

## مدل‌سازی منحنی توان توربین بادی با رویکرد پارامتریک و تجزیه و تحلیل عملکرد آن‌ها

کریم آتشگر<sup>۱</sup>، لیلا عباسی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

atashgar@iust.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

I\_abbasi2006@yahoo.com

**چکیده:** در سال‌های اخیر، با توجه به عوامل متعددی مانند محدودیت سوخت‌های فسیلی و پیامدهای زیست‌محیطی استفاده از این سوخت‌ها، تمرکز بر منابع انرژی تجدیدپذیر افزایش چشم‌گیری داشته است. در کشورهای توسعه‌یافته به کارگیری انرژی‌های پاک مانند انرژی بادی به‌عنوان یکی از منابع جایگزین مورد توجه قرار گرفته است. در این رویکرد، پایش عملکرد توربین‌های بادی و کنترل کیفیت توان خروجی آن‌ها یکی از موضوعات مهم در مدیریت نیروگاه‌های بادی است. یکی از مشخصه‌های مهم و تأثیرگذار در بررسی توان خروجی توربین‌های بادی، منحنی توان است که نشان‌دهنده رابطه بین سرعت باد و توان خروجی توربین می‌باشد. از این رو در تجزیه و تحلیل عملکرد توربین‌های بادی، منحنی توان مورد توجه کارشناسان قرار می‌گیرد. برآورد دقیق منحنی توان توربین بادی یک موضوع کلیدی برای ارزیابی صحیح از عملکرد توربین بادی است. در این مقاله رویکرد پارامتریک در مدل‌سازی منحنی توان مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا چهار روش موجود برای مدل‌سازی پارامتریک منحنی توان توربین‌های بادی (چندجمله‌ای درجه دو، نمایی، مکعب، مکعب تقریبی) معرفی شده است. سپس مدل‌های معرفی شده در یک توربین بادی بکار گرفته شدند و از طریق آزمون نیکویی برازش، با منحنی توان اسمی سازنده توربین بادی مقایسه شدند. نتایج تجزیه و تحلیل‌ها نشان می‌دهد که منحنی توان نمایی در مقایسه با سه مدل دیگر از شایستگی بیشتری برخوردار است.

**واژه‌های کلیدی:** انرژی باد، مدل‌سازی پارامتریک، منحنی توان، توربین بادی.

\* نویسنده مسئول

۱. مقدمه

در سرتاسر جهان، شتاب فزاینده تغییرات در سیستم‌های تولید انرژی منجر به ظهور انرژی‌های فراوان و کم‌هزینه‌ای همچون انرژی باد شده است. شکل (۱) ظرفیت تجمعی انرژی بادی در جهان را نشان می‌دهد که از ۲۳ گیگاوات در سال ۲۰۰۱ به بیش از ۵۳۰ گیگاوات در سال ۲۰۱۷ افزایش یافته است. بنابراین ظرفیت جهانی پس از دو دهه بیش از ۲۳۰۰ درصد رشد کرده است [۱ و ۲]. علاوه بر این، نرخ رشد انرژی باد تا سال ۲۰۳۵ با میانگین سالانه ۶٪ افزایش خواهد یافت [۳]. از این رو توسعه روش‌های دقیق برای شناسایی مشخصه‌های مرتبط با سیستم‌های تولید انرژی بادی از قبیل منحنی توان توربین بادی ضروری به نظر می‌رسد. از آنجا که منحنی توان تابعی غیرخطی و بسیار پیچیده از پارامترهای ورودی مختلف مکانیکی، الکتریکی و مترولوژیکی است، در حقیقت ارائه منحنی توان نرمال‌شده توربین برای یک منطقه خاص جغرافیایی که قادر باشد مشخصات خروجی توربین را دقیقاً توصیف کند، از طرف سازنده توربین بسیار دشوار است [۴ و ۵]. از این رو استفاده از رویکردهای مختلف و مدلسازی منحنی توان توربین بادی که منجر به برآورد بهتر منحنی توان گردد، به کنترل پیشگیرانه و بهینه‌سازی عملکرد توربین‌ها کمک می‌کند [۶].

نیاز به مدلسازی منحنی توان توربین بادی با دقت بالا را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد [۷]:

- ارزیابی و پیش‌بینی توان باد و ظرفیت موجود در منطقه: برآورد توان حاصل‌شده از انرژی باد در مناطق کاندید و انتخاب بهینه و یا رتبه‌بندی مناطق عموماً توسط روش‌های مدلسازی منحنی توان صورت می‌گیرد و با توجه به هزینه‌های زیاد پیاده‌سازی

عملی توربین‌ها، دقت نامطلوب منحنی توان منجر به تصمیم‌گیری اشتباه خواهد شد. با توجه به اینکه منحنی‌های مرجع عموماً در شرایط استاندارد ایجاد می‌شوند، از طرفی با گذشت زمان عملکرد توربین بادی دچار افت می‌گردد، منحنی توان با دقت مطلوب می‌تواند جایگزین مناسبی برای منحنی‌های مرجع باشد.

- انتخاب مدل مناسب از توربین‌های موجود: با توجه به مقایسات بین منحنی توان مدل‌های مختلف توربین و ظرفیت موجود در منطقه می‌توان توربین مناسب آن منطقه را انتخاب کرد.
- پایش آنلاین عملکرد توربین بادی: بهره‌بردار با بررسی منحنی توان می‌تواند از عملکرد مطلوب توربین اطمینان حاصل و یا در صورت مشخص شدن نقص در کارکرد توربین به بررسی و رفع مشکل پیش‌آمده اقدام کند.

