

## طراحی نیروگاه ۱۰ مگاواتی بادی در محل دانشگاه آزاد اسلامی واحد نائین با رویکرد بهینه‌سازی چند هدفه

امید پیریایی<sup>۱\*</sup>، مهدی مهدویان<sup>۲</sup>

\*۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه برق، واحد نائین، دانشگاه آزاد اسلامی، نائین، ایران، pi\_om90@yahoo.com

۲- عضو هیات علمی گروه برق، واحد نائین، دانشگاه آزاد اسلامی، نائین، ایران، meh\_mahdavian@yahoo.com

**چکیده:** در این مقاله به امکان‌سنجی و طراحی نصب یک واحد ۱۰ مگاواتی در منطقه‌ی نائین اصفهان می‌پردازیم. این طراحی شامل سه تابع هدف می‌باشد. اهداف مورد نظر در این مقاله شامل کمترین هزینه نصب، راه‌اندازی، هزینه‌های خرید توربین، و اتصال به شبکه هستند و همچنین شامل بیشترین تولید سالیانه به همراه بهترین قابلیت اطمینان برای توربین‌ها می‌باشند. مدل پیشنهادی در قالب یک مسئله‌ی بهینه‌سازی چند هدفه ارائه و جهت دستیابی به دسته‌ی جواب‌های قابل قبول از الگوریتم NSGA-II استفاده شده است. در بخش‌های نهایی بهترین مجموعه‌ی توربین‌ها را با استفاده از الگوریتم مورد استفاده مکان‌یابی بهینه می‌کنیم. این مکان‌یابی در محدوده‌ی دانشگاه آزاد اسلامی واحد نائین انجام می‌پذیرد.

**واژه‌های کلیدی:** قابلیت اطمینان، توربین بادی، نیروگاه بادی، بهینه‌سازی چند هدفه، NSGA-II

### ۱- مقدمه

اتوماتیک ولتاژ (AVR)، کنترل سوخت و گاورنر تنظیم کرد. اما در نیروگاه‌های بادی با توجه به متغیر بودن باد، توان ورودی و خروجی مانند نیروگاه‌های سوخت فسیلی کاملاً در اختیار ما نمی‌باشد، که این تفاوت باعث شده تجهیزات کنترلی و ژنراتورهای توربین‌های بادی نسبت به نیروگاه‌های فسیلی متفاوت باشند. حال که با اهمیت انرژی باد بیشتر آشنا شدیم لازم به ذکر است که برای پیشبرد هدف اصلی در این مقاله لازم است که مطالعات باد منطقه انجام شود تا در راستای مکان‌یابی بهینه برای نصب توربین‌های انتخابی ابزاری قدرتمند در دست داشته باشیم. با توجه به اهمیت مطالعات بادی منطقه نائین با همکاری ایستگاه هواشناسی این منطقه اطلاعات لازم که از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار است دریافت شده است که شامل گلبادها، سرعت، ارتفاع و سایر اطلاعات مورد نیاز برای این مقاله می‌باشد. در این مقاله تلاش شده تا با بررسی دقیق و مطالعه‌ی توربین‌های شرکت‌های مختلف بهترین و کم‌هزینه‌ترین توربین‌ها انتخاب شوند. با توجه به کارهای انجام شده نمونه در جهان امکان‌سنجی و طراحی توربین‌ها

با توجه به اینکه جهان امروز رو به پیشرفت است و این پیشرفت نیازمند انرژی می‌باشد. و اینکه انرژی‌های فسیلی نیز رو به اتمام هستند، در نتیجه تمدن بشری نیز در خطر اتمام انرژی می‌باشد. به همین دلیل بسیاری از کشورهای پیشرفته جهان به دنبال راه‌های استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر هستند. این انرژی‌ها شامل باد، انرژی خورشید، گرمای درون زمین و جزو و مد دریاها می‌باشند انرژی باد با توجه به در دسترس بودن و نداشتن هیچ‌گونه آلودگی زیست محیطی و بصره بودن از لحاظ اقتصادی در زمان‌های طولانی بهترین گزینه نسبت به سایر انرژی‌ها می‌باشد. از اصلی‌ترین نکات نیروگاه‌های بادی نحوه کنترل توان ورودی یا محرک گرداننده توربین می‌باشد که این نیروگاه‌ها را از سایر نیروگاه‌ها متمایز کرده است. این در حالی است که در نیروگاه‌هایی با سوخت فسیلی خروجی نیروگاه را می‌توان با

در این معادله،  $C$  را فاکتور مقیاس و  $k$  را فاکتور شکل می‌نامند.  $f(v)$  نیز احتمال سرعت باد برای سرعت  $v$  را نشان می‌دهد. می‌توان گفت که پارامتر  $C$  نشان‌دهنده‌ی این است که به طور کلی یک منطقه چقدر باد خیز است. درحالی که پارامتر  $k$  نشان‌دهنده‌ی این است که تابع توزیع سرعت باد تا چه اندازه‌ی دارای قله می‌باشد. استفاده از تابع توزیع ویبول مستلزم آن است که در ابتدا مقادیر  $k$  و  $C$  معلوم شود. توربین‌های بادی با یک سرعت cut-in شروع به تولید توان می‌کنند و هنگامی که سرعت آن‌ها به سرعت cut-out برسد، از حرکت می‌ایستند تا به آن‌ها آسیبی نرسد. اکثر توربین‌های بادی موجود در بازار در بازه‌ی ۳ تا ۲۵ متر بر ثانیه توانایی تولید توان دارند. توان بادی که با سرعت  $v$  بر سطح جاروب شده‌ی  $A$  توسط پره می‌وزد، با مکعب سرعت باد و مطابق با رابطه‌ی زیر متناسب است.

$$P(V) = 0.5 \rho A V^3 \quad (2)$$

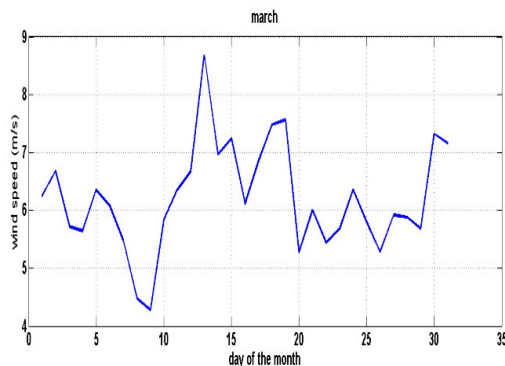
در این رابطه،  $\rho$  چگالی هوا در سطح دریا با میانگین دمای ۱۵ درجه‌ی سلسیوس و فشار یک اتمسفر می‌باشد.  $V$  نیز در این رابطه معرف سرعت متوسط باد می‌باشد.

$$\rho = \frac{\bar{P}}{R_d \bar{T}} \quad (3)$$

در این رابطه  $R_d$  ثابت گاز برای هوای خشک می‌باشد. مقدار آن برابر با  $287 \text{ J/Kg.K}$  می‌باشد.

## ۲-۱- تجزیه و تحلیل سرعت باد منطقه ناین

میانگین سرعت وزش باد در ایستگاه ناین در ماه‌های مختلف سال:



شکل (۱) منحنی سرعت وزش باد بصورت میانگین در یک سال

جدول (۱) میانگین سرعت وزش باد در ایستگاه ناین در ماه‌های مختلف سال

بر حسب m/s												
ژوئن	۴/۰۱۲۳۲	می	۳/۹۶۰۸۸	آوریل	۴/۰۱۲۳۲	مارس	۳/۹۶۰۸۸	فوریه	۳/۹۶۰۸۸	ژانویه	۳/۹۳۲۰۸	اصلی
دسامبر	۲/۸۲۹۲	نوامبر	۳/۰۸۶۴	اکتبر	۳/۰۸۶۴	سپتامبر	۳/۴۹۷۹۲	اگوست	۳/۷۰۳۶۸	ژولای	۴/۰۱۲۳۲	اصلی

همان‌طور که مشاهده می‌کنید، میانگین سرعت باد در منطقه ناین در ماه‌های مختلف سال متفاوت است و در بازه‌ی بین  $2/82$  تا  $4/21$  تغییر می‌کند. این میانگین سرعت برای همه‌ی لحظات است. حال

