

روشی جدید برای استحصال توان بهینه از توربین های بادی: مدل زمانی - مکانی برای مزرعه بادی با استراتژی نروفازی

سید وهاب شجاع الدینی^۱، آرمین پارسیان نژاد^۲، مجتبی فرزانة^۳

^۱ استادیار مهندسی برق، پژوهشکده برق و کامپیوتر، سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی، دانشگاه حکیم سبزواری

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد الکترونیک، دانشگاه حکیم سبزواری

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۱/۸/۱، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۱/۹/۲۰)

چکیده: در این مقاله روشی جدید برای حصول بهینه برق از توربین های مزارع برق بادی ارائه می شود. در روش پیشنهادی با استفاده از تلفیق سابقه زمانی پارامترهای باد با اطلاعات مکانی آن، مدلی مبتنی بر استنتاج فازی برای مزرعه بادی تشکیل شده و به روز می شود. با استفاده از مدل فوق، می توان پارامترهای باد دریافت شده توسط هر توربین در مزرعه بادی را به دست آورد. برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، دو نوع متداول از شرایط وزشی باد با تغییرات کند و تند شبیه سازی می شود. نتایج حاکی از آن هستند که روش پیشنهادی می تواند در حالت وزش باد با تغییرات کند خطای تخمین باد و میزان یکنواختی برق حاصله را به ترتیب ۵/۳ درصد و ۰/۵۲ ولت نسبت به روش های موجود بهبود بخشد. این بهبودها در شرایط وزش باد تند به ترتیب ۱۷/۱ درصد و ۱۲/۷ ولت به دست می آیند. بر این اساس ملاحظه می شود که مدل پیشنهادی این مقاله خصوصاً در شرایط وزش بادهای با توربولانس بالا می تواند پارامترهای تنظیم دقیق تری برای توربین ها به دست آورده و در نتیجه برق یکنواخت تری را به شبکه تزریق نماید.

کلمات کلیدی: مزرعه برق بادی، تخمین، توان بهینه، مدل سازی فازی، آنترپوی.

A Novel Method for Optimum Electrical Energy Harvesting from Wind Turbines: A Space-Time Model for Wind Farm by Neuro-Fuzzy Strategy

Seyed Vahab Shojaedini, Armin Parsian'nejad, Mojtaba Farzaneh

Abstract - In this paper, a novel method is introduced for optimum energy harvest from wind farms. In the proposed method, wind farm is modeled by fuzzy-logic and the model is updated using a combination of wind parameters history and wind's spatial information. Utilizing this model, the parameters for the wind blowing through each turbine in the wind farm is estimated. To evaluate the performance of the proposed method two practical wind types are simulated. In the first scenario, the wind maintains low turbulence and its parameters change slowly while in the second scenario the wind demonstrates high turbulences and its parameters undergo sudden shifts. Simulation results for the proposed method are obtained in both scenarios. For the first scenario, the comparison reveals that the proposed method improves the accuracy of wind speed estimation and the monotonousness of the obtained electrical voltage by 5.3% and 0.52 volts respectively compared to existing methods. These improvements reach 17.1% and 12.7 volts in the presence of high turbulence winds in the second scenario. Based on these corroborating simulations, it is concluded that the proposed method provides a more accurate estimate of wind parameters for the wind blowing through the wind farm.

Keywords: Wind Farm, Estimation of Wind Parameters, Optimum Electrical Energy, Fuzzy Modeling, Entropy.

۱- مقدمه

در دو دهه اخیر، توجه کشورهای صنعتی و در چند سال گذشته، کشورهای توسعه یافته به انرژی های نو بیش از پیش متمرکز شده است [۱]. یکی از منابع انرژی در طبیعت، باد است که انرژی نهفته در آن، حدوداً ۱۵ برابر کل انرژی فسیلی موجود در دنیا است [۲]. امروزه برای دریافت انرژی باد و تبدیل آن به برق، از مزارع بزرگ شامل توربین های بادی متعدد استفاده می شود [۳]. یکی از ویژگی های مهم این شیوه از تولید برق، وابستگی شدید آن به سرعت و جهت وزش باد به عنوان عامل تولید انرژی می باشد [۴].

توربین های بادی بخاطر رفتار هیجانی باد (شامل تغییر مداوم سرعت و جهت وزش باد و وجود کریدورهای بادی مختلف در یک مزرعه بادی)، ولتاژ ثابتی را در طی مدت عملکرد خود به دست نمی دهند. این مشکل زمانی تشدید می شود که باد وزشی به مزرعه از نوع باد با توربولانس بالا باشد. در چنین شرایطی نیروگاه های بادی کیفیت شبکه توزیع را دچار افت کرده و مشکلات متعددی برای واحدهای دیسپچینگ بوجود می آورند [۵-۶].

داشتن یک تخمین درست از سرعت و جهت وزش باد برای توربین های مزرعه بادی اولاً باعث می شود که پارامترهای ژنراتورهای مولد برق چنان متناسب با سرعت و جهت وزش باد تنظیم شوند که همواره برق یکنواختی را به شبکه مصرف تزریق نمایند [۷]. ثانیاً باعث استحصال برق با حداکثر توان ممکن از باد وزیده شده می گردد [۸-۹] و ثالثاً با اصلاح زاویه آئرو دینامیکی پره ها و زاویه ی ناسل باعث ایجاد کمترین تنش مکانیکی بر روی ناسل، برج، جعبه دنده و پره ها شده و بدین ترتیب باعث افزایش عمر مفید توربین می گردد [۱۰-۱۱]. در سالان اخیر برای داشتن چنین تخمین مناسبی تحقیقات بسیاری انجام و روش های مختلفی ارایه شده اند.

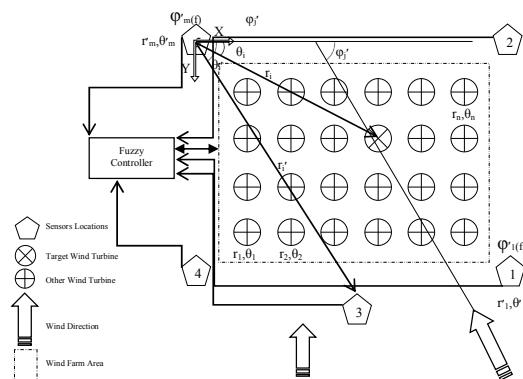
روش های پیش بینی باد وزشی با استفاده از اجرای تکنیک های مختلف آماری از قبیل حداقل سازی میانگین مجذور خطا بر روی دادگان مربوط به سرعت و جهت وزش باد در بازه های زمانی طولانی تلاش می کنند تا تخمینی از این پارامترها را برای هر لحظه از زمان ارایه دهند. متأسفانه به دلیل آن که پارامترهای باد را معمولاً نمی توان در بازه زمانی بزرگ یکنواخت فرض نمود، روش های مزبور در عمل توانایی پیش بینی دقیق پارامترهای فوق را از خود نشان نداده اند [۱۲]. در گونه پیشرفته تری از روش ها، از برازش مدل های تصادفی مانند فیلتر میان گیر خودبازگشتی بر روی دادگان سرعت و جهت وزش باد دریافتی توسط هر توربین استفاده می شود [۱۳]. علاوه بر تعیین درجه فیلتر که یکی از مسائل چالش برانگیز در این روش ها می باشد، ماهیت غیرایستار پارامترهای باد عامل دیگری است که باعث عدم حصول فیلتر مناسب برای مدلسازی سرعت و جهت وزش باد دریافتی توسط هر توربین می گردد [۱۴].

