



بهبود عملکرد آیرودینامیکی توربین بادی محور عمودی ترکیبی داریوس-ساونیوس

ابوالفضل عبدالهی^۱، سید محمد حسین کریمیان

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۷-۲۳
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۹-۱۷
پذیرش: ۱۳۹۷-۱۱-۱۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۱-۱۷

کلمات کلیدی:

داریوس
ساونیوس
توربین ترکیبی
حالت دورانی
شبیه‌سازی عددی

خلاصه: پره‌های پشت به باد توربین‌های ساونیوس اثر منفی در تولید گشتاور این توربین‌ها دارند. با افزایش نسبت سرعت نوک پره این اثر منفی در تولید گشتاور بیشتر می‌شود. به همین علت بخش ساونیوس در توربین‌های ترکیبی داریوس-ساونیوس پس از شروع به حرکت و با افزایش نسبت سرعت نوک پره، گشتاور منفی تولید می‌نماید. در پژوهش حاضر، مقابل پره‌های پشت به باد توربین ساونیوس یک دیواره قرار داده شده است تا اثرات منفی این پره‌ها در تولید گشتاور کاهش یابد و در نتیجه عملکرد آیرودینامیکی آن بهبود داده شود. دو نوع پره ساونیوس با طول قوس مختلف و سه نوع دیواره با جانمایی مختلف به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شده و گشتاور تولیدی و مقدار نوسانات گشتاور آن‌ها در یک دور کامل محاسبه شده است. توربین ساونیوسی که بیشترین گشتاور متوسط و کم‌ترین نوسانات گشتاور را دارد روی یک توربین داریوس پره مستقیم سوار شده و توربین ترکیبی را تشکیل داده است. در مقایسه با توربین داریوس پره مستقیم، در نسبت سرعت نوک پره ۰/۹ توربین ترکیبی پیشنهادی ۲/۳ درصد گشتاور متوسط بیشتر و ۴۰ درصد نوسانات گشتاور کمتری دارد. این امر نشان می‌دهد توربین ترکیبی پیشنهادی در مقایسه با مدل‌های متداول خود از نظر نسبت سرعت نوک پره، حوزه کاری گسترده‌تری دارد.

۱- مقدمه

بازده کمتری دارند ولی در شروع حرکت و در نسبت سرعت نوک پره^۱ پایین عملکرد مطلوبی دارند [۶]. توربین داریوس پره مستقیم ساده‌ترین نوع توربین داریوس است که به دلیل متوسط گشتاور بالا و ساخت ساده مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ اما با این حال این توربین دو عیب دارد: نوسانات زیاد گشتاور تولیدی و عدم توانایی شروع خودکار^۲. نوسانات زیاد گشتاور تولیدی علاوه بر ایجاد مشکل برای ژنراتور، عمر قطعات توربین را نیز کاهش می‌دهد [۸].

برای حل مشکل راه‌اندازی و کاهش نوسانات گشتاور توربین پره مستقیم پژوهش‌های زیادی به صورت عددی و تجربی انجام شده است. در توربین‌های داریوس پره مارپیچ، گرچه مشکل راه‌اندازی و نوسانات گشتاور توربین پره مستقیم برطرف شده است اما تولید پره این نوع توربین هزینه بالاتری دارد و گشتاور متوسط آن نیز نسبت به پره مستقیم کمتر است [۹-۱۱].

یکی از روش‌های متداول که برای افزایش گشتاور راه‌اندازی

یکی از منابع تجدیدپذیر انرژی شناخته شده که امروزه به‌طور وسیع مورد استفاده قرار گرفته، انرژی بادی است [۱]. به‌طور کلی توربین‌های بادی به دو دسته عمده تقسیم‌بندی می‌شوند: توربین‌های محور عمودی و محور افقی. توربین‌های محور افقی در مقیاس بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرند و بازده بالاتری نسبت به توربین‌های محور عمودی دارند؛ اما در مقابل توربین‌های محور عمودی نسبت به نوع محور افقی تأثیر منفی کمتری روی محیط‌زیست گذاشته و به دلیل مزیت‌هایی که دارند مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند. مهم‌ترین این مزیت‌ها عبارت‌اند از: عدم وابستگی به جهت باد، کم بودن هزینه تعمیر و نگهداری، کم‌صدا بودن و غیره [۷-۲].

توربین‌های ساونیوس و داریوس دو دسته عمده توربین‌های محور عمودی را تشکیل می‌دهند که اساس چرخش آن‌ها به ترتیب بر مبنای نیروی پسا و برا است. توربین‌های ساونیوس نسبت به داریوس

1 Tip Speed Ratio (TSR)

2 Self-Starting

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a.abdolahifar@aut.ac.ir



را بهبود بخشیدند.

در حالت کاری توربین‌های ساوونیوس، پره‌های رو به باد گشتاور مثبت و پره‌های پشت به باد گشتاور منفی تولید می‌کنند. اگر برآیند این گشتاورها مثبت باشد توربین گشتاور مثبت تولید می‌کند. سرعت نسبی روی پره‌های پشت به باد حاصل جمع سرعت باد و سرعت پره است ولی برای پره‌های رو به باد این سرعت برابر تفاضل سرعت باد و سرعت پره است. هرچه ضریب پسای پره و سرعت نسبی روی آن بیشتر باشد، نیروی پسای بیشتری به پره وارد شده و پره گشتاور بیشتری تولید می‌کند. طبیعتاً سرعت نسبی روی پره‌های پشت به باد بیشتر از پره‌های رو به باد است؛ از طرفی پره‌های رو به باد ضریب پسای بیشتری دارند. مادامی که در تقابل ضریب پسای پره و سرعت نسبی روی آن، گشتاور پره رو به باد بیشتر باشد، گشتاور توربین مثبت خواهد بود. با افزایش نسبت سرعت نوک پره، سرعت نسبی روی پره‌های پشت به باد زیاد و روی پره‌های رو به باد کم می‌شود؛ در نتیجه از یک نسبت سرعت نوک پره به بعد گشتاور توربین اصطلاحاً منفی می‌شود. این امر موجب می‌شود توربین‌های ساوونیوس در محدوده نسبت سرعت نوک پره پایین استفاده شوند. در توربین‌های ترکیبی داریوس-ساوونیوس نیز حضور بخش ساوونیوس باعث می‌شود در نسبت سرعت نوک پره بالا این بخش گشتاور منفی تولید کرده و بازده کل توربین را کاهش دهد [۱۷].

در شبیه‌سازی عددی پژوهش حاضر، با ایجاد یک دیواره مقابل پره‌های پشت به باد توربین ساوونیوس، اثر سرعت باد روی این پره‌ها حذف شده تا سرعت نسبی روی آن‌ها کاسته شود؛ بنابراین توربین خواهد توانست در نسبت سرعت نوک پره بالاتر نیز عملکرد مطلوب داشته باشد. گرچه در پژوهش‌های پیشین [۱۷ و ۱۸] عملکرد توربین داریوس در حالت راه‌اندازی بهبود داده شده و با تغییر شکل پره عملکرد توربین ترکیبی بهینه شده است اما در هیچ یک از دو مرجع ذکر شده و مراجع دیگر مرور شده مورد مشابه دیده نشده است.

ابتدا یک نوع توربین ساوونیوس سه‌پره‌ای در نسبت سرعت نوک پره‌ای که گشتاور منفی تولید می‌کند انتخاب گردید؛ سپس با اضافه شدن سه نوع دیواره و یک نوع دیگر توربین ساوونیوس سه‌پره‌ای، توربینی که بهترین عملکرد آیرودینامیکی را دارد انتخاب می‌شود. در مرحله بعدی، برای پره‌های توربین انتخاب شده هم‌پوشانی لحاظ شده و اثر آن در توربین ساوونیوس دو و سه‌پره‌ای مورد مطالعه قرار گرفته

توربین پره مستقیم پیشنهاد شده، استفاده از توربین ترکیبی داریوس-ساوونیوس است؛ بنابراین بخش ساوونیوس توربین ترکیبی در نقش محرک برای شروع چرخش توربین عمل خواهد کرد.

در سال ۲۰۰۵ واکوئی و همکاران [۱۲]، توربین ترکیبی داریوس-ساوونیوس را با تغییر محل قرار گرفتن بخش ساوونیوس مورد بررسی قرار دادند. قرار دادن توربین ساوونیوس در فضای خالی داخل توربین داریوس، منجر به کاهش بازده هر دو توربین گردید؛ البته در توربین‌های مقیاس بزرگ قرارگیری بخش ساوونیوس در داخل اثرات منفی کمتری دارد. حضور بخش ساوونیوس در پایین بخش داریوس نشان داد که دو توربین اثری روی یکدیگر ندارند و این حالت مطلوب‌تر است. در سال ۲۰۰۶ و ۲۰۰۸ گوپتا و همکاران [۱۳] و [۱۴] نیز توربین ترکیبی را به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار داده و نشان دادند توربین ساوونیوس سه پره‌ای توان مطلوب‌تری تولید می‌کند. در سال ۲۰۰۹، علم و همکاران [۱۵]، توربین ساوونیوس دو طبقه را به توربین داریوس اضافه کرده و حداقل سرعت شروع به چرخش را در آب و هوا اندازه‌گیری نمودند. بویان و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۴ ایرفویل نامتقارن را برای توربین پره مستقیم ارائه دادند و این امر باعث بهبود عملکرد راه‌اندازی گردید؛ سپس برای تکمیل فرایند راه‌اندازی، توربین ساوونیوس را به این توربین اضافه نمودند. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیدند که توربین داریوس تخم‌مرغی شکل نیز به دلیل وجود فضای میانی بیشتر گزینه مناسبی برای قرارگیری بخش ساوونیوس در داخل بخش داریوس است. در سال ۲۰۱۸، اکبری و عبدالهی‌فر [۱۷] توربین ترکیبی داریوس-ساوونیوس را به صورت سه‌بعدی مورد شبیه‌سازی قرار دادند. در حالت راه‌اندازی عملکرد توربین ترکیبی به مراتب بهتر از توربین پره مستقیم بود. هرچند با افزایش نسبت سرعت نوک پره عملکرد بخش ساوونیوس کاهش پیدا کرد و در سرعت ۶۰ دور در دقیقه (نسبت سرعت نوک پره ۰/۹) بخش ساوونیوس گشتاور منفی تولید نمود؛ بنابراین برای توربین ترکیبی سرعت دورانی حدود ۳۰ دور در دقیقه (نسبت سرعت نوک پره ۰/۴۴) و نواحی با سرعت باد کم توصیه گردید. با توجه به کم بازده بودن بخش ساوونیوس توربین ترکیبی در حالت کاری، پژوهش‌های زیادی برای بهبود آن انجام شده است. برای مثال، روشن و مغربی [۱۸] به کمک شبیه‌سازی دو بعدی با بهینه کردن زاویه کمان پره‌های ساوونیوس و صلبیت ایرفویل عملکرد توربین ترکیبی

قسمت اضافه شده در رابطه (۳) بانام تنش رینولدز شناخته شده و به صورت رابطه (۴) تعریف می شود.

$$t_{ij} = - \overline{ru_i u_j} \quad (4)$$

پژوهشگران زیادی از مدل های دومعادله ای کا-امگا و کا-پسیلون استفاده می کنند. معرفی مدل آشفتگی اس.اس.تی^۲ به وسیله منتر [۲۲]، پیشرفت قابل توجهی در زمینه شبیه سازی جریان های سیال ارائه نمود. در مسائل آیرودینامیکی دارای گرادیان فشار معکوس و در پیش بینی جدایش جریان نیز مدل اس.اس.تی توانایی بالایی دارد [۲۲].

مدل اس.اس.تی در شبیه سازی جریان های اطراف توربین بادی محور عمودی استفاده فراوانی داشته است. در پژوهش مک لارن و همکاران [۲۳] نتایج آزمایشگاهی شلدا و همکاران [۲۴] با این مدل SST و دو مدل متداول کا-امگا و کا-پسیلون مقایسه گردید و مدل اس.اس.تی بیشترین تطابق را با نتایج آزمایشگاهی ارائه داد. بر همین اساس مدل آشفتگی اس.اس.تی برای این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است.

در این پژوهش جریان آشفته، تراکم ناپذیر و گذرا حول توربین بادی محور عمودی به صورت سه بعدی در نرم افزار انسیس فلونت^۳ شبیه سازی شده است. برای گسسته سازی معادلات دیفرانسیل، از روش حجم محدود و برای حل معادلات فشار و مومنتوم، از گسسته سازی مرتبه دوم استفاده شده است. عدد رینولدز جریان آزاد بر اساس طول پره ساونیوس حدود ۳۰۰۰۰۰ بوده و چرخش توربین با استفاده از روش شبکه لغزان^۴ مدل سازی شده است.

