



Optimal Maintenance for Wind Turbines Considering Multi - Level Time - Based Maintenance Thresholds

Karim Atashgar & Hadi Abdollahzadeh*

Karim Atashgar, Assistance professor of Industrial Engineering Faculty-Malek Ashtar University of Technology

Hadi Abdollahzadeh, PhD student of Industrial Engineering –Malek Ashtar University of Technology

Keywords

Opportunistic maintenance,
Imperfect maintenance
actions,
Wind turbines, simulation,
Cuckoo optimization
algorithm

ABSTRACT

An efficient maintenance model plays an essential role in the management of a wind farm. Although several different models provided by researchers to maintain wind turbines of a farm, literature addresses these models proposed without 1) assuming the existence of different turbine types in a farm, and 2) the need of preventive deployment of a maintenance group, simultaneously. In this paper an opportunistic maintenance model based on multi level threshold values for age of wind turbine parts is proposed. In this proposed model it is assumed that: 1) various turbine types installed in a farm, 2) there is an economic dependence between turbine parts, and 3) deployment follows time based approach. The condition of failed turbines and working turbines are also considered in this model. In this proposed model to meet the best possible solution, Cuckoo Optimization Algorithm is approached. The performance evaluation addresses the proposed model is more efficient compared to other models proposed in literature.

© 2016 IUST Publication, IJIEPM Vol. 27, No. 3, All Rights Reserved



نگهداری و تعمیرات بهینه توربین‌های بادی با در نظر گرفتن حدود آستانه تعمیرات چند سطحی مبتنی بر زمان

کریم آتشگر* و هادی عبدالله‌زاده سنگرودی

چکیده:

یک مدل نگهداری و تعمیرات کارآمد، در مدیریت مزرعه‌های بادی، نقش اساسی ایفا می‌کند. مدل‌های مختلفی برای نت توربین‌های مزرعه‌های بادی توسط محققان پیشنهاد شده است، ولی ادبیات موضوع مبین این مهم است که هیچ یک از محققان، تنوع در توربین‌ها و اعزام پیشگیرانه گروه‌های نت را در مدل‌های پیشنهادی خود بطور همزمان مورد ملاحظه قرار نداده‌اند. در این مقاله، یک مدل نت فرصت‌طلبانه بر اساس مقادیر حدود آستانه چند سطحی عمر قطعات، برای یک مزرعه بادی، با فرض هم‌زمان (۱) وجود توربین‌های متنوع، (۲) وجود وابستگی اقتصادی بین قطعات و (۳) اعزام پیشگیرانه مبتنی بر زمان، ارائه شده است. در مدل پیشنهادی این مقاله، شرایط در حال کار بودن و یا از کارافتاده بودن توربین‌ها نیز برای فعالیت‌های نت فرصت‌طلبانه، مورد توجه قرار گرفته است. در این مدل پیشنهادی، به منظور بدست آوردن بهترین جواب ممکن، از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته استفاده شده است. عملکرد مدل پیشنهاد شده در این مقاله نشان می‌دهد که علاوه بر مزیت‌های بالا، مدل پیشنهادی در مقایسه با مدل‌های دیگر از کارایی بالاتری برخوردار است.

کلمات کلیدی

نت فرصت طلب،
فعالیت‌های نت ناکامل،
توربین بادی،
شبیه‌سازی،
الگوریتم بهینه‌سازی فاخته

بخش بسیار مهمی از هزینه‌های عملیاتی مزارع بادی را هزینه‌های نگهداری و تعمیرات (نت) تشکیل می‌دهد. از این‌رو، توسعه موفقیت آمیز یک مزرعه بادی، نیازمند به‌کارگیری یک استراتژی نت مناسب و کارآمد است [۳].

مدل‌های مختلفی به منظور بهینه‌سازی فعالیت‌هایی نگهداری و تعمیرات سیستم‌های مختلف ارائه شده است [۴-۶]. اما موضوع بسیار مهمی که در تعریف سیاست‌های نت یک مزرعه بادی باید به آن توجه شود، وابستگی اقتصادی بین قطعات و زیرسیستم‌های یک مزرعه می‌باشد. برای مثال، زمانی که یک گروه نت به مزرعه اعزام می‌گردد، بدون توجه به حجم فعالیت‌های نت صورت گرفته، یک هزینه ثابت اعزام گروه‌های نت به سیستم تحمیل خواهد شد. بر این اساس، در گزارش انرژی‌های بادی اروپا [۷]، بر به‌کارگیری سیاست نت فرصت‌طلب^۱ برای مزارع بادی تاکید شده است. در این سیاست، زمانی که یک گروه نت به مزرعه اعزام می‌شود (حال به دلیل یک فعالیت نت برنامه‌ریزی شده، خرابی یک قطعه یا از کار افتادن سیستم)، این فرصت ایجاد می‌شود که مجموعه‌ای از فعالیت‌های نت