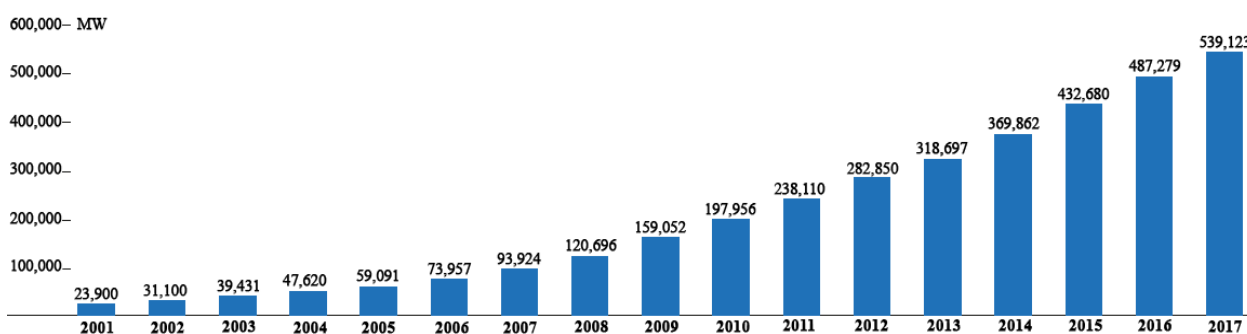
به لحاظ نظری توان حاصل‌شده از یک توربین بادی توسط روابط

زیر نشان داده می‌شود [۸]:

$$P_w = 0.5 \rho \lambda R^2 v^3 \quad (1)$$

$$P_m = C_p (\lambda, \theta) P_w \quad (2)$$

در روابط بالا  $P_w$  برابر با توان باد،  $P_m$  توان مکانیکی تولیدشده توسط توربین،  $\rho$  چگالی هوا،  $R$  شعاع روتور،  $C_p$  ضریب توان یا بازده توربین بادی و معادل سرعت باد است. از آنجا که چگالی هوا در ارتفاع هاب تقریباً ثابت است، توان مکانیکی خروجی توربین به سرعت باد و ضریب بازده توان بستگی دارد. ضریب توان با نسبت سرعت خطی نوک پره به سرعت باد ( $\lambda$ ) و زاویه گام پره ( $\theta$ ) رابطه مستقیم دارد [۶].



شکل (۱): ظرفیت تجمعی انرژی بادی در جهان [۲]

۲. مدل‌هایی که بر اساس مفهوم منحنی توان توربین‌های بادی طراحی می‌شوند [۴-۶ و ۱۳-۱۷].

در مرجع [۷] نشان داده شده است معادلات بنیادین توان موجود در باد پیچیده و مشکل بوده لذا مدل‌هایی که بر پایه معادلات بنیادین

در پژوهش‌های صورت‌گرفته مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی عملکرد توربین بادی پیشنهاد شده است که می‌توان آن‌ها را در دو گروه طبقه‌بندی کرد: ۱. مدل‌هایی که بر مبنای معادلات بنیادین توان موجود در باد، ارائه‌شده در رابطه (۱) توسعه داده می‌شوند [۹-۱۲]؛

ارائه می‌شوند، دقت کافی ندارند. در مرجع [۷] همچنین اظهار شده است که مدل‌های مبتنی بر مفهوم منحنی توان توربین بادی منجر به نتایج نسبتاً دقیق‌تری می‌شوند.

پژوهشگران روش‌های متعددی را برای مدل‌سازی منحنی توان توربین بادی به کار می‌گیرند [۱۳]. در یک دسته‌بندی این مدل‌ها شامل دو رویکرد پارامتریک و ناپارامتریک می‌شوند [۶ و ۱۴]. در رویکرد پارامتریک مدل منحنی توان به وسیله مجموعه‌ای از عبارات ریاضی با تعداد ثابتی پارامتر تعریف می‌شود [۶]. از مثال‌های پارامتریک می‌توان به مدل‌های مبتنی بر تابع لجستیک [۱۴ و ۱۸]، مدل مبتنی بر توابع خطی [۱۵ و ۱۶]، برآورد منحنی توان بر پایه روش حداکثر درست‌نمایی [۱۷] و مدل‌هایی بر مبنای توابع چندجمله‌ای از جمله چندجمله‌ای درجه دو [۱۳]، مکعب و مکعب تقریبی [۷] و نمایی [۱۳] اشاره کرد. برخلاف رویکرد پارامتریک، در رویکرد ناپارامتریک هیچ فرض مشخصی برای تعریف فرم تابعی برای تعیین رابطه بین متغیرهای ورودی و خروجی وجود ندارد و تلاش می‌شود منحنی توان به گونه‌ای که بیشترین نزدیکی را با داده‌های مشاهده‌شده داشته باشند، تخمین زده شود. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های مبتنی بر داده‌کاوی [۱۹ و ۲۰]، روش‌هایی بر پایه شبکه‌های عصبی [۵ و ۲۱] و روش‌های مبتنی بر منطق فازی [۲۲] اشاره کرد.

در مرجع [۲۱] مدلی بر پایه شبکه عصبی مصنوعی تحت شرایط نرمال برای پیش‌بینی منحنی توان مزارع بادی به کار گرفته شد. هرچند این مدل از دقت مناسبی برخوردار است، با توجه به ماهیت جعبه سیاه شبکه‌های عصبی درکی درباره کارکرد اجزای تشکیل‌دهنده آن وجود ندارد، لذا نمی‌توان خروجی شبکه را ردیابی کرد.