برای منطقه ناین از پیچیدگی خاصی برخوردار بود. برای نمونه در [۱۰] با توجه به اینکه میانگین سرعت باد قابل ملاحظه بود، جانمایی توربین‌ها با توجه به وسعت منطقه و نداشتن موانع از جمله درختان و ساختمان‌ها کار پیچیده‌ای نبود. با توجه به [۱۲] در این مقاله امکان استفاده از چند توربین از شرکت‌های متفاوت را برای ما فراهم می‌آورد. در [۵] ما با مناطق باد خیز ایران آشنا می‌شویم. با توجه به اینکه در سایر نقاط امکان سنجی‌ها با توجه به مطالعات ایستگاه هواشناسی و سازمان محیط زیست انجام می‌پذیرد با توجه به آشنایی به منطقه ناین و مطالعات بادی منطقه اقدام به انجام پروژه شده است. در سایر منابع استفاده شده در مقاله سعی کرده ایم تا کارهای جدید و موفق در این زمینه به عنوان پیش زمینه کار انتخاب شود تا بتوان نتیجه‌ی نهایی را قابل اطمینان ارزیابی کرد. در این مقاله سعی شده است تا از انتخاب توربین‌ها تا جانمایی آن‌ها در منطقه طبق مطالعات دقیق انجام پذیرد. با توجه به باد خیز بودن منطقه و قابل استحصال بودن انرژی در این مقاله سعی شده که همه‌ی انرژی تولیدی به شبکه اصلی تزریق و از این طریق برای دانشگاه درآمد زایی شود. با توجه به اینکه در منطقه ناین هیچگونه اقدامی برای نصب توربین انجام نشده است در نتیجه مطالعات خاصی لازم بود تا امکان سنجی و طراحی برای این کار مهم انجام پذیرد. در نتیجه برای این کار به اطلاعات ثبت شده در ایستگاه هواشناسی ناین نیاز داشتیم. با در دست داشتن اطلاعات بادی ناین توربین‌های مورد نظر توسط الگوریتم زنتیک ثر محوطه‌ی دانشگاه جانمایی شد. این جانمایی با توجه به موانع ساختمانی که به عنوان قیود در برنامه در نظر گرفته شده بود انجام شده است.

## ۲ - تابع توزیع احتمالاتی سرعت باد

قبل از به دست آوردن تابع احتمالاتی سرعت باد باید اطلاعات را دسته‌بندی کنیم. بدین منظور اطلاعاتی از ایستگاه هواشناسی جمع‌آوری شده است. مطابق با این اطلاعات، سرعت باد برای همه‌ی روزهای سال و به مدت ۵ سال مشخص می‌باشد. لازم به ذکر است که این اطلاعات مربوط به سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۴ میلادی می‌باشد و از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار است. به منظور مرتب کردن داده‌ها ابتدا سرعت باد برای ماه‌های یکسان را در کنار هم قرار داده و سپس میانگین سرعت باد در هر روز را محاسبه می‌کنیم. با داشتن میانگین سرعت باد در روزهای مختلف سال، می‌توان نسبت به محاسبه و به دست آوردن تابع توزیع احتمالاتی سرعت باد در ناحیه‌ی موردنظر اقدام کرد. برای مدل‌سازی تابع توزیع احتمالاتی سرعت باد از تابع چگالی احتمالاتی ویبول استفاده می‌کنند. اگر  $v$  را به عنوان یک متغیر تصادفی در نظر بگیریم، تابع توزیع احتمالاتی ویبول مطابق با معادله‌ی زیر است:

$$f(v) = (k/c) \times (v/c)^{k-1} \times \exp(-(v/c)^k) \quad (1)$$

لازم به تذکر است که این نمودار با استفاده از اطلاعات سرعت باد در بلندمدت رسم شده است. جهت درک بهتر این موضوع، لازم است که گفته شود این نمودار با استفاده از اطلاعات ثبت شده در طی سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۸ میلادی رسم شده است. با توجه به گلباد، باد غالب نایب غربی می‌باشد.

## ۲-۲- معرفی و بررسی توربین‌ها

از اینجا به بعد به بررسی میزان انرژی استحصال شده از چندین نوع مختلف توربین بادی می‌پردازیم. این توربین‌ها از شرکت وستاس، گمسا و جی ای انرژی انتخاب شده‌اند. با توجه به اینکه این توربین‌ها هر یک دارای یک منحنی تولید می‌باشند، ما در این بخش با توجه به سرعت باد منطقه در ارتفاع‌های مختلف و از طریق تابعی که نرم‌افزار MATLAB برای هر کدام از توربین‌ها به ما می‌دهد، می‌توانیم تولید سالیانه آنها را محاسبه کنیم. در نتیجه در ادامه برای به دست آوردن نقاط بهینه، از نظر یکی از توابع هدف که بیشترین تولید سالیانه می‌باشد، می‌توان با دقت عمل بهتر و قوی‌تری این کار را انجام داد.

توربین‌های انتخاب شده با توجه به بروشوری که شرکت سازنده در اختیار مشتری قرار داده است دارای مشخصاتی از قبیل سرعت  $C_{ut\ in}$  و  $C_{ut\ out}$ ، کلاس بادی، توان مورد استحصال از توربین، ارتفاع هاب، ارتفاع ژنراتور و بسیاری از ویژگی‌ها و مشخصات فنی مورد نیاز را در اختیار ما قرار می‌دهد. در جدول زیر ۱۴ نوع توربین با ظرفیت‌ها، ارتفاع نصب و مدل توربین نمایش داده شده‌اند:

جدول (۳) توربین‌های مورد بررسی

ظرفیت (MW)	ارتفاع برج (m)	شرکت سازنده
۲	۸۰	وستاس
۲	۹۵	وستاس
۲	۱۰۵	وستاس
۲	۸۰	وستاس
۲	۹۵	وستاس
۲	۸۰	وستاس
۲	۹۵	وستاس
۲	۱۱۰	وستاس
۲	۱۲۰	وستاس
۲	۱۲۵	وستاس
۳	۹۴	وستاس
۳	۱۱۹	وستاس
۱/۵	۹۸	جی ای انرژی
۵	۸۰	گمسا

در قسمت قبل نیز گفته شد که برای اینکه تولید سالیانه هر کدام از توربین‌ها را بدست آوریم نیاز به منحنی توربین‌هایی داریم که در بروشور شرکت‌ها به ما داده شده است تا بتوان قابل‌دریافت در طول سال به دست آید. برای این کار، ما به اطلاعاتی از قبیل چگالی هوای تصحیح شده در ماه‌های مختلف سال در منطقه‌ی نائین و میانگین

اینکه حداقل سرعت باد برای شروع تولید واحدهای بادی در حدود ۵ m/s می‌باشد. اما با توجه به اینکه داده‌های فوق برای میانگین سرعت باد است، باید داده‌های دیگری هم باشند که نشان‌دهنده‌ی سرعت دقیق باد در ساعت‌های مختلف از شبانه‌روز باشند. اما در همین جا می‌توان دریافت که منطقه‌ی نائین از سرعت باد مناسبی در طول سال برخوردار است و می‌تواند به عنوان یک منطقه‌ی مناسب جهت تولید بادی مورد تجزیه و تحلیل بیشتر قرار گیرد.