۳- هندسه توربین ها

مطابق شکل ۱، زاویه سمت در صفحه X-Y تعریف شده و مقدار آن در جهت مثبت محور Y برابر صفر در نظر گرفته شده است. توربین در جهت مثبت محور Z دوران می کند و زاویه سمت به صورت پاد ساعت گرد از صفر تا ۳۶۰ درجه افزایش می یابد. جریان هوا در جهت مثبت محور X موازی با خط واصل زاویه سمت ۹۰ درجه به

است. در نهایت، با توجه به میزان گشتاور تولیدی و نوسانات آن، توربین مناسب انتخاب گردیده است. توربین ساونیوس انتخاب شده در بالای توربین داریوس پره مستقیم قرار گرفته و توربین ترکیبی پیشنهادی را تشکیل دادند. به منظور اعتبارسنجی نتایج عددی پژوهش حاضر، از نتایج آزمایشگاهی الخوری و همکاران و فوجیساوا [۱۹ و ۲۰] برای دو توربین داریوس پره مستقیم و ساونیوس استفاده شده است. در واقع در این پژوهش با بهبود عملکرد توربین ساونیوس و متعاقباً توربین ترکیبی متداول، حوزه کاری آن از نظر نسبت سرعت نوک پره افزایش داده شده است و این توربین خواهد توانست در نسبت سرعت نوک پره بالاتر از نوع متداول خود نیز عملکرد آیرودینامیکی مطلوب داشته باشد. با توجه به فیزیک توربین های ترکیبی و همچنین به دلیل وجود گردابه های نوک پره، در این پژوهش از شبیه سازی سه بعدی استفاده شده است. گسترش حوزه عملکردی توربین های ترکیبی می تواند گامی در جهت افزایش بهره وری و توسعه آن ها گردد.

۲- معادلات حاکم بر جریان سیال و روش حل

برای شبیه سازی در این پژوهش از معادلات متوسط گیری شده ناویر-استوکس^۱ استفاده شده است. شکل تانسوری این معادلات برای سیال تراکم ناپذیر در معادلات (۱) و (۲) قابل مشاهده است [۲۱].

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu S_{ji} - \overline{\rho u'_j u'_i})$$

که در آن:

حروف بزرگ نشان دهنده میانگین گیری زمانی است و S_{ij} نرخ کرنش متوسط است که در رابطه (۳) تعریف شده است. زیروندهای i و j نیز اندیس های تانسوری هستند که مقدار آن ها از ۱ تا ۳ متغیرند.

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

2 Shear Stress Transport (SST)

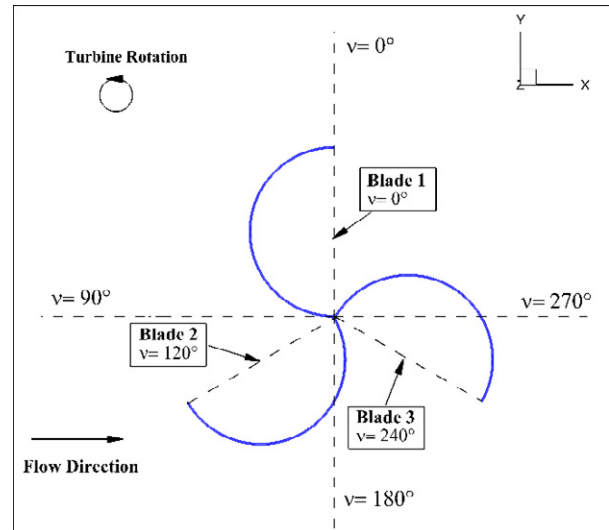
3 ANSYS Fluent 17.2

4 Sliding Mesh

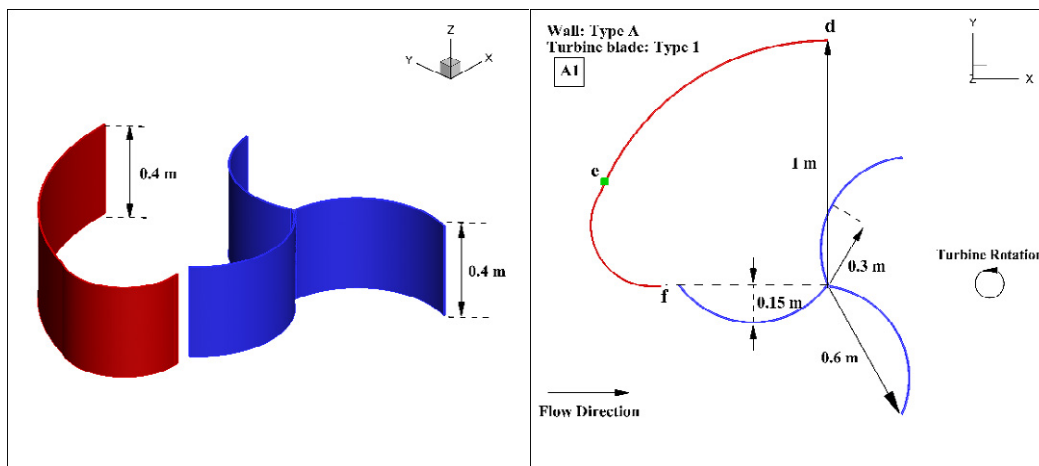
1 Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)

۲۷۰ درجه، در نظر گرفته شده است.

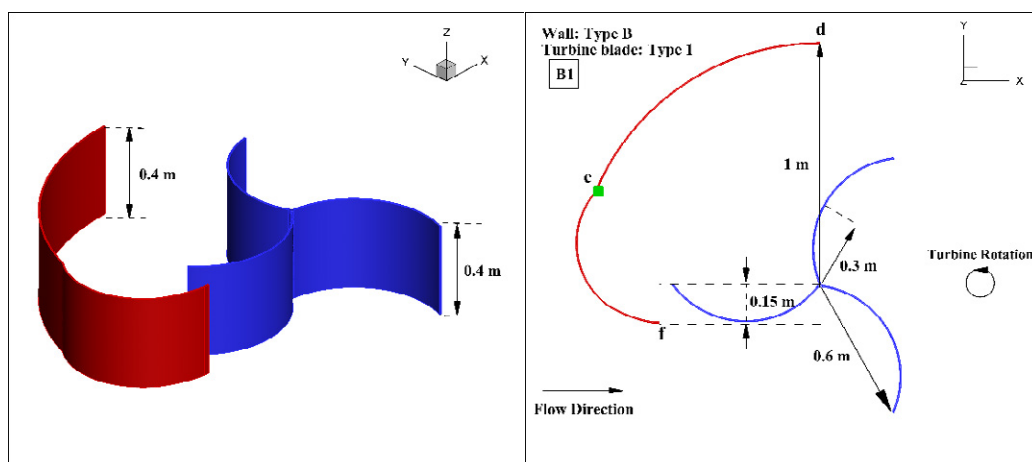
دو نوع توربین ساونیوس و سه نوع دیواره برای مطالعه انتخاب شده است. به منظور سادگی بیان، توربین‌ها با نام‌های ۱ و ۲ و دیواره‌ها با نام‌های A، B و C نام‌گذاری شده‌اند و در شکل‌های ۲ تا ۸، به ترتیب قابل مشاهده هستند. لازم به توضیح است برای نمایش بهتر موقعیت پره‌ها نسبت به دیواره، در این شکل‌ها، پره اول در زاویه سمت ۹۰ درجه قرار گرفته و پره دوم و سوم با اختلاف زاویه سمت ۱۲۰ درجه‌ای نسبت به آن قرار گرفته‌اند. شعاع همه توربین‌های ساونیوس از مرکز توربین تا انتهای پره محاسبه شده و برابر ۰/۶ متر است. ارتفاع پره‌های ساونیوس برابر ۰/۴ متر و ضخامت هر یک ۵ میلی‌متر است. دیواره‌ها نیز با ارتفاع ۰/۴ متر و ضخامت ۵ میلی‌متر روی دو منحنی به نام‌های de و ef قرار گرفته‌اند. شکل‌های ۲ تا ۴،



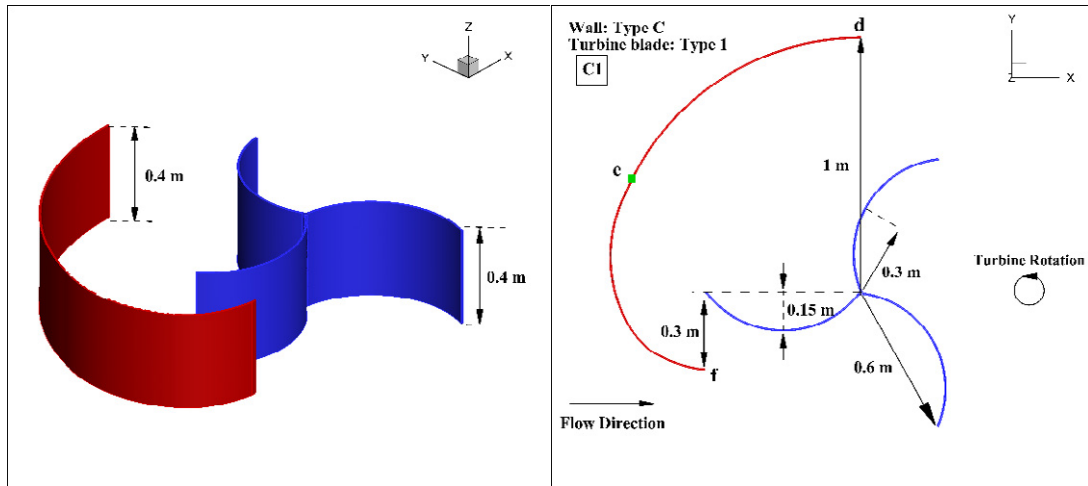
شکل ۱: تعریف زاویه سمت برای پره‌های توربین نسبت به جهت جریان.
Fig.1: Azimuth angle definition for turbine blades relative to the flow direction.



شکل ۲: مشخصات هندسی توربین ساونیوس و دیواره A1.
Fig.2: Geometrical specifications of the Savonius turbine and the wall, type of A1.



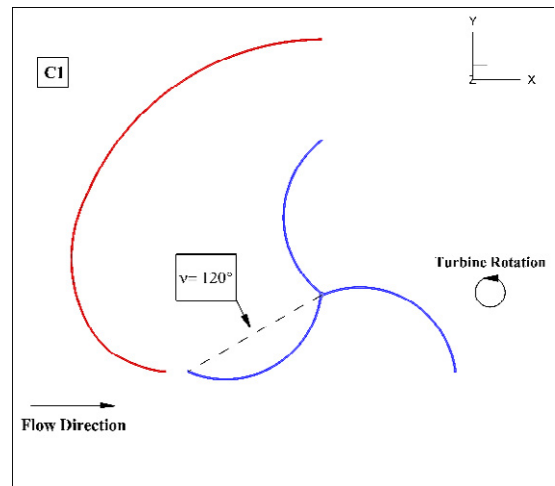
شکل ۳: مشخصات هندسی توربین ساونیوس و دیواره B1.
Fig.3: Geometrical specifications of the Savonius turbine and the wall, type of B1.



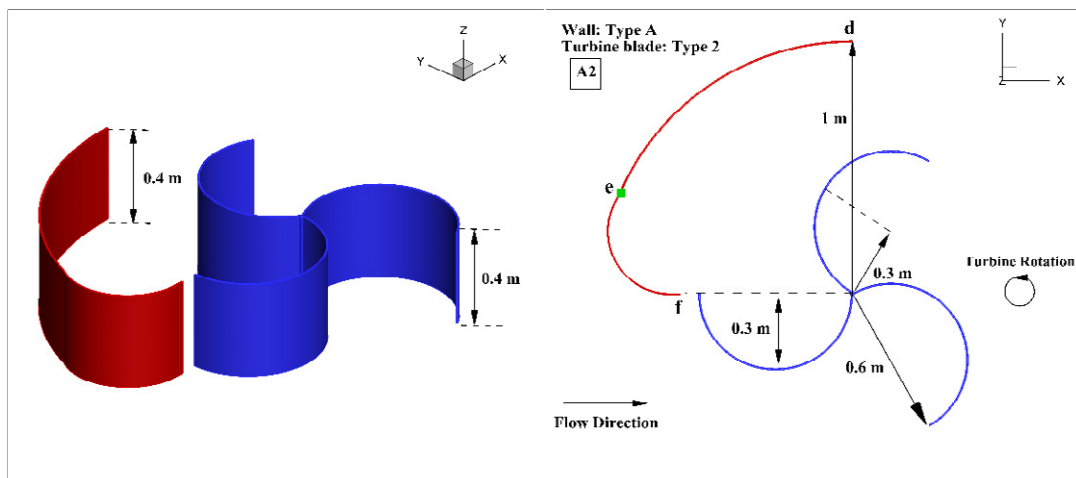
شکل ۴: مشخصات هندسی توربین ساونیوس و دیواره C1.
 Fig.4: Geometrical specifications of the Savonius turbine and the wall, type of C1.

