

ارزیابی اقتصادی و مقایسه عملکرد آیرودینامیکی توربین بادی اچ-شکل و وی-شکل در شهر زاهدان

سام سهام^۱ و سعید کریمیان علی آبادی^{۲*}

^۱ کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس، تهران

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس، تهران

S_saham@modares.ac.ir

Karimian@modares.ac.ir

چکیده

در این تحقیق دو نوع توربین محور عمودی از منظر آیرودینامیکی و اقتصادی مورد ارزیابی قرار گرفته است. توربین‌های مورد استفاده دارای پره‌های صاف و مستقیم (اچ-شکل) و زاویه‌دار (وی-شکل) بوده که دارای مشخصات ابعادی برابری هستند. این مشخصات نیز متناسب با شرایط اقلیمی شهر زاهدان و توزیع سرعت باد میانگین در این منطقه لحاظ شده است. برای ارزیابی آیرودینامیکی توربین‌ها از روش نیمه تحلیلی DMST استفاده شده است. نتایج این ارزیابی نشان می‌دهد که توان تولید شده در نوع وی-شکل بسیار کمتر از نوع اچ-شکل بوده، که این موضوع ناشی از کاهش مساحت موثر توربین و همچنین کاهش گشتاور تولید شده توسط روتور آن است. از طرف دیگر توان منفی هنگام راه‌اندازی در نوع وی-شکل حدود ۷ برابر کمتر از نوع اچ-شکل بوده و این موضوع باعث بهبود راه‌اندازی این نوع توربین خواهد شد. از نظر اقتصادی نیز هزینه تولید انرژی متوسط سالیانه برای توربین وی-شکل حدود ۱۰ دلار بوده، که نسبت به هزینه ۶۶ دلاری نوع اچ-شکل بسیار کمتر خواهد بود و این موضوع باعث می‌شود تا این نوع توربین برای کاربری‌های شهری و در مقیاس کوچک مناسب باشد.

کلمات کلیدی: توربین باد محور عمودی، عملکرد آیرودینامیکی، ارزیابی اقتصادی

A Comparative Study of the Aerodynamic Performance and Economic Viability of H-Shaped and V-Shaped Wind Turbines in the Climate of Zahedan City

Sam Saham¹ and Saeed Karimian^{2*}

Sam Saham¹: MS.c graduated, Faculty of Mechanical Engineering (Tarbiat Modares University)

Saeed Karimian^{2*}: Associate professor, Faculty of Mechanical Engineering (Tarbiat Modares University)

S_saham@modares.ac.ir

Karimian@modares.ac.ir

Abstract

This research evaluates two types of vertical axis turbines from both an aerodynamic and economic perspective. The turbines used in this study have straight (H-shaped) and angled (V-shaped) blades, with equivalent dimensional characteristics that are suitable for the climatic conditions and average wind speed distribution in Zahedan city. The aerodynamic evaluation of the turbines was conducted using the semi-analytical DMST method. The results indicate that the V-shaped turbine generates significantly less power than the H-shaped turbine due to the reduction of the effective area of the turbine and the torque produced by its rotor. However, during startup, the V-shaped turbine exhibits about seven times less negative power than the H-shaped turbine, which improves the overall startup process. From an economic standpoint, the V-shaped turbine has an annual average energy production cost of approximately 10 \$, which is much lower than the 70 \$ cost of the H-shaped turbine. This makes the V-shaped turbine a more suitable option for urban and small-scale applications.

Keywords: Vertical axis wind turbine, Aerodynamic performance, Economic evaluation

۱- مقدمه

مصرف سوخت‌های فسیلی باعث مشکلات زیست محیطی از جمله آلودگی جو، تولید گازهای گلخانه‌ای و آلودگی آب و خاک می‌شود [۱]. از طرفی با گذشت زمان، ذخایر نفت و گاز رو به کاهش بوده و در عین حال گسترش صنایع و کارخانجات نیاز روز افزون به انرژی را افزایش می‌دهد. از همین رو بسیاری از کشورها سعی دارند تا وابستگی خود را به سوخت‌های فسیلی کاهش داده و انرژی مورد نیاز خود را به واسطه انرژی‌های تجدیدپذیری همچون انرژی باد و خورشید بدست آورند. این نوع از انرژی که انرژی سبز نیز نامیده می‌شود، بیش از ۲۰ درصد تقاضای انرژی جهان را تأمین می‌کند [۲]. انرژی بادی به دلیل آن که رایگان بوده و اغلب در دسترس است، یکی از روش‌های مناسب تأمین انرژی به حساب می‌آید. بهره‌مندی از انرژی باد نیازمند استفاده از توربین‌های بادی بوده تا بتوان به کمک این توربین‌ها انرژی باد را به انرژی مکانیکی و نهایتاً به کمک ژنراتورها به انرژی الکتریکی تبدیل کرد. توربین‌ها به دو دسته محور افقی و محور عمودی تقسیم‌بندی می‌شوند که عموماً توربین‌های محور افقی نسبت به نوع محور عمودی توان بیشتری تولید می‌کنند، اما نیازمند صرف هزینه بیشتر و اختصاص دادن منطقه‌ای تحت عنوان مزرعه توربین بادی هستند. به همین دلیل استفاده از توربین‌های محور عمودی با توان کمتر، ابعاد کوچکتر، عدم حساسیت به جهت وزش باد و هزینه ساخت و سرویس کمتر یکی از گزینه‌های مناسب برای بهره‌مندی از مکان‌هایی همچون بام منازل، بام کارگاه‌ها، حاشیه بزرگ‌راه‌ها و سایر مکان‌های مشابه بوده که عملاً استفاده از توربین‌های محور افقی در آن مکان‌ها امکان‌پذیر نیست، و یا صرفه اقتصادی ندارد.

از آنجا که موقعیت جغرافیایی ایران در ناحیه کم‌فشار است، لذا برخی از نقاط آن تحت تاثیر جریان‌ها قدرتمند

تابستانی و زمستانی قرار خواهد گرفت. این جریان‌ها شامل بادهای زمستانی و تابستانی بوده که از سمت اقیانوس اطلس و دریای مدیترانه و اقیانوس هند می‌وزند. یک مطالعه در دانشگاه شریف نشان می‌دهد که پتانسیل ۲۶ نقطه در کشور در حدود ۶۵۰۰ مگاوات بوده که منطقه مناسبی برای استقرار توربین‌های بادی خواهد بود [۳ و ۴]. این قسمت‌ها شامل بخش اعظمی از جنوب شرقی ایران است که به طور کلی بادخیز تلقی می‌شود. اولین تجربه ایران در نصب توربین‌های بادی با هدف تولید برق به سال ۱۹۹۴ برمی‌گردد. در آن زمان دو مزرعه توربین بادی با توان ۵۰۰ کیلووات در منجیل و رودبار، واقع در استان گیلان احداث شد، که انرژی سالیانه آن به بیش از ۱.۸ میلیون کیلووات ساعت رسید [۴]. دومین تجربه در سال ۱۹۹۹ با احداث ۲۷ توربین بادی در منجیل و رودبار انجام شد که ۲۱ توربین مربوط به منجیل بوده که شامل ۱۵ توربین ۳۰۰ کیلوواتی، ۵ توربین ۵۵۰ کیلوواتی، و یک توربین ۵۰۰ کیلوواتی است [۴ و ۵]. سایر نقاط ایران که از توربین‌های بادی بهره می‌برند می‌توان به بینالود در خراسان و لوتاک در سیستان و بلوچستان اشاره کرد.