در مرجع [۲۳] پژوهشگران با توجه به پویایی باد از روشی ناپارامتریک بر پایه الگوریتم داده‌کاوی و ماشین بردار پشتیبان (SVM) بهره بردند. آن‌ها ابتدا داده‌های مربوط به توان خروجی دریافت‌شده از سیستم اسکادا<sup>۱</sup> را در فواصل مساوی سرعت باد تقسیم کردند (سیستم اسکادا سیستمی برای کنترل نظارتی و اکتساب داده‌های توربین است). سپس برای تشخیص فاصله بهینه از یک شاخص ارزیابی (فاکتور F) استفاده کردند، در ادامه با کمک الگوریتم خوشه‌بندی k-means مرکز هر دسته را پیدا کرده و این نقاط را مبنای ساخت منحنی توان قرار دادند و در انتها با کمک الگوریتم SVM منحنی توان را مدل کردند؛ دقت این روش بستگی به تشخیص صحیح تعداد بهینه دسته‌ها دارد.

هی و کوشیاک [۲۴] برای مدل‌سازی منحنی توان، رویکرد ترکیبی

شامل دو فاز را ارائه کردند. در فاز اول، توان باد با تکنیک ناپارامتری ماشین یادگیری سریع (ELM) و با در نظر گرفتن سرعت باد، دمای هوا و سرعت روتور پیش‌بینی شد. سپس عملکرد ماشین یادگیری با شاخص‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد میانگین مطلق خطا (MAPE) ارزیابی شد. در فاز دوم توان پیش‌بینی‌شده با استفاده از رویکرد پارامتریک کاپولا برای ساخت مدل منحنی توان به کار گرفته شد.

در مرجع [۲۵] تخمین منحنی توان توسط یک عبارت چندجمله‌ای صورت گرفت با این فرض که باد مانند یک متغیر تصادفی با توزیع رایلی<sup>۲</sup> رفتار می‌کند. آن‌ها نشان دادند اگرچه با افزایش درجه چندجمله‌ای منحنی توان برازش بهتری بر روی داده‌های مشاهده‌شده خواهد داشت، احتمال رخداد پدیده نامطلوب بیش‌برازش<sup>۳</sup> داده‌ها افزایش خواهد یافت.

کوشیاک و ورما [۲۶] با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده از ۲۲ توربین در بازه زمانی مشخص و با به‌کارگیری روش خوشه‌بندی میانگین k و محاسبه فاصله ماه‌لانویس پس از شناسایی و حذف داده‌های پرت منحنی توان را ارائه کردند، سپس کشیدگی و چولگی را برای منحنی به دست آوردند. آن‌ها دو پارامتر کشیدگی و چولگی را به‌طور هم‌زمان به‌عنوان معیار کنترل و ارزیابی عملکرد توربین‌ها معرفی کردند. دقت این مدل به مقدار زیادی وابسته به اندازه k و حجم زیاد داده‌های آموزشی است.

مرشدی‌زاده و همکاران [۲۷] با در نظر گرفتن پارامترهایی که بیشترین تأثیرگذاری را بر روی منحنی توان توربین بادی دارند، از قبیل سرعت روتور، دمای دنده و زاویه گام پره منحنی توان توربین بادی را با به‌کارگیری شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (MLP) و شبکه عصبی مبتنی بر توابع پایه شعاعی (RBF) طراحی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل شبکه عصبی به‌لحاظ دقت نسبت به سایر روش‌های ناپارامتریک بهتر عمل می‌کند.

اگرچه روش‌های ناپارامتریک منجر به برآورد مدل‌های دقیق‌تری می‌شود، هزینه محاسباتی بالا و صرف زمان طولانی برای آموزش داده‌ها موجب توجه پژوهشگران به روش‌های پارامتریک می‌گردد [۲۸ و ۲۹]. منحنی توان مبتنی بر روش‌های پارامتریک به‌سادگی به دست آمده و با توجه به اینکه نیاز به داده‌های بسیار کمتری دارد، حساس به عملکرد سنسورهای اسکادا نیست [۲۷].

این مقاله درصدد است چهار روش پارامتریک مختلف برای

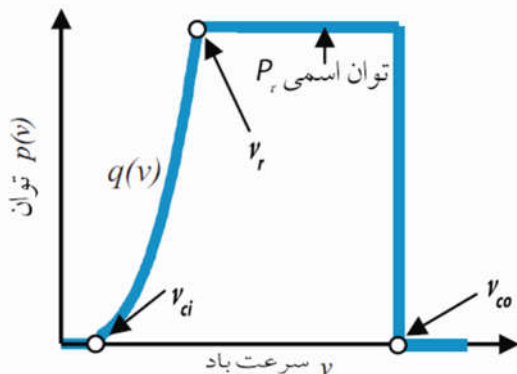
2. Rayleigh Distribution  
3. overfitting

1. Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA)

باد به صورت رابطه (۳) نوشته می‌شود [۳۰]:

$$P(v) = \begin{cases} 0 & v < v_{ci} \text{ یا } v > v_{co} \\ q(v) & v_{ci} \leq v < v_r \\ P_r & v_r \leq v < v_{co} \end{cases} \quad (3)$$

که در آن،  $v_{ci}$  حداقل سرعت باد است که در آن نقطه، توربین شروع به تولید برق می‌کند.  $v_r$  سرعتی از باد است که در آن نقطه حداکثر توان خروجی توربین شروع می‌شود.  $v_{co}$  سرعتی از باد است که در آن برای محافظت از پره‌ها و جلوگیری از آسیب‌دیدگی، توربین متوقف می‌شود و تولید برق به صفر می‌رسد.  $P_r$  یا توان اسمی که بیانگر ماکزیمم توان قابل تولید توربین می‌باشد، با توجه به ملاحظات فنی توربین به دست می‌آید.  $q(v)$  بخش غیرخطی منحنی توان را تشکیل می‌دهد، در فاصله بین  $v_{ci}$  و  $v_r$ ، قرار می‌گیرد و پژوهش‌های صورت گرفته بر روی منحنی توان، بر روی مدل‌سازی این بخش از منحنی توان متمرکز شده‌اند و هدف تمامی مدل‌سازی‌ها این است که بخش غیرخطی منحنی توان را به گونه‌ای که خطای پیش‌بینی را حداقل نماید، برآورد کنند. مفاهیم فوق در شکل (۲) به خوبی نشان داده شده است.



