



بهبود عملکرد توربین بادی ترکیبی داریوس - ساونیوس

آرمین روشن^۱ و محمدجواد مغربی^{۲*}^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد^۲ استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۲۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۰۵/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۷/۲۴

چکیده

توربین‌های بادی داریوس و ساونیوس که از جمله توربین‌های بادی محور عمودی محسوب می‌شوند، به دلیل طراحی ساده و عدم وابستگی به جهت باد، مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. توربین داریوس، با وجود بازده بالاتر نسبت به ساونیوس، با مشکل اساسی راه‌اندازی خودکار روبرو است. هدف از مطالعه حاضر، ترکیب توربین داریوس با ساونیوس، جهت دستیابی به مدلی با گشتاور راه‌اندازی و محدوده عملکرد مناسب است. ابتدا یک مدل شامل، سه پره داریوس از نوع مستقیم و دو پره ساونیوس، شبیه‌سازی می‌شود و به منظور بهبود عملکرد، زاویه کمان پره‌های ساونیوس و صلبیت پره‌های داریوس تغییر می‌یابند. با دستیابی به زاویه کمان و صلبیت بهینه و ترکیب آن‌ها، قابلیت مدل ترکیبی اولیه بهبود داده می‌شود. شبیه‌سازی به صورت دوبعدی و با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی انجام پذیرفته و برای چرخش توربین از شبکه‌بندی متحرک، استفاده شده است. مطابق با نتایج، ترکیب توربین داریوس با ساونیوس تأثیر مطلوبی بر راه‌اندازی خودکار و یکنواخت کردن منحنی عملکرد توربین دارد؛ همچنین مشاهده گردید که صلبیت ۰/۷۵ برای ایرفویل و زاویه ۱۵۰ درجه برای کمان پره‌ی ساونیوس، حالت‌های بهینه شده از نظر بیشینه ضریب توان، گشتاور راه‌اندازی و محدوده عملکرد می‌باشند که با بهره‌گیری هم‌زمان، مدل ترکیبی با حداکثر عملکرد به دست می‌آید.

کلمات کلیدی: توربین ترکیبی داریوس - ساونیوس؛ راه‌اندازی خودکار؛ ضریب توان؛ دینامیک سیالات محاسباتی.

Performance Improvement of Hybrid Darrieus-Savonius Wind Turbine

A. Roshan¹, M. J. Maghrebi^{2,*}¹ M.Sc. Student, Mech. Eng. Dept., Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.² Prof, Mech. Eng. Dept., Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Abstract

Vertical axis wind turbine, divided into Darrieus and Savonius, have been considered by many scientists owing to simplicity of design and operation independent of wind direction. Although Darrieus turbine has higher efficiency than Savonius, it faces to essential problem of self-starting. The aim of the present study is the combination of Darrieus and Savonius turbine in order to reach to a model with high starting torque and proper performance range. First, a model involving 3 straight-bladed Darrieus with 2 Savonius blades is simulated. For improving the performance, Savonius blade arc angle and airfoil solidity are changed. By optimizing the arc angle and solidity, the initial hybrid model performance is improved. Two-dimensional simulation using computational fluid dynamics is conducted using moving mesh for rotating part. According to results, the combination of Darrieus and Savonius turbine has favorable impact on self starting and makes performance curve smooth. It was also observed that solidity of 0.75 for Darrieus and angle of 150° for savonius blade arc are the optimized mode for maximum power coefficient, starting torque and performance range. In other words, The hybrid model with maximum performance is achieved by using these values at the same time.

Keywords: Hybrid Darrieus-Savonius Turbine; Self Starting; Power Coefficient; Computational Fluid Dynamics.

۱- مقدمه

امروزه کشورهای مختلف جهان برای داشتن رشد اقتصاد پایدار، نیازمند منابع کافی برای تولید پیوسته انرژی هستند؛ اما با توجه به کاهش ناگهانی سوخت‌های فسیلی به- عنوان منابع متعارف انرژی، افزایش قیمت و تأثیر مخرب آن بر محیط‌زیست، تقاضا برای منابع انرژی پایدار و مطمئن روزبه‌روز افزایش یافته است. از این رو تلاش برای توسعه منابع انرژی تجدید پذیر و پاک نظیر، انرژی خورشیدی، بادی و ... بسیار ضروری است. در بین تمام منابع تجدیدپذیر، فتاوری مرتبط با انرژی بادی، توسعه بسیار یافته است و در حال حاضر، به‌عنوان یک منبع تولید الکتریسیته در مقیاس بزرگ محسوب می‌گردد. توربین‌های بادی، وظیفه تبدیل انرژی جنبشی موجود در باد به انرژی مکانیکی و در نهایت به الکتریسیته را دارند. تاریخچه توربین‌های بادی، سرچشمه‌ای نزدیک به ۲۰۰ سال قبل از میلاد دارد. اولین توربین بادی کاربردی، در قرن هفتم در ایران به نام آسیاب بادی سیستان به کار گرفته شد. در سال ۱۹۳۰ در آمریکا، توربین‌های بادی به‌طور مؤثر در مزارع برای تولید الکتریسیته و پمپ کردن آب مورد استفاده قرار می‌گرفت. اولین استفاده از توربین‌های بادی متصل به شبکه، توسط جان براون و کو در سال ۱۹۵۱ انجام پذیرفت. ظرفیت کل توان بادی مورد استفاده تا پایان سال ۲۰۱۴ نزدیک به ۳۶۹/۶ گیگاوات گزارش شد که انتظار می- رود تا پایان سال ۲۰۱۹ به مقدار ۶۶۶/۱ گیگاوات برسد (۱ و ۲).

توربین‌های بادی بر اساس محور دوران، به دو گروه محور افقی و عمودی تقسیم می‌گردند. توربین‌هایی که محور چرخش آن به‌صورت افقی و موازی سطح زمین است را توربین‌های محور افقی و توربین‌هایی که محور دوران آن عمود بر سطح زمین باشد را محور عمودی گویند. توربین‌های محور افقی، بازده بالاتری نسبت به نوع عمودی دارند و دارای قابلیت راه‌اندازی خودکار می‌باشند. عیب بزرگ این توربین، وابستگی شدید به جهت وزش باد است که توربین را نیازمند به مکانیزم جهت‌یابی^۱ باد می‌کند؛ در صورتی که نوع محور عمودی، مستقل از جهت وزش، می‌تواند باد را از هر سمت دریافت و شروع به کار کند. این قابلیت بزرگ به‌همراه سرعت

راه‌اندازی پایین، باعث شده است که بتوان از این نوع توربین در مناطق شهری و مسکونی استفاده کرد که جهت باد مدام در حال تغییر است. همچنین هزینه‌ی ساخت و نگهداری پایین‌تر و عملکرد با صدا و لرزش کمتر نسبت به محور افقی، از جمله مزایای منحصربه‌فرد دیگری است که سبب افزایش توسعه فتاوری ساخت توربین‌های محور عمودی شده است [۱ و ۳]. توربین‌های محور عمودی، به دو گروه اصلی داریوس و ساونیوس تقسیم می‌شوند. توربین ساونیوس، توسط سیگارد جوهان ساونیوس^۲ ابداع شد. این توربین، از حداقل دو پره نیمه استوانه‌ای با مقطع دایروی تشکیل شده است که از نظر آیرودینامیکی، نیروی پسا محرک توربین ساونیوس است. در واقع اختلاف نیروی پسا قسمت مقعر نسبت به محدب، عامل حرکت در این توربین است. توربین داریوس، توسط مخترع فرانسوی گنورگ داریوس^۳ ابداع گردید. محرک این توربین به دلیل استفاده از ایرفویل به‌عنوان پره، نیروی آیرودینامیکی برا است که بر اثر اختلاف فشار بین سطح بالا و پایین ایرفویل، نیروی عمود بر جهت جریان باد ایجاد شده که عامل حرکت توربین می‌شود؛ در نتیجه توربین داریوس به دلیل استفاده از نیروی برا، دارای ضریب عملکرد بالاتری نسبت به مدل ساونیوس است [۱-۴]. مشکل اساسی توربین- های داریوس، شروع خودکار و به عبارتی خود راه‌اندازی^۴ است. توربین داریوس، برخلاف نوع ساونیوس که گشتاور راه- اندازی بالایی دارد، قادر به تولید گشتاور کافی جهت راه- اندازی نمی‌باشد [۵].

پژوهش‌های بسیاری به‌صورت آزمایشگاهی و عددی، برای بهبود عملکرد توربین‌های بادی محور عمودی انجام - پذیرفته است. ساها و راجی‌کومار [۶]، پره‌های پیچ‌دار ساونیوس را به‌صورت آزمایشگاهی در یک تونل باد با سرعت پایین مورد مطالعه قرار دادند و مشاهده کردند که این نوع توربین، دارای بازده و قابلیت خود راه‌اندازی بالاتری نسبت به توربین متعارف است. امیری و همکاران [۷]، تأثیر هم‌پوشانی اولیه و ثانویه بر عملکرد توربین بادی ساونیوس را به‌صورت عددی و تجربی بررسی کردند. آن‌ها بیشترین ضریب توان را در مقدار هم‌پوشانی اولیه ۰/۲ گزارش کردند. همچنین

² Sigurd Johannes Savonius³ Georges Darrieus⁴ Self starting¹ Yaw Mechanism

عددی بررسی کرد و نتیجه گرفت که افزایش صلیبیت، قابلیت راه‌اندازی توربین را بهبود می‌بخشد و سبب می‌شود که بیشینه ضریب توان در نسبت سرعت نوک پایین‌تر رخ دهد. در سال‌های اخیر، روش‌های بسیاری جهت افزایش گشتاور راه‌اندازی توربین‌های داریوس، پیشنهاد شده است. یکی از مؤثرترین روش‌ها ترکیب توربین داریوس با ساونیوس برای استفاده از مزیت‌های منحصربه‌فرد هر کدام، در قالب یک توربین است. از این رو مدل ترکیبی می‌تواند هم‌زمان از گشتاور راه‌اندازی بالای توربین ساونیوس و ضریب توان بالای توربین داریوس بهره‌برد. پژوهش‌هایی جهت بهبود عملکرد توربین ترکیبی داریوس - ساونیوس انجام پذیرفته است. گوپتا و همکاران [۱۴]، عملکرد توربین ترکیبی با دو پره ساونیوس و سه پره داریوس، برای حالات متفاوت نسبت هم-پوشانی توربین ساونیوس با مقادیری بین ۱۶/۲ تا ۲۵ درصد، در یک تونل باد مدارباز فرو صوت، مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها بیشترین ضریب توان را به مقدار ۰/۲۵ در نسبت هم-پوشانی ۲۰ درصد گزارش دادند. مجدداً گوپتا و همکاران [۱۵]، یک توربین سه پره ساونیوس را با یک توربین ترکیبی با سه پره ساونیوس و سه پره داریوس، برای حالات بدون هم‌پوشانی و با هم‌پوشانی با نسبت‌های ۱۶/۲، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درصد را در تونل باد مورد مطالعه و مقایسه قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که بیشترین ضریب توان توربین ترکیبی مربوط به حالت بدون هم‌پوشانی است و برای توربین ساونیوس برای نسبت هم‌پوشانی ۲۰ درصد اتفاق می‌افتد؛ همچنین بیشترین توان توربین ترکیبی، بیشتر از توربین ساونیوس است و مقدار آن ۰/۵۱ است. در اکثر بررسی‌های صورت گرفته بروی توربین‌های ترکیبی، بیشتر از توربین داریوس باحالت بیضی‌شکل استفاده شده است که سبب پیچیدگی ساخت و نگهداری توربین می‌شود. برای این منظور بویان و بیسواس [۱۶]، یک توربین داریوس سه پره از نوع مستقیم و با ایرفویل غیرمقارن S818 را مورد مطالعه قرار دادند و مشاهده کردند که توربین در بسیاری از زاویه‌های چرخش، دارای خصوصیات شروع خودکار است. باین‌وجود برای اینکه توربین به‌صورت کامل خود راه‌انداز شود، توربین داریوس را در یک سیستم ترکیبی با توربین ساونیوس به‌عنوان استارت، قرار دادند و برای افزایش عملکرد توان توربین ترکیبی، آزمایش‌ها را در اعداد رینولدز متفاوت و