قریشی و رحیمی^۱ به بررسی جزییات انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر و همچنین به ائتلاف انرژی در برخی از صنایع پرداختند و پیشنهادهایی برای بهبود این مشکل ارائه دادند [۶]. علمداری و همکاران^۲ به بررسی پتانسیل انرژی بادی در ایران پرداختند. آن‌ها سرعت باد را در سال ۲۰۰۷ و در ارتفاع‌های ۱۰، ۳۰، و ۴۰ متری از سطح زمین مورد مقایسه قرار دادند. آن‌ها در تحقیقشان سرعت میانگین باد، تابع توزیع سرعت باد، و میانگین تراکم باد را توسط ۶۸ مرکز اطلاعاتی آب و هوایی ایران تخمین زدند [۷]. مصطفی‌پور^۳ امکان‌سنجی بهره‌برداری از انرژی باد در منطقه یزد ایران را بررسی کرد. او سرعت باد را به صورت ماهانه و سالیانه در ارتفاع‌های مختلف

^۳ Mostafaeipour A

^۱ Ghorashi AH, Rahimi A

^۲ Alamdari P, et al

بین سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۵ در ۱۱ ایستگاه هواشناسی مورد ارزیابی قرار داد. طبق تحقیقات او سرعت باد میانگین سالیانه در اکثر ایستگاه‌های هواشناسی کمتر از ۴.۵ متر بر ثانیه بوده، که برای نصب توربین‌های بادی (خصوصاً توربین‌های بزرگ) نامناسب است [۸]. همچنین در تحقیقی دیگر به ارزیابی اقتصادی استفاده از توربین‌های بادی کوچک در شهر کرمان پرداخت. در این تحقیق سه توربین کوچک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که شهر کرمان دارای پتانسیل انرژی بادی نسبتاً بهتری برای نصب توربین‌های بادی کوچک است. [۹]. موسوی و همکاران ۱ به مقایسه روش‌های موجود برای تولید برق با توربین بادی در ایران پرداختند و بیان کردند که نیروگاه‌های متکی به انرژی باد می‌تواند یکی از نیروگاه‌های رقابتی در صنعت بوده و از طرفی بیان کردند که موضوع یارانه‌ها می‌تواند در آینده بر توسعه صنعت بادی ایران تاثیرگذار باشد. همچنین در نتایج آن‌ها اشاره شده است که با توجه به وضعیت اقتصادی ایران و جهان، حرکت به سوی انرژی‌های پاک از جمله توربین بادی، یکی از رویکردهای مناسب برای کشور است [۱۰]؛ همچنین با توجه به اهمیت انرژی باد و مزایای آن، بسیاری از محققان به بررسی پتانسیل انرژی باد در مناطق مختلف ایران و جهان پرداختند که می‌توان به شهرهایی مانند یزد، تهران [۱۱]، و منجیل [۱۲] در ایران، و کشورهای ترکیه [۱۳ و ۱۴]، یونان [۱۵ و ۱۶]، آلمان [۱۷]، ایتالیایی [۱۸]، بحرین [۱۹]، عربستان [۲۰]، و پاکستان [۲۱] اشاره کرد. بنابراین با توجه به آمارهای ذکر شده واضح است که به طور کلی کشور ایران با وجود برخی مناطق مناسب از نظر انرژی باد نسبت به سایر کشورها در مقام پایین‌تری قرار گرفته است که این مسئله به تنهایی نشان می‌دهد که استفاده از توربین‌های محور عمودی و کوچک می‌تواند بازدهی بهتری در سطح کشور داشته باشد. این در حالی است که اکثر نیروگاه‌های بادی کشور از توربین‌های محور افقی

عظیم استفاده می‌کنند که علاوه بر پیچیدگی ساخت و بهره‌برداری، دارای هزینه‌های تولید و نگهداری بیشتری نسبت به نوع محور عمودی هستند.

در این تحقیق سعی شده است تا عملکرد آیرودینامیکی دو نوع توربین محور عمودی اچ-شکل و وی-شکل متناسب با شرایط جوی و سرعت هوای موجود در منطقه سیستان و شهر زاهدان مورد بررسی قرار گیرد. از معیارهای مهم برای انتخاب توربین جهت تولید برق در این منطقه می‌توان به مقدار سرعت باد میانگین در هر ماه، و توزیع فراوانی هر سرعت اشاره کرد. برای این منظور قطر توربین‌ها و سایر پارامترهای هندسی متناسب با شرایط اقلیم منطقه بوده و برای هر دو نوع توربین از نسبت منطقی یکسان استفاده شده است؛ تنها پارامتری که باعث تفاوت بین دو توربین می‌شود، استفاده از پره‌های زاویه دار در نوع وی-شکل است. در نهایت، پس از بررسی عملکردی و فنی توربین‌ها، هزینه‌های اجرای طرح و تخمینی از ارزیابی اقتصادی مربوط به هر یک از آن‌ها ارائه خواهد شد.

۲- معرفی اجزاء و عملکرد توربین محور عمودی

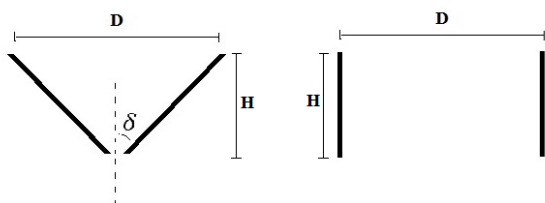
همانطور که در بخش قبل بیان شد، توربین‌های بادی انرژی جنبشی باد را به کمک پره‌ها دریافت کرده و با دوران روتور این انرژی را به انرژی مکانیکی تبدیل کرده و به شفت نگه‌دارنده پره‌ها منتقل می‌کنند. انتهای دیگر این شفت در جعبه دنده قرار دارد و در آن سرعت دوران شفت افزایش یافته و نهایتاً وارد ژنراتور می‌شود. این توضیح مختصر اساس کار توربین‌های بادی است. اما نحوه دریافت انرژی باد توسط پره‌ها بنا به نوع توربین متفاوت است. برخی از توربین‌ها مانند نوع ساوینوس بر اساس نیروی پسا، و برخی بر اساس نیروی برآ عمل می‌کنند. اما در توربین‌های داریوس (مشابه توربینی که در این تحقیق استفاده شده است) از نیروی برآ بهره استفاده

