره برای بهینه سازی است که منجر به افزایش چشم گیر ضریب توان و افزایش گشتاور اولیه (راه اندازی اولیه) توربین بادی عمود محور شد.

۲- آیرودینامیک ایرفویل توربین بادی داریوس

یکی از مهم ترین مسئله توربین داریوس، گستردگی وسیع زاویه حمله است که پره های توربین آن را تجربه می کنند. افزایش بیش از حد زاویه ی حمله، باعث بروز پدیده ی جدایش جریان که بخاطر واماندگی سبب بروز عملکرد ضعیف توربین می شود. در شکل های ۲ و ۳ نمایی از حالت های مختلف نیروهای وارده بر پره توربین بادی داریوس مشاهده می شود، زاویه محلی α که به دلیل تغییر سرعت نسبی W در هردور در حال تغییر است، سرعت جریان بالادست V_{∞} و سرعت چرخش $R\omega$ تعیین کننده جهت و مقدار سرعت نسبی پره در هر لحظه هستند. این تغییر جهت سرعت نسبی باعث تغییر جهت و اندازه هر لحظه نیروی برآ و پسا بر پره می شود. در نتیجه F_R تغییر می کند، این نیرو به دو مولفه نیروی عمودی F_n و مولفه نیروی مماسی F_t تجزیه می شود. این نیرو مماسی که از چرخش توربین بدست می آید گشتاور لازم جهت تولید برق را تولید می کند [۱۲].

گام اول در طراحی توربین باد انتخاب نسبت سرعت نوک مناسب است که به صورت زیر بیان می شود:

$$TSR = \lambda = \frac{R\omega}{V_{\infty}} \quad (1)$$



شکل ۲- نیروهای وارده بر پره توربین بادی داریوس [۲]

تیمرو ون رویج [۷]، تاثیر مولد گردابه بر روی پره 300-W-97 DU مورد بررسی قرار داد. نتیجه گرفت استفاده از مولد گردابه سبب افزایش ضریب برآ می شود. تاکائو و همکاران [۸]، اثر پره های راهنما بر عملکرد توربین بادی محور عمودی داریوس با پره های مستقیم را بصورت آزمایشگاهی، بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند پره های راهنما به دلیل متغیر بودن زاویه ی ورودی جریان هوا به روتور، تأثیر به سزایی بر عملکرد توربین دارد و باعث افزایش ضریب توان می شود.

پراساد و همکاران [۹]، به مطالعه استفاده از اسلت^۱ روی پره بصورت آزمایشگاهی پرداختند. آنها یافتند هرچه رینولدز^۲ افزایش یابد عملکرد توربین عمودی بهتر می شود و بهترین زاویه اسلت ۲۰ درجه می باشد که منجر به افزایش ضریب توان تا ۴۳ درصد می شود.

سبحانی و همکاران [۱۰]، اثر حفره روی پره بر توربین عمودی داریوس با شبیه سازی عددی دو بعدی با مدل K-W SST را بررسی کردند. آنها به منظور افزایش بهره وری آیرودینامیکی عملکرد توربین و اثرات پارامترهای مختلف از جمله قطر، ضخامت حفره روی پره NACA 0021 با اشکال هندسی دایره، مربع و مثلث را در نظر گرفتند. آنها مشاهده کردند یک بخش با حفره کم، سرعت نوک پره و گشتاور خروجی را افزایش می دهد. فلپ^۳ها وسیله ای بسیار ارزان و ساده ای هستند که باعث افزایش نیروی برآ می شوند و از افت نیروی برآ جلوگیری می کنند و در صنعت هواپیمایی نقش به سزایی دارند. اسماعیل و همکاران [۱۱]، تأثیر اصلاح شکل پروفیل پره در توربین بادی داریوس به کمک ترکیب فلپ عمودی با حفره در نزدیکی لبه فرار را مورد بررسی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند بیشترین افزایش گشتاور تولیدی توربین داریوس با اصلاح شکل پروفیل ۳۵ درصد می باشد.

در این پژوهش سعی شده است توربین عمود محور داریوس با تعداد ۳ پره از انواع پره NACA 0021 و 4421 NACA شبیه سازی شود که بتوان تاثیر عامل تقارن وعدم تقارن بودن پره بر بازده توربین بررسی شود. نوآوری این

¹ Slat

² Reynolds

³ Flap

$$F_t = L \sin \alpha - D \cos \alpha \quad (۸)$$

$$F_n = L \cos \alpha + D \sin \alpha \quad (۹)$$

L نیروی برآ، D نیروی پسا، F_t نیروی مماسی و F_n نیروی عمودی هستند.

از آنجا که نیروهای مماسی و عمودی بیان شده در معادلات (۸) و (۹) به ازای هر زاویه چرخش دلخواه هستند، لذا به صورت تابعی از زاویه θ در نظر گرفته می‌شوند. نیروی مماسی متوسط \bar{F}_t وارد بر یک پره را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$F_{ta} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_t(\theta) d\theta \quad (۱۰)$$

گشتاور وارده بر توربین که با Q نمایش داده می‌شود و بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$Q = NF_{ta}R \quad (۱۱)$$

شعاع روتور R و N تعداد پره‌های توربین است.

P توان خروجی توربین نیز به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$P = Q \times \omega \quad (۱۲)$$

ضریب توان توربین باد که نشانگر میزان کارایی توربین باد است از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C_p = \frac{P}{P_{air}} = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A V_{\infty}^3} \quad (۱۳)$$

که ρ چگالی هوا است و سطح مقطع مفید جریان باد برابر است با $A = d * H$ که d قطر روتور توربین و H ارتفاع توربین است [۱۳].

۳- معادلات حاکم

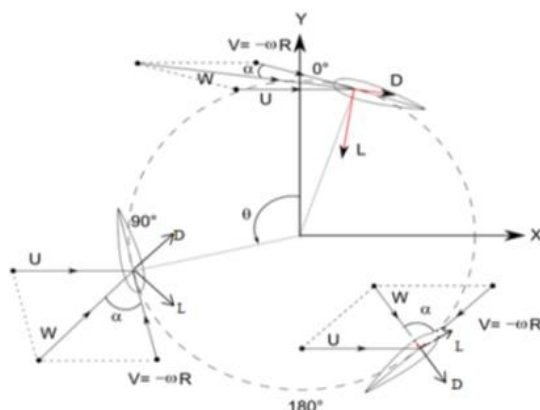
در این پژوهش برای حل عددی از معادلات دوبعدی تراکم ناپذیر لزج ناویر استوکس استفاده شده است. معادلات حاکم استفاده شده عبارت‌اند از معادله پیوستگی و معادله مومنتم [۱۴].

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۱۴)$$

معادله مومنتم:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + f_i \quad (۱۵)$$



شکل ۳- سرعت های وارد بر پره در حال چرخش [۱۲]

R شعاع روتور توربین، ω سرعت چرخش زاویه ای روتور و V_{∞} سرعت جریان آزاد باد است. نسبت سرعت نوک که کمیتی بی بعد است نسبت سرعت چرخش پره به سرعت جریان آزاد باد را نشان می‌دهد.

