



ارزیابی ظرفیت جذب انرژی باد و بومی سازی یک توربین بادی محور عمودی مطابق اقلیم شهرهای ایران

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

^۱ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۲ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۰۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۲/۰۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۲

چکیده

بکارگیری توربین بادی مقیاس شهری و روستایی که ضمن سادگی در هندسه و هزینه ساخت مقرون به صرفه، توانایی جذب توان بهینه باشد، دارای جذابیت بالایی خواهد بود. در این تحقیق ابتدا پتانسیل جذب انرژی باد در ۳ منطقه مختلف ایران شامل شهرهای تهران، زاهدان و منجیل مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس یک نمونه توربین بادی محور عمودی متناسب با شرایط اقلیمی این مناطق، بومی سازی شده است. فرایند باز طراحی بر مبنای مشخصه‌های یک توربین مینا به عنوان طرح اولیه صورت گرفته و برای این منظور یک کد نیمه تحلیلی سه بعدی بر پایه روش دی ام اس تی^۱ (DMST) توسعه داده شده که اعتبارسنجی آن مطالعه و آرایه شده است. با استفاده از این مدل، تاثیر پارامترهای متنوعی شامل سرعت باد، تعداد پره، اندازه وتر، طول و قطر پره، بر ضریب توان و ضریب نیرو بررسی شده است. بر اساس نتایج این پژوهش می توان دریافت که شهر منجیل نسبت به دو شهر دیگر دارای پتانسیل بادی بهتری بوده، قرارگیری توربین محور عمودی در این شهر هم از نظر فنی و هم اقتصادی دارای ارجحیت است؛ همچنین مشاهده شد که تاثیر تنظیم متغیرهای هندسی در یک توربین محور عمودی از نوع اچ-شکل، می تواند به میزان ۲۰ الی ۴۰ درصد در عملکرد توربین (بسته به شرایط اقلیمی) بهبود ایجاد کند.

کلمات کلیدی: ظرفیت انرژی باد؛ توربین محور عمودی؛ بومی سازی؛ مشخصه هندسی؛ ضریب توان.

Wind energy potential evaluation and customizing a vertical axis wind turbine based on Iran cities climate

Saeed Karimian^{1*}, Sam Saham²

¹ Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

² MSc., Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract

The use of urban and rural scale wind turbines, which is simply in geometry and low cost fabrication, will be of great attraction. In this study, the potential of wind energy absorption in three different regions of Iran, including Tehran, Zahedan, and Manjil, was first evaluated and then a sample of vertical axis wind turbine was localized according to the climatic conditions of these areas. The design process is based on the characteristics of a base turbine as the initial design and for this purpose, a 3D semi analytical model is developed based on the DMST method, which is validated and presented. Using this new semi analytical model, the impact of a variety of parameters including wind speed, blade number, chord length, blade height, and rotor diameter, is evaluated on power coefficient and force coefficient. Based on the results of this study, it can be seen that the city of Manjil has better wind potential than the other two cities. Localisation of the VAWT in this city is both technically and economically preferred. Also, the effect of adjusting geometric variables can improve the turbine performance by 20 to 40 percent (depending on climatic conditions).

Keywords: wind energy potential; vertical axis wind turbine; wind turbine localization; geometric properties; power coefficient.

¹ Double Multiple Stream Tube Method

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 است و در عین حال گسترش صنایع نیاز روزافزون به انرژی را افزایش می‌دهد. به همین دلیل 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 توربین‌های بادی و سلول‌های خورشیدی بدست بیاورند. این نوع انرژی که انرژی سبز^۱ نیز نامیده می‌شود، بیش از ۲۰ درصد تقاضای انرژی جهان را تامین می‌کند [۲]. انرژی بادی یکی از روش‌های مناسب تامین انرژی است، چرا که علاوه بر رایگان بودن اغلب در دسترس است؛ اما بهره‌مندی از انرژی باد نیازمند استفاده از توربین‌های بادی است تا بتوان به کمک این توربین‌ها انرژی باد را به انرژی مکانیکی و نهایتاً به کمک ژنراتورها به انرژی الکتریکی تبدیل کرد. این توربین‌ها به دو دسته محور افقی و محور عمودی تقسیم‌بندی می‌شوند که عموماً توربین‌های محور افقی نسبت به نوع محور عمودی توان بیشتری دارند، اما نیازمند صرف هزینه بیشتر و اختصاص دادن منطقه‌ای تحت عنوان مزرعه توربین بادی هستند [۳].

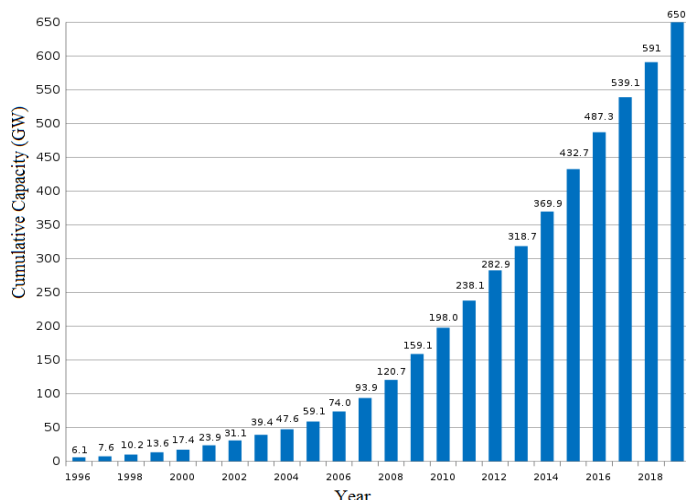
به همین دلیل استفاده از توربین‌های محور عمودی با توان کمتر، ابعاد کوچکتر، عدم حساسیت به جهت وزش باد و هزینه ساخت و سرویس کمتر یکی از گزینه‌های مناسب برای بهره‌مندی از مکان‌هایی همچون بام منازل، بام کارگاه‌ها، حاشیه بزرگراه‌ها و سایر مکان‌های مشابه است که عملاً استفاده از توربین‌های محور افقی امکان‌پذیر نیست و با صرفه اقتصادی ندارد. در این تحقیق به بررسی سرعت باد در مناطق بادخیز ایران و بومی‌سازی یک توربین بادی محور عمودی از نوع اچ-شکل و با مشخصات اولیه معلوم پرداخته می‌شود؛ چراکه تولید انرژی الکتریکی بیشتر، نیازمند انرژی باد مناسب و به عبارتی سرعت باد مناسب است. این موضوع باعث می‌شود تا اولاً منطقه مورد نظر جهت بهره‌برداری از انرژی باد مورد بررسی قرار گرفته و ثانیاً طراحی توربین متناسب با شرایط

اقلیمی منطقه انجام گیرد تا بتوان به حداکثر توان خروجی از توربین دست یافت.

همانطور که از شکل ۱ مشخص است، استفاده از توربین‌های بادی در جهان بخصوص در سال‌های گذشته روند صعودی داشته است. تولید انرژی به واسطه توربین‌های بادی در سال ۲۰۲۰ به حدود ۷۳۳ گیگاوات رسیده است که نسبت به سال ۲۰۱۹ حدود ۱۲ درصد افزایش و نسبت به سال ۲۰۱۰، در حدود ۳ برابر شده است. در این میان کشورهای چین، آمریکا و آلمان به ترتیب با تولید حدود ۲۸۲ گیگاوات، ۱۱۸ گیگاوات، و ۶۲ گیگاوات انرژی در سال ۲۰۲۰، به ترتیب ۳۸/۵ درصد، ۱۶/۱ درصد و ۸/۵ درصد از تولید انرژی بادی جهان را به خود اختصاص داده‌اند (جدول ۱)؛ در حالی که ایران با تولید ۳۰۳ مگاوات در رتبه ۵۷ قرار گرفته است؛ همچنین سرانه تولید انرژی به واسطه انرژی بادی در جهان حدود ۹۳ وات به ازای هر نفر است که با مقایسه سرانه تولید انرژی بادی نقاط مختلف جهان، کشورهای دانمارک، سوئد، و ایرلند به ترتیب با تولید ۱۰۶۸ وات، ۹۳۳ وات و ۸۶۴ وات به ازای هر نفر از جمعیت خود، سه رتبه برتر در سرانه تولید انرژی بادی را شامل می‌شوند؛ بنابراین با توجه به اهمیت انرژی باد و مزایای آن، بسیاری از محققان به بررسی پتانسیل انرژی باد در مناطق مختلف جهان پرداخته‌اند از این جمله می‌توان به امکان‌سنجی نصب توربین بادی در ترکیه [۱]، [۴]، یونان [۶] و [۷]، آلمان [۸]، ایتالیایی [۹]، بحرین [۱۰]، عربستان [۱۱]، و پاکستان [۱۲] اشاره کرد.