^۱ Mousavi SM, et al

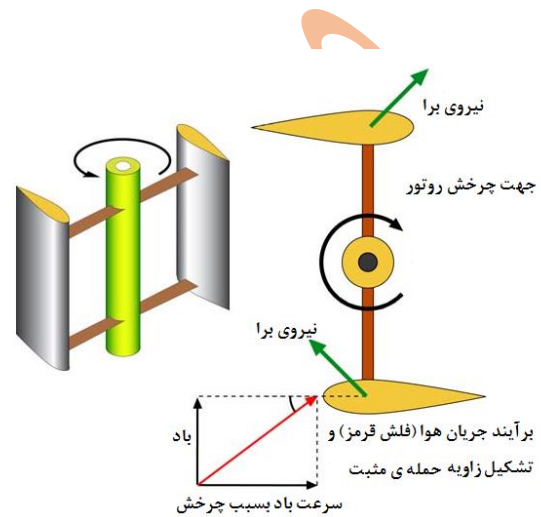
لذا از نظر آیرودینامیکی جزو قسمت‌های اصلی و مهم به شمار می‌رود. این قسمت نیاز به طراحی دقیق و مناسبی دارد، چرا که دارای رابطه مستقیمی با تولید نیرو و به چرخش درآوردن روتور است.

- **جعبه دنده و ژنراتور:** جعبه‌دنده باعث افزایش سرعت دورانی محور خروجی از جعبه‌دنده شده که باعث می‌شود سرعت نسبتاً پایین روتور به سرعت مناسب برای ژنراتور برسد. در نهایت محور خروجی از جعبه‌دنده با ژنراتور در ارتباط بوده و توسط ژنراتور انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود.

همانطور که گفته شد، در این تحقیق از دو نوع توربین استفاده شده است؛ حالت اول استفاده از پره‌های مستقیم (اچ-شکل)، و نوع دوم روتور با پره‌های زاویه‌دار است که به آن توربین وی-شکل می‌گویند. شماتیک توربین‌ها در شکل ۲ و مشخصات ابعادی آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. برای مقایسه دو توربین با شرایط هندسی مشابه، از نسبت طول پره به قطر روتور یکسان (نسبت منطری یکسان) استفاده شده است. برای این منظور، در حالت اچ-شکل قطر روتور ۶ متر در نظر گرفته شده، و بر اساس این قطر، ارتفاع روتور در توربین وی-شکل معادل ۴.۲۵ متر خواهد بود. در شماتیک شکل ۲ نیز مشخص است که با ثابت نگه داشتن قطر روتور اچ-شکل از قسمت بالایی آن و نزدیک کردن قسمت پایینی روتور به یکدیگر می‌توان هندسه روتور وی-شکل را ایجاد کرد. زاویه حاصل شده از امتداد پره با محور توربین تحت عنوان زاویه مخروطی و یا زاویه دلتا نامیده می‌شود. این زاویه معادل ۴۵ درجه لحاظ شده است.



شده و پره‌ها مشابه شکل ۱، به گونه‌ای طراحی می‌شوند تا مقدار پسا در مقابل جریان کم بوده و از طرف دیگر مقدار برآی تولید شده توسط پره‌ها بیشتر باشد. این نیروی برآ که ناشی از اختلاف فشار بین سطوح پر فشار و کم فشار پره است، معمولاً چندین برابر نیروی پسا بوده و باعث ایجاد گشتاور حول محور توربین و به حرکت درآمدن پره توربین می‌شود.



شکل ۱- نحوه عملکرد توربین بادی محور عمودی داریوس (بر اساس نیروی برآ) [۲۲]

اجزای اصلی توربین‌های محور عمودی را می‌توان به قسمت‌های زیر تقسیم‌بندی کرد:

- **برج توربین:** برج یا پایه توربین قسمت ثابت توربین باد بوده و وظیفه تحمل وزن استاتیک توربین و همچنین بار دینامیکی وارد بر آن را بر عهده دارد. در این نوع توربین برخلاف نوع محور افقی، معمولاً ژنراتور و جعبه‌دنده در قسمت پایینی برج (نزدیک زمین) نصب می‌شود.
- **پره‌های توربین:** پره‌های توربین واسطه تبدیل انرژی باد به انرژی مکانیکی بوده و از آنجا که تولید انرژی خروجی وابستگی نسبتاً زیادی به پره‌های توربین دارد،

شکل ۲- شماتیک جانبی هندسه روتور اچ-شکل (سمت راست) و وی-شکل (سمت چپ)

جدول ۱- مشخصات توربین اچ-شکل و وی-شکل		
V-type	H-type	مشخصه
ناکا ۰۰۱۵	ناکا ۰۰۱۵	نوع ایرفویل
۳ عدد	۳ عدد	تعداد پره
۰.۳ متر	۰.۳ متر	طول وتر پره
۶ متر	۶ متر	قطر روتور
۶ متر	۶ متر	طول پره
۴.۲۵ متر	۶ متر	ارتفاع روتور
۴۵	۰	زاویه دلتا
۵۰ دور بر دقیقه	۵۰ دور بر دقیقه	سرعت چرخش روتور

بین پره‌های دو نیمه به ترتیب V_{au} و V_{ad} بوده که متاثر از ضرایب القایی نیمه رو به باد و نیمه پشت به باد یعنی a_u و a_d است. این ضرایب که نشان دهنده میزان تاثیر پره بر جریان عبوری از روتور است، توسط روش سعی و خطا و با کمک روابط مومنتوم در دو صفحه مجزا از هم (برای دو نیمه روتور) بدست می‌آیند.

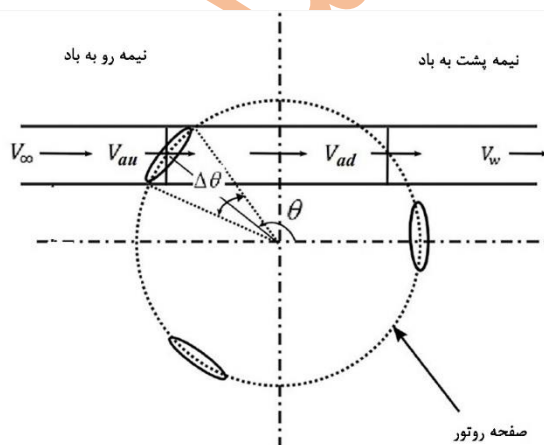
$$V_{\infty} > V_{au} > V_e > V_{ad} > V_w \quad (1)$$

$$V_{au} = a_u V_{\infty} \quad (2)$$

$$V_e = V_{\infty} (\gamma a_u - 1) \quad (3)$$

$$V_{ad} = a_d V_e \quad (4)$$

در روابط فوق، پارامترهای V_{au} و V_{ad} به ترتیب بیانگر سرعت جریان در دیسک محرک جلویی (Upwind actuator disc) و سرعت جریان در دیسک محرک عقبی (Downwind actuator disc) است. این پارامترها از متغیرهای پایه‌ای برای محاسبه سرعت نسبی و زاویه حمله است. ضرایب a_u و a_d نیز به ترتیب ضریب القایی محوری برای نیمه رو به باد (دیسک محرک جلویی) و نیمه پشت به باد (دیسک محرک عقبی) است.