توربین ساونیوس نوع اول با طول قوس 0.15 متر را نشان می‌دهند. نحوه قرارگیری دیواره و توربین در مجموعه توربین و دیواره C1 به‌گونه‌ای است که در زاویه سمت 120° درجه، دیواره و منحنی پره هم‌راستا می‌شوند و با عبور پره از راستای دیواره، جریان می‌تواند وارد قسمت داخلی پره می‌شود. در شکل ۵ این مورد قابل مشاهده است. شکل‌های ۶ تا ۸، توربین ساونیوس نوع دوم با طول قوس 0.3 متر را نشان می‌دهند.

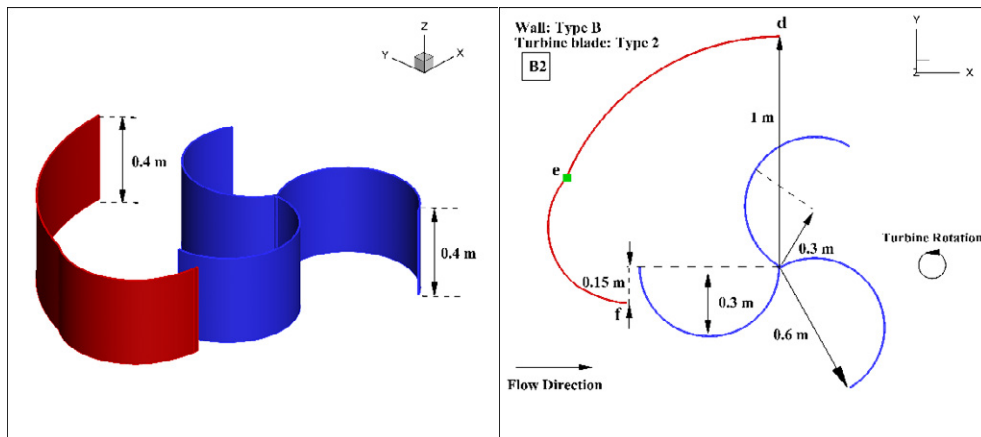
منحنی de در تمام دیواره‌ها ثابت بوده و بخشی محیط از دایره‌ای به شعاع یک متر و مرکز توربین است. نقطه d در زاویه سمت صفر درجه و نقطه e در زاویه سمت 67° درجه قرار دارد. منحنی ef، برای سه نوع دیواره متفاوت بوده و از اتصال پیوسته پنج نقطه حاصل



شکل ۵: هم‌راستایی پره و دیواره در توربین ساونیوس و دیواره C1.
 Fig.5: Blade and wall alignment of the Savonius turbine and the wall, type of C1.

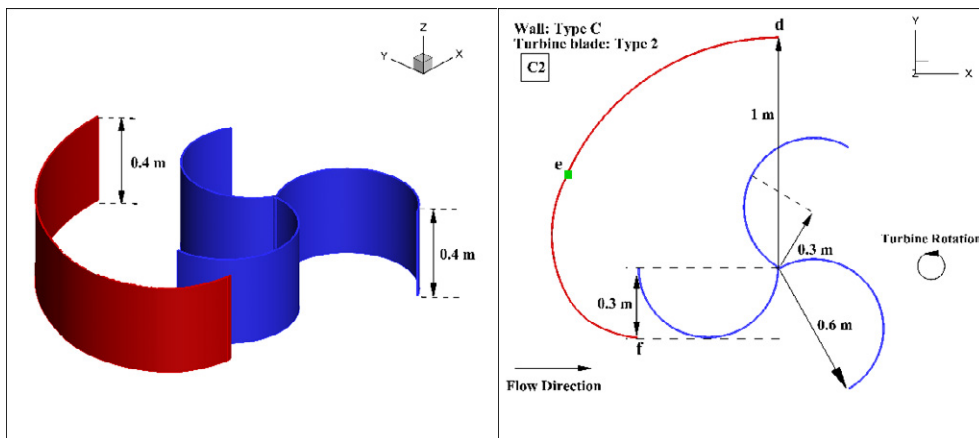


شکل ۶: مشخصات هندسی توربین ساونیوس و دیواره A2.
 Fig.6: Geometrical specifications of the Savonius turbine and the wall, type of A2.



شکل ۷: مشخصات هندسی توربین ساوونیوس و دیواره B2.

Fig.7: Geometrical specifications of the Savonius turbine and wall, type of B2.



شکل ۸: مشخصات هندسی توربین ساوونیوس و دیواره C2.

Fig.8: Geometrical specifications of the Savonius turbine and the wall, type of C2.

جدول ۱: مختصات پنج نقطه روی منحنی دیواره.

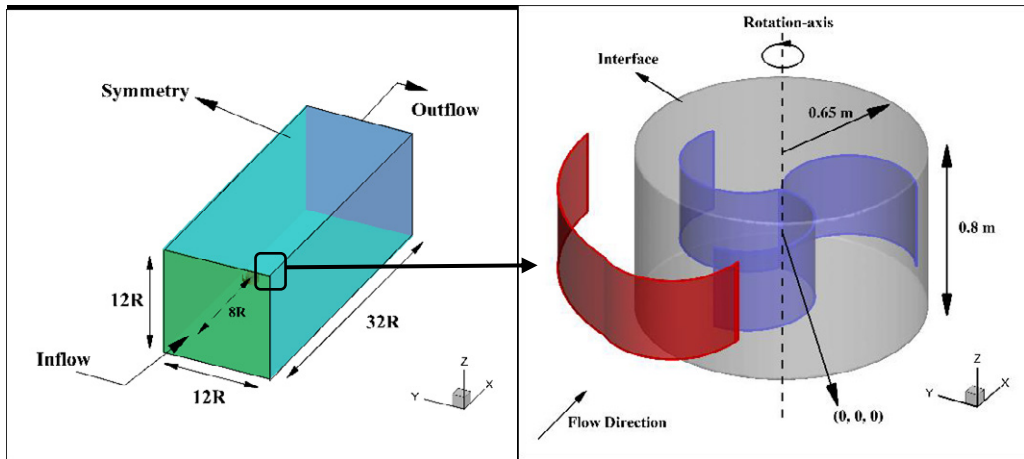
Table 1: The five points coordinates located on the curve of wall.

نوع C	نوع B	نوع A	دیواره
$r(m), \nu^\circ$	$r(m), \nu^\circ$	$r(m), \nu^\circ$	نقاط روی منحنی ef
(1 و 67)	(1 و 67)	(1 و 67)	نقطه 1 (e)
(0/8 و 100)	(0/94 و 90)	(0/97 و 78)	نقطه 2
(0/72 و 105)	(0/86 و 95)	(0/88 و 85)	نقطه 3
(0/69 و 116)	(0/69 و 103)	(0/69 و 90)	نقطه 4
(0/67 و 117)	(0/67 و 104)	(0/67 و 90)	نقطه 5 (f)

۴- ناحیه محاسباتی، شرایط مرزی و تولید شبکه

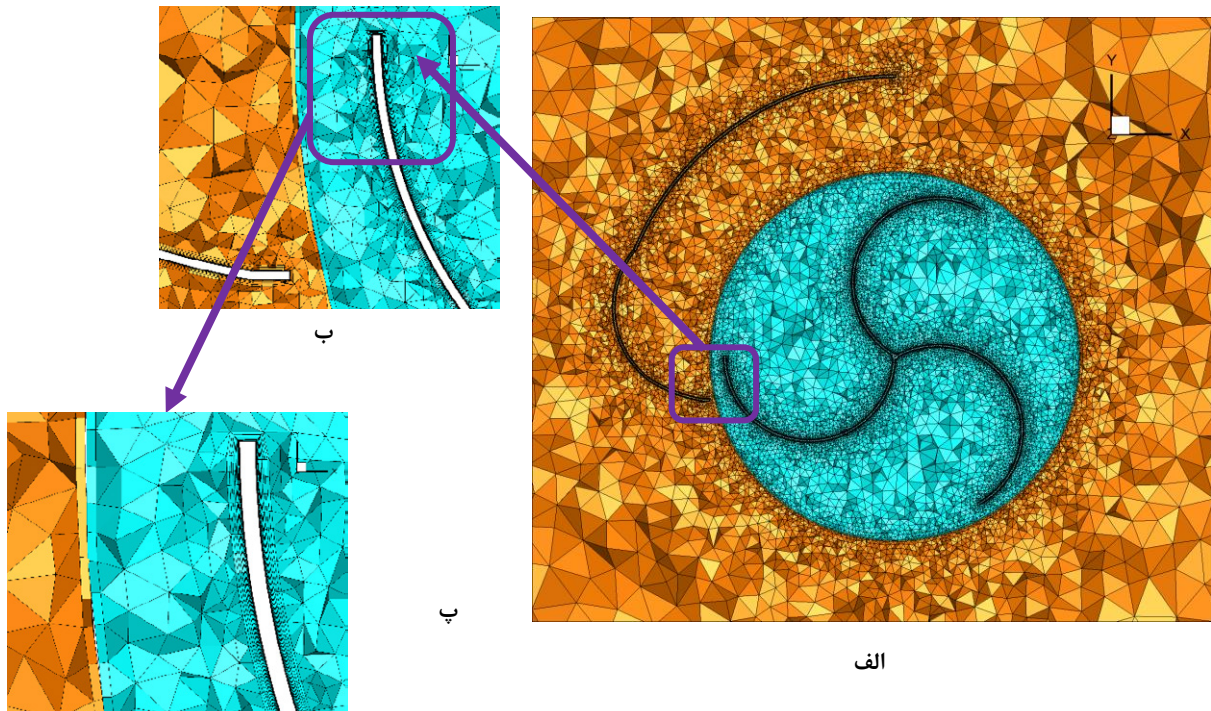
همان‌گونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، ناحیه‌ی محاسباتی یک مکعب مستطیل با ابعاد $12R$ ، $32R$ و $12R$ به ترتیب در جهات X ، Y و Z است. متغیر R نیز بیشینه شعاع دیواره و برابر یک متر است. ناحیه محاسباتی به دو ناحیه ساکن و دوار تقسیم می‌شود.

شده که مختصات آن بر حسب شعاع و زاویه سمت در جدول ۱ قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نقطه f از زاویه سمت 90° درجه تا زاویه سمت 117° درجه (فاصله $0/3$ متر در جهت $-Y$) جایجا می‌شود تا اثرات جریان مماس بر دیواره روی پره‌ای که در مجاور دیواره قرار دارد بررسی شود.



شکل ۹: ناحیه محاسباتی، ناحیه دوار و دیواره.

Fig.9: The computational domain, rotating zone and wall.



شکل ۱۰: نمای بالای شبکه تولیدشده در صفحه $Z=0$. الف: ناحیه دوار و دیواره، ب و پ: شبکه باسازمان تولیدشده در مرز ناحیه دوار و ساکن و روی پره. Fig. 10: Top view of generated grid at the plane of $Z=0$. a) Rotating zone and the wall, b and c) structured grid generated at the interface and on the wall and turbine blades.

آن قرار دارد. مبدأ مختصات در مرکز توربین قرار دارد و فاصله آن مرز ورودی جریان برابر $8R$ است. در مرز ورودی سرعت ثابت جریان آزاد^۲ و در مرز خروجی فشار استاتیکی استاندارد^۳ اعمال شده و روی دیواره‌ها و پره‌های توربین

دیواره، نزدیک مرز ناحیه ساکن و دوار و در ناحیه ساکن قرار دارد. هوا در شرایط استاندارد سطح دریا^۱ با سرعت ثابت و یکنواخت ۷ متر بر ثانیه در جهت مثبت محور X وارد میدان می‌شود. مطابق شکل ۹ شعاع ناحیه دوار ۰/۶۵ و ارتفاع آن ۰/۸ متر است و توربین در مرکز

2 Velocity Inlet B.C.
3 Pressure Outlet B.C.

1 Sea Level

جدول ۲: بررسی استقلال ابعادی برای توربین ساونیوس در حالت استاتیک. (* میدان انتخاب شده است).

Table 2: Results of domain size study for the Savonius turbine at the static mode. (* domain finally chosen).

نام	میدان اول	میدان دوم*	میدان سوم
ابعاد (X, Y, Z)	24R×9R×9R	32R×12R×12R	40R×15R×15R
فاصله مرکز توربین تا مرز ورودی	6R	8R	10R
درصد افزایش حجم نسبت به میدان اول	-	140	360
گشتاور کل (نیوتن متر)	0/6142	0/6454	0/6518
درصد خطای گشتاور کل نسبت به قبلی	-	4/8	0/98

گردد. پره اول در زاویه سمت صفر و بقیه پره‌ها با اختلاف زاویه سمت ۱۲۰ درجه‌ای نسبت به هم قرار گرفته‌اند. شرایط مرزی اعمال شده بر میدان مطابق بخش ۴ بوده و شبکه مورد استفاده، شبکه‌ای است که در قسمت استقلال شبکه کیفیت آن مورد تأیید قرار خواهد گرفت. معیار انتخاب میدان محاسباتی مناسب، بر اساس تغییرات گشتاور کل توربین بوده و هر درصد خطا نسبت به مقدار قبلی محاسبه شده است. جدول ۲ مشخصات ابعادی میدان‌های مورد نظر، محل قرارگیری توربین، گشتاور کل و درصد خطای نسبی گشتاور کل برای هر میدان را بیان می‌کند. با توجه به کاهش درصد خطای نسبی به کمتر از یک درصد بین میدان دوم و سوم، میدان دوم، همان میدان بیان شده در بخش ۴، مناسب به نظر می‌رسد و برای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است.