مشاهده کردند که با افزایش نسبت هم‌پوشانی ثانویه مثبت، ضریب گشتاور افزایش و هم‌پوشانی منفی، ضریب گشتاور را کاهش می‌دهد. گوش و همکاران [۸]، عملکرد توربین ساونیوس اصلاح شده یک طبقه و سه طبقه، برای پمپ کردن آب را با استفاده از مدل‌های ریاضی، مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها با انجام آزمایش در تونل باد مشاهده کردند که بهترین عملکرد مربوط به مدل یک طبقه با ماکزیمم ضریب توان ۱۹٪ در رینولدز ۱۲۰۰۰ است که با افزایش عدد رینولدز، افزایش می‌یابد. تاکائو و همکاران [۹]، تأثیر پره‌های راهنما بر عملکرد توربین بادی محور عمودی با پره‌های مستقیم از نوع داریوس را به‌صورت آزمایشگاهی و در یک تونل باد جت باز، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که پره‌های راهنما به دلیل تغییر زاویه ورودی جریان هوا به روتور، تأثیر مطلوبی بر عملکرد توربین دارد و بیشینه ضریب توان را به مقدار ۰/۲۰۵ و در حدود ۱/۸ برابر بیشتر از حالت متعارف، گزارش دادند. مک‌لارن و همکاران [۱۰]، تأثیر تغییر مثبت و منفی زاویه گام از پیش تعیین شده توربین بادی داریوس با پره‌های مستقیم را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که پره‌های با زاویه گام منفی، عملکرد توربین را تا بیشتر از ۲۹ درصد افزایش می‌دهد؛ در صورتی که زاویه مثبت گام، سبب کاهش ۴۷ درصدی عملکرد توربین می‌شود. میانو و همکاران [۱۱]، برای بهبود گشتاور راه‌اندازی در نسبت سرعت نوک پایین توربین محور عمودی داریوس، از پره‌های با گام متغیر استفاده کردند. آن‌ها به‌صورت آزمایشگاهی و عددی ثابت کردند که پره با گام متغیر عملکرد توربین را نسبت به گام ثابت، بهبود می‌بخشد. بری و یو [۱۲]، از طریق دینامیک سیالات محاسباتی، به‌صورت دوبعدی و با روش شبکه متحرک، تأثیر انحنای ایرفویل بر عملکرد توربین داریوس را بررسی کردند. آن‌ها توربین سه پره از نوع مستقیم با ایرفویل غیرمقارن ناکا ۲۴۱۵ را شبیه‌سازی کردند و نشان دادند که ایجاد انحنای، باوجود کاهش بیشینه ضریب توان نسبت به توربین با ایرفویل مقارن، به دلیل افزایش گشتاور در لحظه شروع به حرکت، تأثیر مطلوبی بر راه‌اندازی خودکار توربین می‌گذارد. محمد [۱۳] با معرفی مشکل اساسی توربین داریوس در راه‌اندازی خودکار و با بررسی چند روش، سعی به بهبود این نقطه ضعف کرد. او تأثیر صلیبیت ایرفویل بر عملکرد آیرودینامیکی توربین را به‌صورت آزمایشگاهی و

رینولدز و به‌منظور پرهیز از حل دقیق معادلات ۱ و ۲ که بسیار پرهزینه است، مؤلفه سرعت و فشار به دو جز متوسط و نوسانی تقسیم می‌شوند.

$$\tilde{u}_i = \bar{U}_i + u'_i \quad (5)$$

$$\tilde{p} = \bar{P} + p' \quad (6)$$

با جایگذاری روابط ۵ و ۶ و متوسط‌گیری از معادلات ناویراستوکس، معادلات رنس محاسبه می‌گردند. در روابط ۷ و ۸، معادلات رنس با فرض تراکم‌ناپذیر بودن جریان، آورده شده است.

$$\frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (7)$$

$$\left[\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u'_i u'_j}) \quad (8)$$

جمله $\rho \overline{u'_i u'_j}$ نشان‌دهنده رابطه بین سرعت‌های نوسانی است و تنسور تنش رینولدز نامیده می‌شود. فرض‌های بسیاری برای حل تنش‌های رینولدز وجود دارد که یکی از آن‌ها فرض بوزینسک است که در رابطه ۹ آورده شده است.

$$\rho \overline{u'_i u'_j} = -\mu_t \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (9)$$

فرض بوزینسک با ایجاد رابطه‌ای بین کمیت‌های نوسانی و متوسط، راه‌کار مناسبی برای محاسبه لزجت آشفتگی است که در رابطه ۹ با μ_t نشان داده شده است. لزجت آشفتگی^۲، به‌صورت یک کمیت اسکالر عمل می‌کند که با استفاده دو کمیت مقیاس سرعت آشفتگی، ν و مقیاس طول، l محاسبه می‌شود [۱۷ و ۱۸].

$$\nu_t = \nu l \quad (10)$$

۳- انتخاب مدل آشفتگی

برای حل معادلات یو-رنس با استفاده از فرض بوزینسک، مؤلفه‌های تنش رینولدز، به متغیرهای متوسط میدان، مرتبط می‌شوند. برای محاسبه مؤلفه لزجت آشفتگی، مدل‌های آشفتگی زیادی، به کار گرفته شده است. در مدل صفر معادله‌ای با استفاده از روابط جبری و برقراری ارتباط هندسی، لزجت آشفتگی محاسبه می‌شود. در مدل‌های یک

همچنین پنج حالت هم‌پوشانی متفاوت برای توربین ساونیوس، در تونل باد انجام دادند. آن‌ها در بین تمام مدل‌ها، بیشینه ضریب توان توربین ترکیبی به مقدار ۰/۳۴ و برای حالت بهینه هم‌پوشانی با مقدار ۰/۱۵ به دست آوردند و نتیجه گرفتند که توربین ترکیبی بهینه‌شده دارای عملکرد توان بهتری نسبت به سایر مدل‌های توربین محور عمودی است.

در مطالعه حاضر، به‌منظور بهبود گشتاور راه‌اندازی، توربین داریوس با پره‌های مستقیم با توربین ساونیوس ترکیب و با تغییر زاویه کمان پره‌های ساونیوس، عملکرد مدل ترکیبی بهبود بخشیده می‌شود؛ همچنین تأثیر تغییر صلبیت ایرفویل بر عملکرد توربین داریوس و مدل ترکیبی نیز بررسی می‌شود. درنهایت با بهینه کردن زاویه کمان پره‌های ساونیوس و صلبیت ایرفویل و ادغام حالت‌های بهینه‌شده، سعی بر بهبود عملکرد مدل ترکیبی پیشنهادشده، می‌گردد.

۲- معادلات حاکم بر جریان سیال

معادلات بقای جرم و اندازه حرکت یا همان معادلات ناویر-استوکس، حاکم بر جریان سیال در توربوماشین‌ها می‌باشند. برای شبیه‌سازی جریان در توربین بادی محور عمودی، از معادلات یو-رنس^۱ استفاده می‌شود که از طریق تجزیه رینولدز و گرفتن میانگین زمان در معادلات پیوستگی و مومنوم به دست می‌آید.

$$\left[\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial x_j} \right] + \tilde{\rho} \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\tilde{\rho} \left[\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \right] = -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \tilde{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$\tilde{\tau}_{ij}$ در رابطه ۲، معرف تنسور تنش ویسکوز است و از طریق رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$\tilde{\tau}_{ij} = 2\mu \left(\tilde{s}_{ij} - \frac{1}{3} \tilde{s}_{kk} \delta_{ij} \right) \quad (3)$$

\tilde{s}_{ij} در رابطه ۳، معرف تنسور نرخ کرنش آنی است و از طریق رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$\tilde{s}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

برای بررسی جریان متلاطم با استفاده از روش تجزیه‌ی

² Turbulent viscosity

¹ URANS

رابطه‌ی ۱۱، انتقال انرژی جنبشی آشفته و رابطه ۱۲، نرخ اتلاف مخصوص است. F_1 و F_2 توابع خاص و β^* ، σ_ω و σ_k ثابت‌هایی می‌باشند که منتر برای محاسبه‌ی ضرایب مدل، آن‌ها را معرفی کرد. ν_t مؤلفه لزجت گردابه‌ای سینماتیکی است که به صورت رابطه‌ی ۱۳ معرفی گردید.

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega; \Omega F_2)} \quad (13)$$

که در آن Ω ، مقدار مطلق گردابه است [۲۱].

۴- پارامترهای مهم توربین بادی

نسبت سرعت نوک پره به صورت حاصل ضرب شعاع روتور در سرعت زاویه‌ای روتور نسبت به سرعت جریان هوای آزاد، تعریف می‌شود.

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

ضریب توان یا Cp، بیانگر کسر قدرت موجود در باد است که توسط توربین بادی استخراج می‌شود.

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \quad (15)$$

در رابطه ۱۵، P توان توربین، ρ چگالی سیال و A مساحت جاروب شده توسط توربین است که به صورت رابطه ۱۶ تعریف می‌شود.

$$A = H \times D \quad (16)$$

در رابطه ۱۶، H ارتفاع پره و D قطر روتور توربین است. ضریب گشتاور نیز مطابق رابطه ۱۷ محاسبه می‌شود.

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A R V^2} \quad (17)$$

در رابطه‌ی ۱۷، T گشتاور توربین و R بیانگر شعاع روتور می‌باشد. رابطه ۱۸، ارتباط بین ضریب توان و گشتاور را بیان می‌کند.

$$C_t = \frac{C_p}{\lambda} \quad (18)$$

یکی از پارامترهای مهم توربین‌های بادی داریوس، صلبیت است و به این معناست که چه میزان از سطحی که توسط پره‌های توربین جاروب می‌شود را پره‌های توربین اشغال کرده‌اند. این پارامتر مطابق رابطه‌ی ۱۹ بیان می‌گردد.

$$\sigma = \frac{NC}{R} \quad (19)$$

که در آن N تعداد پره‌های توربین و C طول وتر ایرفویل است.

