

ارزیابی اقتصادی و مقایسه عملکرد آبرودینامیکی توربین بادی H - شکل و V - شکل در شهر زاهدان

سام سهام (کارشناس ارشد)
سعید کریمیان علی آبادی* (دانشیار)
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی مکانیک شریف (بهار ۱۴۰۳)
دوره ۳۰، شماره ۱، صص ۱۱۱-۱۱۸، (پژوهشی)

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

واژگان کلیدی: ارزیابی اقتصادی، توربین بادمحور عمودی، عملکرد آبرودینامیکی.

۱. مقدمه

بیشتری تولید می‌کنند، اما نیازمند صرف هزینه بیشتر و اختصاص دادن منطقه‌ای تحت عنوان مزرعه توربین بادی هستند. به همین علت، 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 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، بنابراین برخی از نقاط آن تحت تأثیر جریان‌های 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 می‌باشند.^[۴۳] این قسمت‌ها شامل بخش اعظمی از جنوب شرقی ایران است که به‌طور کلی بادخیز تلقی می‌شود. اولین تجربه ایران در نصب توربین‌های بادی با هدف تولید برق به سال ۱۹۹۴ برمی‌گردد. در آن زمان،

مصرف سوخت‌های فسیلی باعث مشکلات زیست محیطی از جمله آلودگی جو، تولید گازهای گلخانه‌ای و آلودگی آب و خاک می‌شود.^[۱] ذخایر نفت و گاز با گذشت زمان کاهش می‌یابد، اما با گسترش صنایع و کارخانجات، نیاز به انرژی افزایش می‌یابد. از همین رو، بسیاری از کشورهای سعی دارند تا وابستگی خود را به سوخت‌های فسیلی کاهش دهند و انرژی مورد نیاز خود را به واسطه انرژی‌های تجدیدپذیر همچون انرژی باد و خورشید تأمین کنند. 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 رایگان و در دسترس بودن آن، یکی از روش‌های مناسب تأمین انرژی محسوب می‌شود. بهره‌مندی از انرژی باد نیازمند استفاده از توربین‌های بادی بوده تا بتوان به کمک این توربین‌ها انرژی باد را به انرژی مکانیکی و در نهایت به کمک ژنراتورها به انرژی الکتریکی تبدیل کرد. توربین‌ها به دو دسته محور افقی و محور عمودی تقسیم‌بندی می‌شوند که به‌طور معمول توربین‌های محور افقی نسبت به نوع محور عمودی توان

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۲۰۲۳/۰۳/۱۴۰، اصلاحیه ۲۰۲۳/۰۴/۱۴۰، پذیرش ۲۰۲۳/۰۵/۱۴۰.

استناد به این مقاله:

سهام، سام و کریمیان علی‌آبادی، سعید، ۱۴۰۳. ارزیابی اقتصادی و مقایسه عملکرد آبرودینامیکی توربین بادی H - شکل و V - شکل در شهر زاهدان. مهندسی مکانیک شریف،

۱۴۰(۱)، صص ۱۱۱-۱۱۸. DOI:10.24200/J40.2023.62309.1680

دو مزرعه توربین بادی با توان ۵۰۰ کیلووات در منجیل و رودبار، واقع در استان گیلان احداث گردید که انرژی سالیانه آن به بیش از ۱/۸ میلیون کیلووات ساعت رسید.^[۴] دومین تجربه در سال ۱۹۹۹ و با احداث ۲۷ توربین بادی در منجیل و رودبار صورت پذیرفت که ۲۱ توربین مربوط به منجیل بوده که شامل ۱۵ توربین ۳۰۰ کیلوواتی، ۵ توربین ۵۵۰ کیلوواتی و یک توربین ۵۰۰ کیلوواتی است.^[۵] از دیگر نقاط ایران که از توربین‌های بادی بهره می‌برند، می‌توان به بینالود در خراسان و لوتاک در سیستان و بلوچستان اشاره کرد.

قریشی و رحیمی به بررسی جزئیات انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر و همچنین به اتلاف انرژی در برخی از صنایع پرداختند و پیشنهاداتی برای بهبود این مشکل ارائه دادند.^[۶] علمدروی و همکاران 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 سرعت میانگین باد، تابع توزیع سرعت باد و میانگین تراکم باد را توسط ۶۸ مرکز اطلاعاتی آب و هوایی ایران تخمین زدند.^[۷] مصطفی پورامکان سنجی بهره‌برداری از انرژی باد در منطقه یزد ایران را بررسی کرد. او سرعت باد را به صورت ماهانه و سالیانه در ارتفاع‌های مختلف در 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 (به‌خصوص توربین‌های بزرگ) نامناسب است.^[۸] وی 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 به نسبت بهتری برای نصب توربین‌های بادی کوچک است.^[۹] موسوی و همکاران به مقایسه روش‌های موجود برای تولید برق با توربین بادی در ایران پرداختند و بیان کردند که نیروگاه‌های متکی به انرژی باد می‌توانند یکی از نیروگاه‌های رقابتی در صنعت بوده و از طرفی بیان کردند که موضوع یارانه‌ها می‌تواند در آینده بر توسعه صنعت بادی ایران تأثیرگذار 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] 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] یونان،^[۱۴] آلمان،^[۱۵] ایتالیایی،^[۱۶] بحرین،^[۱۷] عربستان^[۱۸] و پاکستان^[۱۹] اشاره کرد. بنابراین، با توجه به آمارهای ذکر شده، واضح است که به‌طور 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 آبرودینامیکی دو نوع توربین محور عمودی H - شکل و V - شکل متناسب با شرایط جوی و سرعت‌های 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 انتخاب شده و برای هر دو نوع توربین از نسبت منظر یکسان استفاده شده است؛ تنها پارامتری که موجب