شکل (۲): منحنی توان بر حسب سرعت باد [۱۳]

یکی از موارد مهم در کنترل عملکرد توربین بادی، مقایسه منحنی توان توربین بادی در حال کار با منحنی توان اسمی تضمین شده توسط سازنده می‌باشد. از آنجا که منحنی توان اسمی سازنده در شرایط استاندارد (ارتفاع هم‌سطح دریا و چگالی هوا ۱/۲۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب) محاسبه شده است، می‌بایست منحنی توان سازنده را به شرایط آب‌وهوایی محل نصب توربین نرمالایز نمود؛ شکل (۳) منحنی توان نرمال شده توربین مورد مطالعه را، پس از نرمال‌سازی داده‌های ارائه شده توسط سازنده [۳۱]، بر طبق شرایط استقرار توربین نشان

مدل‌سازی توان خروجی توربین‌های بادی را با استفاده از یک مطالعه موردی مورد بررسی قرار دهد و با ارزیابی و مقایسه شایستگی مدل‌های مختلف مبتنی بر رویکرد پارامتریک، بر مبنای رابطه غیرخطی و کران‌دار بین دو متغیر سرعت، به‌عنوان متغیر مستقل، و توان خروجی توربین بادی، به‌عنوان متغیر پاسخ، برترین مدل را معرفی کند.

در این تحقیق، تجزیه و تحلیل‌ها مبتنی بر اطلاعات مربوط به سرعت باد و توان خروجی توربین بادی AOC 15/50 مستقر در یک نیروگاه بادی انجام شده است. این داده‌ها با استفاده از نرمالیزه کردن منحنی توان ارائه شده توسط سازنده آن نسبت به شرایط منطقه محل استقرار به دست آمده است. در این تحقیق، پس از معرفی چهار مدل چندجمله‌ای درجه دو، نمایی، مکعب و مکعب تقریبی و به‌دست‌آوردن مدل‌های تطبیق داده شده به داده‌های توربین مورد مطالعه، با استفاده از آزمون نیکویی برازش<sup>۱</sup> و نرم‌افزار متلب تطبیق این مدل‌ها با منحنی نرمال شده بررسی می‌شود. در بخش دوم این مقاله، منحنی توان و مشخصه‌های آن معرفی می‌شود. بخش سوم این مقاله به تشریح چهار مدل چندجمله‌ای درجه دو، نمایی، مکعب و مکعب تقریبی که برای مدل‌سازی منحنی توان به کار می‌روند، اختصاص یافته است. پس از تجزیه و تحلیل و محاسبه معادلات معرفی شده فوق برای توربین بادی مورد مطالعه، در بخش چهارم، شایستگی این مدل‌ها با استفاده از ضریب تعیین ( $R^2$ ) به‌عنوان شاخص سنجش نیکویی برازش مدل بررسی می‌شود. آخرین بخش این مقاله به نتیجه‌گیری از این تحقیق اختصاص دارد.

## ۲. منحنی توان و مشخصه‌های آن

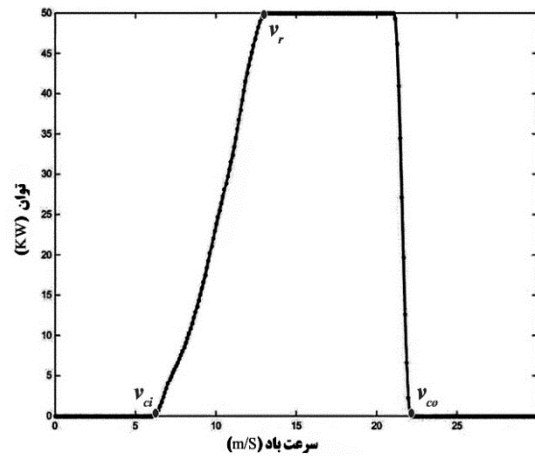
توان تولیدی توسط یک توربین بادی را معمولاً از طریق منحنی توان، تشریح می‌کنند. در منحنی توان، رابطه بین سرعت باد و توان نشان داده می‌شود. مرجع [۶] مزایای استفاده از منحنی توان را برای توربین‌های بادی به‌صورت زیر تشریح کرده است:

۱. کنترل مداوم عملکرد توربین‌ها برای اطمینان یافتن از کارکرد مطلوب آن‌ها؛
  ۲. یافتن دلایل عملکرد نامطلوب توربین‌های بادی و رفع سریع عیوب؛
  ۳. جلوگیری از وقوع ضرر و زیان سنگین حاصل از نقص‌های کوچک؛
  ۴. اطمینان از طراحی و استقرار صحیح توربین.
- برای یک توربین بادی سرعت متغیر<sup>۲</sup>، رابطه بین توان و سرعت

3. Cut-in wind speed  
4. Rated wind speed  
5. Cut-out wind speed  
6. Rated Power

1. Goodness of Fit Index (GFI)  
2. Variable Speed Wind Turbine ( VSWT)

می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌گردد مشخصه‌های منحنی توان معرفی شده در شکل (۲)، به راحتی در شکل (۳) قابل مشاهده است.



