

بررسی عملکرد توربین بادی ترکیبی داریوس-ساوینوس در مقایسه با توربین داریوس پره مستقیم به کمک شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی

نوذر اکبری^{۱*}، ابوالفضل عبدالهی^۲

^۱ دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید ستاری، تهران، ایران

^۲ دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران)، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۱۶

بازنگری: ۱۳۹۶/۱۱/۲۱

پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۳۰

ارائه آنلاین: ۱۳۹۶/۱۲/۶

کلمات کلیدی:

ساوینوس

داریوس

راه‌اندازی خودکار

توربین ترکیبی

دینامیک سیالات محاسباتی

خلاصه: هدف از این پژوهش، بررسی عملکرد توربین بادی ترکیبی داریوس-ساوینوس برای دستیابی به مدلی با گشتاور راه‌اندازی بالا و محدوده عملکرد مناسب است. گشتاور توربین‌های داریوس پره مستقیم دامنه نوسانات زیادی دارد و در برخی از زوایا، این گشتاور برای شروع حرکت توربین کافی نیست. توربین ترکیبی با دو مدل توربین داریوس پره مستقیم معادل، مقایسه شده است. اولین مدل، توان در دسترس برابر و دومین مدل، ارتفاع یکسان با توربین ترکیبی دارد. شبیه‌سازی سه‌بعدی با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی و حل میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر استوکس به روش حجم محدود و با استفاده از مدل آشفتگی انجام پذیرفته و برای چرخش توربین از شبکه‌بندی متحرک، استفاده شده است. مطابق نتایج، توربین ترکیبی در حالت راه‌اندازی نسبت به توربین‌های معادل اول و دوم به ترتیب، ۲۲/۴ و ۱۷/۵ درصد انحراف معیار کمتر و ۶۹/۸ و ۵۶/۹ درصد متوسط گشتاور بیشتر دارد. در حالت کاری نیز توربین ترکیبی در سرعت دورانی ۳۰ دور در دقیقه به ترتیب، ۱۶/۱ و ۲۷/۳ درصد انحراف معیار کمتر و ۱۹/۱ و ۱/۰۳ درصد متوسط گشتاور بیشتر دارد. از این رو، توربین ترکیبی در شروع حرکت و همچنین در سرعت‌های دوران پایین نسبت به توربین‌های داریوس معادل، گشتاور متوسط بیشتر و نوسانات کمتری دارد.

۱- مقدمه

توربین‌های بادی بر اساس محور دوران به دو گروه محور عمودی و افقی تقسیم می‌گردند. توربین‌هایی را که محور چرخش آن‌ها عمود بر زمین باشد، توربین‌های محور عمودی و توربین‌هایی را که محور چرخش آن به صورت افقی و موازی سطح زمین باشد، توربین‌های محور افقی می‌گویند. توربین‌های محور افقی، بازده بالاتری نسبت به نوع عمودی دارند و دارای قابلیت راه‌اندازی خودکار هستند؛ اما در مقابل، وابستگی شدیدی به جهت وزش باد دارند. این نوع توربین‌ها به سازوکاری برای جهت‌یابی باد نیازمند هستند. مزیتی که توربین‌های محور عمودی نسبت به توربین‌های محور افقی دارند، متقارن بودن و عدم حساسیت آن‌ها به جهت وزش باد و همچنین سرعت راه‌اندازی پایین‌تر آن‌ها است. از طرفی با توجه به این‌که تمامی تجهیزات توربین روی زمین نصب می‌شوند، هزینه ساخت و نگهداری پایین‌تری دارند. از دیگر مزیت‌های این نوع توربین‌ها نیز می‌توان به عملکرد با صدا و لرزش کمتر نسبت به محور افقی اشاره کرد که سبب افزایش توسعه

فناوری ساخت توربین‌های محور عمودی شده است [۱ و ۲].

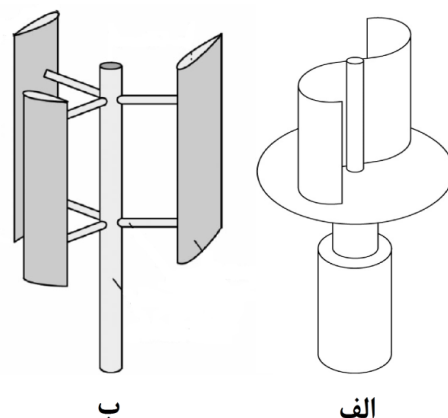
توربین‌های محور عمودی، به دو نوع داریوس و ساوینوس تقسیم می‌شوند. در توربین داریوس، از ایرفویل به‌عنوان پره استفاده می‌شود و محرک آن نیروی برا است؛ درحالی‌که اساس چرخش توربین ساوینوس بر مبنای نیروی پسا است و سرعت شروع به حرکت پایینی دارد. ساده‌ترین نوع توربین داریوس، نوع پره مستقیم آن است. این نوع توربین به دلیل ساخت ساده مورد توجه است اما مشکل اساسی آن در شروع خودکار است. ساده‌ترین نوع توربین ساوینوس از حداقل دو پره نیم استوانه‌ای تشکیل شده است. اگرچه توربین ساوینوس ضریب عملکرد پایین‌تری نسبت به مدل داریوس دارد؛ اما مشکل راه‌اندازی و شروع خودکار را ندارد [۳].

شکل ۱ نمونه‌ای از دو توربین ساوینوس و داریوس متداول با پره‌های مستقیم را نشان می‌دهد.

پژوهش‌های بسیاری به صورت تجربی و عددی، برای بهبود عملکرد توربین‌های بادی محور عمودی انجام گرفته است. در سال‌های اخیر، روش‌های بسیاری جهت افزایش گشتاور راه‌اندازی توربین‌های داریوس،

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Nozar@ssau.ac.ir





شکل ۱: توربین (الف) ساوینوس و (ب) داریوس با پره‌های مستقیم

Fig. 1. Turbines, a) Savonius, b) straight-blade Darrieus.

ترکیبی و داریوس با یکدیگر مقایسه کردند. در سال ۲۰۱۱ گوپتا و همکاران [۸]، توربین ترکیبی داریوس-ساوینوس را به صورت دوبعدی شبیه‌سازی کرده و درصد هم‌پوشانی‌های مختلف را برای پره‌های ساوینوس بررسی کردند. در اکثر بررسی‌های صورت گرفته بر روی توربین‌های ترکیبی، بیشتر از توربین داریوس با حالت بیضی‌شکل استفاده شده است که سبب پیچیدگی ساخت آن می‌گردد. برای این منظور بویان و بیسواس [۹] در سال ۲۰۱۴، یک توربین داریوس با سه پره مستقیم را با ایرفویل غیرمتقارن مورد مطالعه قرار دادند و مشاهده کردند که توربین در بعضی از زاویه‌های چرخش دارای خصوصیت شروع خودکار است. اما برای این که توربین به طور کامل خود راه‌اندازی شود، سامانه ترکیبی با توربین ساوینوس را اضافه نمودند و نتیجه گرفتند که توربین ترکیبی بهینه‌شده دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌های توربین محور عمودی است. همچنین حالت بیضی‌شکل توربین داریوس تنها در حالتی اثر مثبت دارد که توربین ساوینوس در داخل توربین داریوس قرار بگیرد.

روشن و مغربی [۳] در سال ۲۰۱۶ به کمک شبیه‌سازی دوبعدی و به منظور بهبود گشتاور راه‌اندازی، توربین داریوس با پره‌های مستقیم را با توربین ساوینوس ترکیب کردند و با تغییر زاویه کمان پره‌های ساوینوس، عملکرد مدل ترکیبی را بهبود بخشیدند. همچنین تأثیر صلیب ایرفویل بر عملکرد توربین داریوس و مدل ترکیبی را نیز مورد مطالعه قرار دادند. در نهایت با بهینه کردن زاویه کمان پره‌های ساوینوس و صلیب ایرفویل و ادغام حالت‌های بهینه‌شده، عملکرد مدل ترکیبی را بهبود بخشیدند. در سال ۲۰۱۷ کوراوند و همکاران [۱۰]، ایرفویل ترکیبی را پیشنهاد دادند که نیروی برا و پسای وارد بر آن، هر دو با هم اثر مثبتی در چرخش توربین بادی مقیاس کوچک داشته باشند. راد و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۷، یک توربین بادی محوری را با ضریب توان بالاتر از ۵۵ درصد طراحی کردند. توربین بادی کوچک طراحی شده، ضریب توان بهینه خود را در جریان باد کم سرعت (در محدوده ۱ تا ۳ متر بر ثانیه) حفظ کرد.