^۳ Azimuth angle

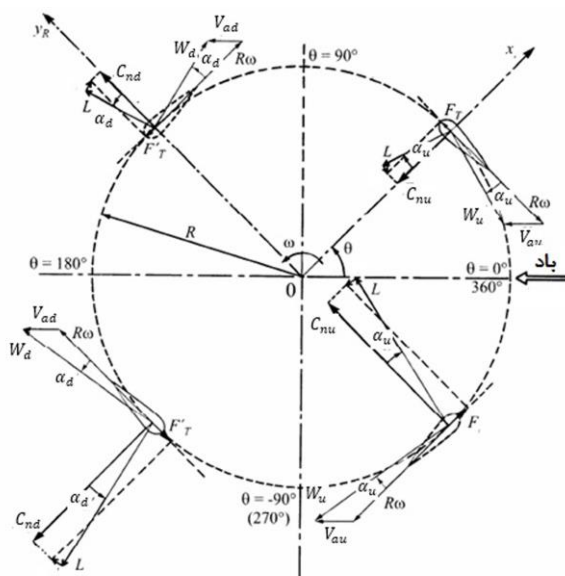
۳- معادلات و مدل‌سازی

تحلیل توربین مورد نظر در این تحقیق براساس روش دی ام اس تی^۱ و با کمک نرم افزار متلب^۲ انجام می‌شود. این روش بر اساس روش مومنتوم بوده و در این روش روتور توربین به دو قسمت رو به باد و پشت به باد تقسیم شده و برای هر بخش روابط مومنتوم جریان به صورت جداگانه اعمال می‌شود. همانطور که از شکل ۳ مشخص است، روتور توربین در امتداد مسیر جریان به بخش‌هایی تقسیم می‌شود که این موضوع با تقسیم‌بندی زاویه آزیموت^۳ ($\Delta\theta$) متناسب است. جریان آزاد (V_{∞}) با برخورد به پره‌های روتور در نیمه رو به باد مقداری از انرژی خود را از دست داده و به V_e تقلیل پیدا می‌کند؛ این متغیر، سرعت جریان را در میانه توربین (بین نیمه رو به باد و نیمه پشت به باد) نشان می‌دهد. به طور مشابه سرعت V_e نیز با عبور از پره‌های نیمه پشت به باد، با کاهش انرژی مواجه شده و در نهایت سرعت خروج جریان از روتور (V_w) به کمترین مقدار خود می‌رسد. این پارامتر همان سرعت جریان دنباله (Wake) است. در این میان، سرعت جریان در محل عبور از

^۱ DMST method

^۲ Matlab

شکل ۳- مسیر جریان در روش دی ام اس تی [۲۳]



شکل ۴- عکس العمل نیروها در صفحه روتور [۲۴]

با فرض دلخواه ضریب القایی اولیه (a) می توان سرعت جریان را در مقطع مورد نظر محاسبه کرده و با کمک آن سرعت جریان عمود بر پره و سرعت جریان مماس بر پره در راستای وتر و همچنین سرعت جریان مماس بر پره در راستای طول پره مشابه روابط ۵ و ۶ بدست می آید. از آنجا که در محاسبات آپرودینامیک برای دستیابی به نیروهای برآ و پسا مبنای محاسبات بر اساس سرعت نسبی جریان است، لذا توسط رابطه ۷، سرعت نسبی جریان در لحظه برخورد به پره بدست آمده و با کمک آن می توان زاویه حمله ظاهری را مشابه رابطه ۸ بدست آورد. شکل ۴ نیز نشان دهنده وضعیت قرار گیری پره در چهار لحظه متفاوت است. همانطور که مشاهده می شود سرعت نسبی جریان و زاویه حمله در هر لحظه دارای جهت و مقدار متفاوتی بوده و پس از بدست آمدن نیروهای برآ و پسا می توان با تغییر دستگاه مختصات، این نیروها را به نیروهای مماس و عمودی بر پره تبدیل کرد.

همچنین از آنجا که پره های توربین دارای طول محدودی هستند، لذا مقداری از جریان در نوک پره از سطح پر فشار پره به سطح کم فشار آن منحرف شده، که این عمل باعث می شود تا گردابه هایی تحت عنوان گردابه های نوک پره^۱ و به دنبال آن ایجاد جریان فرو وزش^۲ و تغییر زاویه سرعت نسبی جریان و نهایتاً باعث کاهش زاویه حمله موثر در این نواحی شود که نتیجه آن کاهش عملکرد آپرودینامیکی در قسمت نوک پره خواهد بود. بنابراین برای بهبود روش دی ام اس تی زاویه حمله موثر از اختلاف زاویه حمله ظاهری و زاویه حمله القایی ناشی از افت جریان از نوک پره بوده که از طریق روابط پرانتل بدست می آید [۲۵].

$$V_n = V_a \cos \theta \cos \delta \quad (5)$$

$$V_t = r\omega - V_a \sin \theta \quad (6)$$

$$W = \sqrt{(V_n)^2 + (V_t)^2} \quad (7)$$

$$\alpha = \sin^{-1}(V_n/W) \quad (8)$$

در گام بعد می توان ضرایب نیروی برآ و پسا و به دنبال آن با تغییر دستگاه مختصات، ضرایب نیروی عمودی و مماسی بر پره را مشابه روابط ۹ و ۱۰ بدست آورد. پس از بدست آمدن ضرایب نیرو می توان مقدار نیرو را در هر مقطع از پره طبق روابط ۱۱ و ۱۲ نیز محاسبه کرد. در این روابط δ زاویه مخروطی پره، ρ چگالی هوا، c وتر پره، Δh طول المان پره، W سرعت نسبی جریان در لحظه برخورد به پره، C_t و C_n به ترتیب ضرایب نیروی عمودی و مماسی بوده که متناسب با ضرایب برآ و پسای پره است.

$$C_n = C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha \quad (9)$$

$$C_t = C_L \sin \alpha - C_D \cos \alpha \quad (10)$$

$$F_N(\theta) = \left(\frac{1}{r}\right) C_n \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta h \cdot W^2 \quad (11)$$

^۲ Downwash

^۱ Tip Vortex

$$C_p = \lambda \cdot C_{\bar{Q}} \quad (18)$$

$$F_T(\theta) = \left(\frac{1}{r} C_t \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta h \cdot W^2 \right) \quad (12)$$

۴- اعتبارسنجی روش حل

به منظور اعتبارسنجی روش مورد استفاده از یک توربین اچ-شکل و با مشخصات هندسی مطابق با جدول ۲ استفاده شده و نتیجه حاصله از مقیاس ضریب توان با داده‌های تجربی بدست آمده از آزمایشگاه سندیا^۱ در شکل ۵ مورد مقایسه قرار گرفته است. در این شکل محور افقی نشان دهنده نسبت سرعت پره^۲ و محور قائم نشان دهنده ضریب توان توربین است. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که روش دی ام اس تی مورد استفاده در این تحقیق توانسته است تا ضریب توان توربین را در نقطه کاری خود (محدوده نسبت سرعت ۵) با مقدار خطای نسبی ۶ درصد تخمین بزند؛ همچنین منحنی خطای مطلق نیز در شکل نشان داده شده است. اختلاف بین تحلیل انجام شده و داده‌های تجربی را می‌توان ناشی از عواملی همچون دنباله جریان^۳، انبساط جریان^۴ و همچنین استال دینامیکی^۵ دانست.