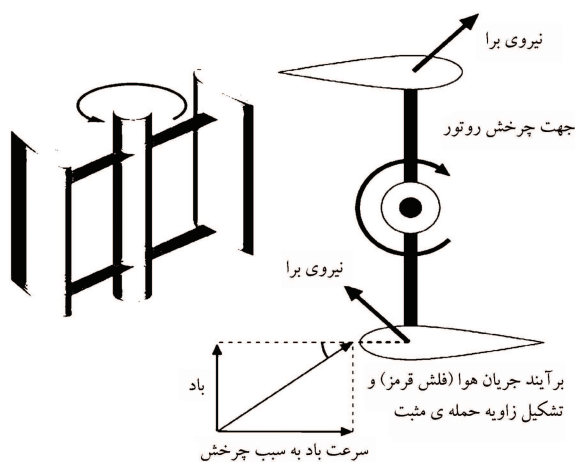
ایجاد تفاوت میان دو توربین می‌شود، استفاده از پره‌های زاویه‌دار در نوع V - شکل است. در نهایت، پس از بررسی عملکردی و فنی توربین‌ها، هزینه‌های اجرای طرح و تخمینی از ارزیابی اقتصادی مربوط به هر یک از آنها ارائه شده است.

۲. معرفی اجزاء و عملکرد توربین محور عمودی

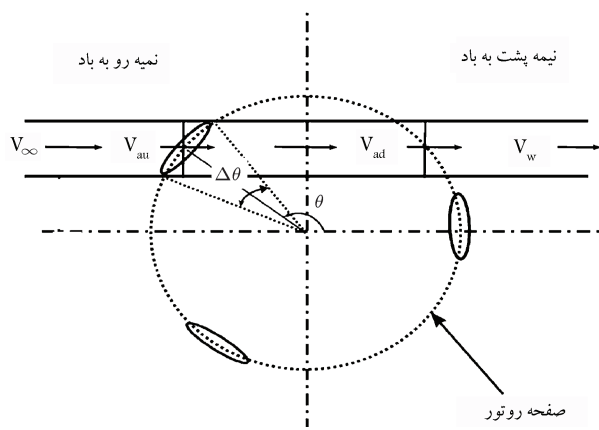
همانطور که در بخش پیشین بیان شد، توربین‌های بادی انرژی جنبشی باد را به کمک پره‌ها دریافت کرده و با دوران روتور این انرژی را به انرژی مکانیکی تبدیل کرده و به شفت نگه‌دارنده پره‌ها منتقل می‌کنند. انتهای دیگر این شفت در جعبه دنده قرار دارد و در آن سرعت دوران شفت افزایش یافته و در نهایت وارد ژنراتور می‌شود. این توضیح کوتاه، اساس کار توربین‌های بادی است. اما نحوه دریافت انرژی باد توسط پره‌ها بنا به نوع توربین متفاوت است. برخی از توربین‌ها مانند نوع ساوینوس براساس نیروی پسا و برخی براساس نیروی برآ عمل می‌کنند. اما در توربین‌های داریوس (مشابه توربینی که در این تحقیق استفاده شده است) از نیروی برآ بهره‌گرفته شده است 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 میان سطوح پرفشار و کم‌فشار پره است، به‌طور معمول چندین برابر نیروی پسا بوده و باعث ایجاد گشتاور حول محور توربین و به حرکت درآمدن پره توربین می‌شود.

