

## مدل سازی مزرعه بادی مجهز به ژنراتور القایی دوسوتغذیه با معادل سازی بخش مکانیکی با استفاده از خوشه بندی بر اساس ضریب جذب توان

سامان احمدی<sup>۱</sup>، ایمان پورفر<sup>۲\*</sup>، امین ساکی<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۲۰ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۱۳	
<b>واژگان کلیدی:</b> مزرعه بادی، ژنراتور القایی دوسو تغذیه، کاهش مدل، الگوریتم k-means	با توسعه روزافزون مزارع بادی، تأثیر آن‌ها بر سیستم‌های قدرت، قابل چشم‌پوشی نبوده، مدل سازی مناسب مزارع بادی از اهمیتی خاص برخوردار شده است. در بسیاری از مطالعات، هنگام مطالعه اثر یک مزرعه بادی روی سیستم قدرت، به جای مدل سازی دقیق همه توربین‌های موجود در مزرعه، عملکرد مزرعه بادی در PCC به صورت عملکرد مزرعه معادلی شامل یک ژنراتور و یک توربین معادل در نظر گرفته می‌شود. این موضوع، سبب سادگی تحلیل سیستم و کاهش چشمگیر بار محاسباتی مطالعات می‌گردد. برای بهبود دقت می‌توان بخش مکانیکی را با استفاده از روش‌های دسته بندی به جای یک توربین با چند توربین معادل سازی کرد. تاکنون روش‌های مختلفی برای انجام این نوع معادل سازی در مزارع بادی معرفی شده‌اند که همه آن‌ها از ویژگی سرعت باد به عنوان شاخص دسته بندی توربین‌ها استفاده می‌کنند. در این مقاله برای دسته بندی توربین‌های بادی به جای سرعت باد استفاده از ضریب جذب توان توربین بادی به عنوان ویژگی دسته بندی پیشنهاد شده است. سپس در ادامه، با معادل سازی بخش مکانیکی توربین‌ها در هر یک از خوشه‌ها نتایج با حالتی که دسته بندی بر اساس سرعت باد صورت گرفته باشد و نیز با مدل دقیق، مورد مقایسه قرار گرفته است. برای شبیه سازی، از نرم افزار MATLAB استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که روش مورد استفاده، موجب بهبود دقت نتایج حاصل از معادل سازی می‌شود.

### ۱- مقدمه

بادی معمولاً از دو نوع ژنراتور القایی استفاده می‌شود:  
الف. ژنراتور القایی قفس سنجابی<sup>۴</sup> (SCIG)؛  
ب. ژنراتورهای القایی از دوسو تغذیه<sup>۵</sup> (DFIG).  
در این میان، ژنراتورهای القایی از دوسو تغذیه به دلایل مختلفی از جمله بازده بالا، قابلیت کنترل پذیری قابل قبول و بهبود کیفیت توان، یکی از پرکاربردترین تکنولوژی‌ها در مزارع

استفاده از توان بادی به دلایل مختلف در سال‌های اخیر، رشدی فزاینده داشته است که از آن جمله می‌توان به دلایل اقتصادی و زیست محیطی اشاره کرد. برای تولید توان بادی، نیازمند احداث مزارع بادی هستیم و هر یک از این مزارع با توجه به ظرفیت توان تولیدی می‌تواند شامل صدها توربین بادی باشد. در سیستم‌های تولید انرژی مورد استفاده در مزارع

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: pourfar@jsu.ac.ir

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول

۲. استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول

۳. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول

<sup>4</sup>. Squirrel cage induction generator

<sup>5</sup>. Doubly fed induction generator

بادی هستند. در سالیان اخیر، بخش عمده‌ای از مطالعات در حوزه مزارع بادی به مزارع مجهز به ژنراتورهای القایی دوسوتغذیه معطوف شده است. با افزایش تعداد و ظرفیت مزارع بادی، دیگر از اثر این تولیدات بر عملکرد، پایداری و بهره‌برداری از سیستم قدرت نمی‌توان چشم‌پوشی کرد [۱-۱۳]. به همین دلیل، مدل‌سازی مزرعه بادی در نقطه اتصال به شبکه، امری ضروری است که با توجه به تعداد زیاد توربین‌ها کاری بسیار پیچیده خواهد بود. برای کاهش پیچیدگی سیستم معمولاً به جای استفاده از مدل دقیق، از مدل‌های معادل که موجب کاهش پیچیدگی سیستم شده، ولی مشخصات توان در نقطه اتصال به شبکه را به‌خوبی حفظ می‌کنند، استفاده می‌شود.

نحوه مدل‌سازی مزرعه بادی در مطالعات مختلف، متفاوت است و به اهداف در نظر گرفته شده در مطالعه بستگی دارد. در برخی مطالعات برای بررسی رفتار توربین‌های موجود در مزرعه، نیاز است که تمامی توربین‌های موجود به‌طور دقیق مدل‌سازی شود و به اصطلاح، مزرعه با جزئیات مدل شود؛ اما در برخی مطالعات همچون پایداری گذرا می‌توان برای کاهش پیچیدگی سیستم و نیز کاهش حجم محاسبات، از مدل‌های کاهش مرتبه یافته استفاده کرد.

در مرجع شماره [۴] توربین‌های موجود در هر ردیف از توربین‌ها در مزرعه با یک توربین معادل‌سازی می‌شوند. کاربرد این روش در مزارعی است که دارای ساختار منظم هستند و در آن سرعت باد تمام توربین‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. در مرجع شماره [۵]، دو نوع مدار معادل برای مزرعه بادی ارائه شده است؛ یکی با در نظر گرفتن سرعت باد یکسان برای توربین‌های موجود در ستون‌های مشابه و دیگری با در نظر گرفتن سرعت باد ورودی متفاوت برای کلیه توربین‌ها. فرناندز و همکاران، با در نظر گرفتن سرعت باد ورودی هریک از توربین‌ها، مدل ساده‌شده‌ای برای توربین بادی ارائه کردند که در آن، گشتاور هریک از توربین‌ها به صورت مجزاً محاسبه شده، سپس مجموع گشتاورها به‌عنوان ورودی ژنراتور معادل در نظر گرفته می‌شود [۶]. همین نویسندگان در مقاله‌ای دیگر، در ابتدا یک باد معادل برای مزرعه بادی محاسبه کرده، بر مبنای روش معادل‌سازی تک‌ماشینه، مدلی معادل برای مزرعه ایجاد کردند [۷]. در

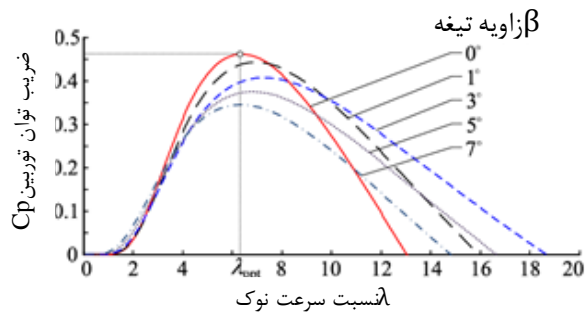
مرجع شماره [۸]، محققان با انجام شبیه‌سازی در حالت‌های مختلف، مدل‌های معادل تک‌ماشینه و چندماشینه را اعتبارسنجی کردند. به‌منظور بهبود کیفیت گروه‌بندی توربین‌های موجود در مزارع بادی در روش معادل‌سازی چندماشینه و یافتن توربین‌های با عملکرد شبیه به هم به‌طور نسبتاً دقیق، از روش‌های خوشه‌بندی مبتنی بر الگوریتم‌های کامپیوتری استفاده می‌شود. در مرجع شماره [۹]، نویسندگان با استفاده از تکنیک خوشه‌بندی مبتنی بر مفهوم بردار پشتیبان، توربین‌های موجود در مزرعه را دسته‌بندی و مزرعه را معادل‌سازی کردند. پنگ و همکارانش با بهره‌گیری از تکنیک‌های فازی، مدل معادل چندماشینه‌ای از مزرعه بادی ارائه کردند. در این مقاله از شاخص‌های مختلف ژنراتور توربین بادی از دوسو تغذیه به‌عنوان شاخص دسته‌بندی استفاده شده است [۱۰].

در مرجع شماره [۱۱]، یک مدل معادل با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پیش‌بینی توان بادی ارائه شده است. در این مقاله، اطلاعات توان بادی و سرعت باد توسط یک روش نمونه‌برداری مولتی‌سناریو گرفته شده، سپس این اطلاعات به یک خوشه‌بند داده می‌شوند. روش به کار گرفته شده در [۱۲] برای معادل‌سازی پارامترها شبیه به مرجع شماره [۹] بوده، یک روش کلی نیست.

