

مطالعه عددی اثر ترکیب توربین های محور عمودی داریوس - ساوونیوس و تاثیر آن بر گشتاور تولیدی آن

سید محمد جوادی^۱، محمد جلیلی مهر^۲

m_jalilimehr@yahoo.com

۱- استادیار، دانشگاه مهندسی فناوری های نوین قوچان

۲- دانشجوی دکترا، مهندسی انرژی و فناوری های نوین تاسیسات، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی

چکیده

هرچند که توربین داریوس نسبت به بقیه توربین های محور عمودی دارای بازده بالاتری است. اما گشتاور پایین این توربین ها در هنگام شروع به حرکت باعث می شود که این توربین ها شروع به حرکت خودکار نداشته باشند. در این مقاله به بررسی عددی و شبیه سازی دو بعدی یک توربین محور عمودی داریوس از نوع H روتور با شعاع 51.5 cm و با سه پره ایرفویلی شکل با مقطع NACA0021 در نرم افزار فلونت پراخته شده است. از آنجا که توربین های از نوع ساوونیوس دارای گشتاور اولیه بالایی هستند در این تحقیق برای رفع مشکل راه اندازی، یک توربین ترکیبی داریوس-ساوونیوس طراحی شده است که در آن توربین ساوونیوس به صورت هم محور با توربین داریوس به آن متصل شده است. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که استفاده از یک توربین ساوونیوس با قطر D=24 cm بدون همپوشانی پره ها، در سرعت های زاویه ای زیر 25rad/s باعث افزایش ۵۰ درصدی گشتاور اولیه توربین ترکیبی نسبت به توربین داریوس شده است. در سرعت های زاویه ای بالاتر، حذف توربین ساوونیوس سبب افزایش راندمان توربین خواهد شد.

واژگان کلیدی: توربین داریوس - توربین ساوونیوس - گشتاور - نسبت سرعت نوک پره.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۱۱/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۰۸/۱۲

۱- مقدمه

کنترل قدرت در توربین‌های با محور قائم با تیغه‌های مستقیم و در توربین‌های با محور افقی می‌تواند تابع زاویه گام متغیرها باشد. مثال برجسته برای توربین‌های محور عمودی، توربین داریوس می‌باشد که از سه یا چهار پره نازک با مقطع ایرفویلی شکل که به انتهای شعاع بازوهای روتور وصل شده است.

توربین بادی محور عمودی داریوس، یک توربین بادی با سرعت بالا و گشتاور پایین است که مناسب برای تولید جریان برق متناوب به حساب می‌آید. نمونه‌های مختلفی از این توربین در آزمایشگاه توسط تاکاماتسو^۱ [۱] و تاکنوچی^۲ [۲] مورد بررسی قرار گرفت. دائی^۳ [۳] به وسیله تحلیل دو بعدی CFD موفق به پیشگویی کارایی توربین داریوس شد. پونتا^۴ [۴] یک دستگاه کانالی برای یک توربین داریوس معرفی کرد تا جریان ورودی اطراف روتور را افزایش دهد و خروجی توربین را در یک اندازه خاص تقویت کند. شیونو [۵] نشان داد تیغه‌های حلزونی دارای نوسانات کمتر و ویژگی‌های بهتری نسبت به تیغه‌های مستقیم است. جان دیکاست^۵ و همکارانش [۶] یک توربین داریوس در ابعاد واقعی طراحی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از تکنیک پره‌های متحرک و به کارگیری یک ایرفویل با قابلیت ضریب برآ بالا در اعداد رینولدز پایین باعث دستیابی به شرایط خود راه اندازی توربین خواهد شد. گوپتا و شارما^۷ [۷] برای مقایسه دو توربین ساوونیوس و داریوس-ساوونیوس اقدام به ساخت این دو توربین در ابعاد آزمایشگاهی کردند.

نتایج آزمایشگاهی در تونل باد نشان داد که ضریب توان در توربین ساوونیوس با افزایش همپوشانی پره‌های توربین^۷ بیشتر می‌شود. همچنین ضریب توان در توربین ترکیبی داریوس-ساوونیوس نسبت به توربین ساوونیوس افزایش چشمگیری نشان داد. دومینی^۸ و همکارانش [۸] نشان دادند که تحت شرایط یکنواخت و اعداد رینولدز پایین، یک توربین داریوس دو پره ای دچار مشکل راه اندازی خواهد

شد در حالی که با افزایش تعداد پره‌ها این نقص برطرف خواهد شد.

در سال ۲۰۱۰ ساماراویرا^۹ و همکارانش [۹] با استفاده از یک مدل تحلیلی بر روی توربین داریوس به این نتیجه رسیدند که افزایش ضخامت در ایرفویل‌ها باعث بهبود خواص خود راه اندازی توربین خواهد شد. همچنین باتیستا^{۱۰} [۱۰] با استفاده از نرم افزار محاسباتی جاوا فویل به تجزیه و تحلیل رفتار جریان در اطراف پره‌های یک توربین محور عمودی داریوس پرداخت و با مقایسه تعداد زیادی از پره‌ها با مقاطع ایرفویلی مختلف به این نتیجه رسید که پره با مقطع ایرفویلی NACA0030 بهترین عملکرد آیرودینامیکی را دارد. جی یائو^{۱۱} [۱۱] با استفاده از نرم افزار فلونت و به کارگیری دو مدل آشفتگی $k-\epsilon$ و $k-\epsilon$ RNG به تحلیل یک مدل دو بعدی توربین داریوس H-روتور با سه پره پرداخت. تاثیر مدل‌های آشفتگی بر روی سرعت کم، بر روی فشار تقریباً زیاد و بر روی گشتاور خیلی زیاد بود. توزیع سرعت در محدوده محاسباتی برای هر دو مدل شبیه هم بود. توزیع فشار نیز مشابه اما در مقدار تفاوت داشت. گرادیان‌های سرعت در اطراف پره‌های توربین قابل ملاحظه بود. همچنین گشتاور کلی به صورت تناوبی تغییر می‌کرد.