اما از آنجا که موقعیت جغرافیایی ایران در ناحیه کم‌فشار است، برخی از نقاط آن تحت تاثیر جریان‌های قدرتمند تابستانی و زمستانی قرار دارد. این جریان‌ها شامل بادهای زمستانی که از سمت اقیانوس اطلس و دریای مدیترانه و همچنین آسیای میانه می‌وزند و بادهای تابستانی که از سمت اقیانوس هند و اقیانوس اطلس می‌وزند می‌شود. یک مطالعه در دانشگاه صنعتی شریف ایران نشان می‌دهد که پتانسیل ۲۶ نقطه در کشور در حدود ۶۵۰۰ مگاوات است. قسمت‌های اعظم جنوب شرقی ایران به طور کلی بادخیز تلقی می‌شود و می‌تواند محل مناسبی جهت استقرار توربین‌های بادی باشد [۱۳].

^۱Green energy



شکل ۱- ظرفیت بهره‌برداری از انرژی باد در جهان (Global wind energy council report)

آن به بیش از ۱,۸ میلیون کیلووات ساعت رسید. دومین تجربه در سال ۱۹۹۹ با احداث ۲۷ توربین بادی در منجیل، رودبار، و هرزویل (شهرکی در شمال شرقی منجیل) 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 [۱۳ و ۱۴]. سایر نقاط ایران که از توربین‌های بادی بهره می‌برند می‌توان به بینالود در خراسان و لوتاک در سیستان و بلوچستان اشاره کرد.

قربانی و رحیمی به بررسی جزئیات انرژی تجدید پذیر و تجدید ناپذیر و همچنین به ائتلاف انرژی در برخی از صنایع پرداختند و همچنین پیشنهادهایی برای بهبود این مشکل ارائه کردند [۱۵]. علمداری و همکاران به بررسی پتانسیل انرژی باد 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 [۱۶]. مصطفی پور امکان‌سنجی بهره‌برداری از انرژی باد در منطقه یزد ایران را مورد بررسی قرار داد؛ او سرعت باد را به صورت ماهانه و سالیانه در ارتفاع‌های مختلف بین سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۵ در ۱۱ ایستگاه هواشناسی مورد ارزیابی قرار داد [۱۷]؛ همچنین مصطفی پور به ارزیابی اقتصادی استفاده از توربین‌های بادی کوچک در شهر کرمان در ایران پرداخت. او در این تحقیق سه توربین کوچک را مورد

جدول ۱- سهم کشورها در بهره‌مندی از انرژی باد در سال ۲۰۲۰ (Global wind energy council report)

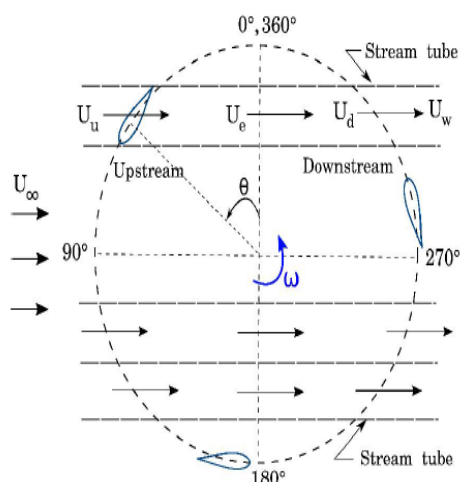
کشور	توان تولیدی (MW)	درصد سهم از کل	سرانه مصرف انرژی (MW)	سرانه تولید انرژی از باد (W)
۱. چین	۲۸۲۰۰۰	۳۸/۵ درصد	۴/۶	۲۰۰
۲. آمریکا	۱۱۸۰۰۰	۱۶/۱ درصد	۱۲/۱	۳۵۵
۳. آلمان	۶۲۰۰۰	۸/۵ درصد	۶/۳	۷۴۷
۴. هند	۳۸۵۰۰	۵/۳ درصد	۰/۹	۲۸
۵. اسپانیا	۲۷۰۰۰	۳/۷ درصد	۵/۱	۵۷۴
۶. انگلیس	۲۴۶۰۰	۳/۴ درصد	۴/۵	۴۰۰
۷. فرانسه	۱۷۳۰۰	۲/۴ درصد	۶/۷	۲۶۰
۸. برزیل	۱۷۰۰۰	۲/۳ درصد	۲/۸	۸۰
۹. کانادا	۱۳۵۰۰	۱/۹ درصد	۱۴/۶	۳۶۴
۱۰. ایتالیا	۱۱۰۰۰	۱/۵ درصد	۴/۹	۱۸۳

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 در استان گیلان واقع در شمال ایران احداث شد که انرژی سالیانه

می‌شود. همانطور که از شکل ۲ مشخص است، روتور توربین در امتداد مسیر جریان به بخش‌هایی تقسیم می‌شود که این تقسیم‌بندی با تقسیم‌بندی زاویه آزیموت ($\Delta\theta$) متناسب است. زاویه آزیموت نیز نشان دهنده موقعیت زاویه‌ای پره نسبت به محور توربین است. جریان آزاد (U_∞) با برخورد به پره‌های روتور در بالادست مقداری از انرژی خود را از دست داده و به U_e تقلیل پیدا می‌کند؛ به طور مشابه سرعت U_e نیز با عبور از پره‌های پایین‌دست با کاهش انرژی مواجه شده و در نهایت سرعت خروج جریان از روتور (U_w) به کمترین مقدار خود می‌رسد. در این میان، سرعت جریان در محل عبور از پره‌های بالادست و پایین‌دست به ترتیب (U_u) و (U_d) بوده که که متاثر از ضرایب القایی بالادست و پایین‌دست یعنی a_u و a_d هستند. این ضرایب که نشان دهنده میزان تاثیر پره بر جریان عبوری از روتور است، توسط روش سعی و خطا و با کمک روابط مومنوم در دو صفحه مجزا از هم (برای بالادست و پایین‌دست) بدست می‌آیند.

$$U_\infty > U_u > U_e > U_d > U_w \quad (1)$$

$$\begin{aligned} U_u &= a_u U_\infty \\ U_e &= U_\infty(2a_u - 1) \\ U_d &= a_d U_e \end{aligned} \quad (2)$$



شکل ۲- مسیره‌های جریان در روش دی ام اس تی [۲۰]

بررسی قرار داد و نشان داد که این شهر پتانسیل استفاده از انرژی باد را برای توربین‌های بادی کوچک دارد [۱۸]. موسوی و همکاران به مقایسه روش‌های موجود تولید برق با توربین بادی در ایران پرداختند و بیان کردند که نیروگاه‌های متکی به انرژی باد می‌تواند یکی از نیروگاه‌های رقابتی در صنعت باشد و از طرفی بیان کردند که موضوع یارانه‌ها می‌تواند در آینده بر توسعه صنعت بادی ایران تاثیرگذار باشد [۱۹]. همچنین تحقیقاتی در مورد پتانسیل انرژی باد برای سایر نقاط ایران مانند یزد، تهران، سمنان و منجیل توسط محققان مختلف صورت گرفته است.