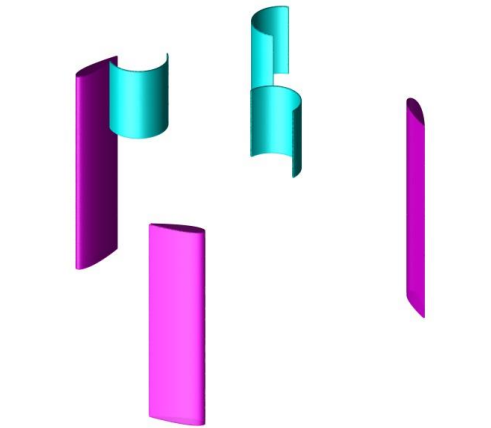
اغلب پژوهش‌های عددی انجام گرفته در این حوزه، به صورت دوبعدی است در حالی که حضور توربین ساوینوس به صورت مجزا و در بالای توربین نیازمند شبیه‌سازی سه‌بعدی است. همواره نتایج حل دوبعدی با حل سه‌بعدی متفاوت بوده و این تفاوت در حل میدان توربین بادی، به دلیل حضور گردابه‌های نوک پره، بیشتر است؛ بنابراین نتایج حل سه‌بعدی تطابق بیشتری با نتایج واقعی خواهد داشت.

در شبیه‌سازی سه‌بعدی پژوهش حاضر، توربین ترکیبی داریوس-

پیشنهاد شده است. یکی از مؤثرترین روش‌ها ترکیب توربین داریوس با ساوینوس برای استفاده از مزیت‌های منحصربه‌فرد هر کدام، در قالب یک توربین است؛ بنابراین در مدل ترکیبی، قسمت ساوینوس در گشتاور راه‌اندازی و قسمت داریوس در ضریب توان بیشینه‌ی توربین، اثر مثبت بیشتری خواهند داشت.

در سال ۲۰۰۵ واکوئی و همکاران [۴]، توربین بادی ترکیبی را در دو حالت مختلف مورد بررسی قرار دادند. در حالت اول توربین ساوینوس در داخل فضای توربین داریوس و در حالت دوم، توربین ساوینوس در پایین توربین ساوینوس قرار گرفت. حالت اول موجب تداخل جریان هوا بین دو نوع توربین گردید؛ اما حالت دوم به نظر می‌رسید دو توربین روی یکدیگر اثری ندارند. حالت اول را برای توربین‌های بزرگ مقیاس و حالت دوم را برای توربین‌های کوچک مقیاس توصیه کردند.

گوپتا و همکاران [۵] در سال ۲۰۰۶، عملکرد توربین ترکیبی با دو پره‌ی ساوینوس و سه پره‌ی داریوس را به صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. در پژوهش دیگری مجدداً گوپتا و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۸، یک توربین با سه پره ساوینوس و سه پره داریوس را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که بیشترین ضریب توان برای توربین ساوینوس در هم‌پوشانی ۲۰ درصد اتفاق می‌افتد. توربین ترکیبی نیز در حالتی که پره‌های ساوینوس با یکدیگر هم‌پوشانی ندارند بیشترین ضریب توان را دارد. همچنین توربینی که از ساوینوس سه پره‌ای استفاده کرده است، ضریب توان بیشتری را دارد. علم و همکاران [۷]، در سال ۲۰۰۹، توربین ساوینوس چهارپره در دو طبقه را به پایین توربین داریوس اضافه کردند. آن‌ها آزمایش‌های خود در آب و هوا انجام دادند و حداقل سرعت شروع به حرکت توربین را در حالت



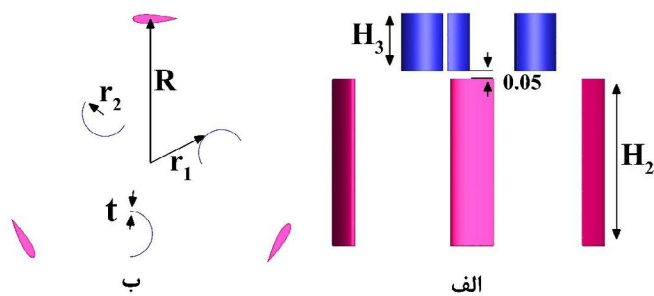
شکل ۲: نمای ایزومتریک توربین ترکیبی داریوس و ساوینوس

Fig. 2. Isometric view of hybrid Darrieus-Savonius wind turbine.

ارتفاع مجموع این دو برابر H_0 است. فاصله‌ای ۵ سانتی‌متری بین دو نوع پره در نظر گرفته شده تا کمترین اثر را روی هم بگذارند. مدل چهارم و پنجم، دو توربین داریوس پره مستقیم به ارتفاع H_0 و H_p هستند. این دو مدل، معادل مدل سوم و جهت مقایسه توربین داریوس و توربین ترکیبی، در نظر گرفته شده‌اند. شکل ۲ نمای ایزومتریک توربین ترکیبی را نشان می‌دهد. ایرفویل مورد استفاده *NACA0021* است. سایر مشخصه‌های فیزیکی در جدول ۱ آورده شده است.

نمای جانبی و نمای بالای توربین ترکیبی در شکل ۳ قابل مشاهده است.

با توجه به این که مدل سوم توربینی با پره‌های متفاوت است، برای به دست آوردن ارتفاع، بهترین گزینه استفاده از توان در دسترس برای توربین بادی است که از رابطه (۱) به دست می‌آید:



شکل ۳: توربین ترکیبی (الف) نمای جانبی (ب) نمای بالا

Fig. 3. Hybrid turbine, a) front view, b) top view.

Table 1. Specifications of turbines under consideration.

جدول ۱: مشخصه‌های فیزیکی توربین‌های مورد نظر

مشخصات توربین	کمیت (متر)
طول کورد ایرفویل C	۰/۳
H_1	۱/۱۵
H_2	۱/۱۵
H_3	۰/۴
شعاع روتور داریوس R	۰/۹۹
ضخامت ورقه‌ی نیم استوانه t	۰/۰۰۵
شعاع روتور ساوینوس مرکز نیم استوانه r_1	۰/۴۵
شعاع نیم استوانه r_2	۰/۱۵

ساوینوس و داریوس پره مستقیم در حالت راه‌اندازی و همچنین حالت کاری مورد مطالعه قرار گرفته است. پژوهش‌هایی که تاکنون انجام گرفته‌اند اطلاعات جامعی راجع به محدوده عملکردی این نوع توربین (از نظر سرعت دوران و سرعت باد)، گشتاور مجموع توربین، میزان دقیق نوسانات گشتاور و متوسط آن، در حالت راه‌اندازی و کاری ارائه نمی‌دهند.

هدف این پژوهش، ارائه توربین ترکیبی داریوس-ساوینوس، به منظور بهبود عملکرد توربین پره مستقیم، با شرایط توصیه‌شده و بهینه است. توربین مورد بحث، از نوع مقیاس کوچک بوده و ساده‌ترین شرایط ممکن را برای ساخت دارد. با استفاده از نتایج پژوهش‌های قبلی، موقعیت توربین ساوینوس، تعداد پره و میزان هم‌پوشانی پره‌های ساوینوس، بهینه در نظر گرفته شده است؛ بنابراین بخش ساوینوس به صورت کاملاً مجزا، بدون هم‌پوشانی و با فاصله از محور روتور و در بالای توربین داریوس قرار گرفته و از توربین ساوینوس سه پره‌ای استفاده شده است. از آنجایی که لازمه صنعتی شدن این توربین‌ها داشتن اطلاعات دقیق راجع به مقدار دقیق گشتاور خروجی و میزان نوسانات آن و همچنین محدوده عملکردی این توربین‌ها از نظر سرعت باد محیط و سرعت دوران توربین است، نتایج این پژوهش می‌تواند گامی جهت پاسخ به نیازهای صنعت و توسعه پایدار باشد.