در دسته ای از روش ها، از فیلترینگ کالمن به منظور تخمین سرعت و جهت وزش باد دریافتی توربین ها استفاده می شود. در این روش ها ابتدا دادگان مربوط به سرعت و جهت وزش باد دریافتی توسط هر توربین در مجموعه ای از لحظات متوالی جمع آوری شده و سپس به عنوان ورودی یک فیلتر کالمن استفاده می شود. فیلتر مزبور سرعت و جهت وزش باد دریافتی توسط توربین ها را در لحظات آتی پیش بینی می نماید [۱۵]. محدودیت اصلی این دسته از روش ها آن است که به دلیل غیرخطی و غیر گوسی بودن نحوه تغییرات وزش باد، عمدتاً فیلتر کالمن در بسیاری از لحظات نمی تواند پیش بینی دقیقی از سرعت و جهت باد دریافتی هر توربین ارایه دهد و بدین ترتیب اهداف سه گانه ای که پیشتر ذکر شدند، در این روش ها به شکل مطلوبی حاصل نمی شوند [۱۶].

در برخی از تحقیقات از روش هایی مانند داده کاوی و شبکه های عصبی مصنوعی نیز به منظور تخمین پارامترهای مزبور استفاده شده است که با محدودیت هایی نظیر حجم بالای دادگان آموزشی، حساسیت شدید به ساختار شبکه عصبی و همچنین مشکلات همگرایی رویه رو بوده اند [۱۷]. علاوه بر محدودیت هایی که به طور جداگانه برای هر دسته از روش های تخمین پارامترهای باد دریافتی توسط هر توربین برشمردیم، باید توجه داشت که در این روش ها تخمین پارامترهای باد دریافتی توسط یک توربین، فقط بر اساس سابقه زمانی اندازه گیری حسگر موجود روی آن انجام می گیرد. چنین اتکابی به سابقه زمانی اندازه گیری ها به همراه تاخیر ناشی از سخت افزار و موتورهای کنترل زاویه یاو در تنظیم پارامترهای ژنراتورهای مولد برق، باعث می شوند که عملاً پارامترهای ژنراتورهای مولد برق در هر لحظه نسبت به سرعت و جهت وزش باد همان لحظه دارای خطای قابل توجهی باشند. این خطا خصوصاً در شرایط وزش باد های با توربولانس بالا که در آنها پارامترهای باد تغییرات بیشتری دارند، شدیداً افزایش می یابد. بدین ترتیب تحقیقات متعددی نشان داده اند که در بسیاری از موارد استفاده از روش های تخمین پارامترهای باد مبتنی بر سابقه زمانی اندازه گیری ها، پارامترهای بهینه را برای ژنراتورهای مولد برق را به دست نداده و لذا در حصول سه هدفی که در ابتدا ذکر شدند، دارای محدودیت هستند [۱۸].

در این مقاله یک روش جدید به منظور تخمین پارامترهای باد دریافتی توسط هر توربین و تنظیم بهینه توربین بر اساس این پارامترها در مزارع تولید برق بادی ارائه می شود که بر تلفیق رشته مشاهدات زمانی با اندازه گیری مکانی سرعت و جهت باد استوار است. در روش پیشنهادی برای کل مزرعه یک مدل مبتنی بر منطق فازی تشکیل داده می شود. در این مدل علاوه بر سرعت و جهت باد دریافتی توسط توربین ها در لحظات متوالی، سرعت و جهت باد دریافتی توسط حسگرهایی که در اطراف مزرعه و قبل از توربین ها به موازات مسیر آن ها قرار داده شده اند، نیز دخالت داده می شوند. برای تشکیل مدل فوق از خوشه بندی توربین

که اعضای $\omega_j'(t)$ سرعت و جهت باد اندازه گیری شده توسط حسگر جانبی j در زمان t' هستند.



شکل ۱: جانمایی توربین ها و حسگرها در مزرعه بادی

میزان انرژی بادی که در هر مقطع زمانی به یک توربین می رسد تابعی است از جهت و سرعت باد رسیده به آن توربین در مقطع مزبور. با در نظر گرفتن $\Delta\phi_{ij}'(t)$ به عنوان اختلاف سمت توربین i ام و جهت وزش باد دریافتی توسط هر یک از حسگرهای مکانی پیشگفته و $\Delta v_{ij}'(t)$ به عنوان اختلاف سرعت آنها، بردار L بعدی $f_i(t)$ برای این توربین به صورت رابطه (۴) تعریف می گردد:

$$f_i(t) = [r_i, \Delta\phi_{i1}'(t) \dots \Delta\phi_{ij}'(t) \dots \Delta\phi_{iM}'(t), \Delta v_{i1}'(t) \dots \Delta v_{ij}'(t) \dots \Delta v_{iM}'(t)] \quad (4)$$

$$i = 1, 2, \dots, N, \quad j = 1, 2, \dots, M, \quad 0 \leq t \leq T_0$$

بدین ترتیب در مقطع زمانی t یک فضای برداری $F(t)$ به صورت رابطه (۵) خواهیم داشت:

$$F(t) = \{f_1(t), f_2(t), \dots, f_k(t), \dots, f_N(t) \mid f_k(t) \in R^L\} \quad (5)$$

با توجه به امکان تغییر پارامترهای باد در فواصل زمانی مختلف، فضای برداری $F(t)$ طی این بازه های زمانی، به خوشه هایی افزاز می شود که ویژگی های باد دریافتی توربین های هر خوشه شبیه به هم بوده و با سایر خوشه ها دارای بیشینه تفاوت باشند. بر این اساس در یک مقطع زمانی مانند t ، توربین ها براساس ویژگی های موثر در دریافت آنها که فضای $F(t)$ را تشکیل می دهند با منطق فازی خوشه بندی می شوند. اگر خوشه ها را مجموعه های فازی در نظر بگیریم، تابع آنروپی فازی $E(t)$ را می توان برای کل مزرعه بادی به فرم رابطه (۶) تعریف کرد. این تابع عدم قطعیت در این موضوع که آیا توربین k که با بردار ویژگی $f_k(t)$ در فضای $F(t)$ معرفی می شود، به یک خوشه خاص تعلق دارد یا خیر را بیان کرده و می تواند مقادیری بین صفر تا $\frac{1}{N}$ را اختیار کند [۱۹].

های مزرعه با استفاده از تابع آنروپی فازی استفاده می شود که علاوه بر به روز شدن در بازه های زمانی متوالی، با تغییرات پارامترهای باد نیز سازگاری بیشتری داشته باشد. بدین ترتیب تخمینی که این مدل برای هر توربین به دست می دهد، علاوه بر سابقه زمانی مشاهدات توربین مزبور، بر سرعت و جهت بادی که به زودی به آن خواهد رسید نیز متکی می باشد. بر اساس چنین تلفیق فازی از ویژگی های زمانی- مکانی باد وزیده شده می توان پارامترهای تنظیم دقیق تری برای هر توربین نسبت به روش های موجود خصوصاً در شرایط وزش بادهای با توربولانس بالا که پارامترهای باد وضعیت متغیرتری دارند، به دست آورد. بدین ترتیب ولتاژ خروجی با استفاده از تنظیماتی از توربین بادی به دست می آید که نسبت به باد وزیده شده به آن دارای تطابق بیشتری هستند. بدین ترتیب خروجی های واقعی کاملاً متأثر از این پیش بینی بوده و برق با کیفیت تری از مزرعه بادی به دست می آید.