به‌طور کلی کارهای انجام‌شده در زمینه معادل‌سازی را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: ۱. معادل‌سازی فقط به روش تک‌ماشینی؛ ۲. معادل‌سازی چندماشینی بدون به‌کارگیری یک روش علمی و الگوریتمی.

با توجه به اینکه توان تولید مزرعه بادی، توان سومی از سرعت باد است، این ایده تداعی می‌شود که نتایج معادل‌سازی‌ها با در نظر گرفتن شاخص باد، دارای خطای بیشتری نسبت به معادل‌سازی بر اساس شاخص ضریب توان باشد؛ زیرا توان تولیدی توربین‌ها برحسب توان یکم ضریب توان است.

در این مقاله در ابتدا مدل دینامیکی DFIG بیان شده، سپس دو مدل ثابت و متغیر برای سرعت باد در نظر گرفته می‌شود که شکل آن‌ها در متن مقاله رسم شده است. بر این اساس، توربین‌های بادی موجود در دو حالت شامل سرعت باد ثابت و سرعت باد متغیر، مدل‌سازی شده‌اند و توربین‌ها با در نظر گرفتن دو شاخص که شاخص دوم مورد پیشنهاد مقاله بوده،



شکل ۱: منحنی ضریب جذب توان برحسب نسبت سرعت نوک

### ۲-۱-۱- معادلات ولتاژ

معادلات ولتاژ برای محورهای  $d$  و  $q$  برای استاتور و روتور به صورت زیر است. توضیحات پارامترها در انتهای بخش ۲-۱ می‌آید:

$$U_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \psi_{qs} \omega_e \quad (4)$$

$$U_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \psi_{ds} \omega_e \quad (5)$$

$$U_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - \psi_{qr} \omega_s \quad (6)$$

$$U_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} - \psi_{dr} \omega_s \quad (7)$$

### ۲-۱-۲- معادلات شار پیوندی

معادلات شار برای محورهای  $d$  و  $q$  برای استاتور و روتور به صورت زیر است. توضیحات پارامترها در انتهای بخش ۲-۱ می‌آید:

$$\psi_{ds} = L_s I_{ds} + L_m I_{dr} \quad (8)$$

$$\psi_{qs} = L_s I_{qs} + L_m I_{qr} \quad (9)$$

$$\psi_{dr} = L_r I_{dr} + L_m I_{ds} \quad (10)$$

$$\psi_{qr} = L_r I_{qr} + L_m I_{qs} \quad (11)$$

### ۲-۱-۳- معادله گشتاور الکترومغناطیسی

معادلات ولتاژ برای محورهای  $d$  و  $q$  برای استاتور و روتور به صورت زیر است. توضیحات پارامترها در انتهای بخش ۲-۱ می‌آید:

$$T_e = \frac{3}{2} N_p L_m (I_{qs} I_{dr} - I_{ds} I_{qr}) \quad (12)$$

دسته‌بندی می‌شوند. این دو شاخص شامل: ۱. سرعت باد ورودی توربین‌ها؛ ۲. ضریب جذب توان توربین‌ها است. پس از آن، کار معادل‌سازی انجام شده است. در مرحله بعد، بخش مکانیکی توربین‌های موجود در مزرعه که منوط به استفاده از ضریب جذب توان به‌عنوان شاخص پیشنهادی است، معادل‌سازی شده، نتایج حاصل از معادل‌سازی بر اساس دو شاخص ارائه‌شده، با نتایج مدل دقیق مزرعه مقایسه گردیده است. تمایز و بهبود نتایج توسط شاخص پیشنهادی مقاله (ضریب جذب توان) در انتها با رسم نتایج و بیان آن‌ها در انتهای مقاله نشان داده می‌شود. عملکرد شاخص ارائه‌شده در شرایط خطا با در نظر گرفتن یک خطای سه فاز به زمین و نیز در شرایط افت ولتاژ با کاهش ولتاژ شبکه به  $0.8$  پریونیت در سیستم شبیه‌سازی شده بررسی گردیده است.

### ۲- مدل دینامیکی DFIG

رابطه توان خروجی توربین بادی DFIG به صورت زیر است:

$$P_w = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \theta) \rho A_k v_w^3 \quad (1)$$

در این رابطه،  $P_w$  توان تولیدی برحسب وات،  $\rho$  چگالی هوا برحسب کیلوگرم بر متر مکعب و  $V_w$  سرعت باد برحسب متر بر ثانیه است.  $C_p(\lambda, \theta)$  ضریب جذب توان توربین بادی است که خود تابعی از زاویه لبه پره  $\theta$  و نسبت سرعت نوک پره  $\lambda$  می‌باشد. منحنی  $C_p^2$  به صورت تجربی برای توربین‌های بادی تعیین شده، با استفاده از روش‌های ریاضی، رابطه‌ای به آن نسبت داده می‌شود. در این مقاله، این منحنی به صورت زیر در نظر گرفته شده است [۱۳]:

$$C_p(\lambda, \theta) = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\theta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (2)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\theta} - \frac{0.035}{\theta^3 + 1} \quad (3)$$

در شکل (۱) منحنی ضریب جذب توان برحسب سرعت نوک پره نشان داده شده است.

### ۲-۱- معادلات ژنراتور

معادلات مربوط به ژنراتور یک توربین بادی DFIG معمولاً در سیستم  $d$ - $q$  بیان می‌شوند و معادلات پایه‌ای شامل ولتاژ، شار پیوندی و گشتاور در ادامه آمده است [۱۰].

<sup>2</sup>. Power coefficient

<sup>1</sup>. Tip speed ratio

### ۳- مدل‌سازی باد

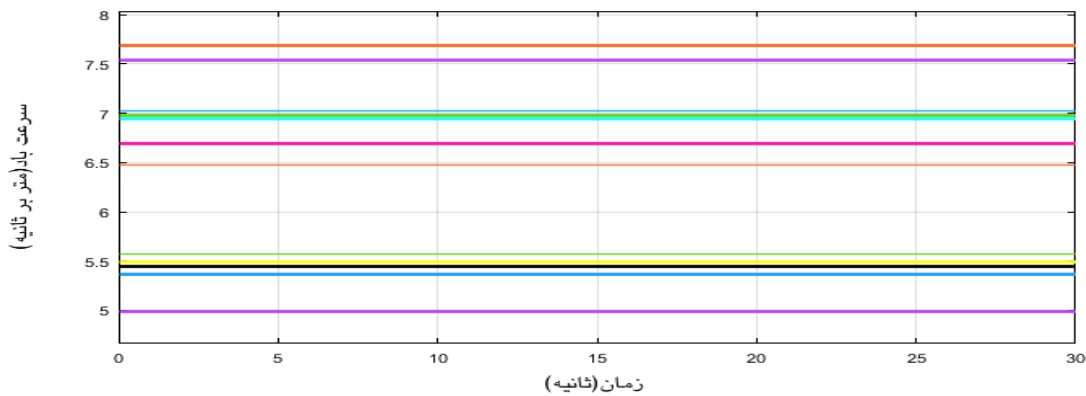
در این مقاله، دو مدل برای سرعت باد ورودی مزرعه در نظر گرفته شده است:

الف. سرعت باد ثابت؛

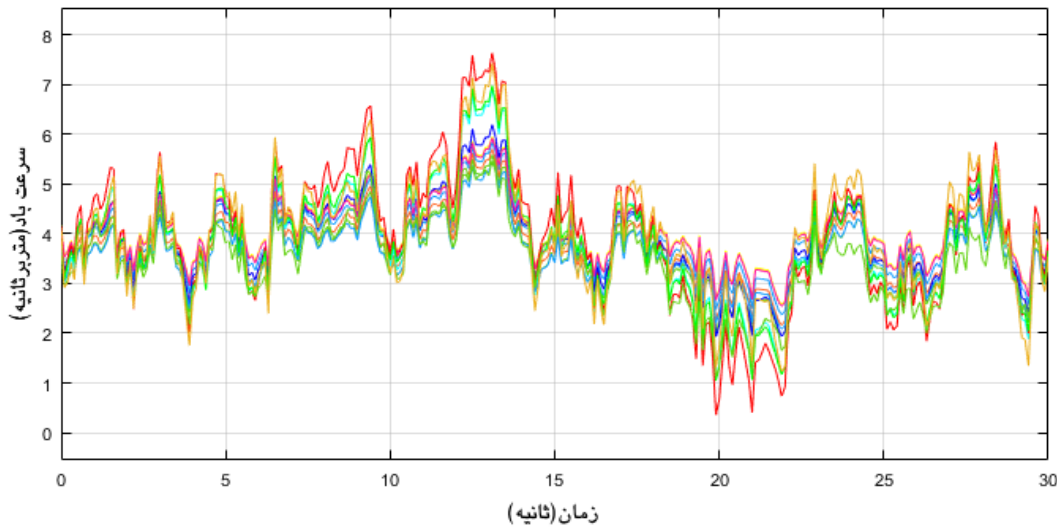
ب. سرعت باد متغیر.