۲- مدل‌سازی سه‌بعدی

در شبیه‌سازی سه‌بعدی این پژوهش پنج مدل در نظر گرفته شده است. مدل اول، داریوس پره مستقیم با ارتفاع H_1 ، مدل دوم، ساوینوس نیم استوانه‌ای با ارتفاع H_p ، مدل سوم، ترکیبی از ساوینوس و داریوس است که بخش داریوس آن ارتفاع $H_1=H_p$ و بخش ساوینوس آن ارتفاع H_p دارد و

۳- معادلات حاکم بر جریان سیال و بررسی روش حل

برای شبیه‌سازی جریان در توربین‌های بادی محور عمودی، از معادلات یورنس استفاده می‌شود که از طریق گرفتن میانگین زمان در معادلات پیوستگی و اندازه حرکت به دست می‌آید. در این معادلات مؤلفه سرعت و فشار به دو جزء متوسط و نوسانی تقسیم می‌شوند. روابط (۳) و (۴)، معادلات یورنس را نشان می‌دهد.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (4)$$

در معادله (۴)، دلتای کرونکر است. ترم آخر در معادله (۴) به معادلات مومنتوم اولیه اضافه شده که نمایانگر اثرات آشفتگی بر جریان است. این ترم که شباهت ظاهری به تنش دارد، به‌عنوان تنش رینولدز شناخته می‌شود. این ترم ۹ مجهول به مجهولات مسأله اضافه کرده است. جوزف بوزینسک با تعریف یک لزجت معادل، رابطه (۵) را برای مدل کردن ترم مجهول پیشنهاد داده است.

$$(-\rho \overline{u'_i u'_j}) = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} (\rho k + \mu_t \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k}) \delta_{ij} \quad (5)$$

در این رابطه μ_t مقدار لزجت معادل است که از خواص جریان محسوب می‌شود و به نوع سیال مرتبط نیست. k انرژی جنبشی اغتشاشی است که به‌صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود [۱۲].

$$k = \frac{1}{2} \overline{(u'_i u'_i)} \quad (6)$$

با توجه به فرض بوزینسک در صورت مشخص شدن مقادیر k و μ_t معادلات یورنس قابل حل است. برای محاسبه مؤلفه لزجت آشفتگی،

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A_s V_\infty^3 \quad (1)$$

که در آن

$$P_w: \text{توان در دسترس بر حسب } W$$

$$\rho: \text{چگالی هوا بر حسب } \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$A_s: \text{مساحت جاروب شده بر حسب } \text{m}^2$$

$$V_\infty: \text{سرعت جریان آزاد بر حسب } \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

برای مقایسه گشتاور راه‌اندازی توربین ترکیبی با توربین داریوس پره مستقیم باید دو توربین، توان در دسترس یکسان داشته باشند. با توجه به اینکه دو توربین در شرایط یکسان از لحاظ چگالی سیال و سرعت جریان آزاد قرار دارند، پس کافی است دو توربین مساحت جاروب شده یکسان داشته باشند. ابتدا مساحت جاروب شده توربین ترکیبی را محاسبه می‌کنیم:

$$A_s = 2RL \quad (2)$$

که در آن R شعاع روتور و L طول پره است.

$$A_{s \text{ Hybrid}} = (2 \times 0.99 \times 1/15) + (2 \times 0.6 \times 0.45) = 2/817$$

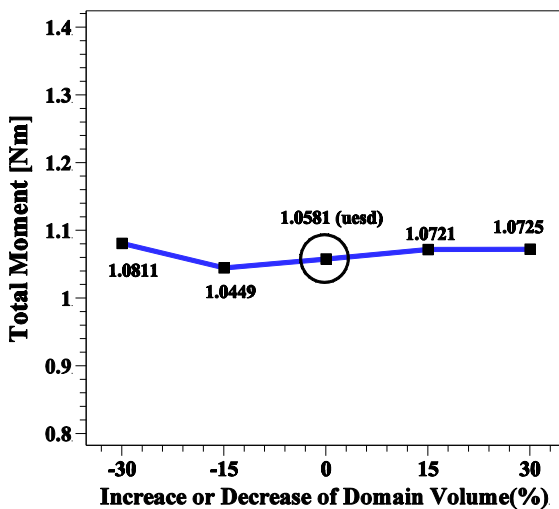
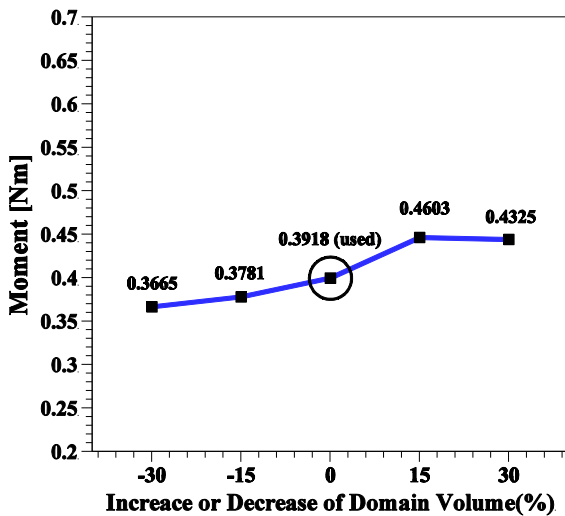
در اینجا فاصله‌ی ۵ سانتی‌متری که بین دو توربین در نظر گرفته شده بود تا دو نوع پره کمترین اثر منفی را روی هم بگذارند نیز به‌عنوان بخش ساوینوس در نظر گرفته شده است تا مساحت جاروب شده‌ی بیشتری داشته باشیم. حال می‌توان طول پره توربین داریوس موردنظر را جهت مقایسه با توربین ترکیبی به دست آورد:

$$L = \frac{A_{s \text{ Hybrid}}}{2 \times R} = \frac{2/817}{2 \times 0.99} = 1/42 \approx 1/45 = H_4$$

با توجه به برخی محدودیت‌های ساخت، ممکن است توان در دسترس توربین موردتوجه قرار نگیرد و صرفاً ارتفاع توربین که پارامتر مهمی برای ساخت آن است، مهم باشد. در اینجا مدل پنجم تعریف می‌شود. این مدل مساحت جاروب شده بیشتری نسبت به توربین ترکیبی دارد و ارتفاع آن از جمع ارتفاع‌های داریوس و ساوینوس به دست می‌آید:

$$H_5 = 1/15 + 0.5 + 0.4 = 1/6 \text{m}$$

است. جریان آزاد با سرعت ثابت ۷ متر بر ثانیه از وجه YZ در جهت مثبت محور X وارد شده و از وجه مقابل آن خارج می‌شود. فشار استاتیک جریان ورودی ثابت و برابر 101325 پاسکال و شرط عدم لغزش برای دیواره پره‌های توربین در نظر گرفته شده است. مرکز روتور از وجه ورودی جریان، $8R$ فاصله دارد. برای وجه ورودی جریان شرط مرزی ورودی سرعت، وجه خروجی جریان فشار خروجی و برای وجوه اطراف میدان شرط مرزی تقارن اعمال شده است. شرایط مرزی اعمال شده و میدان حل و محورهای مختصات در شکل ۴ قابل مشاهده است.



شکل ۵: استقلال از میدان حل برای توربین پره مستقیم با ارتفاع $1/15$ متر برای زاویه سمت 50° . الف: گشتاور یک پره، ب: گشتاور مجموع

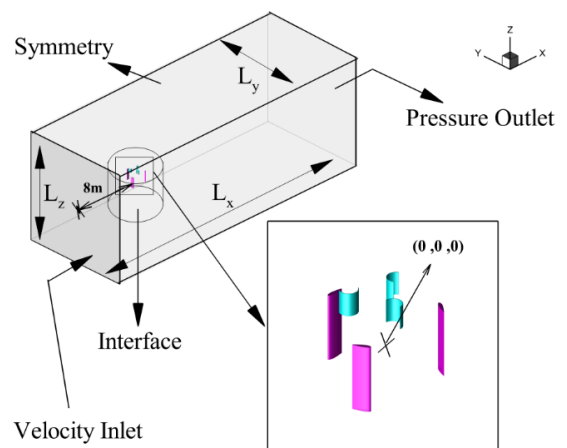
Fig. 5. Domain independence study for straight-blade turbine with height of 1.15 m at azimuth angle of 50° , a) single blade, b) whole turbine.