سرعت وارده بر ایروفیل توربین های بادی داریوس دارای دو مولفه V_c مولفه سرعت وتر و V_n مولفه سرعت عمود بر وتر است [۱۳].

$$V_c = R\omega + V_{\infty} \cos \theta \quad (۲)$$

$$V_n = V_{\infty} \sin \theta \quad (۳)$$

θ زاویه سمت در نظر گرفته شده است که در نتیجه زاویه حمله α به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{V_n}{V_c} \right] \quad (۴)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{V_{\infty} \sin \theta}{R\omega + V_{\infty} \cos \theta} \right] \quad (۵)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{V_{\infty} \sin \theta}{V_{\infty} \left(\frac{R\omega}{V_{\infty}} + \cos \theta \right)} \right] \quad (۶)$$

که با تعریف نسبت سرعت نوک به صورت $TSR = \lambda = \frac{R\omega}{V_{\infty}}$ زاویه حمله به شکل جدیدی درمی‌آید:

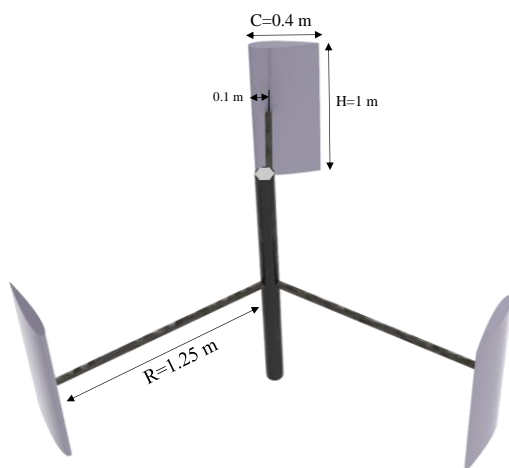
$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{\sin \theta}{\lambda + \cos \theta} \right] \quad (۷)$$

با توجه به زاویه حمله ایرفویل نیروی های برآ و پسا وارد بر ایرفویل قابلیت تجزیه و تبدیل به دو مولفه مماسی و نرمال را دارند، این دو مولفه در هر لحظه بر ایرفویل مماس و عمود هستند، نیروی مماسی گشتاور لازم برای تولید توان در توربین تولید می‌کند که از تفاضل تصویر نیروهای برآ و پسا وارد بر ایرفویل بدست می‌آید:

اعتبارسنجی، نتایج عددی حاصله را با نتایج آزمایشگاهی کاستلی و همکاران [۱۵] مقایسه شد. این توربین همانند شکل ۴ دارای ۳ پره مستقیم شکل با زاویه گام ثابت ساخته شده از پره NACA 0021 و از جنس فایبرگلس می‌باشد که مشخصات توربین مورد بررسی در جدول ۱ نشان داده شده است. کاستلی و همکاران در مطالعات آزمایشگاهی خود باد ورودی را با سرعت ۹ متر بر ثانیه آزمایش کردند و همچنین شرایط اولیه مدل مورد بررسی در جدول ۲ نشان داده شده است.

۵- شرایط مرزی و ناحیه حل

برای حل معادلات در این مطالعه به دلیل لزوم پیش‌بینی دقیق‌تر، برای مدل سازی ناحیه‌ی حل ابتدا باید توربین را در فضای مستطیل شکل که در معرض جریان ثابت باد قرار داده شود، انتخاب مناسب ناحیه حل موثرترین بخش در پیش بینی حل عددی می‌باشد که اگر کوچک انتخاب شود دقیق نمی‌توان انتظار داشت و یا اگر بزرگ انتخاب شود زمان محاسبات خیلی می‌شود [۱۶]. پس با انتخاب ناحیه حل مناسب کمک شایانی به زمان و حجم محاسبات می‌شود و همچنین باید دامنه حل به قدری بزرگ باشد تا از ایجاد انسداد در مرزها جلوگیری شود. بدین منظور ناحیه ی حل مستطیلی با ابعاد 14D×21D انتخاب شده است که بر اساس قطر روتور بیان شده و همچنین جزئیات آن در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۴- شماتیک توربین بادی داریوس [۱۵]

که در این معادلات \bar{u} و \bar{u} میانگین سرعت و سرعت نوسانی می‌باشند. همچنین ρ و ν به ترتیب چگالی هوا و لزجت سینماتیکی می‌باشند. f نمایانگر نیروهای وزنی و p نماینده فشار میانگین است مدل آشفتگی SST $k-\omega$ توسط منتر و به منظور امیختن فرمول بندی دقیق و قدرتمند مدل $k-\omega$ در نواحی نزدیک دیواره با مدل $k-\epsilon$ مستقل از جریان آزاد در نواحی دور از دیواره ارائه شده است [۱۴]. یعنی در واقع این مدل توربولانسی تنش‌های رینولدز را به همان روش $k-\epsilon$ انجام می‌دهد. پژوهشگران بخاطر این که مدل SST $k-\omega$ رفتار بسیار مناسبی در جدایش جریان و گرادیان فشار معکوس از خود بروز می‌دهد را توصیه می‌کنند و معادلات انتقال برای انرژی جنبشی توربولانسی K در این مدل به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۴].

$$\alpha \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla(k) \right] + P_k - \beta^* \rho k \omega \quad (16)$$

که در معادله بالا σ_k و β^* ثابت های معادله هستند و P_k به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$P_k = \left(2\mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \cdot \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \rho \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) k \quad (17)$$

حال می‌توان معادله انتقال فرکانس اشفتگی توربولانسی ω در مدل SST $k-\omega$ را به صورت زیر تعریف کرد:

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i \omega) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega,1}} \right) \nabla(\omega) \right] + \gamma_2 \left(2\rho \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \cdot \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) - \beta_2 \rho \omega^2 + 2 \frac{P_k}{\sigma_{\omega,2} \omega} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_k} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial x_k} \quad (18)$$

در معادله (۱۸) $\sigma_{\omega,1}$ ، $\sigma_{\omega,2}$ ، γ_2 و β_2 ثابت بوده و آخرین ترم معادله دیفیوژن عرضی نام دارد که یک ترم اضافی است و نقش انتقال مدل از ϵ به ω را برعهده دارد.