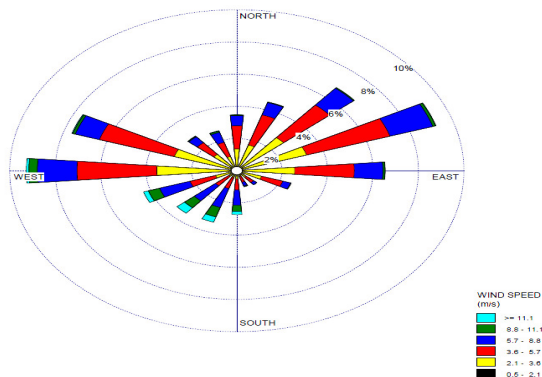
در ایستگاه‌های هواشناسی، بادسنج‌ها را در ارتفاع ۱۰ متری از سطح ایستگاه نصب می‌کنند. اما برج توربین‌های بادی ارتفاعی بیش از ۸۰ متر را دارا می‌باشند. بدین منظور با استفاده از رابطه‌ی زیر می‌توان سرعت باد را در ارتفاع‌های بالاتر محاسبه کرد.

$$V_2 = V_1 \ln(Z_2/Z_0)/\ln(Z_1/Z_0) \quad (۴)$$

جدول (۲) میانگین سرعت باد در ارتفاع‌های بالاتر

ارتفاع (m)	میانگین سرعت باد (m/s)
۱۰	۵/۳۵۳۵
۲۰	۶/۵۰۶۳
۳۰	۷/۱۸۰۷
۴۰	۷/۶۵۹۲
۵۰	۸/۰۳۰۳
۶۰	۸/۳۳۳۵
۷۰	۸/۵۸۹۹
۸۰	۸/۸۱۲۰
۹۰	۹/۰۰۷۹
۱۰۰	۹/۱۸۳۱
۱۱۰	۹/۳۴۱۶
۱۲۰	۹/۴۸۶۳
۱۲۵	۹/۵۵۴۲

همانطور که مشاهده می‌کنید، با افزایش ارتفاع، میانگین سرعت باد نیز بالاتر می‌رود و این یعنی افزایش میزان انرژی باد در ارتفاع‌های بالا. با همکاری سازمان هواشناسی و استفاده از اطلاعات ثبت شده در ایستگاه، نمودار گلباد ایستگاه نائین رسم شده است:



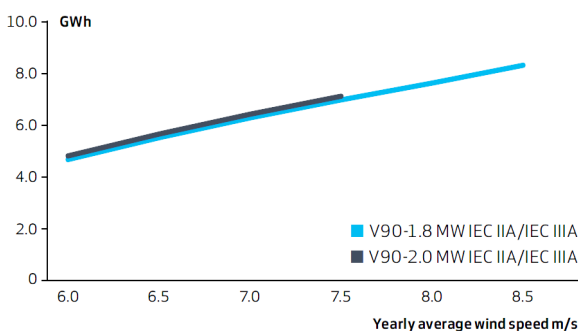
شکل (۲) نمودار گلباد بلند مدت ایستگاه نائین

همان‌طور که مشاهده می‌کنید میزان توان قابل استحصال از انرژی باد در ماه‌های مختلف، با هم تفاوت دارد. این تفاوت در توان وابسته به شرایط جوی منطقه، از جمله سرعت باد می‌باشد. مطابق جدول فوق، بیشترین توان قابل تولید در ماه مارس میلادی می‌باشد. اگر کل اعداد را با هم جمع کنیم، کل توان باد در طی یک سال برابر با  $810.1644 \times 8760 = 7079$  J می‌باشد. با ضرب این عدد در تعداد ساعات یک سال، انرژی کل باد در طی یک سال به دست می‌آید:

$$810.1644 \times 8760 = 7079 \text{ J} \quad (5)$$

البته این انرژی مربوط به یک متر مربع در ارتفاع ۸۰ متری از سطح زمین می‌باشد. همچنین سهم بسیاری از این انرژی در سرعت‌های پایین اتفاق می‌افتد و امکان استفاده و تبدیل آن به انرژی الکتریکی نمی‌باشد. میزان انرژی قابل استحصال توسط توربین‌های بادی، علاوه بر سرعت و تداوم باد به عواملی همچون راندمان توربین، ارتفاع دکل، دایره چرخش پره‌ها (سطح جاروب شده) و... وابسته است. برای توربین‌های شرکت وستاس، یک نمودار تولید انرژی سالیانه رسم شده است. با استفاده از این نمودار می‌توان میزان انرژی تولیدی در یک سال را به صورت تقریبی به دست آورد. نمودار مربوط به توربین نوع اول که مورد بررسی قرار گرفته است به صورت شکل زیر می‌باشد:

#### ANNUAL ENERGY PRODUCTION



شکل (۳) تولید سالیانه‌ی توربین وستاس ۲ مگاواتی در ارتفاع ۸۰ متری بر حسب میانگین سرعت سالیانه‌ی باد

اما آنچه در این نمودار به‌عنوان فرض اولیه در نظر گرفته شده است، این است که سرعت میانگین مورد استفاده در این نمودار در ارتفاع پره‌ها باشد و همواره وزش باد را در محدوده‌ی مورد نظر داشته باشیم. پس برای استفاده از این نمودار کفایت سرعت متوسط باد در ارتفاع ۸۰ متری از سطح زمین را در نظر بگیریم و از روی نمودار میزان تولید آن را به دست آوریم. البته پس از آن باید ببینیم که آیا همواره در این ارتفاع سرعت باد از سرعت cut-in بیشتر است یا نه؟ اگر مواقعی سرعت باد در محدوده‌ی مورد نظر نبود، احتمال آن‌ها را در انرژی تولیدی ضرب کنیم و مقدار به دست آمده را از کل توان تولیدی کم کنیم.

سرعت باد در ارتفاع مورد نظر از سطح زمین در ماه‌های مختلف سال در منطقه‌ی نائین نیازمندیم که با توجه به رابطه‌ی (۲) و (۳) با وارد کردن اطلاعات ثبت شده در ایستگاه هواشناسی در نرم‌افزار MATLAB، به محاسبه‌ی آن‌ها پرداخته می‌شود. نتایج به دست آمده به صورت جدول زیر است که نتایج به‌دست آمده را در ارتفاع ۸۰ متری از سطح دریا برای توربین نوع وستاس با ظرفیت ۲ مگا وات نشان می‌دهد:

جدول (۴) میانگین سرعت باد در ارتفاع ۸۰ متری در ماه‌های مختلف سال

ماه	چگالی هوای تصحیح شده (کیلوگرم بر متر مکعب)	میانگین سرعت در ارتفاع ۸۰ متری (m/s)
ژانویه	۰/۴۶۷۱	۷/۵۸۲۳
فوریه	۰/۳۹۵۸	۸/۳۹۹۴
مارس	۰/۲۲۱۳	۱۰/۲۲۱۸
آوریل	۰/۱۵۶۵	۹/۵۸۶۴
می	۰/۱۲۰۰	۹/۳۳۱۳
ژوئن	۰/۰۹۸۲	۹/۱۷۰۵
ژولای	۰/۰۹۱۲	۹/۴۱۳۱
آگوست	۰/۰۹۸۸	۸/۹۷۹۸
سپتامبر	۰/۱۱۱۰	۹/۳۳۱۸
اکتبر	۰/۱۴۶۷	۸/۵۷۸۴
نوامبر	۰/۲۶۷۲	۷/۳۸۲۹
دسامبر	۰/۴۲۰۰	۷/۷۶۶۰

همان‌طور که مشاهده می‌شود، میانگین سرعت در هر ماه، بیشتر از سرعت cut-in می‌باشد. با توجه به اینکه همه‌ی موارد مورد نیاز برای استفاده از رابطه‌ی (۳) در دسترس است، به محاسبه‌ی توان قابل استحصال در هر ماه می‌پردازیم. با استفاده از رابطه‌ی (۳) نتایج زیر حاصل می‌شود. این اعداد نشان دهنده‌ی میزان انرژی باد در هر متر مربع در سال می‌باشد.

جدول (۵) میزان توان قابل استحصال در هر ماه

ماه	میزان توان قابل استحصال در هر ماه (MW)
ژانویه	۱۰۱/۸۱۰۵
فوریه	۱۱۷/۲۸۲۷
مارس	۱۱۸/۱۹۳۰
آوریل	۶۸/۹۳۹۷
می	۴۸/۷۴۱۱
ژوئن	۳۷/۸۵۸۵
ژولای	۳۸/۰۵۰۴
آگوست	۳۵/۷۷۲۰
سپتامبر	۴۵/۰۸۷۱
اکتبر	۴۶/۳۰۲۰
نوامبر	۵۳/۷۶۵۵
دسامبر	۹۸/۳۶۱۹

همان‌طور که مشاهده می‌کنید، بیشترین احتمال رخداد سرعت در بازه‌ی بین ۷ تا ۱۲ متر بر ثانیه است. با محاسبه‌ی احتمال رخداد سرعت در بازه‌ی ۴ تا ۲۵ متر بر ثانیه، می‌توان واقعاً که در عمل قابل تولید است را محاسبه کرد. نتایج محاسبات در نرم‌افزار

MATLAB به صورت شکل زیر می‌باشد:  
probability of wind speed between 0 and 4 is 0/0378 and the probability of wind speed between 4 to 25 is 0/9622

همان‌طور که مشاهده می‌شود، احتمال رخداد سرعت در بازه‌ی ۴ تا ۲۵ متر بر ثانیه برابر ۰/۹۶۲۲ است. پس جهت به دست آوردن مقدار واقعی تولید انرژی سالیانه، باید این عدد را در GWh سالیانه ضرب کنیم.

$$0.9622 \times 31.8686 = 30.6640 \quad (۸)$$

همان‌طور که مشاهده می‌کنید، میزان تولید سالیانه برای این توربین چیزی در حدود ۳۰ GWh می‌باشد.