مدل‌های آشفتگی زیادی به کار گرفته شده است. در مدل‌های دو معادله‌ای با حل دو معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی، دو کمیت آشفتگی محاسبه می‌شود. در بیشتر مسائل مهندسی، از روش‌های دو معادله‌ای مانند $k - \omega$ و $k - \epsilon$ استفاده می‌شود.

در این پژوهش، توربین بادی محور عمودی به صورت سه بعدی شبیه‌سازی و از طریق روش دینامیک سیالات محاسباتی، با استفاده از حل گر انسیس فلونت، مورد تحلیل قرار گرفته است. جریان سیال لزج و تراکم ناپذیر در نظر گرفته 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. از مدل آشفتگی $k - \epsilon$ استاندارد استفاده شده و در نزدیکی دیواره تابع دیواره استاندارد اعمال شده است. مدل آشفتگی $k - \epsilon$ استاندارد در انسیس فلونت بر اساس پژوهش لندر و اسپالدینگ [۱۳] بوده و بیشترین استفاده را برای شبیه‌سازی جریان‌های سیال در صنعت داراست.

۴- ناحیه محاسباتی، شرایط مرزی و تولید شبکه

از آنجایی که برای صحت سنجی در این پژوهش از پژوهش عددی الایمو و همکاران [۱۴] استفاده شده است. میدان حل جریان، مشابه [۱۴]، یک مکعب مستطیل با طول $L_x = 32R$ ، عرض و ارتفاع $L_y = L_z = 12R$ است. مبدأ مختصات در مرکز روتور قرار دارد. سیال مربوطه هوا در شرایط استاندارد با چگالی $1/225$ کیلوگرم بر متر مکعب و لزجت 0.00001827 پاسکال ثانیه

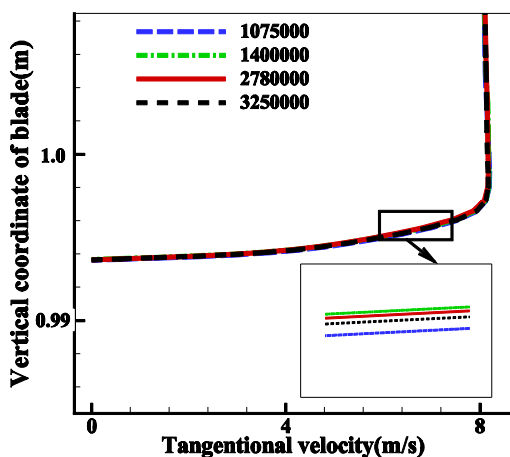


شکل ۴: نمای ایزومتریک میدان حل و شرایط مرزی اعمال شده

Fig. 4. Isometric view of the computational domain and applied boundary conditions.

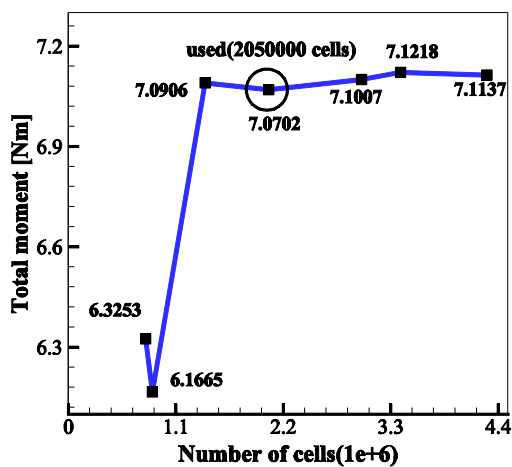
سمت ۵۰ درجه و برای توربین داریوس پره مستقیم به ارتفاع ۱/۱۵ متر در حالت استاتیک انجام شده است. با توجه به اختلاف فاز ۱۲۰ درجه‌ای سه پره توربین نسبت به هم، استقلال از شبکه بررسی شده، شامل زوایای ۱۷۰ و ۲۹۰ درجه نیز می‌شود. دلیل انتخاب زاویه ۵۰، ۱۷۰ و ۲۹۰ درجه این است که گشتاور کل توربین در این زاویه، بیشترین اختلاف را با [۴۱] دارد. درصد اختلاف نسبی بین شبکه ۱۴۰۰۰۰۰ و ۳۲۵۰۰۰۰ برابر ۱/۶۳ درصد است. با در نظر گرفتن زمان و توان محاسباتی و کاهش بزرگ‌ترین مقدار مطلق مانده‌ها به کمتر از ۰/۰۰۰۱، متوسط تعداد سلول در شبکه، ۱۴۰۰۰۰۰ در نظر گرفته شده است.

جهت مطالعه بیشتر روی مستقل شدن شبکه، منحنی سرعت مماسی بر پره نیز در زاویه سمت ۵۰ درجه برای توربین داریوس پره مستقیم بررسی گردید.



شکل ۷: منحنی سرعت مماسی برای زاویه سمت ۵۰ درجه

Fig. 7. Velocity profile on the straight-blade turbine surface for different generated grids at azimuth angle of 50°.



شکل ۸: استقلال از شبکه توربین ترکیبی برای زاویه سمت ۹۰ درجه

Fig. 8. Grid independence study for hybrid turbine at the azimuth angle of 50°.

محور چرخش توربین، جهت مثبت محور Z بوده و زاویه سمت توربین، نشان‌دهنده موقعیت پره‌های توربین است. زاویه سمت صفر منطبق بر جهت مثبت محور Y است و هم‌جهت با چرخش توربین افزایش می‌یابد. برای توربین ترکیبی از زاویه سمت بخش داریوس برای بیان زاویه سمت کل توربین استفاده شده است. شبکه تولیدشده نیز از نوع بی‌سازمان به همراه لایه‌مرزی است.

۵- بررسی استقلال شبیه‌سازی

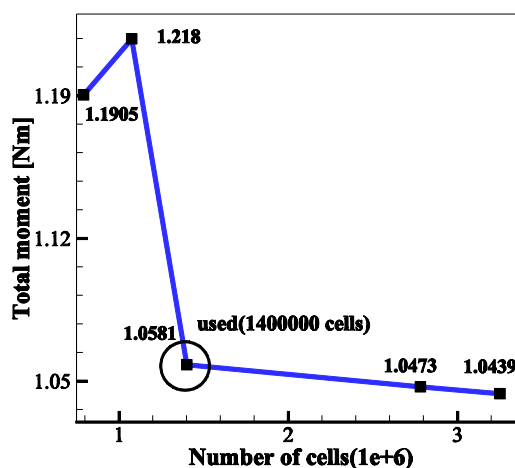
۵-۱- استقلال ابعادی

از آنجایی که هدف استقلال ابعادی تعیین ابعاد حوزه حل است. در پژوهش‌های دینامیک سیالات محاسباتی به دلیل حجم محاسبات و مشکلات سخت‌افزار، پژوهشگر به دنبال حل مسأله با حداقل ابعاد حوزه حل است؛ بنابراین استقلال ابعادی نیز برای حالت استاتیک انجام گرفته است

شکل ۵ استقلال از میدان حل را برای توربین داریوس پره مستقیم، با تغییر ۳۰ درصدی حجم میدان حل، نشان می‌دهد. درصد صفر، میدان [۱۴] است. درصد خطا نسبت به بیشترین افزایش حجم محاسبه شده است. برای یک پره درصد خطای نسبی در زاویه سمت ۵۰ درجه ۹/۴۱ درصد و برای مجموع سه پره برابر ۱/۴۳ درصد است. به نظر می‌رسد میدان مورد استفاده در مرجع [۱۴]، مناسب است.

۵-۲- استقلال از شبکه

استقلال از شبکه نیز، همان‌طور که شکل ۶ نشان می‌دهد، برای زاویه



شکل ۶: استقلال از شبکه توربین داریوس پره مستقیم با ارتفاع ۱/۱۵ متر برای زاویه سمت ۵۰

Fig. 6. Grid independence study for straight-blade turbine at the azimuth angle of 50°.