یاکوب^{۱۲} [۱۲] با تحلیل سه بعدی به بررسی عملکرد توربین ساوونیوس پرداخت. ژیاناجی^{۱۳} و همکارانش [۱۳] یک مدل کوچک از توربین بادی محور عمودی با ایرفویل‌های مختلف را آزمایش کردند. مطالعات آزمایشگاهی کیوزوکا^{۱۴} و همکارانش [۱۴] بر روی توربین داریوس دو پره در مقیاس آزمایشگاهی نشان داد که توربین ترکیبی توربین ساوونیوس و داریوس سبب بهبود عملکرد توربین داریوس در هنگام راه اندازی می‌شود. آزمایش منحنی‌های پره‌های مختلف در دانشگاه ایلینویز^{۱۵} در سال ۱۹۷۸ توسط خان^{۱۶} [۱۵] نشان داد که بیشترین راندمان روتورهای توربین ساوونیوس حدود ۳۵٪ می‌باشد. کاوامورا^{۱۷}

¹⁰ Batista¹¹ Ji Yao¹² Yaakob¹³ Xiaona Ji¹⁴ Kyozyuka¹⁵ Illinois¹⁶ Khan¹⁷ Kawamura¹ Takamatsu² Takenouchi³ Dai⁴ Ponta⁵ Jon Decoste⁶ Gupta - Sharma⁷ Overlap⁸ Dominy⁹ Samaraweera

باد دارد و نشان دهنده نسبت سرعت نوک پره به سرعت جریان آزاد سیال است و به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\lambda = TSR = \frac{R\omega}{V_{wind}} \quad (2)$$

که در آن R طول پره و ω سرعت زاویه‌ای دوران و V_{wind} سرعت باد می‌باشد. با بهره‌گیری از قدرت استحصال شده توسط پره می‌توان گشتاور تولیدی و سرعت زاویه‌ای چرخش را از رابطه زیر بدست آورد [۱۸]:

$$P = T.\omega \quad (3)$$

در تمامی حالت‌های مورد بررسی محور چرخش پره‌ها عمود بر جهت جریان سیال قرار گرفته است.

۳- تقسیم‌بندی فضای شبیه‌سازی

از آنجایی که هدف این تحقیق بررسی عملکرد یک ماشین چرخنده است، تقسیم بندی فضای محاسبات به دو زیر شبکه ساکن و متحرک ضروری است. محدوده مستطیل شکل خارجی ساکن بوده و کل فضای محاسبات را تشکیل داده و مشخص کننده زیر شبکه تونل باد (در شکل (۱)) است. در شکل (۲) بازه دایره‌ای داخلی مشخص کننده زیر شبکه روتور است و با سرعت زاویه ای ω می‌چرخد.

۴- روش حل

جهت حل معادلات بقای جرم، اندازه حرکت و آشفتگی از نرم افزار 15 Ansys-Fluent استفاده شده است. برای مدلسازی عبارات تنش رینولدز در معادلات اندازه حرکت از مدل آشفتگی sst k-w که توانایی خوبی در مدلسازی جریان و گردابه‌ها اطراف پره توربین دارد [۱۹] و الگوریتم حل piso استفاده شده است. گام زمانی در تمامی محاسبات انجام شده به اندازه زمان لازم برای یک درجه چرخش توربین انتخاب شده است. کوچکتر شدن گام زمانی، تغییر محسوس در نتایج نشان نداد. معیار همگرایی باقیمانده‌ها در هر گام زمانی، 10^{-5} انتخاب شده که ۳۰ تکرار در هر گام زمانی برای رسیدن به این همگرایی لازم است.

۵- مدل سازی و شرایط مرزی

به منظور جلوگیری از خطای ایجاد شده توسط دیواره‌های تونل باد، عرض منطقه محاسباتی حدود ۸ برابر قطر روتور و

همکارانش [۱۶] به مطالعه جریان اطراف روتور ساوونیوس با استفاده از روش DDM^۱ پرداختند. آنها ضریب گشتاور و ضریب توان روتور را در سرعت‌های مختلف جریان هوا برای پره‌های نیم دایره‌ای مورد بررسی قرار دادند. محققان کمیسیون انرژی کالیفرنیا زیر نظر حمید رهایی [۱۷]، با استفاده از نرم افزار NASA INS2D و کدهای CFD مختلف به بهینه سازی منحنی پره این روتورها پرداختند. آنها دو نوع پره مختلف با بالک و بدون بالک در انتهای روتور را مورد مطالعه قرار داده و توانستند با بهینه سازی منحنی پره، ضریب گشتاور روتور را تا ۲۷٪ و ضریب توان ماکزیمم روتور را تا ۴۰٪ افزایش دهند.

هرچند که مهم‌ترین جاذبه توربین‌های محور قائم، عدم نیاز آنها به هرگونه سیستم جهت یابی است ولی مشکل اساسی آنها عدم خود راه اندازی و یا عبارتی نیاز به سیستم راه اندازی خارجی برای شروع حرکت و تامین گشتاور مورد نیاز جهت راه اندازی توربین داریوس می باشد. لذا در این مقاله برای حل این مشکل به بررسی شرایط مختلف ترکیب یک توربین داریوس سه پره با توربین ساوونیوس به منظور بهبود گشتاور در زمان راه اندازی و اصلاح ضریب توان در سرعت‌های مختلف باد پرداخته شده است. همچنین اثر افزایش ضخامت ایرفویل در توربین داریوس و همچنین اثر هم پوشانی و قطر پره های توربین ساوونیوس مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- تحلیل جریان در اطراف روتور

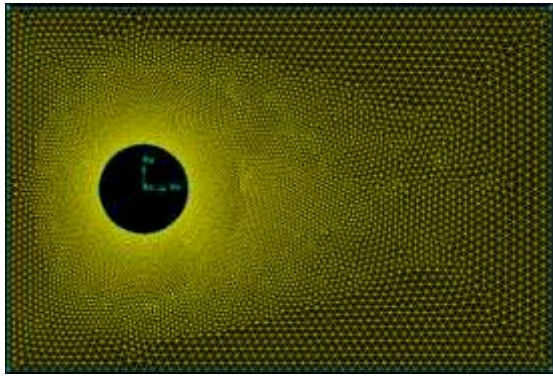
هنگامی که جریان به صفحه روتور (صفحه عمل کننده) برخورد نماید، مقداری از انرژی توسط پره استحصال می‌یابد. کل میزان انرژی جریان باد عبور کننده از سطح مقطع A برابر است با:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1)$$