در حالت اول، فرض بر این است که سرعت باد تقریباً یکنواخت و اختلاف سرعت باد توربین‌ها ناچیز است، در حالی که در شرایط باد متغیر اختلاف سرعت بادها بیشتر شده، باد ورودی مزرعه به واقعیت نزدیک‌تر است. مدل‌های باد در شکل‌های (۲-الف) و (۲-ب) نشان داده شده‌اند.

در این روابط،  $U_{qr}$  و  $U_{dr}$ ،  $U_{qs}$ ،  $U_{ds}$  به ترتیب ولتاژ محورهای d و q برای استاتور و روتور هستند.  $I_{dr}$ ،  $I_{qs}$ ،  $I_{ds}$  و  $I_{qr}$  به ترتیب جریان‌های الکتریکی محورهای d و q برای استاتور و روتور بوده،  $\psi_{qr}$  و  $\psi_{dr}$ ،  $\psi_{qs}$ ،  $\psi_{ds}$  به ترتیب شار پیوندی محورهای d و q برای استاتور و روتور هستند.  $R_r$  مقاومت‌های استاتور و روتور و  $\omega_s$  و  $\omega_e$  سرعت‌های زاویه ای چرخشی و سرعت زاویه‌ای لغزشی روتور هستند.  $L_r$  و  $L_s$  اندوکتانس‌های خودی استاتور و روتور بوده،  $L_m$  اندوکتانس متقابل میان استاتور و روتور است.  $N_p$  در اینجا تعداد جفت قطب‌هاست.



شکل ۲-الف: سرعت‌های باد ثابت مورد استفاده



شکل ۲-ب: سرعت‌های باد متغیر مورد استفاده

الف. سرعت باد ورودی توربین‌ها؛

ب. ضریب جذب توان توربین‌ها.

سرعت باد در بیشتر مقالات موجود در این زمینه، به‌عنوان

### ۴- دسته‌بندی توربین‌ها

در این بخش، توربین‌های موجود در مزرعه را با در نظر گرفتن دو شاخص دسته‌بندی می‌کنیم:

$C_j$  تخصیص داده می‌شوند، اگر و تنها اگر رابطه زیر برقرار باشد:

$$x_i - z_j < x_i - z_p, p = 1, 2, \dots, K, j \neq p \quad (13)$$

گام سوم: وقتی که تمام نمونه‌ها به خوشه‌ها تخصیص داده شدند، موقعیت  $k$  مرکز خوشه دوباره محاسبه می‌شود. مراکز جدید خوشه  $z_1, \dots, z_k$  از رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

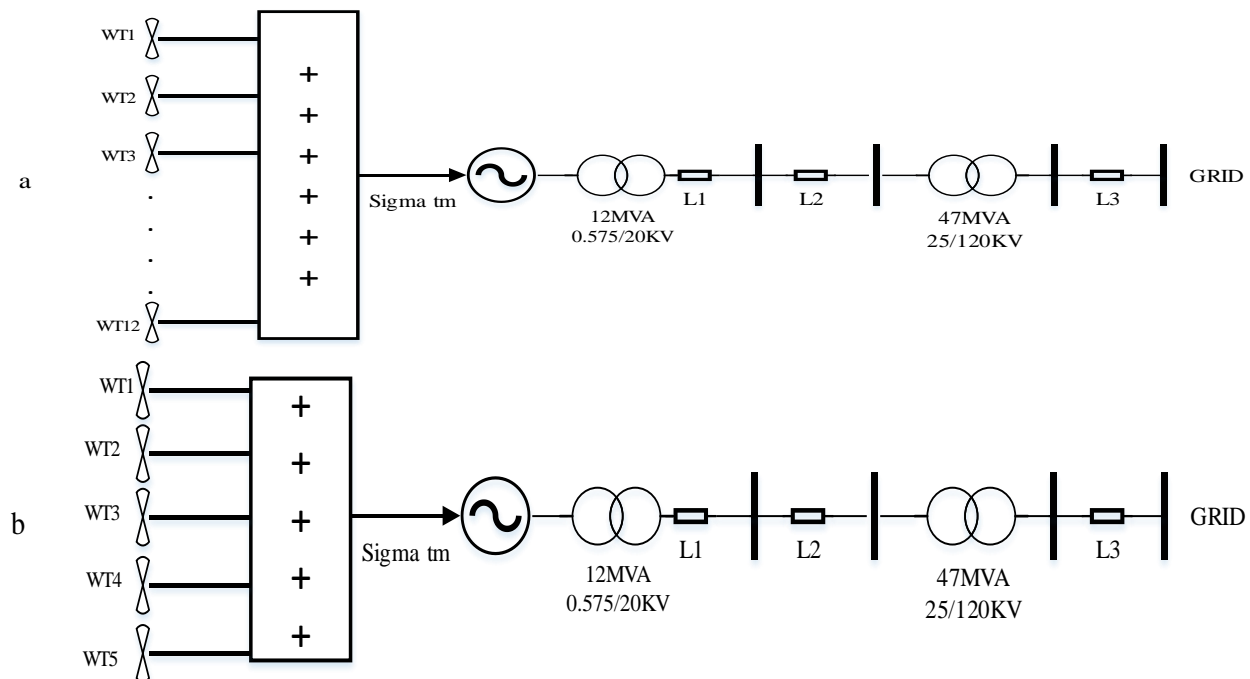
$$Z_i = 1/n_i \sum_{j=1}^{n_i} X_j, i=1, \dots, k \quad (14)$$

که  $n_i$  تعداد عناصر متعلق به خوشه  $C_i$  است.

گام چهارم: گام‌های دوم و سوم آنقدر تکرار می‌شوند تا مراکز دیگر جابه‌جا نشوند. در شرایطی که فرایند به‌طور طبیعی در گام چهارم به اتمام نرسد، بهتر است روال فوق به‌ازای بیشترین تکرار از پیش تعیین شده اجرا شود. فلوجارت خوشه‌بندی با استفاده از تکنیک  $k$ -means در شکل (۴) نشان داده شده است. نتایج خوشه‌بندی در جداول ۱ تا ۴ آمده است.

شاخصی برای دسته‌بندی به کار می‌رود. در این مقاله با در نظر گرفتن رابطه (۱) به جای سرعت باد، از ضریب جذب توان برای دسته‌بندی استفاده شده است. مدل دقیق مزرعه بادی شامل ۱۲ توربین است که به یک ژنراتور متصل و از طریق ترانسفورماتورها و خطوط انتقال به شبکه متصل می‌شوند. پس از معادل‌سازی، تعداد توربین‌ها به ۵ توربین کاهش می‌یابد که شکل ۳ به‌خوبی گویای این حقیقت است. در این پژوهش، از الگوریتم خوشه‌بندی  $k$ -means برای خوشه‌بندی سرعت‌های باد و ضرایب توان توربین‌ها استفاده می‌شود. این روش در سال ۱۹۶۷ توسط مک کوئین ارائه شده است. ایده اصلی این روش، تعریف  $k$  مرکز برای هر یک از خوشه‌ها بوده، شامل مراحل زیر است:

گام اول: در ابتدا از بین  $n$  نقطه داده‌ای،  $k$  نقطه  $z_1, z_2, \dots, z_k$  به‌عنوان مراکز خوشه‌ها انتخاب می‌شوند. گام دوم: نقاط داده‌ای  $X_i$  و  $i=1, 2, \dots, n$  به خوشه فرضی