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

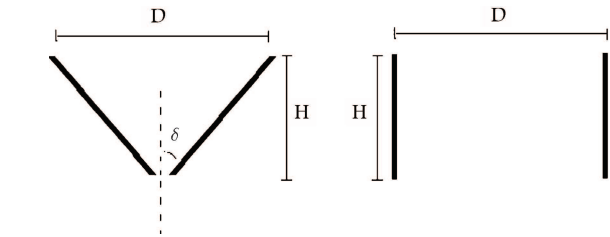
- **برج توربین:** برج یا پایه توربین، قسمت ثابت توربین باد بوده و وظیفه تحمل وزن استاتیکی توربین و همچنین بار دینامیکی وارد بر آن را بر عهده دارد. در این نوع توربین، برخلاف نوع محور افقی، به‌طور معمول ژنراتور و جعبه‌دنده در قسمت پایینی برج (نزدیک زمین) نصب می‌شود؛
- **پره‌های توربین:** پره‌های توربین واسط تبدیل انرژی باد به انرژی مکانیکی بوده و از آنجا که تولید انرژی خروجی وابستگی به‌نسبت زیادی به پره‌های توربین دارد، بنابراین از نظر آبرودینامیکی جزو قسمت‌های اصلی و مهم به‌شمار 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



شکل ۱. نحوه عملکرد توربین بادی محور عمودی داریوس (براساس نیروی برآ).^[۲۲]



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



شکل ۲. شماتیک جانبی هندسه روتور H - شکل (سمت راست) و V - شکل (سمت چپ).

جدول ۱. مشخصات توربین H - شکل و V - شکل.

مشخصه	H - type	V - type
نوع ایرفویل	ناکا ۰۰۱۵	ناکا ۰۰۱۵
تعداد پره	۳ عدد	۳ عدد
طول وتر پره	۳/۰ متر	۳/۰ متر
قطر روتور	۶ متر	۶ متر
طول پره	۶ متر	۶ متر
ارتفاع روتور	۶ متر	۴/۲۵ متر
زاویه دلتا	۰	۴۵
سرعت چرخش روتور	۵۰ دور بر دقیقه	۵۰ دور بر دقیقه

نیمه رو به باد و نیمه پشت به باد) نشان می‌دهد. به‌طور 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 میان پره‌های دو نیمه به ترتیب $V_{ad}V_{au}$ بوده که متأثر از ضرایب القایی (نیمه رو به باد و نیمه پشت به باد) یعنی a_d و a_u است. این ضرایب که نشان‌دهنده میزان تأثیر 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) به‌دست می‌آیند.

$$V_{\infty} > V_{au} > V_e > V_{ad} > V_w \quad (۱)$$

$$V_{au} = a_u V_{\infty} \quad (۲)$$

$$V_e = V_{\infty} (2a_u - 1) \quad (۳)$$

$$V_{ad} = a_d V_e \quad (۴)$$

در روابط فوق، پارامترهای V_{ad} و V_{au} 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_d و a_u نیز به ترتیب ضرایب القایی محوری برای نیمه رو به باد دیسک محرک جلویی (Upwind actuator disc) و نیمه پشت به باد دیسک محرک عقبی (Downwind actuator disc) است. با فرض دلخواه ضرایب القایی اولیه (a)، می‌توان سرعت جریان را در مقطع مورد نظر محاسبه کرده و با کمک آن سرعت جریان عمود بر پره، سرعت جریان مماس بر پره در راستای وتر و همچنین سرعت جریان مماس بر پره در راستای طول پره را مشابه روابط ۵ و ۶ به دست آورد. از آنجا که در محاسبات آیرودینامیک برای دستیابی به نیروهای برآ و پسا، مبنای محاسبات براساس سرعت نسبی جریان است، بنابراین توسط رابطه ۷، سرعت نسبی جریان در لحظه برخورد به پره به‌دست آمده و با کمک آن می‌توان زاویه حمله ظاهری را مشابه رابطه ۸ به دست آورد. شکل ۴ نیز نشان‌دهنده وضعیت قرارگیری پره در چهار لحظه متفاوت است. همانطور که مشاهده می‌شود، سرعت نسبی جریان و زاویه حمله در هر لحظه دارای جهت و مقدار متفاوتی بوده و پس از به‌دست آمدن نیروهای برآ و پسا می‌توان با تغییر دستگاه مختصات، این نیروها را به نیروهای مماس و عمودی بر پره تبدیل کرد.

همچنین، از آنجا که پره‌های توربین دارای طول محدودی هستند، بنابراین مقداری از جریان در نوک پره از سطح پرفشار پره به سطح کم‌فشار آن منحرف شده است که

جعبه‌دنده شده که موجب انتقال سرعت به نسبت پایین روتور به سرعت مناسب برای ژنراتور می‌شود. در نهایت، محور خروجی از جعبه‌دنده با ژنراتور در ارتباط بوده و توسط ژنراتور انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود.