ساختار مقاله به صورت زیر است. در بخش ۲، اصول ریاضی و روش تشکیل مدل زمانی- مکانی مزرعه بادی مبتنی بر منطق فازی به منظور تخمین پارامترهای باد وزیده شده به توربین ها شرح داده می شود. در بخش ۳، عملکرد روش پیشنهادی این مقاله آزموده می شود. برای این کار شبیه سازی در شرایط مختلف وزش باد انجام شده و نتایج عملکرد روش پیشنهادی در تخمین پارامترهای باد رسیده به هر توربین و کیفیت برق استحصالی از آن به دست می آید. در بخش ۴، نتایج به دست آمده از شبیه سازی ها مورد بررسی قرار گرفته و کارایی روش پیشنهادی با کارایی روش های موجود از جهات مختلف مقایسه می شود. بخش پایانی مقاله نیز به نتیجه گیری اختصاص دارد.

۲- روش پیشنهادی

فرض کنید که مطابق آنچه در شکل (۱) نشان داده شده است، در مزرعه بادی N توربین بادی هم سطح، فعال هستند که موقعیت های آنها در مختصات قطبی با رابطه (۱) توصیف می گردد:

$$X_i = [r_i, \theta_i]^T, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

در رابطه فوق X_i نشان دهنده بردار موقعیت توربین i می باشد. مطابق همین شکل تعداد M حسگر مکانی نیز در موقعیت های بیان شده با رابطه (۲) مستقر هستند.

$$X_i' = [r_i', \theta_i']^T, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

این حسگرها در هر لحظه یک بردار اندازه گیری $\omega_j'(t')$ را به صورت رابطه (۳) به دست می دهند.

$$\omega_j'(t') = [v_j'(t'), \phi_j'(t')]^T \quad (3)$$

$$j = 1, 2, \dots, M, \quad 0 \leq t' \leq t$$

$$\sigma_{\mu_q}^l(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N p_{qk}(f_k^l(t) - \mu_q^l(t))^2 \quad (11)$$

که در آن $\mu_q^l(t)$ عبارتست از l امین عضو بردار میانگین خوشه q در مقطع زمانی t و $1 < l < L$ که:

$$L = \text{length}(f_k(t)), \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

همچنین پارامتر $\sigma_F(t)$ و رابانس فضای $F(t)$ بوده و $\|\sigma_F(t)\|$ به صورت رابطه (۱۳) به دست می آید:

$$\|\sigma_F(t)\| = (\sigma_F^T(t) \cdot \sigma_F(t))^{1/2} \quad (13)$$

اکنون برای فضای برداری $F(t)$ که به خوشه های $1 < q < Q(t)$ افزاز شده است، تابع فاصله را به صورت (۱۴) حاصل می کنیم:

$$D(Q(t)) = \frac{D_{\max}(t)}{D_{\min}(t)} \sum_{q=1}^{Q(t)} \left(\sum_{q'=1}^{Q(t)} \|\mu_q(t) - \mu_{q'}(t)\| \right)^{-1} \quad (14)$$

که $D_{\max}(t)$ و $D_{\min}(t)$ با (۱۵) به دست می آیند:

$$D_{\max}(t) = \max(\|\mu_q(t) - \mu_{q'}(t)\|) \\ D_{\min}(t) = \min(\|\mu_q(t) - \mu_{q'}(t)\|) \quad (15)$$

$$\forall q, q' \in \{1, 2, 3, \dots, Q(t)\}$$

برای تشکیل یا حفظ بهترین خوشه های توریبی در هر مقطع زمانی به گونه ای که دارای بیشینه فشردگی در هر خوشه و بیشینه جدایی^۱ بین خوشه ها باشند، از ترکیب دو معیار معرفی شده در روابط (۱۰) و (۱۴) استفاده شده و تابع تصمیم $\Lambda(Q(t))$ مطابق رابطه (۱۶) به دست می آید:

$$\Lambda(Q(t)) = \beta \cdot S(Q(t)) + D(Q(t)) \quad (16)$$

در رابطه فوق β ضریب تنظیمی است که می تواند وزن هر یک معیارهای فشردگی و جدایی را در تابع تصمیم مشخص نماید. بر این اساس $Q(t)$ مطابق رابطه (۱۷) مشخص می شود:

$$\xi(t) = [\Lambda(Q_{\min}(t)), \dots, \Lambda(Q'(t)), \dots, \Lambda(Q_{\max}(t))] \\ Q(t) = Q'(t) | \Lambda(Q'(t)) = \min(\xi(t)) \quad (17)$$

بنابر محاسبات فوق، توربین های مزرعه بادی در مقطع زمانی t به $Q(t)$ خوشه فازی افزاز می شوند که به صورت مجموعه (۱۸) نشان داده می شوند:

$$E(t) = \sum_{q=1}^{Q(t)} \sum_{k=1}^N p_{qk}(t) \cdot \log p_{qk}(t) \quad (6)$$

در رابطه فوق $Q(t)$ تعداد خوشه های مزرعه بادی در مقطع زمانی t است و امکان تعلق هر عضو فضای $F(t)$ به خوشه ها نیز به صورت $p_{qk}(t)$ نشان داده شده که مطابق رابطه (۷) عضوی از ماتریس احتمال تعلق $P(t)$ است:

$$P(t) = \begin{bmatrix} p_{11}(t) & p_{12}(t) & \dots & p_{1k}(t) & \dots & p_{1N}(t) \\ p_{21}(t) & p_{22}(t) & \dots & p_{2k}(t) & \dots & p_{2N}(t) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{q1}(t) & p_{q2}(t) & \dots & p_{qk}(t) & \dots & p_{qN}(t) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{Q(t)1}(t) & p_{Q(t)2}(t) & \dots & p_{Q(t)k}(t) & \dots & p_{Q(t)N}(t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

که $1 < k < N$ و $1 < q < Q(t)$ هستند. اکنون تابع هدف فازی مبتنی بر ترکیب فاصله یابی و آنتروپی فازی به فرم رابطه (۸) تعریف می شود:

$$G(P(t), \mu(t), F(t)) = \sum_{q=1}^{Q(t)} \sum_{k=1}^N p_{qk}(t) \cdot \|f_k(t) - \mu_q(t)\|^2 + N \cdot \sum_{q=1}^{Q(t)} \sum_{k=1}^N p_{qk}(t) \cdot \log p_{qk}(t) \quad (8)$$

که $\mu_q(t)$ مرکز خوشه q و $\mu(t)$ بردار شامل مراکز خوشه ها در مقطع زمانی t هستند. جمله اول رابطه فوق، میانگین فواصل با وزندهی فازی بوده و جمله دوم نیز ضریب N - از تابع آنتروپی فازی $E(t)$ است.