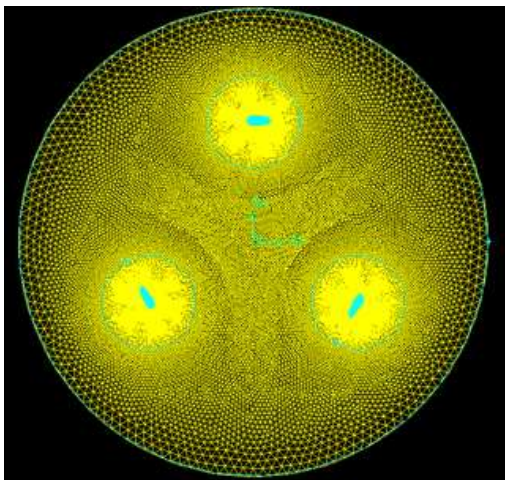
که رابطه اخیر نشان دهنده‌ی بیشترین میزان انرژی موجود سیال متحرک گذرنده از صفحه پره‌ها می‌باشد. مطابق با نظریه بتز تنها کسری از این میزان انرژی توسط پره استحصال می‌شود. پارامتر نسبت سرعت نوک پره^۲ پارامتر بی بعد دیگری است که کاربرد زیادی در تحلیل توربین‌های

² Tip Speed Ratio

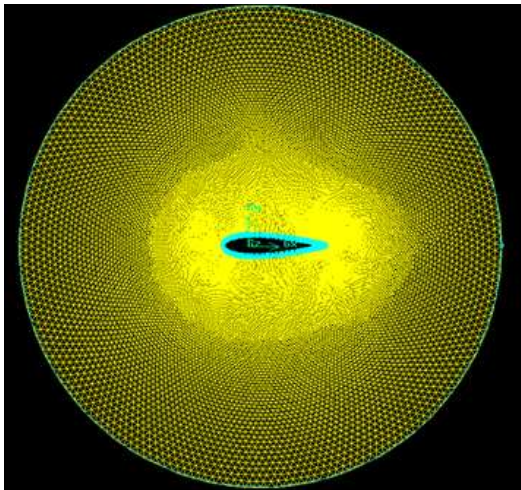
¹ Domain Decomposition Method



(الف) شبکه بندی زیر شبکه توربین باد.



(ب) شبکه بندی زیر شبکه روتور.



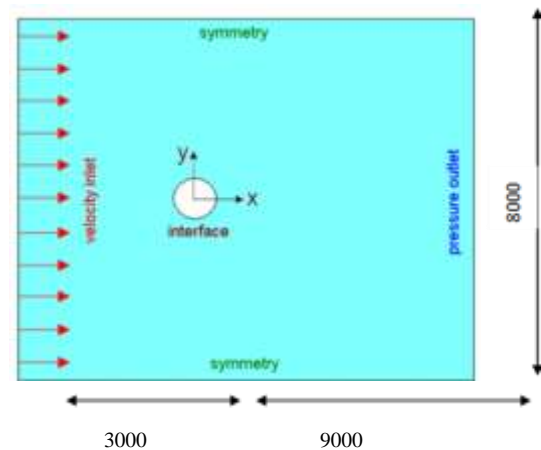
(ج) شبکه بندی اطراف پره.

شکل (۳) ابعاد و شرایط مرزی زیر شبکه روتور (به میلیمتر) (ب) شبکه بندی ناحیه متحرک (ج) شبکه اطراف یک پره.

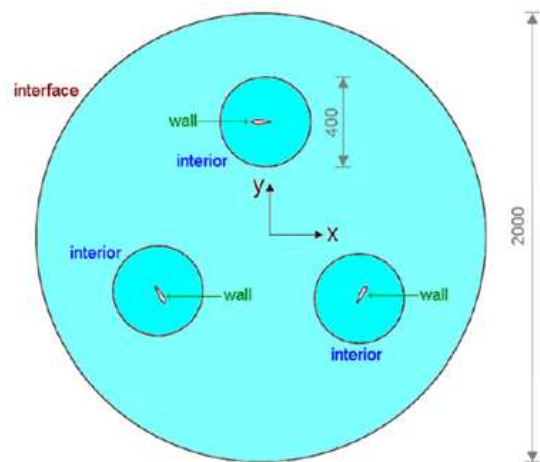
۶- نتایج

در این مقاله به مطالعه اثر توربین همزمان ساوونیوس - داریوس بر عملکرد توربین داریوس پرداخته شده است. شکل

همچنین طول آن حدود ۱۲ برابر قطر روتور است. در شکل (۱) ابعاد محیط حل، موقعیت روتور و شرایط مرزی مورد استفاده نشان داده شده است. محیط دایره دور روتور دارای شرط Interface است که پیوستگی جریان عبوری از اطراف روتور را فراهم می‌نماید. به منظور کاهش زمان محاسبات یک شبکه با ساختار نامنظم^۱ (شبکه مثلثی) برای زیر شبکه تونل باد انتخاب شده که در شکل (۲) نشان داده شده است. زیر شبکه روتور، شبکه متحرک^۲ محیط دایروی اطراف توربین است که با سرعتی برابر با سرعت زاویه‌ای توربین می‌چرخد. شکل (۳) ابعاد و شرایط مرزی استفاده شده در زیر شبکه روتور را نشان می‌دهد. برای کنترل ابعاد شبکه اطراف پره های توربین و افزایش دقت حل، پره های توربین باد در درون دایره کنترلی با قطر 400mm قرار گرفته است.



شکل (۱) ابعاد و شرایط مرزی استفاده شده در زیر شبکه تونل باد (ابعاد به میلیمتر).



شکل (۲) ابعاد و شرایط مرزی زیر شبکه روتور.

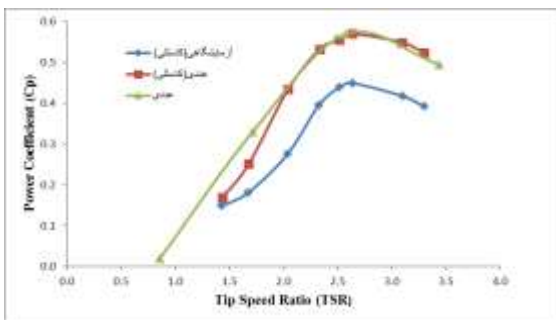
² Moving Mesh

¹ Unstructured Mesh

با میانگین گیری از شکل (۵)، گشتاور توربین در نسبت سرعت‌های تعیین شده بدست می‌آید. که مقدار آن برای $TSR=1$ ، $TSR=1.7$ و $TSR=2.6$ به ترتیب برابر 2.05 N.m ، 3.06 N.m و 4.8 N.m است. به همین ترتیب برای نسبت سرعت‌های مختلف، نمودار تغییرات گشتاور، بدست آمده و با میانگین گیری از آن گشتاور مورد نظر در نسبت سرعت تعیین شده بدست می‌آید.