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 و اکثر نیروگاه‌های بادی این کشور از توربین‌های محور افقی استفاده می‌کنند که علاوه بر پیچیدگی ساخت و بهره‌برداری، دارای هزینه‌های تولید و نگهداری بیشتری نسبت به نوع محور عمودی هستند. از طرفی طراحی و ساخت توربین‌های بادی رابطه تنگاتنگی با شرایط آب و هوایی منطقه مورد نظر دارد که این موضوع باعث می‌شود تا در این تحقیق، توزیع سرعت باد در طول سال و پتانسیل بادی چند شهر از جمله زاهدان، تهران، و منجیل مورد ارزیابی قرار گرفته و توانایی آن‌ها در بکارگیری از توربین‌های بادی جهت تولید برق مشخص شود؛ سپس یک توربین بادی محور عمودی از نوع اچ-شکل برای هر شهر به صورت منحصر به فرد بومی‌سازی می‌شود. این فرایند بومی‌سازی متناسب با سه پارامتر اساسی اندازه سرعت باد، احتمال رخداد سرعت باد و ارتفاع مورد نظر جهت نصب توربین است. پس از مشخص شدن این پارامترها، تغییراتی در هندسه توربین مورد نظر ایجاد می‌شود، به طوری که نهایتاً میزان توان تولیدی توربین در طول سال به بیشینه مقدار خود برسد.

۱- معادلات و مدل‌سازی

تحلیل توربین مورد نظر براساس روش دی ام اس تی (DMST) و با کمک نرم افزار متلب (MATLAB) انجام می‌شود. این روش بر اساس روش مومنوم بوده و در آن روتور توربین به دو قسمت بالادست و پایین‌دست تقسیم می‌شود و برای هر بخش روابط مومنوم جریان به صورت جداگانه اعمال

میانگین، λ نسبت سرعت پره، و A مساحت جارو شده توسط پره بوده که به صورت $A = H \cdot D$ تعریف می‌شود.

$$Q(\theta) = R \cdot F_T(\theta) \quad (5)$$

$$\bar{Q} = \frac{N}{2\pi} \int Q d\theta \quad (6)$$

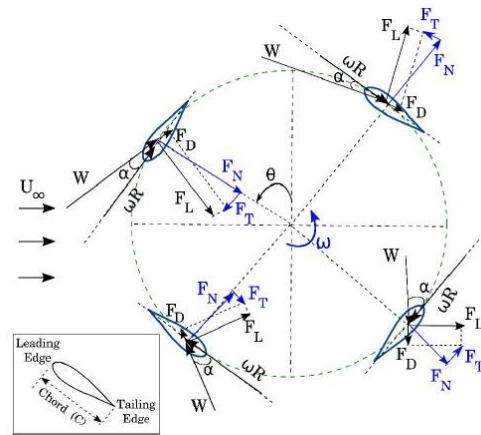
$$C_{\bar{Q}} = \frac{\bar{Q}}{1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot R \cdot U_{\infty}^2} \quad (7)$$

$$C_p = \lambda \cdot C_{\bar{Q}} \quad (8)$$

همچنین از آنجا که پره‌های توربین دارای طول محدودی هستند، لذا مقداری از جریان در نوک پره از سطح پره فشار پره به سطح کم فشار پره منحرف می‌شود که این عمل باعث می‌شود تا گردابه‌هایی تحت عنوان گردابه‌های نوک پره^۱ ایجاد شده و باعث 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 آیرودینامیکی در قسمت نوک پره می‌شود؛ بنابراین برای بهبود روش دی ام اس تی زاویه حمله موثر با توجه به رابطه ۹ بدست می‌آید که در این رابطه α_{eff} زاویه حمله موثر، α زاویه حمله ظاهری و α_i زاویه حمله القایی ناشی از افت جریان از نوک پره است.

$$\alpha_{eff} = \alpha - \alpha_i \quad (9)$$

همانطور که از شکل ۴ مشخص است، الگوریتم روش دی ام اس تی بر پایه نیمه بالادست و پایین دست است که در ابتدای این فرایند متغیرهای ورودی همچون طول پره، قطر روتور، وتر پره، نوع ایرفویل، سرعت دورانی و سرعت جریان آزاد مورد نظر تعریف می‌شود. سپس المان بندی پره و تقسیم بندی زوایای آزمایشات که تاثیر مستقیم بر دقت روش دارد انجام می‌شود. پس از محاسبه نسبت سرعت برای المان‌های پره می‌توان وارد گام بعدی یعنی محاسبات مربوط به قسمت رو به باد توربین شد؛ در این گام ابتدا سعی در یافتن ضریب القایی است. برای این منظور با استفاده از روش سعی و خطا و اعمال یک ضریب القایی پیش فرض و انجام حلقه تکرار، ضریب القایی مناسب بدست می‌آید. با بدست آمدن ضریب القایی می‌توان پارامترهای کلیدی حل آیرودینامیکی یعنی سرعت نسبی و زاویه حمله موثر را محاسبه کرد.



شکل ۳- عکس العمل نیروها در صفحه روتور [۲۰]

با توجه به شکل ۳ پس از برخورد جریان آزاد با پره توربین، دو مولفه سرعت به روی پره لحاظ می‌شود. یک مولفه مربوط به سرعت مطلق جریان و هم راستا با وزش باد بوده، و مولفه دیگر مربوط به چرخش توربین و همواره مماس بر پره است. براینکه این دو مولفه موجب پدیدار شدن مولفه‌ای به نام سرعت نسبی جریان می‌شود (W) که این سرعت و زاویه حمله مربوط به آن مبنای محاسبه نیروهای آیرودینامیکی وارد بر پره خواهد بود. پس از بدست آمدن نیروهای برآ و پسا و با تصویرسازی مناسب، می‌توان این نیروها را در راستای عمود بر پره و مماس بر پره بدست آورد؛ بنابراین روابط ۳ و ۴ نیروهای عمود بر پره و مماس بر پره را با توجه به سرعت نسبی جریان و ضریب نیروی مربوطه محاسبه می‌کند. در این روابط 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.

$$F_N(\theta) = \left(\frac{1}{2} C_N \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta h \cdot W^2 \right) \quad (3)$$

$$F_T(\theta) = \left(\frac{1}{2} C_T \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta h \cdot W^2 \right) \quad (4)$$

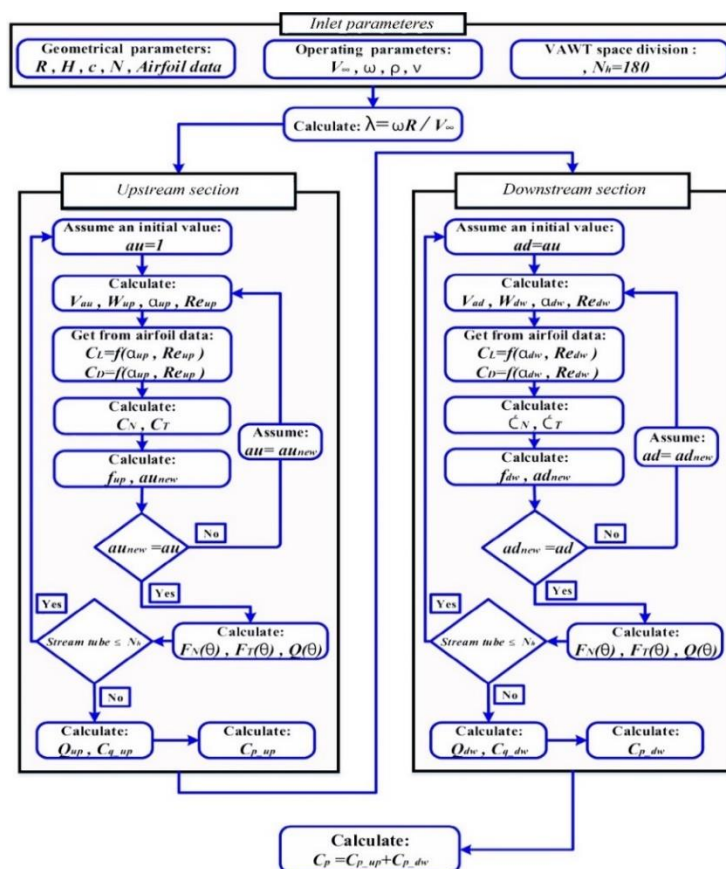
در گام بعد با کمک نیروی مماسی وارد بر پره گشتاور ایجاد شده و نهایتاً توان تولیدی توربین توسط روابط ۵، ۶، ۷ و ۸ بدست می‌آید. در این روابط Q گشتاور پره متناسب با هر زاویه آزمایشات، \bar{Q} گشتاور میانگین روتور، $C_{\bar{Q}}$ ضریب گشتاور

² Downwash

¹ Tip vortex

شد، تکرار می‌شود. تنها تفاوت آن تغییر سرعت جریان ورودی به قسمت پایین دست است. این سرعت (U_e) با کمک روابطی که در ابتدای این بخش بیان شد بدست می‌آید. در نهایت با بدست آمدن گشتاور و توان وارد شده بر پره در قسمت بالادست و پایین دست روتور می‌توان کل توان خروجی از توربین را محاسبه کرد.