شکل (۳): منحنی توان نرمال شده توربین AOC 15/50

### ۳. مدل‌سازی منحنی توان

منحنی‌های توان که توسط سازنده ارائه می‌شوند معمولاً با استفاده از مشخصات فنی، مستقل از دما، فشار، رطوبت و چگالی هوا، بر پایه معادله بنیادین استخراج می‌شوند. به این ترتیب، منحنی‌های معرفی شده توسط سازنده با شرایط واقعی که توربین در آن استقرار می‌یابد، انطباق ندارد. از این رو نیروگاه‌ها لازم است برای کنترل توان خروجی توربین‌ها، منحنی توان را بر اساس شرایط واقعی مدل‌سازی کنند. در رویکرد پارامتریک انواع منحنی‌هایی که برای مدل‌سازی قسمت غیرخطی منحنی توان به کار می‌روند عبارت‌اند از:

- منحنی توان چندجمله‌ای درجه دو
- منحنی توان نمایی
- منحنی توان مکعب
- منحنی توان مکعب تقریبی

در منحنی توان چندجمله‌ای درجه دو، توان برحسب سرعت  $q(v)$  با یک چندجمله‌ای مرتبه دوم به صورت رابطه (۴) تقریب زده می‌شود [۲۳]:

$$q(v) = C_1 + C_2 v + C_3 v^2 \quad (4)$$

به طوری که  $C_1$ ،  $C_2$  و  $C_3$  ثوابتی هستند که بر مبنای اطلاعات  $v_{ci}$ ،  $P_r$  و  $v_r$  و به ترتیب با استفاده از روابط (۵)، (۶) و (۷) به دست می‌آیند.

$$C_1 = \frac{1}{(v_{ci} - v_r)^2} \left[ v_{ci}(v_{ci} + v_r) - 4v_{ci}v_r \left( \frac{v_{ci} + v_r}{2v_r} \right)^3 \right] \quad (5)$$

$$C_2 = \frac{1}{(v_{ci} - v_r)^2} \left[ 4(v_{ci} + v_r) \left( \frac{v_{ci} + v_r}{2v_r} \right)^3 - 3v_{ci} - v_r \right] \quad (6)$$

$$C_3 = \frac{1}{(v_{ci} - v_r)^2} \left[ 2 - 4 \left( \frac{v_{ci} + v_r}{2v_r} \right)^3 \right] \quad (7)$$

زمانی که از منحنی توان نمایی در یک توربین بادی سرعت متغیر، برای مدل‌سازی منحنی توان استفاده می‌شود، بخش غیرخطی منحنی توان به صورت رابطه (۸) تقریب زده می‌شود [۳۲]:

$$q(v) = \frac{1}{2} \rho A K_p (v^\beta - v_{ci}^\beta) \quad (8)$$

که در آن  $A$  برابر با مساحت جاروب شده توسط پره‌ها،  $\rho$  معادل چگالی هوای منطقه،  $v_{ci}$  معادل سرعت Cut-in و  $K_p$  و  $\beta$  مقادیر ثابت هستند.

منحنی توان مکعب با استفاده از ساده‌سازی رابطه (۸) به دست می‌آید. به طوری که در آن  $\beta$  برابر ۳ و  $v_{ci}$  برابر صفر فرض می‌شود. در این صورت منحنی توان به صورت رابطه (۹) ساده می‌شود [۳۳]:

$$q(v) = \frac{1}{2} \rho A C_{p,eq} v^3 \quad (9)$$

که در آن  $C_{p,eq}$  ثابت ضریب مکعبی است که معادل ضریب توان است. منحنی توان مکعب تقریبی، تقریبی از معادله (۹) می‌باشد که در آن  $C_{p,eq}$  با بیشترین مقدار خود که با  $C_{p,max}$  نشان داده می‌شود، تقریب زده شده است؛ بنابراین بخش غیرخطی منحنی توان مطابق رابطه (۱۰) نشان داده می‌شود [۳۴]:

$$q(v) = \frac{1}{2} \rho A C_{p,max} v^3 \quad (10)$$

#### ۳.۱. مدل‌سازی منحنی توان توربین AOC 15/50

در جدول (۱) پارامترهای تخمین زده شده برای تقریب منحنی توان توربین مورد مطالعه، نشان داده شده است. در این جدول مقادیر  $C_1$ ،  $C_2$  و  $C_3$  با استفاده از معادلات ۵ تا ۷ محاسبه شده است. دو پارامتر  $K_p$  و  $\beta$  در مدل نمایی (۸) و پارامتر  $C_{p,eq}$  در مدل مکعب (۹) با استفاده از روش حداقل مربعات تقریب زده شده‌اند. برای استفاده از روش حداقل مربعات از معادله (۱۱) استفاده شده است. در این روش باید مقدار  $J$  کمینه گردد. در معادله (۱۱)،  $q(v)$  مقدار توان خروجی قسمت غیرخطی منحنی توان مرجع توربین است (شکل ۳)،  $q'(v)$  مقدار توان خروجی قسمت غیرخطی از معادله منحنی توان برازش شده،  $v_I = v_{ci}$  و  $v_R = v_r$  می‌باشند. در این مقاله برای کمینه کردن  $J$  از الگوریتم نلدر-مید (روش سیمپلکس سراسیبی) که در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی شده است، استفاده می‌شود [۳۵].