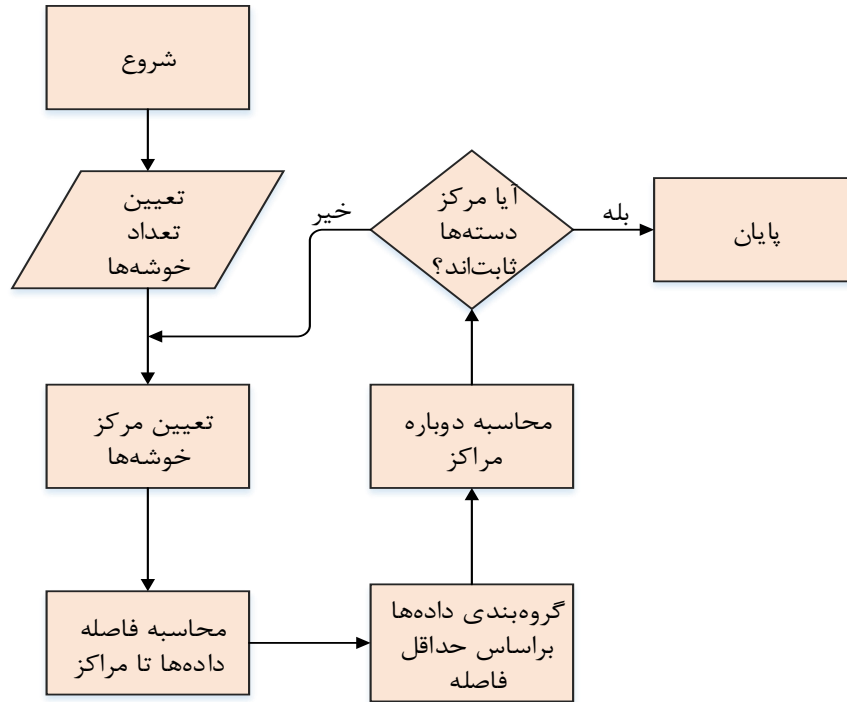
شکل ۳: مزرعه بادی در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی دینامیکی: (a) مدل دقیق، (b) مدل معادل

معادل‌سازی شده، نتایج حاصل از خوشه‌بندی بر اساس سرعت‌های باد و ضرایب توان با یکدیگر مقایسه می‌شود. بدین منظور بخش‌های مکانیکی مطابق دستورالعمل شرح داده شده در شکل (۵) معادل‌سازی شده است.

#### ۴-۲- معادل‌سازی بخش مکانیکی توربین‌ها

هر توربین را می‌توان متشکل از دو بخش دانست: الف. بخش مکانیکی؛ ب. بخش الکتریکی.

در این مقاله، بخش‌های مکانیکی در هر یک از خوشه‌ها



شکل ۴: فلوجارت الگوریتم k-means

جدول ۱: نتایج خوشه‌بندی توربین‌ها بر اساس سرعت

جدول ۳: دسته‌بندی توربین‌ها بر اساس سرعت باد در حالت باد متغیر

خوشه	شماره توربین			
خوشه اول	۱	۲	۸	۱۱
خوشه دوم	۷	۱۰	-	-
خوشه سوم	۳	۵	-	-
خوشه چهارم	۶	۹	۴	-
خوشه پنجم	۱۲	-	-	-

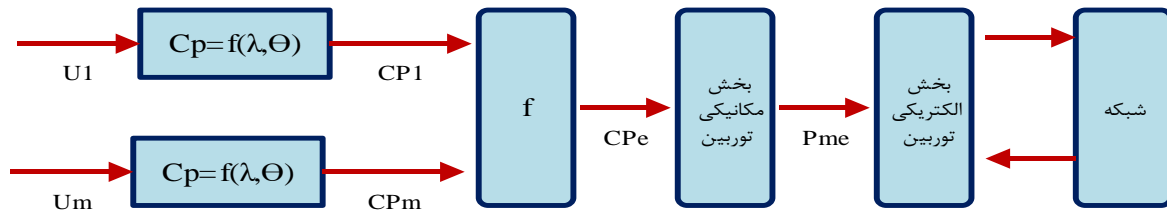
خوشه	شماره توربین			
خوشه اول	۱	۴	۱۱	۱۲
خوشه دوم	۷	۲	-	-
خوشه سوم	۳	۶	-	-
خوشه چهارم	۵	۸	۱۰	-
خوشه پنجم	۹	-	-	-

جدول ۲: نتایج خوشه‌بندی توربین‌ها بر اساس ضریب جذب توان

جدول ۴: دسته‌بندی توربین‌ها بر اساس ضریب جذب توان در حالت باد متغیر

خوشه	شماره توربین				
خوشه اول	۱	۵	۷	۸	۱۱
خوشه دوم	۲	۱۲	-	-	-
خوشه سوم	۳	۴	-	-	-
خوشه چهارم	۶	۹	-	-	-
خوشه پنجم	۱۰	-	-	-	-

خوشه	شماره توربین			
خوشه اول	۵	۶	۸	۱۰
خوشه دوم	۱	۱۱	-	-
خوشه سوم	۲	۴	-	-
خوشه چهارم	۳	۷	۱۲	-
خوشه پنجم	۹	-	-	-



شکل ۵: فلوجارت معادل سازی بخش های مکانیکی

هدف، محاسبه توان مکانیکی در هریک از خوشه هاست که فرمولاسیون آن به شرح زیر است [۱۴]:

$$u_e = \left( \frac{1}{A_e \cdot cp_e} \cdot \sum_{i=1}^m A_i \cdot cp_i \cdot u_i^3 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (18)$$

توپولوژی شبیه سازی انجام گرفته در نرم افزار متلب به صورت نشان داده شده در شکل شماره (۶) است.

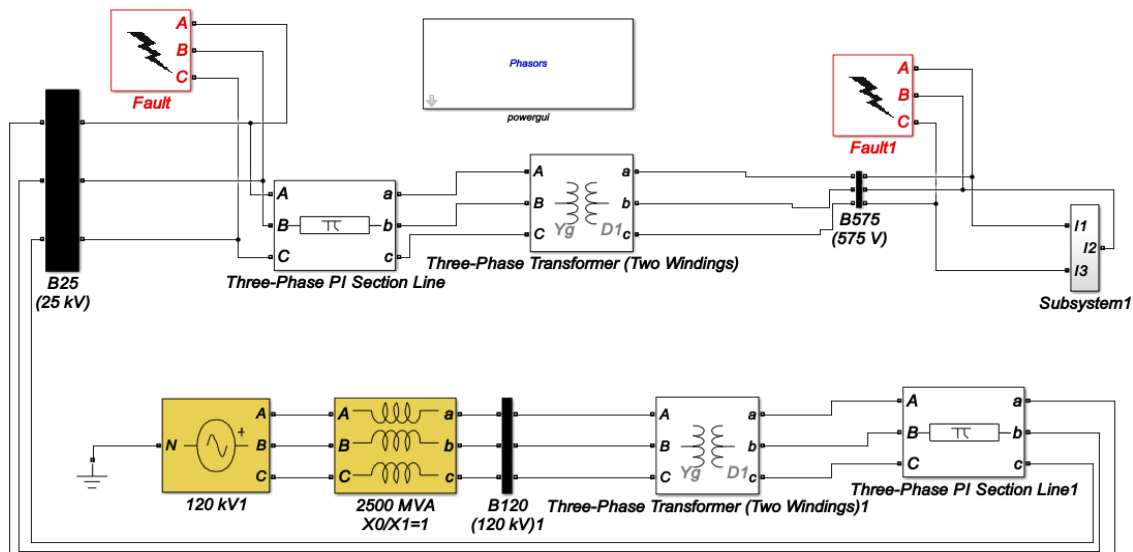
در اینجا، ۱۲ توربین بادی به یک ژنراتور متصل شده اند که از طریق ترانسفورماتورها و خطوط انتقال به یک شین بی نهایت متصل شده اند و پارامترهای هریک از المان ها در پیوست شماره ۱ آورده شده است. زمان شبیه سازی در اینجا ۳۰ ثانیه است.