با می نیم کردن تابع هدف تعیین شده برای این روش خواهیم داشت [۲۰]:

$$p_{qk}(t) = \left(\sum_{q=1}^{Q(t)} \left[\frac{e^{\|f_k(t) - \mu_q(t)\|^{-1/Q(t)}}}{e^{\|f_k(t) - \mu_{q'}(t)\|^{-1/Q(t)}}} \right] \right)^{-1} \quad (9)$$

اکنون می توان متوسط پراکندگی خوشه ها را به صورت رابطه (۱۰) بیان نمود:

$$S(Q(t)) = \frac{\sum_{q=1}^{Q(t)} \|\sigma_{\mu_q}(t)\|}{Q(t) \|\sigma_F(t)\|} \quad (10)$$

که در رابطه اخیر، اعضای $\sigma_{\mu_q}(t)$ مطابق رابطه (۱۱) به دست می آیند:

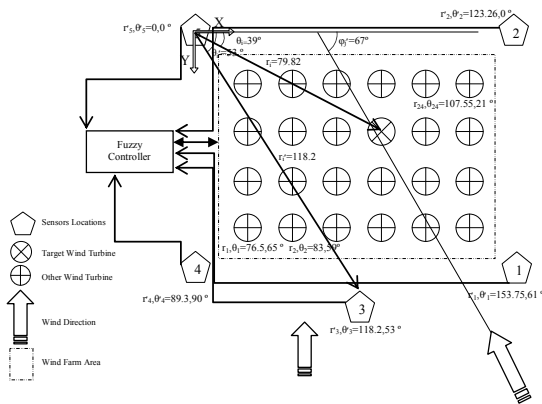
¹Compactness

²Separation

پارامترهای O_1 با استفاده از روش کمینه مربعات خطا و پارامترهای O_2 نیز توسط روش تندترین شیب تخمین زده می شوند.

۳- آزمون

به منظور آزمودن کارایی روش پیشنهادی، شبیه سازی برای یک مزرعه بادی شامل ۲۴ عدد توربین (N) انجام پذیرفت. در این شبیه سازی جانمایی حسگرهای مزرعه را با فواصل و ترتیب مساوی حسگرها در نظر گرفتیم (کلی ترین حالت ممکن) که با این توپولوژی تعدادی مختلفی از سنسورهای متساوی الفاصله آزموده شدند که عدد ۵ (M) به عنوان تعداد بهینه حاصل و اعمال شد. جانمایی مزرعه بادی به همراه حسگرها و توربین های شبیه سازی شده در شکل (۳) نشان داده شده است. در ادامه، سناریوهای مختلفی از وزش باد تولید گردیدند. شبیه سازی این سناریوها به کمک نرم افزار استاندارد Wind-Pro انجام شد که در بسیاری از تحقیقات معتبر مربوط به توربین های بادی به نتایج این نرم افزار استناد گردیده است [۲۴]. برای تطابق شبیه سازی ها با آنچه در عمل رخ می دهد، دادگان در دو سناریوی مختلف تولید گردیدند. اولین سناریو، به شرایطی تعلق داشت که سرعت باد دارای تغییرات کمتری است (باد نجیب با سرعت بین ۳ تا ۲۵ متر بر ثانیه و توربولانس پایین ۰.۲٪) و نوع دوم آزمون ها به شرایطی می پرداخت که سرعت باد در آن دارای تغییرات شدیدی محسوب می شود (باد مگتتش با سرعت بین ۰ تا ۴۰ متر بر ثانیه و توربولانس بالای ۰.۷٪). جدول (۱) مشخصات توربین ها و ژنراتورها را در فرآیند آزمون این تحقیق نشان می دهد.



شکل ۳: ساختار مکانی مزرعه بادی در شبیه سازی ها

پس از شبیه سازی مزرعه بادی در سناریوهای فوق، روش پیشنهادی این مقاله با استفاده از بسته نرم افزاری Matlab2009 پیاده سازی و آزموده شد. به منظور ارزیابی بهتر روش پیشنهادی این مقاله، یکی از روش های جدید که بر اساس کنترل توربین بادی برای حصول بیشترین انرژی پرپایه شبکه های عصبی [۲۵] عمل می کند نیز پیاده سازی شد.

$$C(t) = \{c_1(t), c_2(t), \dots, c_q(t), \dots, c_{Q(t)}(t)\} \quad (18)$$

که $C_q(t)$ عبارتست از q امین خوشه توربینی دارای $I_q(t)$ توربین عضو آن که در این مقطع زمانی حاصل شده است. اعضای این افزاز از $F(t)$ با رابطه (۱۹) نشان داده می شوند:

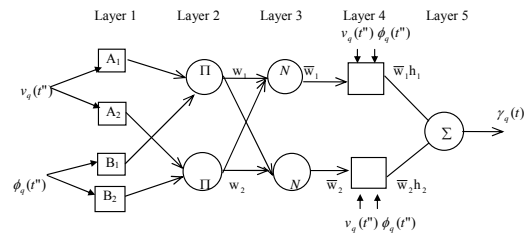
$$F'_q(t) = \{f'_{q1}(t), \dots, f'_{qi}(t), \dots, f'_{qt}(t)\} \quad (19)$$

$$f'_{qi}(t) = f_k(t) \in F(t) \mid f_k(t) \in C_q(t)$$

اکنون می توان مدل نروفازی مربوط به $C_q(t)$ را به ترتیبی که در ادامه می آید، به گونه ای به روز نمود تا بهترین تخمین از زاویه ناسل $\gamma_q(t)$ (عمود بر جهت تخمین زده شده برای باد) به دست آید. بر اساس مدل تاکاگی- سوگنو [۲۱] که در شکل (۲) نشان داده شده است، با داشتن رشته مشاهدات سرعت و جهت باد در زمانهای متوالی t'' قوانین حاکم بر ساختار فوق عبارتند از:

$$\text{If } v_q(t'') \text{ is } A_1 \text{ and } \phi_q(t'') \text{ is } B_1 \Rightarrow h_1 = \lambda_1 x + \psi_1 y + \tau_1$$

$$\text{If } v_q(t'') \text{ is } A_2 \text{ and } \phi_q(t'') \text{ is } B_2 \Rightarrow h_2 = \lambda_2 x + \psi_2 y + \tau_2 \quad (20)$$



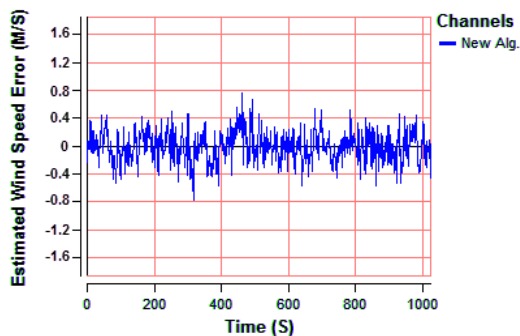
شکل ۲: مدل نروفازی هر خوشه از مزرعه بادی

که A_1, A_2, B_1, B_2 قواعد فازی حاکم بر مدل فازی فوق هستند. ژانگ نشان داد [۲۲] که در ساختار نروفازی فوق می توان با به دست آوردن خروجی هر لایه و ارایه آن به لایه مابعد، خروجی نهایی را برای لحظه آتی t از روی رشته مشاهدات لحظاتی متوالی t'' به فرم رابطه (۲۱) حاصل نمود:

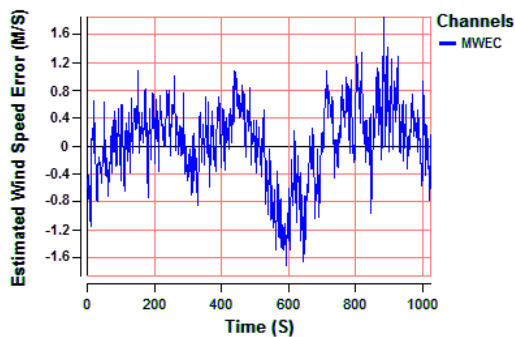
$$\gamma_q(t) = \overline{w_1} v_q(t'') \lambda_1 + \overline{w_1} \phi_q(t'') \psi_1 + \overline{w_1} \tau_1 + \overline{w_2} v_q(t'') \lambda_2 + \overline{w_2} \phi_q(t'') \psi_2 + \overline{w_2} \tau_2 \quad (9)$$

در رابطه اخیر، پارامترهای نروفازی به دو دسته پیش فرض و پارامترهای مربوط به توابع عضویت فازی تقسیم می شوند که دسته اول شامل $O_1 = (\lambda_1, \lambda_2, \psi_1, \psi_2, \tau_1, \tau_2)$ بوده و ماهیت خطی دارند و دسته دوم $O_2 = (\overline{w_1}, \overline{w_2})$ پارامترهای قوانین فازی بوده و دارای ماهیت غیرخطی هستند. برای تخمین این پارامترها مطابق الگوریتم یادگیری هایپریدی ارایه شده توسط سان و همکارانش [۲۳]

³. Maximum Wind Energy Capture



(ب)

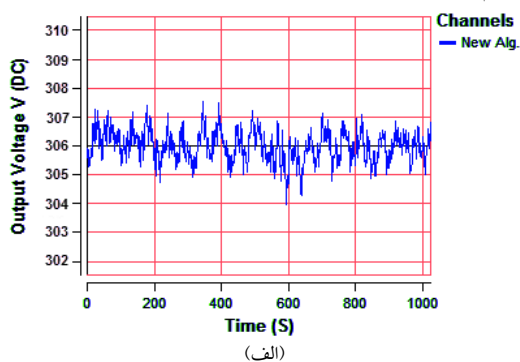


(ج)

شکل ۴: نتایج یکی از شبیه سازی های سناریوی اول:

الف- باد شبیه سازی شده، ب- خطای تخمین روش پیشنهادی و ج- خطای تخمین روش MWEc

در شکل (۵-الف) ولتاژ به دست آمده با اعمال روش پیشنهادی و متناظر با آن در (۵-ب)، همین خروجی در شرایط اعمال MWEc در سناریوی اول ملاحظه می شوند. اگر بیشینه ترانس برق استحصالی در هر روش را به عنوان نمایه ای از میزان یکنواختی برق تولید شده از آن روش در نظر بگیریم، اندازه این پارامتر برای خروجی روش پیشنهادی (شکل ۵-الف) برابر با $2/04$ ولت و برای خروجی روش MWEc (شکل ۵-ب) برابر با $2/2$ ولت به دست آمده اند که حاکی از آن است که روش پیشنهادی این مقاله ولتاژ یکنواخت تری را از مزرعه بادی استحصال می نماید. این بهبود با نتیجه ای که در مجموعه شکل های (۴) از تخمین بهتر پارامترهای باد توسط روش پیشنهادی دیدیم، توجیه پذیر می باشد.



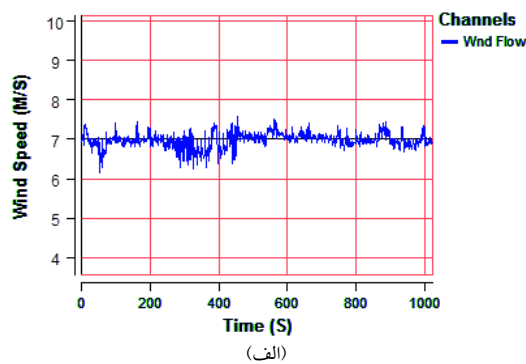
(د)

در ادامه این مقاله روش فوق را به اختصار MWEc می نامیم. در تمام آزمون های این مقاله، روش فوق به موازات روش پیشنهادی بر روی نتایج شبیه سازی Wind-Pro آزمایش شد. سرانجام نتایج هر دو روش با سناریوی اصلی شبیه سازی مقایسه و شاخص های عملکرد هر یک حاصل گردید.

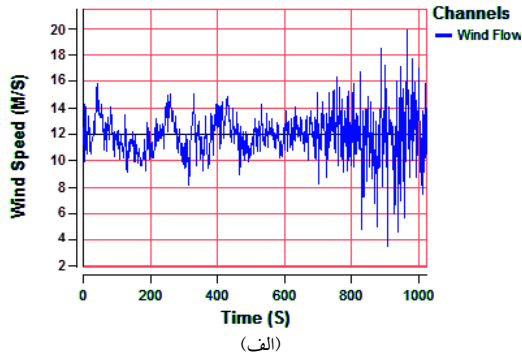
جدول ۱: مشخصات شبیه سازی شامل مشخصات مزرعه بادی، توربین ها، باد و پارامترهای ژنراتور

| ردیف | ویژگی | مقدار |
|------|------------------------------|-------------|
| ۱ | تعداد توربین | ۲۴ |
| ۲ | نوع ژنراتور | DFIG |
| ۳ | تغییرات سرعت باد (m/s) | ۰-۴۰ ، ۳-۲۵ |
| ۴ | مقاومت استاتور (P.u) | ۰/۰۱ |
| ۵ | ثابت اینرسی روتور (P.u) | ۳ |
| ۶ | میزان تغییر زاویه گام (درجه) | ۲-۵ |
| ۷ | اندوکتانس استاتور (P.u) | ۰/۱ |
| ۸ | مقاومت روتور (P.u) | ۰/۰۱ |
| ۹ | اندوکتانس روتور (P.u) | ۰/۰۸ |
| ۱۰ | اندوکتانس مغناطیس کنندگی | ۳ |
| ۱۱ | شعاع روتور (m) | ۳۵ |
| ۱۲ | محدوده زاویه گام (درجه) | ۰-۵۰ |

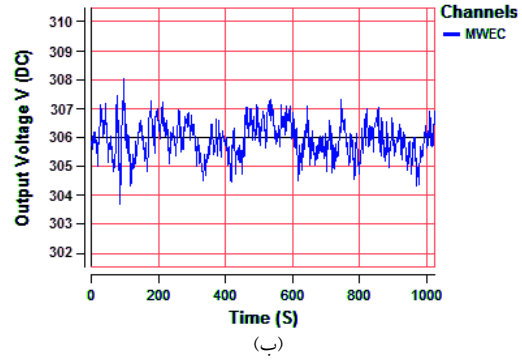
در شکل (۴) نتایج یکی از شبیه سازی های سناریوی اول آمده است. در این شکل منحنی سرعت باد شبیه سازی شده در یکی از آزمایش ها (شکل ۴-الف) به همراه نتایج روش پیشنهادی و MWEc (شکل های ۴-ب و ۴-ج) نشان داده شده اند. چنان که ملاحظه می شود، قدر مطلق خطای تخمین روش پیشنهادی و روش MWEc نسبت به منحنی سرعت باد در شبیه سازی اصلی تا حداکثر $0/8$ متر بر ثانیه و $1/7$ متر بر ثانیه بالغ می شود که حاکی از تطابق بیشتر نتایج حاصل از روش این مقاله با شبیه سازی اصلی است.