$$J = \sum_{j=1}^{R-1} (q(v_j) - q'(v_j))^2 \quad (11)$$

1. Nelder-Mead
2. Downhill Simplex Search

## ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع فعال با استفاده از الگوریتم کلاس‌بندی نقاط بار شبکه ۷۵

$$q(v) = \frac{1}{2} * 0.93 * 177 * 0.84 (v^{2.6} - 4.9^{2.6}) \quad (14)$$

منحنی توان مکعب توربین:

$$q(v) = \frac{1}{2} * 0.93 * 177 * 0.31 * v^3 \quad (15)$$

منحنی توان مکعب تقریبی توربین:

$$q(v) = \frac{1}{2} * 0.93 * 177 * 0.31 * v^3 \quad (16)$$

### ۴. آزمون نیکویی برازش منحنی‌های توربین و تحلیل آنها

پس از محاسبه ضرایب و پارامترهای مدل‌های چهارگانه معرفی شده در بخش قبلی این مقاله، با استفاده از نرم‌افزار متلب برای بررسی میزان تطبیق مدل‌های موجود با منحنی نرمال‌شده شکل (۳)، آزمون نیکویی برازش هریک از مدل‌ها با استفاده از شاخص ضریب تعیین ( $R^2$ ) محاسبه می‌شود.

جدول (۳) ضریب تعیین به‌دست‌آمده برای هریک از منحنی‌های مدل‌سازی‌شده این تحقیق را نشان می‌دهد.

جدول (۳): ضریب تعیین $R^2$ برای مدل‌های منحنی توان توربین مورد مطالعه	
مدل	ضریب تعیین
چندجمله‌ای درجه‌دو	۰/۸۳۸
نمایی	۰/۹۹۹۲
مکعب	۰/۹۰۶۱
مکعب تقریبی	۰/۹۹۷۷

شکل (۴) منحنی توان نرمال‌شده (منحنی شکل ۳) را در مقایسه با چهار مدل چندجمله‌ای درجه‌دو، نمایی، مکعب و مکعب تقریبی به‌دست‌آمده از این تحقیق نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مدل‌سازی‌های انجام‌شده در این تحقیق با استفاده از رویکرد چندجمله‌ای درجه‌دو نسبت به سه مدل دیگر تطابق کمتری با منحنی نرمال‌شده شکل (۳) دارد. با توجه به جدول (۳) و شکل (۴)، مشاهده می‌شود که به‌ترتیب، مدل منحنی نمایی و مدل منحنی مکعب تقریبی از تطبیق بیشتری با منحنی توان نرمال‌شده برخوردارند. پس از این دو مدل، منحنی توان مکعب نیز از شرایط نسبتاً قابل قبولی برخوردار است.

شایان ذکر است که مقدار چگالی، مساحت جاروب‌شده و سرعت  $v_{ci}$  در مدل نمایی (۸) و  $C_{p,max}$  در مدل مکعب تقریبی (۹) بر اساس اطلاعات ثبت‌شده در نیروگاه و از منحنی مرجع نرمال‌شده به دست آمده است.

در جدول (۲) مقادیر  $v_r$  و  $v_{ci}$  (که برای محاسبه ضرایب تقریب چندجمله‌ای استفاده می‌شوند) و دیگر پارامترهای عملکردی توربین بادی مورد مطالعه را که برای محاسبه مدل‌های نمایی، مکعب و مکعب تقریبی مورد نیاز است مشاهده می‌کنید.

جدول (۱): پارامترهای تقریبی معادلات مدل‌سازی برای AOC 15/50

پارامتر			تقریب
$C_3 = 0.0127$	$C_2 = 0.0158$	$C_1 = 0.0747$	چندجمله‌ای درجه‌دو
$\beta = 2/6$	$K_p = 0.84$		نمایی
$C_{p,eq} = 0.31$			مکعب
$C_{p,max} = 0.34$			مکعب تقریبی

جدول (۲): پارامترهای عملکردی توربین AOC 15/50

پارامتر	مقدار
$R_r(kw)$ توان اسمی	۵۰
$v_{ci}(m/s)$ سرعت باد راه‌انداز	۴/۹
$v_r(m/s)$ سرعت اسمی	۱۲/۹
$v_{co}(m/s)$ سرعت توقف باد	۲۲/۰
$A(m^2)$ مساحت جاروب‌شده	۱۷۷
$\rho(kg/m^3)$ چگالی هوا	۰/۹۳

از آنجایی که برای مدل‌سازی منحنی توان توربین مورد مطالعه، نیاز به چگالی هوای منطقه استقرار توربین می‌باشد، لذا در این تحقیق برای تخمین چگالی هوای منطقه، از رابطه (۱۲) که در آن  $h$  ارتفاع از سطح دریا می‌باشد، استفاده شده است. (ارتفاع منطقه از سطح دریا برابر ۳۶۹ متر است) [۳۶]:

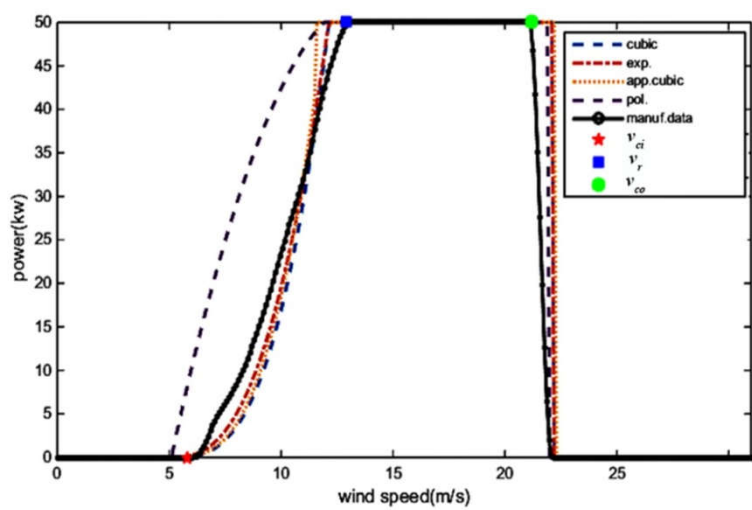
$$\rho = 1.225 - (1.194 * 10^{-4}) * h \quad (12)$$