در شکل (۶) برای اطمینان از درستی روند کار، نتایج حاصل از توربین داریوس شبیه سازی شده در این مقاله با نتایج مقاله کاستلی^۱ [۲۰] مقایسه شده است. شکل (۶) تغییرات ضریب توان توربین که به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود را بر حسب نسبت سرعت نوک پره نشان می‌دهد.

$$C_p = \frac{P}{0.5 \rho A V_{\infty}^3} \quad (5)$$



شکل (۶) مقایسه نتایج عددی با نتایج کاستلی جهت اعتبارسنجی.

همانطور که از شکل مشاهده می‌گردد، منحنی نتایج عددی در این تحقیق و داده‌های عددی کاستلی دارای حداکثر ۸٪ اختلاف نسبت به یکدیگر می‌باشد. همچنین نتایج عددی و آزمایشگاهی دقت خوبی در پیش‌بینی موقعیت ضریب توان ماکزیمم و رفتار منحنی دارد.

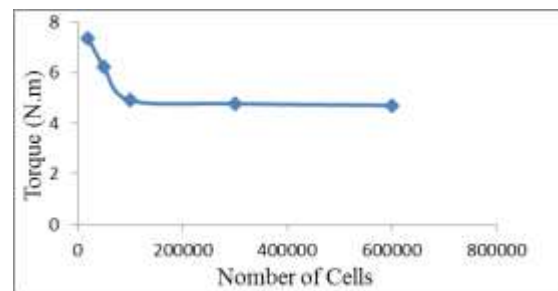
اختلاف بین دو منحنی آزمایشگاهی و عددی بخاطر نادیده گرفتن نیروی پسای ایجاد شده توسط بازوهای نگه دارنده پرها و همچنین اثرات سه بعدی جریان ناشی از طول محدود پرها در حالت آزمایشگاهی می‌باشد.

در شکل (۷) اثر دو پروفیل NACA0012 و NACA0021 بر روی گشتاور توربین داریوس در نسبت سرعت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که مشاهده

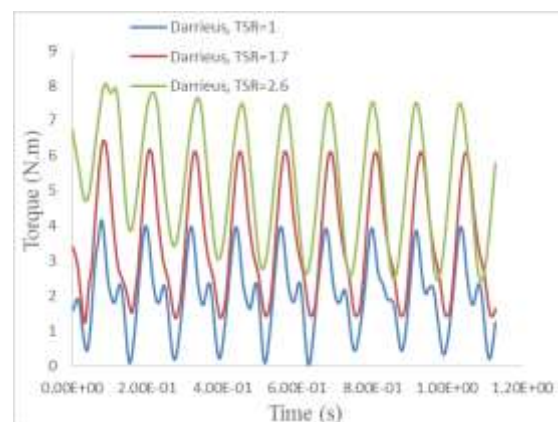
(۱) مدل هندسی تولیدی و شبکه‌بندی اطراف آن را نشان می‌دهد. توربین مورد بررسی یک توربین داریوس ۳ پره بوده که پروفیل هر پره NACA0021 بوده است.

برای شبکه بندی محیط حل اطراف پره‌های توربین از نرم افزار گمبیت، استفاده شده است. برای بررسی استقلال از شبکه، ۵ شبکه مختلف با تعداد ۲۰۰۰۰ تا ۶۰۰۰۰ سلول ایجاد و گشتاور خروجی توربین محاسبه گردید. در شکل (۴) اثر شبکه بندی بر گشتاور تولیدی توربین داریوس در نسبت سرعت نوک پره ۲/۵۷ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار گشتاور توربین با افزایش تعداد گره‌ها کاهش می‌یابد. اما با افزایش تعداد گره‌ها از ۱۰۰۰۰۰ تا ۶۰۰۰۰۰ سلول، اختلاف مقدار گشتاور تنها ۳/۳۲ درصد است. لذا برای صرفه جویی در وقت و هزینه، شبکه بندی با تعداد گره ۱۰۰۰۰۰ شبکه مورد استفاده قرار گرفته است.

در شکل (۵) تغییرات گشتاور توربین داریوس در $TSR=1$ ، $TSR=1.7$ و $TSR=2.6$ برای بازه زمانی ۱.۲ ثانیه جهت مقایسه نشان داده شده است.

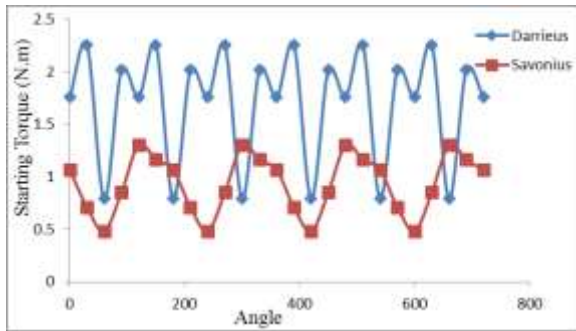


شکل (۴) گشتاور توربین داریوس در $TSR=2.57$ برای پنج شبکه بندی مختلف جهت بررسی استقلال از شبکه بندی.



شکل (۵) تغییرات گشتاور توربین داریوس نسبت به زمان در $TSR=1$ ، $TSR=1.7$ و $TSR=2.6$

¹ Castelli



شکل (۹) گشتاور شروع به حرکت برای دو توربین داریوس و ساوونیوس.

در نتیجه در یک دور گردش کامل، توربین داریوس دارای سه قله با گشتاور ماکزیمم و مینیمم به ترتیب $2/254$ و $0/79$ نیوتن متر در زوایای 30° و 60° درجه و توربین ساوونیوس دارای دو قله با گشتاور ماکزیمم و مینیمم به ترتیب $1/3$ و $0/48$ نیوتن متر در زوایای 120° و 60° درجه خواهد بود.