۴- مشخصات و شرایط اولیه مدل مورد بررسی

یکی از مهم ترین بخش این تحقیق، که بیش از نیمی از زمان شبیه سازی به آن اختصاص داده شده، بخش هندسه و مش است. در این شبیه سازی جریان تراکم ناپذیر است، سطح پره های توربین به صورت صاف و بدون زبری فرض شده است. همچنین تمامی تحلیل‌ها به صورت دوبعدی و چگالی هوا و ویسکوزیته به ترتیب برابر ۱/۲۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب و 1.82×10^{-5} پاسکال ثانیه می‌باشند. برای

جدول ۱- مشخصات توربین بادی پژوهش حاضر

مشخصات توربین	توضیحات
تعداد پره	۳
طول وتر پره	۰/۰۸۵۸ متر
ایرفویل مقطع پره	NACA 0021
سرعت باد	۹ متر بر ثانیه
مساحت	۱/۰۳ متر مربع
قطر توربین	۱/۰۳ متر
ارتفاع پره	۱ متر

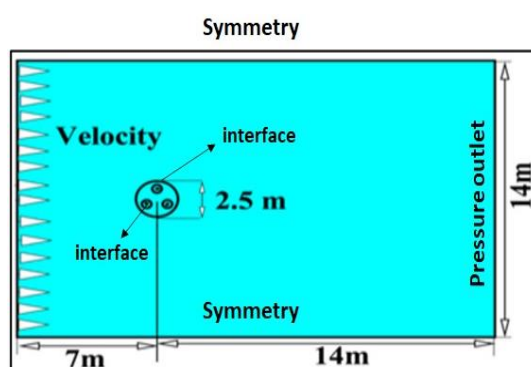
جدول ۲- شرایط اولیه

فشار	صفر
سرعت در راستای X	۹ متر بر ثانیه
سرعت در راستای Y	صفر
انرژی جنبشی اشفتگی ($\frac{m^2}{s^2}$)	0/30375
نرخ اضمحلال مخصوص ($\frac{1}{s}$)	2079/433

ناحیه متحرک داخلی دایروی شامل پره‌ها که توسط ناحیه روتور در بر گرفته شده است. با توجه به شکل ۵ پیداست ناحیه‌هایی به نام ناحیه ی پره در اطراف پره‌ها طراحی شده است و دلیل این کار کنترل کیفیت و تعداد شبکه در اطراف پره‌ها می‌باشد که مهمترین بخش یک توربین همین پره‌ها بوده پس کیفیت شبکه در اطراف پره‌ها نقش بسزایی در دقت حل خواهد گذاشت. با توجه به شکل ۵ دو هندسه مجزا از هم تعریف می‌شود که یکی از آن‌ها نقش ثابت و دیگری نقش متحرک را داراست. لازم به ذکر است که بخش متحرک شامل پره‌ها نیز می‌شود که برای هر یک مرزهایی بصورت جداگانه تعریف می‌شود و سپس شرایط مرزی خاصی برای آن‌ها بیان می‌شود. شروط مرزی سرعت یکنواخت در ورودی که برابر ۹ متر بر ثانیه تنظیم شده است و شرط مرزی در ورودی، سرعت ورودی^۱ در خروجی جریان نیز از فشار خروجی^۲ که برابر فشار اتمسفر در نظر گرفته شده است. همچنین در دو مرز بالا و پایین شرط مرزی متقارن^۳ اعمال شده است و شرط مرزی عدم لغزش برای پره‌های توربین اعمال شده است. در شبیه سازی عددی هنگامی دو ناحیه ی متفاوت دارای فصل مشترک با یکدیگر هستند باید از شرط مرزی مرز میانی^۴ استفاده شود. استفاده از شرط مرزی مرز میانی این اطمینان را می‌دهد که شبکه بندی در دو طرف این مرزی به یکدیگر متصل شده‌اند [۱۷]. پس با توجه به مطالب گفته شده باید میان فصل مشترک ناحیه‌های پره، روتور و غیرچرخان شرط مرزی مرز میانی انتخاب شود. به دلیل متحرک بودن دامنه روتور نسبت به دامنه بیرونی، شبکه حول روتور نسبت به دامنه بیرونی در حال حرکت می‌باشد. بنابراین با اعمال این شرط مرزی، نرم‌افزار این امکان را می‌یابد تا به روش میان یابی، خواص جریان را در مرز بین روتور و دامنه ثابت محاسبه کند.

۶- روش حل

حل معادلات به وسیله نرم افزار تجاری انسیس فلونت صورت گرفته است. شبیه‌سازی انجام شده به این صورت است



شکل ۵- حوزه حل و شرایط مرزی

دامنه محاسباتی را می‌توان به ۳ ناحیه تقسیم کرد:

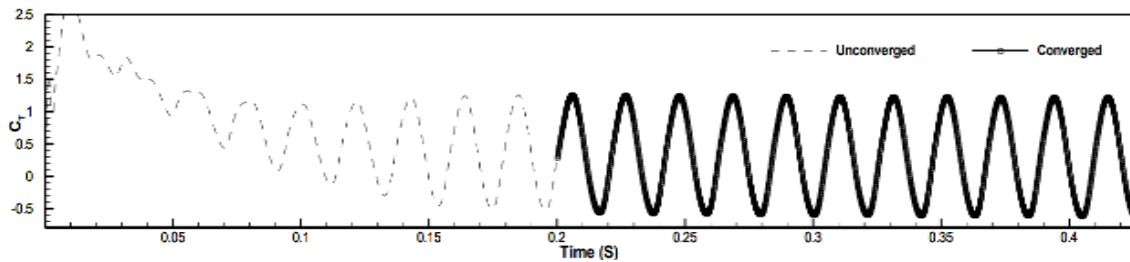
- ۱- ناحیه ثابت مستطیلی شکل که تعیین کننده محدوده کلی دامنه است.
- ۲- یک ناحیه متحرک داخلی دایروی شامل روتور که با همان سرعت زاویه‌ای روتور می‌چرخد.
- ۳- سه

¹ Velocity Inlet

² Pressure Outlet

³ Symmetry

⁴ Interface



شکل ۶- گشتاور خروجی از توربین برای λ برابر با $2/5$

استاندارد برای کولپینگ حوزه فشار و سرعت، روش سیمپل^۴ و روش پیزو^۵ وجود دارد. در دو روش، الگوریتم‌ها از حل یک معادله اضافی برای حوزه فشار استفاده می‌کنند که در این تحقیق از الگوریتم پیزو برای کولپینگ سرعت و فشار در معادلات ناویر - استوکس استفاده شده است. این الگوریتم برای مسائل جریان ناپایا مناسب‌تر بوده و در گام‌های زمانی کوچک، و با هزینه محاسباتی کمتر از الگوریتم سیمپل جواب‌های دقیق به دست می‌دهد.