۶- صحت سنجی

برای صحت سنجی از پژوهش عددی الایمو و همکاران [۱۴] که در سال ۲۰۱۵ به چاپ رسیده، به عنوان مرجع استفاده شده است. این پژوهش [۱۴] به شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی توربین بادی داریوس از نوع پره مستقیم و ماریچ پرداخته و گشتاور توربین را در زوایای مختلف محاسبه نموده است. تعداد سلول شبکه استفاده شده در [۱۴]، ۹۵۰۳۴۷۱ است.

ضریب گشتاور به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود:

$$C_t = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 A_s R} \quad (7)$$

که در آن

C_t : ضریب گشتاور

M : گشتاور برحسب N.m

ρ : چگالی هوا برحسب kg/m^3

V_∞ : سرعت جریان آزاد برحسب m/s

A_s : مساحت جاروب شده برحسب m^2

R : شعاع روتور برحسب m

شکل ۹ ضریب گشتاور یک پره و گشتاور مجموع هر سه پره را برحسب زاویه سمت توربین در حضور هر سه پره نشان می‌دهد. با توجه به حضور هر سه پره در میدان حل، کافی است توربین ۱۲۰ درجه بچرخد تا همه نتایج برای یک دور کامل توربین حاصل شود. اطلاعات حاصل از حل عددی، از چرخش ۱۰ درجه‌ای توربین به دست آمده است.

در زوایای سمت ۲۰، ۱۷۰ و ۲۶۰ درجه مقدار درصد خطای نسبی به ترتیب برابر ۴/۲۹، ۱۸/۸۵ و ۱۰/۵۵ درصد است. بیشینه درصد خطای نسبی در مقایسه با نمودار [۱۴]، برابر ۱۸/۸۵ درصد مربوط به زاویه سمت ۱۷۰ درجه است. این درصد خطای نسبی برای شبکه با ۳۲۵۰۰۰ سلول به کمتر از ۱۰ درصد رسیده و به نظر

Table 2. Y^+ values, max., min. and average, on the walls of straight-blade turbine.

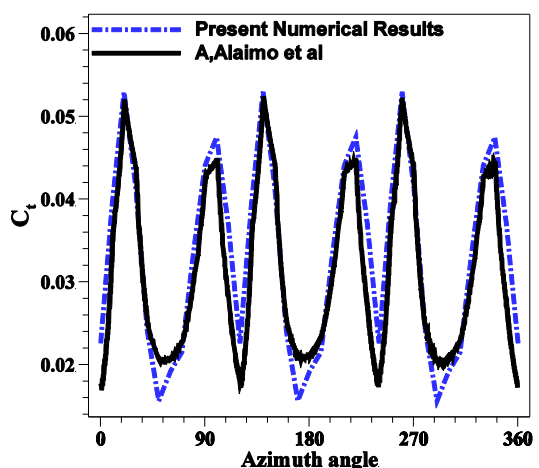
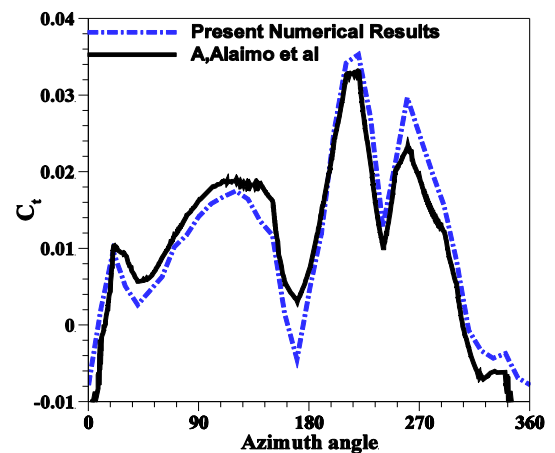
جدول ۲: نمونه ای از مقادیر بیشینه، کمینه و متوسط روی دیواره پره‌های توربین داریوس

Y^+ بیشینه	Y^+ کمینه	Y^+ متوسط	
۱۷۶/۷۴	۴/۸۷	۱۳۹/۲۲	پره ۱
۲۶۵/۳۶	۸/۶	۱۰۰/۷۸	پره ۲
۲۵۲/۳۸	۷/۱۴	۸۴/۹۲	پره ۳

همان‌طور که در شکل ۷ قابل مشاهده است سرعت صفر در دیواره پره اعمال شده است.

برای توربین ترکیبی نیز استقلال از شبکه برای زاویه‌ی سمت ۹۰ درجه انجام شد. با توجه به اختلاف فاز ۲۱۰ درجه‌ای سه پره توربین نسبت به هم، استقلال از شبکه بررسی شده، شامل زوایای ۲۱۰ و ۳۳۰ درجه نیز می‌شود. شکل ۸ استقلال از شبکه توربین ترکیبی را نشان می‌دهد.

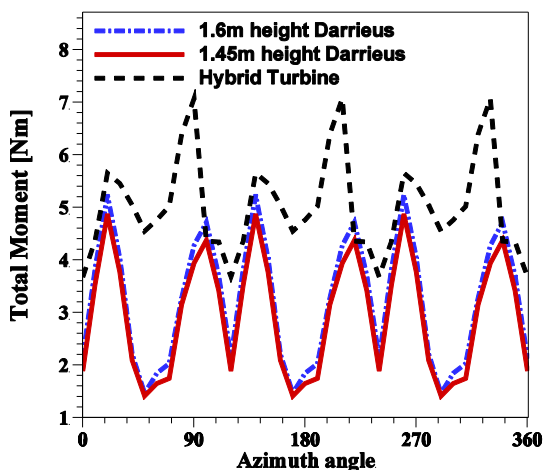
درصد اختلاف نسبی بین شبکه ۲۰۵۰۰۰۰ و ۴۲۸۵۰۰۰ برابر ۰/۶ درصد است. با در نظر گرفتن زمان و توان محاسباتی و کاهش بزرگ‌ترین مقدار مطلق مانده‌ها به کمتر از ۰/۰۰۰۱، متوسط تعداد سلول در شبکه، ۲۰۵۰۰۰۰ در نظر گرفته شده است.



شکل ۹: مقایسه گشتاور برحسب زاویه سمت توربین داریوس با مرجع [۱۴]. الف:

گشتاور یک پره، ب: گشتاور مجموع

Fig. 9. Comparison between moment coefficient results of present study and numerical results of Ref [14] for different azimuth angles of straight-blade turbine, a) single blade, b) whole turbine.



شکل ۱۲: گشتاور کل راه‌اندازی توربین ترکیبی در مقایسه با توربین‌های داریوس پره مستقیم معادل (حالت راه‌اندازی)

Fig. 12. Total moment produced by the hybrid and straight-blade turbines at the self-start mode.

آن را نشان می‌دهد.

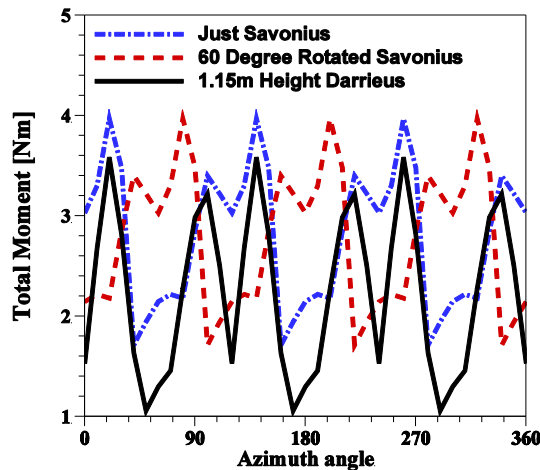
۸- نتایج حل استاتیک برای حالت راه‌اندازی

برای اینکه تقریبی از زاویه قرارگیری بهینه دو توربین داریوس و ساوینوس نسبت به هم داشته باشیم، قسمت ساوینوس توربین ترکیبی به‌تنهایی در میدان جریان قرار گرفت تا بتوان زوایای سمت بیشینه و کمینه گشتاور آن را تعیین کرد. حال با داشتن تغییرات گشتاور قسمت داریوس، می‌توان زاویه قرارگیری بهینه را در توربین ترکیبی به‌طور نسبی تعیین کرد. با توجه به شکل ۱۰ این زاویه ۶۰ درجه تعیین شد؛ یعنی وقتی پره داریوس در زاویه‌ی سمت صفر درجه قرار دارد بخش ساوینوس در زاویه سمت ۶۰ درجه قرار می‌گیرد. همچنین برای بیان زاویه سمت کل توربین از زاویه سمت بخش داریوس استفاده شده است.

