



بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد توربین‌های بادی محور عمودی به صورت تجربی

نیما ابوفاضلی، پویان هاشمی طاری*، رقیه گوگ‌ساز قوچانی، مجید زندی

دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۰۲
بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۲۸
پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۰
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۱/۰۳

کلمات کلیدی:

انرژی تجدیدپذیر
توربین بادی عمودمحور
ساوینیوس
داریوس
ضریب توان

خلاصه: از مباحث چالش برانگیز در بهره‌گیری از انرژی بادی، استفاده از توربین‌های بادی در مناطق شهری است. با توجه به ساختار این مناطق، معمولاً توربین‌های بادی محور عمودی (داریوس-ساوینیوس) که مستقل از جهت باد عمل می‌کنند استفاده شود. همچنین با توجه به محدودیت فضای مناطق شهری بررسی پارامترهای توربین‌ها در ابعاد میکرو امری مهم و اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد. هدف این پژوهش بررسی این توربین‌ها، پارامترهای تأثیرگذار و بهبود عمل‌کرد آن‌ها است. به‌منظور روش انجام پژوهش دو توربین ساوینیوس و داریوس در ابعاد میکرو طراحی و ساخته شده‌اند و عملکرد آیرودینامیکی آن‌ها با بدست آوردن نمودار ضریب توان بر حسب نسبت سرعت‌نوک‌پره مورد مطالعه قرار گرفته است. تأثیر سرعت باد بر توربین ساوینیوس به صورت تجربی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که این توربین در سرعت‌های باد پایین عملکرد بهتری دارد. بخشی از خلاقیت و نوآوری این پژوهش ساخت توربین داریوس بوده که امکان تغییر برخی پارامترهای تأثیرگذار را داشته باشد. این طراحی باعث کاهش هزینه‌ها است. دو پارامتر نسبت ابعاد و جایگاه بازوی نگه‌دارنده پره‌ها در توربین داریوس به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج آزمایش‌ها بهترین جایگاه بازوی نگه‌دارنده پره‌ها، ابتدا و انتهای پره است و توربین با نسبت ابعاد یک بهترین عملکرد را دارد.

۱- مقدمه

اساس توربین‌هایی با توان کمتر از ۰/۲۵ کیلووات (قطر روتور کوچکتر از ۱/۲۵ متر) در دسته توربین‌های میکرو و با توان ۰/۲۵ تا ۱/۴ کیلووات (قطر روتور ۱/۲۵ تا ۳ متر) در دسته توربین‌های مینی قرار می‌گیرند [۵]. توربین‌های بادی کوچک (میکرو، مینی) توان بیشتری (به نسبت قطر) را به نسبت توربین‌های بزرگتر، به‌ویژه برای مناطقی با باد کم، تولید می‌کنند. دلیل این امر راه‌اندازی توربین در سرعت‌های کم باد است. این نوع از توربین‌ها در برخی از کاربردهای مستقل که نیاز به قابلیت اطمینان بالاتری دارند، به‌واسطه عملکرد در گستره باد بیشتر، مناسب‌تر هستند. علاوه بر ابعاد توربین، انتخاب نوع توربین نیز برای مصرف شهری از معیارهای تعیین‌کننده است.

در دسته‌بندی دیگر، توربین‌های بادی دارای دو نوع توربین بادی محور عمودی و توربین بادی محور افقی هستند. به ترتیب در نوع محور افقی و عمودی، محور دوران توربین موازی و عمود بر جریان بالا دست می‌باشد. دو پارامتر تعیین‌کننده در رفتار آیرودینامیکی این توربین‌ها عدد رینولدز (که بر حسب طول وتر ایرفویل تعریف می‌شود)

با توجه به محدودیت‌هایی که امروزه سوخت‌های فسیلی پیش‌روی بشر قرار داده است، استفاده از منابع تجدیدپذیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. انرژی باد جزء در دسترس‌ترین منابع انرژی‌های تجدیدپذیر است. بهره‌گیری از انرژی باد توسط توربین‌های بادی صورت می‌گیرد. در دهه‌های گذشته توجه بسیاری به بهره‌گیری از انرژی باد، برای استفاده در مناطق شهری، به عنوان یکی از مراکز اصلی مصرف انرژی، شده است [۱-۴]. در نتیجه در صورت تولید انرژی مورد نیاز در همان مناطق، می‌توان از بسیاری از هزینه‌ها و تلفات انتقال انرژی جلوگیری کرد. با این وجود در مناطق شهری جریان سیال باد بسیار آشفته بوده و با تغییر جهت و سرعت ناگهانی همراه است. از سوی دیگر با توجه به محدودیت فضایی که در مناطق شهری وجود دارد، باید از توربین‌هایی با ابعاد مناسب استفاده کرد. بر اساس دسته‌بندی توربین‌های بادی بر حسب ابعاد آنها، توربین‌های کوچک (مینی و میکرو) برای مصارف شهری مناسب تشخیص داده شده‌اند. بر این

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: P_hashemi@sbu.ac.ir



۲- مبانی نظری

توربین‌های بادی محور عمودی دارای دو نوع ساوینیوس و داریوس هستند. در این بخش به متغیرهای تأثیرگذار بر عملکرد این توربین‌ها با توجه به پژوهش‌های پیشین پرداخته شده است. اساس کار توربین‌های ساوینیوس بر اساس نیروی پَسار^۱ است. پارامترهای متفاوتی تأثیرگذار بر عملکرد آن‌ها هستند. صفحه‌های انتهایی توربین‌های ساوینیوس، قطعه‌های ساده‌ای هستند که می‌توانند به‌طور چشمگیری عملکرد توربین را بهبود ببخشند. این صفحه‌ها مانع خروج جریان هوا از ابتدا و انتهای توربین شده و از کاهش اختلاف فشار قسمت مقعر و محدب توربین که باعث به گردش درآمدن توربین می‌شود، جلوگیری می‌کنند. بنابراین وجود صفحه‌های انتهایی باعث افزایش ضریب توان به‌طور چشمگیری در سرعت نوک پره بالاتر می‌شوند [۱۶-۱۸]. برای قطر این صفحه‌ها یک مقدار بهینه وجود دارد که معمولاً ۱/۱ برابر قطر توربین است. بزرگ کردن بیش از حد این صفحه‌ها باعث افزایش غیرمفید اینرسی روتور می‌شود [۱۹]. یکی دیگر از متغیرهای موثر بر عملکرد توربین‌ها، نسبت ابعاد آن‌ها است. نسبت ابعاد به معنی نسبت ارتفاع توربین به قطر آن است. افزایش نسبت ابعاد توربین باعث بهبود عملکرد توربین می‌شود [۲۰]. توربین‌های ساوینیوس با ارتفاع بیشتر تلفات کمتری از ابتدا و انتهای پره دارد، بنابراین افزایش ارتفاع تأثیر مشابه با اضافه کردن صفحه‌های ابتدایی و انتهایی دارد. در نتیجه، نسبت ارتفاع‌های یک تا حتی ۴/۸ توسط بسیاری از مقاله‌ها پیشنهاد شده است [۱۹، ۲۱]. متغیر مهم بعدی هم‌پوشانی طولی پره‌ها است. این فاصله دارای مقدار بهینه‌ای است که بزرگتر و یا کوچک‌تر کردن آن باعث کاهش توان توربین خواهد شد. این مقدار بهینه، ۱۰٪ تا ۲۰٪ مقدار قطر پره توربین بیان شده است [۲۱، ۲۲]. تعداد پره‌های روتور نیز بر عملکرد آن تأثیر به‌سزایی دارد. با افزایش تعداد پره‌ها از دو پره بالاتر، ضریب توان کاهش می‌یابد. برای توربین با بیش از دو پره تأثیر جریان قسمت محدب هر پره بر روی قسمت مقعر پره بعدی به‌طور غیرمفید زیاد می‌شود و این عامل باعث کاهش عملکرد بهینه توربین می‌شود. بنابراین در بسیاری از مقاله‌ها تعداد پره‌های بهینه توربین برابر با دو پره است [۱۶، ۱۹، ۲۳]. تعداد مراحل روتور به معنی قرارگیری چندین روتور مجزا با زوایای متفاوت بر روی یکدیگر است. حالت بهینه قرارگیری دو روتور با زوایای ۹۰ درجه بر همدیگر

و نسبت سرعت نوک پره طراحی (نسبت سرعت دورانی نوک پره به سرعت بالادست) هستند.

با توجه به ویژگی‌های باد شهری، توربین‌های بادی محور عمودی مزایای مختلفی نسبت به توربین‌های بادی محور افقی جهت استفاده در صنایع شهری دارند. این مزایا عبارتند از: مستقل از جهت وزش باد بودن و عدم نیاز به سیستم کنترلی یاو، سرعت دورانی پایین‌تر به‌واسطه عملکرد این توربین‌ها در نسبت سرعت نوک پره کمتر، آلودگی صوتی کمتر، قابلیت تحمل تندبادها، طراحی ساده‌تر، هزینه ساخت و تعمیر و نگهداری کمتر و امنیت بالاتر برای زیست‌بوم پرندگان و خفاش‌ها [۶-۱۲]. با توجه به توضیحاتی که داده شد و بر اساس مطالعه‌های پژوهشگران پیشین، توربین‌های محور عمودی کوچک (مینی و مایکرو) جهت استفاده در حوزه شهری گزینه مناسبی خواهند بود. پارامترهای متفاوتی تأثیرگذار بر عملکرد این توربین‌ها هستند. توربین‌های ساوینیوس متأثر از پارامترهایی شامل وجود صفحه‌های انتهایی، نسبت ابعاد توربین، هم‌پوشانی طولی پره‌ها، تعداد پره‌ها، تعداد مراحل روتور و طراحی‌های نوینی مانند هدایت‌گر باد به سمت پره هستند [۱۳]. همچنین پارامترهایی مانند نسبت ابعاد، صلبیت، نوع ایرفویل پره، زاویه حمله پره‌ها و شدت آشفتگی جریان سیال باد بر عملکرد توربین داریوس تأثیرگذار است. هریک از این پارامترها در بخش مبانی نظری مورد بررسی قرار گرفته است و تأثیر آن‌ها بر عملکرد توربین ارائه شده است [۱۳-۱۵].

تمرکز این پژوهش به‌طور ویژه بر توربین‌های بادی محور عمودی در ابعاد مایکرو است. با وجود پژوهش‌های گسترده بر طراحی توربین‌های بادی محور عمودی مینی، مطالعه‌های بسیار کمتری بر روی توربین‌های در ابعاد مایکرو شده است. در واقع بسیاری از پارامترهای تعیین‌کننده رفتار آیرودینامیکی توربین‌های محور عمودی، در ابعاد مایکرو به صورت متفاوت تأثیر می‌گذارند که می‌بایست مورد بررسی قرار گیرند. در واقع تمایز این پژوهش با پژوهش‌های پیشین و جنبه نوآورانه آن بررسی توربین‌هایی در ابعاد مایکرو است. لذا در این بخش از مقاله ابتدا توضیح مختصری در رابطه با انواع توربین‌های محور عمودی و پارامترهای تعیین‌کننده در عملکرد آن‌ها ارائه خواهد شد. لازم به ذکر است که مطالب گردآوری شده بیشتر مربوط به توربین‌های بزرگ و کوچک در ابعاد مینی است.

تأثیرگذار بر عملکرد توربین انتخاب ایرفویل مناسب است. به همین منظور پژوهش‌های بسیاری بر نوع ایرفویل انجام شده است [۱۵]. ایرفویل‌های مورد استفاده به دو دسته کلی ایرفویل متقارن و ایرفویل کمان‌ابرو (غیرمتقارن) تقسیم‌بندی می‌شود. ایرفویل‌های کمان‌ابرو ویژگی بهتری در راه‌اندازی خودکار توربین بادی داریوس دارد [۳۰]. این در حالی است که توربین‌های بادی داریوس با ایرفویل متقارن ضریب توان بیشینه بیشتری تولید می‌کنند [۱۳]. پارامتر تأثیرگذار بعدی در عملکرد توربین‌ها زاویه حمله آن‌ها است. زاویه حمله به زاویه بین محور ایرفویل و خط عمود بر پایه نگه‌دارنده گفته می‌شود. پژوهش‌های متفاوتی بر زاویه حمله بهینه این توربین‌ها صورت پذیرفته است [۳، ۳۲]. اگرچه توربین‌های بادی محور عمودی حساسیت کمتری در برابر شدت آشفتگی جریان نسبت به توربین‌های محور افقی دارد، اما توربین‌های داریوس دارای پره‌هایی با شکل ایرفویل است و آشفتگی جریان بر عملکرد این توربین‌ها تأثیر می‌گذارد [۳۳]. جزئیات بیشتر مربوط به هر کدام از این پارامترها جهت انتخاب برای طراحی توربین داریوس در بخش طراحی و ساخت توربین‌های مایکرو ارائه شده است.