معادله‌ای از یک معادله انتقال اضافی برای محاسبه یک کمیت آشفته‌گی استفاده می‌شود و کمیت دیگر با استفاده از روابط جبری محاسبه می‌گردد. مدل اسپالارت آلماراس^۱، یکی از مدل‌های تک معادله‌ای است که مناسب برای جریان با عدد رینولدز کم با اختلاف فشار معکوس در لایه‌ی مرزی است؛ ولی این مدل در جریان‌های با تغییرات ناگهانی، ضعیف عمل می‌کند. در مدل‌های دو معادله‌ای با حل دو معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی، دو کمیت آشفته‌گی محاسبه می‌شود. مدل‌هایی نظیر، $k-\omega$ و $k-\varepsilon$ از جمله مدل‌های دو معادله‌ای هستند. مدل آشفته‌گی $k-\varepsilon$ توسط جان و لاندرو [۱۹] ارائه گردید. این مدل برای جریان لایه برشی آزاد مناسب است، ولی مشکل اساسی آن در پیش‌بینی جریان در نزدیکی دیواره با اختلاف فشار معکوس شدید است. مدل آشفته‌گی $k-\omega$ توسط ویلکاگس [۲۰] ارائه گردید. این مدل به خوبی توانایی پیش‌بینی جریان در نزدیکی دیواره را دارد، ولی به شدت تحت تأثیر خواص آشفته‌گی جریان ورودی است و حساسیت زیادی نسبت به جریان آزاد دارد. منتر [۲۱]، یک مدل دو معادله‌ای به نام SST پیشنهاد داد که ترکیبی از مدل‌های $k-\omega$ و $k-\varepsilon$ بود. ایده مدل این‌گونه است که در نزدیکی ناحیه دیواره از خصوصیت‌های مدل $k-\omega$ و در خارج از لایه مرزی از خصوصیت‌های مدل $k-\varepsilon$ استفاده شود. به عبارتی مدل SST، تنها از فواید مدل‌های $k-\omega$ و $k-\varepsilon$ بهره می‌برد. مدل SST، با بهبود پیش‌بینی جریان‌های شامل گرادیان فشار معکوس می‌تواند مدل مناسبی برای کاربردهای آیرودینامیکی باشد؛ در نتیجه پیش‌بینی می‌شود که این مدل به خوبی قادر به تحلیل جریان پیچیده توربین‌های بادی محور عمودی است. این مدل از دو معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی بهره می‌برد که در روابط ۱۱ و ۱۲ آورده شده است [۱۷ و ۲۱].

$$\frac{D\rho k}{Dt} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (11)$$

$$\frac{D\rho \omega}{Dt} = \frac{\gamma}{\nu_t} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (12)$$

¹ Spalart-Allmaras

۵- حل عددی

معادله‌های حاکم بر جریان سیال (معادلات ناویر-استوکس)، به دلیل غیرخطی و کوپل بودن، دارای حل تحلیلی جامعی نمی‌باشند. روش‌های عددی با تبدیل معادله‌های با مشتقات جزئی به معادله‌های جبری، امکان حل آن‌ها را میسر می‌نمایند. روش دینامیک سیالات محاسباتی، یکی از ابزارهای ارزشمند عددی برای تحلیل و طراحی سیستم‌های دینامیک سیالات، محسوب می‌شود. شبیه‌سازی عددی پدیده‌های مختلف علم مکانیک، به‌خصوص در سال‌های اخیر و با توجه به افزایش سرعت پردازشگرهای کامپیوتری، جایگزین مناسبی برای روش‌های پرهزینه آزمایشگاهی، محسوب می‌گردد. با شبیه‌سازی صحیح و رعایت اصول حل، می‌توان با صرف کمترین هزینه و بدون نیاز به ساخت و بررسی آزمایشگاهی یک پدیده مکانیکی، رفتار و تأثیر سیستم‌های مختلف سیالاتی را بررسی کرد.

۵-۱- بررسی روش حل

در این مطالعه، توربین بادی محور عمودی به‌صورت دوبعدی شبیه‌سازی و از طریق روش دینامیک سیالات محاسباتی، با استفاده از حل گر انسیس فلونت، مورد تحلیل قرار گرفته و جریان نیز به‌صورت غیر دائم در نظر گرفته شده است. به دلیل پایین بودن سرعت، جریان ورودی به‌صورت تراکم‌ناپذیر فرض شده است که استفاده از حل گر مبتنی بر فشار برای این جریان مناسب است. لانزافم و همکاران [۲۲]، برای کوپل کردن معادلات سرعت و فشار در معادلات ناویر-استوکس، الگوریتم‌های پیژو^۱ و سیمپل^۲ و کوپلد^۳ را با هم مقایسه کردند و دریافتند که الگوریتم پیژو برای تمام نسبت سرعت نوک، مناسب و قادر به پیش‌بینی رفتار جریان اطراف پره‌ها و اثر واماندگی است. در نتیجه برای کوپل کردن معادلات سرعت و فشار از الگوریتم پیژو استفاده شده است. دقت شبیه‌سازی، به نحوه گسسته‌سازی و مرتبه گسسته‌سازی روش مورد استفاده ارتباط دارد. برای گسسته‌سازی معادلات دیفرانسیل، از روش حجم محدود و برای حل معادلات فشار و مومنتوم، از

گسسته‌سازی مرتبه دوم استفاده شده است؛ همچنین برای محاسبه لزجت آشفتگی، مدل آشفتگی SST k- ω به‌دلیل پیش‌بینی مناسب جریان اطراف پره‌های توربین و گرادیان فشارهای معکوس و جدایش جریان، به‌کار گرفته شده است.

۵-۲- بررسی ناحیه‌ی محاسباتی و شرایط مرزی

برای شبیه‌سازی دوبعدی توربین بادی، محدوده‌ی حل به دو ناحیه چرخان و ساکن تقسیم می‌شود. ناحیه‌ی چرخان با هندسه‌ای دوار، شامل، پره‌های توربین و فضای نزدیک به پره‌ها است و ناحیه ساکن با هندسه‌ای مستطیلی، فضای اطراف توربین را شامل می‌شود. دقت شبیه‌سازی و دریافت نتایج صحیح تا حد زیادی مرتبط با ابعاد مناسب ناحیه‌های به‌کار گرفته شده است. برای این منظور ناحیه ساکن، مستطیلی به ابعاد 20×14 متر و ناحیه چرخان دایره‌ای به شعاع 0.9 متر که مرکز آن در فاصله‌ی 6 متری از ورودی جریان قرار گرفته، در نظر گرفته شده است.

انتخاب شرایط مرزی مناسب، لازمه حل عددی است. شرط مرزی مناسب پره‌ها، دیواره با شرط عدم لغزش است. مرز بین ناحیه چرخان و ساکن، به‌صورت سطح مشترک^۴ بین دو هندسه قرار می‌گیرد، به‌گونه‌ای که آن مرز تداخلی به‌صورت لغزنده در نظر گرفته می‌شود. برای ورودی جریان سیال که با سرعت یکنواخت و ثابتی وارد دامنه حل می‌شود، شرط سرعت ورودی و در مرز خروجی جریان که گرادیان سرعت و تنش برابر صفر است و فشار خروجی برابر فشار اتمسفری فرض می‌شود، شرط مرزی فشار خروجی اختیار می‌گردد. برای مرزهای بالا و پایین ناحیه‌ی ساکن، شرط تقارن در نظر گرفته می‌شود تا سیال در راستای این دو مرز ایدئال فرض شود و هیچ‌گونه تلفات مکانیکی بین سیال و مرزها نباشد تا بتوان جریانی با مرز نامحدود حول ناحیه‌ی چرخان ایجاد کرد. ناحیه محاسباتی به همراه شرط مرزی هر قسمت در شکل ۱ آورده شده است.

۵-۳- بررسی نحوه‌ی شبکه‌بندی

دقت و نحوه شبکه‌بندی، تأثیر فراوانی بر نتایج شبیه‌سازی دارد. در این مطالعه، هندسه حل به دو ناحیه چرخان و

¹ PISO

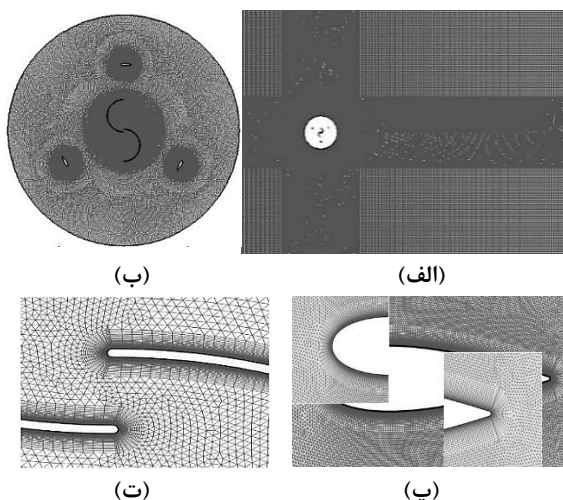
² SIMPLE

³ COUPLED

⁴ Interface

۵-۴- اعتبارسنجی حل و نتایج استقلال از شبکه

برای اطمینان حاصل کردن از صحت نحوه‌ی شبیه‌سازی باید نتایج حل عددی با نتایج معتبر آزمایشگاهی مقایسه گردد و در صورت انطباق نتایج، حل عددی قابل استناد است. از آنجاکه مطالعه حاضر روی ترکیب توربین داریوس و ساونیوس انجام پذیرفته است، در نتیجه باید نتایج هرکدام از توربین‌ها به صورت جداگانه بررسی و اعتبارسنجی گردد. برای این منظور، از نتایجی که آقای کستلی و همکاران [۲۳] بروی توربین داریوس و نتایجی که آقای بلکول و همکاران [۲۴] بروی توربین ساونیوس انجام داده‌اند، استفاده شده است. مشخصات هندسه‌های به کار گرفته شده مطابق با مدل‌های آزمایشگاهی است که در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است.



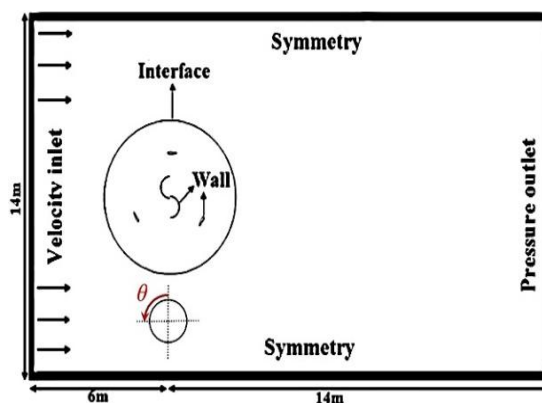
شکل ۲- شبکه‌بندی (الف) ناحیه ساکن، (ب) ناحیه چرخان، (پ) اطراف ایرفویل و (ت) اطراف پره ساونیوس

جدول ۱- مشخصات توربین داریوس

مشخصات توربین	کمیت
پروفیل پره	ناکا ۰۰۲۱
طول وتر (m)	۰/۰۸۵۸
قطر روتور (m)	۱/۰۳
ارتفاع (m)	۱/۴۵
مساحت (m ²)	۱/۲۳
صلبیت	۰/۵
تعداد پره	۳
سرعت جریان آزاد (m/s)	۹

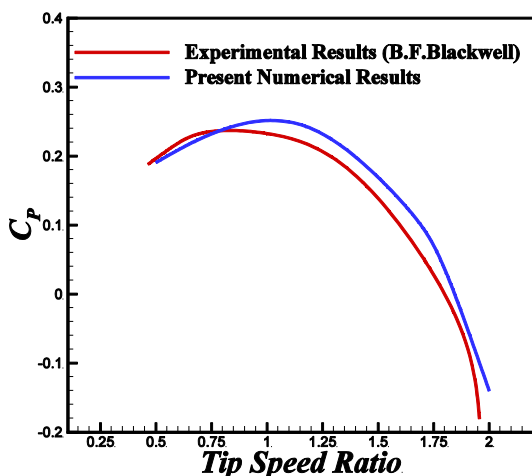
ساکن تقسیم می‌شود که ناحیه چرخان، دارای شبکه متحرک و از نوع لغزشی و ناحیه ساکن، دارای شبکه ثابت است. در ناحیه چرخان، به دلیل تأثیر چرخش توربین و پره‌های آن بر جریان و به تبع ایجاد گرادیان‌های شدید سرعت و فشار، همچنین بحث لایه مرزی، جدایش جریان و ایجاد گردابه در نزدیکی پره‌ها، شبکه‌بندی با دقت بیشتری انجام پذیرفته است. در فاصله بسیار نزدیک به پره‌ها یعنی زیر لایه لزج، مقدار عدد بدون بعد فاصله از دیواره، Y^+ اهمیت ویژه‌ای دارد. در رابطه ۲۰ این عدد معرفی شده است. u_* سرعت اصطکاکی، ν لزجت سینماتیکی و y فاصله به نزدیک‌ترین دیواره است.