نوع ایرفویل	ناکا ۰۰۱۵
تعداد پره	۲ عدد
وتر پره	۰.۱۵m
ارتفاع پره	۵.۱m
قطر روتور	۵m
سرعت چرخش	۱۶۲.۵rpm

با محاسبه ضرایب نیروی عمودی و مماسی و با کمک روابط ۱۳ و ۱۴ می‌توان مقدار ضریب القایی جدید را بدست آورد. میزان همگرایی مدل ۰.۰۰۰۱ در نظر گرفته شده است. با محاسبه ضریب القایی جدید مجدداً سرعت نسبی جریان، زاویه حمله و ضرایب نیروهای مماسی و عمودی بدست آمده و این حلقه تا زمانی که به همگرایی مناسب برسد، برای هر المان از پره و هر زاویه آزیموت و برای هر دو نیمه روتور به صورت جداگانه تکرار می‌شود.

$$f = \frac{Bc}{\lambda \pi r} \int_{-\pi/\gamma}^{\pi/\gamma} \left(C_n \frac{\cos \theta}{|\cos \theta|} - C_t \frac{\sin \theta}{|\cos \theta| \cos \delta} \right) \left(\frac{W}{V_a} \right)^2 d\theta \quad (13)$$

$$a_{new} = \pi / (f + \pi) \quad (14)$$

در گام بعد با کمک نیروی مماسی وارد بر پره، گشتاور مورد نظر ایجاد شده، و نهایتاً توان تولیدی توربین توسط روابط ۱۵ تا ۱۸ بدست می‌آید، که در این روابط Q گشتاور پره متناسب با هر زاویه آزیموت، \bar{Q} گشتاور میانگین روتور، $C_{\bar{Q}}$ ضریب گشتاور میانگین، λ نسبت سرعت پره، و A مساحت جاروب شده توسط روتور توربین است.

$$Q(\theta) = r \cdot F_T(\theta) \quad (15)$$

$$\bar{Q} = \frac{N}{2\pi} \int Q d\theta \quad (16)$$

$$C_{\bar{Q}} = \frac{\bar{Q}}{1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot R \cdot U_{\infty}^2} \quad (17)$$

^۴ stream tube expansion

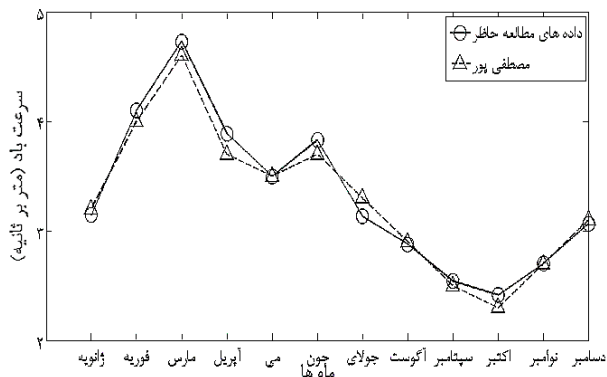
^۵ Dynamic stall

^۱ Sandia Lab

^۲ Tip speed ratio

^۳ wake

مطابق شکل ۷ نیز استنباط می‌شود که احتمال رخداد سرعت باد بین $3 m/s$ الی $4 m/s$ بیشترین احتمال و به ترتیب در حدود ۳۸ و ۲۱ درصد است.

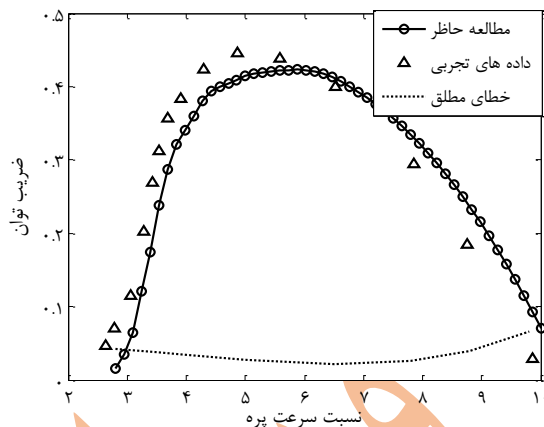


شکل ۶- اعتبارسنجی پروفیل سرعت باد با مرجع ۲۸

در ادامه با توجه به رابطه ۱۹ و ۲۰ می‌توان به ترتیب توان و چگالی انرژی باد در این شهر را تخمین زد. در این روابط V_n معرف سرعت باد در توزیع احتمال مورد نظر، و p احتمال رخداد این سرعت است. در رابطه ۲۰ پس از محاسبه توان باد، می‌توان با در نظر گرفتن یک سال معادل ۸۷۶۰ ساعت، بیشینه انرژی باد منطقه را محاسبه کرد. بنابراین با توجه به توزیع سرعت باد زاهدان و این روابط می‌توان توان و انرژی باد سالیانه این شهر را در حدود $98 W/m^2$ و $855 kWh/m^2$ تخمین زد.

$$P = \sum_{n=1}^{15} \frac{1}{4} \rho V_n^3 \cdot p \quad (19)$$

$$E = P \cdot 8760 \quad (20)$$



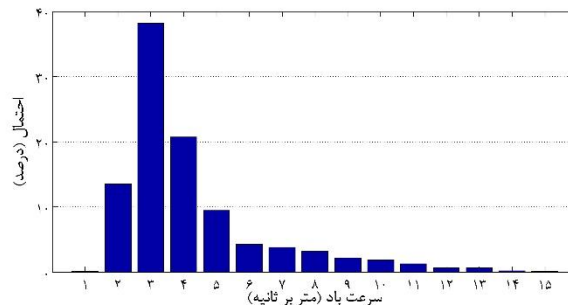
شکل ۵- اعتبارسنجی مدل دی ام اس تی با داده‌های تجربی

[۲۶]