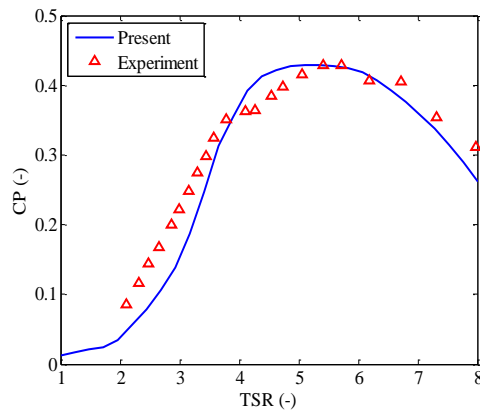
با محاسبه سرعت نسبی و زاویه حمله و همچنین داده‌های ضریب برآ و پسای ایرفویل مورد نظر، نیروی عمود بر پره و نیروی مماس بر پره محاسبه می‌شود. سپس با تصویرسازی-های مناسب می‌توان نیروهای وارد شده بر پره را بدست آورد که شامل سه نیرو در راستای سرعت باد (محور x)، عمود بر سرعت باد (محور y) و در راستای محور توربین (محور z) است؛ همچنین گشتاور وارد شده بر پره نیز بدست می‌آید. در گام بعد، مشابه فرایندی که برای قسمت بالادست توربین انجام



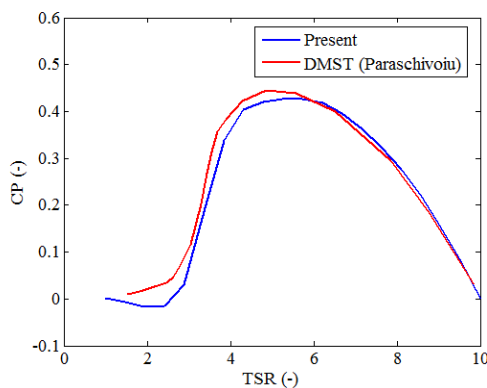
شکل ۴- الگوریتم حل روش دی ام اس تی [۲۱]

ثابت ماندن مساحت جاروب شده توسط روتور ($H \times D$)، مقدار توان خروجی توربین به بیشترین مقدار خود در طول سال برسد. ثابت نگه داشتن مساحت جاروب شده باعث می‌شود تا سطح مقطع ورود جریان به توربین در هر سه شهر یکسان باشد؛ لذا می‌توان عملکرد توربین را بر حسب جریان وارد شده

در ادامه برای رسیدن به هدف بومی‌سازی توربین، از یک توربین تحت عنوان توربین مبنا استفاده شده و برای بهبود توان خروجی متناسب با شهر مورد نظر، با استفاده از روش سعی و خطا تغییراتی در وتر پره، تعداد پره، طول پره، قطر روتور، و سرعت چرخش توربین اعمال می‌شود، به طوریکه با



شکل ۶- اعتبارسنجی مدل دی ام اس تی با داده‌های تجربی [۲۰]



شکل ۶- اعتبارسنجی مدل حاضر با تئوری مرجع [۲۲]

۳- ظرفیت بادی و مقایسه اقلیمی

سرعت‌های باد در شهرهای مورد نظر با استفاده از داده‌های آماری در ارتفاع ۱۰ متری بدست آمده و به کمک رابطه ۱۰ و ۱۱ زیر برای سایر ارتفاع‌ها نیز بدست می‌آید که در این روابط V سرعت باد در ارتفاع مورد نظر، V_{10} سرعت باد در ارتفاع مرجع (۱۰m)، h ارتفاع مورد نظر، و h_{10} ارتفاع ۱۰ m است.

$$V/V_{10} = (h/h_{10})^\alpha \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{0/37 - (0/088 * \log(V))}{1 - (0/088 * \log(h/10))} \quad (11)$$

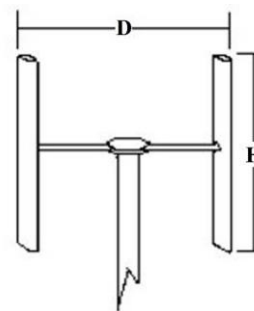
به توربین از طریق این سطح مقطع ارزیابی کرد. به عبارت دیگر می‌توان توربین‌های شهرهای مورد نظر را با یکدیگر مورد مقایسه قرار داد.

۲- معرفی توربین مبنا و اعتبارسنجی کد نیمه-تحلیلی

به منظور اعتبارسنجی روش مورد نظر از یک توربین اچ-شکل مطابق شکل ۵ و با مشخصات هندسی مطابق با جدول ۲ استفاده شده و نتیجه حاصله از مقیاس توان با داده‌های تجربی بدست آمده از آزمایشگاه سندیا^۱ در شکل ۶ مورد مقایسه قرار گرفته است [۲۰]. در این شکل محور افقی نشان دهنده نسبت سرعت پره^۲ است. از طرفی روش حاضر با روش تئوری استفاده شده در مرجع [۲۲] نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به نتایج این ارزیابی می‌شود که روش دی ام اس تی استفاده شده در این تحقیق نسبت به داده‌های تجربی حدود ۱۷ درصد خطا بوده، و نسبت به روش تئوری مرجع [۲۲] دارا خطایی کمتر از ۵ درصد است. اختلاف نتایج بدست آمده را می‌توان ناشی از تشکیل دنباله جریان^۳ و انبساط جریان^۴ دانست.

جدول ۲- مشخصات اولیه توربین مبنا

نوع ایرفویل	ناکا ۰۰۱۵
تعداد پره	۲ عدد
وتر پره	۰/۶۱ متر
ارتفاع پره	۱۶/۷ متر
قطر روتور	۱۷ متر
سرعت چرخش	۴۲/۲ دور بر دقیقه



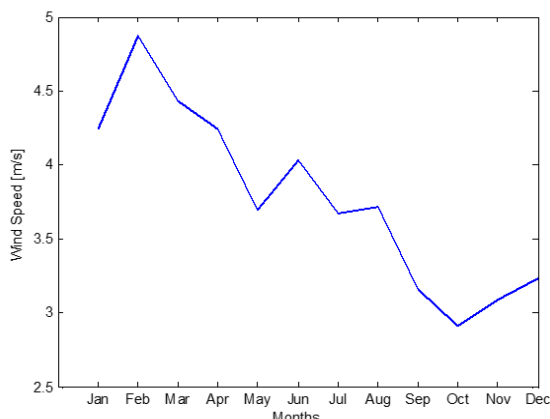
شکل ۵- شماتیک توربین داریوس (اچ-شکل) [۲۰]

³ Wake

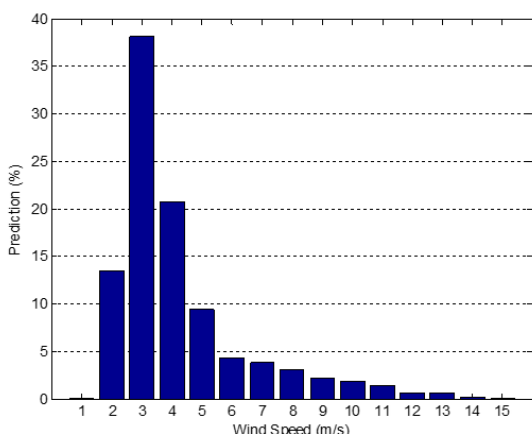
⁴ Streamtube expansion

¹ Sandia Lab

² Tip speed ratio



شکل ۷- میانگین سرعت متوسط باد در زاهدان [۲۳]



شکل ۸- احتمال رخداد سرعت‌های باد مختلف در طول سال (زاهدان)