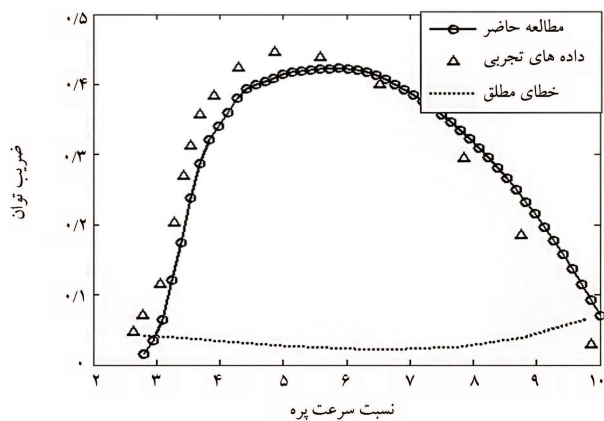
همانطور که گفته شد، در این تحقیق از دو نوع توربین استفاده شده است؛ نوع اول استفاده از پره‌های مستقیم (H - شکل) و نوع دوم روتور با پره‌های زاویه‌دار است که به آن توربین V - شکل می‌گویند. شماتیک توربین‌ها در شکل ۲ و مشخصات ابعادی آنها در جدول ۱ نشان داده شده است. برای مقایسه دو توربین با شرایط هندسی مشابه، از نسبت طول پره به قطر روتور یکسان (نسبت منطری یکسان) استفاده شده است. برای این منظور، در حالت H - شکل، قطر روتور ۶ متر در نظر گرفته شده است و براساس این قطر، ارتفاع روتور در توربین V - شکل معادل ۴/۲۵ متر خواهد بود. در شماتیک شکل ۲ نیز مشخص است که با ثابت نگه‌داشتن قطر روتور H - شکل از قسمت بالایی آن و نزدیک کردن قسمت پایینی روتور به یکدیگر، می‌توان هندسه روتور V - 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.

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 براساس 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 ($\Delta\theta$)^۳ 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 (میان

جدول ۲. مشخصات اولیه توربین مینا.

نوع ایرفول	ناکا ۱۵ °
تعداد پره	۲ عدد
وتر پره	۱۵m / °
ارتفاع پره	۵/۱m
قطر روتور	۵m
سرعت چرخش	۱۶۲/۵rpm



شکل ۵. اعتبارسنجی مدل دی ام اس تی با داده‌های تجربی. [۲۶]

نیمه روتور به صورت جداگانه تکرار می‌شود.

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

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

در گام بعد، با کمک نیروی مماسی وارد بر پره، گشتاور مورد نظر ایجاد شده و در نهایت توان تولیدی توربین توسط روابط ۱۵ تا ۱۸ به دست 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.

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

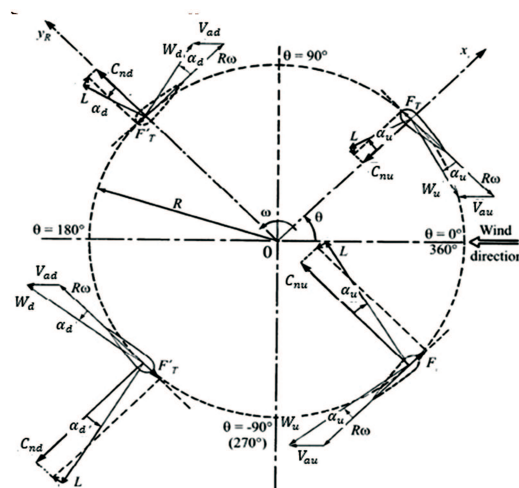
$$\bar{Q} = \frac{N}{2\pi} \int Q d\theta \quad (16)$$

$$C_{\bar{Q}} = \frac{\bar{Q}}{\sqrt{2} \cdot \rho \cdot A \cdot R \cdot V_a^2} \quad (17)$$

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

۴. اعتبارسنجی روش حل

به منظور اعتبارسنجی روش مورد استفاده، از یک توربین H - شکل و با مشخصات هندسی مطابق با جدول ۲ استفاده شده است و نتیجه حاصل شده از مقیاس ضریب توان با داده‌های تجربی به دست آمده از آزمایشگاه سنديا^۶ در شکل ۵ مورد مقایسه قرار گرفته است. در این شکل، محور افقی نشان‌دهنده نسبت سرعت



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

این عمل باعث می‌شود تا گردابه‌هایی تحت عنوان گردابه‌های نوک پره^۴ و به دنبال آن جریان فرو وزش^۵ و تغییر زاویه سرعت نسبی جریان و در نهایت کاهش زاویه حمله موثر در این نواحی ایجاد شود که نتیجه آن، کاهش عملکرد آبرودینامیکی 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 است که از طریق روابط پرانتل به دست می‌آید. [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 می‌توان ضرایب نیروی برآ و پسا و به دنبال آن با تغییر دستگاه مختصات، ضرایب نیروی عمودی و مماسی بر پره را مشابه روابط ۱۳ و ۱۴ به دست آورد. پس از به دست آمدن ضرایب نیرو، می‌توان مقدار نیرو را در هر مقطع از پره طبق روابط ۱۱ و ۱۲ 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 و C_n و C_t به ترتیب ضرایب نیروی عمودی و مماسی بوده که متناسب با ضرایب برآ و پسای پره است.