با وجود پژوهش‌های مفصلی که درباره نقش این پارامترها در عملکرد توربین محور عمودی صورت گرفته، توجه بسیار کمتری به نوع تأثیر آن‌ها بر عملکرد توربین‌های در ابعاد مایکرو شده است. جهت بررسی دقیق‌تر این موضوع نمونه‌ای در این بخش آورده شده است. در شکل ۱ مثلث سرعت شماتیک برای توربین بادی محور عمودی داریوس سه پره رسم شده است. در این شکل Γ شعاع روتور، ω سرعت دورانی روتور، U سرعت باد بالادست، θ زاویه پره روتور و α زاویه حمله ایرفویل در هر لحظه از دروان هستند. سرعت نسبی باد که ایرفویل در لحظه از دوران تجربه می‌کند، پارامتری بسیار مهم در طراحی آیرودینامیکی روتور است. همان‌طور که دیده می‌شود، در این نوع از توربین‌ها، مقدار و جهت سرعت نسبی تابع شعاع توربین و سرعت دورانی روتور است. جهت این بردار در هر لحظه از دوران ایرفویل، زاویه حمله و مقدار آن، میزان عدد رینولدزی را که ایرفویل تجربه می‌کند، مشخص می‌کند. این دو بر مقادیر ضریب‌های آیرودینامیکی (ضریب پسا و ضریب برآر) و در نتیجه گشتاور تولیدی روتور تأثیر به‌سزایی دارند. در توربین‌های با ابعاد بزرگ به علت قطر زیاد روتور،

است [۲۴]. شکل مقطع پره‌ها می‌تواند بسیار متفاوت باشد که در برخی پژوهش‌ها بررسی شده است [۲۵]. با توجه به پژوهش‌های متفاوت، بهترین طراحی سطح مقطع برای این توربین، نیم‌دایره است. این سطح مقطع، تقعر لازم را برای ایجاد اختلاف فشار بین دو طرف سطح پره دارد و از نظر هزینه و ساخت مناسب‌تر است [۲۶]. ایجاد یک دیواره برای هدایت جریان باد به سمت پره‌ها می‌تواند بسیار موثر باشد اما ویژگی عدم نیاز به سیستم یاو را از بین می‌برد [۱۶]. پارامترهای تأثیرگذار دیگری مانند زاویه حمله متغیر وجود دارند، اما به اندازه پارامترهای قبلی موثر نیستند.

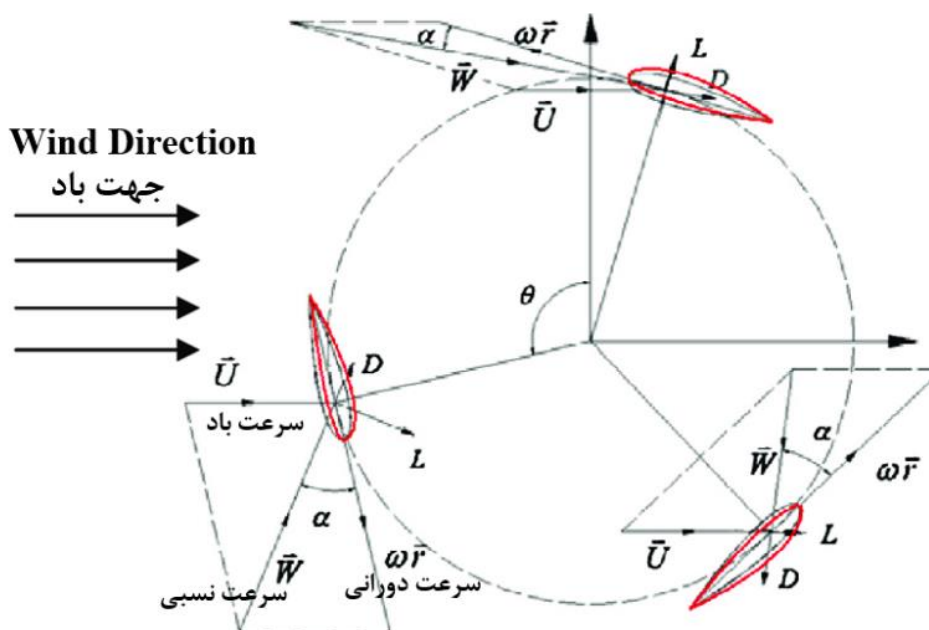
توربین‌های بادی محور عمودی نوع داریوس بر اساس نیروی برآر^۱ ایجادشده بر روی پره‌ها که سطح مقطع ایرفویل دارند کار می‌کنند. این نوع توربین‌ها بر اساس طراحی آن‌ها به‌طور معمول ضریب توان بالاتری نسبت به توربین‌های بادی محور عمودی ساونیوس دارد. توربین‌های داریوس انواع متفاوتی دارد که دو نوع تخم‌مرغی و نوع پره مستقیم آن متداول‌تر است. توربین‌های نوع پره مستقیم دارای پره‌های صاف، بدون پیچش و بدون انحنا است و این عامل باعث طراحی ساده‌تر این نوع توربین شده است. اما این نوع، ضریب توان کمتری از نوع تخم‌مرغی دارد [۲۷]. در کاربرد مناطق شهری توجه بیشتری به نوع پره مستقیم توربین‌های داریوس شده است. پارامترهایی مانند نسبت ابعاد، صلبیت^۲، نوع ایرفویل پره، زاویه حمله پره‌ها و شدت آشفتگی جریان سیال باد بر عملکرد این توربین موثر است. نسبت ابعاد توربین داریوس نیز، نسبت ارتفاع به قطر توربین است. این نسبت مقدار بهینه‌ای دارد که در بسیاری از مقاله‌ها، این مقدار همواره نزدیک به یک و یا خود یک است [۱۳، ۲۸]. پارامتر تأثیرگذار دیگر صلبیت توربین است. صلبیت نسبت سطحی که پره‌های توربین اشغال می‌کند به سطحی که توربین جاروب می‌کند تعریف می‌شود. این پارامتر توسط معادله (۱) محاسبه می‌شود.

$$Solidity = \frac{N.C}{D} \quad (1)$$

در این معادله N تعداد پره‌های روتور، C طول وتر بال و D قطر روتور است. به طور کلی توربین‌های داریوس با سه پره بهترین عملکرد را دارند [۱۴، ۲۹]. سطح مقطع پره‌های توربین بادی محور عمودی داریوس از نوع ایرفویل است. یکی از پارامترهای

1 Lift

2 Solidity



شکل ۱. شماتیک سرعت‌های تأثیرگذار بر پره توربین بادی محور عمودی داریوس (مثلث سرعت)

Fig. 1. Schematic of the affecting velocities on blades of Darrieus vertical axis wind turbine (velocity triangle)

این ابعاد می‌تواند راه‌کارهای موثری جهت بهبود ضریب توان این نوع توربین‌ها ارائه دهد. لذا بازنگری پارامترهای تأثیرگذار بر روی طراحی توربین محور عمودی (ساوینیوس و داریوس) در ابعاد میکرو جهت بهینه کردن توان خروجی ضروری به نظر می‌رسد. در پژوهش پیش‌رو چیدمانی آزمایشگاهی برای بررسی این موضوع به صورت تجربی تدارک دیده شده است. بدین منظور توربین‌هایی در ابعاد میکرو طراحی و ساخته شده‌اند و عملکرد ایرودینامیکی آن‌ها با استفاده از یک سیستم سیمولاتور بادی مورد بررسی قرار گرفته است. از اهداف مهم این پژوهش آماده‌سازی بستری مناسب جهت اندازه‌گیری توان خروجی توربین‌های در ابعاد میکرو و امکان مقایسه آن‌ها به صورت آزمایشگاهی بوده است. به علاوه سعی شده است تأثیر تعدادی از پارامترهای تعیین‌کننده عملکرد توربین‌ها (ساوینیوس و داریوس) مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور عملکرد توربین ساوینیوس در سرعت‌های باد متفاوت (عدد رینولدز متفاوت) اندازه‌گیری شده است. در مورد توربین داریوس، تأثیر دو پارامتر طراحی یعنی نسبت ابعاد روتور و جایگاه بازوی نگه‌دارنده پره‌ها که در پژوهش‌های پیشین کمتر مورد توجه بوده‌اند، مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. نتایج اندازه‌گیری‌ها به صورت تغییرات ضریب توان بر حسب تغییرات نسبت نوک پره ارائه شده است. چیدمان آزمایشگاهی، مراحل و نحوه اندازه‌گیری و نتایج و تحلیل آن‌ها در بخش‌های پیش‌رو آورده شده‌اند.

سرعت دورانی پره نقش بسیار بیشتری در تعیین مقدار و جهت بردار سرعت نسبی در مقایسه با باد بالادست دارد. در مقابل برای توربین‌های میکرو با شعاع روتور بسیار کوچک و سرعت دورانی زیاد، اندازه بردار سرعت دورانی ایرفویل به نسبت سرعت باد بالادست بسیار کوچک می‌شود. لذا مقدار و جهت سرعت باد نسبی که پره تجربه می‌کند، بیشتر تابع سرعت باد بالادست است. این به معنی تغییر بازه زاویه حمله ایرفویل خواهد بود (بین صفر تا نود درجه) که در مقایسه با توربین‌های بزرگ بسیار بیشتر است (برای این توربین‌ها به‌طور معمول در محدوده نزدیک به جدایش^۱ است). این موضوع باعث کاهش ضریب برآر به علت زاویه حمله‌های بزرگ و تجربه استال دینامیکی با بازه زاویه‌ای و فرکانس نوسانی بیشتر برای ایرفویل خواهد بود. به‌علاوه ابعاد کوچک وتر ایرفویل برای روتور میکرو باعث کاهش عدد رینولدز^۲ و در نتیجه کاهش ضریب برآر و افزایش ضریب پسار می‌شود. در مجموع تأثیر این دو پارامتر باعث کاهش ضریب توان می‌شود.

بررسی بالا تفاوت فیزیکی در عملکرد توربین محور عمودی در ابعاد میکرو با توربین‌های بزرگ و به ویژه کاهش بازده توان تولیدی را نشان می‌دهد. با این وجود مطالعه دقیق رفتار ایرودینامیکی روتور در

1 Stall
2 Reynolds Number

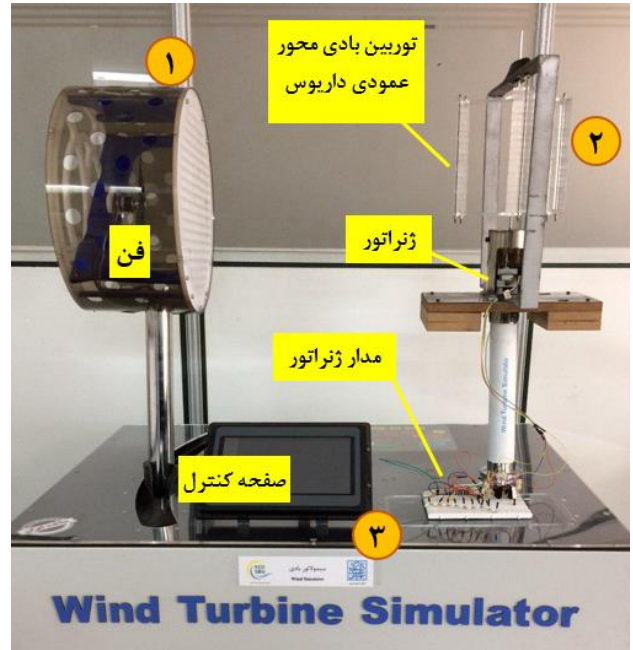
انجام آزمایش و تجهیزات اندازه‌گیری توضیح داده شده‌است.