۷- شبکه بندی حوزه حل

گسسته سازی و شبکه بندی مناسب دامنه محاسباتی و انتخاب مدل آشفتگی مناسب برای پیش بینی درست رفتار جریان دو عاملی است که تاثیر به سزایی بر نتایج شبیه‌سازی دارد. در این مطالعه بدلیل هندسه ی حل پیچیده و متحرک توربین بادی باید شبکه بندی دامنه حل به اندازه کافی دقیق باشد تا با نتایج آزمایشگاهی منطبق باشد [۱۸]. در شبیه‌سازی، ناحیه ی حل به دو بخش ناحیه ی چرخان و ساکن تقسیم شده است که ناحیه ی چرخان دارای شبکه ی متحرک و از نوع لغزشی و ناحیه ی ساکن دارای شبکه ی ثابت است. روش شبکه متحرک مزیتی که دارد ناحیه ی دوار که شامل پره های روتور و شبکه در برگیرنده آن می باشد با همان سرعت دورانی روتور می چرخد. شبکه دینامیک حول روتور و پره ها بر طبق نسبت سرعت نوک می چرخد در حالی که شبکه دامنه خارجی ثابت می‌چرخد. برای پیش بینی دقیق تر خواص جریان و محاسبه گرادیان ها ریزترین شبکه غیر ساختار یافته در میان تمام ناحیه ها، در دامنه پره ها

که ناحیه چرخان بر اساس شرایط کاری نسبت سرعت نوک با یک سرعت زاویه ای مشخص می چرخد. شبیه سازی تا زمانی ادامه پیدا می کند تا رفتار جریان به صورت پایا^۱ دربیاید. برای درک بهتر شکل ۶ بیانگر این حالت است که ملاحظه می گردد که به دلیل خاصیت تناوبی جریان گشتاور به دست آمده از چرخش دوره‌های ۵ و ۶ شبیه به همدیگر می باشند. در همه حالت در نظر گرفته شده رفتار جریان بعد از چرخش ۵ ام به صورت پایا^۲ در می‌آید. بنابراین مشخصه های ارائه شده در این مطالعه برای چرخش ششم توربین می‌باشد. زاویه چرخش θ همان زاویه ایجاد شده توسط بازوی متصل پره اول با محور چرخش توربین در جهت پادساعتگرد می باشد. موقعیت اولیه پره ۱ در زاویه صفر درجه قرار دارد و یک دور کامل چرخش پره اول از زاویه ۰ تا ۳۶۰ درجه می‌باشد.

با توجه به رفتار چگالی گازها و از آنجا که جریان حول پره‌های روتور دارای عدد ماخ پایین می‌باشد، بنابراین می‌توان از اثرات تراکم‌پذیری جریان صرف‌نظر نمود. در چنین شرایطی از آنجا که فشار با چگالی مرتبط نیست، بهترین و مناسب‌ترین گزینه برای شبیه‌سازی روش مبتنی بر فشار^۳ می‌باشد. در این حالت (به دلیل غیرخطی بودن معادله ناویر استوکس و نبود یک معادله مستقل برای فشار)، از ترکیب معادلات پیوستگی و مومنتوم برای بدست آوردن معادله‌ای برای حل مستقیم حوزه فشار استفاده می‌گردد. روش مبتنی بر فشار نسبت به روش مبتنی بر چگالی پایدارتر بوده و حل زودتر به همگرایی می‌رسد [۱۸]. در این حالت دو الگوریتم

^۱ Stationary State

^۲ Stationary State

^۳ Interface

^۴ Semi-Implicit Method for Pressure

^۵ Pressure Implicit Method With Splitting of Operators (PISO)

پره، د) اطراف پره، ه) اطراف لبه فرار و) اطراف لبه حمله آورده شده است.

۸- بررسی استقلال حل عددی از شبکه بندی

به منظور بررسی استقلال از شبکه سه شبکه بندی مختلف که جزئیات آن در جدول ۳ نمایش داده شده است بررسی گردیده است.

جدول ۳- جزئیات شبکه بندی

تعداد گره های روی پره	تعداد کل سلول ها در کل ناحیه	کیفیت شبکه بندی
۲۴۰	۱۹۰۰۰۰	شبکه درشت
۴۸۰	۴۹۵۰۰۰	شبکه متوسط
۹۶۰	۸۷۴۰۰۰	شبکه ریز

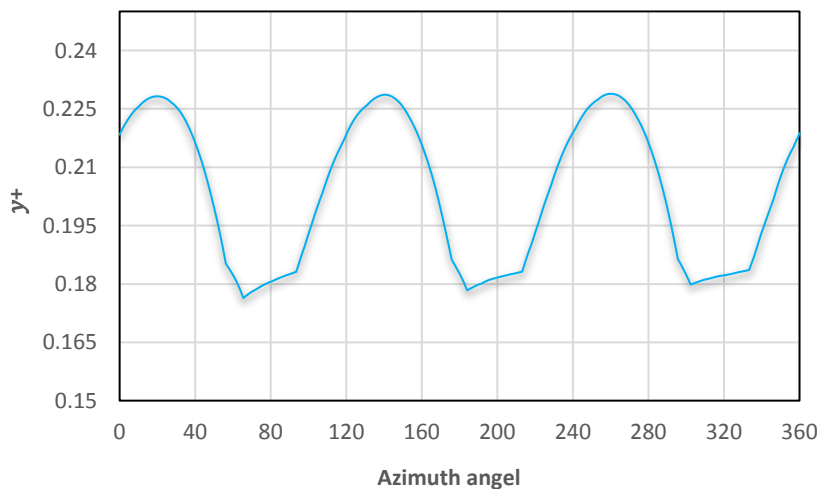
برای اینکه شبکه ما تاثیری بر دامنه حل نداشته باشد؛ ضریب گشتاور یک پره در سرعت نوک پره، ۲/۵ در شکل ۹ برای سه نوع شبکه بررسی شده است. با توجه به شکل ۹ اختلاف ضریب گشتاور بین دو شبکه ریز و متوسط کم می-باشد ولی در حالت شبکه درشت و متوسط اختلاف ضریب گشتاور بزرگ می باشد و برای اینکه که زمان محاسبات کم شود و دقت محاسبات افزایش یابد از شبکه متوسط استفاده شده است.

انتخاب می شود. در ناحیه ی چرخان به دلیل تاثیر چرخش توربین و پره های آن بر جریان و وجود گرادیان های شدید سرعت و فشار، لایه مرزی، جدایش جریان و ایجاد گردابه در نزدیکی پره ها، شبکه بندی با دقت بیشتر انتخاب شده است. نزدیک سطح پره و لایه مرزی یعنی زیر لایه مرزی، طول بی بعد Y^+ یک معیار مناسب برای درست بودن شبکه دامنه محاسباتی است (در شکل ۷ نمودار تغییرات Y^+ در امتداد سطوح پره آورده شده است). با توجه به انتخاب مدل توربولانسی $K-\epsilon$ SST باید ارتفاع لایه اول شبکه بر روی پره را طوری انتخاب شود که $Y^+ < 1$ باشد. Y^+ یک عدد بی بعد است [۱۹].