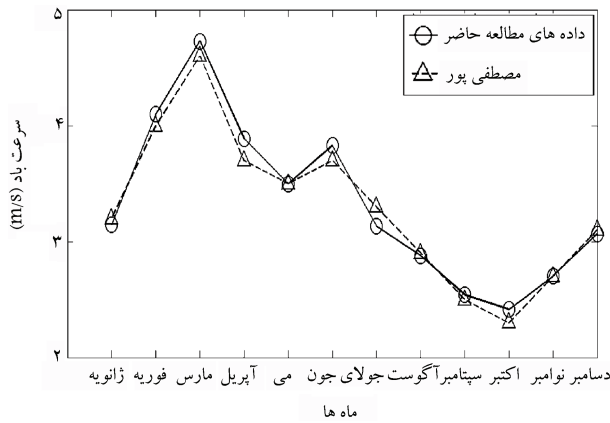
$$C_n = C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha \quad (9)$$

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

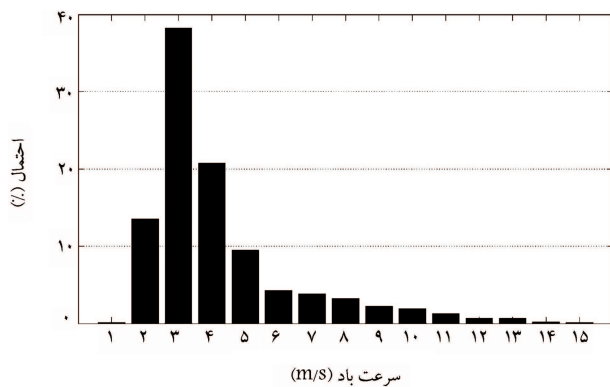
$$F_N(\theta) = \left(\frac{1}{2} C_n \rho c \Delta h W^2 \right) \quad (11)$$

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

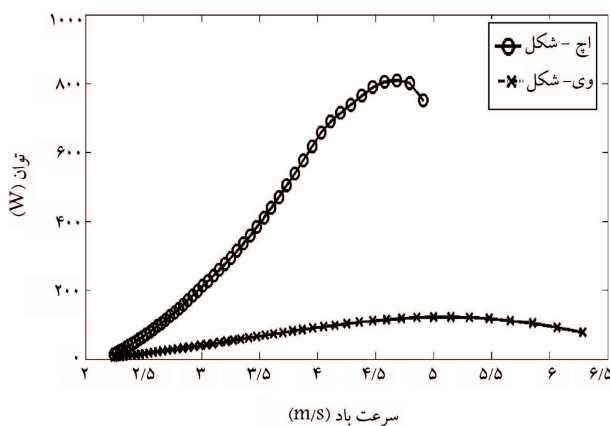
با محاسبه ضرایب نیروی عمودی و مماسی و با کمک روابط ۱۳ و ۱۴ می‌توان مقدار ضریب القایی جدید را به دست آورد. میزان همگرایی مدل ۱/۰۰۰۰۰° در نظر گرفته شده است. با محاسبه ضریب القایی جدید، سرعت نسبی جریان، زاویه حمله و ضرایب نیروهای مماسی و عمودی مجدداً محاسبه می‌شوند و این حلقه تا زمانی که به همگرایی مناسب برسد، برای هر المان از پره، هر زاویه آزیموت و برای هر دو



شکل ۵. اعتبارسنجی پروفیل سرعت باد با مرجع [۲۸]



شکل ۶. احتمال رخداد سرعت‌های باد مختلف در طول سال (زاهدان).



شکل ۷. منحنی توان توربین.

توانی در حدود ۸۱° و ۱۲° وات در سرعت بادهای ۴/۶ و ۴/۸ متر بر ثانیه حاصل کنند.

آنچه که از شکل ۸ استنباط می‌شود، کاهش ۸۵ درصدی توان توربین V - شکل نسبت به نوع H - شکل است. این موضوع ناشی از دو دلیل اصلی می‌باشد که عبارتند از: کاهش گشتاور خروجی از توربین به دلیل نزدیک‌تر شدن المان‌های پره به محور توربین و همچنین کاهش مساحت موثر روتور توربین V - شکل. از سوی دیگر، 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 H - شکل

پره ۷ و محور قائم نشان دهنده ضریب توان توربین است. 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 شش درصد تخمین بزند. همچنین، منحنی خطای مطلق نیز در شکل نشان داده شده است. اختلاف میان تحلیل انجام شده و داده‌های تجربی را می‌توان ناشی از عواملی همچون دنباله جریان^۸، انبساط جریان^۹ و استال دینامیکی^{۱۰} دانست.