۳-۱- معرفی شبیه‌ساز بادی

برای آزمایش توربین از شبیه‌ساز باد که در شکل ۲ نمایش داده شده، استفاده شده‌است. این شبیه‌ساز در حالت اول از سه بخش کلی تشکیل شده است. این سه بخش عبارت‌اند از:

۱. فن که برای شبیه‌سازی باد استفاده شده است؛
۲. بخش مربوط به توربین شامل روتور، ژنراتور، پایه نگهدارنده توربین و مدار بارگذاری ژنراتور؛
۳. بخش کنترلی شبیه‌ساز شامل صفحه کنترل و سیستم کنترل PLC است.

با استفاده از سرعت‌سنج مدل TES۱۳۴۱ میزان سرعت باد در فواصل مختلف از مرکز فن در دو راستای عمود بر محور فن گرفته شده تا محدوده‌ای که در آن باد پروفیل سرعت یکنواختی دارد، مشخص شود. تعیین این محدوده جهت تعیین قطر روتور توربین که بناست با باد با سرعت یکنواخت مواجه شود ضروری است. این عملیات در سه دور فن متفاوت ۵۰۰ دور بر دقیقه، ۱۵۰۰ دور بر دقیقه و ۲۵۰۰ دور بر دقیقه انجام شده است. پروفیل سرعت باد مطابق شکل ۳ و شکل ۴ است. در این شکل‌ها محور افقی بر اساس سرعت باد و محور عمودی بر اساس فاصله طولی و عرضی از محل قرارگیری روتور طراحی شده است. مطابق پروفیل‌های باد به‌دست‌آمده، تقریباً

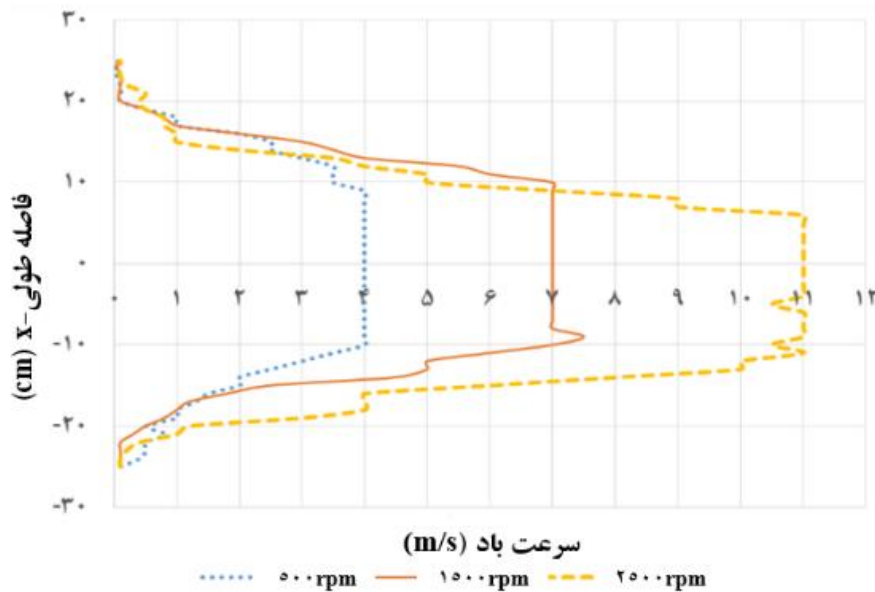


شکل ۲. سیستم شبیه‌ساز باد.

Fig. 2. Wind simulator

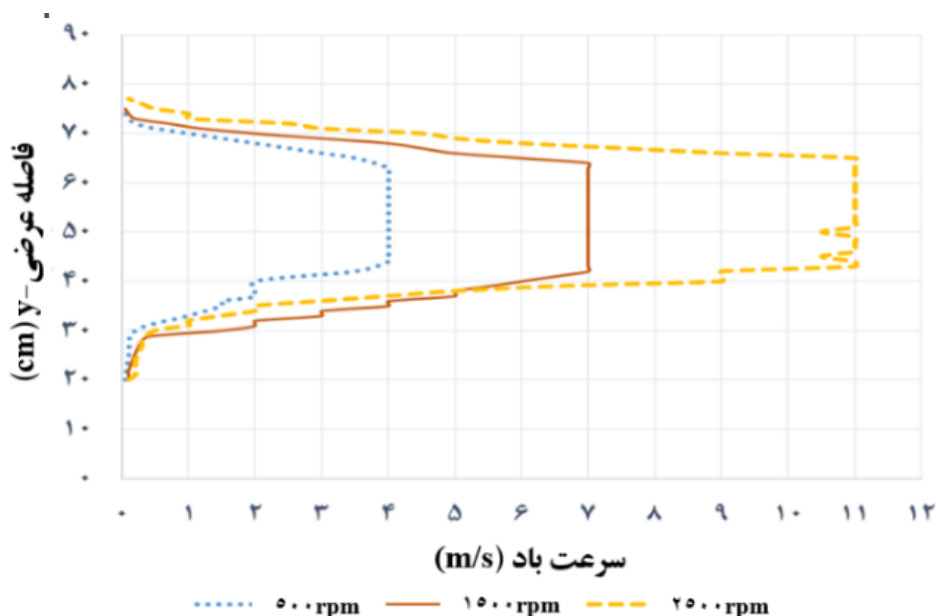
۳- طراحی و ساخت

در این بخش از مقاله به مباحث ساخت و آزمایش تجربی توربین‌های بادی محور عمودی ساوینیوس و داریوس پرداخته شده‌است. به‌همین منظور در ابتدا توضیحاتی در رابطه با سیستم شبیه‌سازی باد ارائه شده‌است. سپس در بخش‌های بعدی به طراحی و ساخت دو نوع توربین مورد نظر پرداخته شده‌است و در نهایت نحوه



شکل ۳. پروفیل سرعت باد فن شبیه‌ساز در راستای افقی در فاصله ثابت از فن.

Fig. 3. Wind speed profile of simulator in horizontal direction at constant distance from fan



شکل ۴. پروفیل سرعت باد فن شبیه‌ساز در راستای عمودی در فاصله ثابت از فن.

Fig. 4. Wind speed profile of simulator in vertical direction at constant distance from fan

است. توربین به صورت دو پره‌ای و دو مرحله‌ای طراحی شده‌است. این موضوع باعث یکنواخت‌تر شدن گشتاور منتقل شده به ژنراتور و بهبود عملکرد توربین می‌شود. افزایش تعداد مراحل باعث پیچیدگی در ساخت می‌گردد. شکل مقطع پره با توجه به سادگی در ساخت، نیم‌دایره است. اطلاعات روتور توربین ساوینیوس در جدول ۱ آورده شده‌است. روتور توربین ساوینیوس طراحی شده در شکل ۵ نشان داده شده است.

با توجه به دقتی که دستگاه‌های پرینتر سه‌بعدی دارند پره‌های روتور توربین بادی با استفاده از این دستگاه ساخته شده‌اند. صفحه‌های

محدوده باد یکنواختی با ابعاد ۲۰ سانتی‌متر در راستای افقی و ۲۰ سانتی‌متر در راستای عمودی وجود دارد.

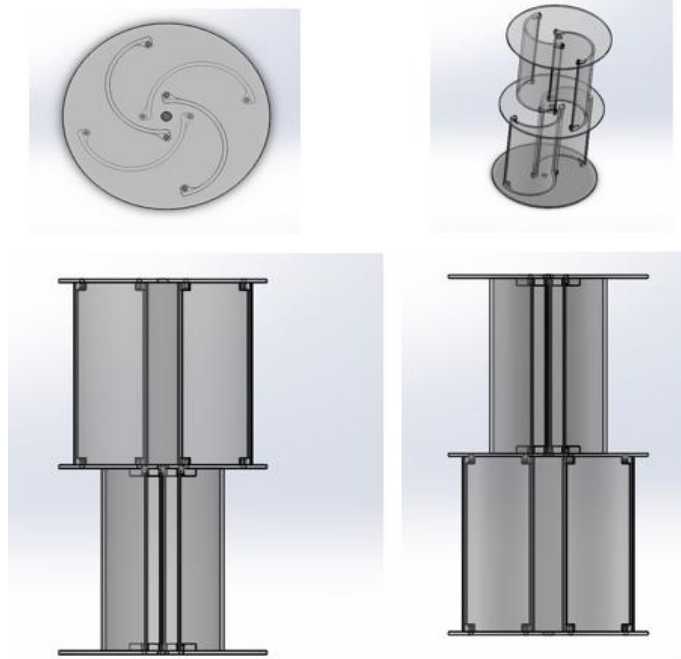
۲-۳- طراحی و ساخت توربین بادی محور عمودی ساوینیوس

طراحی روتور توربین ساوینیوس با استفاده از نتایج پژوهش‌های پیشین صورت گرفته است [۱۶، ۱۹، ۲۱، ۲۴]. ابعاد روتور با توجه به فن شبیه‌ساز باد ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده‌است. نسبت ابعاد ۲/۴ است. صفحه‌های انتهایی به منظور عملکرد بهتر توربین ساوینیوس در نظر گرفته شده‌اند. قطر این صفحات ۱/۱ برابر قطر روتور است. مقدار هم‌پوشانی طولی پره‌ها ۲۰٪ قطر پره توربین

جدول ۱. جدول اطلاعات روتور توربین بادی محور عمودی ساوینیوس

Table 1. Specification of Savonius vertical axis wind turbine

توربین بادی محور عمودی ساوینیوس	
تعداد پره‌ها	۲ پره‌ای
تعداد مراحل	۲ مرحله‌ای
ارتفاع روتور	۲۰ سانتی‌متر
قطر روتور	۸/۴ سانتی‌متر
قطر صفحات انتهایی	۹/۲ سانتی‌متر
نسبت هم‌پوشانی طولی پره‌ها	۲ سانتی‌متر
قطر مقطع دایره‌ای پره‌ها	۵/۲ سانتی‌متر



شکل ۵. طرح کامل روتور توربین ساوونیوس.

Fig. 5. Exact design of the Savonius wind turbine rotor

روتور توربین داریوس نیز بر اساس اطلاعاتی که از نتایج پژوهش‌های پیشین استخراج شده بود، طراحی شد. با توجه به عملکرد مناسب روتور توربین در حالت پره مستقیم و با تعداد سه پره، این نوع روتور انتخاب شده است. نسبت ابعاد توربین در طراحی اولیه یک در نظر گرفته شده است، بنابراین ارتفاع و قطر روتور توربین داریوس ۲۰ سانتی‌متر است. پارامتر دیگر در طراحی توربین صلبیت آن است. صلبیت پره توربین تابع نسبت سرعت نوک پره طراحی است. هرچه این نسبت بیشتر باشد، صلبیت کمتر است. به عبارت دقیق‌تر

انتهایی با استفاده از برش لیزر صفحات پلکسی ساخته شده‌اند. روتور کامل شده مطابق با شکل ۶-الف است. روتور آماده شده به شفت به قطر ۴ میلی‌متر متصل می‌شود. به منظور اتصال روتور به ژنراتور و استحکام آن در مقابل باد و جلوگیری از ارتعاش، روتور در پایه نگه‌دارنده قرار داده شده است. در شکل ۶-ب توربین ساوونیوس کامل نشان داده شده است.

۳-۳- طراحی و ساخت توربین بادی محور عمودی داریوس



شکل ۶. توربین بادی محور عمودی ساوونیوس (الف) روتور کامل شده توربین از سه نما (ب) روتور توربین به همراه پایه نگه‌دارنده.