همه‌ی این محاسبات لازم است برای تک تک توربین‌ها انجام شود. نتیجه‌ی این محاسبات در جدول زیر برای چهارده نوع توربین در ارتفاع‌های مختلف آمده است:

جدول (۶) جمع‌بندی توربین‌های بررسی شده

نام توربین	ارتفاع برج (m)	تولید سالیانه (GWh)
وستاس	۸۰	۳۰/۶۶۴۰
وستاس	۹۵	۳۱/۲۴۷۸
وستاس	۱۰۵	۳۱/۹۰۲۷
وستاس	۸۰	۴۹/۷۸۱۴
وستاس	۹۵	۵۰/۹۸۳۵
وستاس	۸۰	۵۷/۶۴۸۱
وستاس	۹۵	۵۹/۷۹۳۶
وستاس	۱۱۰	۶۲/۱۴۶۲
وستاس	۱۲۰	۶۳/۳۸۲۴
وستاس	۱۲۵	۶۴/۰۱۰۷
وستاس	۹۴	۴۵/۳۰۴۶
وستاس	۱۱۹	۴۸/۳۳۹۲
جی ای	۹۸	۳۰/۹۷۱۶
گمسا	۸۰	۳۷/۱۱۷۰

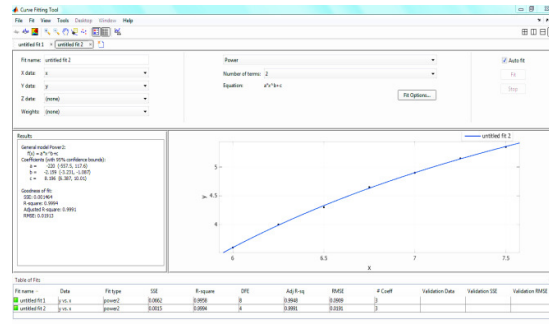
اگر بنا به انتخاب یکی از توربین‌های جدول فوق را داشته باشیم، به نظر می‌آید که بهترین انتخاب توربین نوع شماره ۱۰ می‌باشد. این توربین دارای میزان تولید سالیانه‌ی بسیار بالاتری از سایر مدل‌ها می‌باشد.

### ۲-۳- محاسبه هزینه‌ها

هزینه‌های در نظر گرفته در این مقاله به سه دست تقسیم می‌شوند.

- هزینه خرید که به هزینه لازم جهت خریداری و دریافت هرکدام از توربین‌های پیشنهادی بستگی دارد. این هزینه

اما مطابق با یافته‌های قبلی، سرعت متوسط باد در ارتفاع ۸۰ متری برابر با ۸/۸۱۲۰ متر بر ثانیه است. این عدد بر روی نمودار در نظر گرفته نشده است. بنابراین با استفاده از نرم‌افزار MATLAB مجبور به برون‌گرایی از این نمودار هستیم. نتایج بدست آمده تابع (۶) است که نرم‌افزار MATLAB به ما می‌دهد و در آن X سرعت متوسط سالانه باد در ارتفاع مورد نظر توربین است:



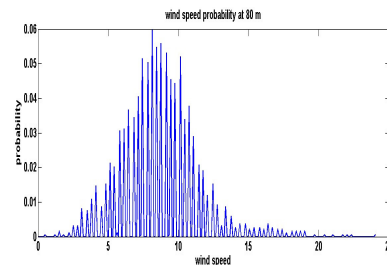
شکل (۴) استفاده از جعبه ابزار Curve Fitting جهت به دست آوردن تابعی برای نمودار تولید سالیانه‌ی توربین وستاس ۲ مگاواتی در ارتفاع ۸۰ متری بر حسب میانگین سرعت سالیانه‌ی باد

بهترین پاسخی که برای نقاط مورد نظر به دست آمد، تابعی است به صورت معادله‌ی زیر که می‌توان عدد ۸/۸۱۲۰ را در آن گذاشت و مقدار تقریبی تولید توان را از آن به دست آورد.

$$f(x) = -200x^{-2.159} + 8.196 \quad (۶)$$

$$f(x) = 6.3737 \quad (۷)$$

با توجه به یافته‌ها می‌توان مقدار تقریبی توان تولیدی را برای هر توربین در سال ۶۳۷۳۷ GWh برآورد کرد. با توجه به اینکه در این امکان‌سنجی، از ۵ توربین استفاده می‌شود، انرژی سالیانه‌ی تولیدی برابر با ۳۱۸۶۸۶ GWh می‌باشد. این عدد به شرطی است که میزان سرعت باد همواره در محدوده‌ی بین سرعت cut-in و cut-out باشد. پس باید به بررسی احتمال خداد سرعت در این محدوده بپردازیم. این کار نیز با استفاده از نرم‌افزار MATLAB قابل انجام است. نمودار احتمال رخداد سرعت در ارتفاع ۸۰ متری از سطح زمین به صورت زیر است:



شکل (۵) احتمال رخداد سرعت باد در ارتفاع ۸۰ متری از سطح زمین در منطقه‌ی نائین

جدول (۷) مربوط به مشخصات و هزینه‌های ۱۴ توربین مورد نظر که شامل هزینه‌های تولید، هزینه‌های ثابت سرمایه‌گذاری و سایر هزینه‌های مد نظر در این پروژه ی طراحی می باشد. با توجه به اینکه در ادامه روند کار باید کمترین هزینه‌ها ملاک انتخاب مجموعه توربین‌ها باشد، لذا با در دست داشتن این هزینه اقدام به انتخاب بهینه‌ترین توربین خواهیم کرد.

## ۲-۴- مکان یابی بهینه

مکان احداث مزرعه بادی باید دارای ویژگی‌های زیر باشد:

- در منطقه مسکونی نباشد؛ زیرا آلودگی صوتی ناشی از توربین‌ها می‌تواند منجر به نارضایتی و آزار ساکنان منطقه شود.
- زمین منطقه به گونه‌ای باشد که توانایی تحمل وزن توربین و فشار ناشی از گشتاور باد را داشته باشد.
- در مجاورت درختان و حیوانات نباشد.

با توجه به اینکه توربین‌ها باید در محوطه‌ی ۳۰ هکتاری دانشگاه نصب شوند و مکان‌یابی در این محوطه می‌باشد، می‌بایست مختصات ساختمان‌ها و مشخصات آن‌ها به عنوان قیود در دسترس باشند. زیرا نقاط نصب بهینه نباید روی ساختمان‌ها قرار بگیرند. از قیود دیگر نقاط بهینه نزدیک بودن به پست برق است که در برنامه‌نویسی لحاظ شده است.



شکل (۶) نقشه‌ی هوایی دانشگاه

## ۲-۵- توابع هدف مسئله

- ۱- حداقل بودن هزینه
- ۲- بیشترین میزان تولید
- ۳- کمترین میزان خرابی و یا به عبارتی بیشترین میزان دسترس بودن

حال فرض کنیم تعداد کل توربین‌های مورد نیاز  $i$  باشد و ما توانایی خرید از  $j$  نوع توربین را داشته باشیم در این صورت هزینه هر توربین به صورت نمایش داده می‌شود  $C_{i,j}$ . و هر توربین دارای نرخ خرابی

می‌تواند بسته به نمایندگی و نوع توربین و ظرفیت و ارتفاع و همچنین شرکت سازنده مختلف باشد.