بدین ترتیب مدل‌های به‌دست‌آمده برای توان خروجی توربین AOC 15/50 به قرار زیر است:

منحنی توان چندجمله‌ای مرتبه دوم توربین:

$$q(v) = 0.0747 + 0.0158v - 0.0127v^2 \quad (13)$$

منحنی توان نمایی توربین:



شکل (۴): منحنی توان توربین AOC 15/5 و مدل‌سازی‌های منحنی توان

## ۵. نتیجه‌گیری

مدل‌سازی منحنی توان توربین‌های بادی و تجزیه و تحلیل آن، یکی از راه‌های مهم در بررسی عملکرد و کنترل توان توربین‌های بادی محسوب می‌شود. در این مقاله با استفاده از اطلاعات ثبت‌شده از توربین بادی مورد مطالعه، چهار مدل با رویکردی‌های چندجمله‌ای درجه‌دو، نمایی، مکعب و مکعب تقریبی برای توان عملکرد توربین طراحی شد. پس از بررسی مدل‌های فوق با شاخص ضریب تعیین و تطبیق این مدل‌ها با منحنی نرمال‌شده توربین مورد مطالعه، پیش‌بینی می‌شود که منحنی توان نمایی از قابلیت عملکردی بهتری برخوردار باشد.

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل مدل‌سازی منحنی توان توربین مورد مطالعه با رویکرد پارامتریک نشان می‌دهد:

در توربین مورد مطالعه مدل نمایی و مکعب تقریبی، نسبت به سایر مدل‌ها بهتر هستند.

معادله مکعب نیز در عین سادگی، مقادیر قابل قبولی از آزمون نیکویی برازش را در این مطالعه نشان می‌دهد که همین امر باعث می‌شود این معادله نیز برای استفاده در عمل پیشنهاد شود.

در این تحقیق، معادله چندجمله‌ای درجه‌دو با وجود اینکه پارامترهای آن به سادگی به دست می‌آید، از عملکرد پایین‌تری نسبت به مدل‌های دیگر دارد و این نشان می‌دهد مدل چندجمله‌ای نسبت به پارامترهایی مثل سرعت باد از حساسیت بالایی برخوردار است.

## مراجع

- [1] International Energy Agency (IEA), "Status of power system transformation 2018", IEA, Paris, Tech. Rep, 2018.
- [2] Global Wind Energy Council (GWEC), "Global wind report 2017-annual market update, 2017", Available at <http://www.gwec.net>, 2017.
- [3] Marugán, A. P., Márquez, F. P. G. and Papaelias, M., "Multivariable analysis for advanced analytics of wind turbine management", In Proceedings of the Tenth International Conference on Management Science and

## فهرست علائم

سرعت ( $m.s^{-1}$ )	$V$
مساحت جاروب‌شده توسط پره‌ها ( $m^2$ )	$A$
توان تولیدشده توسط توربین بادی (W)	$P_m(v)$
توان باد (W)	$P_w(v)$
ضریب توان	$C_p$
چگالی ( $kg.m^{-3}$ )	$\rho$
سرعت باد راه‌انداز ( $m.s^{-1}$ )	$v_{ci}$
سرعت توقف باد ( $m.s^{-1}$ )	$v_{co}$
سرعت نامی باد ( $m.s^{-1}$ )	$v_r$
توان اسمی باد (W)	$P_r$
بخش غیرخطی منحنی توان	$q(v)$
ضرایب تقریب چندجمله‌ای درجه‌دو	$C_1, C_2, C_3$
ضرایب تقریب نمایی	$K_p, \beta$
ضرایب تقریب مکعب	$C_{p,eq}$
ماکزیمم مقدار ضریب توان مؤثر	$C_{p,max}$
ارتفاع از سطح دریا (m)	$h$
زاویه گام پره	$\theta$
نسبت سرعت نوک پره	$\lambda$
شعاع روتور (m)	$R$