لذا برای دستیابی به بیشترین گشتاور اخذ شده توسط جریان باد، موقعیت نسبی دو توربین داریوس و ساوونیوس نسبت به یکدیگر نقش مهمی در توربین ترکیبی دارد. این امر با استفاده از مفهوم گشتاور شروع به حرکت آنها قابل بررسی و بهینه سازی می باشد.

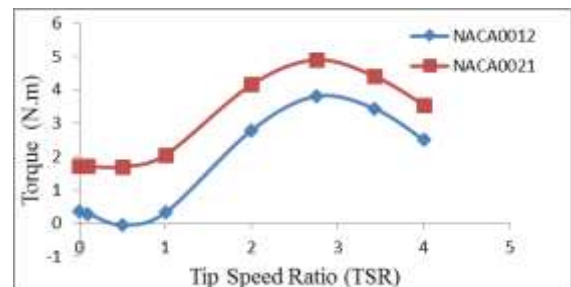
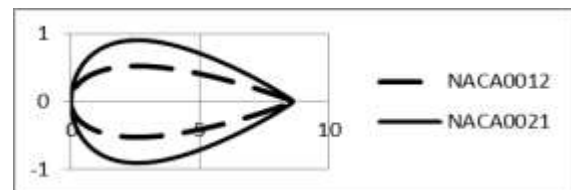
هدف اصلی از رسم این نمودار، بدست آوردن مقادیر گشتاور ماکزیمم و مینیمم دو نمودار و قرار دادن مقدار ماکزیمم نمودار توربین ساوونیوس بر روی مقدار مینیمم نمودار توربین داریوس به منظور رسیدن به یک هندسه بهینه است. اما همانطور که از شکل پیداست بهترین حالت قرارگیری دو توربین داریوس و ساوونیوس نسبت به هم، می تواند مشابه شکل (۱۰) (وضعیت موجود) باشد.

مقادیر گشتاور برای دو دور چرخش کامل توربینها (جهت درک بهتر نمودار) رسم شده است. سپس توربینها را به اندازه 20° درجه چرخانده و دوباره مراحل ذکر شده در بالا تکرار شد و مقادیر گشتاور بدست آمد. این کار برای یک دور چرخش کامل توربینها انجام شد تا نمودار گشتاور توربین بدست آید. در شکل (۱۱) نمایی از توربین ترکیبی مورد استفاده در این مقاله به همراه شبکه بندی آن نشان داده شده است. همانطور که شکل (۱۲) نشان می دهد گشتاور شروع به حرکت در توربین ترکیبی داریوس- ساوونیوس مشابه نمودار توربین داریوس است با این تفاوت که بهبود قابل ملاحظه ای داشته است.

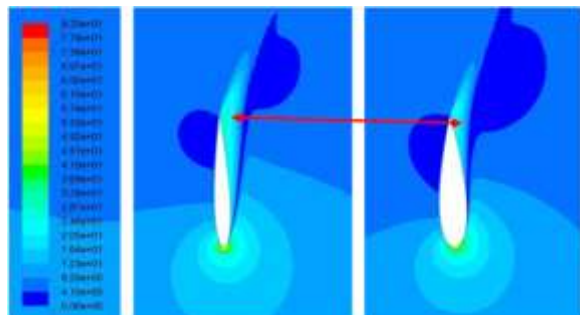
می شود با افزایش ضخامت ایرفویل بهبود قابل ملاحظه ای در گشتاور خروجی از توربین ایجاد شده است.

در شکل (۸) توزیع سرعت برای این دو ایرفویل در $TSR=3.43$ و زاویه 92° درجه مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می شود ناحیه جدایش جریان برای ایرفویل NACA0021 کوچکتر از NACA0012 می باشد.

برای افزایش قابلیت خودراه اندازی توربین داریوس، استفاده از توربین ساوونیوس همزمان با توربین داریوس پیشنهاد شده است. توربین ساوونیوس بدلیل گشتاور بالا در شروع حرکت، می تواند نقش مهمی در بهبود راه اندازی توربین داریوس داشته باشد. در شکل (۹) گشتاور شروع به حرکت برای دو توربین داریوس و ساوونیوس نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود مقادیر گشتاور برای توربین داریوس و ساوونیوس به ترتیب هر 120° و هر 180° درجه تکرار می شود.

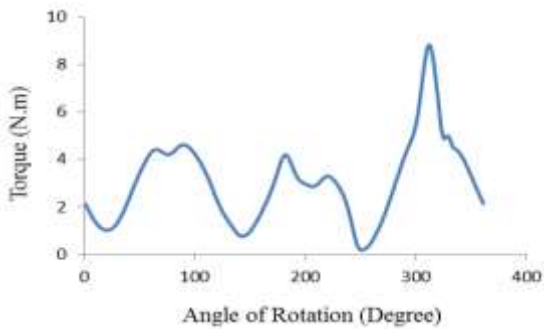


شکل (۷) مقایسه تغییرات گشتاور دو توربین داریوس با پروفیل NACA0012 و NACA0021 بر حسب نسبت سرعت نوک پره.

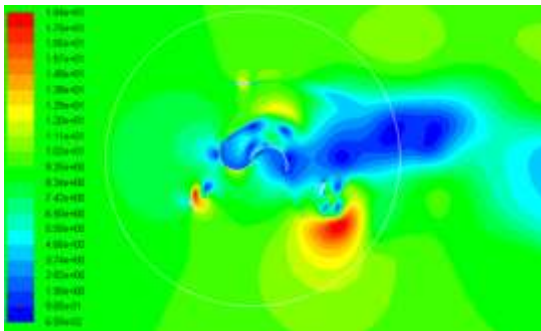


شکل ۸ توزیع سرعت (m/s) برای دو ایرفویل NACA0012 (چپ) و NACA0021 (راست) در $TSR=3.43$ و زاویه 92° درجه.