(الف)

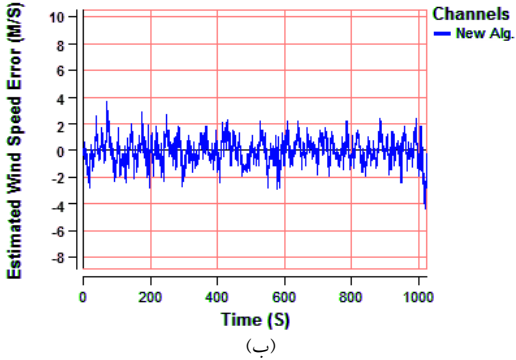


(الف)

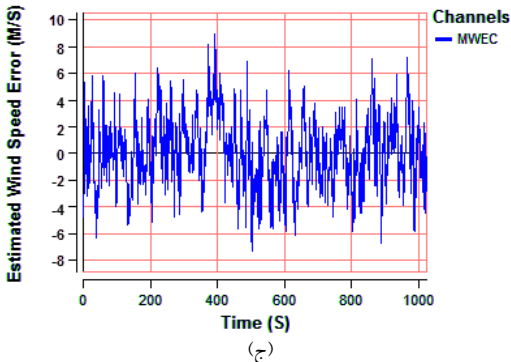


(ب)

شکل 5: ولتاژ استحصالی در سناریوی اول با اعمال الف- روش پیشنهادی و ب- روش MWE



(ب)



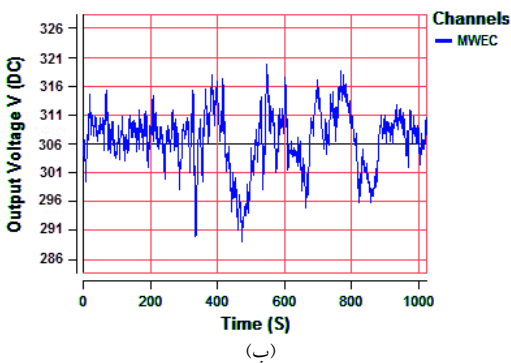
(ج)

شکل 6: نتایج یکی از شبیه سازی های سناریوی دوم:

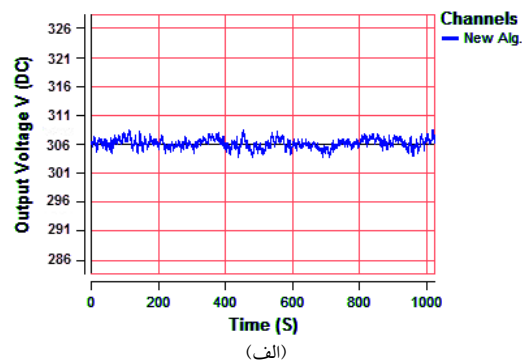
الف- باد شبیه سازی شده، ب- خطای تخمین روش پیشنهادی و ج- خطای تخمین روش MWE

شکل (6) نتیجه آزمون روی یکی از نمونه های آزمایشی در سناریوی دوم را نشان می دهد. در این شکل، (6-الف) سرعت باد شبیه سازی شده، (6-ب) خطای تخمین حاصل از الگوریتم این مقاله و (6-ج) خطای تخمین حاصل از MWE را نشان می دهند. این شکل ها نشان می دهند که قدر مطلق خطای تخمین روش پیشنهادی و روش MWE نسبت به شبیه سازی اصلی در این سناریو حداکثر به 4 و 9 متر بر ثانیه می رسند.

این مقادیر کماکان حاکی از برتری روش پیشنهادی نسبت به MWE در تخمین سرعت باد وزشی می باشند. به همین ترتیب شکل (7-الف) ولتاژ به دست آمده با اعمال روش پیشنهادی این مقاله و شکل (7-ب) همین خروجی را در شرایط اعمال MWE در سناریوی دوم نشان می دهند. مقایسه این شکل ها نیز با استفاده از معیار پیشینه تفرانس برق استحصال شده نشان می دهد که اندازه معیار فوق برای روش پیشنهادی 3 ولت و برای خروجی روش MWE مقدار 16/07 ولت به دست آمده اند که از عملکرد بهتر روش پیشنهادی حکایت دارند.



(ب)



(الف)

شکل 7: ولتاژ استحصالی در سناریوی دوم با اعمال الف- روش پیشنهادی و ب- روش MWE

۴- تفسیر

دست آمده اند. این مقادیر نشان می دهند که اثر بهبود دهنده روش این مقاله به هنگام بروز تغییرات شدیدتر در وزش باد موثرتر از شرایطی است که باد وزشی تغییرات اندکی دارد.

۵- نتیجه گیری

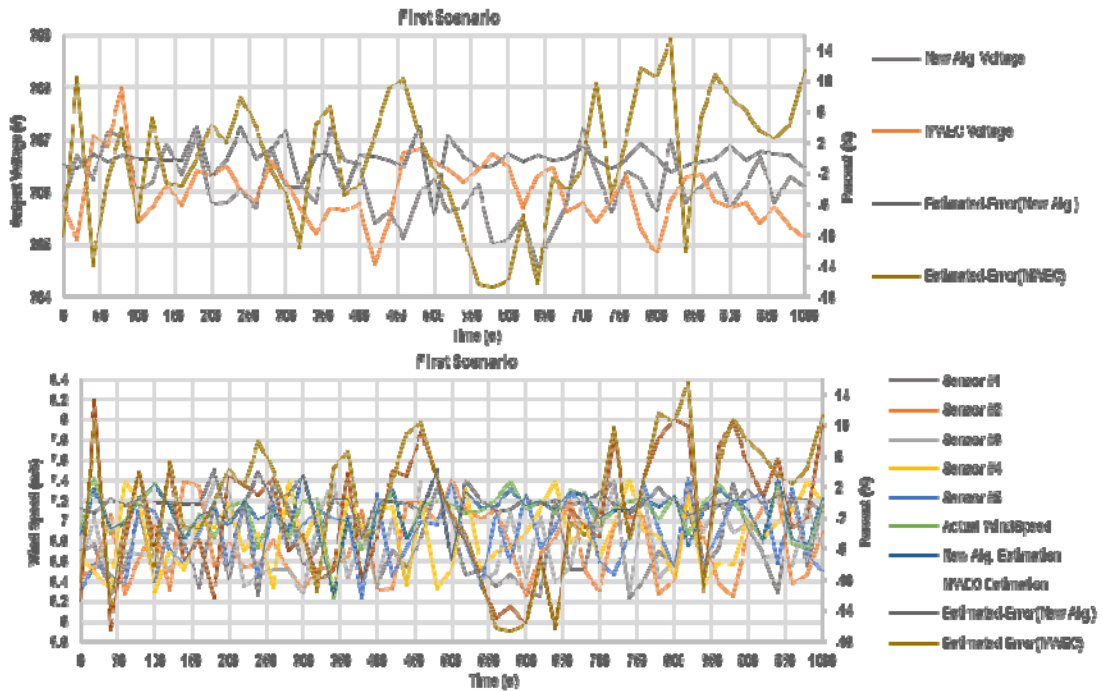
در این مقاله روشی نوین به منظور استحصال بهینه برق از توربین های واقع در مزارع برق بادی مبتنی بر مدلسازی مزرعه و توربین های آن با استفاده از تئوری فازی ارائه شد. برای تشکیل مدل فوق علاوه بر سابقه زمانی پارامترهای باد از اطلاعات مکانی آن نیز استفاده می شود. برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی دو نوع متداول از شرایط وزشی باد در مزارع با تغییرات کند و تند شبیه سازی شدند. به منظور مقایسه نیز الگوریتم پیشنهادی این مقاله و یکی از جدیدترین روش های موجود موسوم به MWECC در هر دو سناریو آزموده شدند.