Fig. 6. Savonius vertical axis wind turbine a) Turbine rotor b) Turbine rotor with supporting stand

مناسب از دیگر چالش‌های پیش‌رو در این پژوهش بوده است. با مقایسه ایرفویل‌های مختلف (NACA۰۰۰۹ تا NACA۰۰۲۴) در رینولدزهای مختلف معلوم شد که در رینولدزهای پائین (ایرفویل با طول وتر خیلی کوچک) ایرفویل متقارن با ضخامت بیشتر عملکرد بهتری خواهد داشت [۱۳]. برای توربین‌های در ابعاد بزرگتر سطح مقطع‌های ایرفویل NACA۰۰۰۹ و NACA۰۰۱۲ با ضریب برآر بیشتر و مواد ساخت کمتر، مناسب‌تر هستند. با این وجود در ابعاد میکرو سطح مقطع‌های ایرفویل ذکر شده بسیار نازک هستند. بنابراین جریان سیال باد ایرفویل را مشاهده نمی‌کند و این نوع ایرفویل‌ها در ابعاد میکرو امکان ایجاد برآر مناسب را ندارند. برای افزایش ضخامت از ایرفویل NACA۰۰۲۱ استفاده شده است. این موضوع کمک به استحکام آن نیز می‌کند. زاویه حمله پره‌ها صفر در نظر گرفته شده است. امکان بهبود عملکرد روتور توربین با زاویه حمله‌های دیگر وجود دارد اما به منظور مشاهده تأثیر پارامترهای دیگر بر این توربین، زاویه حمله پره‌ها، صفر در نظر گرفته شده است. اطلاعات روتور توربین داریوس در جدول ۲ آورده شده است.

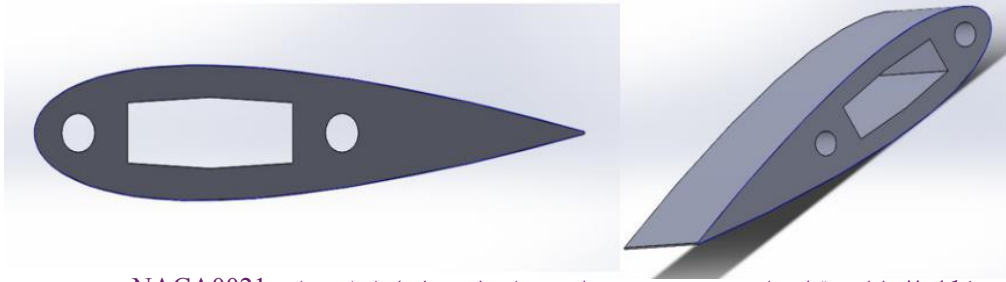
پره‌های توربین داریوس به نحوی ساخته شدند که امکان آزمایش‌های مختلف جهت بررسی تأثیر پارامترهایی همچون نسبت ابعاد و جایگاه بازوی نگه‌دارنده پره‌ها بر عملکرد توربین بادی محور عمودی داریوس فراهم باشد. بدین منظور پره‌های روتور این توربین از قطعات کوچکی به ارتفاع یک سانتی‌متر تشکیل شده است. هر یک از این قطعه‌ها از لیزر صفحه‌هایی با ضخامت یک سانتی‌متری پلکسی به دست آمده است. با قرار گرفتن ۲۰ عدد از این قطعات بر یکدیگر هریک از پره‌های روتور تشکیل می‌شود. بر روی این قطعات دو سوراخ

صلبیت کمتر به معنای اجازه عبور باد از بین پره‌ها در سرعت دورانی بالاتر روتور است. لذا هر چه صلبیت کمتر باشد، نسبت سرعت نوک پره طراحی که در آن بیشینه ضریب توان رخ می‌دهد بیشتر است. از طرف دیگر اگر مقدار صلبیت بیش از حد پائین باشد، روتور اینرسی لازم برای دوران نخواهد داشت. نتایج پژوهش‌های پیشین نشان‌دهنده آن است که بهینه‌ترین مقدار برای صلبیت حدود ۴۰٪ است [۲۸]. با این وجود برای توربین‌های میکرو این مقدار متفاوت است. ضریب توان بیشینه می‌بایست در نسبت سرعت نوک پره طراحی کمتری رخ دهد. زیرا طبق رابطه نسبت سرعت نوک پره، صورت این رابطه به واسطه مقدار کم شعاع روتور کوچک خواهد بود. لازم به ذکر است که سرعت دورانی روتور در ابعاد میکرو ۲ تا ۳ برابر آن سرعت در ابعاد بزرگتر (مینی) است. با این وجود حاصل ضرب این سرعت در شعاعی که در ابعاد سانتی‌متر است هنوز مقدار کوچکی تولید می‌کند. در عین حال، برای رسیدن به این سرعت دورانی روتور نیازمند به اینرسی لازم می‌باشد. بدین منظور صلبیت روتور برای توربین میکرو می‌بایست مقدار بیشتری در مقایسه با توربین‌های در ابعاد بزرگتر داشته باشد. در این پژوهش مقدار صلبیت برابر با ۷۵٪ در نظر گرفته شده است. پارامتر دیگر در طراحی توربین محور عمودی پره مستقیم، ایرفویل پره است. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، برای تولید ضریب توان بیشتر، معمولاً ایرفویل‌های متقارن برای این نوع توربین‌ها انتخاب می‌شوند. نتایج مطالعه‌های پیشین حاکی از این است که ایرفویل‌های متقارن با ضخامت کمتر توان تولید ضریب برآر بیشتری دارند. با این وجود در مورد توربین‌های میکرو که ابعاد ایرفویل بسیار کوچک است نقش عدد رینولدز بیشتر می‌شود. لذا انتخاب ایرفویل با ضخامت

جدول ۲. جدول اطلاعات روتور توربین بادی محور عمودی داریوس

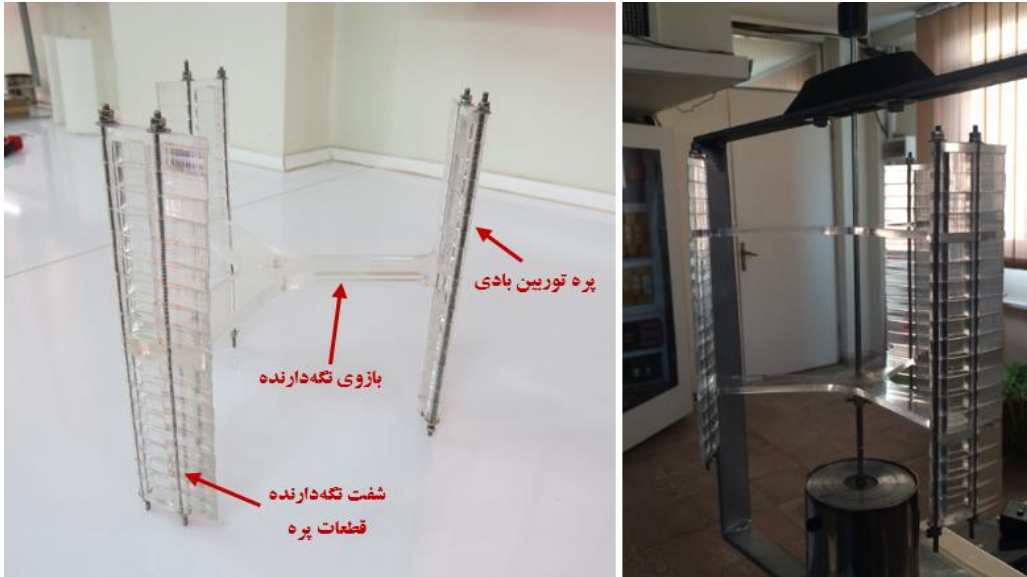
Table 2. Specification of Darrieus vertical axis wind turbine

توربین بادی محور عمودی داریوس	
نوع توربین	داریوس نوع پره مستقیم
تعداد پره‌ها	۳ پره
ارتفاع روتور	۲۰ سانتی‌متر
قطر روتور	۲۰ سانتی‌متر
مقطع پره‌ها	مقارن NACA0021
طول وتر بال ایرفویل	۵ سانتی‌متر
صلبیت	۰/۷۵



شکل ۷. طراحی قطعه‌های پره روتور توربین داریوس با سطح مقطع ایرفویل متقارن NACA0021.

Fig. 7. Design of Darrieus turbine blades with NACA0021 symmetrical cross section



شکل ۸. روتور کامل شده توربین داریوس و روتور توربین به همراه پایه نگه‌دارنده.

Fig. 8. Complete Darrieus turbine rotor and turbine rotor with supporting stand

از حالت‌های مختلفی مانند مقاومت آجری و یا لامپ‌های ال‌ای‌دی استفاده شده‌است. در نهایت از دستگاه بارگذاری استفاده شده است که باعث می‌شود تا دقت آزمایش افزایش یابد. تجهیزات اندازه‌گیری و آزمایش توربین برای روتور توربین بادی محور عمودی داریوس در شکل ۹ دیده می‌شود.

برای محاسبه ضریب توان توربین، توان خروجی توربین به توان باد تقسیم شده‌است. ضریب توان توربین از معادله (۲) به دست می‌آید.

$$C_p = \frac{P_{Turbine}}{0.5\rho AV^3} \quad (2)$$

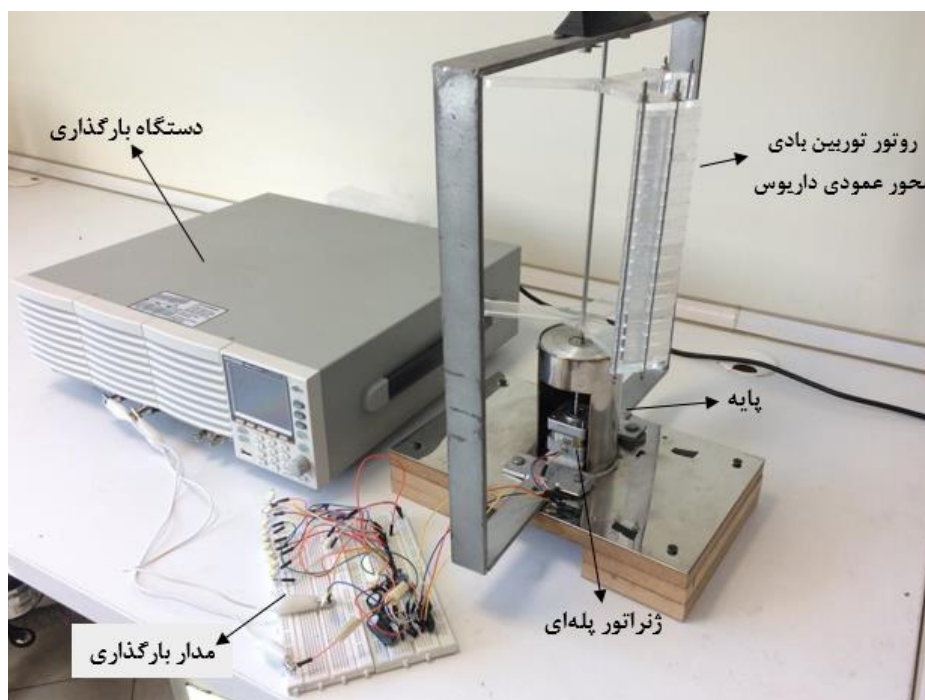
برای محاسبه نسبت سرعت نوک پره از معادله (۳) استفاده شده‌است.

$$TSR = \frac{R.\omega}{V} \quad (3)$$

قرار گرفته تا با عبور شفت، روتور توربین سرهم‌بندی شود. طراحی این قطعه‌ها با سطح مقطع ایرفویل متقارن NACA0021 مطابق شکل ۷ است. قطعات سرهم‌بندی شده، روتور و توربین کامل شده داریوس در شکل ۸ دیده می‌شود.

۳-۴- شرح تست‌ها و نحوه اندازه‌گیری

به منظور مقایسه عملکرد توربین‌ها منحنی ضریب توان آن‌ها بر حسب نسبت سرعت نوک پره هر توربین مورد بررسی قرار گرفته است. شفت روتورها به ژنراتور متصل شده‌است تا انرژی مکانیکی خروجی روتور به انرژی الکتریکی تبدیل شود. با استفاده از بارهای مختلفی که بر ژنراتور قرار داده شده‌است، توان‌های مختلفی در سرعت‌های دورانی مختلف از توربین به دست آمده‌است. از موتورهای پله‌ای به عنوان ژنراتور استفاده شده‌است. برای بارگذاری بر ژنراتور



شکل ۹. دستگاه‌های اندازه‌گیری و آزمایش روتور.

Fig. 9. Rotor measuring and testing devices

توربین محاسبه می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، تست‌های مختلفی بر روی روتور ساوینیوس و روتور داریوس انجام شده است. در آزمایش مربوط به توربین ساوینیوس سرعت باد تغییر داده شده است تا تأثیر این پارامتر بر عملکرد این نوع توربین بررسی گردد. در توربین داریوس با کاهش ارتفاع روتور نسبت ابعاد تغییر داده شده و سپس جایگاه بازوی نگاه‌دارنده در سه حالت متفاوت آزمایش شده است تا عملکرد این توربین نیز در شرایط متفاوت بررسی شود.