- هزینه نصب و راه اندازی نیز شامل هزینه سخت پایه و فوندانسیون نصب هر توربین است که به نوع و ارتفاع توربین و وزن خالص و دیگر پارامترهای مکانیکی بستگی دارد.
- هزینه دیگر که در کاهش آن باید بیشتر کوشا باشیم و مکان یابی بهینه بخاطر آن صورت می‌گیرد هزینه سیم‌کشی می‌باشد. هزینه سیم‌کشی علاوه بر فاصله و مقدار کابل مورد نیاز به میزان قدرت و توان توربین نیز بستگی دارد زیرا که باعث می‌شود در توان‌های بالا مجبور شویم از کابل با ظرفیت بالاتر استفاده کنیم که این باعث می‌شود هزینه هر متر کابل افزایش یابد.

$$P = V I \cos \varphi \quad (9)$$

$$I = \frac{P}{V \cos \varphi} \quad (10)$$

$$A = \frac{I \cdot L \cdot \cos \varphi \sqrt{3}}{K \cdot \Delta U \% \cdot Un} \quad (11)$$

این فرمول که برای سیستم سه فاز است در آن  $P$  توان خروجی توربین،  $V$  ولتاژ،  $I$  جریان بر حسب آمپر،  $\cos \varphi$  ضریب توان،  $\Delta U \%$  درصد مجاز افت ولتاژ و  $K$  هدایت مخصوص (بسته به جنس کابل) در این پروژه به ازای هر یک سانتی‌متر کابل برای توربین ۵ مگاواتی، ۵ دلار در نظر گرفته شده و برای توربین‌های ۲، ۳ و ۱/۵ مگاواتی ۳ دلار می‌باشد.

$$C_R = \sum C_{i,j} - C_T \quad (12)$$

که در آن  $C_R$  هزینه کابل،  $C_{i,j}$  مجموع هزینه‌های خرید توربین‌ها، احداث خرید زمین و سایر هزینه‌ها و  $C_T$  هزینه نهایی که بوسیله برنامه‌ی MATLAB به دست آمده، شامل کابل کشی از نقطه بهینه تا توربین می‌باشد.

جدول (۷) مشخصات توربین‌ها و هزینه‌ها

شماره توربین	اسامی شرکت سازنده	ظرفیت توربین‌ها (MW)	ارتفاع برج (m)	تولید سالیانه (GWh)	هزینه‌ها (دلار)
۱	ونستاس	۲	۸۰	۳۰/۶۶۴۰	۲۷۶۸۰۰۰
۲	ونستاس	۲	۹۵	۳۱/۲۴۷۸	۲۷۷۲۰۰۰
۳	ونستاس	۲	۱۰۵	۳۱/۹۰۲۷	۲۷۷۵۰۰۰
۴	ونستاس	۲	۸۰	۴۹/۷۸۱۴	۲۷۶۸۰۰۰
۵	ونستاس	۲	۹۰	۵۰/۹۸۳۵	۲۷۷۰۰۰۰
۶	ونستاس	۲	۸۰	۵۷/۶۴۸۱	۲۷۶۸۰۰۰
۷	ونستاس	۲	۹۵	۵۹/۷۹۳۶	۲۷۷۲۰۰۰
۸	ونستاس	۲	۱۱۰	۶۲/۱۴۶۲	۲۷۷۸۰۰۰
۹	ونستاس	۲	۱۲۰	۶۳/۳۸۲۴	۲۷۸۵۰۰۰
۱۰	ونستاس	۲	۱۲۵	۶۴/۱۰۱۷	۲۷۹۰۰۰۰
۱۱	ونستاس	۳	۹۴	۴۵/۳۰۴۶	۳۶۰۵۰۰۰
۱۲	ونستاس	۳	۱۱۹	۴۸/۳۳۹۲	۳۶۰۵۰۰۰
۱۳	جی ای	۱/۵	۹۵	۳۰/۹۷۱۶	۳۶۲۰۰۰۰
۱۴	گمسا	۵	۸۰	۲۶/۱۶۵	۱۸۶۵۰۰۰



پس نرخ خرابی برای روزهای بدون باد و تغییرات توربین در طول سال بصورت روزانه محاسبه می‌شود:

$$L = \frac{\sum V_i < V_{cut\ in} + D_T}{365} \quad (17)$$

که در آن  $V_i$  سرعت بادهای کمتر از حداقل و  $D_T$  تعداد کل روزهای مد نظر برای تغییرات در طول ۳۶۵ روز سال می‌باشد

### ۳- روند انجام کار

به‌طور کلی الگوریتم ژنتیک چند هدفه توسعه یافته‌ی الگوریتم ژنتیک است. به صورتی که در مرحله اول جمعیت اولی در محدوده مورد نظر انتخاب می‌شود و میزان تابع هدف‌های مختلف برای هر یک از جمعیت‌های موجود به دست می‌آید. در مراحل مختلف این جواب‌ها طبق الگوریتم ژنتیک با یکدیگر زاد و ولد کرده و نتایج جدید به دست می‌آید. در هر مرحله جهش ژنتیکی نیز انجام می‌شود. در آخر هر تکرار نتایج با یکدیگر مقایسه می‌شوند و جبهه به نام جبهه پرتو تولید می‌شود خاصیت عضوهای این جبهه این است نسبت به بقیه اعضا که در این جبهه نیستند مقادیر تابع هدف‌های بهتری دارند، و از جهتی نسبت به یکدیگر برتری کامل ندارند. در هر تکرار اعضا این جبهه از نظر تعداد و مقدار امکان دارد تغییر کنند و در نهایت به سوی بهترین جواب‌های ممکن همگرا می‌شوند. در این پروژه همانطور که گفته شد ۳ تابع هدف وجود دارد که هیچ‌کدام نسبت به دیگری اولویت ندارد و به جواب‌هایی نیاز داریم که بهترین باشند. ترتیب اولویت بندی برای شروع برنامه بصورت زیر است.

#### (1 tool, 2 arz, 3 type torbin)

مکان و میزان طول و عرض برای توربین‌ها را بدین صورت مشخص می‌کنیم. ستون اول را عدد صفر، ستون دوم را عدد ۵۴۷۰۰۰ متر مربع و ستون سوم را ۱۴ به دلیل اینکه ۱۴ نوع توربین داریم. با توجه به اینکه جمعیت اولیه را ۱۰۰ با تعداد تکرار ۱۰۰۰۰ در نظر گرفته‌ایم، درصد جهش ژنتیکی را نیز ۳۰٪ می‌گیریم که در نتیجه آن درصد زاد و ولد معمولی و تغییر ژن‌ها بین پدر و مادر نیز ۷۰٪ در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه ما دارای ۱۰۰ جمعیت اولیه که هر کدام دارای فاصله، هزینه، رنک و موقعیت قرارگیری خاص هستند. ماکزیمم و مینیمم‌های تعریف شده برای این پروژه که شامل هزینه، تولید و نرخ خرابی‌های مورد نظر است، متغیرهایی تولید می‌کنند که با توجه به تابع هدف‌های تعریف شده برای آن‌ها است و با توجه به حدهای بالا و پایین که برای آن‌ها تعریف کرده‌ایم چک می‌شوند و توسط تابع  $Mond\ Ominated\ Sorting$  جمعیت‌ها مرتب می‌شوند که شامل رنک‌های ۱ تا ۱۰۰ است و ترتیب اولویت آن‌ها همان تابع هدف‌های تعریف شده هستند. که به ترتیب بهترین جواب Rank 1 و بدترین جواب Rank 100 است. رنک‌بندی انجام شده فاصله بین تک تک جمعیت‌ها را انجام می‌دهد تا بسیاری از جمعیت‌ها را کنار زده و جا را برای نسل‌های بعدی که بهینه‌تر می‌باشند باز کند. همچنین فاصله زیاد بین جواب‌ها نیز مد نظر است. حداکثر تکرار برای جمعیت اولیه