۵-۲- استقلال از شبکه و گام زمانی

برای بررسی استقلال از تعداد سلول شبکه محاسباتی، اندازه سلول‌ها در نواحی نزدیک توربین و دیواره ریز گردید و بیشترین تغییرات گشتاور کل در ریز کردن اندازه سلول‌های روی پره و اطراف آن مشاهده گردید. در سرعت دورانی ۶۰ دور در دقیقه با گام زمانی ۰/۰۰۱ ثانیه، گشتاور کل برای سه شبکه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مناسب بودن گام زمانی مورد استفاده در ادامه به دست می‌آید. این سه شبکه در توربین نوع دوم بدون دیواره ایجاد شده و اندازه هر سلول روی پره برای شبکه اول، دوم و سوم به ترتیب برابر ۰/۰۲، ۰/۰۱۳ و ۰/۰۰۹۵ متر و ارتفاع اولین لایه برابر ۵×۱۰^{-۵} متر و ثابت در نظر گرفته شده است. تعداد سلول این شبکه‌ها نیز به ترتیب برابر ۴/۲، ۳/۴ و ۵/۷ میلیون است. بیشینه و متوسط مقادیر Y^+ برای سلول‌های روی پره در جدول ۳ قابل مشاهده است. با توجه به

شرط عدم لغزش^۱ اعمال شده است. در سایر وجه‌های اطراف میدان حل، شرط مرزی تقارن^۲ در نظر گرفته شده است؛ بنابراین تنش برشی و گرادیان سرعت روی این وجوه صفر خواهد بود [۲۵ و ۲۶]. شبکه تولیدشده به صورت کلی از نوع بی‌سازمان^۳ بوده ولی اطراف پره‌های توربین و دیواره از شبکه باسازمان^۴ استفاده شده است. در شکل ۱۰، نمای بالای شبکه تولیدشده در صفحه $Z=0$ ارائه شده است. ناحیه دوار و دیواره در قسمت (الف) شکل ۱۰ و شبکه باسازمان نزدیک پره به همراه مرز ناحیه ساکن و دوار در قسمت‌های (ب) و (پ) شکل ۱۰ قابل مشاهده هستند. در مرز ناحیه ساکن و دوار به‌منظور افزایش دقت محاسبه شار عبوری بین دو ناحیه، از شبکه باسازمان استفاده شده است.

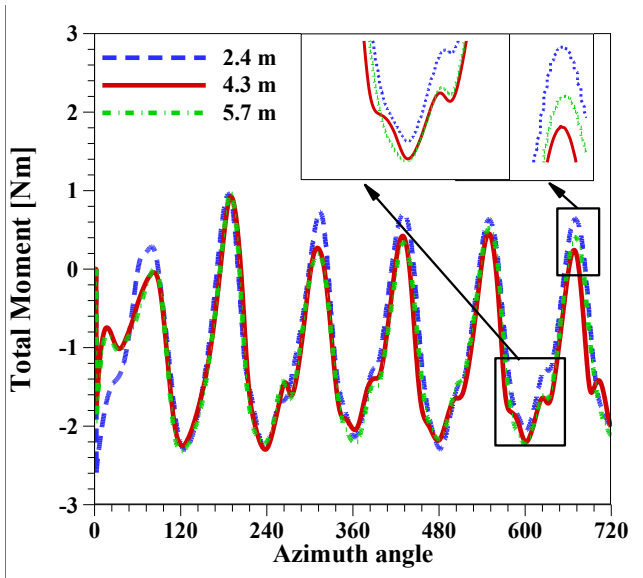
۵- بررسی استقلال شبیه‌سازی و اعتبارسنجی

در پژوهش‌های دینامیک سیالات محاسباتی یکی از اهداف پژوهش‌گر، دستیابی به دقت مناسب با در نظر گرفتن هزینه‌های محاسباتی است؛ به همین منظور در این قسمت به ترتیب مقادیر مناسب برای ابعاد میدان حل، تعداد سلول شبکه و گام زمانی تعیین شده است. سپس برای سنجش اعتبار شبیه‌سازی حاضر، از نتایج تجربی دو نوع توربین داریوس و ساونیوس استفاده شده است.

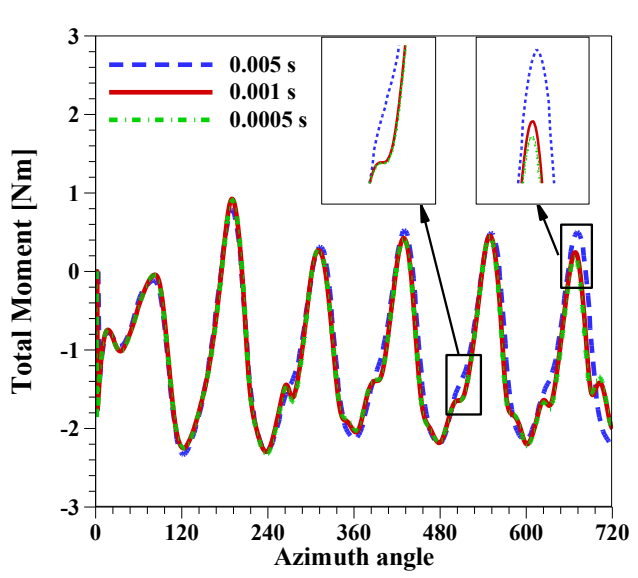
۵-۱- استقلال ابعادی

توربین و دیواره B2 در حالت استاتیک در سه میدان مختلف مورد مطالعه قرار گرفته تا حداقل ابعاد مناسب میدان حل تعیین

- 1 No Slip
- 2 Symmetry B.C.
- 3 Unstructured Grid
- 4 Structured Grid



الف



ب

شکل ۱۱: استقلال از شبکه و گام زمانی. الف: استقلال از تعداد سلول شبکه، ب: استقلال از گام زمانی.

Fig.11: Grid and time independency study. (a) grid, (b) time.

$$TSR = \frac{R \omega}{V_{\infty}} \quad (5)$$

مشخصات هندسی توربین داریوس و ساونیوس الخوری و فوجیساوا به همراه سرعت باد شرایط آزمایشگاهی در جدول ۴ قابل مشاهده است. مساحت جاروب شده به وسیله توربین برابر است با

جدول ۳: مقادیر بیشینه و متوسط Y^+ روی پره های توربین ساونیوس.
Table 3: Maximum and averages of Y^+ values on the Savonius turbine blades.

متوسط Y^+	بیشینه Y^+	
0/73	2/75	شبکه اول
0/67	2/46	شبکه دوم
0/6	2/11	شبکه سوم

استفاده از مدل ای.اس.تی، برای هر سه شبکه محدوده Y^+ رعایت شده است [۲۷]. شکل ۱۱ (الف) گشتاور کل توربین نوع دوم بدون دیواره را در سرعت دورانی ۶۰ دور در دقیقه برای سه شبکه به ازای دو دور کامل چرخش توربین نشان می دهد. شبکه دوم با $4/3$ میلیون سلول و با اختلاف متوسط کمتر از ۵ درصد در گشتاور کل نسبت به شبکه ریزتر، به عنوان شبکه مطلوب انتخاب گردید.

لازم به ذکر است این شبکه برای توربین بدون دیواره است. در نواحی نزدیک دیواره برای شبکه هایی که همراه با دیواره هستند نیز شبکه ریز تولید شده است. این امر موجب افزایش تعداد سلول محاسباتی می شود و تعداد سلول شبکه های همراه با دیواره برابر $5/3$ میلیون است.

به منظور بررسی مناسب بودن گام زمانی انتخاب شده، شبکه قبلی بدون دیواره با $4/3$ میلیون سلول با دو گام زمانی $0/005$ و $0/001$ ثانیه نیز مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به منحنی گشتاور کل در شکل ۱۱ (ب)، گام زمانی $0/001$ ثانیه با اختلاف متوسط کمتر از ۲ درصد در گشتاور کل نسبت به گام زمانی $0/005$ ثانیه، به عنوان گام زمانی مطلوب انتخاب گردید.

۳-۵- اعتبارسنجی

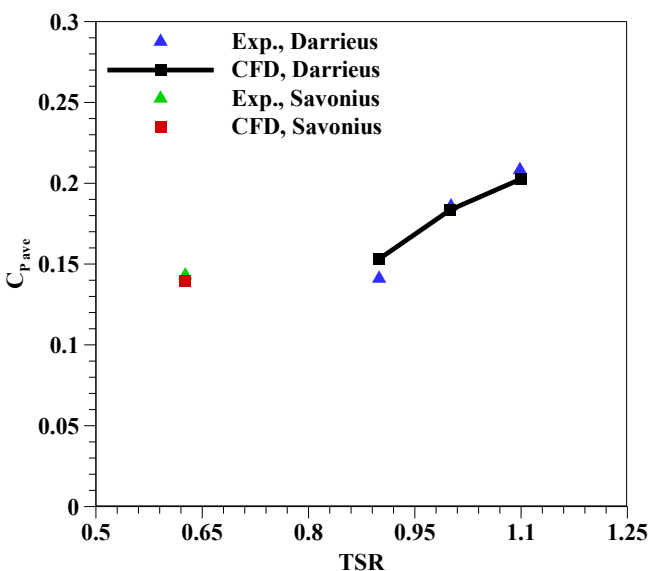
اعتبارسنجی در دو قسمت مجزا برای دو توربین داریوس و ساونیوس انجام شده است. از نتایج تجربی پژوهش الخوری و همکاران [۱۹] برای توربین داریوس پره مستقیم (از نسبت سرعت نوک پره $0/9$ تا $1/1$) و از نتایج تجربی پژوهش فوجیساوا [۲۰] برای توربین ساونیوس (در نسبت سرعت نوک پره $0/626$) استفاده شده است. نسبت سرعت نوک پره مطابق رابطه (۵) تعریف می شود.

جدول ۴: مشخصات هندسی توربین داریوس پره مستقیم الخوری و همکاران [۱۹] و ساونیوس فوجیساوا [۲۰] به همراه سرعت باد شرایط آزمایشگاهی.
Table 4: Geometrical specifications of Elkhoury et al [19] and Darrieus and Fujisawa [20] Savonius VAWTs with wind speed values.

داریوس الخوری و همکاران [19]		ساونیوس فوجیساوا (بدون هم پوشانی پره ها) [20]		
ناکا 0021 ^۱	پروفیل ایرفویل	0/08	شعاع نیم دایره (متر)	
0/2	طول وتر (متر)			
3		2		تعداد پره
0/4		0/16		شعاع توربین (متر)
-		0/176		شعاع دیسک نصب شده در بالا و پایین توربین ^۲ (متر)
0/8		0/32		ارتفاع (متر)
0/64		0/1024		مساحت جاروب شده (مترمربع)
8		6		سرعت باد (متر بر ثانیه)

¹ NACA0021

² Turbine End Plates



شکل ۱۲: مقایسه نتایج آزمایشگاهی توربین داریوس پره مستقیم و توربین ساونیوس [۱۹ و ۲۰] با نتایج عددی پژوهش حاضر.

Fig.12: Comparison of experimental data [19, 20] with present numerical simulation results for Darrieus and Savonius VAWTs.

توربین ترکیبی شده است. در قسمت (الف) این شکل ها بیانگر گشتاور پره اول و قسمت (ب) بیانگر گشتاور کل توربین بر حسب زاویه سمت در دور دوم چرخش توربین است.

معیار انتخاب توربین و دیواره مناسب بر مبنای گشتاور کل تولیدی توربین در نظر گرفته شده است؛ بنابراین متوسط گشتاور

حاصل ضرب قطر توربین در ارتفاع.