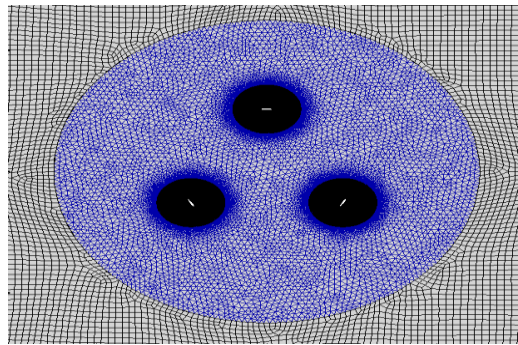
$$Y^+ = \frac{u^* y}{\nu} \quad (19)$$

$$u^* = \sqrt{\tau_w / \rho} \quad (20)$$

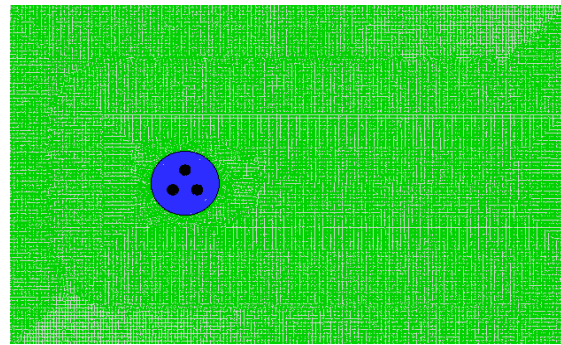
در معادله (۱۹)، y ارتفاع اولین سلول از سطح پره می باشد. u^* سرعت اصطکاکی و ترم مخرج، لزجت سینماتیکی می باشد. سرعت اصطکاکی بصورت رابطه (۲۰) تعریف می-شود. در این معادله τ_w تنش برشی دیواره و ρ چگالی سیال می باشد. برای پوشش بهتر ناحیه ی چرخان و اطراف لایه مرزی، شبکه های کوچکی مثلثی انتخاب شده است. در ناحیه ی ساکن به دلیل کاهش تاثیر گرادیان های سرعت و فشار، شبکه ها درشت تر و از نوع مربعی انتخاب شده است. در شکل ۸ نحوه شبکه بندی ناحیه های ساکن و چرخان دامنه حل برای الف) کل ناحیه، ب) اطراف توربین، ج) اطراف ناحیه



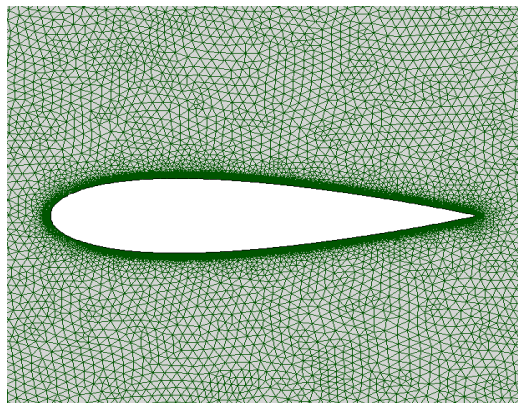
شکل ۷- نمودار تغییرات Y^+ در امتداد سطوح پره



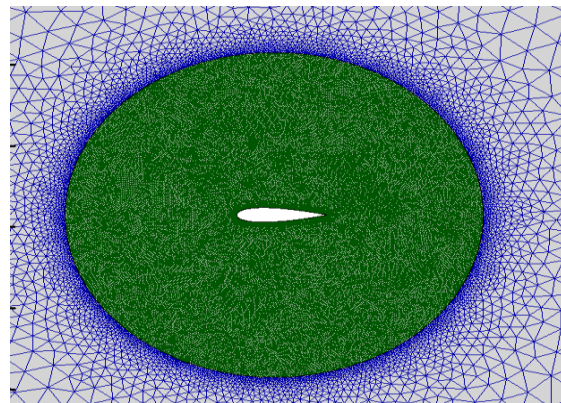
(ب)



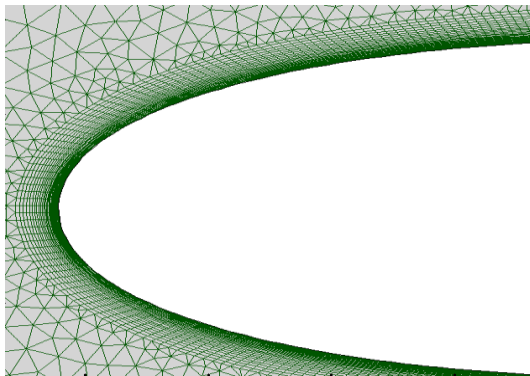
(الف)



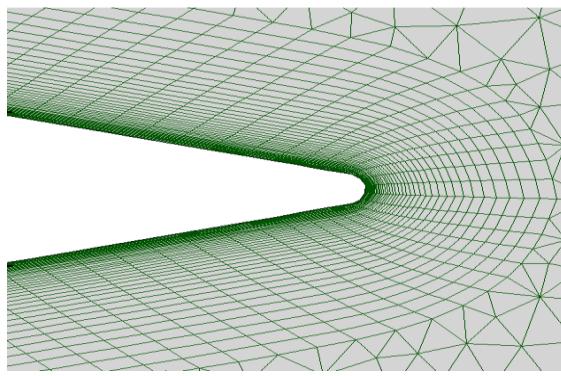
(د)



(ج)



(و)



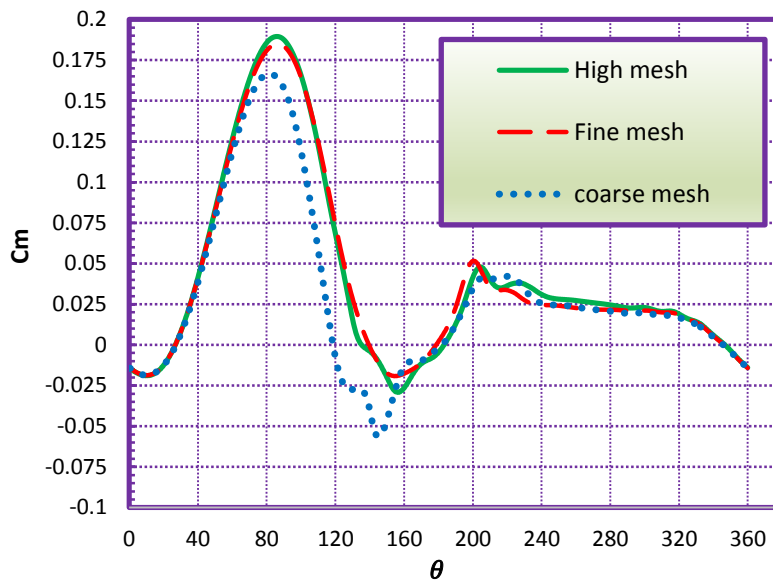
(هـ)