$$Y^+ = \frac{u_* y}{\nu} \quad (20)$$



شکل ۱- رسم شماتیک دامنه‌ی شبیه‌سازی به همراه شرایط مرزی

در این مطالعه، برای افزایش دقت شبیه‌سازی از Y^+ برابر با یک استفاده شده است. برای این منظور، فاصله اولین شبکه تا پره، y برابر با $0/00005$ متر و با ضریب رشد $1/0.8$ به تعداد ۵۰ ردیف، شبکه‌ی منظم چهاروجهی در اطراف هر پره به عنوان لایه مرزی در نظر گرفته می‌شود. برای پوشش بهتر ناحیه‌ی چرخان و فضای اطراف لایه‌ی مرزی، از شبکه‌های کوچک مثلثی استفاده شده است. در ناحیه ساکن به دلیل کاهش تأثیر گرادیان‌های سرعت و فشار، شبکه‌ها درشت‌تر و از نوع چهاروجهی در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۲، نحوه شبکه‌بندی ناحیه‌های ساکن و چرخان به همراه بزرگ‌نمایی پره‌ها آورده شده است.



شکل ۴- مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی بلک‌ول با نتایج عددی حاضر برای توربین ساوینیوس

یکی از مهم‌ترین چالش‌های شبیه‌سازی عددی، زمان موردنیاز برای حل است که مستقیماً به نحوه شبکه‌بندی و اندازه‌ی شبکه‌ها مرتبط است. برای نشان دادن استقلال نتایج، به شبکه محاسباتی و همچنین بهینه‌سازی شبکه‌بندی از نظر اندازه، جهت کاهش حجم و زمان محاسبات، مطالعه‌ای در یک نسبت سرعت نوک خاص برای سه نوع شبکه‌بندی ریز، متوسط و بزرگ انجام پذیرفته است. مشخصات و اندازه‌ی شبکه‌ها در جدول‌های ۳ و ۴ آورده شده است. در نمودار شکل‌های ۵ و ۶، ضریب گشتاور کل پره‌های توربین داریوس و ساوینیوس در یک دور گردش بعد از همگرایی کامل، بر حسب زاویه‌ی دوران (ازیموت) آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، برای دو نوع شبکه‌بندی متوسط و ریز، نتایج بر هم منطبق شده و نشان می‌دهد که ریزتر کردن اندازه شبکه‌ها تأثیری بر نتیجه نخواهد گذاشت. در نتیجه برای شبیه‌سازی به‌منظور کاهش زمان محاسبه، از شبکه متوسط با مشخصات گفته شده در جداول ۳ و ۴ استفاده شده است.

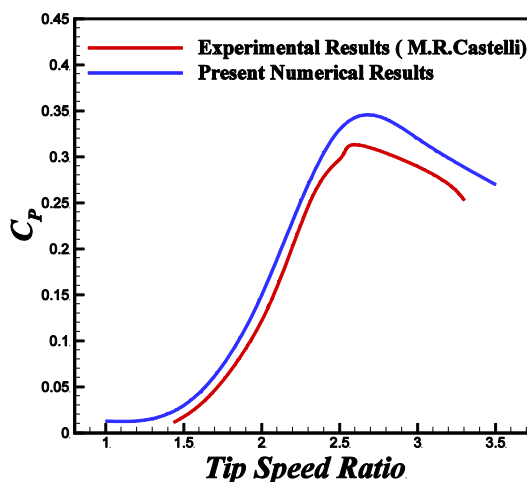
جدول ۳- شبکه‌های در نظر گرفته‌شده برای توربین

داریوس در سرعت نوک ۳		
تعداد سلول‌های روی ابرفویل (بالا و پایین)	تعداد سلول‌های ناحیه‌ی محاسباتی	شبکه
۵۰×۵۰	۳۸۹۸۹۰	درشت
۱۰۰×۱۰۰	۴۱۴۴۶۴	متوسط
۱۵۰×۱۵۰	۴۴۸۳۷۴	ریز

جدول ۲- مشخصات توربین ساوینیوس

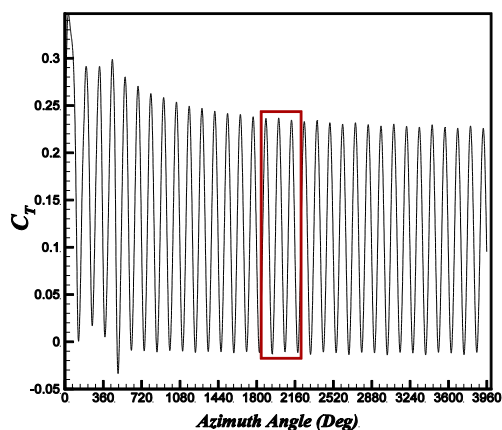
کمیت	مشخصات توربین
۰/۹۵۲۴	قطر روتور (m)
۱	ارتفاع (m)
۰/۹۵۲۴	مساحت (m ²)
۰/۱	نسبت هم‌پوشانی پره‌ها
۲	تعداد پره
۷	سرعت جریان آزاد (m/s)

در نمودار شکل‌های ۳ و ۴، نتایج ضریب میانگین توان بر حسب نسبت سرعت نوک برای حل‌های عددی و آزمایشگاهی بررسی شده است. مشاهده می‌گردد که حل عددی حاضر، به‌خوبی قادر به پیش‌بینی نتایج آزمایشگاهی است و از تطابق بالایی برخوردار می‌باشند. اختلاف نتایج حل عددی به‌صورت دوبعدی با آزمایشگاهی به‌خصوص در نسبت سرعت نوک بالا، دلایل مختلفی دارد که عمده‌ترین آن، نادیده گرفتن اثرات گردابه‌های نوک در پره‌های توربین واقعی است. علت دیگر، لحاظ نکردن بعضی از اجزای توربین واقعی، نظیر بازوهای نگهدارنده‌ی پره‌های توربین است که نمی‌توان آن‌ها را در شبیه‌سازی دوبعدی وارد کرد [۲۵]؛ در نتیجه اختلاف نتایج که بیشتر ناشی از صرف‌نظر کردن از برخی اتلافات موجود در حل دوبعدی است، به‌دلیل محدود بودن، قابل چشم‌پوشی است و می‌توان اعتبار روش حل عددی حاضر را تأیید کرد.



شکل ۳- مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی کستلی با نتایج عددی حاضر برای توربین داریوس

کند که نشان می‌دهد، هنوز به حل پایدار نرسیده‌ایم، ولی از دور ششم به بعد (زاویه ۱۸۰۰ تا ۲۱۶۰ درجه)، نمودار به‌صورت همگرا درآمده است. به‌گونه‌ای که نتایج محنی ضریب گشتاور، در هر دور دوران اختلاف ناچیزی با دور قبل دارد؛ در نتیجه در این شبیه‌سازی از دور ششم به بعد، نتایج را استخراج نموده تا از همگرایی و به‌تبع صحت حل، اطمینان حاصل شود.



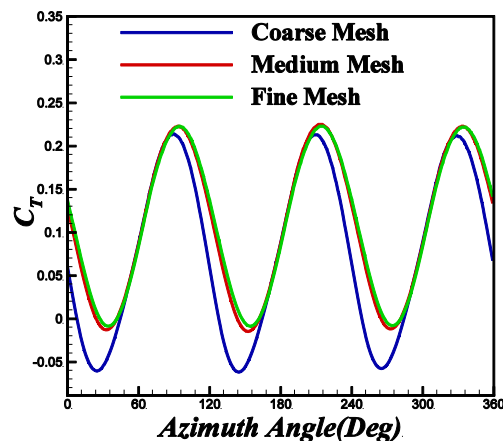
شکل ۷- همگرایی حل در نمودار ضریب گشتاور برحسب زاویه دوران توربین داریوس

۶- تشریح شرایط حل و هندسه‌های مورد مطالعه

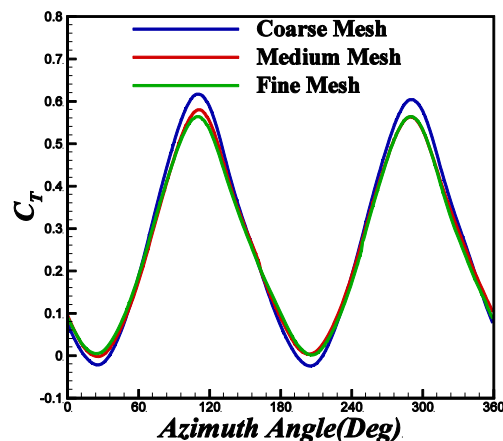
در این مطالعه، از ترکیب توربین داریوس و ساوینوس با مشخصات آورده شده در جداول ۱ و ۲ استفاده شده است، با این تفاوت که قطر روتور توربین ساوینوس ۰/۵ متر در نظر گرفته شده است و پره‌های ساوینوس در بین پره‌های داریوس، در مرکز روتور قرار گرفته می‌شود. برای بهبود عملکرد مدل ترکیبی، تأثیر صلبیت ایرفویل، σ و زاویه کمان پرهی ساوینوس، Φ بررسی می‌گردد. در شکل ۸، پارامترهای مورد بررسی مشخص شده است. تأثیر صلبیت با تغییر طول وتر ایرفویل، C و تأثیر طول کمان، با تغییر زاویه Φ بررسی می‌گردد. مشخصات هندسه‌های شبیه‌سازی شده در جدول ۵ آورده شده است. سرعت جریان آزاد برای شبیه‌سازی، ۷ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است و سایر مشخصات ساختاری نظیر، تعداد پره‌های توربین داریوس و ساوینوس، زاویه حمله انتخابی برای پره‌های داریوس که صفر درجه است، همچنین نحوه‌ی شبکه‌بندی، شرایط مرزی و مدل آشفتگی، همانند اعتبارسنجی، برای مدل ترکیبی نیز تکرار می‌شود.