$$P_{we} = \frac{1}{2} \rho \cdot A_e \cdot u_e^3 \cdot cp_e \quad (15)$$

در رابطه فوق،  $A_e$  مساحت معادل در هر خوشه است و  $cp_e$  ضریب توان معادل را نشان می دهد. محاسبه هریک به صورت زیر است:

$$A_e = \sum_{i=1}^m A_i \quad (16)$$

$$cp_e = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m cp_i \quad (17)$$



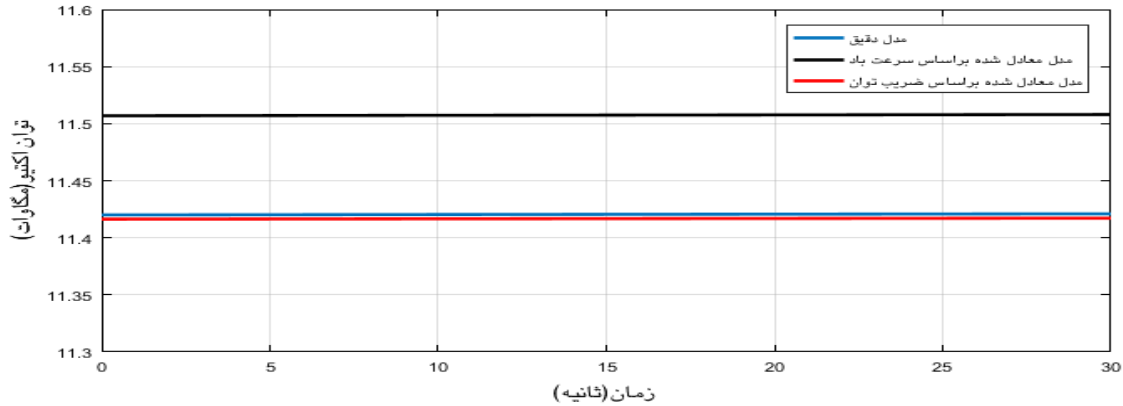
شکل ۶: شبیه سازی انجام شده در نرم افزار MATLAB/SIMULINK

در این قسمت، با در نظر گرفتن سرعت باد ثابت به عنوان ورودی مزرعه، معادل سازی در دو حالت که در آن ها یک بار دسته بندی بر اساس سرعت باد و بار دیگر بر اساس ضریب جذب توان صورت گرفته، انجام شده است و نتایج توان های اکتیو و راکتیو مزرعه بادی در نقطه کوپل مشترک با شبکه در ادامه آورده شده است.

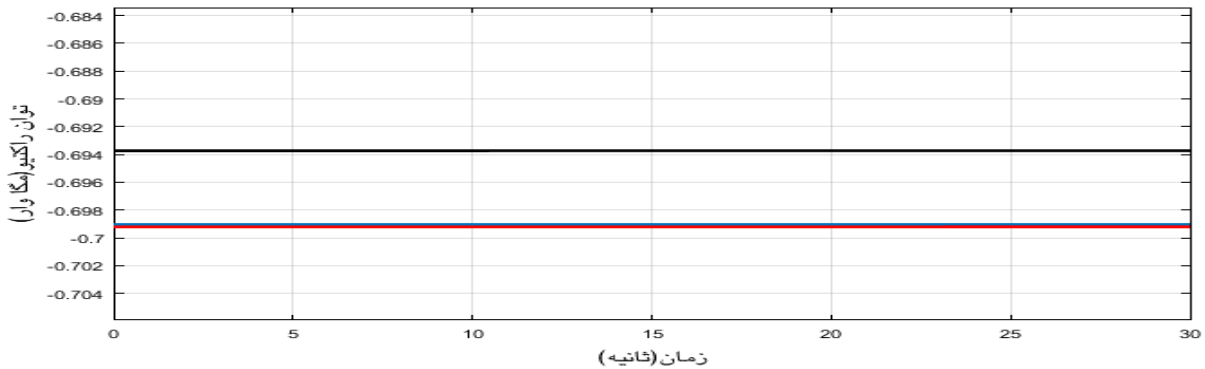
## ۵- مشخصات توان خروجی مزارع بادی

مشخصات توان اکتیو و راکتیو مزرعه بادی پس از معادل سازی در ادامه آمده است.

الف. نتایج مقایسه توان های اکتیو و راکتیو در حالت باد ثابت



شکل ۷: توان اکتیو مزرعه بادی در حالت باد ثابت



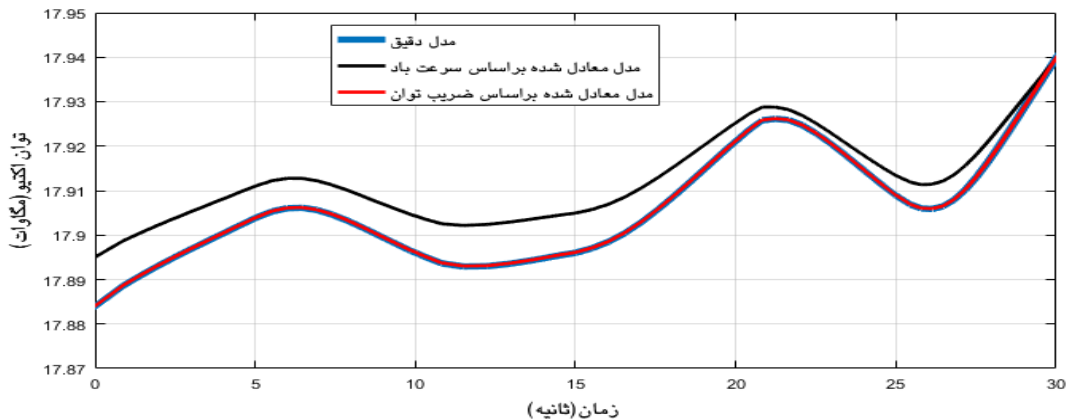
شکل ۸: توان راکتیو مزرعه بادی در حالت باد ثابت

دقیق‌تری مدل دقیق را دنبال می‌کند.

**ب. نتایج توان‌های اکتیو و راکتیو در حالت نوسانات باد**

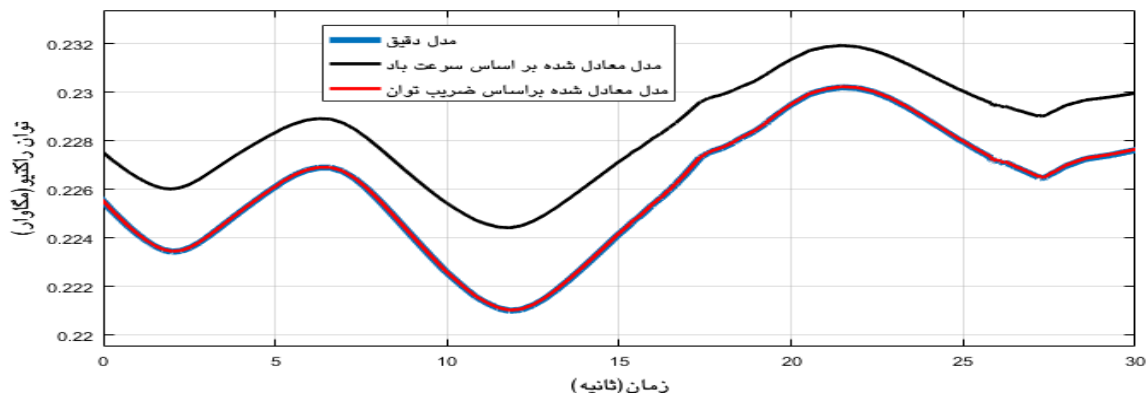
در این حالت، مقایسه، با در نظر گرفتن مدل دوم باد انجام شده که نتایج در شکل‌های (۹) و (۱۰) آمده است.

در شکل‌های (۷) و (۸)، منحنی آبی‌رنگ، نشان‌دهنده مدل دقیق است و منحنی‌های قرمز و مشکی، به ترتیب مدل‌های معادل‌شده بر اساس ضریب جذب توان و سرعت باد را نشان می‌دهند. همان‌گونه که انتظار می‌رود، نتایج مقایسه حاکی از آن است که مدل معادل‌شده بر اساس ضریب جذب توان نسبت به مدل معادل‌شده بر اساس سرعت باد، به طور