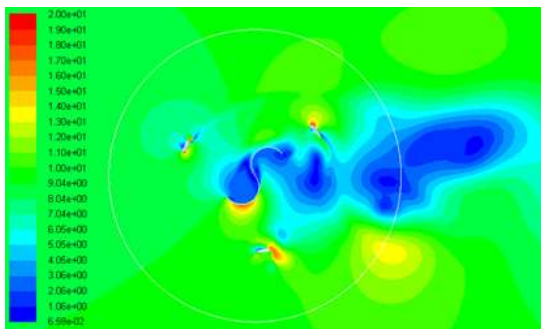
به طوری که میانگین گشتاور توربین داریوس در یک دور کامل برابر 1.7 N.m و در توربین ترکیبی برابر 2.01 N.m است که افزایش ۱۵٪ را نشان می‌دهد. شکل (۱۳) منحنی گشتاور یک توربین ترکیبی داریوس-ساوونیوس با قطر 24 cm را در $TSR=1$ برای یک دور چرخش توربین نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است، توربین دارای یک مینیمم در زاویه ۲۵۰ درجه و یک ماکزیمم در زاویه ۳۱۰ درجه است. اشکال (۱۴) تا (۱۹) توزیع سرعت و فشار و گردابه را در این زوایا جهت مقایسه نشان می‌دهد.



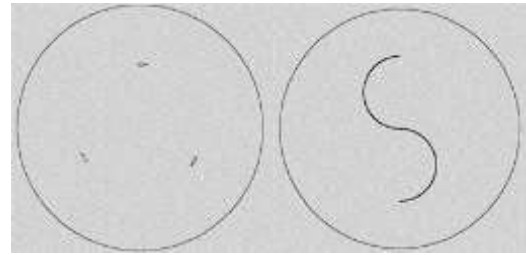
شکل (۱۳) منحنی گشتاور توربین داریوس-ساوونیوس با قطر 24cm در $TSR=1$ برای یک دور چرخش توربین.



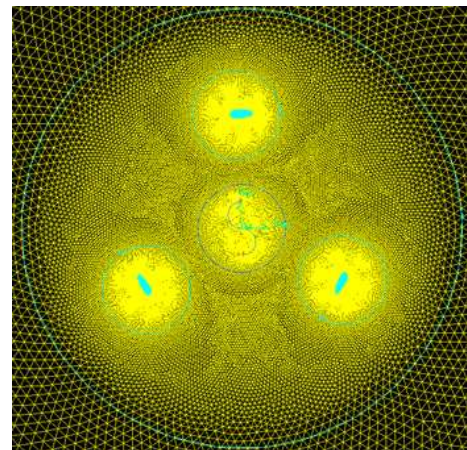
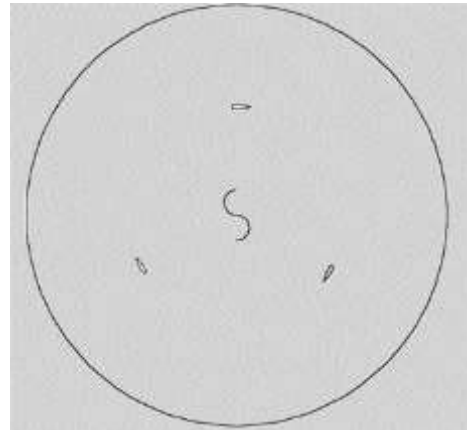
شکل (۱۴) خطوط همتراز سرعت (m/s) برای توربین داریوس-ساوونیوس با قطر $D=24cm$ در زاویه ۲۵۰ درجه (مینیمم گشتاور).



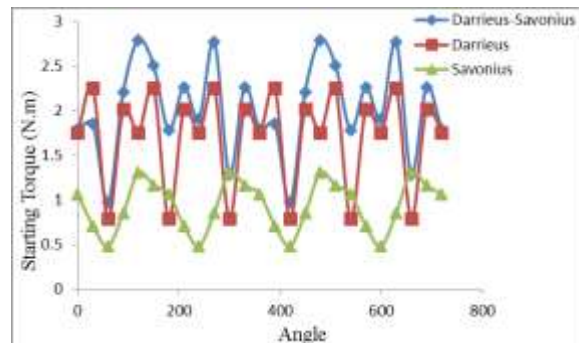
شکل (۱۵) خطوط همتراز سرعت (m/s) برای توربین داریوس-ساوونیوس با قطر $D=24cm$ در زاویه ۳۱۰ درجه (ماکزیمم گشتاور).



شکل (۱۰) موقعیت صفر درجه برای دو توربین داریوس (چپ) و ساوونیوس (راست).



شکل (۱۱) موقعیت دو توربین داریوس و ساوونیوس نسبت به هم در توربین ترکیبی به همراه مش بندی آن.

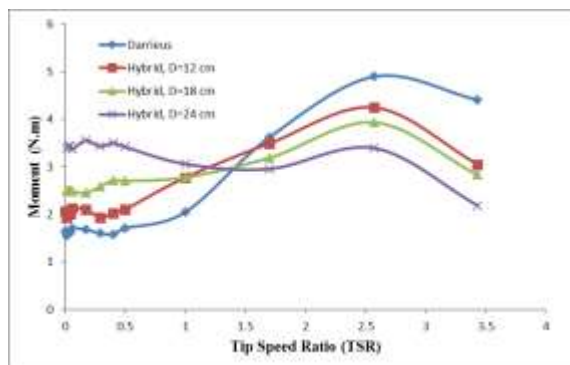


شکل (۱۲) مقایسه گشتاور شروع به حرکت در توربین داریوس، ساوونیوس و داریوس-ساوونیوس.

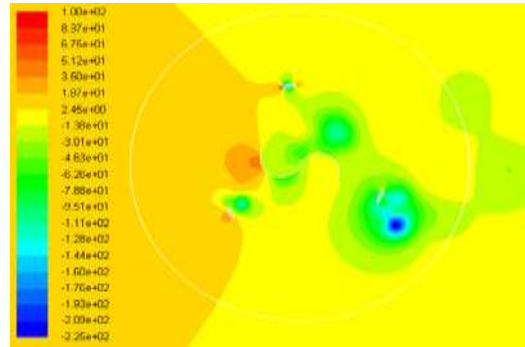
با توجه به شکل‌های نشان داده شده می‌توان نتیجه گرفت گشتاور ماکزیمم توربین ترکیبی زمانی اتفاق افتاده است که پره‌های توربین ساوونیوس تقریباً عمود بر جهت جریان باد قرار داشته و پره‌های توربین داریوس نیز از برخورد با گردابه‌های تشکیل شده در پشت توربین ساوونیوس در امان هستند و عملکرد آیرودینامیکی آنها دچار افت نمی‌شود. در حالی که گشتاور مینیمم توربین هنگامی است که توربین ساوونیوس موازی با جریان باد قرار دارد و یکی از پره‌های توربین داریوس در معرض اغتشاشات ناشی از جریان پشت توربین ساوونیوس قرار گرفته است.