۵. پتانسیل انرژی باد در زاهدان

شهر زاهدان در مرکز استان سیستان و بلوچستان، در جنوب شرقی ایران و ارتفاع ۱۳۸۵ متری از سطح دریا واقع شده است که دارای جمعیتی حدود ۶۰۰ هزار نفر و مساحتی به میزان ۷۸ کیلومتر مربع است. این شهر در ناحیه بادخیز قرار گرفته است که در طول سال در معرض بادهای قدرتمند فصلی در جهات مختلف قرار می‌گیرد. از معروف‌ترین آن‌ها می‌توان به بادهای ۱۲° روزه اشاره کرد. روش محاسبه سرعت باد برای هر ماه (به صورت جداگانه) از میانگین‌گیری سرعت باد ماهانه در سه سال متوالی ۲۰۱۸ الی ۲۰۲۰ و در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین به دست 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 $3/77 \text{ m/s}$ می‌باشد و بیشینه و کمینه سرعت متوسط باد به ترتیب در حدود $4/87 \text{ m/s}$ و $2/9 \text{ m/s}$ بر ثانیه است و در ماه‌های فوریه و اکتبر رخ می‌دهد. مطابق شکل ۷، با توزیع احتمال سرعت باد استنباط می‌شود که احتمال رخداد سرعت باد در بازه ۳ الی ۴ متر بر ثانیه به ترتیب در حدود ۳۸ و ۲۱ درصد است که از بیشترین احتمال برخوردار است.

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 و انرژی باد سالیانه این شهر را در حدود 98 W/m^2 و 855 kWh/m^2 تخمین زد.

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

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

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 ۳ الی ۴ متر بر ثانیه رخ می‌دهد. با رسم منحنی توان توربین‌های مورد نظر، نمودارهای شکل ۸ حاصل می‌شود. مشاهده می‌شود که توربین‌های H - شکل و V - شکل به ترتیب توانسته‌اند بیشینه

جدول ۳. ارزیابی عملکرد توربین H - شکل و V - شکل.

نوع توربین	بیشینه توان (W)	گشتاور منفی (N.m)	انرژی تولیدی سالانه (KWh)	بیشینه ضریب توان
H - شکل	۸۱۰	۱۳۵	۲۴۵۰	۰/۴۵
V - 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 به‌صرفه 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 و 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 کیلووات ساعت انرژی را به کمک رابطه ۲۳ نیز محاسبه کرد.

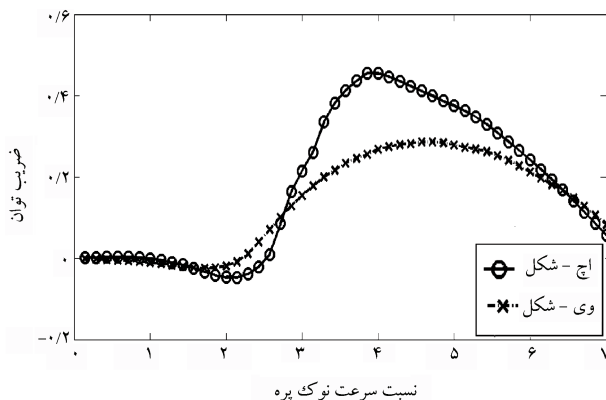
$$NPV = \frac{C_I}{n} \left[1 + m \left(\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right) \right] \quad (22)$$

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

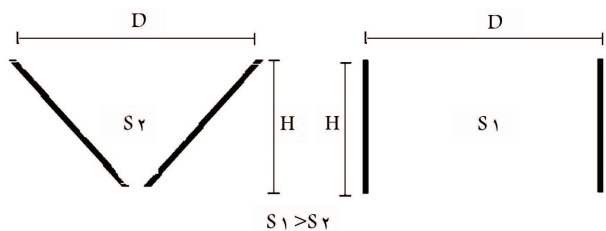
همچنین، فرض‌های زیر با توجه به مرجع [۲۸] در متغیرهای ذکر شده در روابط فوق دخیل است:

- هزینه اولیه توربین ۱۰۰۰ دلار به ازای هر کیلووات در نظر گرفته شده 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 شش 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 H - شکل و V - شکل به دست آورد. این مقایسه در جدول ۴ نشان داده شده است. از آنجا که توان تولید شده توسط توربین H - شکل بیشتر است، بنابراین نیازمند ژنراتور بزرگ‌تر و ادوات کنترلی گران‌تری بوده و از همین رو، هزینه اولیه آن بیشتر از نوع وی-شکل است. همین موضوع در



شکل ۹. منحنی ضریب توان توربین.



شکل ۱۰. مقایسه تصویر مساحت جاروب شده (مساحت موثر) توربین H - شکل و V - شکل.

است. کاهش مساحت موثر توربین V - شکل را می‌توان در شکل ۱۰ مشاهده کرد. با توجه به پارامترهای ابعادی در نظر گرفته شده در بخش‌های قبل، مساحت موثر در توربین H - شکل و V - شکل به ترتیب معادل ۳۶ متر مربع و ۱۳ متر مربع است.