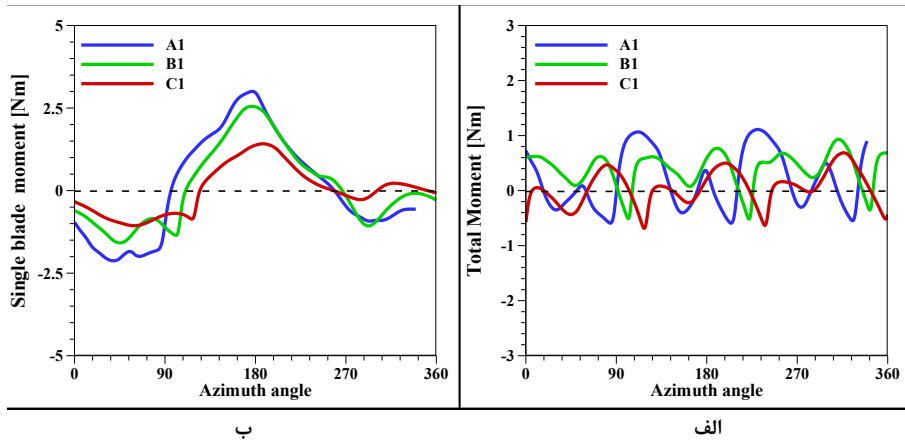
از پارامتر ضریب توان متوسط برای یک دور توربین برای مقایسه نتایج شبیه سازی عددی حاضر و تجربی ذکر شده استفاده شده است. این پارامتر به صورت رابطه (۶) تعریف می شود.

$$C_{P_{ave}} = \frac{P_{t_{ave}}}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^3 A_s} = \frac{M_{ave} \omega}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^3 A_s} \quad (6)$$

بر اساس نتایج به دست آمده از شکل ۱۲، شبیه سازی عددی سه بعدی برای توربین داریوس با متوسط خطای ۴ درصد به خوبی با نتایج آزمایشگاهی تطابق دارد. برای توربین ساونیوس نیز خطای ۲/۵ درصد نشان دهنده تطابق مناسب با نتایج آزمایشگاهی است.

۶- نتایج و بحث

در این قسمت تمام توربین های بیان شده به همراه دیواره با سرعت جریان آزاد ۷ متر بر ثانیه و سرعت دورانی ۶۰ دور در دقیقه مورد شبیه سازی قرار گرفته و نتایج آن در شکل های ۱۳ تا ۱۵ قابل مشاهده است. سرعت دورانی انتخاب شده سرعتی است که توربین ساونیوس در حالت بدون دیواره گشتاور منفی تولید می کند. مطابق نتایج مرجع [۱۷]، این سرعت در حوزه کاری توربین ترکیبی قرار نمی گیرد اما حضور دیواره باعث قرار گرفتن این سرعت در حوزه کاری

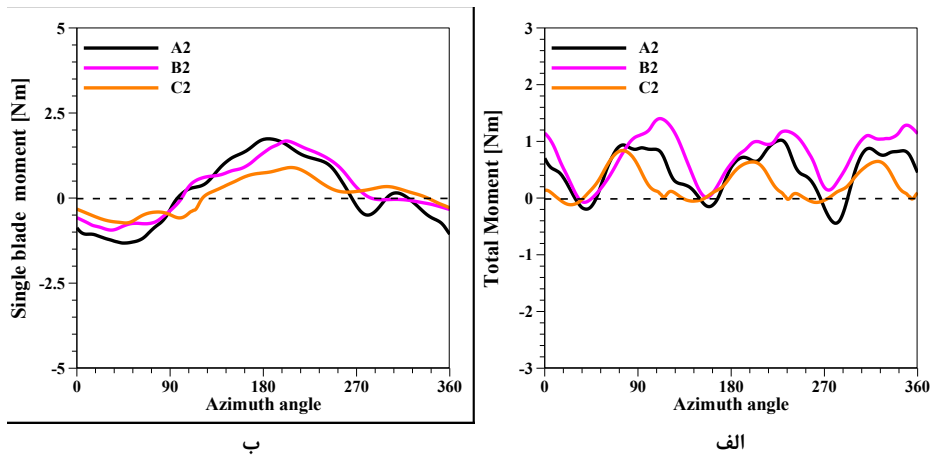


ب

الف

شکل ۱۳: عملکرد توربین ساونیوس نوع اول به همراه سه دیواره در دور دوم توربین. الف: گشتاور یک پره، ب: گشتاور کل.

Fig.13: Performance of the Savonius turbine, type 1, with three types of wall at the second cycle. a) Single blade moment, b) total moment.

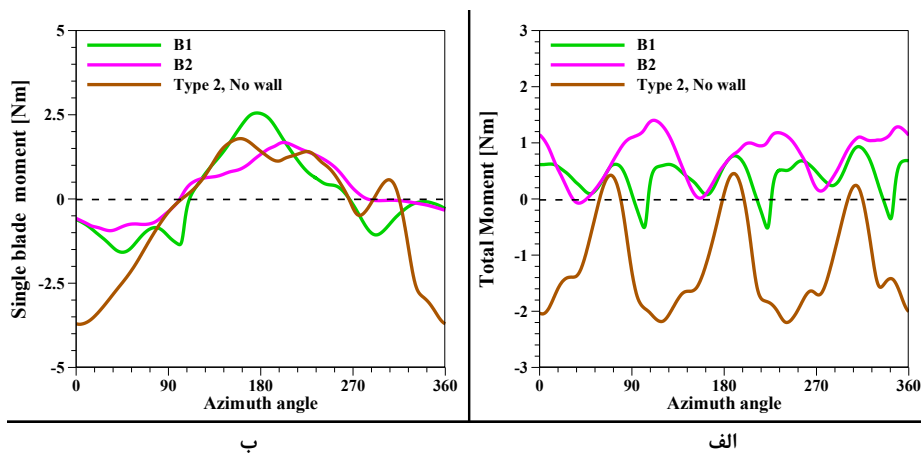


ب

الف

شکل ۱۴: عملکرد توربین ساونیوس نوع دوم به همراه سه دیواره در دور دوم توربین. الف: گشتاور یک پره، ب: گشتاور کل.

Fig.14: Performance of the Savonius turbine, type 2, with three types of wall at the second cycle. a) Single blade moment, b) total moment.



ب

الف

شکل ۱۵: عملکرد توربین ساونیوس نوع اول و دوم به همراه دیواره مطلوب و بدون دیواره در دور دوم توربین. الف: گشتاور یک پره، ب: گشتاور کل.

Fig.15: Performance of the Savonius turbines, types 1 and 2, with desired walls and without wall at the second cycle. a) Single blade moment, b) total moment.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n (M_i - M_{ave})^2 \right)} \quad (7)$$

که در آن n تعداد نقاط منحنی گشتاور کل در یک دور توربین است. پارامترهای متوسط و انحراف گشتاور کل در دور دوم توربین برای هر شش نوع توربین محاسبه شده و در جدول‌های ۵ تا ۹ قابل مشاهده است.

جدول ۷: متوسط و انحراف گشتاور کل توربین ساونیوس نوع اول و دوم به همراه دیواره مطلوب و بدون دیواره در دور دوم توربین.

Table 7: Values of average of total moment and its deviation for the Savonius turbines, types 1 and 2, with desired walls and without wall at the second cycle.

σ	متوسط گشتاور کل توربین (نیوتن متر)	توربین نوع اول و دوم و دیواره مطلوب
0/31	0/39	B1
0/42	0/75	B2
0/82	-1/17	نوع دوم بدون دیواره

جدول ۸: متوسط و انحراف گشتاور کل توربین ساونیوس نوع دوم و سوم و چهارم و دیواره مطلوب در دور دوم توربین.

Table 8: Values of average of the total moment and its deviation for the Savonius turbines, types 2, 3 and 4, with desired walls at the second cycle.

σ	متوسط گشتاور کل توربین (نیوتن متر)	توربین نوع دوم و سوم و چهارم و دیواره
0/42	0/75	B2
0/46	0/59	B3
0/25	0/77	B4

جدول ۹: متوسط و انحراف گشتاور کل توربین ساونیوس نوع چهارم بدون دیواره و همراه با دیواره نوع B در دور دوم توربین در سرعت‌های دورانی ۶۰ و ۸۰ دور در دقیقه.

Table 9: Values of average of the total moment and its deviation for the Savonius turbine, type 4, with and without desired wall, type B, at the second cycle at 60 rpm and 80 rpm.

σ	متوسط گشتاور کل توربین (نیوتن متر)	وضعیت توربین	
0/25	0/77	همراه دیواره	60 دور در دقیقه
0/48	-0/63	بدون دیواره	
-48	222	درصد تغییر نسبت به حالت بدون دیواره	
0/46	-0/49	همراه دیواره	80 دور در دقیقه
0/64	-1/21	بدون دیواره	
-28	60	درصد تغییر نسبت به حالت بدون دیواره	

بیشتر و نوسانات گشتاور کمتر نشان‌دهنده مطلوب بودن عملکرد آن توربین خواهد بود. گشتاور متوسط هر توربین در دور دوم توربین محاسبه شده و برای بررسی نوسانات گشتاور نیز در دور دوم توربین از پارامتر بی‌بعد انحراف معیار استفاده شده است. همان‌گونه که در رابطه (۷) پیداست [۲۸]، انحراف گشتاور کل نسبت به متوسط آن محاسبه شده است.

جدول ۵: متوسط و انحراف گشتاور کل توربین ساونیوس نوع اول به همراه سه دیواره در دور دوم توربین.

Table 5: Values of average of total moment and its deviation for the Savonius turbine, type 1, with three types of wall at the second cycle.

σ	متوسط گشتاور کل توربین (نیوتن متر)	توربین نوع دوم و دیواره
0/39	0/45	A2
0/42	0/75	B2
0/25	0/23	C2

جدول ۶: متوسط و انحراف گشتاور کل توربین ساونیوس نوع دوم به همراه سه دیواره در دور دوم توربین.

Table 6: Values of average of total moment and its deviation for the Savonius turbine, type 2, with three types of wall at the second cycle.

σ	متوسط گشتاور کل توربین (نیوتن متر)	توربین نوع اول و دیواره
0/54	0/23	A1
0/31	0/39	B1
0/31	0/056	C1

۶-۳- توربین نوع اول و دوم مطلوب

در این قسمت دو توربین $B1$ و $B2$ با یکدیگر مقایسه شده و توربین بهینه‌تر انتخاب گردیده است. با توجه به شکل ۱۵ (الف)، از زاویه سمت ۲۰ تا ۱۲۶ درجه پره $B2$ گشتاور بیشتری از $B1$ تولید می‌کند. از زاویه سمت ۱۲۶ درجه پره $B1$ گشتاور بیشتری تولید کرده و این امر تا زاویه سمت ۲۰۵ درجه ادامه پیدا می‌کند. از زاویه سمت ۲۰۵ تا ۳۳۰ درجه نیز $B2$ وضعیت بهتری نسبت به $B1$ دارد. به نظر می‌رسد انحنای کمتر پره نوع اول باعث جدایش بیشتر جریان در زاویه سمت ۲۰ تا ۱۲۶ درجه شده و این پره گشتاور منفی‌تری از نوع دوم تولید کرده است؛ از طرفی انحنای کمتر پره توربین نوع اول موجب شده از زاویه سمت ۱۲۶ درجه، جایی که مطابق شکل ۵ انحنای پره نوع اول با دیواره هم‌راستاست، تا زاویه سمت ۲۰۵ درجه این پره گشتاور بیشتری از نوع دوم تولید نماید. در زاویه سمت ۲۰۵ تا ۳۳۰ درجه نیز ضریب پسای بیشتر پره نوع دوم باعث برتری آن نسبت به نوع اول شده است. در مجموع با توجه به قسمت (ب) شکل ۱۵ و جدول ۷، توربین $B2$ ، ۹۲ درصد گشتاور کل متوسط بیشتر و ۳۵ درصد انحراف گشتاور کل بیشتری نسبت به توربین $B1$ دارد. با توجه به متوسط گشتاور کل بیشتر، توربین $B2$ به‌عنوان توربین مناسب‌تر انتخاب شده است.

برای نمایش نقش مثبت حضور دیواره در عملکرد توربین ساونیوس، منحنی گشتاور توربین نوع دوم بدون دیواره نیز در شکل ۱۵ قابل مشاهده است که در آن، اثر نبود دیواره در زاویه سمت ۳۲۰ تا ۸۰ درجه مشهود است. نوسانات بسیار زیاد و گشتاور منفی نشان‌دهنده نامناسب بودن توربین ساونیوس بدون دیواره در این شرایط است (متوسط گشتاور کل ۱/۱۷- نیوتن‌متر و انحراف گشتاور کل ۰/۸۲).

۶-۴- توربین نوع دوم و سوم چهارم و دیواره

با انتخاب توربین $B2$ به‌عنوان توربین مطلوب، اثر تعداد پره و اثر هم‌پوشانی روی پره‌های آن انجام شده است؛ بنابراین توربین‌های $B3$ و $B4$ مطابق شکل‌های ۱۶ و ۱۷ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای این توربین‌ها، هم‌پوشانی با طول ۰/۱ متر از مرکز توربین در نظر گرفته شده است؛ گرچه طول دهانه هر پره افزایش پیدا کرده، اما قطر توربین ثابت نگه داشته شده است.