تهران

براساس سرشماری سال ۱۳۹۵، تهران پرجمعیت‌ترین شهر ایران و پایتخت آن است. این شهر با جمعیتی بیش از ۸٫۵ میلیون نفر در مساحتی به میزان ۷۵۰ کیلومتر مربع در ارتفاع متوسط ۱۳۵۰ متری از سطح دریا، جزو پرجمعیت‌ترین شهرهای جهان و دومین کلان‌شهر پرجمعیت خاورمیانه است. از نظر ناهمواری‌های طبیعی به دو قسمت دشت و کوهپایه تقسیم می‌شود و دارای اقلیم نیمه‌خشک است. مسیر اصلی و جهت باد غالب شهر تهران، از شمال غرب به جنوب شرق است. دیگر جریان‌های هوایی که در محدوده شهر تهران می‌وزند عبارت است از:

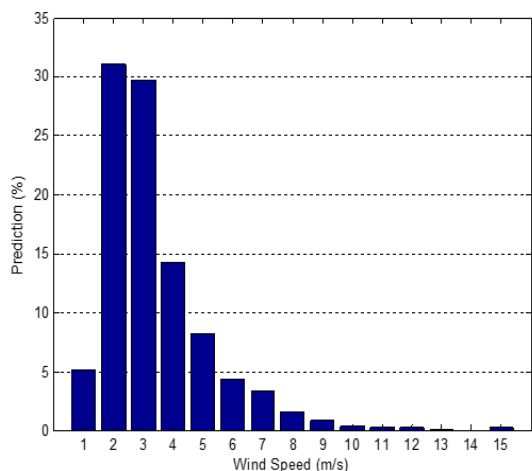
از طرفی با توجه به رابطه ۱۲ و ۱۳ می‌توان به ترتیب توان و چگالی انرژی باد در شهرهای مورد نظر را تخمین زد. در این روابط V_n معرف سرعت باد در توزیع احتمال مورد نظر، و p احتمال رخداد آن سرعت است. در رابطه ۱۳ پس از محاسبه توان باد، می‌توان در نظر گرفتن یک سال معادل ۸۷۶۰ ساعت، بیشینه انرژی باد منطقه را ارزیابی کرد.

$$P = \sum_{n=1}^{15} \frac{1}{2} \rho V_n^3 \cdot p \quad (12)$$

$$E = P \cdot 8760 \quad (13)$$

زاهدان

بر اساس سرشماری سال ۱۳۹۵، 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. توزیع سرعت باد این شهر در طول سال با میانگین‌گیری از سرعت متوسط ماهانه در سه سال اخیر (از سال ۲۰۱۸ الی ۲۰۲۰) و در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین به صورت شکل ۷ بدست آمده است. از این سرعت به عنوان پیشبینی سرعت باد در سال‌های آتی و مبنای طراحی و بومی‌سازی توربین بادی استفاده می‌شود. با توجه به 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 2.19 m/s و در ماه‌های فوریه و اکتبر رخ می‌دهد. از طرفی با توزیع احتمال سرعت باد مطابق شکل ۸ مشاهده می‌شود که احتمال رخداد سرعت باد بین 3 m/s الی 4 m/s بیشترین احتمال و به ترتیب در حدود ۳۸ درصد و ۲۰ درصد است؛ همچنین با توجه به توزیع سرعت باد زاهدان و روابط ۱۱ و ۱۲ می‌توان انرژی باد سالیانه این شهر را در حدود 98 W/m^2 و 855 kWh/m^2 تخمین زد.



شکل ۱۰- احتمال رخداد سرعت‌های باد مختلف در طول سال (تهران)

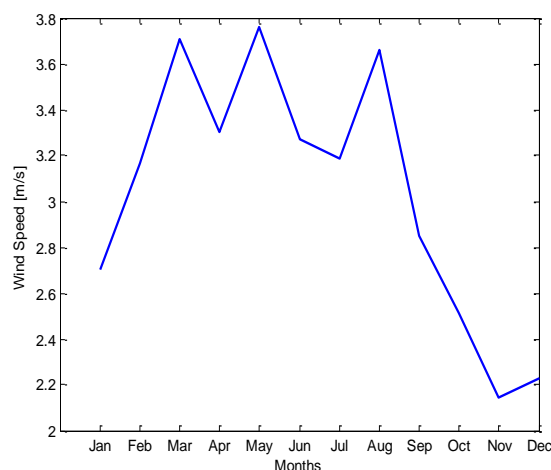
منجیل

بر اساس سرشماری سال ۱۳۹۰، منجیل شهری در استان گیلان واقع در شمال ایران و در ارتفاع ۴۹۶ متری از سطح دریا است که جمعیتی حدود ۲۰۰۰۰ نفر دارد. این شهر یکی از شهرهای معروف از نظر وزش باد است که اغلب در بهار و تابستان به بیشترین شدت خود می‌رسد. از دلایل ایجاد باد در این شهر می‌توان به استقرار الگوهای متفاوت فشار در فصول مختلف سال اشاره کرد که باعث ایجاد یکی از شدیدترین بادهای محلی ایران در جنوب دریای خزر شده‌است. همچنین دره سفیدرود کانال ارتباطی بین دریای خزر در شمال و خشکی گسترده ایران مرکزی در جنوب است؛ تفاوت عرض جغرافیایی این دو پهنه سبب شده تا از نظر الگوهای گردشی هوا شرایط مختلفی در منطقه استقرار یابد، به طوری که الگوهای متفاوتی از فشار را در فصول مختلف سال در سطح منطقه به وجود می‌آورند که نتیجه آن تبادل هوا بین دریای خزر و خشکی مرکزی ایران است. از آنجایی که دیواره کوهستانی البرز مانع از تبادل هوا در این منطقه شده است، بنابراین جریان هوا فقط از طریق دره‌هایی که عمود بر جهت ناهمواری‌هاست انجام می‌شود.

توزیع سرعت باد میانگین شهر منجیل بین سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۲۰ در نمودار شکل ۱۱ نشان داده شده است. این شهر دارای میانگین سرعت $m/s 9,5$ در ارتفاع ۱۰ متری بوده و بیشترین سرعت میانگین ثبت شده $m/s 15,9$ در ماه

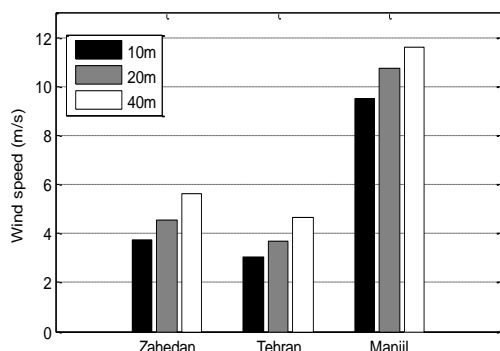
- بادهای منطقه‌ای جنوبی و جنوب شرقی: این بادهای در ماه‌های گرم سال از سمت دشت کویر و پستی‌های مرکزی ایران می‌وزند.
- بادهای غربی: این بادهای از جمله بادهای سیاره‌ای هستند که در تمام طول سال، شهر تهران را تحت تاثیر قرار داده و می‌توان آن را باد غالب دانست.

توزیع سرعت باد میانگین شهر تهران بین سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۲۰ در نمودار شکل ۹ نشان داده شده است. این شهر دارای میانگین سرعت $m/s 3$ در ارتفاع ۱۰ متری بوده و بیشترین سرعت میانگین ثبت شده $m/s 3,76$ در ماه می، و کمترین سرعت میانگین $m/s 2,14$ در ماه نوامبر است. احتمال رخداد سرعت باد در طول سال برای این شهر در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد، سرعت وزش باد بین $2m/s$ الی $3m/s$ دارای بیشترین احتمال است. این بازه سرعت حدود ۶۰ درصد از توزیع سرعت باد را شامل می‌شود که به ترتیب حدود ۳۱ درصد و ۲۹ درصد از آن را شامل می‌شود؛ همچنین با توجه به توزیع سرعت باد تهران می‌توان توان و انرژی باد سالیانه این شهر را در حدود $54W/m^2$ و $473kWh/m^2$ تخمین زد.