با ارزیابی بیشتر منحنی‌های عملکردی توربین، مشاهده می‌شود که توربین V - شکل دارای منحنی صاف‌تری بوده و برای سرعت بادهای مختلف دارای تغییر توان کمتری است؛ به عبارت دیگر، در این نوع توربین، توان خروجی حساسیت کمتری نسبت به تغییر سرعت باد دارد، درحالی‌که این موضوع برای توربین H - 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 V - شکل کمتر از ۱۰ وات می‌باشد که نسبت به نوع H - شکل (حدود ۷۰ وات) کمتر است؛ این بدان معناست که با زاویه‌دار کردن پره‌ها (با زاویه ۴۵ درجه) مقدار توان منفی هفت برابر کوچکتر می‌شود. همچنین، انتظار می‌رود که با افزایش زاویه مخروطی (δ)، از این گشتاور منفی کاسته شود. در توربین‌های H - شکل نیز به منظور کاهش این گشتاور نامطلوب در هنگام راه‌اندازی از روش‌هایی از جمله موتور راه‌انداز، پره‌های جی - شکل، ترکیب روتورهای داریوس و ساونیس و ... استفاده می‌شود.

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

جدول ۴. مقایسه اقتصادی توربین‌های H - شکل و V - شکل.

هزینه			
اولیه (\$)	جاری (\$)	خالص تمام شده سالیانه (\$)	تولید انرژی (\$/KWh)
۱۱۳۴	۶۸	۷۰	۰/۰۲۷۱
۲۲۰	۱۰	۱۰	۰/۰۲۱۹

اگرچه توربین H - شکل از نظر تولید توان و بازدهی آبرودینامیکی دارای اولویت است، اما توربین V - شکل به دلیل گشتاور منفی کمتر در لحظه راه‌اندازی دارای ارجحیت می‌باشد که این موضوع به‌خصوص 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 H - شکل به دلیل توان بالاتر و نیاز به تجهیزات بزرگتر و گران‌تر، بیشتر از نوع V - شکل است. هزینه خالص انرژی به طور متوسط برای نوع H - شکل ۶۶ دلار بوده که این مقدار تقریباً هفت برابر نوع V - شکل است.

بنابراین، می‌توان مزایا و معایب استفاده از توربین H - شکل و V - شکل را در موارد زیر خلاصه کرد:

- توان و ضریب توان توربین H - شکل به ترتیب 81° وات و $0/45$ می‌باشد، درحالی‌که این مقادیر برای نوع V - شکل 12° وات و $0/28$ است؛
 - توربین V - شکل در هنگام راه‌اندازی اولیه دارای توان منفی در حدود 1° وات می‌باشد که هفت برابر از نوع H - شکل کمتر است. از این رو، راه‌اندازی این نوع توربین سهولت بیشتری داشته و نیاز به ادوات خاصی ندارد؛
 - از نظر اقتصادی نیز هزینه خالص تولید انرژی در توربین H - شکل حدود هفت برابر از توربین وی-شکل بیشتر است.
- بنابراین، با توجه به مزایا و معایب هر کدام از این توربین‌ها می‌توان به این نتیجه رسید که توربین وی-شکل در مقیاس کوچک شهری به دلیل هزینه‌های پایین‌تر و راه‌اندازی آسان‌تر نسبت به نوع H - شکل دارای اولویت است. از طرفی، توربین H - شکل به دلیل تولید توان بیشتر و بازدهی بالاتر می‌تواند برای نیروگاه‌ها و مزارع بادی مناسب باشد.

۸. نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی آماری سرعت باد در سه سال اخیر (2018 الی 2020) 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 $98 W/m^2$ وات بر متر مربع است. توربین‌های H - شکل و V - شکل استفاده شده می‌توانند به ترتیب 81° وات را در سرعت باد $4/6$ متر بر ثانیه و 12° وات را در سرعت باد $4/8$ متر بر ثانیه تولید کنند. از نظر بازدهی نیز توربین H - شکل به دلیل داشتن مساحت مؤثر بیشتر و تولید گشتاور بالاتر نسبت به نوع V - شکل، دارای ضریب توانی در حدود $0/45$ بوده و این در حالی است که ضریب توان توربین وی-شکل حدود $0/28$ است.