۳-۵- آنالیز خطا

یکی از مسئله‌های مهم در ارائه نتایج آزمایش‌های تجربی تحلیل خطای سیستم آزمایشگاهی است. بنابراین خطای محاسبه ضریب توان به دست آمده است. در محاسبه خطای ضریب توان، خطای سیستم‌های آزمایشگاهی و ابزارهای اندازه‌گیری که توربین به وسیله آن‌ها آزمایش شده است، در محاسبه خطای کلی استفاده شده است. یکی از اساسی‌ترین تجهیزات آزمایشگاهی که توربین به وسیله آن اندازه‌گیری شده است دستگاه بارگذاری است (شکل ۱۰). این دستگاه این قابلیت را دارد که با افزودن پیوسته مقاومت، میزان توان خروجی توربین را با ۱٪ خطا محاسبه و به عنوان خروجی ارائه دهد.

که در آن I شعاع روتور توربین، ω سرعت دورانی روتور و V سرعت باد است. برای به دست آوردن سرعت دورانی روتور از دورسنج مدل ۲۲۶۸-DT استفاده شده است. آزمایش‌ها توسط دستگاه شبیه‌ساز باد و در اتاق ایزوله صورت گرفته است. برای کامل شدن منحنی در هر آزمایش مقدار بار لازم بر ژنراتور تغییر داده شده است تا سرعت دورانی و در نتیجه ضریب توان توربین به دست آید. بنابراین در چندین نقطه ضریب توان و نسبت سرعت نوک پره محاسبه شده است تا منحنی خروجی توربین به دست آید.

پس از ساخت توربین‌های ساوینیوس، داریوس و مشخص شدن نحوه آزمایش آن‌ها، نتایج در قالب نمودار ضریب توان بر حسب نسبت سرعت نوک پره ارائه شده است. همان‌طور که گفته شد توان خروجی توربین، توان الکتریکی است. در معادله (۴) نحوه محاسبه توان توربین به وسیله ولتاژ، جریان و مقاومت آورده شده است.

$$P_{Turbine} = I.V = \frac{V^2}{R} \quad (4)$$

که در آن $P_{Turbine}$ توان توربین، V مقدار ولتاژ، I مقدار جریان و R مقاومت است. طبق این معادله توان توربین را می‌توان از دو روش ولتاژ-جریان و ولتاژ-مقاومت به دست آورد و سپس ضریب توان



شکل ۱۰. دستگاه بارگذاری، شکل سمت راست صفحه‌نمایش دستگاه هنگام آزمایش، شکل سمت چپ دستگاه کامل.
Fig. 10. Loading device, right figure: device screen when testing, left figure: the complete device

$$\frac{\partial C_p}{\partial P_{Turbine}} = \frac{1}{0.5 \rho A V^3} \quad (5)$$

با جایگذاری مقادیر مربوطه در معادله (۵) مقدار مشتق جزئی برابر با ۰/۳۳ است. بنابراین با در نظر گرفتن خطای ۱٪ برای محاسبه دستگاه بار که توان توربین را ارائه می‌دهد، C_{p0} برابر با ۰/۳۳٪ است.

$$\frac{\partial C_p}{\partial A} = \frac{0.5 P_{Turbine} \rho V^3}{(0.5 \rho A V^3)^2} \quad (6)$$

با جایگذاری مقادیر در معادله (۶) مقدار مشتق جزئی برابر با ۵ است. بنابراین C_{p0} برابر با ۰/۳٪ می‌شود.

$$\frac{\partial C_p}{\partial V} = \frac{1/5 P_{Turbine} \rho A V^2}{(0.5 \rho A V^3)^2} \quad (7)$$

با جایگذاری مقادیر در معادله (۷) مقدار مشتق جزئی برابر با ۰/۱۲ است. C_{p0} برابر با ۰/۳۶٪ می‌شود. با محاسبه واریانس مقادیر خطای به دست آمده، خطای کلی سیستم ۰/۵۷٪ است.

۴- نتایج و بحث

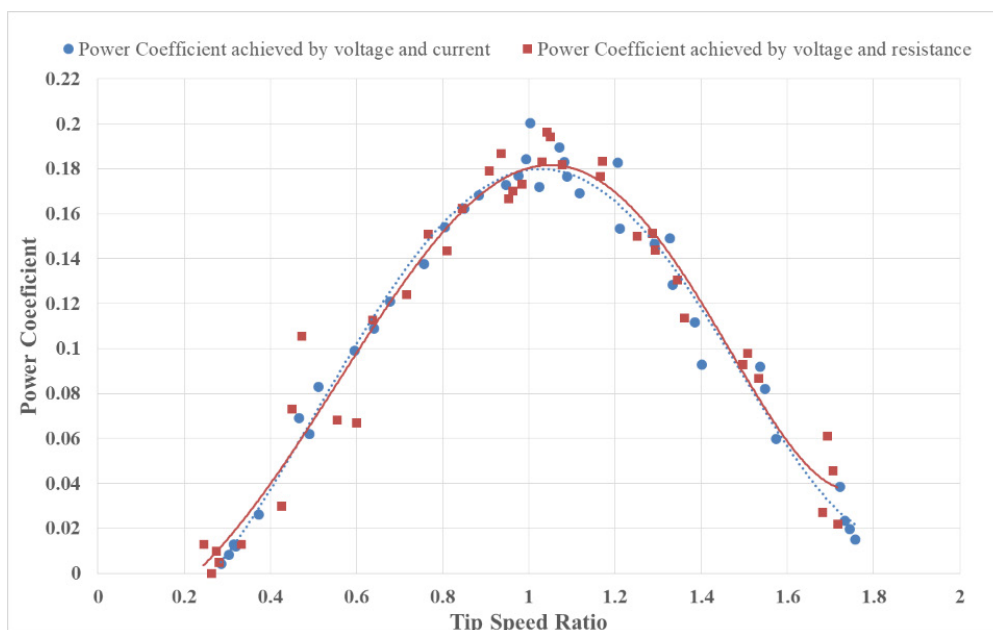
در شکل ۱۲ نمودار ضریب توان برحسب نسبت سرعت نوک پره برای توربین ساونیوس با کاربرد دو روش مذکور یعنی ولتاژ-جریان و ولتاژ-مقاومت برای محاسبه توان، آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود منحنی‌های ضریب توان برحسب نسبت سرعت نوک پره با دقت بسیار خوبی نزدیک به هم است. تفاوت اندکی در نقاط محاسبه‌شده وجود دارد که دلیل این تفاوت گرم شدن فن شبیه‌ساز



شکل ۱۱. سرعت‌سنج باد مورد استفاده برای به دست آوردن سرعت باد فن شبیه‌ساز.
Fig. 11. Wind anemometer used to obtain simulator wind speed

با توجه به آن که سرعت باد یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار بر ضریب توان توربین بوده است، بنابراین با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج هات‌وایر مدل TES-1341-1341 استفاده شده است (شکل ۱۱). با توجه به کاتالوگ ارائه شده توسط سازنده این دستگاه اندازه‌گیری میزان خطای اندازه‌گیری سرعت باد برای این سیستم ۳٪ ارائه شده است. عامل تأثیرگذار دیگر برای خطای سیستم مربوط به خطای ساخت توربین است که با توجه به ساخت دستی این سیستم میزان خطای آن برابر با ۲/۵٪ در نظر گرفته شده است. با توجه به اطلاعات مربوط به دستگاه‌های اندازه‌گیری و ساخت توربین به آنالیز خطای توربین پرداخته شده است.

برای محاسبه خطای دستگاه مشتق جزئی ضریب توان بر حسب هریک از پارامترهای بالا به دست آمده است. سپس مقادیر ضریب توان برابر با ۰/۲، چگالی ۱/۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب، مساحت ۰/۰۴ متر مربع و سرعت ۵ متر بر ثانیه در معادله‌ها جایگذاری شده است.



شکل ۱۲. نمودار ضریب توان برحسب نسبت سرعت نوک پره در سرعت ۴.۵ متر بر ثانیه، نمودار خط‌چین توان محاسبه‌شده با ولتاژ و آمپر و نمودار خط توان محاسبه‌شده با ولتاژ و مقاومت.

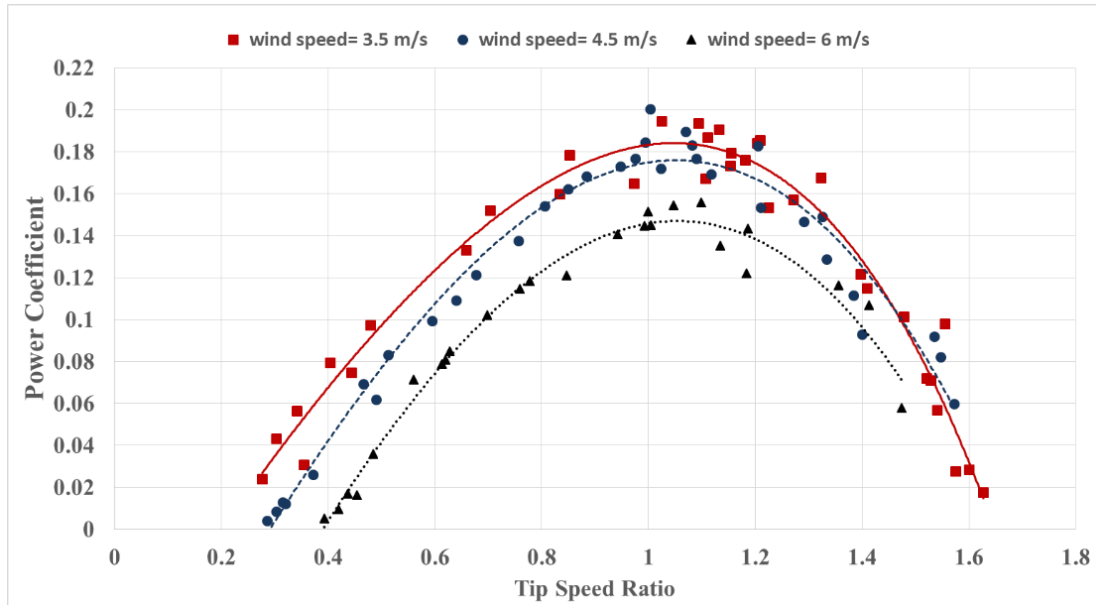
Fig. 12. Diagram of power coefficient in term of tip speed ratio at 4.5 m / s wind speed, power was obtained by voltage and ampere in the dotted curve and by voltage and resistance in line curve

مورد پذیرش به دست آمد، آزمایش دیگر برای مشاهده چگونگی عملکرد توربین ساوینیوس در سرعت‌های باد مختلف انجام شده است. در شکل ۱۳ نمودار ضریب توان برحسب نسبت سرعت نوک پره برای توربین ساوینیوس در سرعت‌های باد ۳/۵، ۴/۵ و ۶ متر بر ثانیه آورده شده است. نتایج نشان‌دهنده آن است که این توربین بهترین عملکرد را در سرعت باد ۳/۵ متر بر ثانیه دارد.

محورهای عمودی و افقی نمودار ضریب توان برحسب نسبت سرعت نوک پره بر اساس اعداد بی‌بعد است. بنابراین به نظر می‌رسد که تغییر عواملی مانند سرعت باد نباید بر عملکرد توربین تأثیرگذار باشد. از لحاظ تئوری این مسئله قابل‌پذیرش است. اما باید بررسی شود که آیا ساختار و اجزای توربین قابلیت پذیرش شرایط آزمایش را دارد یا خیر. یک دلیل این تفاوت می‌تواند این واقعیت باشد که با افزایش سرعت باد و سرعت دورانی روتور، سیستم بلبرینگ‌ها و به‌طور کلی پایه نگه‌دارنده قابلیت عملکرد مناسب را مانند عملکرد آنها در سرعت‌های باد پایین ندارند. بنابراین ضریب توان توربین تا حدودی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر امکان تأثیر تغییر عدد رینولدز با تغییر سرعت باد و تأثیر بر عملکرد توربین وجود دارد [۱۱]. گشتاور تولیدی در توربین‌های بادی ساوینیوس بر اثر نیروی پَسار وارد بر قسمت مقعر

باد پس از مدتی کار کردن و تغییر دور فن و در نتیجه سرعت باد است. با این وجود با تکرار آزمایش‌ها و اجازه خنک شدن به فن سعی بر به دست آوردن داده‌ها با دقت بالا بوده است. در نهایت با استفاده از روش ولتاژ-جریان برای محاسبه توان توربین در سایر آزمایش‌ها استفاده شده است.