جدول ۴- شبکه‌های در نظر گرفته‌شده برای توربین

شبکه	تعداد سلول‌های ناحیه‌ی محاسباتی	تعداد سلول‌های روی پره (بالا و پایین)
درشت	۲۵۷۷۶۶	۲۵۰×۲۵۰
متوسط	۳۰۱۸۹۸	۳۰۰×۳۰۰
ریز	۳۵۳۴۹۶	۳۵۰×۳۵۰



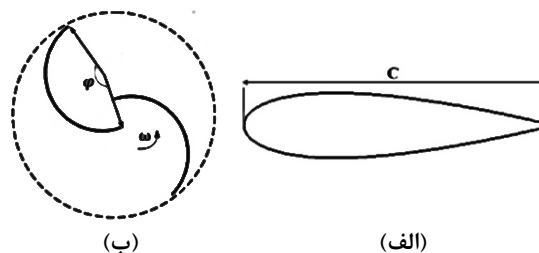
شکل ۵- تأثیر اندازه‌ی شبکه بر ضریب گشتاور در توربین داریوس



شکل ۶- تأثیر اندازه‌ی شبکه بر ضریب گشتاور در توربین ساوینوس

نکته‌ی حائز اهمیت دیگر در انجام شبیه‌سازی، تعداد دوران‌های توربین تا زمان همگرایی حل است. برای درک بهتر از نحوه همگرایی حل در شکل ۷، نتایج ضریب گشتاور توربین داریوس برحسب زاویه دوران، آورده شده است. مطابق با نتایج، در دوره‌های اولیه، نمودار روند قابل‌قبولی را طی نمی‌-

همان‌گونه که در شکل ۹ مشاهده می‌گردد، توربین ترکیبی با بهره‌گیری از توربین ساونیوس، توانسته با عبور از ناحیه‌ی مرده، گشتاور موردنیاز جهت راه‌اندازی را کسب نماید. مطابق با نمودار شکل ۹ تا نسبت سرعت نوک ۱/۵، ضریب توان سیر صعودی داشته است، ولی از آنجا که توربین ساونیوس نمی‌تواند با سرعتی بیشتر از سرعت باد بچرخد، در نتیجه توان آن در نسبت سرعت ۱/۵ تا ۲ به صفر میل می‌نماید و به تبع توان توربین ترکیبی نیز در این گستره‌ی نسبت سرعت نوک، کاهش یافته است. در نسبت سرعت‌های بالا، توربین داریوس با تکیه بر نیروی برآ، توان بالایی تولید می‌کند که همین امر موجب افزایش توان مدل ترکیبی در نسبت سرعت ۲ تا ۲/۵ شده است. با افزایش نسبت سرعت نوک در محدوده‌ی ۲/۵ تا ۳/۵ به دلیل کاهش زاویه‌ی حمله و به تبع کاهش نیروی برآ، توان توربین داریوس کاهش یافته است؛ همچنین با افزایش سرعت، پره‌های توربین ساونیوس قادر به چرخش نیستند و همانند ترمز عمل می‌کنند. این دو عامل سبب کاهش توان توربین ترکیبی در این گستره از نسبت سرعت نوک شده است. اشکال اساسی توربین ترکیبی، کاهش بیشینه‌ی ضریب توان است. در مدل ترکیبی اولیه بیشینه ضریب توان نسبت به توربین داریوس، در حدود ۲۵ درصد کاهش یافته است که می‌توان با بهبود آیرودینامیک پره‌ها، این مقدار را به حداقل رساند. مزیت دیگر توربین ترکیبی علاوه بر خود راه‌انداز کردن توربین، یکنواخت کردن منحنی عملکرد است که باعث می‌شود، توربین در گستره وسیع‌تری از نسبت سرعت نوک، کارکرد مناسب داشته باشد. مطابق با شکل ۹، توربین داریوس در نسبت سرعت بین ۲/۵ تا ۳/۵ عملکرد بهینه دارد؛ در صورتی که توربین ترکیبی در محدوده‌ی ۱/۵ تا ۳ عملکرد یکنواخت و بهینه دارد که سبب افزایش کارکرد توربین گردیده است. در شکل ۱۰، نتایج ضریب گشتاور برحسب زاویه دوران (ازیموت) توربین، بعد از همگرایی حل، در نسبت سرعت‌های ۱/۵ و ۱ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، توربین ترکیبی با بهره‌گیری از گشتاور بالای توربین ساونیوس، گشتاور ناچیز توربین داریوس را جبران نموده است و ضریب گشتاور میانگین را در نسبت سرعت نوک ۱/۵ تا ۶ برابر و در ۱ تا ۷ برابر افزایش داده است.



شکل ۸- نمایش پارامترهای موردبررسی، الف) طول وتر ایرفویل و ب) زاویه‌ی کمان پره‌ی ساونیوس

جدول ۵- مشخصات پارامترهای اصلی مدل‌های

شبیه‌سازی شده			
φ (Deg)	σ	C (m)	Hybrid Model
۱۸۰	۰/۵	-۰/۰۸۵۸	۱
۱۸۰	۰/۷۵	-۰/۱۲۸۷	۲
۱۸۰	۱	-۰/۱۷۱۶	۳
۱۸۰	۱/۲۵	-۰/۲۱۴۵	۴
۱۸۰	۱/۵	-۰/۲۵۷۴	۵
۱۷۰	۰/۵	-۰/۰۸۵۸	۶
۱۶۰	۰/۵	-۰/۰۸۵۸	۷
۱۵۰	۰/۵	-۰/۰۸۵۸	۸
۱۴۰	۰/۵	-۰/۰۸۵۸	۹
۱۵۰	۰/۷۵	-۰/۱۲۸۷	۱۰
۱۵۰	۱	-۰/۱۷۱۶	۱۱

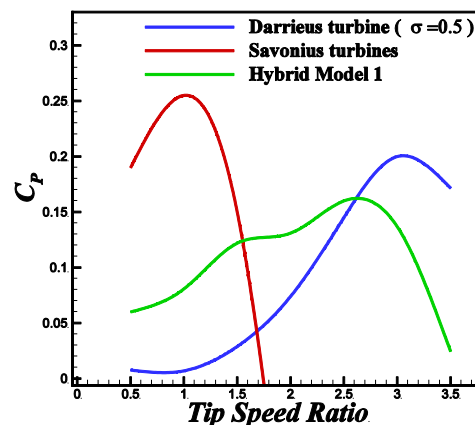
۷- نتایج

۷-۱- بررسی عملکرد توربین ترکیبی اولیه

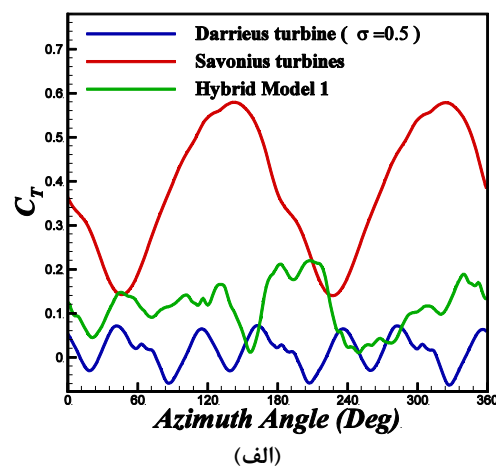
در شکل ۹، نتایج ضریب توان بر حسب نسبت سرعت نوک، برای توربین‌های داریوس، ساونیوس و مدل ترکیبی اولیه آورده شده است. مشکل اساسی توربین‌های داریوس، گشتاور راه‌اندازی کم در نسبت سرعت نوک پایین است. در لحظه‌ی شروع به کار این نوع توربین در نسبت سرعت نوک بین ۰/۵ تا ۱/۵، محدوده‌ای موسوم به ناحیه مرده^۱ وجود دارد که ضریب گشتاور دارای مقادیر منفی یا بسیار ناچیز است. در این محدوده توربین داریوس قادر به تولید گشتاور کافی جهت راه‌اندازی نمی‌باشد [۵]؛ اما توربین ساونیوس به دلیل سطح تماس بیشتر با جریان باد و با تکیه بر نیروی پسا، در نسبت سرعت نوک‌های پایین، گشتاور بالایی تولید می‌نماید.

^۱ Dead Band

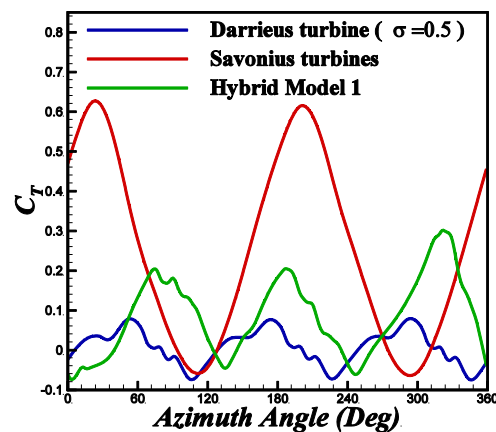
۷-۲- تأثیر صلبیت ایرفویل بر عملکرد توربین ترکیبی
 صلبیت، یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد توربین بادی داریوس است. در این مطالعه، با افزایش طول وتر ایرفویل‌های توربین ترکیبی، مطابق با جدول ۵، صلبیت افزایش داده شده است. در شکل ۱۱، نتایج ضریب توان برحسب نسبت سرعت نوک برای مدل‌های متفاوت ترکیبی آورده شده است. با افزایش طول وتر به جای کاهش شعاع توربین، به منظور دستیابی به صلبیت بالاتر، رینولدز جریان نیز افزایش می‌یابد که در نتیجه آن زاویه واماندگی و همچنین نسبت ضریب برا به پسا افزایش می‌یابد که سبب بهبود عملکرد توربین در لحظه راه‌اندازی می‌شود و همچنین سطح پره افزایش یافته که سبب افزایش نیروهای آیرودینامیکی در حالت توقف توربین می‌شود که باز هم سبب افزایش گشتاور راه‌اندازی می‌گردد. مطابق با نتایج شکل ۱۱، با افزایش صلبیت ایرفویل‌ها، بیشینه ضریب توان در نسبت سرعت نوک پایین‌تر رخ داده که این موضوع سبب محدودیت گستره عملکرد بهینه‌ی توربین می‌شود. همچنین با افزایش صلبیت، ابتدا ضریب توان افزایش و بعد کاهش یافته است؛ چراکه افزایش صلبیت، مخصوصاً در نسبت سرعت نوک‌های بالا، سبب می‌شود که توربین همانند یک جسم صلب عمل کرده و جریان قادر به عبور از بین پره‌ها نمی‌باشد که این امر به شدت سبب کاهش عملکرد توربین می‌شود؛ همچنین صلبیت بالا، باعث افزایش مصالح ساخت و در نتیجه افزایش وزن و هزینه ساخت توربین می‌شود که امری نامطلوب است؛ در نتیجه مدل‌های ۴ و ۵ که دارای صلبیت بالایی هستند، با وجود افزایش ضریب توان در نسبت سرعت پایین و بهبود قابلیت راه‌اندازی خودکار، به دلیل محدوده‌ی عملکرد ناچیز، مناسب نمی‌باشند. مدل ۱ نیز، با وجود محدوده عملکرد وسیع، دارای بیشینه ضریب توان، محدودی است. در نتیجه مدل‌های ۲ و ۳ هم از نظر محدوده‌ی عملکرد بهینه‌ی توربین و هم از نظر بیشینه ضریب توان، بهتر از سایر مدل‌های بررسی شده، می‌باشند که مدل ۲ با صلبیت ۰/۷۵ با در نظر گرفتن محدوده عملکرد بیشتر و هزینه‌ی ساخت پایین‌تر با وجود بهبود کمتر گشتاور راه‌اندازی و بیشینه ضریب توان، نسبت به مدل ۳، مقرون به صرفه‌تر است؛ ولی برای بررسی پارامتر دیگر هر دو مدل به عنوان حالت‌های بهینه، انتخاب و بررسی می‌گردند. در شکل ۱۲ نتایج ضریب گشتاور برحسب زاویه دوران



شکل ۹- مقایسه‌ی منحنی عملکرد توربین‌های داریوس، ساونیوس و ترکیبی



(الف)