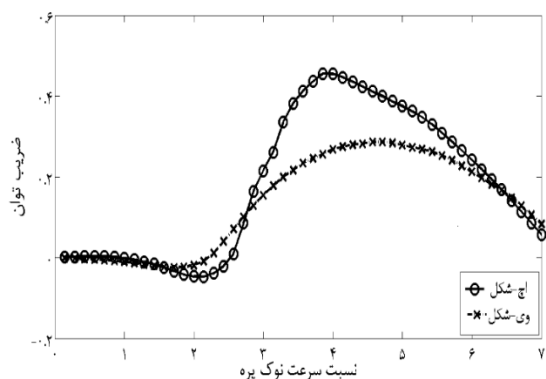
۵- پتانسیل انرژی باد در زاهدان

شهر زاهدان مرکز استان سیستان و بلوچستان در جنوب شرقی ایران و ارتفاع ۱۳۸۵ متری از سطح دریا واقع شده که دارای جمعیتی حدود ۶۰۰ هزار نفر در مساحتی به میزان ۷۸ کیلومتر مربع است. این شهر در ناحیه بادخیز واقع شده است که در طول سال در معرض بادهای قدرتمند فصلی در جهات مختلف قرار می‌گیرد که از معروف‌ترین آن‌ها می‌توان به بادهای ۱۲۰ روزه اشاره کرد. روش محاسبه سرعت باد برای هر ماه (به صورت مجزا) از میانگین‌گیری سرعت باد ماهانه در سه سال متوالی ۲۰۱۸ الی ۲۰۲۰ و در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین بدست آمده است. می‌توان پروفیل سرعت باد برای شهر زاهدان را مطابق روشی که ذکر شد، در شکل ۶ مشاهده کرد. همچنین منبع داده‌های مورد استفاده با اطلاعات مرجع ۲۷ مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. پروفیل سرعت این شهر مبنای ارزیابی توربین مورد نظر است. با توجه به نمودار این شکل، مشاهده می‌شود که سرعت میانگین در طول سال برابر $3.77 m/s$ بوده و بیشینه و کمینه سرعت متوسط باد به ترتیب در حدود $4.87 m/s$ و $2.9 m/s$ و در ماه‌های فوریه و اکتبر رخ می‌دهد. از طرفی با توزیع احتمال سرعت باد

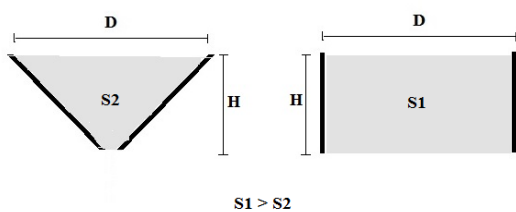
محور توربین، و همچنین کاهش مساحت موثر روتور توربین وی-شکل؛ از طرفی در محاسبه ضریب توان توربین، لازم است تا توان خروجی نسبت به توان باد عبوری از مساحت موثر آن سنجیده شود. منحنی ضریب توان نشان داده شده در شکل ۹ بیانگر کاهش ضریب توان به میزان ۳۷ درصد نسبت به حالت اچ-شکل است. کاهش مساحت موثر توربین وی-شکل را می‌توان در شکل ۱۰ مشاهده کرد. با توجه به پارامترهای ابعادی در نظر گرفته شده در بخش‌های قبل، مساحت موثر در توربین اچ-شکل و وی-شکل به ترتیب معادل ۳۶ متر مربع، و ۱۳ متر مربع است.



شکل ۷- احتمال رخداد سرعت‌های باد مختلف در طول سال (زاهدان)



شکل ۹- منحنی ضریب توان توربین

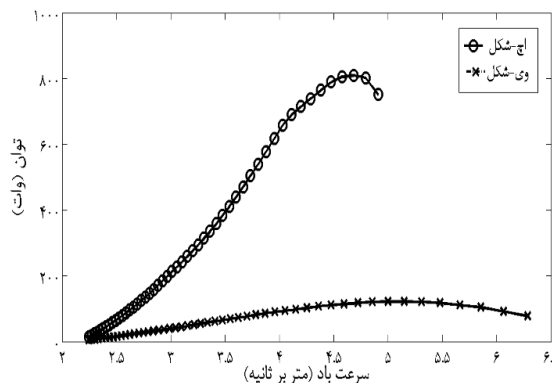


شکل ۱۰- مقایسه تصویر مساحت جاروب شده (مساحت موثر) توربین اچ-شکل و وی-شکل

با ارزیابی بیشتر منحنی‌های عملکردی توربین مشاهده می‌شود که توربین وی-شکل دارای منحنی صاف‌تری بوده و برای سرعت بادهای مختلف دارای تغییر توان کمتری است؛ به

۶- نتایج

با توجه به توزیع سرعت باد و احتمال رخداد آن در شهر زاهدان، مشاهده می‌شود که بیشترین پتانسیل انرژی باد در محدوده سرعت $3-4 \text{ m/s}$ رخ می‌دهد. با رسم منحنی توان توربین‌های مورد نظر، نمودارهای شکل ۸ حاصل می‌شود. مشاهده می‌شود که توربین‌های اچ-شکل و وی-شکل به ترتیب توانسته‌اند بیشینه توانی در حدود ۸۱۰ و ۱۲۰ وات در سرعت بادهای 4.6 m/s و 4.8 m/s حاصل کنند.



شکل ۸- منحنی توان توربین

آنچه که از شکل ۸ استنباط می‌شود، کاهش ۸۵ درصدی توان توربین وی-شکل نسبت به نوع اچ-شکل است. این موضوع ناشی از دو دلیل اصلی بوده که عبارت است از: کاهش گشتاور خروجی از توربین به دلیل نزدیکتر شدن المان‌های پره به

عبارت دیگر در این نوع توربین، توان خروجی حساسیت کمتری نسبت به تغییر سرعت باد دارد، در حالیکه این موضوع برای توربین اچ-شکل بیشتر است. از تفاوت دیگر این دو نوع توربین می‌توان به لحظه راه‌اندازی اشاره کرد. با توجه به منحنی ضریب توان، مشخص است که در لحظه راه‌اندازی، (TSR پایین) مقداری توان منفی ایجاد شده که به معنای وجود گشتاور منفی بوده و موجب عدم راه‌اندازی توربین خواهد شد. این توان منفی برای توربین وی-شکل کمتر از ۱۰ وات بوده، که نسبت به نوع اچ-شکل (حدود ۷۰ وات) کمتر است؛ این بدان معناست که با زاویه‌دار کردن پره‌ها (با زاویه ۴۵ درجه) مقدار توان منفی ۷ برابر کوچکتر می‌شود. همچنین انتظار می‌رود که با افزایش زاویه مخروطی (δ) از این گشتاور منفی کاسته شود. در توربین‌های اچ-شکل نیز به منظور کاهش این گشتاور نامطلوب در هنگام راه‌اندازی از روش‌هایی از جمله موتور راه‌انداز، پره‌های جی-شکل، ترکیب روتورهای داریوس و ساونیوس، و... استفاده می‌شود.