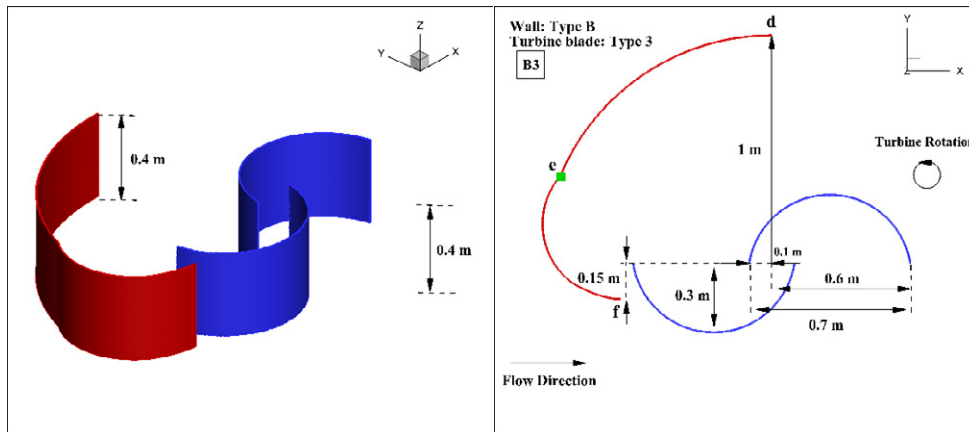
ابتدا با قرارگیری دیواره در سه موقعیت مختلف، گشتاور تولیدی توربین نوع اول و سپس نوع دوم مورد بررسی قرار گرفته است. بهترین توربین و دیواره نوع اول و دوم باهم مقایسه شده و برای پره‌های توربین مطلوب‌تر هم‌پوشانی اعمال می‌شود. در نهایت مجموعه توربین و دیواره مطلوب در توربین ترکیبی قرار گرفته و با توربین پره مستقیمی ارتفاع و قطر برابر با آن دارد مقایسه می‌شود.

۶-۱- توربین نوع اول و دیواره

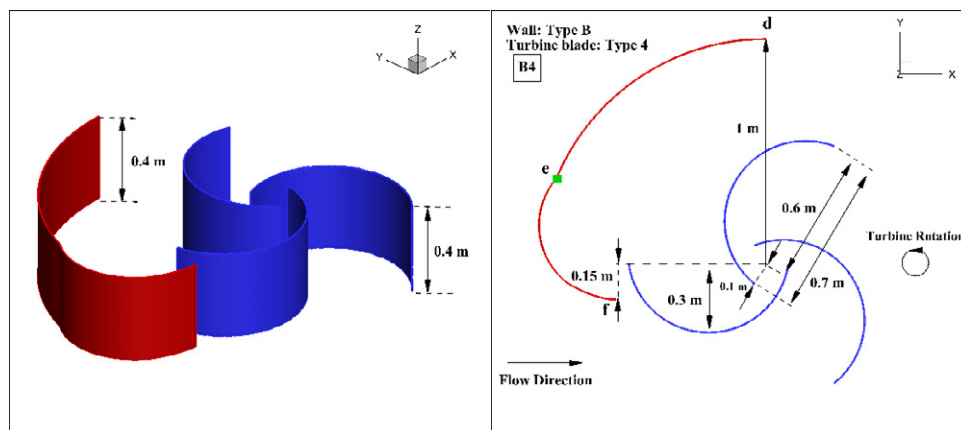
با توجه به شکل ۱۳ (الف)، با پایین آمدن دیواره، در افزایش گشتاور تأخیر ایجاد می‌شود (زاویه سمت ۹۵ تا ۱۲۵ درجه برای سه دیواره روی خط گشتاور صفر). این در حالی است که نقطه افول گشتاور هر سه پره روی خط گشتاور صفر در زاویه سمت ۲۶۰ درجه است؛ بنابراین گستره گشتاور مثبت پره با پایین آمدن دیواره کاهش پیدا می‌کند. از طرفی پایین آمدن دیواره باعث بهبود کمینه گشتاور هر پره و کاهش بیشینه آن شده است. برآیند این شرایط در نمودار گشتاور کل توربین در قسمت (ب) شکل ۱۳ قابل مشاهده است. به نظر می‌رسد حضور دیواره برای توربین و دیواره‌ی $B1$ بهینه‌تر است و پایین آمدن بیش از حد دیواره موجب کاهش بیشینه گشتاور هر پره و در نتیجه کاهش گشتاور کل متوسط می‌شود. با توجه به جدول ۵ نیز گشتاور کل متوسط $C1$ حدود صفر است و توربین $B1$ نسبت به $A1$ ، ۶۹ درصد متوسط گشتاور کل بیشتر و ۴۳ درصد انحراف گشتاور کل کمتر دارد.

۶-۲- توربین نوع دوم و دیواره

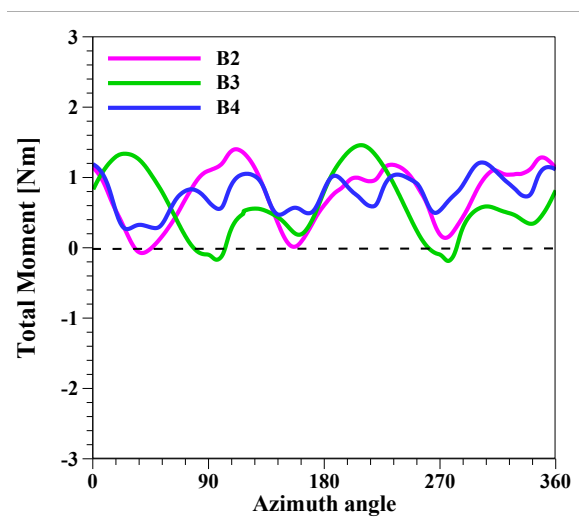
با توجه قسمت (الف) شکل ۱۴، مشابه توربین نوع اول، پایین آمدن دیواره باعث ایجاد تأخیر در افزایش گشتاور می‌شود؛ اما توربین $A2$ و $B2$ وضعیت مشابهی در نقطه‌ی شروع گشتاور مثبت دارند (زاویه سمت ۱۰۰ درجه). مشابه توربین نوع اول، پایین آمدن دیواره باعث کاهش نوسانات گشتاور نیز شده است. نمودار گشتاور کل توربین نیز، قسمت (ب) شکل ۱۴، وضعیت مطلوب‌تر توربین $B2$ را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۶، توربین $B2$ نسبت به $A2$ و $C2$ به ترتیب ۶۷ و ۲۲۶ درصد متوسط گشتاور کل بیشتری دارد؛ گرچه انحراف گشتاور کل برای $C2$ به ترتیب ۴۱ و ۳۶ درصد کمتر از $B2$ و $A2$ است.



شکل ۱۶: مشخصات هندسی توربین ساوینیوس و دیواره B3.
 Fig. 16: Geometrical specifications of the Savonius turbine and the wall, type of B3.



شکل ۱۷: مشخصات هندسی توربین ساوینیوس و دیواره B4.
 Fig.17: Geometrical specifications of the Savonius turbine and the wall, type of B4.



شکل ۱۸: گشتاور کل توربین ساوینیوس نوع دوم و سوم و چهارم و دیواره مطلوب در دور دوم توربین.

Fig.18: Total moment of Savonius turbines, types 2, 3 and 4, with desired walls at the second cycle.

مطابق شکل ۱۸ توربین B4 نوسانات به مراتب کمتری داشته و در دور کامل، گشتاور منفی و حتی صفر ندارد. توربین B3 نیز وضعیت مناسبی دارد اما کاهش تعداد پره باعث افزایش نوسانات آن شده است. همپوشانی سه پره‌ای باعث کاهش نوسانات و عملکرد مطلوب توربین B4 نسبت به دو توربین دیگر شده است؛ بنابراین توربین B4 به عنوان توربین مطلوب انتخاب شده است. مطابق نتایج جدول ۸ توربین B4 نسبت به توربین B2 و B3، به ترتیب ۲/۶ و ۳۰ درصد گشتاور کل متوسط بیشتر و ۴۰ و ۴۵ درصد انحراف گشتاور کل کمتری دارد.

۵-۶- بررسی تاثیر حضور دیواره مطلوب برای توربین نوع چهارم با تغییر نسبت سرعت نوک پره

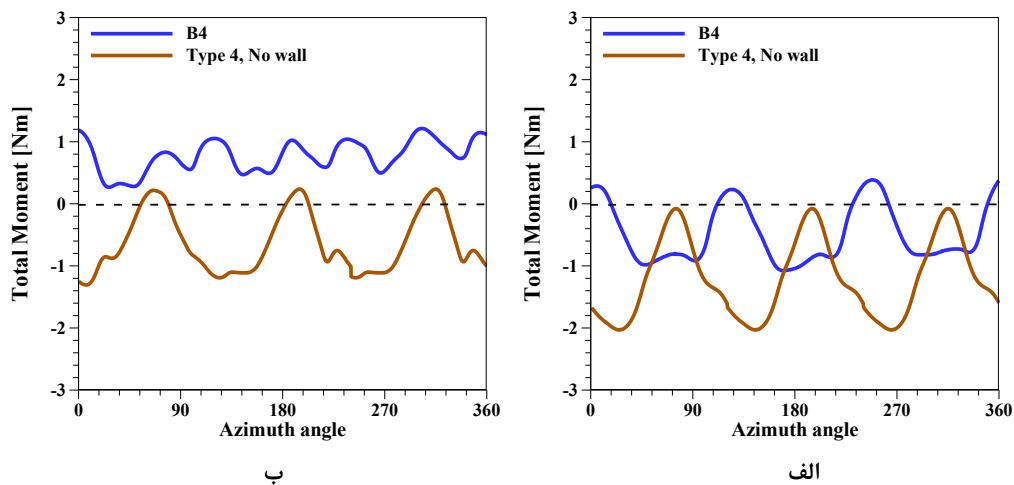
نتایج قبل برای نسبت سرعت نوک پره ۰/۹ یا سرعت دورانی

امر نشان می‌دهد اگر این توربین به عنوان بخش ساونیوس توربین ترکیبی استفاده شده و مجموعه توربین ترکیبی با سرعت ۸۰ دور دقیقه دوران نماید، بخش ساونیوس از گشتاور مثبت تولیدی بخش داریوس می‌کاهد و این موضوع تاثیر منفی در کارایی کل توربین خواهد داشت. یعنی قسمتی از گشتاور مثبت تولیدی بخش داریوس توربین ترکیبی بخاطر حضور بخش ساونیوس همواره اتلاف می‌شود. در واقع در این سرعت، بخش داریوس با گشتاور قوی‌تر می‌چرخد ولی بخش ساونیوس گشتاور ضعیف‌تر اما در جهت خلاف آن به توربین اعمال می‌کند. گرچه وضعیت توربین همراه با دیواره در این سرعت دورانی بسیار بهتر از حالت بدون دیواره است اما کماکان نمی‌توان این سرعت دورانی را در حوزه کاری آن قرار داد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت استفاده از دیواره، حوزه کاری توربین ترکیبی پیشنهادی را تا نسبت نوک پره ۰/۹ افزایش داده است.