$l_{i,j}$  باشد. فرض کنیم هر توربین دارای ظرفیتی طبق تعریف  $p_{i,j}$  باشد. و هر توربین براساس میزان صورت باد سالانه مقدار انرژی  $E_{i,j}$  به ما تحویل دهد در این صورت فرمول‌بندی مسئله ما به این صورت می‌شود:

$$\min cost = \sum C_{i,j} \quad (13)$$

$$\max \sum E_{i,j}$$

$$\min \sum l_{i,j}$$

در این بخش مقدار سالانه انرژی  $E_{i,j}$  را به‌صورت زیر مینیمم می‌کنیم که به‌همین اساس توابع هدف ما به‌صورت کلی کمینه شوند:

$$\max \sum E_{i,j} = \min \sum 64.01 - E_{i,j} \quad (14)$$

بدین صورت توربین انتخاب شده از ترکیبی که بیشترین GWh انرژی را دارد کم شده تا مینیمم شود. همان‌طور که می‌بینیم مساله‌ی بالا دارای بیش از یک بهینه سازی است و تمامی بهینه سازی‌ها به مکان و نوع توربین بستگی دارند. برای حل مساله بالا ناچاریم از الگوریتم بهینه سازی ژنتیک چند هدف استفاده کنیم. با توجه به اینکه در قبل هم در مورد میزان هزینه‌ها و تولید صحبت شد حال میزان قابلیت اطمینان توربین‌ها نیز مطرح است که در قالب نرخ خرابی توربین‌ها به آن می‌پردازیم. عوامل اصلی در خرابی و یا به عبارتی عدم کارایی یک توربین بادی موارد زیر می‌توانند باشد:

- نبود باد با قدرت کافی

- خرابی تجهیزات داخلی توربین

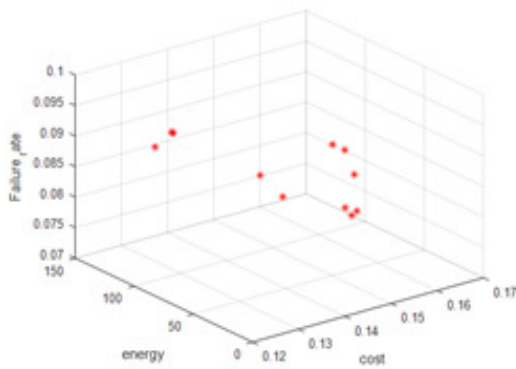
تابع هدف سومی که ما در شبیه‌سازی و مساله خود نیاز به بهینه کردن آن داریم میزان نرخ خرابی توربین بادی می‌باشد. هرچه میزان نرخ خرابی توربین کمتر باشد این نوید را به ما می‌دهد که در طول یک سال ما مدت زمان بیشتری از توربین بهره‌مند می‌شویم، به عبارتی نرخ خرابی بالا نشان دهند خاموشی بوده که خود باعث خاموشی مجتمع و دیگر مسائل فنی می‌شود. در این تابع هدف ما سعی می‌کنیم مجموعه نرخ خرابی‌های ترکیبات پیشنهادی حداقل شوند. لازم به ذکر است همانطور که گفته شد نرخ خرابی و خاموشی به دو عامل بستگی دارد. عمل دوم از روی کاتالوگ‌های ارسالی از شرکت سازنده به دست می‌آید. عمل اول از میزان داده‌های ایستگاه باد به دست می‌آید. به طوری که با داشتن اینکه در سال چند روز یا چند ساعت میزان سرعت باد از حداقل میزان جهت راه‌اندازی هر توربین کمتر است به دست می‌آید. انتظار می‌رود در این تابع هدف توربین‌هایی کاندید شوند که در سرعت‌های پایین توانایی کارکرد داشته باشند. در نتیجه ما با روزهایی سر و کار داریم که باد نمی‌وزد پس تولید نداریم:

$$\begin{cases} V_{cut\ in} \\ V_n \\ V_{cut\ out} \end{cases} \rightarrow v < V_{cut\ in} \quad (15)$$

در این قسمت  $V$  سرعت‌هایی است که پره‌ها را نمی‌چرخاند و عملاً تولید در این سرعت‌ها صفر است.

$$\begin{cases} 0 & V < V_{cut\ in} \\ aV + b & V_{cut\ in} < V < V_{in} \end{cases} \quad (16)$$

نتایج شبیه سازی با در نظر گرفتن همه ی توابع هدف یک جبهه ی پارتو با مجموع ۱۱ جواب بصورت سه بعدی میباشد که به شکل زیر است :



شکل (۷) منحنی جعبه پرتوها

مجموعه جواب‌های بدست آمده شامل ۱۱ جواب است که ترکیبی از ۵ توربین بهینه مطابق با توابع هدف مورد نظر در فواصل متفاوت است. مجموعه جواب های بدست آمده به همراه مختصات های آن بصورت زیر است (مختصات ها همگی به متر هستند) :

جواب یک : ( طول و عرض)

توربین ۹ به مختصات (۴۰۵ و ۱۰۵) و توربین ۳ به مختصات (۴۰۵ و ۱۷) و توربین ۱۴ به مختصات (۴۳۲ و ۲۳۳) و توربین ۱۰ به مختصات (۴۳۳ و ۲۵۵) و توربین ۱۴ به مختصات (۳۸۱ و ۴۳۷) :

جواب دو :

توربین ۹ به مختصات (۳۱۶ و ۲۰۶) و توربین ۷ به مختصات (۴۰۵ و ۴۶) و توربین ۱۰ به مختصات (۴۳۲ و ۲۶۸) و توربین ۱۰ به مختصات (۲۸۱ و ۳۷۸) و توربین ۹ به مختصات (۲۸۱ و ۴۸۶) :

جواب سه :

توربین ۸ به مختصات (۴۰۵ و ۱۱۸) و توربین ۴ به مختصات (۴۰۵ و ۱۸) و توربین ۱۳ (۴۳۲ و ۲۳۶) و توربین ۹ به مختصات (۴۳۴ و ۲۵۵) و توربین ۱۳ به مختصات (۳۸۱ و ۴۳۲) :

جواب چهار :

توربین ۸ به مختصات (۴۰۵ و ۱۴۰) و توربین ۷ به مختصات (۴۰۵ و ۴۰) و توربین ۸ به مختصات (۴۲۹ و ۲۶۷) و توربین ۹ به مختصات (۴۴۵ و ۲۶۱) و توربین ۱۰ به مختصات (۴۲۸ و ۳۸۹) :

جواب پنج :

توربین ۹ به مختصات (۴۰۵ و ۱۲۰) و توربین ۳ به مختصات (۴۰۵ و ۴۲) و توربین ۱۱ به مختصات (۴۳۳ و ۲۵۸) و توربین ۱۰ به مختصات (۱۵۳ و ۳۰۶) و توربین ۱۱ به مختصات (۲۸ و ۴۷۲) :

جواب شش :

۱۰۰ را ۱۰۰۰۰ با درصد جهش ژنتیکی ۳۰٪ در number of crosse انجام می دهیم. بعد از زاد و ولد انجام شده داریم:

به دست آمدن جمعیت جدید → نوزادها + جمعیت جهشی + جمعیت قبلی سپس با استفاده از تابع Sortin کار مرتب سازی و رنک بندی انجام می شود. زیرا ممکن است یک فرزند جدید بوجود آمده باشد که پدر و مادر آن در رنک ششم باشد اما در حال حاضر فرزند آن ها در رنک اول قرار بگیرد به همین دلیل بررسی کردن رنک ها در هر مرحله الزامی است. سپس دوباره فاصله بین جواب ها بررسی می شود تا جواب های به هم چسبیده حذف و جواب های حاضر در رنک های پایین تر بالا بیایند. حال با تشکیل یک ماتریس به نام C که میزان توابع هدف را در آن قرار داده ایم به آن این دستور را می دهیم که دائم رنک ۱ را به ما نشان بدهد زیرا که جبهه پرتو در رنک ۱ می باشد. نقاط بدست آمده برای این پروژه ۵ نقطه یا ۵ توربین در ۵ نقطه مختلف و بهینه است. با فرض مقدار دهی اولیه صفر در هر دوره جواب برای ما هزینه جدید با نرخ خرابی جدید حساب می شود :

$$\begin{cases} cost = 0 \\ power = 0 \\ energy = 0 \\ failure - rata = 0 \end{cases} \quad (18)$$

$$C_{i,j} = (C_1 + K \times D) \quad (19)$$

با توجه به شرایط اعمال شده فاصله توربین با پست برق باید کم ترین فاصله باشد تا مترژ کابل کشیده شده پایین باشد. با توجه به این فرمول برای هر تکرار هزینه جدید حساب می شود. در این قسمت  $C_{i,j}$  هزینه نهایی،  $C_1$  هزینه قبلی،  $K$  قطر کابل و  $D$  مترژ کابل است. در بحث حداکثر انرژی ترکیبی گرفته شده از توربین ها با توجه به اینکه تابع ما یک تابع کمینه است بیشترین ترکیب ممکن را از میزان هر ترکیب دلخواه کم می کنیم.