- Engineering Management, Springer, Singapore, pp. 319-328, 2017.
- [4] Panahi, D., Deilami S. and Masoum M. A., "Evaluation of parametric and non-parametric methods for power curve modelling of wind turbines", 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), pp. 996-1000, 2015.
- [5] Marvuglia, A. and Messineo A., "Monitoring of wind farms' power curves using machine learning techniques", Applied Energy, Vol. 98, pp. 574-583, 2012.
- [6] Lydia, M., Kumar S. S., Selva kumar, A. I. Prem Kumar, G. E., "A comprehensive review on wind turbine power curve modeling techniques", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 30, pp.452-460, 2014.
- [7] Thapar, V., Gayatri A. and Vinod K. S., "Critical analysis of methods for mathematical modelling of wind turbines", Renewable Energy, Vol. 36, No. 11, pp. 3166-3177, 2011.
- [8] Gautam, P. K. and Venayagamoorthy, G. K., "Dynamic performance model of wind turbine generators", In Computational Intelligence Applications In Smart Grid (CIASG), IEEE Symposium on, pp. 101-106, 2013.
- [9] Ashok, S., "Optimised Model for Community-based Hybrid Energy Systems", Renewable Energy, Vol. 32, pp. 1155-1164, 2007.
- [10] Nelson, D. B., Nehrir, M. H. and Wang, C., "Unit sizing and cost analysis of stand-alone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems", Renewable energy, Vol. 31, No. 10, pp. 1641-1656, 2006.
- [11] Kolhe, M., Agbossou, K., Hamelin, J. and Bose, T. K., "Analytical model for predicting the performance of photovoltaic array coupled with a wind turbine in a stand-alone renewable energy system based on hydrogen", Renewable Energy, Vol. 28, No. 5, pp.727-742, 2003.
- [12] Habib, M.A., Said, S.A.M., El-Hadidy, M.A. and Al-Zaharna, I., "Optimization procedure of a hybrid photovoltaic wind energy system", Energy, Vol. 24, No. 11, pp. 919-929, 1999.
- [13] Carrillo, C., Montañó, A. F. O., Cidrás, J. and Díaz-Dorado, E., "Review of power curve modelling for wind turbines", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 21, pp. 572-581, 2014.
- [14] Kusiak, A., Zheng, H. and Song, Z., "On-line monitoring of power curves", Renewable Energy, Vol.34, No. 6, PP. 1487-1493, 2014.
- [15] Lydia, M., Selvakumar, A. I., Suresh Kumar, S. and Prem Kumar, G. E., "Advanced algorithms for wind turbine power curve modeling", IEEE Transactions on sustainable energy, Vol. 4, No. 3, pp. 827-835, 2013.
- [16] Khalfallah, M. G. and Koliub, A. M., "Suggestions for improving wind turbines power curves", Desalination, Vol. 209, No. 1-3, pp. 221-229, 2007.
- [17] Gottschall, J. and Peinke, J., "How to improve the estimation of power curves for wind turbines", Environmental Research Letters, Vol.3, No. 1, pp. 015005, 2008.
- [18] Ritter M. and Deckert, L., "Site assessment, turbine selection, and local feed-in tariffs through the wind energy index", Applied Energy, Vol. 185, pp. 1087-1099, 2017.
- [19] Kusiak, A., Zheng H. and Song, Z., "Models for monitoring wind farm power", Renewable Energy, Vol. 34, No. 3, pp. 583-590, 2009.
- [20] Astolfi, D., Castellani, F., Garinei, A. and Terzi, L., "Data mining techniques for performance analysis of onshore wind farms", Applied Energy, Vol. 148, pp. 220-233, 2015.
- [21] Pelletier, F., Masson, C. and Tahan, A., "Wind turbine power curve modelling using artificial neural network", Renewable Energy, Vol. 89, pp. 207-214, 2015.
- [22] Üstüntaş, T. and Şahin, A. D., "Wind turbine power curve estimation based on cluster center fuzzy logic modeling", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.96, No. 5, pp. 611-620, 2008.
- [23] Ouyang, T. and et al., "Modeling wind-turbine power curve: A data partitioning and mining approach", Renewable Energy, Vol. 102, Part A, pp. 1-8, 2017.
- [24] He, Y. and Kusiak, A. "Performance Assessment of Wind Turbines: Data-Derived Quantitative Metrics", IEEE, Transactions on Sustainable Energy, Vol. 9, No. 1, pp.65-73, 2017.
- [25] Giorsetto, P. and Utsurogi K. F., "Development of a new procedure for reliability modeling of wind turbine generators", IEEE Trans Power App Syst, PAS - 102, pp. 134-43, 1983.
- [26] Kusiak, A. and Verma, A., "Monitoring Wind Farms with Performance Curves", IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012.
- [27] Morshedizadeh, M., Kordestani, M., Carriveau, R., Ting, D. S. K. and Saif, M., "Improved power curve monitoring of wind turbines", Wind Engineering, Vol.41, No. 4, pp. 260-271, 2017.
- [28] Shokrzadeh, S., Jafari Jozani, M. and Bibeau, E., "Wind turbine power curve modeling using advanced parametric and nonparametric methods", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 5, No. 4, pp. 1262-1269, 2014.
- [29] Schlechtingen, M., Santos, I. F. and Achiche, S., "Using data-mining approaches for wind turbine power curve monitoring: A comparative study", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 4, No. 3, pp. 671-679, 2013.
- [30] Goudarzi, A., Davidson, I. E., Ahmadi, A. and Venayagamoorthy, G. K., "Intelligent analysis of wind turbine power curve models", In Computational Intelligence Applications in Smart Grid (CIASG), IEEE Symposium on, pp. 1-7, 2014.
- [31] Jacobson, R., Meadors, M., Jacobson, E. and Link, H., "Power Performance Test Report for the AOC 15/50 Wind turbine, Test B", 2003.
- [32] Mathew, S., "Wind energy: fundamanetals, resource analysis and economics", Berlin: Springer, 2006.
- [33] Linders, J. and Thiringer, T., "Control by variable rotor speed of a fixed-pitch wind turbine operating in a wide speed range", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.8, pp. 520-526, 1993.
- [34] EL-Shimy, M., "Optimal site matching of wind turbine generator: case study of Gulf of Suez region in Egypt", Renewable energy, Vol. 35, pp. 1870-1878, 2010.
- [35] Lagarias, J., Reeds, J., Wright, M. and Wright, P., "Convergence properties of the Nelder-Mead simplex method in low dimensions", SIAM Journal of Optimization, Vol. 9, No. 1, pp. 112-47, 1998.
- [۳۶] مجرد، فیروز، همتی، شهرام، «ارزیابی قابلیت‌های انرژی باد در استان‌های کرمانشاه و کردستان»، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال سیزدهم، شماره ۲۹، صفحه ۱۳۷-۱۵۷، ۱۳۹۲.