در بسیاری از پژوهش‌هایی که عملکرد توربین ساوینیوس مورد بررسی قرار گرفته، بیشینه ضریب توان در نسبت سرعت نوک پره یک اتفاق افتاده است [۱۸، ۳۴]. در شکل ۱۲ نیز دیده می‌شود که بیشینه ضریب توان توربین ساوینیوس که ساخته شده، در نسبت سرعت نوک پره یک اتفاق می‌افتد. بیشینه ضریب توان مقدار ۰.۱۸ است. با علم بر اینکه توربین ساوینیوس دارای بیشینه ضریب توان پایینی (کمتر از ۰.۲۵) نسبت به توربین داریوس است، بیشینه ضریب توان ۰.۱۸ مقدار قابل‌پذیرشی به نظر می‌رسد [۳۵]. دلیل این تفاوت به نحوه ایجاد گشتاور در این دو نوع توربین است که در یکی (ساوینیوس) گشتاور از نیروی پَساری که به پره‌ها وارد می‌شود استخراج می‌شود و در دیگری (داریوس) از ترکیب نیروی برآر (مطلوب) و نیروی پَسار (نامطلوب) حاصل می‌شود. پس از آنکه نمودار ضریب توان توربین ساوینیوس با ویژگی‌های



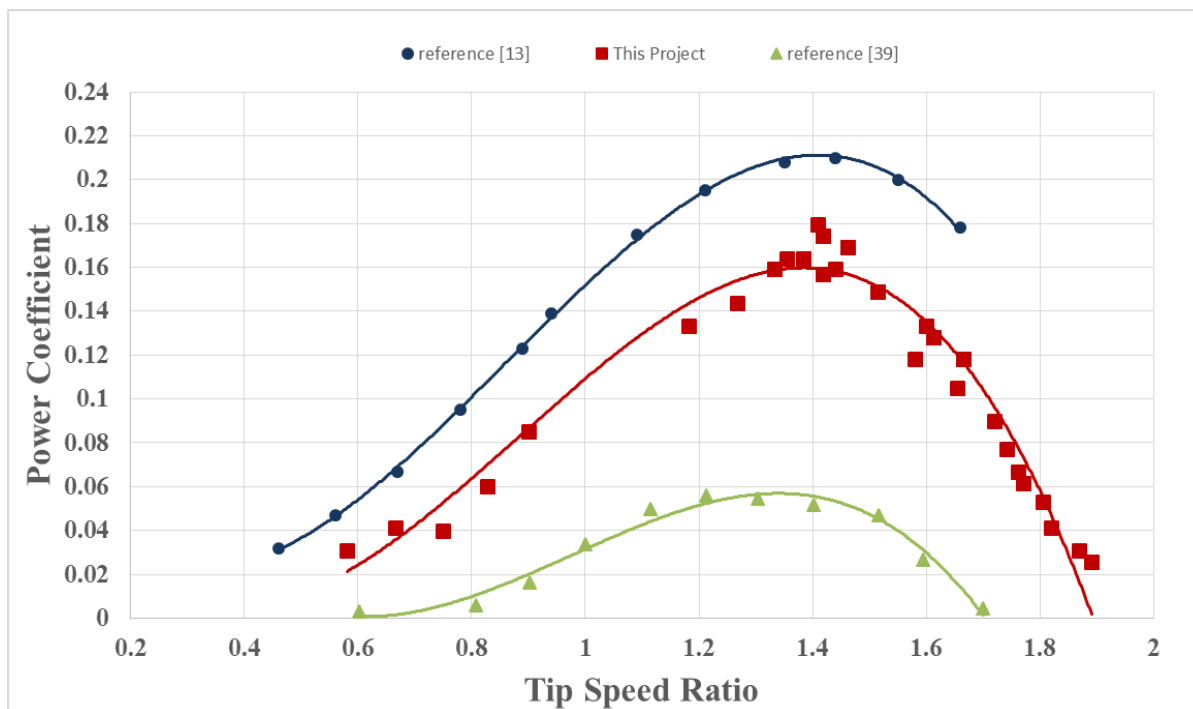
شکل ۱۳. نمودار ضریب توان برحسب نسبت سرعت نوک پره برای توربین ساوینیوس در سرعت‌های باد متفاوت.

Fig. 13. Diagram of power coefficient in term of tip speed ratio for Savonius wind turbine at different wind speeds

[۱۳، ۳۸].

همان‌طور که مشاهده می‌شود، توربین داریوس پژوهش پیش‌رو مشابه با آزمایش تجربی پژوهش مرجع [۱۳] است. تنها تفاوت در ابعاد آن است که به اندازه ۴ برابر کوچک‌نمایی شده‌است. روند منحنی مشابه با روند منحنی مرجع است. تفاوت مشاهده شده همان‌طور که دیده می‌شود اختلاف نزدیک ۵٪ برای بیشینه ضریب توان بین نتایج مرجع و نتایج آزمایش توربین داریوس ساخته‌شده وجود دارد. پره‌های روتور توربین مرجع به صورت یکپارچه با صافی سطح مناسب است. در حالی که پره‌های روتور توربین ساخته شده به منظور فراهم آوردن امکان آزمایش‌های بیشتر قطعه‌قطعه است و صافی سطح مناسب را تأمین نمی‌کند. عامل اصلی تأثیرگذار بر این تفاوت تغییرات عدد رینولدز است که به میزان چهار برابر کاهش یافته و باعث کاهش ضریب توان روتور توربین این پژوهش شده است. از سوی دیگر نتایج این پژوهش با نتایج مرجع [۱۳] مقایسه شده است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود ابعاد روتور این توربین نزدیک‌تر به ابعاد روتور توربین پژوهش پیش‌رو است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تأثیر سرعت باد و به طبع آن تأثیر عدد رینولدز باعث کاهش ضریب توان در این توربین شده است. از سوی دیگر استفاده از ایرفویل‌های غیرمقارن برای سطح مقطع پره‌های توربین بادی داریوس در مقایسه با ایرفویل‌های مقارن باعث کاهش ضریب توان

توربین است که این نیرو با افزایش سرعت باد افزایش می‌یابد و باعث افزایش گشتاور وارد بر توربین می‌شود. وابسته به طراحی توربین‌ها میزان افزایش گشتاور می‌تواند بیشتر و یا کمتر از تأثیر سرعت باد باشد. به طور معمول در توربین‌های ساوینیوس افزایش سرعت باد باعث افزایش ضریب توان می‌شود [۳۶، ۳۷]. وجه تمایز این پژوهش با پژوهش‌های پیشین که باعث تغییر نتایج شده است ابعاد روتور توربین است. در توربین‌های در ابعاد مایکرو، نیروهای مقاوم بر توربین به شدت تأثیرگذار هستند و به همین دلیل افزایش سرعت باد باعث کاهش ضریب توان شده است. بنابراین در انتخاب سرعت طراحی توربین ساوینیوس برای پژوهش‌های عملی ابعاد توربین و بررسی نیروهای مقاوم مهم است. در حال به‌عنوان پژوهش‌های آینده امکان آزمایش‌های بیشتر برای مشاهده تأثیر این پارامتر وجود دارد. در مرحله بعد مجموعه‌ای از آزمایش‌ها و اندازه‌گیری بر توربین بادی داریوس با پره‌های مستقیم در ابعاد مایکرو و قابلیت تغییر ساختار و ابعاد انجام شده‌است. ساختار روتور داریوس امکان آزمایش‌های متفاوت را فراهم می‌کند. شکل ۱۴ تغییرات ضریب توان توربین داریوس بر حسب نسبت سرعت نوک پره را برای نسبت ابعاد یک و در شرایطی که بازوهای نگه‌دارنده در سر و ته پره هستند، نشان می‌دهد. نتایج این اندازه‌گیری با نتایجی که توسط محققین پیشین برای توربین‌های با مشخصات بدست آمده است، مقایسه شده است



شکل ۱۴. مقایسه منحنی ضریب توان توربین داریوس بر حسب نسبت سرعت نوک پره با مراجع [۱۳، ۳۸].

Fig. 14. Comparison of the Darrieus Turbine Power coefficient in terms of tip speed Ratio Curve with references [13, 38]

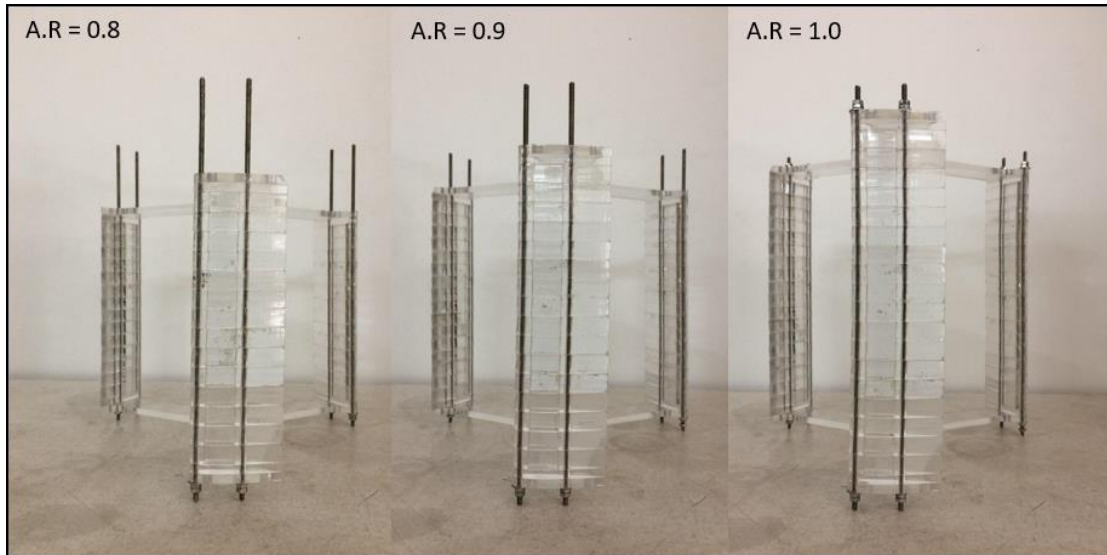
جدول ۳. شرایط آزمایش در مراجع دیگر مشابه با پژوهش حاضر

Table 3. Test conditions in other references similar to the present study

سرعت باد ورودی	صلبیت	نوع ایرفویل	قطر روتور	ارتفاع	تعداد پره	نوع روتور	
۸	۰/۷۵	NACA0021	۲۰	۲۰	۳	داریوس پره مستقیم	پژوهش حاضر
۸	۰/۷۵	NACA0021	۸۰	۸۰	۳	داریوس پره مستقیم	مرجع [۱۳]
۵	۰/۶۵	NACA4415	۲۵	۴۰	۳	داریوس پره مستقیم	مرجع [۳۸]