شکل ۸- نحوه ی شبکه بندی ناحیه های ساکن و چرخان اطراف ایرفویل دامنه پره

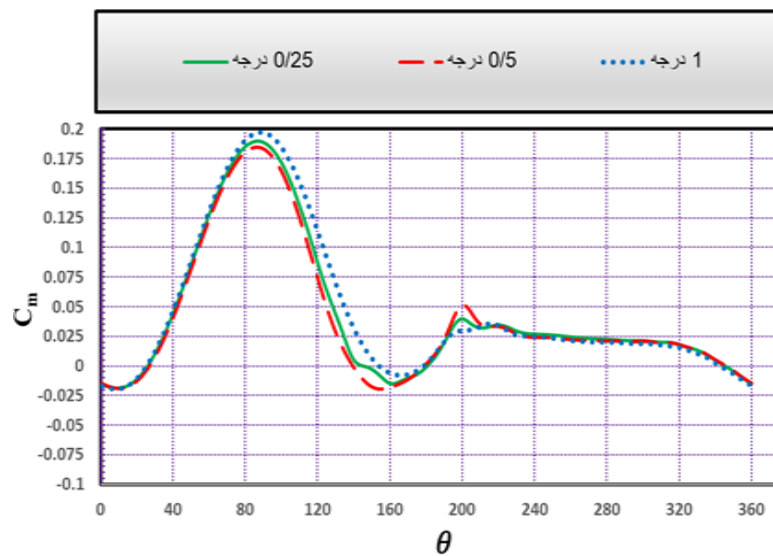
۹- بررسی استقلال گام زمانی

بازه زمانی نقش بسزایی در حل و استخراج نتایج صحیح دارد. از این رو با انتخاب مناسب گام زمانی می توان در زمان صرفه جویی انجام گیرد. برای بررسی استقلال گام زمانی سه گام زمانی مختلف تعریف شده اند که در هر یک مقدار زمانی که طول می کشد تا توربین ۱ یا ۰/۵ یا ۰/۲۵ درجه می چرخد.

برای استقلال از گام زمانی نمودار ضریب گشتاور یک پره بر حسب زاویه ی چرخش پره در سرعت نوک پره ۲/۵ در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. در شکل ۱۰ مشاهده می شود اختلاف ضریب گشتاور نمودار ۰/۵ درجه به ۰/۲۵ درجه در مقابل اختلاف نمودار ۱ درجه به ۰/۵ درجه کمتر است. پس با توجه به این نکته گام زمانی انتخاب می شود که مقدار زمان لازم برای چرخش در هر گام زمانی برابر ۰/۵ درجه باشد.



شکل ۹- نمودار استقلال از شبکه

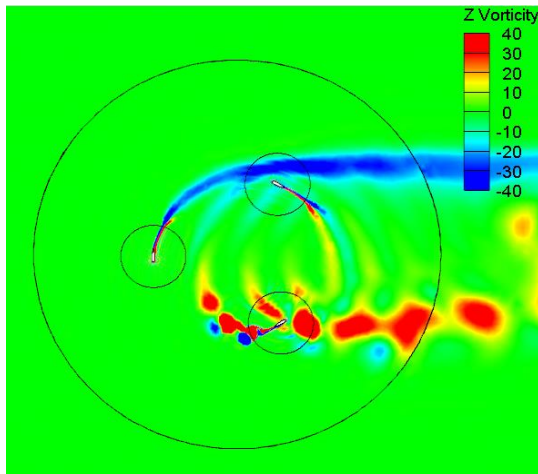


شکل ۱۰- استقلال از گام زمانی

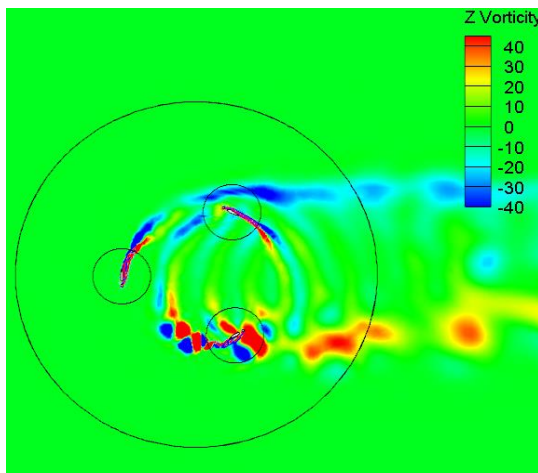
های دیگر برای پیش بینی عملکرد توربین های محور عمودی دارد انتخاب شده است [۱۸]. با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می شود حل عددی در محدوده سرعت های نوک پایین ۱/۵ تا ۲ تطابق نسبتاً خوبی با نتایج تجربی داشته است و بعد از آن نمودار حل عددی در بالای نمودار نتایج تجربی افتاده است. کمترین خطا مطلق ضریب توان حل عددی و آزمایشگاهی تقریباً ۰،۰/۰۰۱، در نسبت سرعت ۲ می باشد و بیشترین خطا

۱۰- اعتبارسنجی

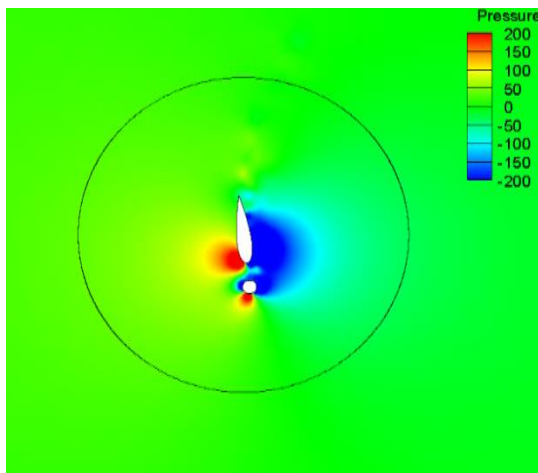
در این مطالعه در حالت دو بعدی توربین بادی محور عمودی که شامل سه پره با اختلاف فاز 120° است، مورد بررسی قرار گرفت. جهت اعتبارسنجی از پژوهش های تجربی کستلی [۱۵] استفاده شده است (که در شکل ۱۱ نشان داده شده است). برای شبیه سازی از مدل توربولانسی k-w sst استفاده شده است. این امر به دلیل دقت بالایی که نسبت به مدل



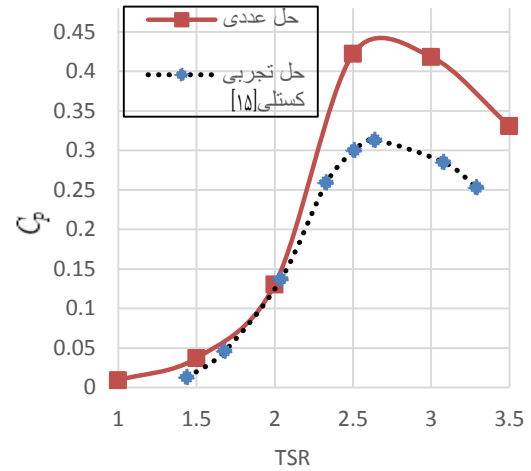
شکل ۱۲- میدان گردابه در سرعت نوک ۲/۵ (بدون میله)