شکل ۹: توان اکتیو مزرعه بادی در حالت نوسانات باد

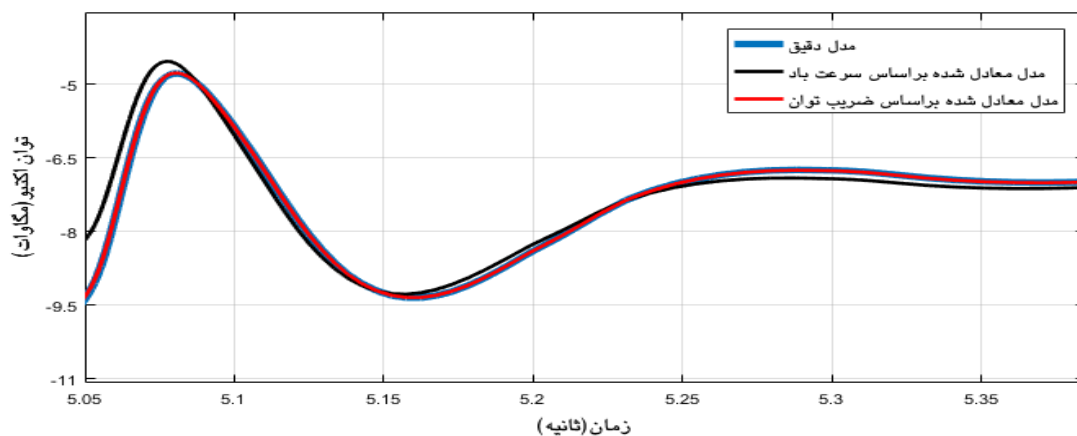




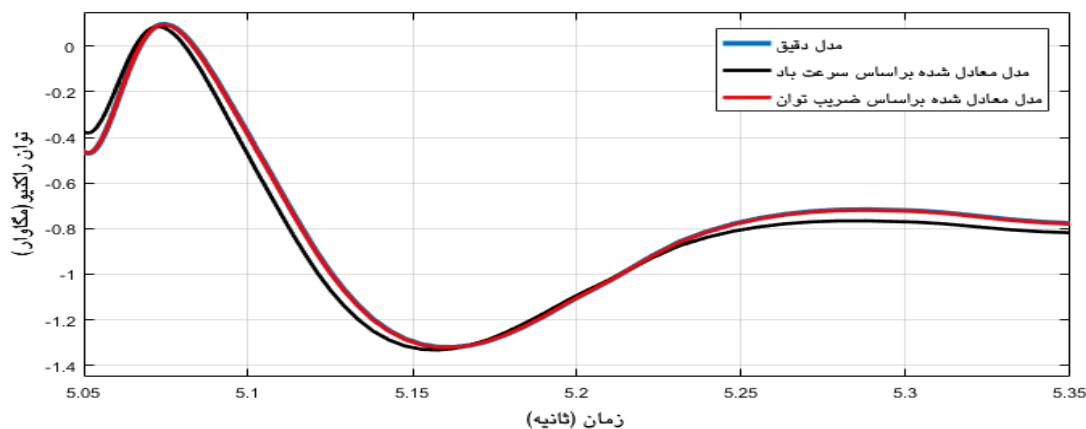
شکل ۱۰: توان راکتیو مزرعه بادی در حالت نوسانات باد

نشان می‌دهند، باز هم مدل معادل شده بر اساس شاخص ضریب جذب، توان عملکرد بهتری نسبت به مدل معادل شده بر اساس سرعت باد دارد و مدل دقیق را به‌طور مطلوب‌تری دنبال می‌کند.

همان گونه که از نتایج پیداست، نوسانات باد موجب ایجاد تغییرات در توان‌های خروجی و ولتاژ می‌شود. منحنی آبی‌رنگ مدل دقیق و منحنی‌های قرمز و مشکی، به ترتیب مدل‌های معادل شده بر اساس ضریب جذب توان و سرعت باد را نمایش می‌دهند. در این شرایط، همان گونه که شکل‌های (۹) و (۱۰)



شکل ۱۱: توان راکتیو در هنگام خطا



شکل ۱۲: توان راکتیو هنگام خطا

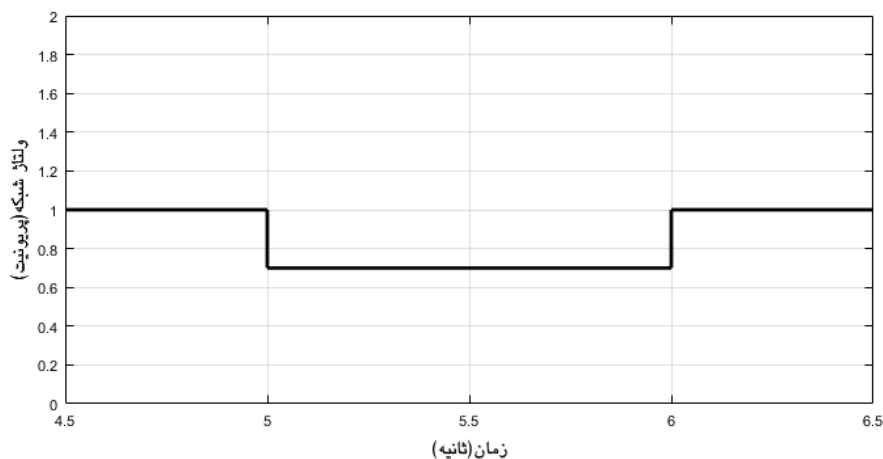
معادل‌شده بر اساس شاخص‌های ضریب جذب توان و سرعت باد هستند. نتایج، حاکی از آن است که در این بخش نیز مدل معادل‌شده بر اساس ضریب جذب توان، به نحو مطلوب‌تری مدل دقیق را دنبال می‌کند.

#### د. نتایج توان‌های اکتیو و راکتیو در حالت افت ولتاژ

در این بخش با کاهش ولتاژ از مقدار ۱ پریونیت به مقدار ۰/۷ عملکرد را ارزیابی می‌کنیم.

#### ج. نتایج توان‌های اکتیو و راکتیو در حالت خطا

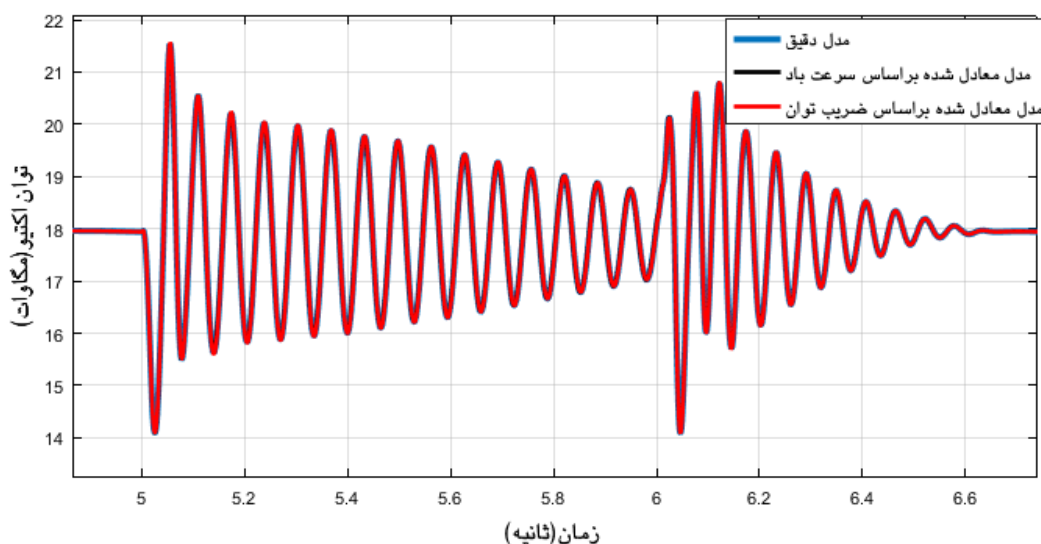
نتایج مقایسه در این حالت در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) آمده است. یک خطای سه فاز به زمین در ثانیه پنجم به سیستم اعمال شده، پس از ۰/۲ ثانیه پاک‌سازی می‌شود. پس از گذشت چنددهم ثانیه، سیستم به پایداری می‌رسد در این بخش نیز منحنی آبی‌رنگ نشان‌دهنده مدل دقیق و منحنی‌های قرمز و مشکی، به ترتیب نشان‌دهنده مدل‌های



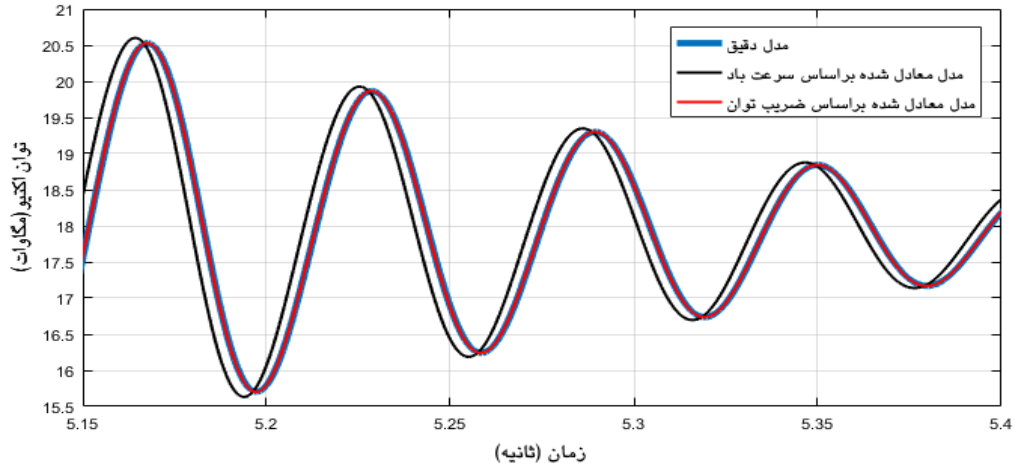
شکل ۱۳: افت ولتاژ ایجادشده در شبکه

ادامه می‌یابد. نتایج توان‌های اکتیو و راکتیو مزرعه در این حالت، به صورت زیر است:

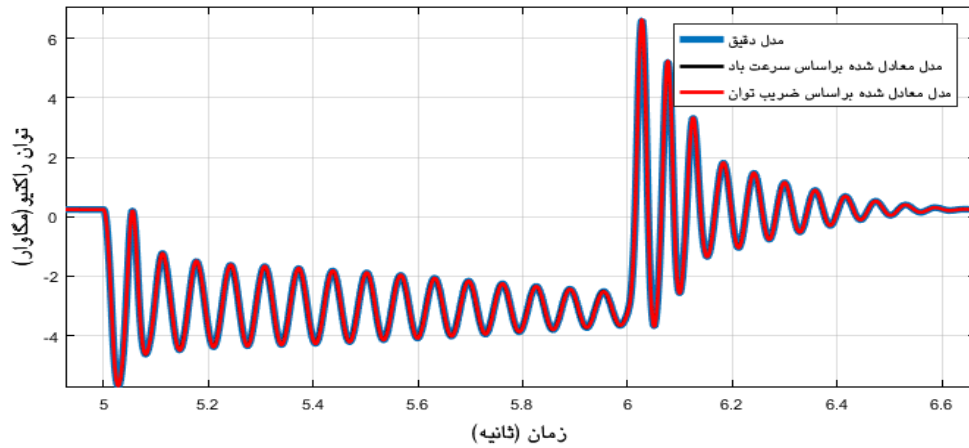
همان گونه که در شکل (۱۳) نشان داده شده است، در ثانیه پنجم شبیه‌سازی، افت ولتاژ آغاز شده، به مدت ۱ ثانیه



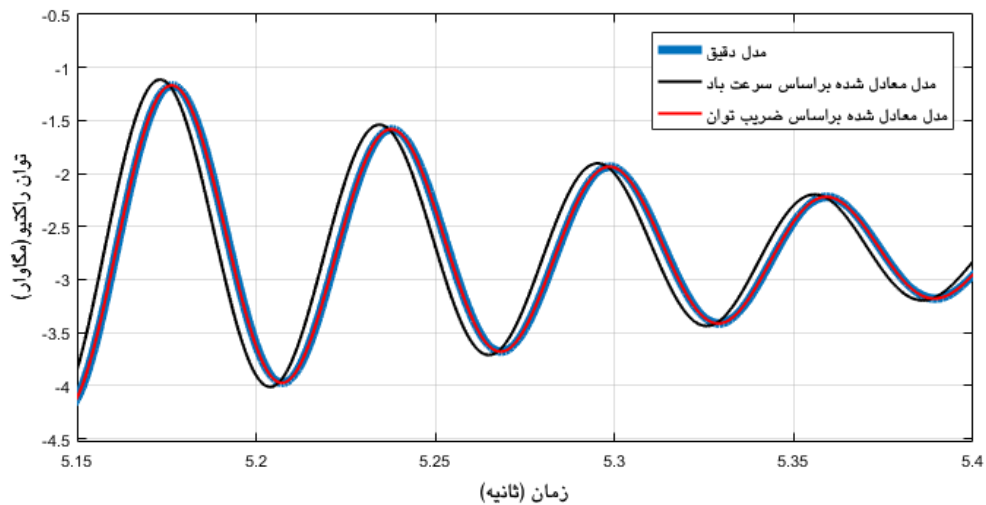
شکل ۱۴: توان اکتیو مزرعه در حالت افت ولتاژ



شکل ۱۴-ب: نمایی نزدیک از توان راکتیو در هنگام افت ولتاژ



شکل ۱۵: توان راکتیو در حالت افت ولتاژ



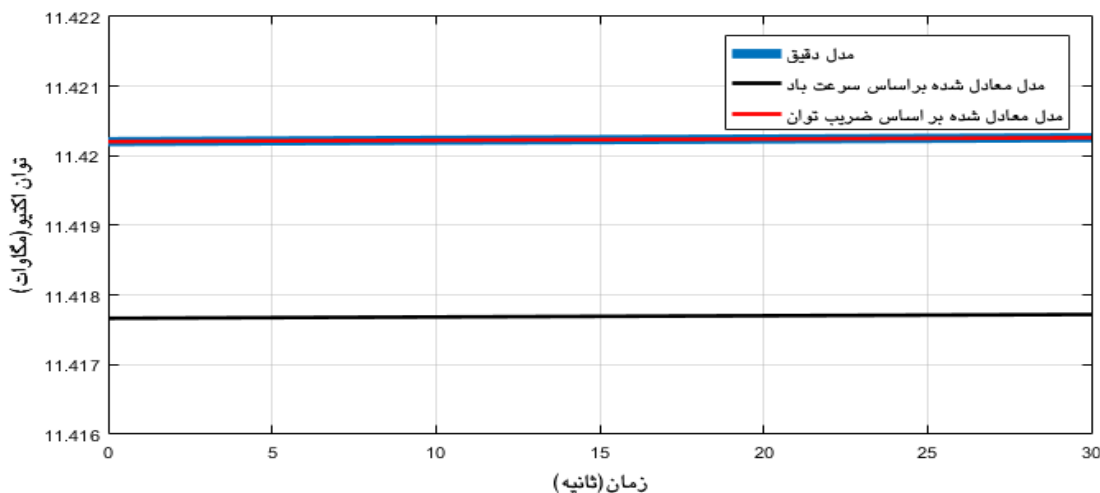
شکل ۱۵-ب: نمایی نزدیک از توان راکتیو در هنگام افت ولتاژ

دقیق را دنبال می‌کند.

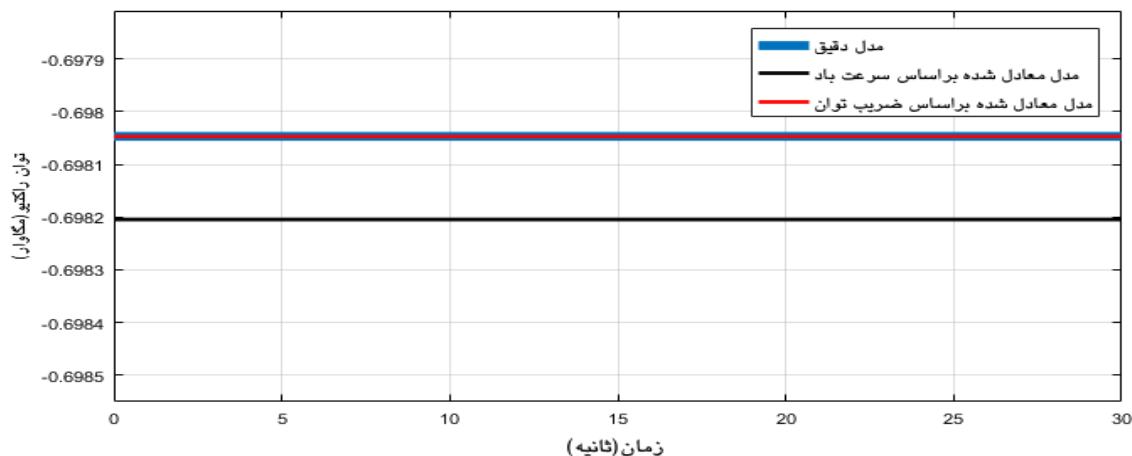
#### ه. نتایج توان‌های اکتیو و راکتیو پس از معادل‌سازی بخش‌های مکانیکی

در این بخش، پس از دسته‌بندی توربین‌ها، بخش‌های مکانیکی را در هریک از خوشه‌ها ساده‌سازی می‌کنیم. همانند قسمت‌های قبلی، در این قسمت هم نتایج توان‌های اکتیو و راکتیو را در نقطه کوپل مشترک با شبکه، با یکدیگر مقایسه می‌کنیم.