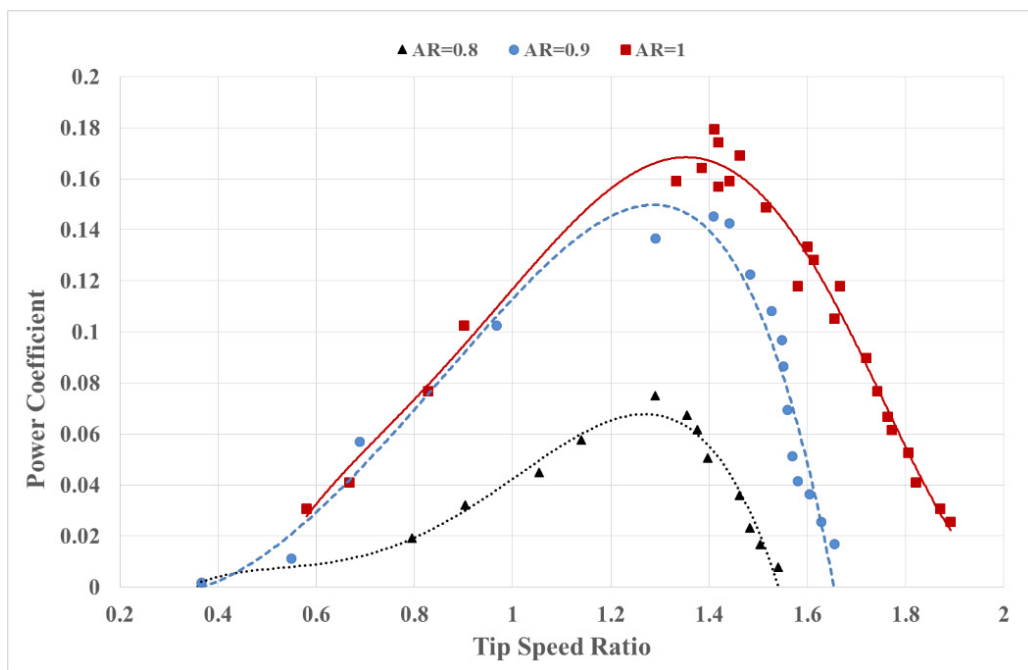
تغییر پارامترهای تأثیرگذار مانند نوع ایرفویل، تعداد پره‌ها، زاویه حمله و شکل نوک ایرفویل عواملی هست که می‌تواند باعث افزایش ضریب توان روتور داریوس در ابعاد میکرو شود. از پارامترهای مهم دیگر که بر عملکرد آیرودینامیکی توربین داریوس تأثیر دارد، صلبیت است. مطالعات پیشین حاکی از آن است که افزایش صلبیت بر کاهش مقدار ضریب توان بیشینه تأثیر دارد. برای صلبیت بالای ۵۰ درصد، ضریب توان به شدت کاهش می‌یابد [۲۸]. همان‌طور که پیشتر ذکر شد دلیل انتخاب این صلبیت بر این اساس است که منحنی ضریب توان به شکل کامل به دست‌آید. در واقع با کاهش شعاع روتور در نسبت سرعت نوک پره یکسان باید سرعت دورانی به شدت افزایش یابد که در واقعیت این موضوع امکان‌پذیر نیست. بنابراین با افزایش

می‌شوند [۳۱]. بنابراین این عامل را نیز می‌توان در کاهش ضریب توان توربین مرجع [۳۸] نسبت به پژوهش حاضر دخیل دانست. همان‌طور که از مقایسه نمودار روتور توربین داریوس و ساوینیوس مشخص است، ضریب عملکرد روتور توربین داریوس کمتر از ساوینیوس است. این موضوع در حالی است که در بسیاری از مراجع ضریب عملکرد توربین داریوس بیشتر از توربین ساوینیوس ذکر شده است. در توربین‌های در ابعاد میکرو عدد رینولدز به شدت کاهش می‌یابد. از آنجایی که روتور داریوس بر اساس نیروی برآر عمل می‌کند، این موضوع بسیار بر عملکرد آن تأثیر می‌گذارد و باعث کاهش ضریب توان آن می‌شود. روتور ساوینیوس بر اساس نیروی پسار عمل می‌کند و تغییر ابعاد و عدد رینولدز تأثیر زیادی بر عملکرد این روتور ندارد.



شکل ۱۵. روتور توربین بادی محور عمودی داریوس با سه نسبت ابعاد ۰.۸، ۰.۹ و ۱

Fig. 15. Rotor of Darrieus vertical axis wind turbine with three aspect ratios of 0.8, 0.9 and 1



شکل ۱۶. مقایسه نمودارهای ضریب توان برحسب نسبت سرعت نوک پره برای نسبت‌های ابعاد متفاوت توربین داریوس.

Fig.16. Comparison diagrams of power coefficient in terms of tip speed ratio for different aspect ratio of Darrieus turbine

روتور توربین داریوس نسبت ابعاد توربین کاهش می‌یابد. بنابراین آزمایش توربین با سه نسبت ابعاد روتور ۰/۸، ۰/۹ و ۱ صورت گرفته است (شکل ۱۵). شکل ۱۶ نمودار ضریب توان برحسب نسبت سرعت نوک پره را در این سه حالت نشان می‌دهد. بر اساس شبیه‌سازی و مدل‌سازی پژوهش‌های پیشین، حالت

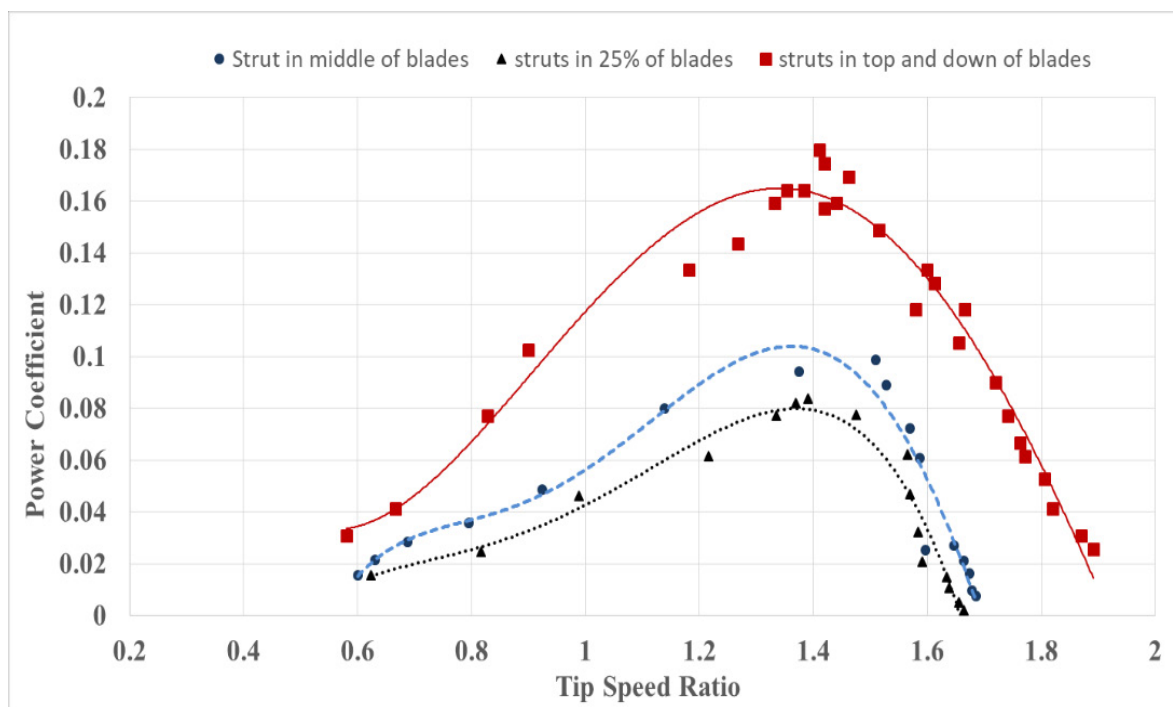
صلبیت محدوده نسبت سرعت نوک پره کاهش یافته است. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، توربین داریوس در این پژوهش به گونه‌ای طراحی و ساخته شده است تا امکان بررسی تاثیر نسبت ابعاد بر روی عملکرد توربین را فراهم آورد. نسبت ابعاد توربین داریوس، نسبت ارتفاع به قطر روتور است. با کم کردن تعداد قطعه‌های پره

در پژوهش‌هایی پیشین ساخته‌شده، تأثیر این عامل کمتر دیده شده است. همچنین در مدل‌سازی‌ها و شبیه‌سازی‌ها کمتر به این عامل پرداخته شده است. با توجه به قطعه‌قطعه بودن پره‌های روتور توربین داریوس ساخته‌شده، امکان آزمایش و مشاهده نتایج برای جایگاه‌های متفاوت بازوی نگه‌دارنده فراهم شده است. این آزمایش در سه حالت انجام گرفته است. در حالت اول بازوهای نگه‌دارنده در ابتدا و انتهای پره جایگذاری شده است. در حالت دوم بازوهای نگه‌دارنده با فاصله ۲۵٪ طول پره از ابتدا و انتهای پره فاصله دارد. در حالت سوم بازوی نگه‌دارنده در وسط پره جایگذاری شده است. نتایج آزمایش هر کدام از این حالت‌های روتور در شکل ۱۷ آورده شده است.

در بین نمودارهای شکل ۱۷ بیشترین مقدار ضریب توان مربوط به حالتی است که بازوی نگه‌دارنده پره‌ها در بالا و پایین پره قرار دارد. پس از آن، روتور در حالتی که بازوی نگه‌دارنده پره‌ها در مرکز قرار دارد عملکرد بهینه دارد. در نهایت در حالتی که دو بازوی نگه‌دارنده با فاصله برابر از ابتدا و انتهای روتور است، توربین عملکرد مناسبی ندارد. علت این امر به احتمال زیاد گردابه‌هایی است که توسط بازوی نگه‌دارنده ایجاد می‌شوند. در حالتی که بازوها در ابتدا و انتهای روتور قرار دارند، تأثیر این گردابه‌ها کمتر بر روی قسمت‌های میانی روتور که گشتاور مطلوب تولید می‌کنند، دیده می‌شود. پس از آن در حالتی

بهبودیافته نسبت ابعاد یک پیش‌بینی شده بود. نتایج آزمایش توربین بادی داریوس در این سه حالت نشان‌دهنده این موضوع است. در نمودارهای شکل ۱۶ نیز دیده می‌شود که بیشینه ضریب توان توربین داریوس مربوط به نسبت ابعاد یک است. مشابه با این نتیجه‌گیری در رابطه با توربین‌های داریوس در نتایج مربوط به مرجع [۲۸] که به صورت تجربی تأثیر نسبت ابعاد را بر توربین داریوس بررسی کرده است، قابل مشاهده است. دلیل این اتفاق را می‌توان در تأثیر گردابه‌هایی که در نوک بالایی و پائینی پره‌ها شکل می‌گیرد، جستجو کرد. برای نسبت ابعاد توربین کوچکتر تأثیر مخرب این گردابه‌ها بر بخش‌های مرکزی پره‌ها که گشتاور مفید تولید می‌کنند، بیشتر است. با توجه به محدودیت ابعادی که برای شبیه‌ساز باد وجود دارد، امکان بزرگ‌تر کردن ارتفاع توربین وجود نداشت. به نظر می‌رسد که با بزرگ‌تر کردن ارتفاع و نسبت ابعاد روتور، بیشینه ضریب توان کاهش یابد [۲۸]. بنابراین با توجه به نتایج آزمایش و پژوهش‌های پیشین به نظر می‌رسد که نسبت ابعاد بهینه برای روتور داریوس یک است.

یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار بر عملکرد توربین داریوس جایگاه بازوی نگه‌دارنده پره‌ها در این توربین است. به‌ویژه در ساخت توربین‌هایی با ابعاد مایکرو به نظر می‌رسد، این پارامتر تأثیر بیشتری در اغتشاش جریان باد دارد. به خاطر ساختار صلب توربین‌هایی که



شکل ۱۷. مقایسه نمودارهای ضریب توان برحسب نسبت سرعت نوک پره برای جایگاه‌های متفاوت بازوی نگه‌دارنده پره‌ها

Fig. 17. Comparison diagrams of power coefficient in terms of tip speed ratio for different blade struts position

هدف دولت‌ها برای تأمین انرژی الکتریکی، بیشتر پژوهش‌ها مربوط به توربین‌های در ابعاد بزرگ بوده است. در دهه‌های اخیر نگرش‌های جدیدی به حوزه انرژی تولیدی شهری و در نتیجه بهره‌برداری از توربین‌های در ابعاد مینی و میکرو شده است. توربین‌های میکرو به طور ویژه امکان فائق آمدن بر محدودیت فضایی در حوزه شهری را فراهم می‌آورند. در این پژوهش عملکرد دو نوع توربین بادی محور عمودی ساوینیوس و داریوس در ابعاد میکرو مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که توربین ساوینیوس در سرعت‌های پایین‌تر باد ضریب توان بالاتری دارند و مناسب برای سرعت‌های پایین و راه‌اندازی توربین است. توربین بادی داریوس مورد بررسی از نوع سه پره با پره مستقیم است. آزمایش‌های انجام شده بر این توربین برای مشخص شدن نسبت ابعاد و جایگاه بازوی نگه‌دارنده پره‌ها در ابعاد میکرو است. بدین منظور روتوری طراحی و ساخته شد که امکان تغییر این پارامترها را دارا است و نیاز ساخت نمونه‌های جداگانه برای هر تست را مرتفع می‌کند. نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری ضریب توان توربین ساوینیوس حاکی از آن است که مدل ساخته شده مطابق با پژوهش‌های پیشین ضریب توان بیشینه قابل قبولی تولید می‌کند. همچنین نتایج نشان می‌دهند که ضریب توان توربین ساوینیوس وابستگی به سرعت باد ورودی دارد و با افزایش آن کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری ضریب توان توربین داریوس دلالت بر این امر دارد که توربین با نسبت ابعاد ۱ بیشترین ضریب توان را دارد. دلیل این امر دلیل این اتفاق به واسطه تولید گردابه‌هایی که در بالا و پائین پره‌ها شکل می‌گیرد، است. برای نسبت ابعاد توربین کوچکتر تاثیر مخرب این گردابه‌ها بر بخش‌های مرکزی پره‌ها که گشتاور مفید تولید می‌کنند، بیشتر است. همچنین نتایج بررسی تاثیر بازوی نگه‌دارنده بر عملکرد توربین داریوس نشان از این دارد که برای موردی که بازوهای نگه‌دارنده در بالا و پایین پره‌ها نصب می‌شوند، بهترین عملکرد حاصل می‌شود. با توجه به نتایج آزمایش‌ها، پیشنهاد شده است که دو نوع توربین ساوینیوس و داریوس می‌توانند در ابعاد میکرو با یکدیگر ترکیب شوند. در این حالت می‌توان توربینی هیبریدی با ضریب توان بالا و با ضریب عملکردی مناسب در محدوده‌های گسترده‌ای از باد داشت. البته ذکر این نکته حائز اهمیت است که عملکرد توربین بادی داریوس میکرو مورد استفاده می‌بایست بهینه گردد. بدین منظور حساسیت ضریب توان توربین داریوس میکرو بر حسب پارامترهای

که تک بازو در وسط روتور قرار می‌گیرد تأثیر آشفستگی جریان بیشتر می‌شود و عملکرد توربین را تخریب می‌کند. در نهایت در حالتی که دو بازو در اواسط پره قرار دارند، تأثیر این گردابه‌ها بیشتر می‌شود و بیشینه ضریب توان توربین تا نزدیک به ۱۰٪ با حالت بهبودیافته روتور کمتر است. تفاوت بین حالتی که تک بازو در وسط است با حالتی که دو بازو در اواسط پره‌ها هستند در این است که تک بازو فقط یکسری گردابه تولید می‌کند، در مقابل در مورد دو بازو، هر بازو گردابه‌های خودش را تولید می‌کند. علاوه بر این بازوهای نیروی پساری تولید می‌کنند که باعث ایجاد گشتاور مقاوم می‌شود. همان‌طور که گفته شد در پژوهش‌های پیشین تأثیر این عامل بر توربین کمتر دیده شده است و تنها در مرجع [۱۳] تفاوت دو حالتی که بازوهای شبیه‌سازی عددی در نظر گرفته شده‌اند و حالتی که بازویی وجود ندارد بررسی شده است. وجود بازوهای نگه‌دارنده باعث کاهش ضریب توان شده است و حتی توانسته موقعیت بیشینه ضریب توان توربین را نیز تغییر دهد. در توربین‌هایی با ابعاد بزرگ دیده می‌شود که دو بازوی نگه‌دارنده پره‌ها در اواسط پره جایگذاری می‌شوند. در این توربین‌ها به واسطه قطر بزرگ روتور تأثیر تخریب جریان توسط بازوی نگه‌دارنده قابل توجه نیست. بنابراین با توجه به تحلیل‌های جامداتی و توزیع وزن و نیروی گریز از مرکز پره بازوهای نگه‌دارنده در اواسط پره قرار داده می‌شوند.

با توجه به نتایج ارائه شده برای دو نوع توربین بادی محور عمودی ساوینیوس و داریوس، می‌توان از مزایای هر کدام از آن‌ها برای دستیابی به یک توربین بادی محور عمودی ترکیبی در ابعاد میکرو استفاده نمود. در واقع نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که توربین بادی ساوینیوس در سرعت‌های پایین باد شروع به حرکت می‌کند و در سرعت‌های بالای باد توربین داریوس ضریب توان بالایی دارد. با ترکیب این دو نوع توربین می‌توان یک توربین در ابعاد میکرو طراحی نمود که در سرعت‌های پایین باد شروع به حرکت می‌کند و در گستره‌های باد بیشتری با ضریب توان بالا به واسطه توربین داریوس عمل کند.

۵- نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پژوهش بررسی عملکرد آیرودینامیکی توربین‌های بادی محور عمودی در ابعاد میکرو بوده است. با توجه به

- 20-31.
- [9] M.S. Siddiqui, N. Durrani, I. Akhtar, Quantification of the effects of geometric approximations on the performance of a vertical axis wind turbine, *Renewable Energy*, 74 (2015) 661-670.
- [10] I. Hui, B.E. Cain, J.O. Dabiri, Public receptiveness of vertical axis wind turbines, *Energy Policy*, 112 (2018) 258-271.
- [11] S. Zanforlin, S. Deluca, Effects of the Reynolds number and the tip losses on the optimal aspect ratio of straight-bladed Vertical Axis Wind Turbines, *Energy*, 148 (2018) 179-195.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] M.R. Castelli, A. Englaro, E. Benini, The Darrieus wind turbine: Proposal for a new performance prediction model based on CFD, *Energy*, 36(8) (2011) 4919-4934.
- [15] M. Mohamed, Performance investigation of H-rotor Darrieus turbine with new airfoil shapes, *Energy*, 47(1) (2012) 522-530.
- [16] B.D. Altan, M. Atilgan, A. Özdamar, An experimental study on improvement of a Savonius rotor performance with curtaining, *Experimental thermal and fluid science*, 32(8) (2008) 1673-1678.
- [17] S. Roy, U.K. Saha, Review of experimental investigations into the design, performance and optimization of the Savonius rotor, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 227(4) (2013) 528-542.
- [18] I. Ushiyama, H. Nagai, Optimum design

گوناگون شامل صلبیت، نوع ایرفویل، زاویه حمله پره، ممان اینرسی وزنی باید آنالیز شود. بهینه‌سازی توبین داریوس مایکرو با پره‌های مستقیم و بررسی و مطالعه توربین هیبردی از اهداف پیش‌رو این مجموعه است.

منابع

- [1] T. Pereira, N. Batista, A. Fonseca, C. Cardeira, P. Oliveira, R. Melicio, Darrieus wind turbine prototype: Dynamic modeling parameter identification and control analysis, *Energy*, 159 (2018) 961-976.
- [2] A. Meana-Fernández, I. Solís-Gallego, J.M.F. Oro, K.M.A. Díaz, S. Velarde-Suárez, Parametrical evaluation of the aerodynamic performance of vertical axis wind turbines for the proposal of optimized designs, *Energy*, 147 (2018) 504-517.
- [3] S. Armstrong, A. Fiedler, S. Tullis, Flow separation on a high Reynolds number, high solidity vertical axis wind turbine with straight and canted blades and canted blades with fences, *Renewable energy*, 41 (2012) 13-22.
- [4] 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.
- [5] R. Kumar, K. Raahemifar, A.S. Fung, A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89 (2018) 281-291.
- [6] V. Tucker, Using a collision model to design safer wind turbine rotors for birds, (1996).
- [7] T. Maeda, Y. Kamada, J. Murata, Q. Li, T. Kawabata, T. Kogaki, Measurements of flow field and pressure distribution of straight-bladed vertical axis wind turbine, in: *Proceedings of the European Wind Energy Association Conference and Exhibition, 2013*, pp. 8.
- [8] M.F. Ismail, K. Vijayaraghavan, The effects of aerofoil profile modification on a vertical axis wind turbine performance, *Energy*, 80 (2015)

- Ting, Straight-bladed vertical axis wind turbine rotor design guide based on aerodynamic performance and loading analysis, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 228(7) (2014) 742-759.
- [29] I.B. Mabrouk, A. El Hami, Effect of number of blades on the dynamic behavior of a Darrieus turbine geared transmission system, Mechanical Systems and Signal Processing, 121 (2019) 562-578.
- [30] H. Beri, Y. Yao, Effect of camber airfoil on self starting of vertical axis wind turbine, Journal of environmental Science and Technology, 4(3) (2011) 302-312.
- [31] M. Islam, M. Amin, D. Ting, A. Fartaj, Performance analysis of a smaller-capacity straight-bladed VAWT with prospective airfoils, in: 46th AIAA aerospace sciences meeting and exhibit, 2008, pp. 1333.
- [32] M. Raciti Castelli, G. Ardizzon, L. Battisti, E. Benini, G. Pavesi, Modeling strategy and numerical validation for a Darrieus vertical axis micro-wind turbine, in: ASME 2010 international mechanical engineering congress and exposition, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2010, pp. 409-418.
- [33] T. Maeda, Y. Kamada, J. Murata, M. Yamamoto, T. Ogasawara, K. Shimizu, T. Kogaki, Study on power performance for straight-bladed vertical axis wind turbine by field and wind tunnel test, Renewable Energy, 90 (2016) 291-300.
- [34] N. Fujisawa, On the torque mechanism of Savonius rotors, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 40(3) (1992) 277-292.
- [35] P. Adriane Prisco, V. Horcio Antonio, A. Joo Vicente, A review on the performance of Savonius wind turbines, Renewable and Sustainable Energy Reviews, (2012).
- [36] J.M. Mercado-Colmenero, M.A. Rubio-Paramio, F. Guerrero-Villar, C. Martin-configurations and performance of Savonius rotors, Wind Engineering, (1988) 59-75.
- [19] U. Saha, S. Thotla, D. Maity, Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 96(8-9) (2008) 1359-1375.
- [20] K. Sobczak, Numerical investigations of an influence of the aspect ratio on the Savonius rotor performance, in: Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2018, pp. 012034.
- [21] M. Zemamou, M. Aggour, A. Toumi, Review of savonius wind turbine design and performance, Energy Procedia, 141 (2017) 383-388.
- [22] K.N. Morshed, M. Rahman, G. Molina, M. Ahmed, Wind tunnel testing and numerical simulation on aerodynamic performance of a three-bladed Savonius wind turbine, International Journal of Energy and Environmental Engineering, 4(1) (2013) 18.
- [23] R.E. Sheldahl, B.F. Blackwell, L.V. Feltz, Wind tunnel performance data for two-and three-bucket Savonius rotors, Journal of Energy, 2(3) (1978) 160-164.
- [24] J.-L. Menet, A double-step Savonius rotor for local production of electricity: a design study, Renewable energy, 29(11) (2004) 1843-1862.
- [25] W. Tian, B. Song, J.H. VanZwieten, P. Pyakurel, Computational fluid dynamics prediction of a modified Savonius wind turbine with novel blade shapes, Energies, 8(8) (2015) 7915-7929.
- [26] B.D. Altan, M. Atilgan, An experimental and numerical study on the improvement of the performance of Savonius wind rotor, Energy Conversion and Management, 49(12) (2008) 3425-3432.
- [27] 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.
- [28] M. Ahmadi-Baloutaki, R. Carriveau, D.S.

- operating conditions, *Applied Energy*, 250 (2019) 864-872.
- [38] H. Jeong, S. Lee, S.-D. Kwon, Wind tunnel interference effects on power performance of small Darrieus wind turbines, in: *The 2014 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM14)*, Busan, Korea, 2014.
- Doñate, A numerical and experimental study of a new Savonius wind rotor adaptation based on product design requirements, *Energy Conversion and Management*, 158 (2018) 210-234.
- [37] A. Grönman, J. Tiainen, A. Jaatinen-Värri, Experimental and analytical analysis of vaned savonius turbine performance under different

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

N. Aboufazeli, P. Hashemi Tari, R. Gavagsaz-ghoachani, M. Zandi, Experimental Study on Effective Parameters on Vertical Axis Wind Turbine Performance, Amirkabir J. Mech. Eng., 53(5) (2021) 2771-2790.

DOI: [10.22060/mej.2020.17414.6590](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17414.6590)