شکل ۱۳- میدان گردابه در سرعت نوک ۲/۵ (با میله)



شکل ۱۴- میدان فشار در سرعت نوک ۲/۵ (بدون میله)

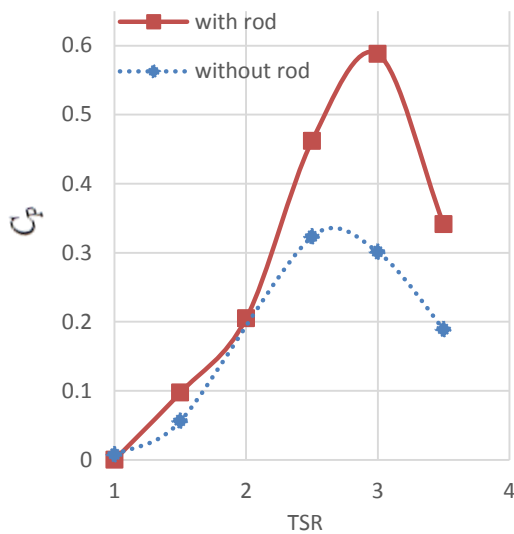


شکل ۱۱- نمودار اعتبارسنجی ضریب توان بر حسب نسبت سرعت نوک پره

مطلق ضریب توان حل عددی و آزمایشگاهی تقریباً ۰/۱۳، در نسبت سرعت نوک ۲/۷ می باشد. دلیل این اختلاف را می توان شبیه سازی دو بعدی دانست که نمی تواند دستگیرهای نگهدارنده پره ها و سطح دیگر پره را شبیه سازی کرد.

۱۱- نتایج

در شکل های ۱۲ و ۱۳ میدان فشار حول یک پره در زاویه ۹۰ درجه از چرخش روتور در سرعت نوک ۲/۵ در مقایسه با حالت پایه نشان داده شده است. با توجه به توزیع میدان فشار پره میله دار، طراحی میله جلوی پره منجر به اختلاف فشار بیشتر بین سطوح بالا و پایین در مقایسه با حالت پایه در این زاویه لبه فرار پره می شود که باعث افزایش نیروی محرک برای توربین می شود. همچنین در این شکل مشاهده می شود که میله طراحی شده با جلوگیری از بازگشت خطوط جریان به سطح پره، باعث بهبود عملکرد توربین در مقایسه با حالت پایه می شود. استفاده از میله جلوی پره با کوچک کردن گردابه های جدا شده از لبه فرار، عملکرد توربین داریوس را بهبود می بخشد. که بدین صورت انرژی باد با برخورد به پره های توربین که در بالادست قرار گرفته اند مقداری از انرژی خود را از دست می دهند در نتیجه مقدار گشتاور تولیدی پره ها در بالادست مقدار بیشتری نسبت به گشتاور تولیدی در پایین دست می باشد. بدیهی است که تولید گردابه کوچکتر در بالادست،



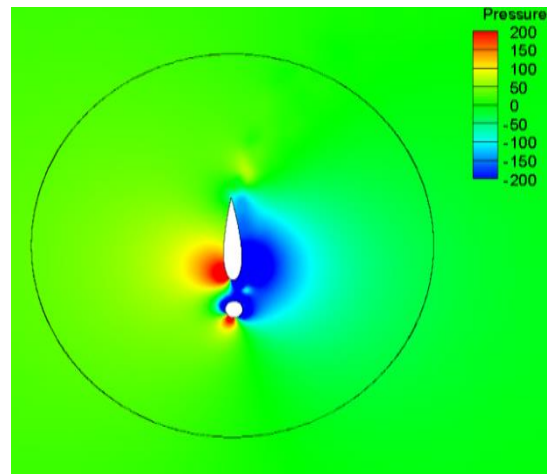
شکل ۱۶- مقایسه نمودار میانگین ضریب توان پره ناکا ۴۴۲۱ بر حسب نسبت سرعت نوک پره

جدول ۴- ضریب توان هندسه های مختلف مورد بررسی برای پره NACA 0021 و NACA 4421

NACA4421	NACA0021	نسبت سرعت نوک پره
$C_p = -0/005$	$C_p = -0/001$	$\lambda = 1$
$C_p = 0/097$	$C_p = 0/039$	$\lambda = 1/5$
$C_p = 0/204$	$C_p = 0/078$	$\lambda = 2$
$C_p = 0/461$	$C_p = 0/408$	$\lambda = 2/5$
$C_p = 0/588$	$C_p = 0/566$	$\lambda = 3$
$C_p = 0/341$	$C_p = 0/554$	$\lambda = 3/5$
$C_p = 0/29$	$C_p = 0/25$	میانگین ضریب توان

۱۲- نتیجه گیری و جمع بندی

یکی از گزینه های انرژی های تجدید پذیر در میان محققان، انرژی بادی است که برای استخراج انرژی آن از توربین استفاده می شود. یکی از ویژگی های مهم توربین های عمود محور، عملکرد این توربین با سرعت بالا و گشتاور پایین می باشد و همین ویژگی باعث شده این نوع از توربین ها برای تولید جریان الکتریسیته متناوب مناسب باشند ولی به لحاظ



شکل ۱۵- میدان فشار در سرعت نوک ۲/۵ (با میله)

اثرات منفی کمتری بر پره های پایین دست توربین دارد و از آنجایی که ارتعاشات و تنش های وارده بر مجموعه یاتاقان ها و محور دوران روتور با استفاده از میله کاهش پیدا می کند و جریان حول توربین پایدارتر می شود [۲۰].

در شکل ۱۶ نمودار میانگین ضریب توان بر حسب نسبت سرعت نوک پره، برای توربین داریوس با پره NACA 4421 برای حالت میله در جلوی پره و حالت پره بدون میله مقایسه شده است. با توجه به شکل ۱۶ با طراحی میله جلوی پره نامتقارن در نسبت سرعت های نوک ۱ تا ۲ افزایش ضریب توان داریم که این مسئله نمایانگر برطرف کردن مشکل اساسی توربین عمودی داریوس در راه اندازی اولیه می باشد و همچنین در ضریب توان دیده می شود که این امر افزایش بازده توربین و بهبود عملکرد توربین می شود و در ادامه از سرعت ۲/۹ تا ۳/۵ روندی کاهشی دارد ولی همچنان از حالت پایه ضریب توان بیشتر می باشد.

در جدول ۴ مقایسه توان تولیدی توربین با پره NACA 0021 و NACA 4421 قابل مشاهده است. توجه به جدول ۳ استفاده از پره نامتقارن NACA 4421 بجای پره متقارن NACA 0021 باعث افزایش میانگین ضریب توان نسبت به پره متقارن NACA 0021 شده است. در واقع دو مشکل اساسی توربین داریوس که در راه اندازی اولیه و بازده کم آن را می توان با استفاده از پره نامتقارن NACA 4421 که جلوی آن میله نصب شده است تا نسبتی مرتفع کرد.