در شکل (۲۰) اثر استفاده همزمان از توربین ساوونیوس و داریوس برای سه قطر توربین داریوس مختلف نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در سرعت‌های زاویه‌ای پایین‌تر از 25 rad/s (TSR=1.4) توربین ترکیبی داریوس- ساوونیوس عملکرد بهتری نسبت به توربین داریوس دارد. از طرفی تاثیر افزایش قطر توربین ساوونیوس در توربین ترکیبی در سرعت‌های پایین مثبت و در سرعت‌های بالا منفی است. در نتیجه با توجه به شکل (۲۰)، استفاده از توربین ترکیبی با قطر توربین ساوونیوس 24 cm در نسبت سرعت نوک پره کمتر از ۱/۵ (سرعت‌های زاویه‌ای زیر 25 rad/s) مناسب بوده و پس از آن حذف توربین ساوونیوس منجر به افزایش راندمان توربین خواهد شد.

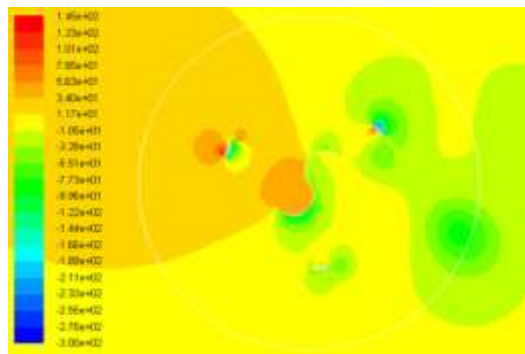
در خصوص دقت حل دو بعدی و مقایسه آن با حل سه بعدی، اثرات سه بعدی جریان روی تیغه‌های ایرفویل می‌تواند تاثیر زیادی بر عملکرد آنها داشته باشد. از طرفی زمان بالای محاسبات در حل سه بعدی، سبب شده تا حل دو بعدی علی‌الرغم دقت کمتر، همچنان مورد استفاده محققین مختلف قرار گیرد.



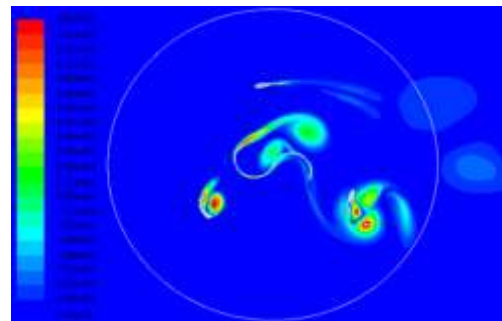
شکل (۲۰) مقایسه منحنی گشتاور سه توربین ترکیبی در قطرهای مختلف با منحنی گشتاور توربین داریوس.



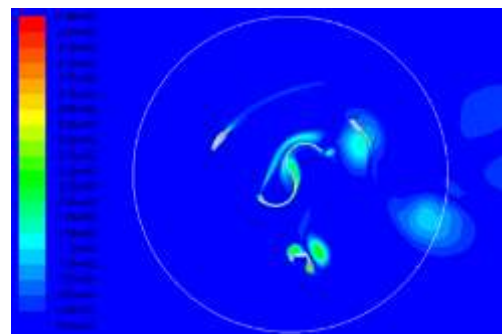
شکل (۱۶) خطوط همتراز فشار (Pa) برای توربین داریوس - ساوونیوس قطر D=24cm در زاویه ۲۵۰ درجه (مینیمم گشتاور).



شکل (۱۷) خطوط همتراز فشار (Pa) برای توربین داریوس - ساوونیوس قطر D=24cm در زاویه ۳۱۰ درجه (ماکزیمم گشتاور).



شکل (۱۸) خطوط همتراز گردابه (1/s) برای توربین داریوس - ساوونیوس با قطر D=24cm در زاویه ۲۵۰ درجه (مینیمم گشتاور).



شکل (۱۹) خطوط همتراز گردابه (1/s) برای توربین داریوس - ساوونیوس قطر D=24cm در زاویه ۳۱۰ درجه (ماکزیمم گشتاور).

یکدیگر در توربین ترکیبی بررسی شد و نتایج نشان داد که بهترین حالت قرار گیری دو توربین، زاویه صفر درجه است. در این حالت گشتاور شروع به حرکت در توربین ترکیبی، افزایش ۱۵٪ نسبت به توربین داریوس از خود نشان داد. در نهایت گشتاور سه توربین ترکیبی داریوس-ساوونیوس که قطر توربین ساوونیوس در آنها تفاوت داشت با توربین داریوس مورد مقایسه قرار گرفت و مشخص شد که تاثیر افزایش قطر توربین ساوونیوس در سرعت‌های زاویه‌ای زیر 25 rad/s مثبت و بالاتر از آن، منفی خواهد بود. در نتیجه، استفاده از یک توربین ترکیبی با قطر توربین ساوونیوس برابر با 24 cm در سرعت‌های زیر 25 rad/s (نسبت سرعت نوک پره کمتر از $1/5$) بهترین بازدهی را داشته و بعد از آن حذف توربین ساوونیوس منجر به افزایش راندمان توربین داریوس خواهد شد.

۸- مراجع

- [1] Takamatsu Y, "Experimental Studies on a Preferable Blade Profile of Darrieus Type Cross-Flow Water Turbine", JSME International Journal, Vol.34, pp. 149-156, 1991.
- [2] Takenouchi.k, Furukava.A, "Self-Starting Characteristics of Ducted Darrieus Wind Turbine for Extra-Low Head Power", In:Proc of Expo World Conf. on Wind Energy, Renewable Energy, Fuel Cell & Exhibition, Hamamatsu, pp. 1-4, Japan, 2005.
- [3] Dai Y.M, Gardiner N, Lam W. "CFD Modelling Strategy of a Straight-Bladed Vertical Axis Marine Current Turbine", Production of The International Offshore and Polar Engineering Conference, pp. 767-773, 2010.
- [4] Ponta.F, Duff G.S, "An Improved Vertical-Axis Water-Current Turbine Incorporating a Channeling Device, Renewable Energy", Vol. 20, No. 2, pp 223-241, 2000.
- [5] Shiono, M., Suzuki, K., Kihou.S, "Output Characteristics of Darrieus Water Turbine with Helical Blades for Tidal Current Generation", Proceedings of Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference, pp.859-864, Kitakyushu, Japan 2002.
- [6] DeCoste, McKay, "MECH 4010 Design Project, Vertical Axis Wind Turbine", 2005.
- [7] Gupta. R, Das & K.K. Sharma, "Experimental Study of A Savonius-Darrieus Wind Machine", Solar & Wind Technology, Vol.16, pp. 234-251, 2006.
- [8] Dominy, R., Lunt, P, Bickerdyke, A., Dominy, J., "Self-Starting Capability of a Darrieus Turbine",

لذا برای اطمینان از نتایج حل دو بعدی، نتایج حل سه بعدی برای سه TSR مختلف انجام شده و با نتایج ۲ بعدی مقایسه شده است.