سرانجام مقایسه عملکرد روش های فوق نیز با استفاده از پارامترخطای تخمین باد و یکنواختی برق تولیدی در مزرعه بادی انجام پذیرفت. نتایج حاکی از برتری روش پیشنهادی بودند به گونه ای که در سناریوی اول روش پیشنهادی این مقاله توانست خطای تخمین باد را ۵/۳ درصد و یکنواختی برق حاصله را ۵۲/۰ ولت نسبت به روش MWECC بهبود بخشد. اگرچه در نوع دوم وزش باد توربولانس بالای وزش موجب می شود تا تخمین پارامترها با بازده کمتری نسبت به سناریوی قبلی انجام شود، اما ملاحظه شد که در این گونه از وزش باد عملکرد الگوریتم پیشنهادی این مقاله نسبت به MWECC برتری قابل ملاحظه تری یافته است.

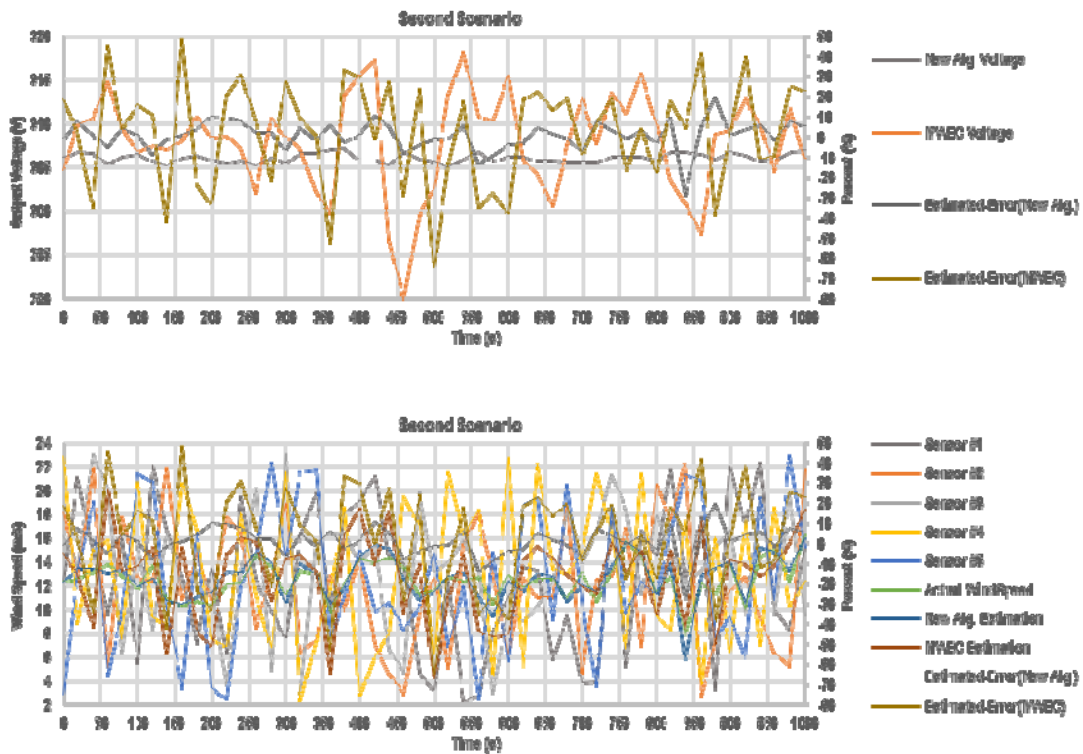
این بهبود به گونه ای است که نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی با دو معیار خطای تخمین باد و یکنواختی برق تولیدی به ترتیب ۱۷/۱ درصد و ۱۲/۷ ولت بهبود را نسبت به MWECC نشان داده است که ۱۱/۸ درصد و ۱۲/۱۸ ولت برتری را نسبت به بهبودهای حاصل در مقایسات سناریوی اول را نشان می دهند. بر این اساس نتایج فوق، حاکی از آن هستند که مدل پیشنهادی این مقاله مبتنی بر مدلسازی فازی مزرعه بادی با استفاده از تلفیق زمانی- مکانی می تواند پارامترهای تنظیم دقیق تری برای توربین ها نسبت به روش های موجود خصوصاً در شرایط وزش بادهای با توربولانس بالا که پارامترهای بادی متغیرتری دارند، به دست آورد.

دو گونه از شرایط وزشی باد در مزرعه بادی با تغییرات کند (باد نجیب) و تند (باد نانجیب) طی دو سناریوی متفاوت شبیه سازی شدند. همچنین الگوریتم های پیشنهادی این مقاله و MWECC نیز در هر دو شبیه سازی آزموده شده و مقایسه گردیدند. نتایج به دست آمده نشان دادند که روش پیشنهادی این مقاله و الگوریتم MWECC در دو وضعیت فوق، عملکردهای کاملاً متفاوتی از خود نشان می دهند. مقایسه عملکرد این دو روش با استفاده از دو معیار عملی انجام پذیرفت. اولین معیار، خطای تخمین پارامترهای باد توسط هر الگوریتم نسبت به شبیه سازی اصلی و معیار دوم نیز یکنواختی برق تولیدی در مزرعه بادی با به کارگیری هر یک از الگوریتم ها بودند. نتایج نشان داده شده در شکل (۸) که با گام زمانی ۲۰ ثانیه ای نشان داده شده اند، از برتری روش پیشنهادی این مقاله نسبت به روش MWECC در شرایط وزش باد نجیب و با هر دو معیار مقایسه فوق، حکایت دارند. در این شکل ابتدا مشخصات باد دریافتی توسط حسگرهای اطراف نیروگاه نشان داده شده و سپس خطای تخمین سرعت باد توسط الگوریتم های مورد بررسی ارائه گردیده اند. سرانجام میزان یکنواختی برق خروجی نیز برای دو الگوریتم به دست آمده اند. در این سناریو متوسط خطای