Table 3. Values of average and deviation of total moment produced by the hybrid and straight-blade turbines at the self-start mode.

جدول ۳: متوسط گشتاور کل و انحراف معیار توربین ترکیبی و توربین‌های داریوس پره مستقیم معادل (حالت راه‌اندازی)

حالت راه‌اندازی	داریوس پره مستقیم	داریوس پره مستقیم ترکیبی	متوسط گشتاور کل توربین (نیوتن متر)
به ارتفاع ۱/۶ متر	به ارتفاع ۱/۴۵ متر		
۳/۲۰۰۳	۲/۹۵۹		۵/۰۲۲۲
۱/۱۹۸۸	۱/۱۲۸۴		۰/۹۳۰۷



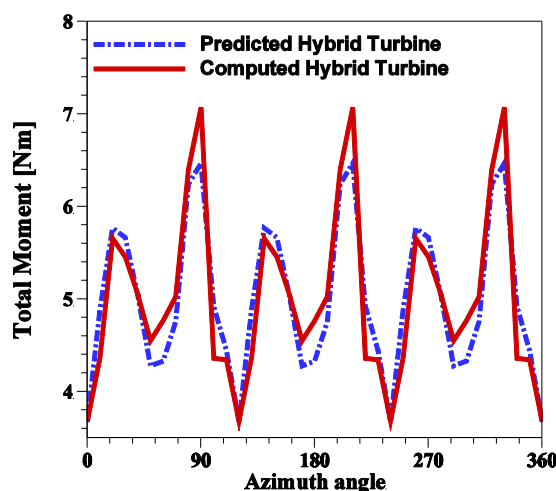
شکل ۱۰: تعیین زاویه قرارگیری نسبی توربین داریوس و ساوینوس نسبت به هم

Fig. 10. Estimation of proper azimuth angle difference between Darrieus and Savonius turbines..

می‌رسد با ریز شدن شبکه درصد خطای نسبی پایین‌تری خواهیم داشت. شبکه تولیدشده در مرجع [۱۴]، ۹۵۰۳۴۷۱ سلول داشته و شبکه مورد استفاده ۱۴۰۰۰۰۰ سلول دارد. با در نظر گرفتن زمان و توان محاسباتی، به نظر می‌رسد با توجه به تعداد سلول کمتر (کاهش ۸۵ درصدی تعداد سلول‌ها) و نحوه تولید شبکه متفاوت، تطابق قابل قبولی برای صحت سنجی به دست آمده است.

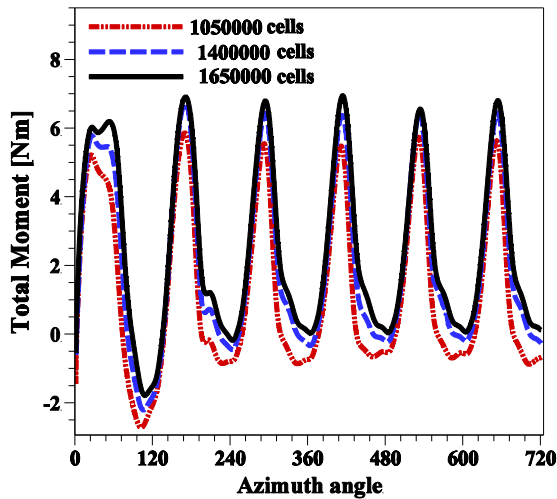
۷- مطالعه Y^+

با توجه به استفاده از مدل توربولانسی استاندارد و تابع دیواره استاندارد، سعی شده مقدار بین ۰.۳ تا ۳۰۰ تغییر کند. جدول ۲ مقادیر بیشینه، کمینه و متوسط



شکل ۱۱: گشتاور کل محاسبه‌شده توربین ترکیبی و گشتاور کل پیش‌بینی‌شده

Fig. 11. Comparison of computed and predicted hybrid turbine total moment.



شکل ۱۴: استقلال از شبکه برای توربین داریوس پره مستقیم با سرعت دوران ۶۰ دور در دقیقه

Fig. 14. Grid independence study for straight-blade turbine at 60 rpm.

داریوس است. انحراف معیار کمتر نشان‌دهنده کاهش نوسانات گشتاور راه‌اندازی است. هرچه مقدار میانگین گشتاور بیشتر و نوسانات آن کمتر باشد، توربین وضعیت مناسب‌تری خواهد داشت و هردو عامل تأثیر مثبت در برطرف کردن مشکل راه‌اندازی توربین دارند.

۹- نتایج حل دینامیک

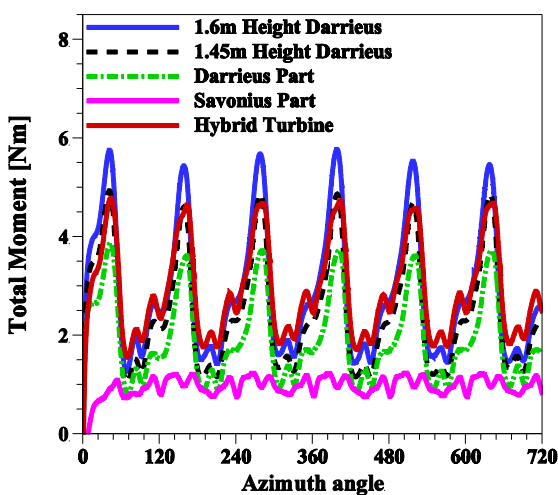
پس از بهبود قابل توجه عملکرد توربین ترکیبی در گشتاور راه‌اندازی، عملکرد دینامیکی آن نیز باید بررسی شود تا تحلیلی جامع از عملکرد آن

با توجه به وجود هندسه‌های مختلف، مساحت جاروب‌شده هر هندسه متفاوت است. در نتیجه برای مقایسه توربین‌های با هندسه مختلف حضور کمیت مساحت جاروب‌شده در مخرج ضریب گشتاور، باعث ایجاد خطا در نتیجه‌گیری می‌شود؛ بنابراین از این‌پس مقدار گشتاور برحسب نیوتن متر در نمودارها بیان می‌شود.

با جمع جبری دو گشتاور توربین‌های داریوس و ساوینوس در هر زاویه، نمودار گشتاور کل پیش‌بینی‌شده برای توربین ترکیبی برحسب زاویه سمت به دست می‌آید. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، نتایج به‌دست‌آمده به نتایج پیش‌بینی‌شده نزدیک است؛ یعنی دو توربین به نحوی کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند که اثرات منفی ناشی از گرفتار شدن یک توربین در گردابه توربین دیگر و سایر عواملی که به دلیل هم‌جواری دو توربین باعث افت توان می‌شوند، به حداقل رسیده است.

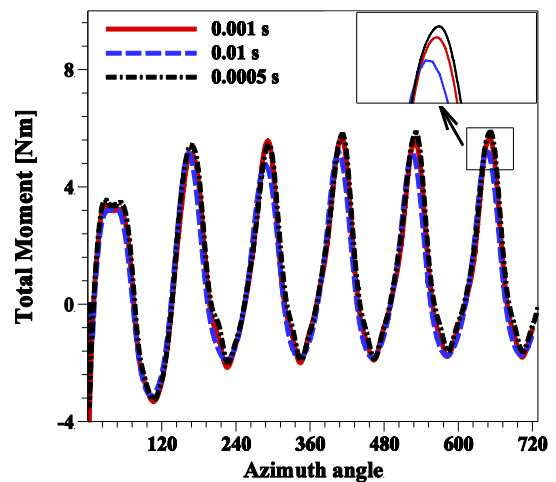
پس از دستیابی به زاویه قرارگیری بهینه و بررسی تأثیرپذیری دو توربین از یکدیگر، عملکرد توربین ترکیبی با توربین‌های داریوس معادل مقایسه شده است. نمودار گشتاور کل راه‌اندازی توربین‌های داریوس معادل و توربین ترکیبی برحسب زاویه سمت توربین در شکل ۱۲ رسم شده است.