در نهایت خلاصه‌ای از عملکرد توربین در حالت اچ-شکل و وی-شکل در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به توزیع سرعت باد در شهر زاهدان، مقدار انرژی تولید شده سالیانه برای توربین اچ-شکل ۲۴۵۰ کیلو وات ساعت بوده، در حالیکه این مقدار برای نوع وی-شکل در حدود ۴۵۰ کیلووات ساعت است. این موضوع نشان می‌دهد که هر چند راه‌اندازی اولیه توربین اچ-شکل دشوارتر است، اما توان خروجی از آن بسیار بیشتر از نوع وی-شکل خواهد بود.

نوع توربین	بیشینه توان (W)	گشتاور منفی ($N.m$)	انرژی تولیدی سالیانه ($KW.h$)	بیشینه ضریب توان
اچ-شکل	۸۱۰	۱۳۵	۲۴۵۰	۰.۴۵
وی-شکل	۱۲۰	۱۵	۴۵۰	۰.۲۸

۷- تخمین هزینه تولید توان

به کمک ارزیابی اقتصادی می‌توان هزینه‌های تولید انرژی و میزان سرمایه‌گذاری لازم را تخمین زد. هدف از ارزیابی اقتصادی، مقایسه مالی طرح‌های مختلف و اطمینان از به صرفه بودن پروژه است. لازم است تا مدیران و سرمایه‌گذاران از هزینه‌های اولیه و جاری پروژه و همچنین از مزایا و معایب طرح اطلاع داشته باشند. روش مورد استفاده برای این منظور مطابق مرجع [۲۷] است؛ هزینه تولید توان توربین به دو قسمت هزینه اولیه و هزینه جاری، مانند هزینه‌های سرویس و تعمیر و نگهداری تقسیم می‌شود. در رابطه ۲۱، C_I بیان‌گر هزینه اولیه توربین، و C_{OM} هزینه‌های جاری پروژه بوده که به صورت ضریبی (m) از هزینه اولیه توربین تعریف می‌شود؛ این بدان معناست که هزینه جاری توربین متناسب با هزینه اولیه توربین است.

$$C_{OM} = mC_I \quad (21)$$

با در نظر گرفتن هزینه اولیه، می‌توان هزینه خالص تمام شده (NPV) را با در نظر گرفتن نرخ تورم I ، برای n سال به صورت رابطه ۲۲ بیان کرد. در نهایت، با توجه به تولید انرژی سالیانه (AEP) برای هر توربین، می‌توان میزان هزینه لازم برای تولید هر کیلو وات ساعت انرژی را با کمک رابطه ۲۳ نیز محاسبه کرد.

$$NPV = \frac{C_I}{n} \left[1 + m \left(\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right) \right] \quad (22)$$

$$C = \frac{NPV}{AEP} \quad (23)$$

همچنین فرض‌های زیر با توجه به مرجع [۲۸] در متغیرهای ذکر شده در روابط فوق دخیل است:

- هزینه اولیه توربین ۱۰۰۰ دلار به ازای هر کیلو وات در نظر گرفته شده است.

۸- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی آماری سرعت باد در سه سال اخیر (۲۰۱۸ الی ۲۰۲۰) در شهر زاهدان پرداخته شد. ارزیابی توزیع سرعت باد در این شهر نشان داد که زاهدان دارای سرعت میانگین سالیانه $3.77 m/s$ بوده و با توجه به احتمال رخداد سرعت‌های باد مختلف، پتانسیل بادی این شهر در حدود $98 W/m^2$ است. توربین‌های اچ-شکل و وی-شکل استفاده شده می‌توانند به ترتیب ۸۱۰ وات را در سرعت باد 4.6 متر بر ثانیه، و ۱۲۰ وات را در سرعت باد 4.8 متر بر ثانیه تولید کنند. از نظر بازدهی نیز توربین اچ-شکل به دلیل داشتن مساحت موثر بیشتر و تولید گشتاور بالاتر نسبت به نوع وی-شکل دارای ضریب توانی در حدود ۰.۴۵ بوده، و این در حالی است که ضریب توان توربین وی-شکل حدود ۰.۲۸ است.

در طرف مقابل هر چند از نظر تولید توان و بازدهی آیرودینامیکی، توربین اچ-شکل دارای اولویت است، اما از نظر راه‌اندازی اولیه توربین وی-شکل به دلیل گشتاور منفی کمتر در لحظه راه‌اندازی دارای ارجحیت بوده، که این موضوع خصوصا در توربین‌های کوچک و در مقیاس شهری که دارای تجهیزات کنترلی پیشرفته نیستند، نکته مهمی تلقی می‌شود. از نظر اقتصادی نیز هزینه‌های مربوط به توربین اچ-شکل به دلیل توان بالاتر و نیاز به تجهیزات بزرگتر و گران‌تر، به نسبت بیشتر از نوع وی-شکل است. هزینه خالص انرژی به طور متوسط برای نوع اچ-شکل ۶۶ دلار بوده که این مقدار تقریبا ۷ برابر نوع وی-شکل است.

لذا می‌توان مزایا و معایب استفاده از توربین اچ-شکل و وی-شکل در موارد زیر خلاصه کرد:

- توان و ضریب توان توربین اچ-شکل به ترتیب ۸۱۰ وات و ۰.۴۵ بوده، در حالیکه این مقادیر برای نوع وی-شکل ۱۲۰ وات و ۰.۲۸ است.

- هزینه‌های جاری از قبیل سرویس، تعمیر و نگهداری معادل ۴۰ درصد قیمت اولیه توربین در نظر گرفته شده است.
- هزینه‌های حمل و نقل، نصب و معادل ۶ درصد قیمت اولیه توربین در نظر گرفته شده است.
- نرخ تورم معادل ۳۵ درصد در نظر گرفته شده است
- عمر مفید توربین ۲۰ سال در نظر گرفته شده است.

بنابراین با در نظر گرفتن مقادیر فوق و استفاده از میزان تولید انرژی سالیانه (جدول ۳) و جایگذاری آن‌ها در روابط ۲۱ الی ۲۳، می‌توان تخمینی از هزینه تولید انرژی به واسطه توربین بادی محور عمودی برای نوع اچ-شکل و وی-شکل بدست آورد. این مقایسه در جدول ۴ نشان داده شده است. از آنجا که توان تولید شده توسط توربین اچ-شکل بیشتر است، لذا نیازمند ژنراتور بزرگتر و ادوات کنترلی گرانتری بوده و از همین رو هزینه اولیه آن بیشتر از نوع وی-شکل است. همین موضوع در هزینه جاری توربین نیز صادق بوده، و در نهایت می‌توان هزینه خالص تولید انرژی سالیانه (NPV) را برای توربین اچ-شکل حدود ۷۰ دلار، و برای توربین وی-شکل ۱۰ دلار تعیین کرد.

جدول ۴- مقایسه اقتصادی توربین‌های اچ-شکل و وی-شکل

	هزینه		
	هزینه تولید	هزینه جاری	هزینه اولیه
	انرژی (\$/KWh)	تمام شده سالیانه (\$)	(\$)
توربین اچ-شکل	۰.۰۲۷۱	۷۰	۱۱۳۴
توربین وی-شکل	۰.۰۲۱۹	۱۰	۲۲۰

Sustainable Energy Reviews, 15(1), ۴۴۹-۴۵۹.