$$\max \sum E_{i,j} = \min \sum (64.01 - E_{i,j}) \quad (20)$$

قسمت chek location نیز مکان توربین با توجه به ذکر قیود و اندازه هایی که برای آن معرفی شده است کرده ایم را انتخاب می کند. فاصله بین توربین ها ۱۶۰ متر و نباید روی ساختمان ها باشند. در فرمول زیر برای اینکه فاصله با ساختمان حفظ شود در صورتی که نقطه انتخاب شده روی ساختمان بود تابع هدف آن را مقداری زیاد می کند تا رنک آن پایین بیاید.

$$H = H + 100000 \quad (21)$$

که در آن  $H$  نقطه فعلی و تعداد تکرار ۱۰۰۰۰ می باشد. گفتنی است که بعد از اینکه رنک های نهایی مشخص شد و بهینه ترین نقطه بدست آمد این نقاط از لحاظ هزینه هایی از قبیل هزینه خرید توربین، هزینه های راه اندازی، هزینه ی خرید کابل و سایر هزینه ها کمینه است. همچنین این تعداد توربین ها ترکیبی از بیشترین تولید سالیانه را دارند و در آخر بهترین قابلیت اطمینان را برای ما به ارمغان می آورند.



معیار برای سنجش نتایج به دست آمده استفاده از نرخ بازگشت سرمایه است. در جدول زیر نرخ بازگشت سرمایه جواب‌های مختلف را به دست می‌آوریم. (گیگا وات ساعتی \$ ۳۰۰۰۰)

جدول (۹) نتایج بازگشت سرمایه پروژه

شماره جواب	مدت زمان بازگشت سرمایه(سال)
۱	۳/۲۹۴۸۶۶
۲	۱/۹۰۸۴۲۳
۳	۲/۳۷۹۹۳۹
۴	۱/۹۱۵۴۱۷
۵	۲/۸۵۹۰۳۳
۶	۲/۲۴۹۱۷۶
۷	۲/۱۴۴۷۰۴
۸	۲/۳۷۷۲۶۳
۹	۲/۶۳۲۷۶۲
۱۰	۱/۹۹۴۸۴۶
۱۱	۲/۳۶۴۲۰۳

همانطور که از جدول بالا استخراج می‌شود طرح ۲ در کمترین زمان سرمایه صرف شده را باز می‌گرداند و در رتبه دوم طرح شماره ۴ قرار دارد. تصمیم در رابطه با انتخاب طرح نمونه جهت احداث به شرایط زیر بستگی دارد:

- میزان بودجه موجود برای احداث طرح
- میزان انرژی مورد نیاز
- زمان بازگشت سرمایه
- میزان سود و تولید انرژی

بهترین جواب‌ها برای هر کدام از معیارهای بالا به صورت زیر است:

- میزان بودجه موجود برای احداث طرح(طرح ۳)
- میزان انرژی مورد نیاز(به مصرف بستگی دارد)
- زمان بازگشت سرمایه(طرح ۲)
- میزان سود و تولید انرژی(طرح ۳)

کلیه جواب‌های بدست آمده را می‌توان با توجه به مختصات آن‌ها در نقشه دانشگاه جای گذاری کرد. این نقاط دارای قابلیت اطمینان بالایی هستند. در بهترین شرایط نیز جواب‌های متفاوت دیگری توسط الگوریتم ژنتیک بدست می‌آید. با توجه به داده‌ها و اهداف مسأله جواب‌های بدست آمده در یک فورمت استاندارد بدست آمده است.

#### مراجع :

- [۱] ثقفی م. ۱۳۷۲. انرژی باد و کاربرد آن در کشاورزی، دانشگاه تهران.
- [۲] ثقفی م. ۱۳۸۴. انرژی‌های تجدیدپذیر نوین، انجمن انرژی ایران و مرکز مطالعات انرژی ایران، دانشگاه تهران.

توربین ۹ به مختصات (۴۰۴ و ۱۵۹) و توربین ۵ به مختصات (۴۰۵ و ۳۲) و توربین ۱۱ به مختصات (۴۳۵ و ۲۶۱) و توربین ۱۰ به مختصات (۴۱۹ و ۲۶۹) و توربین ۱۰ به مختصات (۴۷۲ و ۲۸۰) جواب هفت :

توربین ۹ به مختصات (۱۶۷ و ۳۱۶) و توربین ۴ به مختصات (۴۰۵ و ۲۱) و توربین ۱۰ به مختصات (۲۵۵ و ۴۳۷) و توربین ۱۰ به مختصات (۱۵۳ و ۳۰۰) و توربین ۱۳ به مختصات (۴۶۳ و ۳۸۰) جواب هشت :

توربین ۸ به مختصات (۴۰۵ و ۱۵۸) و توربین ۱۱ به مختصات (۴۰۵ و ۸۵) و توربین ۱۰ به مختصات (۴۲۳ و ۲۵۴) و توربین ۷ به مختصات (۴۴۰ و ۲۵۵) و توربین ۱۳ به مختصات (۴۳۱ و ۳۸۹) جواب نه :

توربین ۹ به مختصات (۴۰۵ و ۱۵۸) و توربین ۳ به مختصات (۴۰۵ و ۲۹) و توربین ۱۳ به مختصات (۴۴۴ و ۲۶۷) و توربین ۱۰ به مختصات (۴۲۳ و ۲۶۸) و توربین ۱۳ به مختصات (۳۸۰ و ۴۵۲) جواب ده :

توربین ۸ به مختصات (۴۰۵ و ۱۲۱) و توربین ۴ به مختصات (۴۰۵ و ۲۲) و توربین ۸ به مختصات (۴۴۲ و ۲۵۹) و توربین ۹ به مختصات (۴۲۶ و ۲۵۶) و توربین ۱۰ به مختصات (۲۸۰ و ۴۰۸) جواب یازده :

توربین ۸ به مختصات (۴۰۵ و ۱۲۳) و توربین ۵ به مختصات (۴۰۵ و ۳۴) و توربین ۱۳ به مختصات (۴۳۱ و ۲۶) و توربین ۹ به مختصات (۴۳۱ و ۲۵۹) و توربین ۱۳ (۳۸۱ و ۴۱۷) جواب چهارده :

جدول (۸) نتایج بدست آمده یازده جواب

شماره جواب	هزینه (دلار)	حداکثر تولید سالیانه (GWH)	نرخ خرابی
۱	۱۶۷۸۲۳۰۰	۱۶۹/۶۳۹۸	۰/۰۷۲
۲	۱۴۳۴۵۸۰۰	۲۵۰/۵۶۹۸	۰/۰۹۲
۳	۱۲۳۶۹۳۰۰	۱۷۳/۲۴۳۲	۰/۰۹۶
۴	۱۴۲۲۰۲۰۰	۲۴۷/۴۶۹۱	۰/۰۹۶
۵	۱۵۹۴۴۴۰۰	۱۸۵/۸۹۵۰	۰/۰۷۶
۶	۱۵۰۹۳۰۰۰	۲۲۳/۶۸۱۹	۰/۰۸۲
۷	۱۳۳۹۲۴۰۰	۲۰۸/۱۴۶۸	۰/۰۹
۸	۱۴۱۳۶۴۰۰	۱۹۸/۲۱۶۷	۰/۰۸۴
۹	۱۲۴۱۸۴۰۰	۱۵۷/۲۲۹۰	۰/۰۹۲
۱۰	۱۴۲۱۰۷۰۰	۲۳۷/۴۵۶۹	۰/۰۹۶
۱۱	۱۲۳۷۲۶۰۰	۱۷۴/۴۴۳۵	۰/۰۹۶