شکل ۹- میانگین سرعت متوسط باد شهر تهران [۲۴]

در هر شهر، ناحیه‌ای دارای تراکم بالای ساخت و ساز بوده و امکان اختصاص دادن منطقه‌ای برای مزرعه‌های بادی با توربین‌های محور افقی مرتفع وجود ندارد؛ لذا توصیه می‌شود که در این نواحی از توربین‌های محور عمودی شهری در ارتفاع پایین نصب شود. در این تحقیق نیز ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین جهت بررسی عملکرد توربین در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۳- میانگین سرعت باد سالیانه در سه ارتفاع مختلف

۴- بومی‌سازی و مطالعه پارامتری

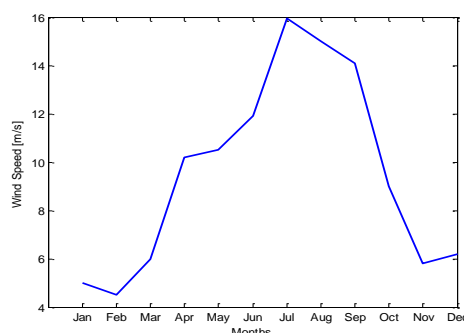
زاهدان

با توجه به توزیع سرعت باد در شهر زاهدان و احتمال رخداد سرعت باد در طول سال مشاهده می‌شود که بیشترین پتانسیل انرژی باد در محدوده سرعت 10 m/s رخ می‌دهد؛ بنابراین متغیرهای توربین متناسب با شهر زاهدان به صورت جدول ۳ تعیین می‌شود و با رسم منحنی توان آن مطابق شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که توربین مورد نظر توانسته است، بیشینه توانی در حدود 140 KW در سرعت باد 13 m/s داشته باشد؛ همچنین با محاسبه توان توربین در طول سال، مقدار انرژی تولیدی سالیانه این توربین در حدود 70 MW.h خواهد بود.

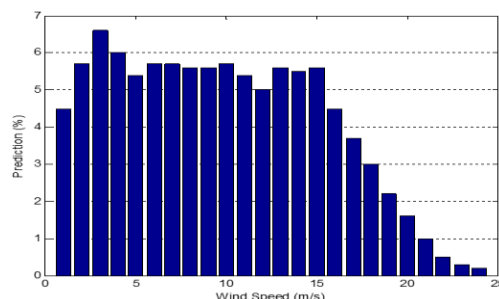
جدول ۳- مشخصات توربین بومی‌سازی شده برای شهر

زاهدان	
مشخصه	مقدار
نوع ایرفویل	ناکا ۰۰۱۵
تعداد پره	۳ عدد
طول وتر پره	۰/۶۹ متر
قطر روتور	۱۷/۲ متر
ارتفاع روتور	۱۶/۵ متر
سرعت چرخش روتور	۵۰ دور بر دقیقه

جولای، و کمترین سرعت میانگین 4.5 m/s در ماه فوریه است. احتمال رخداد سرعت باد در طول سال برای این شهر در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد، توزیع احتمال وزش باد نسبت به شهرهای تهران و زاهدان یکنواخت‌تر است؛ همچنین با توجه به توزیع سرعت باد منجیل می‌توان و انرژی باد سالیانه این شهر را در حدود 1100 W/m^2 و 9740 kWh/m^2 تخمین زد.

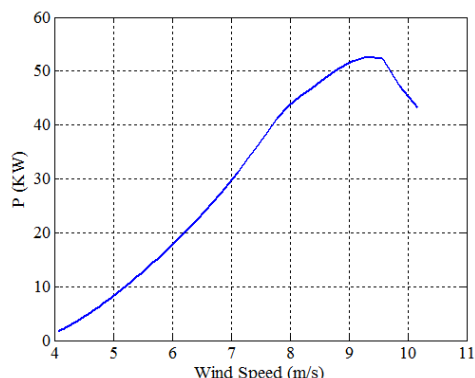


شکل ۱۱- میانگین سرعت متوسط باد شهر منجیل [۲۵]

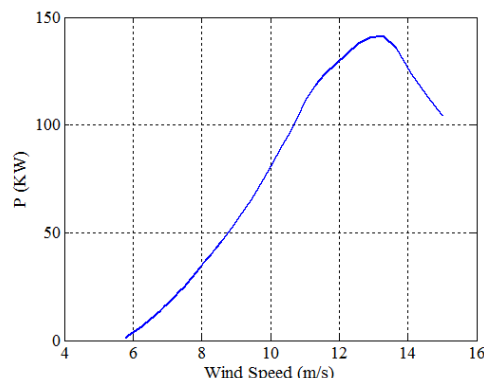


شکل ۱۲- احتمال رخداد سرعت‌های باد مختلف در طول سال (منجیل)

میانگین سرعت باد سالیانه برای شهرهای مورد نظر در ارتفاع‌های ۱۰، ۲۰ و ۴۰ متری با کمک روابط ۹ و ۱۰ بدست آمده و نتیجه آن در شکل ۱۳ رسم شده است. با توجه به این نمودار مشاهده می‌شود که سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری و ۲۰ متری شهر زاهدان را می‌توان به ترتیب و به صورت تقریبی معادل سرعت باد در ارتفاع ۲۰ متری و ۴۰ متری شهر تهران دانست؛ اما سرعت باد در منجیل حتی در ارتفاع ۱۰ متری نیز بسیار بیشتر از سایر شهرها است. با کمک این نمودار می‌توان یک دید کلی از سرعت باد شهرهای مورد نظر در ارتفاع‌های مختلف بدست آورد. معمولا



شکل ۱۵- منحنی توان توربین بومی سازی شده برای شهر تهران



شکل ۱۴- منحنی توان توربین بومی سازی شده برای شهر زاهدان

منجیل

با توجه به توزیع سرعت باد در شهر منجیل و احتمال رخداد سرعت باد در طول سال که مقدار تقریباً یکنواختی دارد، مشاهده می‌شود که بیشترین پتانسیل انرژی باد در محدوده سرعت 15 m/s رخ می‌دهد؛ بنابراین متغیرهای توربین متناسب با شهر منجیل به صورت جدول ۵ تعیین می‌شود و با رسم منحنی توان آن مطابق شکل ۱۶ مشاهده می‌شود که توربین مورد نظر توانسته است، بیشینه توانی در حدود 580 KW در سرعت باد 22 m/s داشته باشد؛ همچنین با محاسبه توان توربین در طول سال، مقدار توان تولیدی سالیانه این توربین در حدود 980 MW.h خواهد بود.

جدول ۵- مشخصات توربین بومی سازی شده برای

شهر منجیل	
مشخصه	مقدار
نوع ایرفویل	ناکا ۰۰۱۵
تعداد پره	۳ عدد
طول وتر پره	$0/52$ متر
قطر روتور	$20/2$ متر
ارتفاع روتور	14 متر
سرعت چرخش روتور	75 دور بر دقیقه

تهران

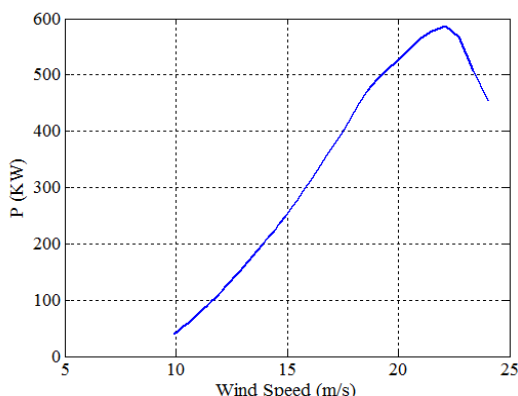
با توجه به توزیع سرعت باد در شهر تهران و احتمال رخداد سرعت باد در طول سال مشاهده می‌شود که بیشترین پتانسیل انرژی باد در محدوده سرعت 6 m/s رخ می‌دهد؛ بنابراین متغیرهای توربین متناسب با شهر تهران به صورت جدول ۴ تعیین می‌شود و با رسم منحنی توان آن مطابق شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که توربین مورد نظر توانسته است بیشینه توانی در حدود 52 KW در سرعت باد $9/5 \text{ m/s}$ داشته باشد؛ همچنین با محاسبه توان توربین در طول سال، مقدار توان تولیدی سالیانه این توربین در حدود 35 MW.h خواهد بود.