لزجت دینامیکی (Pa.s)	μ	راه اندازی اولیه و بازده دچار ضعف هستند که در این پژوهش
لزجت آشفتگی (Pa.s)	μ_t	به بررسی عددی عملکرد اثرات میله نصب شده در جلو پره
زاویه چرخش (Deg)	θ	توربین بادی عمود محورها پره نا متقارن و متقارن با هدف
سرعت نوک پره	λ	بهبود راه اندازی اولیه و بازده پرداخته شده است. در این
سرعت زاویه‌ای (rad/s)	ω	پژوهش توربین بادی از نوع داریوس سه پره در جلوی پره آن
زاویه چرخش (Deg)	θ	میله قرار داده شد و در شرایط مختلف مورد بررسی قرار
زاویه حمله (Deg)	α	گرفت و در تمامی شبیه‌سازی‌ها از نرم‌افزار انسیس فلونت و
چگالی (kg/m^3)	ρ	از روش دینامیک سیالات محاسباتی به صورت دو بعدی و از
سرعت نسبی وارد بر پره (m/s)	w	مدل آشفتگی SST k- ω استفاده شده است. در این پژوهش

۱۴- مراجع

- [1] Ashrafi ZN, Ghaderi M, Sedaghat A (2015) Parametric study on off-design aerodynamic performance of a horizontal axis wind turbine blade and proposed pitch control. *Energy Convers* 93: 349-356.
- [2] Zamani M, Maghrebi MJ, Varedi SR (2016) Starting torque improvement using J-shaped straight-bladed Darrieus vertical axis wind turbine by means of numerical simulation. *Renew Energy* 95: 109-126.
- [3] Marie DGJ (1931) Turbine having its rotating shaft transverse to the flow of the current. edn: Google Patents.
- [4] Hashem I, Mohamed M (2018) Aerodynamic performance enhancements of H-rotor Darrieus wind turbine. *Energy* 142: 531-545.
- [5] Zamani M, Maghrebi MJ, Moshizi SA (2016) Numerical study of airfoil thickness effects on the performance of J-shaped straight blade vertical axis wind turbine. *Wind Struct Int J* 22(5): 595-616.
- [6] Chen CC, Kuo CH (2013) Effects of pitch angle and blade camber on flow characteristics and performance of small-size Darrieus VAWT. *J Vis* 16(1): 65-74.
- [7] Timmer W, Van Rooij R (2003) Summary of the Delft University wind turbine dedicated airfoils. *J Sol Energy Eng* 125(4): 488-496.
- [8] Takao M, Kuma H, Maeda T, Kamada Y, Oki M, Minoda A (2009) A straight-bladed vertical axis wind turbine with a directed guide vane row—Effect of guide vane geometry on the performance—. *J Therm Sci* 18(1): 54-57.

توربین بادی عمود محورها پره نا متقارن و متقارن با هدف بهبود راه اندازی اولیه و بازده پرداخته شده است. در این پژوهش توربین بادی از نوع داریوس سه پره در جلوی پره آن میله قرار داده شد و در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفت و در تمامی شبیه‌سازی‌ها از نرم‌افزار انسیس فلونت و از روش دینامیک سیالات محاسباتی به صورت دو بعدی و از مدل آشفتگی SST k- ω استفاده شده است. در این پژوهش طراحی میله نصب شده در جلوی پره، با به تأخیر انداختن در جدایش جریان، سبب افزایش ۲۳ درصدی ضریب توان تولیدی در نسبت سرعت نوک پره ۳/۲ در مقایسه با حالت بدون میله شده است و نسبت سرعت نوک بهینه را از ۲/۷ به ۳/۲ منتقل می‌کند. توربین محور عمود با پره های متقارن در سرعت‌های نوک پایین افزایش ضریب توان ندارد به این دلیل که جدایش جریان حول پره و واماندگی، در توربین داریم و همچنین با بررسی تاثیر استفاده از پره متقارن و غیر متقارن بر عملکرد توربین، پره هایی از نوع متقارن NACA 4421 و NACA 0021 این نتیجه حاصل شد که استفاده از پره نامتقارن علاوه بر رفع مشکل راه اندازی اولیه بازده توربین را بهبود می بخشد ولی استفاده از پره متقارن فقط مشکل بازده را رفع می کند و مشکل راه اندازی اولیه توربین، به قوت خود باقی می ماند.

۱۳- علائم و نشانه‌ها

مساحت جاروب شده (m^2)	A
ضریب پسا	C_d
ضریب برآ	C_l
نیروی عمودی (N)	F_n
نیروی مماسی (N)	F_t
توان (W)	P
شعاع توربین (m)	R
گشتاور (N.m)	T
سرعت ورودی (m/s)	V_∞

- [15] Castelli MR, Englaro A, Benini E (2011) The Darrieus wind turbine: Proposal for a new performance prediction model based on CFD. *Energy* 36(8): 4919-4934.
- [16] Blazek J (2015) *Computational fluid dynamics: Principles and applications*. Butterworth-Heinemann.
- [17] Nobile R, Vahdati M, Barlow J, Mewburn-Crook A (2011) Dynamic stall for a vertical axis wind turbine in a two-dimensional study. *Renew Energ* 4225-4232.
- [18] Sagharichi A, Maghrebi MJ, ArabGolarcheh A (2016) Variable pitch blades: An approach for improving performance of Darrieus wind turbine. *J Renew Sustain Energy* 8(5): 053305.
- [19] Srinivasan G, Ekaterinaris J, McCroskey W (1995) Evaluation of turbulence models for unsteady flows of an oscillating airfoil. *Comput Fluids* 24(7): 833-861.
- [20] Islam M, Ting DSK, Fartaj A (2008) Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. *Renew Sust Energ* 12(4): 1087-1109.
- [9] Chougule PD, Rosendahl L, Nielsen SR (2015) Experimental study of the effect of a slat angle on double-element airfoil and application in vertical axis wind turbine. *Sh Offshore Struct* 10(2): 176-182.
- [10] Sobhani E, Ghaffari M, Maghrebi MJ (2017) Numerical investigation of dimple effects on darrieus vertical axis wind turbine. *Energy* 133: 231-241.
- [11] Ismail MF, Vijayaraghavan K (2015) The effects of aerofoil profile modification on a vertical axis wind turbine performance. *Energy* 80: 20-31.
- [12] Zhang L, Zhang S, Wang K, Liu X, Liang Y (2011) Study on synchronous variable-pitch vertical axis wind turbine. In 2011 APPEEC 1-5.
- [13] He Y, Agarwal RK (2014) Shape optimization of NREL S809 airfoil for wind turbine blades using a multiobjective genetic algorithm. *Int J Aerosp* 2014.
- [14] Amet E, Maître T, Pellone C, Achard JL (2009) 2D numerical simulations of blade-vortex interaction in a Darrieus turbine. *J Fluids Eng* 131(11).