در مجموع نتایج سه بعدی نیز نشان می دهد در TSR های بیشتر از حدود $1/5$ استفاده از توربین ترکیبی مناسب نیست ولی در TSR های کمتر از $1/5$ ، استفاده از توربین ترکیبی، باعث افزایش چشمگیر گشتاور می شود. این روند با کاهش TSR افزایش بیشتری می یابد. لذا برای راه اندازی توربین (TSR=0) می تواند طرح بسیار مناسبی باشد. در TSR های میانی (حدود $1/5$ تا ۲) استفاده از توربین ترکیبی تاثیر زیادی بر عملکرد توربین داریوس ندارد. همچنین از نظر تغییر رفتار توربین داریوس و توربین ترکیبی در TSR های مختلف حل دو بعدی نیز بخوبی این تغییر رفتار و دامنه را نشان می داد، هر چند اعداد گشتاور بدست آمده و یا محدوده TSR خنثی می تواند تا ۲۰ درصد تغییر داشته باشد. لذا با توجه به زمان محاسبه طولانی در حل سه بعدی، حل دو بعدی می تواند در زمان بسیار کمتر، نتایج خوبی از نظر گشتاور خروجی توربین، پیش بینی نماید.

۷- نتیجه گیری

در این مطالعه به طراحی یک توربین ترکیبی داریوس-ساوونیوس جهت بهبود عملکرد توربین بادی محور عمودی داریوس در نرم افزار فلونت پرداخته شده است. از آنجایی که توربین‌های داریوس در ابتدای حرکت به دلیل گشتاور پائینی که تولید می کنند دچار مشکل راه اندازی می شوند، در این تحقیق با شبیه سازی یک توربین ترکیبی داریوس-ساوونیوس که در آن توربین‌ها به صورت هم محور به هم متصل شده اند، گشتاور دو توربین مورد مقایسه و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

در ابتدا تاثیر پروفیل پره های توربین داریوس بر گشتاور آن مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه دو پروفیل NACA0012 و NACA0021 نشان داد که گشتاور خروجی از توربین در پروفیل NACA0021 حدود ۲۸ درصد بهبود داشته است. دلیل آن نیز وجود ناحیه جدایش کمتر در پروفیل NACA0021 است که باعث بهبود خواص آیرودینامیکی آن می شود. در ادامه به بررسی هندسه بهینه توربین ترکیبی داریوس-ساوونیوس به منظور بازدهی بیشتر پرداخته شد. موقعیت نسبی دو توربین داریوس و ساوونیوس نسبت به

- Journal of Power and Energy, Vol.221, No.1, pp. 111-120, 2006.
- [9] Samaraweera K.K.M.N.P, Pathirathna K.A.B. De Silva H.E.D, Sugathapala A.G.T,” Development of Darrieus-Type Vertical Axis Wind Turbine For Stand-Alone Applications”, Vol.78, pp.251-257, 2010.
- [10] Batista¹, R. Melicio¹, J.C.O. Matias¹, and J.P.S. Catalao¹, “Self-Starting Performance Evaluation in Darrieus-Type Vertical Axis Wind Turbines: Methodology and Computational Tool Applied to Symmetrical Airfoils”, Vol.43, pp.61-66, 2010.
- [11] Ji Yaoa, Wanga, Yuanb, Wanga, Caoa”, Analysis on the Influence of Turbulence Model Changes to Aerodynamic Performance of Vertical Axis Wind Turbine”, Vol.65, pp.58-69, 2012.
- [12] Yaakob OB, Tawi KB, Sunanto DTS”, Computer Simulation Studies on the Effect of Overlap Ratio for Savonius-Type Vertical Axis Marine Current Turbine”, International Journal of Engineering, Transactions A, Vol.23, No.1, pp.79-88, 2010.
- [13] Xiaonaji, Schluter, “Design and Analysis of Small-Scale Vertical Axis Wind Turbine, Renewable Power Generation” 2011.
- [14] Kyozoka Y, Akira H, Duan D, Urakata Y, “An Experimental Study on the Darrieus-Savonius Turbine for the Tidal Current Power Generation”, Proceeding on the International Offshore and Polar Engineering Conference, pp. 349-355, 2009.
- [15] Khan .H, “Model and Prototype Performance Characteristics of Savonius Rotor Wind Mill”, Wind Engineering, Vol. 2, No.2, pp. 75-85, 1978.
- [16] Testuya Kawamura, Tsutomu and Hayashi, Kazuko Miyashita,” Application of the Domain Decomposition Method to Flow Around the Savonius Rotor”, 12th International Conference on Domain Decomposition Methods, Chiba, Japan, 1998.
- [17] Rahai H. R., Hafezi H, “Development of Optimom Design Configuration and Performance for Vertical Axis Wind Turbine”, Feasibility Analysis and Final EISG Report, California Energy Commision, 2005.
- [18] Medici. D., “Experimental Studies of Wind Turbine Wakes Power Optimisation and Meandering”, Chapter 2 and 3, P. 20, 2005.
- [19] ArabGolarche, A., Moghiman, M., Javadi MalAbad, S. M., Numerical simulation of Darrieus wind Turbine using 6DOF Model to Consider the Effect of Inertia and the Fluid-Solid Interaction, Modares Mechanical Engineering, Vol.15, No.12, pp.143-152, 2015 (In Persian).
- [20] Castelli, Englaro, Benini, “The Darroeus Wind Turbine: Proposal for a New Performance Prediction Model Based on CFD”, Vol.36, pp. 4919-4934, 2011.