روش پیشنهادی در تخمین سرعت باد ۱/۵ درصد بوده است. به همین ترتیب متوسط خطای روش MWECC نیز مقداری معادل ۶/۸ درصد را نشان داده است. مقادیر فوق به طور معنی داری حاکی از تخمین دقیق تر روش این مقاله می باشد. معیار تفرانس برق استحصالی نیز برای روش پیشنهادی ۱/۴۹ ولت و برای روش MWECC نیز ۲/۰۱ ولت به دست آمدند. این مقادیر نیز نشان می دهند که در سناریوی فوق، روش پیشنهادی برق یکنواخت تری را به شبکه تزریق نموده است. شکل (۹) نیز نتایج را با گام زمانی ۲۰ ثانیه نشان می دهد و حاکی از آن است که روش پیشنهادی این مقاله در سناریوی دوم شبیه سازی با هر دو معیار فوق، برتر از MWECC عمل نموده است. نتایج نشان می دهند در این سناریو، متوسط خطای روش پیشنهادی در تخمین سرعت باد ۵/۳ درصد بوده است در حالی که همین پارامتر برای روش MWECC برابر با ۲۲/۴ درصد به دست آمده است. معیار یکنواختی برق تولیدی نیز برای دو روش فوق به ترتیب ۲/۳ ولت و ۱۵/۰۳ ولت به دست آمده اند که کماکان استحصال برق یکنواخت تر با استفاده از روش این مقاله را تایید می نمایند. سرانجام مقایسه دو شکل اخیر نشان می دهند که اگرچه روش پیشنهادی این مقاله در هر دو شرایط وزش باد های نجیب و نانجیب توانسته است نتایج بهتری را نسبت به MWECC به دست دهد و لیکن بهبود ایجاد شده توسط روش پیشنهادی در سناریوی دوم چشمگیرتر بوده است. به گونه ای که برتری روش پیشنهادی نسبت به MWECC با معیارهای خطای تخمین باد و یکنواختی برق استحصالی در سناریوی اول به ترتیب ۵/۳ درصد و ۵۲Volts بوده است در حالی که این مقادیر در سناریوی دوم به ترتیب ۱۷/۱ درصد و ۱۲/۷Volts به



شکل ۸: مقایسه تفصیلی عملکرد روشهای پیشنهادی و MWEC در سناریوی اول



شکل ۹: مقایسه تفصیلی عملکرد روشهای پیشنهادی و MWEC در سناریوی دوم

مراجع

- [14] L.Soder, "Simulation of wind speed forecast errors for operation planning of multi-area power systems," Proceedings of 8th International conference on probabilistic methods applied to power systems, Iowa, USA, pp. 723-728, 2004.
- [15] P.Louka, G.Galanis, and N.Siebert, "Improvements in wind speed forecasts for wind power prediction purposes using kalman filtering," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 96, no. 12, pp. 2348-62, 2008.
- [16] P.Zhao, J.Wang, J.Xia, Y.Dai, Y.Sheng, and J.Yue, "Performance evaluation and accuracy enhancement of a day-ahead wind power forecasting system in China," Journal of Renewable Energy, vol. 43, pp. 234-241, 2012.
- [17] J.S.Thongam, P.Bouchard, H.Ezzaidi, and M.Ouhrouche, "Artificial neural network-based maximum power point tracking control for variable speed wind energy conversion systems," 18th IEEE International Conference on Control Applications, Saint Petersburg, Russia, pp. 1667-71, 2009.
- [18] G.Guangdian, and D.Zhijie, "Wind pattern recognition in neural fuzzy wind turbine control system," The Industrial Fuzzy and Intelligent Systems Conference and the NASA Joint Technology, San Antonio, USA, pp. 381-385, 1994.
- [19] S.Al-Sharhan, "Fuzzy entropy: a brief survey," 10th IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Melbourne, Australia, pp. 1135-39, 2001.
- [20] S.Xuan, W.Xiaoye, W.Zhou, W., and X.Ying, "A new fuzzy clustering algorithm based on entropy weighting," Journal of Computational Information Systems, vol. 6, no. 10, pp. 3319-26, 2010.
- [21] M.Brown, and C.Harris, Neuro-Fuzzy Adaptive Modeling and Control, Prentice Hall, New York, 1994.
- [22] J.Jang, "ANFIS: Adaptive-Network-based fuzzy inference system," IEEE Transactions on systems, Manufacturing and Cybernetics, vol. 23, no. 3, pp. 665-685, 1993.
- [23] C.Sun, and J.Jang, "Neuro-Fuzzy modeling and control," Proceedings of IEEE, vol. 83, no. 2, pp.378-406, 1995.
- [24] M.Lackner, and C.Elkinson, "An Analytical Framework for Offshore Wind Farm Layout Optimization," Wind Engineering, vol. 31, no. 1, pp.17-31, 2007.
- [25] Y.Ren, and G.Bao, "Control strategy of maximum wind energy capture of direct-drive wind turbine generator based on neural-network," Proceedings of Power and Energy Engineering Conference, Chengdu, China, pp. 28-31, 2010.
- [1] R.Everett, R.Boyle, S.Peake, and J.Ramage, Energy Systems and Sustainability: Power for a Sustainable Future, Oxford University Press, 2012.
- [2] Small Wind World Report, World Wind Energy Association. Available: <http://www.wwindea.org>, March 2012.
- [3] G.Slootweg, H.Polinder, and W.Kling, "Dynamic modeling of a wind turbine with doubly fed induction generator," Proceedings IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver, Canada, pp. 1-6, 2001.
- [4] G.Wilkins, Technology Transfer for Renewable Energy, CRC Press, 2012.
- [5] E.Muljadi, C.Butterfield, B.Parsons, and A.Ellis, "Effect of variable speed wind turbine generator on stability of a weak grid," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 22, no. 1, pp. 29-36, 2007
- [6] J.Carrasco, L.Franquelo, J.Bialasiewicz, E.Galván, R.Guisado, M.Prats, J.León, and N.Moreno-Alfonso, "Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, no. 4, pp. 1002-16.
- [7] M.Hand, and J.Balas, "Systematic approach for PID controller design for pitch-regulated, variable- speed Wind Turbines," 17th ASME Wind Energy Symposium Proceedings, Nevada, USA, pp. 89-94, 1998.
- [8] B.Beltran, T.Ahmed-Ali, and M.Benbouzid, "Sliding mode power control of variable-speed wind energy conversion systems," IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 23, no. 2, pp. 551-558, 2008.
- [9] G.Tapia, and P.Flores, "Application of a control algorithm for wind speed prediction and active power generation," Renewable Energy, vol. 30, pp. 523-536, 2005.
- [10] M.Hansen, Aerodynamics of Wind Turbines, Earthscan, 2012.
- [11] R.Mayes, D.Rixen, D. Griffith, D.De Klerk, S.Chauhan, N.Voormeeren, and M.Allen, Topics in Experimental Dynamics Sub-structuring and Wind Turbine Dynamics, Springer, 2012.
- [12] S.Watson, L.Landberg, and J.Halliday, "Application of wind speed forecasting to the integration of wind energy in to a large scale power system," IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, vol. 141, no. 4, pp. 357-362, 1994.
- [13] J.Torres, A.Garcia, M.Blas, and A.Francisco, "Forecast of hourly average wind speed with ARMA models in Navarre," Solar Energy, vol. 79, no. 1, pp. 65-77, 2005.