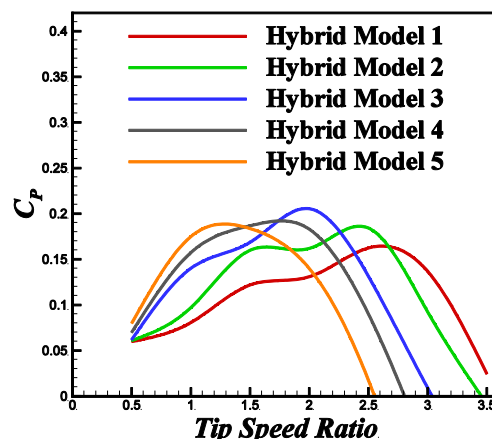


(ب)

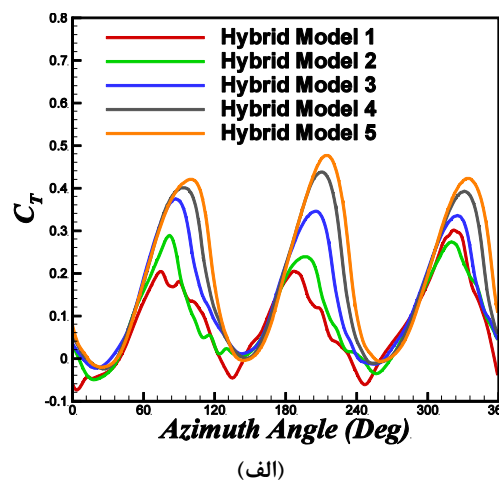
شکل ۱۰- مقایسه‌ی ضریب گشتاور توربین‌های داریوس، ساونیوس و ترکیبی در نسبت سرعت نوک (الف) ۰/۵ و (ب) ۱

توربین ترکیبی، بعد از همگرایی حل، در نسبت سرعت‌های ۱ و ۲/۵، برای صلبیت‌های مختلف، آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش صلبیت در نسبت سرعت نوک پایین، باعث افزایش ضریب گشتاور می‌شود. در شکل ۱۲-الف، بالاترین گشتاور مربوط به مدل ترکیبی ۵ با بیشترین صلبیت است؛ اما افزایش صلبیت ضریب گشتاور را کاهش داده است و در نسبت سرعت نوک ۲/۵ که در شکل ۱۲-ب آورده شده است، بیشترین ضریب گشتاور مربوط به مدل ۲ با صلبیت ۰/۷۵ است که نشان از کاهش عملکرد توربین با افزایش صلبیت در نسبت سرعت‌های بالا است.

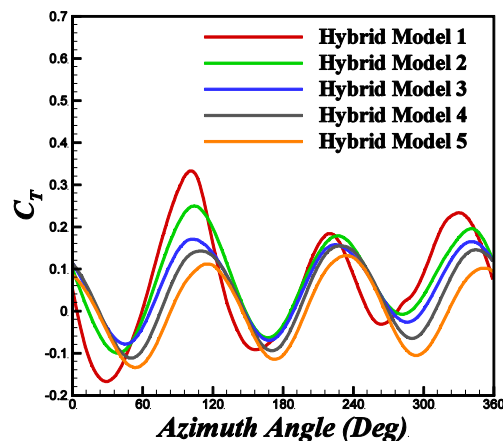
در شکل ۱۳، ضریب گشتاور ایجاد شده توسط ایرفویل اول مدل‌های ترکیبی ۱ و ۳، در طول یک دور دوران، در نسبت سرعت نوک ۲، آورده شده است. در این نسبت سرعت، مدل ترکیبی ۱ با صلبیت ۰/۵، کمترین ضریب توان را دارد. مطابق با شکل ۱۳، بیشترین ضریب گشتاور زمانی رخ داده که ایرفویل در زاویه‌ای بین ۷۰ تا ۱۴۰ قرار گرفته که بالادست جریان محسوب می‌گردد و ایرفویل، حداکثر نیروی برا را تولید می‌کند. در واقع عامل اصلی ایجاد حرکت و تولید گشتاور نیروی برا است که در بالادست جریان تولید نیروی برا خیلی بیشتر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این بازه، ایرفویل مدل ترکیبی ۳، با تکیه بر نیروی برا بیشتر، ضریب گشتاور بیشتری تولید کرده و در نتیجه ضریب توان نیز افزایش یافته است. در واقع ایرفویل با صلبیت ۱ به دلیل سطح تماس بیشتری که با جریان باد دارد و همچنین ایجاد اختلاف فشار بیشتر بین سطح بالا و پایین ایرفویل و در نتیجه افزایش نیروی لیفت، گشتاور بیشتری تولید می‌کند؛ ولی در پایین دست جریان، افزایش صلبیت سبب شده است که جریان نتواند به راحتی از بین پره‌ها عبور کند و در پایین دست جریان نیروی لیفت بسیار کمی تولید شده و برعکس ایرفویل با صلبیت ۰/۵ نیروی لیفت بیشتری در پایین دست تولید نموده است؛ ولی همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشینه ضریب گشتاور تولید شده توسط ایرفویل با صلبیت ۱ بیشتر است و به تبع میانگین ضریب گشتاور تولید شده توسط ایرفویل با صلبیت ۱ نیز بیشتر است. در نتیجه برای مقایسه بهتر این دو مدل می‌بایست در زاویه‌ای که اهمیت بیشتری دارد صورت پذیرد که برای این موضوع مقایسه بین این دو ایرفویل در زاویه ۱۲۰ درجه انجام پذیرفته است.



شکل ۱۱- مقایسه‌ی منحنی عملکرد توربین‌های ترکیبی با صلبیت متفاوت

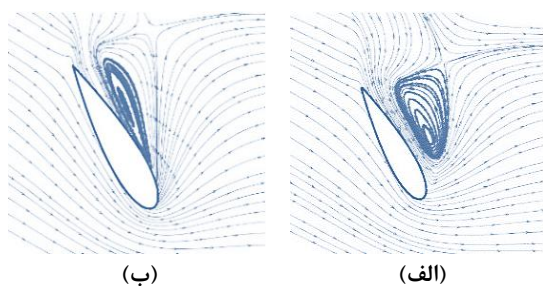


(الف)

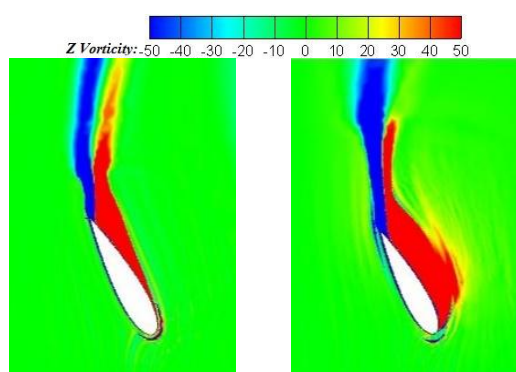


(ب)

شکل ۱۲- مقایسه‌ی ضریب گشتاور توربین‌های ترکیبی با صلبیت متفاوت در نسبت سرعت نوک الف) ۱ و ب) ۲/۵

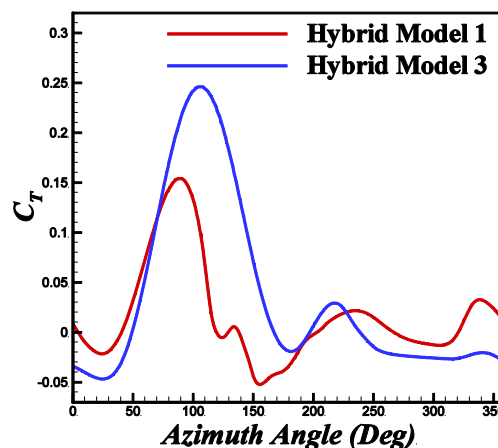


شکل ۱۴- میدان جریان اطراف ایرفویل اول مدل‌های ترکیبی (الف) ۱ و (ب) ۳



شکل ۱۵- کانتور گردابه حول ایرفویل اول مدل ترکیبی (الف) ۱ و (ب) ۳

گردیده است. در شکل ۱۶، منحنی عملکرد مدل‌های ترکیبی با زاویه متفاوت کمان پره‌ی ساونویوس، آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نسبت سرعت نوک ۰/۵ تا ۲/۵، بهترین عملکرد مربوط به مدل ترکیبی ۱ با بیشترین زاویه‌ی کمان (۱۸۰ درجه) است؛ در نتیجه کاهش زاویه‌ی کمان، گشتاور راه‌اندازی را کاهش می‌دهد، اما در نسبت سرعت نوک ۲/۵ تا ۳/۵، مدل ترکیبی ۸ با زاویه کمان ۱۵۰ درجه، بیشترین ضریب توان را دارد. در واقع کاهش زاویه کمان در نسبت سرعت‌های بالا تا زاویه ۱۵۰ درجه عملکرد را بهبود بخشیده است و بعدازآن در زاویه‌ی ۱۴۰، ضریب توان کاهش یافته است؛ در نتیجه اگر اختلاف ناچیز کاهش ضریب توان در نسبت سرعت نوک ۰/۵ تا ۲/۵، با مدل ترکیبی ۱، نادیده گرفته شود، زاویه بهینه کمان پره‌ی ساونویوس، ۱۵۰ درجه است که طی آن بیشینه ضریب توان در حدود ۱۲ درصد افزایش یافته است. در شکل ۱۷، ضریب گشتاور کل پره‌ها (پره‌های داریوس و ساونویوس) در یک دور دوران



شکل ۱۳- مقایسه ضریب گشتاور ایرفویل اول در طول یک دور دوران در نسبت سرعت نوک ۲

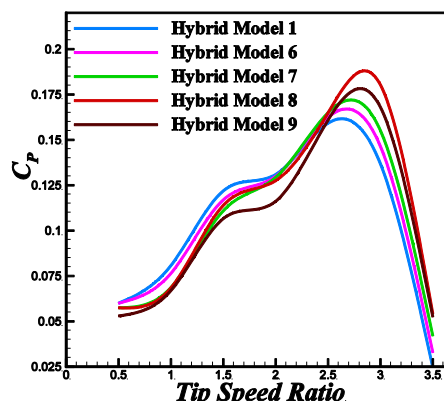
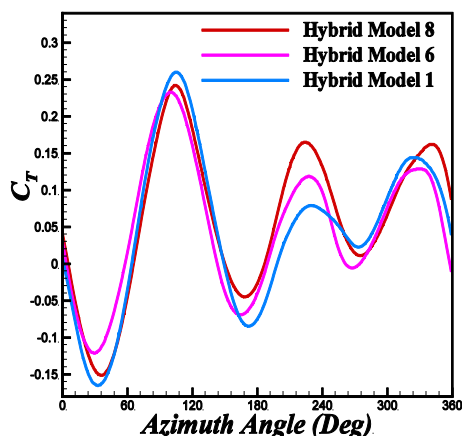
علت افزایش ضریب گشتاور در بالادست را می‌توان در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مشاهده کرد. در شکل ۱۴، میدان جریان حول ایرفویل اول مدل‌های ترکیبی ۱ و ۳ در زاویه ۱۲۰ درجه، آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در قسمت کم‌فشار ایرفویل، گردابه‌هایی ایجاد شده که در مدل ترکیبی ۱ با صلبیت ۰/۵ این گردابه‌ها وسعت بیشتری داشته است که این امر سبب کاهش گشتاور تولیدی نسبت به مدل ۳ شده است؛ همچنین خطوط جریان اطراف ایرفویل مدل ۳ هموارتر است که سبب افزایش عملکرد بهینه توربین در بالادست جریان شده است. در شکل ۱۵، کانتور گردابه‌های تشکیل‌شده حول ایرفویل اول توربین‌های ترکیبی ۱ و ۳ آورده شده است. مشاهده می‌شود که افزایش صلبیت ایرفویل تا مقدار یک، بر کاهش رشد گردابه‌های تولید شده اطراف ایرفویل که به شدت عملکرد توربین را در بالادست کاهش می‌دهد، تأثیر گذاشته است و با یکنواخت نمودن جریان اطراف ایرفویل که با گرداب‌های شدیدی روبرو است، توان توربین را بهبود بخشیده است.