جدول ۴- مشخصات توربین بومی سازی شده برای شهر

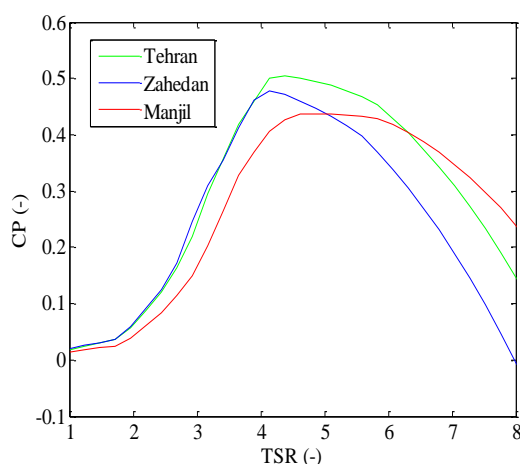
تهران	
مشخصه	مقدار
نوع ایرفویل	ناکا ۰۰۱۵
تعداد پره	۴ عدد
طول وتر پره	$0/45$ متر
قطر روتور	$17/75$ متر
ارتفاع روتور	16 متر
سرعت چرخش روتور	35 دور بر دقیقه

جدول ۶- پتانسیل سرعت باد میانگین سالیانه در ارتفاع ۱۰ متری [۲۷]

قدرت کیفی باد	سرعت باد میانگین سالیانه در ارتفاع
ضعیف	کمتر از $4/5 \text{ m/s}$
متوسط	$4/5 \text{ m/s}$ تا $5/4 \text{ m/s}$
خوب	$5/4 \text{ m/s}$ تا $6/7 \text{ m/s}$
عالی	بیشتر از $6/7 \text{ m/s}$



شکل ۱۶- منحنی توان توربین بومی‌سازی شده برای شهر منجیل



شکل ۱۷- نمودارهای ضریب ضریب توان توربین‌های بومی‌سازی شده

با توجه به شکل ۱۷ می‌توان توربین‌های طراحی شده برای شهرهای زاهدان، تهران و منجیل را مورد مقایسه قرار دارد. مشاهده می‌شود که بازه عملکردی توربین طراحی شده برای منجیل و تهران گسترده‌تر از توربین متناسب با زاهدان است که باعث می‌شود تا این توربین‌ها در سرعت‌های متنوع-تری در مدار کاری قرار گیرند؛ همچنین با مقایسه بیشینه ضریب توان مشاهده می‌شود که توربین طراحی شده برای شهر تهران دارای بیشترین ضریب توان و توربین متناسب با منجیل دارای کمترین ضریب توان نسبت به یکدیگر هستند. در جدول ۷ نیز می‌توان مشخصات اساسی توربین‌های بومی-سازی شده را مورد مقایسه قرار داد.

با مقایسه توزیع سرعت باد شهرهای مورد نظر مشاهده می‌شود که زاهدان با داشتن سرعت باد میانگین سالیانه‌ای برابر $3/77 \text{ m/s}$ نسبت به تهران با سرعت باد میانگین سالیانه 3 m/s دارای برتری است؛ اما از آنجا که این مقادیر سرعت باد با توجه به جدول ۶ جزو مناطق ضعیف از نظر پتانسیل باد است، بنابراین می‌تواند بهره‌برداری از توربین‌های بزرگ را از نظر صرفه اقتصادی با مشکل مواجه کند؛ اما از آنجا که توربین‌های محور عمودی به دلیل استفاده از قطعات کنترلی کمتر، عدم نیاز به برج نگهدارنده و... دارای هزینه کمتری است، لذا با طراحی مناسب و بومی‌سازی این توربین‌ها در ظرفیت‌های پایین و تعداد بیشتر، می‌توان این ضعف را تا حد زیادی برطرف کرد. شهر منجیل با میانگین سرعت باد $6/51 \text{ m/s}$ دارای پتانسیل بادی بسیار خوبی است که منطقه‌ای مناسب برای بهره‌برداری توربین‌های بادی محسوب می‌شود. در نهایت توربین‌هایی با مشخصات هندسی بهبود یافته متناسب با شهرهای مورد نظر معرفی شدند که با توجه به توزیع باد منطقه توانستند بیشینه تولید توان را در طول سال داشته باشند. از آنجا که مساحت جانبی توربین و سرعت چرخش توربین در شهرهای مورد نظر به صورت مشابه انتخاب شده است، پس می‌توان مقایسه خوبی از عملکرد آیرودینامیکی توربین‌ها داشت. این مقایسه در شکل ۱۷ به خوبی نشان داده شده است.

- در ادامه فرض‌های زیر با توجه به مراجع [۲۷] برای متغیرهای ذکر شده در روابط فوق استفاده شده است:
- هزینه اولیه توربین ۱۰۰۰ دلار به ازای هر کیلو وات 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 ۶ درصد قیمت اولیه توربین در نظر گرفته شده است.
 - نرخ تورم معادل ۲۰ درصد در نظر گرفته شده است
 - عمر مفید توربین ۲۵ سال در نظر گرفته شده است.

بنابراین با در نظر گرفتن مقادیر فوق و استفاده از مقادیر تولید انرژی سالیانه (جدول ۷) و جایگذاری آن‌ها در روابط ۱۴ الی ۱۶، می‌توان تخمینی از هزینه تولید انرژی به واسطه توربین بادی محور عمودی در هر یک از شهرها بدست آورد. این مقایسه در جدول ۸ نشان داده شده است.

جدول ۸- مقایسه اقتصادی توربین‌های بومی شده

هزینه اولیه (\$)	هزینه جاری (\$)	هزینه تولید انرژی (\$/KWh)	
۱۹۶۰۰۰	۱۱۷۵۰	۰/۱۴	توربین زاهدان
۷۳۰۰۰	۴۵۰۰	۰/۱	توربین تهران
۸۰۰۰۰۰	۴۸۰۰۰	۰/۰۴۲	توربین منجیل

با مقایسه هزینه‌های هزینه‌های هر یک از توربین‌ها در شهرها، مشاهده می‌شود که هزینه اولیه و جاری توربین منجیل بیشتر از توربین‌های سایر شهرها است؛ چرا که توان تولیدی این توربین بیشتر بوده و به طبع آن نیازمند تجهیزات بزرگتر و گرانتر، همانند ژنراتور است؛ اما در طرف دیگر هزینه تولید هر کیلو وات ساعت انرژی توسط این توربین در شهر منجیل حدود ۰/۰۴۲ دلار بوده، که نسبت به سایر شهرها بسیار کمتر است. با توجه به مرجع [۲۳] و با در نظر گرفتن هزینه اولیه ۳۵۰۰ دلار به ازای هر کیلووات توان توسط یک

جدول ۷- متغیرهای خروجی توربین‌های بومی شده

میانگین توان (KW)	بیشینه توان (KW)	بیشینه ضریب توان	انرژی تولیدی سالیانه (MW.h)	
۷/۸	۱۴۰	۰/۴۸	۷۰	توربین زاهدان
۴/۲	۵۲	۰/۵	۳۵	توربین تهران
۱۱۰	۵۸۰	۰/۴۳	۹۸۰	توربین منجیل

۵- 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. مدیران و سرمایه‌گذاران باید از هزینه‌های اولیه و جاری پروژه و همچنین از مزایا و معایب طرح اطلاع داشته باشند. روش مورد استفاده برای این منظور مطابق مرجع [۲۶] به شرح زیر است:

هزینه تولید توان توربین به دو قسمت هزینه اولیه و هزینه جاری، مانند هزینه‌های تعمیر و نگهداری تقسیم می‌شود. در رابطه ۱۴، C_I بیانگر هزینه اولیه توربین، و C_{OM} هزینه‌های جاری پروژه بوده که به صورت ضریبی (m) از هزینه اولیه توربین تعریف می‌شود.

$$C_{OM} = mC_I \quad (14)$$

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 ۱۵ بیان کرد.

$$NPV = \frac{C_I}{n} \left[1 + m \left(\frac{(1+I)^n - 1}{I(1+I)^n} \right) \right] \quad (15)$$

در نهایت، با توجه به تولید انرژی سالیانه (AEP) هر توربین، می‌توان مقدار هزینه لازم به ازای هر کیلو وات ساعت انرژی را با کمک رابطه ۱۶ محاسبه کرد.

$$C = \frac{NPV}{AEP} \quad (16)$$

توربین محور افقی و همچنین استفاده از شریط یکسان اقلیمی برای شهر منجیل، مشاهده می‌شود که هزینه هر کیلو وات تولید انرژی توسط این نوع توربین در حدود ۰/۰۴ دلار خواهد بود. این مقدار از هزینه را می‌توان تقریباً برابر توربین محور عمودی بومی‌شده دانست.