#### ۴- نتیجه گیری

حال به بررسی و تحلیل نتایج به دست آمده می‌پردازیم. نتایج به دست آمده برای یک تابع هدف به راحتی قابل تحلیل است. وقتی می‌خواهیم هزینه را کاهش دهیم به راحتی می‌توان گفت جواب به دست آمده بهترین جواب است و کمترین هزینه را دارد، اما در توابع چند هدف هیچ وقت نمی‌توان گفت کدام جواب بهتر از بقیه جواب‌ها است. یک

- [19] García, C. A., Fernández, L. M., & Jurado, F. 2013, "Modelling and Control of Wind Parks", Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [20] General electric research. 2010. "How loud is a wind turbine". Available from: [www.ge.com](http://www.ge.com) accessed 2016/05/08
- [21] Ghosh, A and Ledwich, G. 2010, "Compensation of distribution system voltage using DVR," IEEE Transactions on Power Delivery, 17 (4), pp 1030-1036.
- [22] Global Wind Energy Council. 2014. "Global wind statistics". Available from: [www.ewec.net](http://www.ewec.net) accessed 2016/05/08
- [23] Huang, P, Member, S, Shawky, M., Moursi, E., Xiao, W. 2013, "Novel Fault RideThrough Configuration and Transient Management Scheme for Doubly," IEEE Transactions on Power Systems, 28 (1), pp 86-94
- [24] Slootweg J.G, de Haan. S.W. H, Polinder. H, and Kling. W. L. 2012 "Modeling Wind Turbines in Power System Dynamics Simulations." IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, pp 22 – 26.
- [25] Kundur. (2001). "power system stability and control." 1407p
- [26] Leon, A. E., Farias, M. F., Battaiotto, P. E., Solsona, J. a, & Valla, M. I. 2011, "Control strategy of a DVR to improve stability in wind farms using squirrel-cage induction generators," IEEE Transactions on Power Systems, 26 (3), pp 1609-1617.
- [27] Mohseni, M., Member, S., Islam, S. M., & Member, S. 2011, "Impacts of Symmetrical and Asymmetrical Voltage Sags on DFIG-Based Wind Turbines Considering," IEEE Transaction on Power Electronics, 26 (5), 1587 – 1598.
- [28] Ramirez, D., Martinez, S., Platero, C. a., Blazquez, F., & De Castro, R. M. 2011, "Low-voltage ride-through capability for wind generators based on dynamic voltage restorers," IEEE Transactions on Energy Conversion, 26 (1), pp 195–203.
- [29] Thiringer. T. 2011 "Effect of operational modes of a wind farm on the transient stability of nearby generators and on power oscillations: A Nordic grid study." Wind Energy, pp 63-73.
- [30] U.S. department of energy. 2014. "Renewable energy data book". Available from: [www.eere.energy.gov](http://www.eere.energy.gov) accessed 2016/05/08
- [31] W. Qiao, G. Harley. 2008. "Effect of Grid-Connected DFIG Wind Turbines on Power System Transient Stability." IEEE, Power and Energy Society General Meeting -Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, pp 1-8.
- [32] Wessels, C, Gebhardt, F, & Fuchs, F. W. 2011, "Fault ride-through of a DFIG wind turbine using a dynamic voltage restorer during symmetrical and asymmetrical grid faults," IEEE Transactions on Power Electronics, 26 (1), pp 807-815.

- [۳] حبیبی سراسکانرود ک، قهرمانی زرج آباد ا. ۱۳۹۴. پتانسیل سنجی و بررسی امان احداث نیروگاه بادی ۵۰ مگاواتی در منطقه‌ی کوهین استان قزوین. دومین کنفرانس ملی انجمن انرژی ایران
- [۴] روحی ج، برغان م. ماهنامه صنعت برق.
- [۵] روشن غ، فانقرمه ع، شاهکونی ا. ۱۳۹۲. ارزیابی پتانسیل تولید انرژی بادی در ایستگاه‌های منتخب ایران. فصلنامه‌ی برنامه‌ریزی مطلقه‌ای، سال چهارم، شماره ۱۴، صفحات ۱۳-۳۳
- [۶] زرین‌گل س، احمري نژاد ا، بریمانی ن. ۱۳۹۵. اندازه‌یابی بهینه نیروگاه بادی-خورشیدی و موتور ژنراتورهای گازی در حالت مستقل از شبکه با الگوریتم ازدحام ذرات. اولین کنفرانس بین‌المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در مهندسی برق و کامپیوتر.
- [۷] سعادت ا، هوشمند ر. ۱۳۹۵. جایابی بهینه منابع تولید پراکنده و تعیین ظرفیت بهینه آن‌ها با استفاده از اندیس پایداری ولتاژ در شبکه‌های توزیع شعاعی. اولین کنفرانس بین‌المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در مهندسی برق و کامپیوتر.
- [۸] شبکه‌ی اطلاع‌رسانی شانا
- [۹] صادق فام ا، توحیدی س، خیراللهی ص. ۱۳۹۵. ارزیابی پایداری گذرای سیستم‌های قدرت در حضور توربین‌های بادی سرعت متغیر متصل به شبکه. اولین کنفرانس بین‌المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در مهندسی برق و کامپیوتر.
- [۱۰] عبدی ح، حسین‌زاده خنکداری ت، ذاکری فر ر، عباسه کهن س، هاشمی پنبه چوله س. ۱۳۹۰. امکان‌سنجی احداث نیروگاه بادی ۱۰ مگاواتی مراوه تپه. نشریه انرژی ایران، دوره ۱۴، شماره ۱
- [۱۱] عظیمی ن، رسولی ح. پتانسیل سنجی برق تولیدی از انرژی باد جهت احداث نیروگاه برق بادی در منطقه‌ی آزاد ارس. پنجمین کنفرانس بین‌المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی
- [۱۲] کردیان همدانی م، محمدی ی، والی زادی ا، جهانگیری ع. ۱۳۹۵. مطالعه امکان‌سنجی نصب و بهره‌برداری از نیروگاه‌های بادی در شهرستان بهار استان همدان. اولین کنفرانس بین‌المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در مهندسی برق و کامپیوتر.
- [۱۳] ماهنامه‌ی پیک برق

- [14] Aslani. A. 2011 "A Study on Power System's Transient Stability in Determination of the Appropriate Generator Type for Wind Turbines." Environment and Electrical Engineering Conference, pp 8-11.
- [15] Perdana, A. Carlson. O, Persson J. 2004, "Dynamic Response of Grid connected Wind turbine with Doubly Fed Induction Generator during Disturbances," presented at the Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, NTNU, Trondheim, Norway.
- [16] Ackermann, T. 2005, "Wind Power in Power Systems," Wiley publisher.
- [17] Mattos. C, Paulo Abreu Vieira. J. 2015 "Long-Term Voltage Stability Analysis of Variable Speed Wind Generators." IEEE Transaction on power systems, pp 439 – 447.
- [18] Clemens Jauch. 2012, "Technical Aspects of Integrating Wind Turbines into a Power System," Aalborg, Institut for Energiteknik.



امید پیریایی درخرم آباد متولد شده است (۱۳۶۹). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت از دانشگاه دزفول (۱۳۹۲)، کارشناسی‌ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه نایین (۱۳۹۶) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه توربین‌های بادی و ساخت نمونه آزمایشی

توربین ترکیبی آبی بادی در دانشگاه آزاد دزفول به عنوان پروژه پایانی کارشناسی می باشد.

و کارشناسی ارشد مهندسی برق را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه مندی ایشان در زمینه ادوات فکس، بهینه سازی سیستمهای قدرت، انرژی های نو می باشد.



**مهدی مهدویان** در اصفهان متولد شده است (۱۳۵۷). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق از دانشگاه دولتی کاشان



**Abstract:** In this paper, we will study the feasibility and design of a 10-megawatt unit in Isfahan's Nain region. This design consists of three objective functions. The objectives in this paper include the lowest cost of installation, commissioning, turbine purchase costs, and network connectivity, as well as the largest annual production plus the best reliability for turbines. The proposed model is presented in the form of a multi-objective optimization problem and the NSGA-II algorithm is used to achieve the acceptable category of responses. In the final section, we optimize the best turbine set using the algorithm used to locate. This location is located within the limits of the Islamic Azad University of Naying Branch.

**Key words:** reliability, wind turbine, wind power plant, multi-objective optimization, NSGA-II