۷-۳- تأثیر تغییر زاویه‌ی کمان پره ساونویوس بر عملکرد توربین ترکیبی

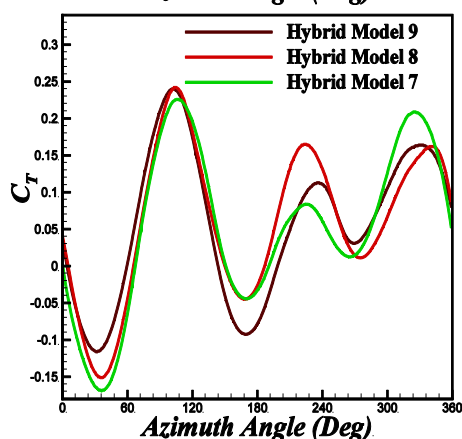
زاویه‌ی کمان پره‌های ساونویوس، یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد توربین است. در این مطالعه، با تغییر زاویه کمان در ۵ مدل ترکیبی، مطابق با جدول ۵، تأثیر این پارامتر بر عملکرد آیرودینامیک توربین ترکیبی بررسی

می‌کند؛ همچنین گردابه‌های به وجود آمده در بالادست پره-ی مدل ۱، بزرگ‌تر است و خطوط جریان حول روتور ساونیوس مدل ترکیبی ۸، هموارتر است که این عوامل، سبب افزایش عملکرد مدل ترکیبی ۸ در نسبت سرعت نوک ۳ شده است.

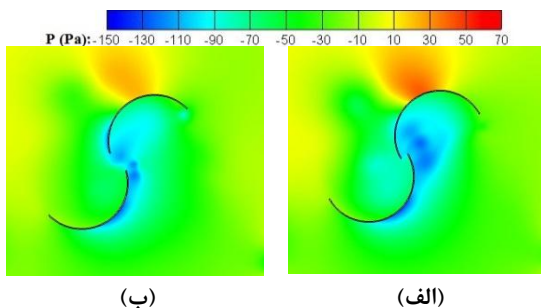
توربین، در نسبت سرعت نوک ۳، برای مدل‌های ترکیبی با زاویه‌ی کمان متفاوت، آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضریب گشتاور در مدل ترکیبی ۸ با زاویه‌ی کمان ۱۵۰ درجه، از سایر مدل‌ها بیشتر است و در اکثر زاویه‌های دوران دارای مقدار مثبت است و بیشترین میانگین را دارد.



شکل ۱۶- مقایسه منحنی عملکرد مدل‌های ترکیبی ۱، ۶، ۷، ۸، ۹



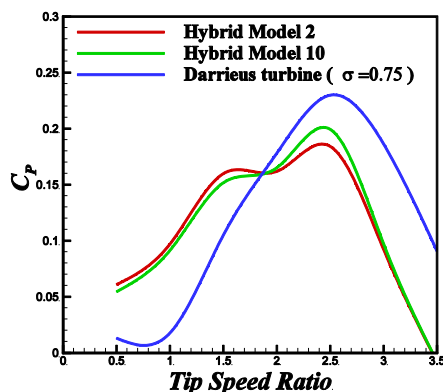
شکل ۱۷- مقایسه‌ی ضریب گشتاور مدل‌های ترکیبی ۱، ۶، ۷، ۸، ۹



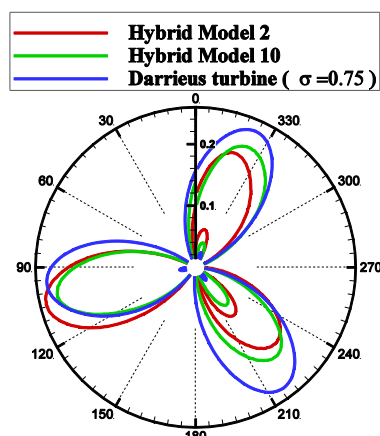
شکل ۱۸- میدان فشار حول پره‌های ساونیوس برای مدل‌های ترکیبی الف) ۱ و ب) ۸ در نسبت سرعت نوک ۳

در شکل ۱۸، میدان فشار حول پره‌های ساونیوس در زاویه‌ی ۱۲۰ درجه، برای مدل‌های ترکیبی ۱ و ۸، در نسبت سرعت نوک ۳ با حداکثر اختلاف ضریب توان، مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ناحیه کم‌فشار در پشت پره‌ی مقعر (پره‌ی پایینی)، به‌گونه‌ای پدید آمده است که در مدل ترکیبی ۸ به چرخش پادساعت‌گرد توربین کمک می‌کند. مطابق با شکل ۱۸، این ناحیه‌ی کم‌فشار در قسمت درون پره محدب در مدل ترکیبی ۱، وسعت بیشتری داشته است که این سبب مکش پره‌ی محدب و جلوگیری از شتاب گرفتن توربین می‌شود؛ در صورتی‌که در مدل ترکیبی ۸، نه‌تنها محدوده‌ی کم‌فشار داخل پره‌ی محدب کوچک‌تر است، بلکه قسمتی از ناحیه کم‌فشار به وجود آمده در بیرون پره محدب، به چرخش و شتاب گرفتن توربین کمک می‌کند. در شکل ۱۹، میدان جریان حول پره‌های ساونیوس مدل ترکیبی ۱ و ۸، در نسبت سرعت نوک ۳، مقایسه شده است. به‌خوبی مشاهده می‌شود که گردابه‌های به وجود آمده درون پره محدب، در مدل ترکیبی ۱، از نظر بزرگی و مکان تشکیل، نسبت به مدل ۸، به‌گونه‌ای است که حرکت پره‌ها را کند

و قوس‌های کوچک، مربوط به ضرایب گشتاور منفی است که در نمودار قطبی به این صورت به تصویر درآمده است.

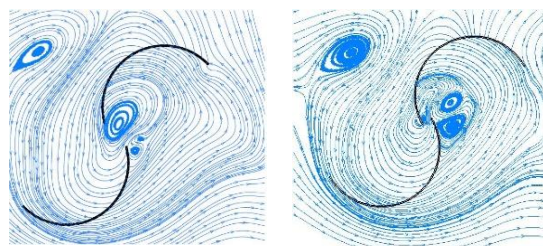


شکل ۲۰- مقایسه منحنی عملکرد مدل‌های ترکیبی ۲ و ۱۰ و توربین داریوس با صلبیت ۰/۷۵



شکل ۲۱- مقایسه‌ی ضریب گشتاور مدل‌های ترکیبی ۲ و ۱۰ و توربین داریوس با صلبیت ۰/۷۵

مطابق با شکل ۲۲، مدل ترکیبی ۱۱ با زاویه کمان ۱۵۰ درجه و صلبیت ایرفویل ۱، بیشینه ضریب توان را نسبت به مدل ترکیبی ۳ با زاویه کمان ۱۸۰ درجه، حدود ۹ درصد افزایش داده است؛ همچنین کاهش ۲۰ درصدی بیشینه توان مدل ترکیبی ۳ نسبت به توربین داریوس را به ۱۱ درصد رسانده است که این نشان از بهبود عملکرد مدل ترکیبی ۱۰ نسبت به ۱۱ از نظر بهبود بیشینه‌ی ضریب توان است. در شکل ۲۳، نتایج ضریب گشتاور در یک دور کامل مدل‌های ترکیبی ۳، ۱۱ و توربین داریوس با صلبیت ۱، در نسبت سرعت نوک ۲، آورده شده است که در آن نتایج گشتاورهای



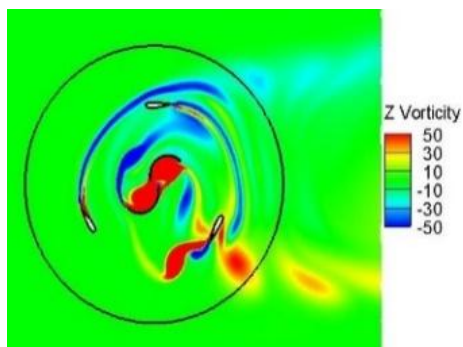
شکل ۱۹- میدان جریان حول پره‌های ساونیوس برای مدل‌های ترکیبی الف) ۱) ب) ۸ در نسبت سرعت نوک ۳

۴-۷- تأثیر ترکیب پارامترهای بهینه‌شده بر عملکرد توربین ترکیبی

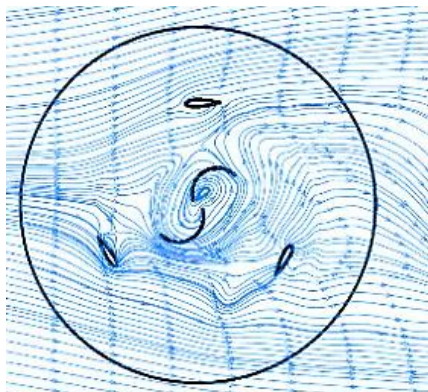
در این مطالعه، طول وتر ایرفویل و زاویه کمان پره‌ی ساونیوس، بهینه گردید. با ترکیب پارامترهای اصلاح‌شده، می‌توان قابلیت‌های توربین ترکیبی را بهبود بخشید. در شکل‌های ۲۰ و ۲۲، منحنی عملکرد توربین ترکیبی که دارای پره ساونیوس با زاویه کمان ۱۵۰ درجه و ایرفویل با دو صلبیت ۰/۷۵ و ۱ است، با حالت‌های اولیه (مطابق با جدول ۵) و توربین داریوس، مقایسه گردیده است. مطابق با شکل ۲۰، مدل ترکیبی ۱۰ با زاویه کمان ۱۵۰ درجه و صلبیت ایرفویل ۰/۷۵، بیشینه ضریب توان را نسبت به مدل ۲ با زاویه کمان ۱۸۰ درجه، حدود ۱۰ درصد افزایش داده است؛ اما در نسبت سرعت نوک ۰/۵ تا ۱/۵، ضریب توان کاهش یافته است؛ همچنین مشاهده می‌شود که مدل ترکیبی بهینه‌شده ۱۰، مشکل اساسی مدل ترکیبی در کاهش بیشینه توان نسبت به توربین داریوس را بهبود بخشیده و کاهش ۲۷ درصدی بیشینه توان مدل ۲ را به ۱۷ درصد رسانده است. در شکل ۲۰، نتایج ضریب گشتاور در یک دور کامل مدل‌های ترکیبی ۲ و ۱۰ و توربین داریوس با صلبیت ۰/۷۵، در نسبت سرعت نوک ۲/۵ آورده شده است. مشاهده می‌گردد که ضریب گشتاور توربین داریوس، نسبت به مدل‌های ترکیبی، بیشتر است و مدل ترکیبی ۱۰ نسبت به ۲ گشتاور بیشتری را در اکثر زاویه‌ها تولید کرده است. مطابق با شکل ۲۱ نتیجه می‌گردد که بیشینه گشتاور تولیدی توسط پره‌ها در سه زاویه خاص تکرار می‌شود که محدوده‌ی این زاویه‌ها برای مدل‌های متفاوت، نزدیک به هم است. نکته‌ی دیگر که در این نمودار مشاهده می‌شود، وجود قوس‌های کوچک درون قوس‌های بزرگ است. قوس‌های بزرگ، مربوط به ضرایب گشتاور مثبت

و به‌خصوص گردابه‌های به وجود آمده در قسمت مرکزی روتور به‌خوبی قابل‌رؤیت است.