- [۵] Mostafaeipour, A., Sedaghat, A., Dehghan-Niri, A. A., & Kalantar, V. (۲۰۱۱). Wind energy feasibility study for city of Shahrabak in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(۶), ۲۵۴۵-۲۵۵۶.
- [۶] Ghorashi, A. H., & Rahimi, A. (۲۰۱۱). Renewable and non-renewable energy status in Iran: Art of know-how and technology-gaps. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), ۷۲۹-۷۳۶.
- [۷] Alamdari, P., Nematollahi, O., & Mirhosseini, M. (۲۰۱۲). Assessment of wind energy in Iran: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), ۸۳۶-۸۶۰.
- [۸] Mostafaeipour, A. (۲۰۱۰). Feasibility study of harnessing wind energy for turbine installation in province of Yazd in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), ۹۳-۱۱۱.
- [۹] Mostafaeipour, A. (۲۰۱۳). Economic evaluation of small wind turbine utilization in Kerman, Iran. *Energy Conversion and Management*, 73, ۲۱۴-۲۲۵.
- [۱۰] Mousavi, S. M., Ghanbarabadi, M. B., & Moghadam, N. B. (۲۰۱۲). The competitiveness of wind power compared to existing methods of electricity generation in Iran. *Energy policy*, 42, ۶۵۱-۶۵۶.
- [۱۱] Keyhani, A., Ghasemi-Varnamkhasi, M., Khanali, M., & Abbaszadeh, R. (۲۰۱۰). An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran, Tehran. *Energy*, 35(1), ۱۸۸-۲۰۱.
- [۱۲] Mostafaeipour, A., & Abarghoeei, H. (۲۰۰۸). Harnessing wind energy at Manjil area located in north of Iran. *Renewable*

- توربین وی-شکل در هنگام راه اندازی اولیه دارای توان منفی در حدود ۱۰ وات بوده، که ۷ برابر از نوع اچ-شکل کمتر است. از این رو راه اندازی این نوع توربین سهولت بیشتری داشته و نیاز به ادوات خاصی ندارد.
- از نظر اقتصادی نیز هزینه خالص تولید انرژی در توربین اچ-شکل حدود ۷ برابر از توربین وی-شکل بیشتر است.

بنابراین با توجه به مزایا و معایب هر کدام از این توربین‌ها می‌توان این گونه نتیجه گرفت که توربین وی-شکل در مقیاس کوچک شهری به دلیل هزینه‌های پایین‌تر و راه‌اندازی آسان‌تر نسبت به نوع اچ-شکل دارای اولویت است. از طرفی توربین اچ-شکل به دلیل تولید توان بیشتر و بازدهی بالاتر می‌تواند برای نیروگاه‌ها و مزارع بادی مناسب باشند.

مراجع

- [۱] Eskin, N., Artar, H., & Tolun, S. (۲۰۰۸). Wind energy potential of Gökçeada Island in Turkey. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12(3), ۸۳۹-۸۵۱.
- [۲] Kumar, A., & Prasad, S. (۲۰۱۰). Examining wind quality and wind power prospects on Fiji Islands. *Renewable energy*, 35(2), ۵۳۶-۵۴۰.
- [۳] Chaparzadeh, Feseqandis R. (۱۹۹۹). Feasibility of applying wind turbine for achieving sustainable development. *Proceedings of ۲th national conference of energy*.
- [۴] Mirhosseini, M., Sharifi, F., & Sedaghat, A. (۲۰۱۱). Assessing the wind energy potential locations in province of Semnan in Iran. *Renewable and*

- energy utilization in Croatia. *Energy*, 24(3), 239-246.
- [22] Kumara, E. A. D., Hettiarachchi, N., & Jayathilake, R. (2017). Overview of the vertical axis wind turbines. *Int. J. Sci. Res. Innov. Technol*, 4, 56-67.
- [23] Mohammed, A. A., Ouakad, H. M., Sahin, A. Z., & Bahaidarah, H. M. (2019). Vertical axis wind turbine aerodynamics: summary and review of momentum models. *Journal of Energy Resources Technology*, 141(5), 050801.
- [24] Paraschivoiu, I. (2002). *Wind turbine design: with emphasis on Darrieus concept*. Presses inter Polytechnique.
- [25] Anderson Jr, J. D., & Anderson, J. D. (1998). *A history of aerodynamics: and its impact on flying machines* (No. 1). Cambridge university press.
- [26] Mohammed, A. A., Ouakad, H. M., Sahin, A. Z., & Bahaidarah, H. M. (2020). Parametric study and comparison of aerodynamics momentum-based models for straight-bladed vertical axis wind turbines. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45, 729-741.
- [27] Moghimi, M., & Motawej, H. (2020). Developed DMST model for performance analysis and parametric evaluation of Gorlov vertical axis wind turbines. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37, 100616.
- [28] Mostafaeipour, A., Jadidi, M., Mohammadi, K., & Sedaghat, A. (2014). An analysis of wind energy potential and economic evaluation in Zahedan, Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 641-650.
- and Sustainable Energy Reviews, 12(6), 1758-1766.
- [13] Akdağ, S. A., & Güler, Ö. (2010). Evaluation of wind energy investment interest and electricity generation cost analysis for Turkey. *Applied Energy*, 87(8), 2574-2580.
- [14] Ucar, A., & Balo, F. (2009). Evaluation of wind energy potential and electricity generation at six locations in Turkey. *Applied Energy*, 86(10), 1864-1872.
- [15] Fyrippis, I., Axaopoulos, P. J., & Panayiotou, G. (2010). Wind energy potential assessment in Naxos Island, Greece. *Applied Energy*, 87(2), 577-586.
- [16] Xydis, G., Koroneos, C., & Loizidou, M. (2009). Exergy analysis in a wind speed prognostic model as a wind farm sitting selection tool: a case study in Southern Greece. *Applied Energy*, 86(11), 2411-2420.
- [17] Weigt, H. (2009). Germany's wind energy: The potential for fossil capacity replacement and cost saving. *Applied Energy*, 86(10), 1857-1863.
- [18] Bekele, G., & Palm, B. (2009). Wind energy potential assessment at four typical locations in Ethiopia. *Applied Energy*, 86(3), 388-396.
- [19] Jowder, F. A. (2009). Wind power analysis and site matching of wind turbine generators in Kingdom of Bahrain. *Applied Energy*, 86(4), 538-545.
- [20] Elhadidy, M. A., & Shaahid, S. M. (1999). Feasibility of hybrid (wind+solar) power systems for Dhahran, Saudi Arabia. *Renewable Energy*, 16(1-4), 970-976.
- [21] Feretić, D., Tomšić, Ž., & Čavlina, N. (1999). Feasibility analysis of wind-