با توجه به مقادیر متوسط گشتاور و انحراف معیار که جدول ۳ نشان می‌دهد، توربین ترکیبی نسبت به توربین داریوس پره مستقیم به ارتفاع ۱/۶ و ۱/۵۴ متر به ترتیب ۶۵/۳۹ و ۹۶/۲۷ درصد گشتاور متوسط بیشتر و ۲۲/۶۳ و ۷۱/۲۲۵ درصد انحراف معیار کمتری دارد. مقدار متوسط گشتاور کل توربین ترکیبی بیشتر و انحراف معیار آن کمتر از توربین پره مستقیم



شکل ۱۵: گشتاور کل توربین ترکیبی در مقایسه با توربین‌های داریوس پره مستقیم معادل در سرعت دوران ۳۰ دور در دقیقه

Fig. 15. Total moment produced by the hybrid and straight-blade turbines at 30 rpm.



شکل ۱۳: استقلال از گام زمانی برای توربین ترکیبی با سرعت دوران ۶۰ دور در دقیقه

Fig. 13. Time independence study for hybrid turbine at 60 rpm.

Table 5. Values of average and deviation of total moment produced by the hybrid and straight-blade turbines at 60 rpm.

جدول ۵: متوسط گشتاور کل و انحراف معیار توربین ترکیبی و توربین‌های داریوس

پره مستقیم معادل (سرعت دوران ۶۰ دور در دقیقه)

توربین ترکیبی	داریوس پره مستقیم به ارتفاع ۱/۴۵ متر	داریوس پره مستقیم به ارتفاع ۱/۶ متر	سرعت دوران ۶۰ دور در دقیقه متوسط گشتاور کل توربین (نیوتن متر)
۱/۲۲	۲/۴۴	۲/۶۷	متوسط گشتاور کل توربین (نیوتن متر)
۲/۴۷۸	۲/۸۰۲	۳/۱۵۹	انحراف معیار

Table 4. Values of average and deviation of total moment produced by the hybrid and straight-blade turbines at 30 rpm.mode.

جدول ۴: متوسط گشتاور کل و انحراف معیار توربین ترکیبی و توربین‌های داریوس

پره مستقیم معادل (سرعت دوران ۳۰ دور در دقیقه)

توربین ترکیبی	داریوس پره مستقیم به ارتفاع ۱/۴۵ متر	داریوس پره مستقیم به ارتفاع ۱/۶ متر	سرعت دوران ۳۰ دور در دقیقه متوسط گشتاور کل توربین (نیوتن متر)
۲/۹۳	۲/۴۶	۲/۹۰	متوسط گشتاور کل توربین (نیوتن متر)
۰/۹۴۸	۱/۱۳	۱/۳۰۴	انحراف معیار

به‌عنوان خطای نسبی محاسبه شده و بیشینه آن برای گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه برابر ۱۶/۲۳ درصد و برای گام زمانی ۰/۰۰۱ ثانیه برابر ۵/۰۹ درصد است. برای گام زمانی ۰/۰۰۱ ثانیه، مقدار خطا در سایر زوایا حدود ۲ درصد و کمتر از آن است. با در نظر گرفتن نزدیکی پاسخها برای دو گام زمانی ۰/۰۰۵ و ۰/۰۰۱ ثانیه و همچنین زمان و هزینه محاسباتی، برای سرعت دورانی ۶۰ دور در دقیقه، از گام زمانی ۰/۰۰۱ ثانیه در حل گذرا استفاده شده است.

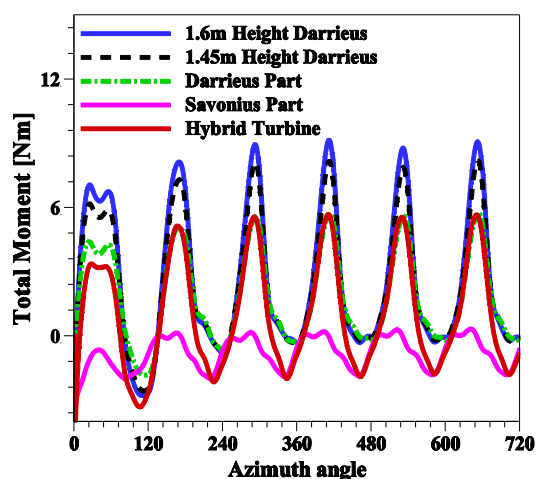
در مبحث استقلال از شبکه، پارامترها باید حداکثر مقدار خود را داشته باشند. یکی از این پارامترها سرعت جریان آزاد بوده که در این مسأله ثابت است. پارامتر دیگر، سرعت دورانی است؛ بنابراین استقلال از شبکه برای سرعت دورانی ۶۰ دور بر ثانیه با گام زمانی ۰/۰۰۱ ثانیه برای توربین پره مستقیم نیز انجام شده و در شکل ۱۴ قابل مشاهده است.

در دور دوم توربین (۳۶۰ تا ۲۷۰ درجه) دو شبکه ۱۴۰۰۰ و ۱۶۵۰۰۰ بیشینه خطای نسبی ۶/۰۲ درصد، به نظر می‌رسد تطابق قابل قبولی دارند و شبکه در حل دینامیک به استقلال رسیده است.

شکل ۱۵، گشتاور مجموع توربین ترکیبی را با توربین‌های معادل به ازای دو دور چرخش کامل توربین (زاویه سمت ۲۷۰ درجه)، در سرعت دوران ۳۰ دور در دقیقه مقایسه کرده است. همچنین سهم بخش ساوینوس و داریوس در توربین ترکیبی نیز نشان داده شده تا تحلیل جامع‌تری از عملکرد دینامیکی توربین ترکیبی داشته باشیم.

با توجه به مقادیر متوسط گشتاور و انحراف معیار که جدول ۴ نشان می‌دهد، در سرعت دوران ۳۰ دور در دقیقه نیز توربین ترکیبی نسبت به توربین‌های داریوس معادل، عملکرد بهتری دارد. توربین ترکیبی نسبت به توربین داریوس پره مستقیم به ارتفاع ۱/۶ و ۱/۴۵ متر به ترتیب ۱/۰۳ و ۱۹/۱ درصد گشتاور متوسط بیشتر و ۲۷/۳ و ۱۶/۱ درصد انحراف معیار

حاصل شود. به همین منظور توربین ترکیبی در سرعت‌های دوران ۳۰ و ۶۰ دور در دقیقه با توربین‌های معادل داریوس پره مستقیم مقایسه گردیده است. برای شروع حل گذرا باید گام زمانی مناسب برای حل گذرای مسأله انتخاب شود. حل مسأله با انتخاب گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه برای سرعت دورانی ۶۰ دور در دقیقه شروع شده و سپس گام زمانی آن قدر کاهش یافته تا پاسخها به استقلال از گام زمانی برسند. گام‌های زمانی ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۵ ثانیه به‌عنوان گام‌های زمانی بعدی انتخاب شده‌اند. شکل ۱۳ استقلال از گام زمانی را برای توربین ترکیبی به ازای دو دور چرخش کامل توربین (زاویه سمت ۲۷۰ درجه)، نشان می‌دهد. بیشترین اختلاف بین گام‌های زمانی استفاده شده، در نقاط بیشینه نمودار است. اختلاف سایر گام‌ها با گام زمانی ۰/۰۰۵ ثانیه



شکل ۱۶: گشتاور کل توربین ترکیبی در مقایسه با توربین‌های داریوس پره مستقیم

معادل در سرعت دورانی ۶۰ دور در دقیقه

Fig. 16. Total moment produced by the hybrid and straight-blade turbines at 60 rpm.

در سرعت دوران پایین نیز مانند حالت راهاندازی، بهتر از توربین‌های داریوس معادل است.

• برای دریافت اثر منفی افزایش سرعت دورانی توربین ساوینوس روی توربین ترکیبی، این توربین با سرعت ۶۰ دور در دقیقه نیز دوران داده شد و مشاهده گردید توربین ترکیبی نسبت به توربین‌های معادل اول و دوم به ترتیب، ۱۱/۶ و ۲۱/۶ درصد، انحراف معیار کمتر و ۳۷/۶ و ۵۴/۳ درصد، متوسط گشتاور کمتر دارد. در سرعت دورانی بالا اثر منفی توربین ساوینوس بیشتر می‌شود؛ بنابراین سرعت‌های دورانی بالا در محدوده عملکردی توربین ترکیبی جای نمی‌گیرند.