در پایان با توجه به نتایج بررسی‌شده، به دلیل محدوده‌ی عملکرد بهینه بیشتر و همچنین هزینه‌ی ساخت کمتر، باوجود کاهش ۸ درصدی بیشینه‌ی ضریب توان، مدل ترکیبی ۱۰ با صلبیت ۰/۷۵ نسبت به مدل ۱۱ با صلبیت ۱، ترجیح داده می‌شود و مدل ترکیبی ۱۰ به‌عنوان مدل ترکیبی بهینه‌شده معرفی می‌شود.



(الف)



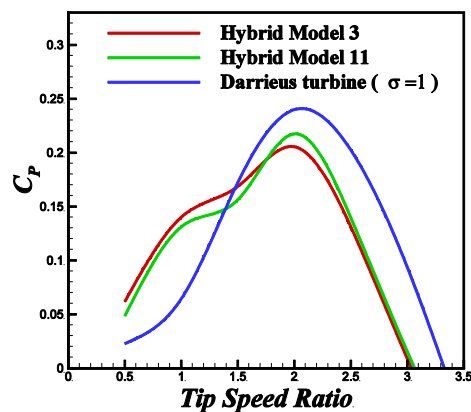
(ب)

شکل ۲۴- الف) کانتر گردابه و ب) خطوط جریان حول روتور مدل ترکیبی ۱۱

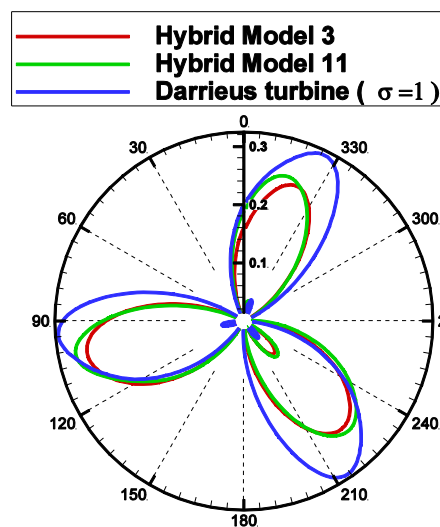
۷-۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، توربین بادی محور عمودی با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی و به‌صورت دوبعدی، شبیه‌سازی شد. نتایج اعتبارسنجی گویای آن است که روش به کار گرفته‌شده، قادر به پیش‌بینی و تحلیل جریان پیچیده‌ی حول روتور هر دو نوع توربین داریوس و ساونیبوس است؛ همچنین مشکل اساسی توربین داریوس در شروع خودکار به دلیل

تولید شده توسط توربین‌های مختلف در زاویه‌های چرخش متفاوت و در نسبت سرعتی مقایسه شده است که توربین‌ها بیشترین میانگین گشتاور را تولید می‌کنند.



شکل ۲۲- مقایسه منحنی عملکرد مدل‌های ترکیبی ۱۱ و ۳ و توربین داریوس با صلبیت ۱



شکل ۲۳- مقایسه‌ی ضریب گشتاور مدل‌های ترکیبی ۱۱ و ۳ و توربین داریوس با صلبیت ۱

در شکل ۲۴، میدان گردابه و خطوط جریان حول روتور توربین ترکیبی مدل ۱۱، در زاویه ۱۲۰ درجه، آورده شده است. در شکل ۲۴-الف، گردابه‌های تشکیل‌شده حول روتور، مشاهده می‌گردند که سبب ایجاد ناحیه‌های کم‌فشار می‌شوند که این نواحی به سمت پایین‌دست حرکت می‌کنند. برای درک بهتر رفتار جریان، در شکل ۲۴-ب، جریان اطراف پره‌ها

کمک به عبور از ناحیه‌ی مرده (نسبت سرعت 0.5 تا 1.5)، کاهش 25 درصدی بیشینه توان توربین ترکیبی اولیه نسبت به توربین داریوس را به 17 درصد رسانده است.

۸- مراجع

- [1] Tummala A, Velamati RK, Sinha DK, Indraj V, Krishna VH (2016) A review on small scale wind turbines. *Renew Sustainable Energy Rev* 56: 1351-1371.
- [2] Leung DYC, Yang Y (2012) Wind energy development and its environmental impact: A review. *Renew Sustainable Energy Rev* 16: 1031-1039.
- [3] Mahale P, Jangid N, Gite A (2015) Vertical axis wind turbine: A lucid solution for global small scale energy crisis. *J Academia Ind Res* 3(8): 393-396.
- [4] Islam M, Ting DSK, Fartaj A (2008) Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. *Renew Sustainable Energy Rev* 12: 1087-1109.
- [5] Bos R (2012) Self-starting of a small urban Darrieus rotor. Delft University of Technology.
- [6] Saha UK, Rajkuma MJ (2006) On the performance analysis of Savonius rotor with twisted blades. *Renew Energy* 31(11): 1776-1788.
- [7] Amiri M, Kahrom M, Kianifar A (2015) Numerical and experimental investigation on effects of the primary and Secondary overlaps on the performance of Savonius wind turbine. *Modares Mech Eng* 15(6): 123-131.
- [8] Ghosh P, Kamoji MA, Kedare SB, Prabhu SV (2009) Model testing of single- and threestage modified Savonius rotors and viability study of modified Savonius pump rotor systems. *Int J Green Energy* 6(1): 22-41.
- [9] Takao M, Kuma H, Maeda T, Kamada Y, Oki M, Minoda M (2009) A straight-bladed vertical axis wind turbine with a directed guide vane row-Effect of guide vane geometry on the performance. *J thermal Sci* 18(1): 54-57.
- [10] McLaren K, Tullis S, Ziada S (2012) Measurement of high solidity vertical axis wind turbine aerodynamic loads under high vibration response conditions. *J Fluid Struct* 32: 12-26.
- [11] Miao JJ, Liang SY, Yu RM, Hu CC, Leu TS, Cheng JC, Chen SJ (2012) Vertical-axis wind turbine with pitch control. *App Mech Materials* 225: 338-343.
- [12] Beri H, Yao Y (2011) Effect of Camber Airfoil on Self Starting of Vertical Axis Wind Turbine. *J Environ Sci Technol* 4(3): 302-312.

گشتاور راه‌اندازی پایین، بررسی گردید و محدوده‌ای موسوم به ناحیه‌ی مرده مطرح شد که در آن محدوده، توربین داریوس قادر به تولید میانگین گشتاور مثبت جهت راه‌اندازی نمی‌باشد. برای رفع این مشکل، توربین ترکیبی داریوس - ساونیوس پیشنهاد گردید که با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده مشاهده شد که مدل ترکیبی با تکیه‌بر گشتاور بالای توربین ساونیوس در نسبت سرعت‌های پایین، قادر به راه‌اندازی به صورت خودکار است و در بعضی نسبت سرعت‌های بین 0.5 تا 1.5 ، ضریب توان تا بیش از 7 برابر توربین داریوس، افزایش یافته است که در نتیجه آن منحنی عملکرد توربین یکنواخت‌تر شده است. مشکل اصلی توربین‌های ترکیبی، در نسبت سرعت‌های بالا، به دلیل مزاحمتی است که توربین ساونیوس ایجاد می‌کند که سبب کاهش 25 درصدی بیشینه توان توربین ترکیبی نسبت به توربین داریوس شده است؛ در نتیجه، برای بهبود عملکرد مدل ترکیبی، تأثیر صلبیت ایرفویل و زاویه کمان پره‌های ساونیوس، بررسی گردید. برای این منظور، توربین ترکیبی در پنج صلبیت متفاوت 0.5 ، 1.0 ، 1.25 و 1.5 و پنج زاویه کمان متفاوت 180 ، 170 ، 160 ، 150 و 140 ، شبیه‌سازی و مقایسه گردید. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده، با افزایش صلبیت محدوده عملکرد توربین کاهش یافته و بیشینه‌ی توان در نسبت سرعت نوک پایین‌تر رخ می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که بیشینه توان تا صلبیت 1 افزایش یافته و با افزایش بیشتر صلبیت، کاهش یافته است؛ همچنین افزایش صلبیت، سبب بهبود گشتاور راه‌اندازی می‌شود؛ در نتیجه مدل ترکیبی با صلبیت 0.75 که دارای محدوده عملکرد، بیشینه ضریب توان و گشتاور راه‌اندازی مناسبی است، به‌عنوان حالت بهینه‌ی صلبیت ایرفویل مدل ترکیبی در نظر گرفته شد. با بررسی نتایج تغییر زاویه کمان پره‌های ساونیوس مشاهده گردید که زاویه کمان 150 درجه، سبب افزایش ضریب توان در نسبت سرعت نوک 2.5 تا 3.5 شده و بیشینه ضریب توان، 12 درصد افزایش یافته است؛ در نتیجه در صورت نادیده گرفتن کاهش اندک ضریب توان در نسبت سرعت نوک 0.5 تا 2.5 ، زاویه کمان 150 درجه به‌عنوان حالت بهینه انتخاب گردید. در پایان با ترکیب حالت‌های بهینه‌شده، مدل ترکیبی با صلبیت ایرفویل 0.75 و زاویه کمان 150 درجه، به‌عنوان حالت بهینه انتخاب گردید و مشاهده شد که این مدل علاوه بر افزایش گشتاور راه‌اندازی و

- [19] Jones WP, Launder BE (1972) The Prediction of laminarization with atwo- equation model of turbulence. *J Heat mass transfer* 15: 301-314.
- [20] Wilcox DC (1998) *Turbulence modeling for CFD*. 2nd edn. DCW Industries, California 174-180.
- [21] Menter FR (1994) Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA J* 32(8): 1598-1605.
- [22] Lanzafame R, Mauro S, Messina M (2014) 2D CFD modeling of H-Darrieus wind turbines using a transition turbulence model. *J Energy Procedia* 45: 131-140.
- [23] Castelli M, Englaro A, Benini E (2011) 2D CFD modeling of H-Darrieus wind turbines using a transition turbulence model. *J Energy* 36: 4919-4934.
- [24] Blackwell BF, Sheldahl RE, Feltz LV (1977) Wind tunnel performance data for two-and three-bucket Savonius rotors. Sandia Laboratories, Albuquerque, NM.
- [25] Howell R, Qin N, Edwards J, Durrani N (2010) Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine. *Renew energy* 35(2): 412-422.
- [13] Mohamed MH (2013) Impacts of solidity and hybrid system in small wind turbines performance. *Int J Energy* 57: 495-504.
- [14] Gupta R, Das R, Sharma K (2006) Experimental study of a Savonius-Darrieus wind machine. *Proceedings of the International Conference on Renewable Energy for Developing Countries*, University of Columbia, Washington DC.
- [15] Gupta R, Biswas A, Sharma KK (2008) Comparativ study of three-bucket Savonius turbine with combined three-bucket-Savonius-three-bladed-Darrieus turbine. *Int J Renew Energy* 33: 1974-1981.
- [16] Bhuyan S, Biswas A (2014) Investigations on self-starting and performance characteristics of simple H and hybrid H-Savonius vertical axis wind rotors. *Energ Convers Manage* 87: 859-867.
- [17] Narasimhamurthy VD (2004) Unsteady-RANS simulation of turbulent trailing-edge flow. Chalmers University of Technology, Goteborg.
- [18] Rogowski K, Maronski R (2015) CFD computation of the savonius rotor. *J Theor appl mech* 53(1): 37-45.