همان‌گونه که از نتایج پیداست، افت ولتاژ، موجب نوسان پاسخ‌های توان و ولتاژ در نقطه کوپل مشترک با شبکه می‌شود که به‌خوبی در شکل‌های بالا منعکس شده است. در شکل‌های (۱۴) و (۱۵)، منحنی آبی‌رنگ نشان‌دهنده مدل دقیق و منحنی‌های قرمز و مشکی، به‌ترتیب نشان‌دهنده مدل‌های معادل‌شده بر اساس شاخص ضریب جذب توان و شاخص سرعت باد هستند. نتایج به‌دست‌آمده، گویای آن است که مدل معادلی که در آن از ضریب جذب توان به‌عنوان شاخص دسته‌بندی استفاده شده، به‌طور مناسب‌تری مدل



شکل ۱۶: توان اکتیو مزرعه با معادل‌سازی بخش مکانیکی توربین‌ها



شکل ۱۷: توان راکتیو مزرعه با معادل‌سازی بخش مکانیکی توربین‌ها

گردید. همانند قسمت‌های قبل، در اینجا نیز شاخص ارائه‌شده برای دسته‌بندی توربین‌ها، موجب بهبود پاسخ مدل معادل گردیده که در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) این حقیقت به‌وضوح دیده می‌شود.

در این قسمت، علاوه بر دسته‌بندی توربین‌ها بر اساس دو شاخص ذکرشده، بخش‌های مکانیکی توربین‌های موجود در خوشه‌ها معادل‌سازی شدند و پاسخ توان‌های اکتیو و راکتیو و در نقطه‌ی کوپل مشترک با شبکه، با مدل دقیق مقایسه

جدول پ-۲: پارامترهای خطوط انتقال

	R(ohm/km)	L(H/km)	C(F/km)	L(k)
L1	۰/۰۰۱۰۶۰۸	<sup>-۷</sup> ۷۷۸×۱۰	<sup>-۹</sup> ۱۵۲/۸۸×۱۰	۰/۰۵
L2	۰/۱۱۵۳	<sup>-۵</sup> ۱۰۵×۱۰	<sup>-۹</sup> ۱۱/۳۳×۱۰	۱۰
L3	۰/۱۱۵۳	<sup>-۵</sup> ۱۰۵×۱۰	<sup>-۹</sup> ۱۱/۳۳×۱۰	۲۰

جدول پ-۳: پارامترهای مبدل

Converter maximum power(pu)	Nominal DC bus voltage(V)	DC bus capacitor (F)
۶	۱۲۰۰	۰/۷۲
Grid side coupling inductor(pu)	Grid side coupling resistance(pu)	-
۰/۰۱۲۵	۰/۰۰۰۱۲۵	-

جدول پ-۴: پارامترهای روتور و استاتور

Nom Power (MVA)	H(s)	$L_m$ (pu)
۲۰	۵/۰۴	۲/۶۴
$L_s$ (pu)	$R_s$ (pu)	$L_r$ (pu)
۰/۰۴۱۶۷	۰/۰۰۱۹۰۶	۰/۰۴۲۱۲
$R_r$ (pu)	-	-
۰/۰۰۱۳۵	-	-

جدول پ-۱: پارامترهای ترانسفورماتور

	$P_n$ (MVA)	$f_n$ (Hz)	$R_1$ (pu)	$L_1$ (pu)
T1	$۱۲ \times ۱۰^۶$	۶۰	$۸/۳۳ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۰۲۵
T2	$۴۷ \times ۱۰^۶$	۶۰	$۲۶ \times ۱۰^{-۶}$	۰/۰۸
	$R_2$ (pu)	$L_2$ (pu)	$R_m$ (pu)	$L_m$ (pu)
T1	$۸/۳۳ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۰۲۵	۵۰۰	Inf
T2	$۲۶ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۰۸	۵۰۰	500
$V_1: V_2$ (Kv)				
T1	۲۵ / ۰/۵۷۵			
T2	۱۲۰ / ۲۵			

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا مقدماتی درباره اهمیت معادل سازی در مزارع بادی گفته شد و پس از آن، ساختار ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه و معادلات دینامیکی آن مورد بررسی قرار گرفت. پس از آن، ضریب جذب توان توربین به عنوان یک شاخص جدید برای دسته بندی توربین ها معرفی شد. در مرحله بعد با طراحی یک مزرعه بادی در بستر نرم افزار MATLAB/SIMULINK توربین های موجود بر اساس شاخص معرفی شده و شاخص رایج مورد استفاده (سرعت باد) دسته بندی شدند، ضمن آنکه در شبیه سازی مدل های مختلفی برای باد ورودی مزرعه پیاده سازی و عملکرد شاخص های فوق در حالات مختلفی شامل خطای شبکه و افت ولتاژ سنجیده شد. نهایتاً بخش مکانیکی توربین های موجود در هر یک از خوشه ها معادل سازی شدند. نتایج حاصل از مقایسه شکل های توان های خروجی اکتیو و راکتیو در حالات مختلف بیانگر آن است که پاسخ مدلی که در آن از ضریب توان به عنوان شاخص دسته بندی توربین ها استفاده شده، به پاسخ مدل دقیق نزدیک تر است.

## پیوست

## مراجع

- [۱] مسعود اسماعیلی، مصطفی صدیقی زاده و حسام یارمحمدی، «کنترل یکپارچه ژنراتور القایی، محدودکننده جریان خطا و ذخیره ساز انرژی در مزارع بادی»، مجله مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۵، زمستان ۱۳۹۷، صفحه ۸۷-۱۰۰.
- [۲] آرش حاتمی و بهنام معتکف ایمانی، «کنترل توربین بادی محور افقی دارای ژنراتور سنکرون به منظور جذب بیشینه انرژی باد»، مجله مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۴، پاییز ۱۳۹۷، صفحه ۴۰۳-۴۱۳.

[۳] جمشید آقائی، امین رحیمی رضایی و محمدرضا کریمی، «هماهنگی نیروگاه‌های بادی و دستگاه‌های ذخیره‌ساز سیستم قدرت در مسئله برنامه‌ریزی امنیت-مقید مشارکت واحدها با استفاده از بهینه‌سازی استوار»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۳، تابستان ۱۳۹۷، صفحه ۲۰۷-۲۲۰.

[4] V.Akhmatov and H.Knudsen, "An aggregate model of a grid-connected, large scale, offshore wind farm for power stability investigations: importance of windmill mechanical system", international journal of Electrical power and Energy systems, No.24, 2002, pp.709-717.

[5] L.M. Fernandez, J.R. Saenz and F. Jurado, "Dynamic models of wind farms with fixed speed wind turbines", Renewable Energy, Vol. 31, 2006, pp.1203-1230.

[6] L.M. Fernandez et al., "Aggregated dynamic model for wind farms with doubly fed induction generator wind turbines", Renewable Energy, Vol. 33, No. 1, 2008, pp. 129-140.

[7] L.M. Fernandez, C.A.Garcia and J.R. Saenz, "Equivalent models of wind farms by using aggregated wind turbines and equivalent winds", Energy Conversion and Management, Vol.50, No. 3, 2009, pp. 691-704.

[8] J. Brochu, C. Larose and R. Gagnon, "Validation of single- and multiple-machine equivalents for modeling wind power plants", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 26, No. 2, 2011, pp. 532-541.

[9] M. Ali, I. Sorin Ilie, J. Milanovic, and G. Chicco, "Wind farm model aggregation using probabilistic clustering", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 28, 2013, pp. 309-316.

[10] J. Zou, C. Peng, H. Xu and Y. Yan, "A fuzzy clustering algorithm-based dynamic equivalent modeling method for wind farm with DFIG", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 30, 2015, pp.1329-1337.

[11] L. Li, Y. Teng, X. Wang, "Dynamic equivalent modeling of wind farm considering the uncertainty of wind power prediction and a case study", Journal of Renewable and Sustainable Energy, Vol. 9, 2017, p. 013301.

[12] L.P. Kunjumammed, B.C. Pal, C. Oates and K.J. Dyke, "The adequacy of the present practice in dynamic aggregated modeling of wind farm systems", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 8, 2017, pp. 23-32.

[13] J.G. Slootweg, H. Polinder and W.L. Kling, "Dynamic modeling of a wind turbine with doubly fed induction generator", Proceeding of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 1, 2001, pp. 644-649.

[14] C.A. García, L.M. Fernández and F. Jurado, "Evaluating reduced models of aggregated different doubly fed induction generator wind turbines for transient stabilities studies", Wind Energy, Vol. 18, 2015, pp.133-152.