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه بررسی آماری سرعت باد در سه سال اخیر (۲۰۱۸ الی ۲۰۲۰) در شهرهای زاهدان، تهران و منجیل در ارتفاع‌های متفاوت انجام شد. ارزیابی توزیع سرعت باد در این شهرها نشان داد که زاهدان دارای سرعت میانگین سالیانه بیشتری نسبت به تهران بوده، نهایتاً با توجه به احتمال رخداد سرعت‌های باد مختلف، پتانسیل بادی زاهدان در حدود $98 W/m^2$ است. این مقدار نسبت به تهران با پتانسیل بادی $54 W/m^2$ از برتری نسبی برخوردار می‌باشد. همچنین شهر منجیل دارای پتانسیل بادی حدود $1100 W/m^2$ بوده و نسبت به دو شهر دیگر برتری نسبی دارد. به منظور بومی‌سازی توربین‌های بادی محور عمودی نیز متناسب با شهرهای مورد نظر، تغییراتی در هندسه توربین‌ها ایجاد شد تا بتوان بیشترین توان را در طول سال از انرژی باد منطقه دریافت کرد.

توربین بومی شده برای زاهدان با تولید توان میانگین $7/8 KW$ توانست در طول سال انرژی معادل $70 MW.h$ تولید کند که این مقدار حدود ۲۸ درصد از کل انرژی موجود در باد این ناحیه است. با تغییر دادن این توربین و بومی‌سازی آن متناسب با شهر تهران نیز مشاهده شد که می‌توان میانگینی معادل $4/2 KW$ تولید کرد که این مقدار برابر $35 MW.h$ انرژی در طول سال بوده و ۲۷ درصد از کل انرژی موجود در باد این ناحیه است. به طور مشابه برای شهر منجیل تولید توان میانگین توربین مورد نظر معادل $110 KW$ و انرژی سالیانه $980 MW.h$ بوده که این مقدار حدود ۳۷ درصد از انرژی موجود در باد منطقه است. با در نظر گرفتن سرانه مصرف انرژی برق معادل $3 MW.h$ برای هر ایرانی در طول سال (با صرف نظر از محل سکونت) می‌توان بیان کرد که هر توربین بادی بومی شده در زاهدان می‌تواند مصرف برق ۲۳ نفر را تامین کند؛ این مقدار برای شهر تهران و توربین متناسب با آن معادل ۱۲ نفر و برای منجیل در حدود ۳۲۵ نفر است.

از نظر اقتصادی نیز مشاهده شد که هر چند هزینه توربین در شهر منجیل نسبت به دو شهر دیگر بیشتر است، اما هزینه تولید انرژی به ازای هر کیلو وات معادل ۰/۰۴ دلار بوده که بسیار کمتر از زاهدان و تهران است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که شهر منجیل و توربین بومی‌شده آن هم از نظر فنی و هم از نظر اقتصادی می‌تواند نسبت به دو شهر دیگر ارجحیت داشته باشد. پیشنهاد می‌شود که در راستای بهبود بومی‌سازی این نوع توربین‌ها و افزایش توان تولیدی در طول سال تغییراتی در سیستم کنترلی توربین‌ها اعمال شود تا مشخصات هندسی توربین متناسب با شرایط جوی منطقه تغییر کرده و بتوان بازه عملکردی توربین را گسترش داد تا نهایتاً مقدار انرژی دریافتی باد در طول سال را افزایش داد؛ همچنین ترکیب این کد تحلیلی با روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و الگوریتم ژنتیک می‌تواند گام بعدی در بهینه‌سازی روش مورد نظر باشد.

مراجع

- [1] Eskin N, et al. (2008). Wind energy potential of Gökçeada Island in Turkey. RSER. Rev. vol 12. pp 839-51.
- [2] Kumar A, Prasad S. (2010). Examining wind quality and wind power prospectson Fiji Islands. Renew Energy. Vol 35. pp 536-40.
- [3] Chaparzadeh, Feseqandis R.(1999). Feasibility of applying wind turbine for achieving sustainable development. National conference of energy. vol 2.
- [4] Akdag SA, Guler O . (2010). Evaluation of wind energy investment interest and electricity generation cost analysis for Turkey. Appl Energy. vol 87. pp 2574-80.
- [5] Ucar A, Balo F. (2009). Evaluation of wind energy potential and electricity generation at six locations in Turkey. Appl Energy. vol 86. pp1864-72.
- [6] Fyrippis I, et al. (2010) Wind energy potential assessment in Naxos Island, Greece. Appl Energy. vol 87. pp 577-86.
- [7] Xydis G, et al. (2009). Exergy analysis in a wind speed prognostic model as a wind farm sitting selection tool: a case study in Southern Greece. Appl Energy. vol 86. pp 2411-20.

- [23] Mostafaeipour A, et al. (2014). An analysis of wind potential and economic evaluation in Zahedan, Iran. *RSER*. pp 641-650
- [24] Keyhani A, et al. (2010). An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran. *Energy*. vol 35. pp 188–201.
- [25] Mostafaeipour A, A barghooei H. (2008). Harnessing wind energy at Manjil area located in north of Iran. *RSER*. vol 12. pp 1758–66
- [26] Mathew, S. (2006). *Wind energy: fundamentals, resource analysis and economics* (Vol. 1). Berlin: Springer.
- [27] Jafari, M., Razavi, A., & Mirhosseini, M. (2018). Effect of airfoil profile on aerodynamic performance and economic assessment of H-rotor vertical axis wind turbines. *Energy*, 165, 792-810.
- [8] Weigt, H. (2009). Germany's wind energy: The potential for fossil capacity replacement and cost saving. *Appl Energy*, 86(10), 1857-1863.
- [9] Bekele G, Palm B. (2009). Wind energy potential assessment at four typical locations in Ethiopia. *Appl Energy*. vol 86. pp 388–96.
- [10] Jowder FAL. (2009). Wind power analysis and site matching of wind turbine generators in Kingdom of Bahrain. *Appl Energy*. vol 86. pp 538–45.
- [11] Elhadidy MA, Shaahid SM. (1999). Feasibility of hybrid (Wind | Solar) power systems for Diihnan, Saudi Arabia. *Renew Energy*. vol 16. pp 970–6.
- [12] DaniloFeretić, et al. (1999). Feasibility analysis of wind-energy utilization in Croatia. *Energy*. vol 24. pp 239–46.
- [13] Mirhosseini M, et al. (2011). Assessing the wind energy potential locations in province of Semnan in Iran. *RSER*. vol 15. pp 449–59.
- [14] Mostafaeipour A, et al. (2011). Wind energy feasibility study for city of Shahrabak in Iran. *RSER*. vol 15. pp 2545–56.
- [15] Ghorashi AH, Rahimi A. (2011). Renewable and non-renewable energy status in Iran: art of know-how and technology gap. *RSER*. vol 15(1). pp 729–36.
- [16] Alamdari P, et al. (2012). Assessment of wind energy in Iran: a review. *RSER*. vol 16(1). pp 836–60.
- [17] Mostafaeipour A. (2010). Feasibility study of harnessing wind energy for turbine installation in province of Yazd in Iran. *RSER*. vol 14 (1). pp 93–111.
- [18] Mostafaeipour A. (2013). Economic evaluation of small wind turbine utilization in Kerman. *ECM*. vol 73. pp 214–25.
- [19] Mousavi SM, et al. (2012). The competitiveness of wind power compared to existing methods of electricity generation in Iran. *Energy Policy*. vol 42. pp 651–6.
- [20] Roy, S., Branger, H., Luneau, C., Bourras, D., & Paillard, B. (2017). Design of an offshore three-bladed vertical axis wind turbine for wind tunnel experiments. *Conference on Offshore*. vol 42
- [21] Moghimi M, Motawej H. (2018). Developed DMST model for performance analysis and parametric evaluation of Gorlov vertical axis wind turbines. *SETA*. vol 37
- [22] Paraschivoiu I, et al. (2009). H-Darrieus wind turbine with blade pitch control. *International J. Rotat Machner*.