پانویس‌ها

1. DMST Method
2. MATLAB
3. Azimuth Angle
4. Tip Vortex
5. Downwash
6. Sandia Lab
7. Tip Speed Ratio
8. Wake
9. Stream Tube Expansion
10. Dynamic Stall

منابع (References)

1. Eskin, N., Artar, H. and Tolun, S., 2008. Wind energy potential of Gökçeada Island in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(3), pp.839-851. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.016>.
2. Kumar, A. and Prasad, S., 2010. Examining wind quality and wind power prospects on Fiji

- Islands. *Renewable Energy*, 35(2), pp.536-540. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.021>.
3. Chaparzadeh, Feseqandis, R., 1999. Feasibility of applying wind turbine for achieving sustainable development. *Proceedings of 2th National Conference of Energy*.
4. Mirhosseini, M., Sharifi, F. and Sedaghat, A., 2011. Assessing the wind energy potential locations in province of Semnan in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), pp.449-459. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.029>.
5. Mostafaeipour, A., Sedaghat, A., Dehghan-Niri, A.A. and Kalantar, V., 2011. Wind energy feasibility study for city of Shahrbabak in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), pp.2545-2556. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.030>.
6. Ghorashi, A.H. and Rahimi, A., 2011. Renewable and non-renewable energy status in Iran: Art of know-how and technology-gaps. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), pp.729-736. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.037>.
7. Alamdari, P., Nematollahi, O. and Mirhosseini, M., 2012. Assessment of wind energy in Iran: A review. *Renew-*

- able and Sustainable Energy Reviews, 16(1), pp.836-860. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.007>.
8. Mostafaeipour, A., 2010. Feasibility study of harnessing wind energy for turbine installation in province of Yazd in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), pp.93-111. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.05.009>.
 9. Mostafaeipour, A., 2013. Economic evaluation of small wind turbine utilization in Kerman, Iran. *Energy Conversion and Management*, 73, pp.214-225. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.04.018>.
 10. Mousavi, S.M., Ghanbarabadi, M.B. and Moghadam, N.B., 2012. The competitiveness of wind power compared to existing methods of electricity generation in Iran. *Energy Policy*, 42, pp.651-656. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.12.038>.
 11. Keyhani, A., Ghasemi-Varnamkhasi, M., Khanali, M. and Abbaszadeh, R., 2010. An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran, Tehran. *Energy*, 35(1), pp.188-201. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.09.009>.
 12. Mostafaeipour, A. and Abarghoeei, H., 2008. Harnessing wind energy at Manjil area located in north of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(6), pp.1758-1766. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.01.029>.
 13. Akdağ, S.A. and Güler, Ö., 2010. Evaluation of wind energy investment interest and electricity generation cost analysis for Turkey. *Applied Energy*, 87(8), pp.2574-2580. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.03.015>.
 14. Ucar, A. and Balo, F., 2009. Evaluation of wind energy potential and electricity generation at six locations in Turkey. *Applied Energy*, 86(10), pp.1864-1872. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.12.016>.
 15. Fyrippis, I., Axaopoulos, P.J. and Panayiotou, G., 2010. Wind energy potential assessment in Naxos Island, Greece. *Applied Energy*, 87(2), pp.577-586. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.05.031>.
 16. Xydis, G., Koroneos, C. and 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), pp.2411-2420. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.03.017>.
 17. Weigt, H., 2009. Germany's wind energy: The potential for fossil capacity replacement and cost saving. *Applied Energy*, 86(10), pp.1857-1863. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.11.031>.
 18. Bekele, G. and Palm, B., 2009. Wind energy potential assessment at four typical locations in Ethiopia. *Applied Energy*, 86(3), pp.388-396. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.05.012>.
 19. Jowder, F.A., 2009. Wind power analysis and site matching of wind turbine generators in Kingdom of Bahrain. *Applied Energy*, 86(4), pp.538-545. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.08.006>.
 20. Elhadidy, M.A. and Shaahid, S.M., 1999. Feasibility of hybrid (wind+ solar) power systems for Dhahran, Saudi Arabia. *Renewable Energy*, 16(1-4), pp.970-976. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00344-9](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00344-9).
 21. Kumara, E.D., Hettiarachchi, N. and Jayathilake, R., 2017. Overview of the vertical axis wind turbines. *Int. J. Sci. Res. Innov. Technol*, 4, pp.56-67. doi:10.1016/j.egypro.2015.03.259.
 22. Mohammed, A.A., Ouakad, H.M., Sahin, A.Z. and Bahaidarah, H.M., 2019. Vertical axis wind turbine aerodynamics: Summary and review of momentum models. *Journal of Energy Resources Technology*, 141(5), p.050801. <https://doi.org/10.1115/1.4042643>.
 23. Paraschivoiu, I., 2002. *Wind Turbine Design: With Emphasis On Darrieus Concept*. Presses Inter Polytechnique. [Book].
 24. Anderson, J.D., 1998. *A History of Aerodynamics: And Its Impact on Flying Machines (No. 8)*. Cambridge University Press. [Book].
 25. Mohammed, A.A., Ouakad, H.M., Sahin, A.Z. and 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, pp.729-741. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-04133-w>.
 26. Moghimi, M. and Motawej, H., 2020. Developed DMST model for performance analysis and parametric evaluation of Gorlov vertical axis wind turbines. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37, p.100616. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100616>.
 27. Mostafaeipour, A., Jadidi, M., Mohammadi, K. and Sedaghat, A., 2014. An analysis of wind energy potential and economic evaluation in Zahedan, Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, pp.641-650. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.016>.