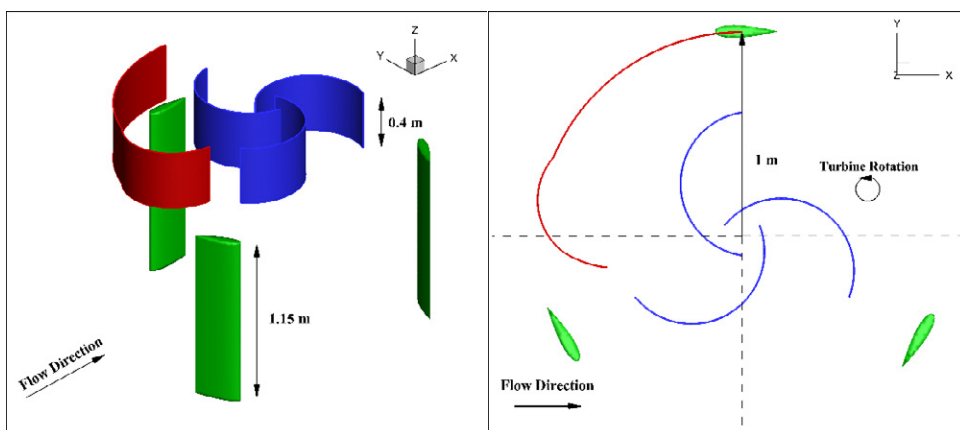
۶-۶- توربین ترکیبی پیشنهادی و توربین پره مستقیم داریوس

پس از دستیابی به توربین ساونیوس و دیواره بهینه، این مجموعه به‌عنوان بخش ساونیوس بالای توربین پره مستقیم سوار شده و عملکرد آن به‌عنوان توربین ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته است. شعاع توربین داریوس در توربین ترکیبی از مرکز آن سنجیده شده و برابر R است؛ بنابراین قطر مجموعه‌ی توربین ساونیوس و دیواره از قطر توربین داریوس فراتر نرفته است. ایرفویل داریوس از نوع ناکا ۰۰۲۱ با طول وتر ۰/۳ متر است. ارتفاع بخش داریوس توربین ترکیبی برابر

۶۰ دور در دقیقه انجام گرفته است. همان‌طور که در شکل ۱۹ (الف) پیداست، حضور دیواره باعث بهبود قابل توجه گشتاور تولیدی توربین ساونیوس پیشنهادی شده است. مطابق نتایج جدول ۹ در سرعت ۶۰ دور در دقیقه، توربین پیشنهادی همراه با دیواره مطلوب ۲۲۲ درصد گشتاور متوسط بیشتر و ۴۸ درصد انحراف گشتاور کل کمتری دارد. حضور دیواره باعث شده گشتاور منفی توربین در این سرعت دورانی به مثبت تبدیل شود. بدیهی است در نسبت سرعت نوک پره‌های کمتر از ۰/۹، سرعت نسبی روی پره‌های رو به باد افزایش یافته همچنین دیواره اثر مثبت بیشتری روی پره‌های پشت به باد توربین ساونیوس خواهد گذاشت و این امر باعث بیشتر شدن گشتاور مثبت توربین ساونیوس و پررنگ‌تر شدن نقش دیواره خواهد شد. گرچه حضور دیواره باعث شده نسبت سرعت نوک پره ۰/۹ یا سرعت دورانی ۶۰ دور در دقیقه نیز در حوزه کاری توربین ترکیبی قرار گیرد ولی این بهبود تا حدی مفید خواهد بود چون با افزایش سرعت دورانی، سرعت نسبی روی پره‌های رو به باد به صفر نزدیک می‌شود و توربین ساونیوس مجدداً گشتاور منفی تولید خواهد نمود. اثر افزایش نسبت سرعت نوک پره در شکل ۱۹ (ب) بررسی شده است. به عنوان نمونه نسبت سرعت نوک پره ۱/۲ یا سرعت دورانی ۸۰ دور دقیقه انتخاب شده است. با افزایش نسبت سرعت نوک پره، گرچه کماکان وضعیت توربین همراه با دیواره نسبت به توربین بدون دیواره بسیار بهتر است (۶۰ درصد گشتاور متوسط بیشتر و ۲۸ درصد انحراف گشتاور کل کمتر)؛ اما غالب گشتاور تولیدی منفی است. این



شکل ۱۹: گشتاور کل توربین ساونیوس نوع چهارم بدون دیواره و همراه با دیواره مطلوب در دور دوم توربین. الف: ۶۰ دور در دقیقه، ب: ۸۰ دور در دقیقه.
Fig. 19: Total moment of the Savonius turbine, type 4, with and without desired wall at the second cycle. a) 60 rpm, b) 80 rpm.



شکل ۲۰: مشخصات هندسی توربین ترکیبی پیشنهادی.

Fig.20: Geometrical specifications of proposed hybrid VAWT.

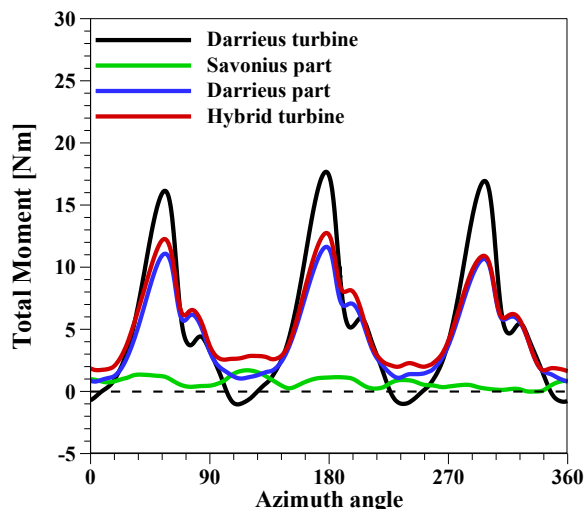
جدول ۱۰: متوسط و انحراف گشتاور کل توربین ترکیبی و داریوس پره مستقیم در دور دوم توربین.

Table 10: Values of average of the total moment and its deviation for proposed hybrid VAWT and straight-blade Darrieus VAWT at the second cycle.

σ	متوسط گشتاور کل توربین (نیوتن متر)	
3/3	5/28	ترکیبی
5/52	5/16	داریوس پره مستقیم

با توجه به نتایج شکل ۲۱ و جدول ۱۰، عملکرد توربین ترکیبی در سرعت ۶۰ دور در دقیقه از توربین داریوس پره مستقیم بهتر است. گرچه توربین داریوس پره مستقیم بیشینه گشتاور بیشتری دارد اما کمینه کمتر آن موجب شده است توربین ترکیبی ۲/۳ درصد گشتاور کل متوسط بیشتر و ۴۰ درصد انحراف گشتاور کل کمتری نسبت به توربین داریوس پره مستقیم داشته باشد. گشتاور مثبت و کم‌نوسان بخش ساونیوس باعث بهبود گشتاور توربین ترکیبی در قسمت‌های کمینه منحنی گشتاور شده است. مطلوب بودن دو پارامتر متوسط و انحراف گشتاور کل، نشان‌دهنده بهتر بودن وضعیت آیرودینامیکی توربین ترکیبی در مقایسه با داریوس پره مستقیم است.

حضور دیواره در این نسبت سرعت نوک پره نه تنها منجر به حذف اثر منفی بخش ساونیوس شد بلکه باعث تولید گشتاور مثبت در این بخش نیز گردید. هر چند مقدار گشتاور تولیدی بخش ساونیوس در مقایسه با گشتاور تولیدی بخش داریوس کم است؛ اما این نسبت سرعت نوک پره به عنوان حد بالای کاری توربین ترکیبی شناخته شده که پیش از این در حوزه کاری توربین‌های ترکیبی متداول



شکل ۲۱: گشتاور کل توربین ترکیبی پیشنهادی در مقایسه با توربین داریوس پره مستقیم با ارتفاع و شعاع برابر.

Fig. 21: Comparison of the total moment produced by the proposed hybrid VAWT and straight-blade Darrieus VAWT with the same height and radius.

۱/۱۵ متر و ارتفاع بخش ساونیوس ۰/۴ متر است. برای جلوگیری از اثرات منفی نوک پره‌های توربین داریوس و ساونیوس روی یکدیگر، ۵ سانتی‌متر نیز فضای خالی بین دو توربین در نظر گرفته شده است؛ بنابراین ارتفاع کل توربین ترکیبی برابر ۱/۶ متر خواهد بود. عملکرد توربین ترکیبی با توربین پره مستقیم مقایسه شده است. ارتفاع این توربین برابر با ارتفاع توربین ترکیبی بوده و پروفیل و طول وتر ایرفویل و شعاع توربین مشابه بخش داریوس توربین ترکیبی است؛ یعنی دو توربین مساحت جاروب یکسان دارند. توربین ترکیبی پیشنهادی در شکل ۲۰ قابل مشاهده است. تعداد سلول محاسباتی برای توربین ترکیبی برابر ۷۲۰۰۰۰۰ است.

عوض می‌شود. این قسمت از پره راهنما تنها در جهت ساعت‌گرد می‌تواند دوران داشته باشد. هنگامی که جهت باد ۱۸۰ درجه عوض می‌شود. این قسمت به صورت ساعت‌گرد چرخیده و باعث افزایش گشتاور پره راهنما و متعاقباً چرخش دیواره می‌شود.

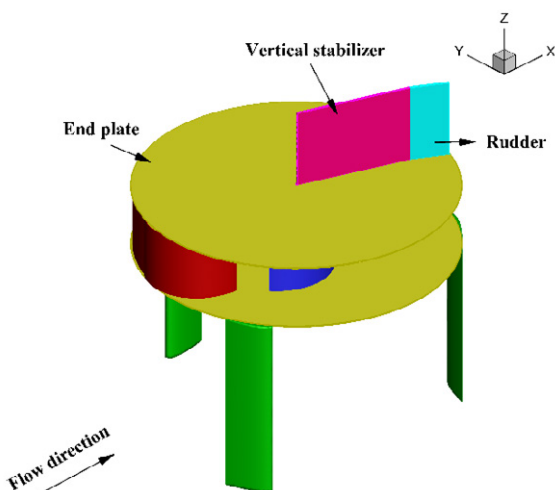
۷- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر عملکرد آیرودینامیکی توربین بادی ساونیوس در حالت دورانی با قرار دادن یک دیواره مقابل جریان، بهبود داده شد؛ تا این توربین بتواند در نسبت سرعت نوک پره‌های بالاتر هم بازدهی مناسبی داشته باشد. این توربین ساونیوس می‌تواند روی توربین داریوس سوار شده و توربین ترکیبی تشکیل دهد؛ بنابراین توربین ترکیبی می‌تواند در نسبت سرعت نوک پره‌های بالاتر نیز عملکرد مطلوب داشته باشد. برتری عملکرد توربین ترکیبی در شروع به حرکت بدیهی است ولی با افزایش نسبت سرعت نوک پره، بازدهی بخش ساونیوس توربین ترکیبی کمتر می‌شود و اثر منفی روی گشتاور تولیدی توربین ترکیبی می‌گذارد. طرح ارائه شده در این پژوهش حوزه کاری توربین ترکیبی را افزایش داد. دو نوع توربین سه‌پره‌ای با انحنای پره‌ی مختلف و بدون هم‌پوشانی پره‌ها (نوع اول با انحنای پره کمتر و نوع دوم با انحنای پره بیشتر) و سه نوع دیواره با قرارگیری در مکان‌های مختلف (با نام‌های A ، B و C) پیشنهاد

جای نداشته است. بدیهی است با کاهش نسبت سرعت نوک پره، بخش ساونیوس توربین ترکیبی گشتاور بیشتری تولید خواهد نمود و عملکرد توربین ترکیبی بهتر خواهد شد.

عملکرد مطلوب توربین ساونیوس در حالت راه‌اندازی با سرعت باد پایین و نسبت سرعت نوک پره پایین در بسیاری از پژوهش‌های عددی و آزمایشگاهی از گذشته تاکنون به اثبات رسیده است. این عملکرد با افزایش نسبت سرعت نوک پره کاهش می‌یابد. در این پژوهش سعی شد تا توربین ساونیوس در نسبت سرعت نوک پره‌های بالاتر نیز بتواند عملکرد آیرودینامیکی مناسب داشته باشد و حد بالای کاری برای نسبت سرعت نوک پره تا مقدار $0/9$ افزایش داده شد. در این نسبت سرعت نوک پره توربین ترکیبی عملکرد قابل قبولی در مقایسه با توربین داریوس پره مستقیم دارد.

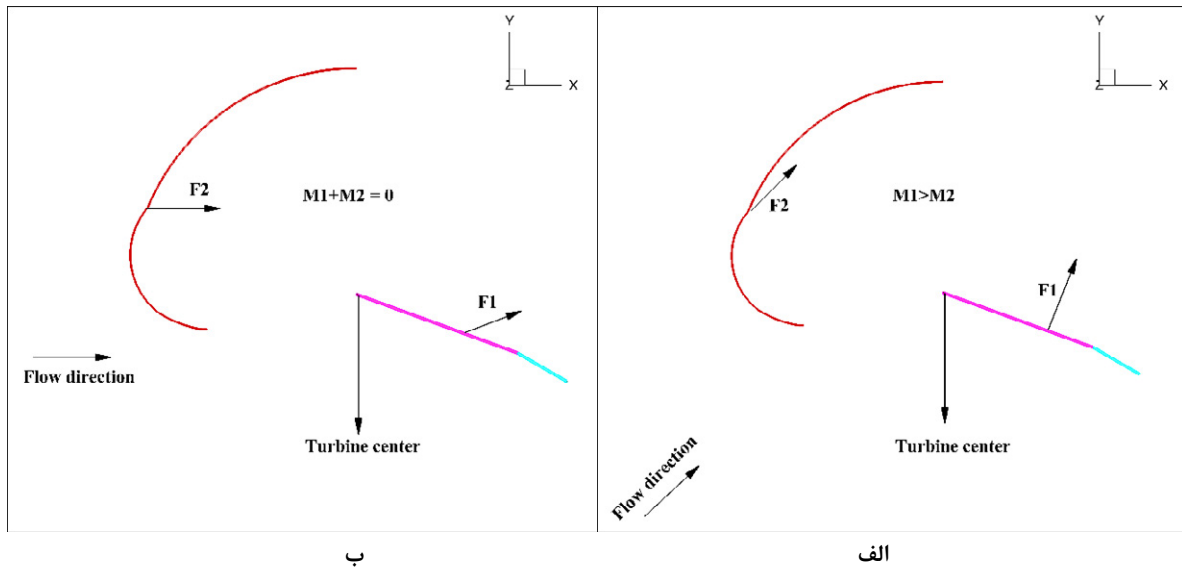
حضور دیواره با وجود بهبود عملکرد توربین ساونیوس و در نتیجه توربین ترکیبی، این توربین را به جهت باد وابسته می‌کند؛ یعنی کارکرد مطلوب دیواره در شرایطی است که در مقابل باد قرار بگیرد. یک راه‌حل ساده برای حل این مشکل، استفاده از پره راهنمای عمودی (مشابه تثبیت‌کننده عمودی در اجسام پرنده^۱) در بالای توربین ساونیوس است. تغییر جهت باد باعث ایجاد نیروی برا در پره‌ی راهنما شده و پره به همراه دیواره حرکت یا وا انجام می‌دهد تا مجدداً مقابل باد قرار گیرد. نمای شماتیک این ایده در شکل ۲۱ قابل مشاهده است. نصب صفحه دیسک در بالا و پایین توربین، به منظور کاهش گردابه‌های نوک پره، نقش مثبتی در افزایش گشتاور تولیدی آن دارد؛ اما این امر موجب افزایش تعداد سلول شبکه محاسباتی و متعاقباً افزایش زمان محاسباتی است؛ بنابراین صرفاً در نمای شماتیک شکل ۲۲ از دیسک در دو طرف توربین ساونیوس استفاده شده است. برای درک بهتر عملکرد پره راهنما شکل ۲۲ رسم شده است. گشتاور تولیدی پره راهنما، مطابق قسمت (الف) شکل ۲۳، با گشتاور دیواره حول مرکز توربین برابر است و موجب می‌شود دیواره رو به باد ثابت بماند. با تغییر جهت باد، مطابق قسمت (ب) شکل ۲۳، زاویه حمله پره راهنما افزایش پیدا کرده در نتیجه گشتاور پره راهنما از دیواره بیشتر شده و دیواره را رو به باد می‌چرخاند. قسمت هدایت‌کننده^۲ برای شرایطی طراحی شده که جهت باد ۱۸۰ درجه