• افزایش گشتاور متوسط سبب افزایش توان توربین و قدرت راهاندازی آن می‌شود و کاهش انحراف معیار، نشان‌دهنده کاهش نوسانات گشتاور تولیدی توربین است. با کاهش نوسانات گشتاور تولیدی توربین، ارتعاشات کمتری به محور اصلی توربین وارد شده و باعث افزایش طول عمر مفید قطعات توربین می‌شود. گشتاور تولیدی توربین، گشتاور ورودی ژنراتور است؛ بنابراین کاهش نوسانات گشتاور ورودی به ژنراتور باعث از بین رفتن هارمونیک‌های اضافی ولتاژ خروجی می‌شود. در نتیجه مدار ساده‌تری برای جبران این هارمونیک‌های اضافی لازم است.

• با جمع‌بندی نتایج حالت راهاندازی و حالت دوار، در مقایسه با توربین‌های داریوس پره مستقیم معادل، توربین ترکیبی پیشنهاد شده در دسته توربین‌های کم‌سرعت قرار می‌گیرد. این توربین در شروع به حرکت، حتی در سرعت باد کم و سرعت‌های دورانی پایین عملکردی به مراتب بهتر از توربین‌های داریوس پره مستقیم معادل دارد. در مجموع به نظر می‌رسد توربین ترکیبی برای مناطق با سرعت باد کم و سرعت دوران پایین، کاملاً مناسب بوده و عملکرد بهتری نسبت به توربین‌های داریوس دارد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

A_s	مساحت جاروب شده، m^2
C	طول کورد، m
C_t	ضریب گشتاور
H	ارتفاع توربین، m
L	طول پره، m
M	گشتاور، $N.m$
P_w	توان در دسترس، W
R	شعاع روتور داریوس، m
r	شعاع روتور ساوینوس، m
t	ضخامت ورقه نیم استوانه، m
V_∞	سرعت جریان آزاد، m/s
علائم یونانی	
ρ	چگالی، kg/m^3

کمتری دارد.

به نظر می‌رسد عملکرد توربین ترکیبی در سرعت دوران پایین نیز مانند حالت راهاندازی، بهتر از توربین‌های داریوس معادل است. توربین‌های ساوینوس در سرعت‌های دورانی بالا عملکرد خوبی ندارند. این توربین‌ها در نیمه‌ی بالایی صفحه دوران (زاویه سمت ۹۰- تا ۹۰+ درجه) گشتاور منفی و در نیمه پایینی صفحه دوران (زاویه سمت ۹۰- تا ۲۷۰+ درجه) گشتاور با توجه به مقادیر متوسط گشتاور و انحراف معیار که جدول ۵ نشان می‌دهد، در سرعت دورانی ۶۰ دور در دقیقه، توربین ترکیبی نسبت به توربین داریوس پره مستقیم به ارتفاع ۱/۶ و ۱/۵۴ متر به ترتیب ۵۴/۳ و ۳۷/۶ درصد گشتاور متوسط کمتر و ۲۱/۶ و ۱۱/۶ درصد انحراف معیار کمتری دارد. توربین ترکیبی کماکان انحراف معیار کمتری از توربین‌های معادل دارد اما گشتاور کل متوسط آن به شدت افت کرده است و دلیل این افت نیز، گشتاور منفی بخش ساوینوس توربین ترکیبی است.

با جمع‌بندی نتایج حالت راهاندازی و حالت دینامیک، در مقایسه با توربین‌های داریوس پره مستقیم معادل، توربین ترکیبی پیشنهاد شده در دسته توربین‌های کم‌سرعت قرار می‌گیرد. این توربین در شروع به حرکت و سرعت‌های دورانی پایین عملکردی به مراتب بهتر از توربین‌های داریوس پره مستقیم معادل دارد.

۱۰- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر برای رفع مشکل راهاندازی و نوسانات زیاد توربین داریوس پره مستقیم، توربین ترکیبی داریوس-ساوینوس برای دستیابی به مدلی با گشتاور راهاندازی و محدوده عملکرد مناسب پیشنهاد گردید. سه پره مستقیم برای بخش داریوس توربین ترکیبی و سه ورقه به شکل نیم استوانه برای بخش ساوینوس آن در نظر گرفته شد. توربین ترکیبی با دو توربین داریوس پره مستقیم معادل، مقایسه شد. اولین مدل، توان در دسترس برابر و دومین مدل، ارتفاع یکسان با توربین ترکیبی دارند.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد:

• توربین ترکیبی در حالت راهاندازی نسبت به توربین‌های معادل اول و دوم به ترتیب، ۲۲/۴ و ۱۷/۵ درصد، انحراف معیار کمتر و ۶۹/۸ و ۵۶/۹ درصد، متوسط گشتاور بیشتر دارد.

• در سرعت دورانی ۳۰ دور در دقیقه، توربین ترکیبی نسبت به توربین‌های معادل اول و دوم به ترتیب، ۱۶/۱ و ۲۷/۳ درصد، انحراف معیار کمتر و ۱۹/۱ و ۱/۰۳ درصد، متوسط گشتاور بیشتر دارد. به نظر می‌رسد عملکرد توربین ترکیبی

- Engineering, 2009. CCECE'09. Canadian Conference on, IEEE, 2009, pp. 1178-1183.
- [8] R. Gupta, A. Biswas, CFD analysis of flow physics and aerodynamic performance of a combined three-bucket Savonius and three-bladed Darrieus turbine, *International journal of green energy*, 8(2) (2011) 209-233.
- [9] S. Bhuyan, A. Biswas, Investigations on self-starting and performance characteristics of simple H and hybrid H-Savonius vertical axis wind rotors, *Energy Conversion and Management*, 87 (2014) 859-867.
- [10] S. Kouravand, B. Moetakef Imani, A. Mashaallah Kermani, Design and analysis of a small wind turbine with combined airfoil, *Renewable and New Energy*, (2017) 66-73. (In Persian).
- [11] M. Rad, A. Zahedi Nejad, Fabrication and test of an axial wind turbine with the most power during absorbing flow kinetic energy, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, (2017) -. (In Persian)
- [12] J. Hinze, *Turbulence* McGraw-Hill, New York, 218 (1975).
- [13] B.E. Launder, D.B. Spalding, The numerical computation of turbulent flows, *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 3(2) (1974) 269-289.
- [14] A. Alaimo, A. Esposito, A. Messineo, C. Orlando, D. Tumino, 3D CFD analysis of a vertical axis wind turbine, *Energies*, 8(4) (2015) 3013-3033.
- [1] P. Mahale, N. Jangid, A. Gite, T.D. Patil, Vertical axis wind turbine: A lucid solution for global small scale energy crisis, *Journal of Academia and Industrial Research (JAIR)*, 3(8) (2015) 393.
- [2] A. Tummala, R.K. Velamati, D.K. Sinha, V. Indraj, V.H. Krishna, A review on small scale wind turbines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56 (2016) 1351-1371.
- [3] A. Roshan, M.J. Maghrebi, Performance improvement of hybrid Darrieus-Savonius wind turbine, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 6(3) (2016) 195-212. (In Persian).
- [4] T. Wakui, Y. Tanzawa, T. Hashizume, T. Nagao, Hybrid configuration of Darrieus and Savonius rotors for stand-alone wind turbine-generator systems, *Electrical Engineering in Japan*, 150(4) (2005) 13-22.
- [5] R. Gupta, R. Das, K. Sharma, Experimental study of a Savonius-Darrieus wind machine, in: *Proceedings of the International Conference on Renewable Energy for Developing Countries*, University of Columbia, Washington DC, 2006.
- [6] R. Gupta, A. Biswas, K. Sharma, Comparative study of a three-bucket Savonius rotor with a combined three-bucket Savonius–three-bladed Darrieus rotor, *Renewable Energy*, 33(9) (2008) 1974-1981.
- [7] M.J. Alam, M.T. Iqbal, Design and development of hybrid vertical axis turbine, in: *Electrical and Computer*