شکل ۲۲: نمای شماتیک توربین ترکیبی پیشنهادی همراه با دیسک در دو طرف توربین ساونیوس و پره راهنمای پیشنهادی.

Fig. 22: Schematic view of the proposed hybrid VAWT with end plates and the simple vertical stabilizer.

- 1 Vertical Stabilizer
- 2 Yaw
- 3 Rudder



شکل ۲۳: عملکرد شماتیک پره راهنما از نمای بالا. الف: گشتاور پره راهنما و دیواره حول مرکز توربین برابر و خلاف هم بوده و این دو در تعادل اند، ب: در شرایطی که باد تغییر جهت می دهد، گشتاور پره راهنما از دیواره بیشتر شده و دیواره را به سمت باد می چرخاند.

Fig. 23: Top view of schematic performance of the vertical stabilizer. a) Moment of the vertical stabilizer and the wall around turbine center are equal; therefore, whole turbine will be stable, b) moment of the vertical stabilizer is more than of the wall; therefore, the wall will rotate toward the wind.

مجموع این پره بیشتر بود. از میان شش حالت مختلف توربین و دیواره، توربین نوع دوم و دیواره نوع B که به اندازه نصف شعاع پره پایین آمده است، به عنوان توربین و دیواره مطلوب انتخاب شدند. معیار انتخاب توربین مطلوب، متوسط گشتاور بیشتر و نوسانات گشتاور کمتر در طول یک دور توربین بود.

۲- پس از اعمال هم پوشانی برای پره های توربین نوع دوم، متوسط گشتاور توربین سه پره ای همراه با هم پوشانی پره ها نسبت به توربین سه پره ای بدون هم پوشانی پره ها در یک دور توربین بیشتر و نوسانات گشتاور آن کمتر بود؛ بنابراین توربین سه پره ای همراه با هم پوشانی پره ها به عنوان توربین مطلوب انتخاب شد.

۳- در سرعت دورانی ۶۰ دور در دقیقه، حضور دیواره نوع B برای توربین سه پره ای همراه با هم پوشانی پره ها باعث شد گشتاور منفی آن مثبت شود. بر اساس نتایج، ۲۲۲ درصد افزایش گشتاور متوسط و ۴۸ درصد کاهش نوسانات برای توربین پیشنهادی همراه با دیواره مطلوب مشاهده شد.

۴- توربین ساونیس مطلوب و دیواره نوع B روی توربین داریوس پره مستقیم سوار شده و توربین ترکیبی را تشکیل دادند. عملکرد توربین ترکیبی در حالت دورانی با یک توربین داریوس پره

گردید و با شبیه سازی سه بعدی عملکرد آیرودینامیکی آن ها بررسی شد. سرعت دورانی همه موارد برابر ۶۰ دور در دقیقه و سرعت باد برابر ۷ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. در این سرعت دورانی، توربین ساونیس بدون حضور دیواره، متوسط گشتاور منفی دارد؛ یعنی اگر این توربین روی توربین داریوس سوار شود در این سرعت دورانی نه تنها گشتاور تولید نمی کند بلکه از گشتاور تولیدی بخش داریوس در توربین ترکیبی نیز می کاهد. با توجه به وجود دو نوع توربین و سه نوع دیواره، در شش حالت مختلف توربین و دیواره مورد بررسی قرار گرفته و مطلوب ترین آن ها انتخاب شد. برای پره های توربین انتخابی هم پوشانی لحاظ شد و گشتاور تولیدی توربین و نوسانات آن با توربین انتخابی بدون هم پوشانی پره ها و توربین دو پره ای همراه با هم پوشانی پره ها مقایسه گردید.

نتایج به دست آمده نشان می دهد:

۱- کاهش انحنای پره ساونیس در توربین نوع اول و پایین آمدن دیواره باعث شد هنگامی که لبه پره و دیواره کنار هم قرار می گیرند، هم راستا نیز باشند. این مورد باعث افزایش گشتاور تولیدی پره در آن زاویه سمت شد اما در بقیه زوایای سمت، پره ای که انحنای بیشتری دارد (نوع دوم) گشتاور بیشتری تولید نمود؛ در نتیجه گشتاور

علائم یونانی

θ	زاویه قرارگیری نقاط روی دیواره (درجه)
m	لزجت مولکولی
ν	زاویه سمت (درجه)
ρ	چگالی (kg/m^3)
σ	انحراف گشتاور کل در یک دور توربین
t_{ij}	تنش رینولدز، (Pa)
ω	سرعت زاویه‌ای توربین (rad/s)

منابع

- [1] D.Y. Leung, Y. Yang, Wind energy development and its environmental impact: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1) (2012) 1031-1039.
- [2] 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.
- [3] A. Tummalala, R.K. Velamati, D.K. Sinha, V. Indrajya, V.H. Krishna, A review on small scale wind turbines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56 (2016) 1351-1371.
- [4] A. Shires, Design optimisation of an offshore vertical axis wind turbine, *Proceedings of the ICE-Energy*, 166(EN1) (2013) 7-18.
- [5] A. Rezaeiha, H. Montazeri, B. Blocken, Characterization of aerodynamic performance of vertical axis wind turbines: Impact of operational parameters, *Energy Conversion and Management*, 169 (2018) 45-77.
- [6] M. Ghasemian, Z.N. Ashrafi, A. Sedaghat, A review on computational fluid dynamic simulation techniques for Darrieus vertical axis wind turbines, *Energy Conversion and Management*, 149 (2017) 87-100.
- [7] R. Howell, N. Qin, J. Edwards, N. Durrani, Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine, *Renewable energy*, 35(2) (2010) 412-422.
- [8] H. Riegler, HAWT versus VAWT: Small VAWTs find a clear niche, *Refocus*, 4(4) (2003) 44-46.

مستقیم که ارتفاع برابر با توربین ترکیبی دارد مقایسه شد. توربین ترکیبی عملکرد آیرودینامیکی بهتری از توربین داریوس پره مستقیم نشان داد. این توربین ۲/۳ درصد گشتاور متوسط بیشتر و ۴۰ درصد نوسانات کمتری نسبت به متوسط گشتاور دارد.

نسبت سرعت نوک پره برای توربین ترکیبی و داریوس در اینجا برابر ۰/۹ بود. در این نسبت سرعت نوک پره، گشتاور منفی بخش ساونیوس توربین ترکیبی مثبت گردید و کماکان توربین ترکیبی عملکرد بهتری از پره مستقیم داشت. در واقع نسبت سرعت نوک پره ۰/۹ به عنوان نقطه‌ی حد بالای کاری برای توربین ترکیبی مورد بحث شناخته می‌شود؛ یعنی در نسبت سرعت نوک پره‌های کمتر از آن عملکرد توربین ترکیبی مطلوب است و حوزه عملکردی آن نسبت به توربین‌های ترکیبی متداول افزایش پیدا کرده است. با کاهش نسبت سرعت نوک پره، سرعت نسبی روی پره‌های رو به باد افزایش پیدا کرده و همچنین دیواره اثر مثبت بیشتری روی پره‌های پشت به باد توربین ساونیوس خواهد گذاشت. در این حالت برتری توربین ترکیبی پیشنهادی نسبت به توربین داریوس پره مستقیم پررنگ‌تر خواهد شد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

مساحت جاروب شده = ارتفاع × شعاع توربین × ۲	A_s
(m^2)	
ضریب توان متوسط در یک دور توربین	$C_{P_{ave}}$
گشتاور کل توربین (N.m)	M
گشتاور متوسط کل در یک دور توربین (N.m)	M_{ave}
فشار استاتیک متوسط، (Pa)	P
توان متوسط در یک دور توربین ()	P_{avg}
شعاع توربین (m)	R
شعاع قرارگیری نقاط روی دیواره (m)	r
نرخ کرنش متوسط (S^{-1})	S_{ij}
زمان (S)	t
سرعت میانگین گیری شده (m/s)	U_i
جزء نوسانی سرعت (m/s)	$u\phi$
متوسط زمانی سرعت‌های نوسانی (m^2/s^2)	$\overline{u\phi u\phi}$
سرعت جریان آزاد (m/s)	V_∞
بردار مکانی	x_i
اختصارات	
نسبت سرعت نوک پره	TSR

- of Mechanical Engineering, 51(6) (2018) 171-180. (In Persian).
- [18] 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).
- [19] M. Elkhoury, T. Kiwata, E. Aoun, Experimental and numerical investigation of a three-dimensional vertical-axis wind turbine with variable-pitch, *Journal of wind engineering and Industrial aerodynamics*, 139 (2015) 111-123.
- [20] N. Fujisawa, On the torque mechanism of Savonius rotors, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 40(3) (1992) 277-292.
- [21] D.C. Wilcox, *Turbulence modeling for CFD*, DCW industries La Canada, CA, 1998.
- [22] F.R. Menter, Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, *AIAA journal*, 32(8) (1994) 1598-1605.
- [23] K. McLaren, S. Tullis, S. Ziada, Computational fluid dynamics simulation of the aerodynamics of a high solidity, small-scale vertical axis wind turbine, *Wind Energy*, 15(3) (2012) 349-361.
- [24] R.E. Sheldahl, Comparison of field and wind tunnel Darrieus wind turbine data, *Journal of Energy*, 5(4) (1981) 254-256.
- [25] K.A. Hoffmann, S.T. Chiang, *Computational Fluid Dynamics Volume I*, Engineering Education System, Wichita, Kan, USA, (2000).
- [26] A. Fluent, 15.0 User's Manual, ANSYS Documentation N Fluent N User's Guide & Theory Guide—Release 15.0, ANSYS Inc., ANSYS Inc.
- [27] M. Vaughn, C. Chen, Error versus y^+ for three turbulence models: Incompressible flow over a unit flat plate, in: 18th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, 2007, pp. 3968.
- [28] P.R. Wolf, C.D. Ghilani, *Adjustment computations: statistics and least squares in surveying and GIS*, Wiley-Interscience, 1997.
- [9] L. Battisti, A. Brighenti, E. Benini, M.R. Castelli, Analysis of Different Blade Architectures on small VAWT Performance, in: *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2016, pp. 062009.
- [10] Y.-T. Lee, H.-C. Lim, Numerical study of the aerodynamic performance of a 500 W Darrieus-type vertical-axis wind turbine, *Renewable Energy*, 83 (2015) 407-415.
- [11] F. Scheurich, T. Fletcher, R. Brown, The influence of blade curvature and helical blade twist on the performance of a vertical-axis wind turbine, in: 48th AIAA aerospace sciences meeting including the new horizons forum and aerospace exposition, 2010, pp. 1579.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] M.J. Alam, M.T. Iqbal, Design and development of hybrid vertical axis turbine, in: *Electrical and Computer Engineering*, 2009. CCECE'09. Canadian Conference on, IEEE, 2009, pp. 1178-1183.
- [16] 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.
- [17] N. Akbari, A. Abdolahifar, Performance investigation of hybrid Darrieus-Savonius wind turbine compared to straight-bladed Darrieus turbine by Three-dimensional numerical simulation, *Amirkabir Journal*