انرژی باد به جهت کاهش اثرات گازهای گلخانه‌ای و همچنین کاهش وابستگی به انرژی‌های فسیلی به یکی از پر رشدترین منابع انرژی در بسیاری از کشورهای جهان تبدیل شده است [۱]. به طوری که در سال ۲۰۱۰ میلادی تولید انرژی بادی به بیش از ۲٫۵ درصد کل انرژی الکتریسیته مصرف شده در جهان رسیده است و ظرفیت نصب شده جهانی آن به طور متوسط در هر سال بیش از ۲۵ درصد رشد داشته است [۲]. حفظ و افزایش سرمایه‌گذاری‌های انجام شده در این حوزه‌ی مهم، نیازمند توسعه عملکرد و بهره‌وری توربین‌های بادی و همچنین بهینه‌سازی سودآوری مزارع بادی می‌باشد. درآمد خالص یک مزرعه بادی برابر اختلاف درآمدهای حاصل از فروش انرژی تولید شده و هزینه‌های عملیاتی آن تعریف می‌گردد.

تاریخ وصول: ۹۳/۰۷/۱۰

تاریخ تصویب: ۹۳/۱۲/۱۱

هادی عبدالله‌زاده سنگرودی، مجتمع مهندسی صنایع - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران. hadi_sangrodi@mut.ac.ir
*نویسنده مسئول مقاله: کریم آتشگر، مجتمع مهندسی صنایع - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران. Atashgar@iust.ac.ir

کش گرایانه^۲ بر روی دیگر قطعاتی که دارای ریسک بالای خرابی هستند، صورت گیرد.

در ادبیات مهندسی نگهداری و تعمیرات، سیاست‌ها و کاربردهای مختلف نگهداری و تعمیرات فرصت‌طلبانه گزارش شده است. برای مثال، لاگوین^۳ و همکاران [۸] با در نظر گرفتن رویکرد نت فرصت‌طلبانه به بررسی تعویض قطعات غیر معیوب یک کمپرسور هیدروژن در زمان از کارافتادگی آن سیستم پرداخته‌اند. کراکر و کومار^۴ [۹] از یک سیاست نت فرصت‌طلب جهت بهینه‌سازی فعالیت‌های نت یک موتور هواپیمای نظامی استفاده کرده‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که می‌بایست عملیات نگهداری و تعمیرات فرصت‌طلب بر روی قطعات ارزان موتور مورد نظر پیاده شود.

بررسی منابع ارائه شده در ادبیات نشان می‌دهد که، شرایط واقعی یک مزرعه بادی، یعنی تنوع توربین‌ها و وابستگی اقتصادی بین قطعات، به صورت همزمان به عنوان فرضیات مدل ارائه شده، مورد توجه قرار نگرفته است. سنارد^۵ و همکاران [۱۰، ۱۱] بر اساس یک افق برنامه‌ریزی محدود، یک مدل بهینه‌سازی عدد صحیح خطی برای تعیین زمان‌بندی بهینه نت فرصت‌طلبانه یک مزرعه بادی متشکل از توربین‌های مشابه ارائه کرده‌اند. خروجی این مدل، برنامه بهینه تعویض اصلاحی و پیشگیرانه قطعات توربین‌های مختلف در یک روز بر اساس میزان انرژی تولیدی و فعالیت‌های نت اصلاحی می‌باشد. در رویکردی مشابه، گوستاوسن^۶ و همکاران [۱۲] با در نظر گرفتن یک هزینه مشترک آماده‌سازی برای فعالیت‌های نت، یک مدل برنامه‌ریزی خطی صفر و یک جهت بهینه‌سازی سیاست فرصت‌طلبانه تعویض قطعات یک مزرعه بادی متشکل از توربین‌های مشابه ارائه کرده‌اند. تیان^۷ و همکاران [۱۳] یک سیاست نت فرصت‌طلبانه با در نظر گرفتن وابستگی اقتصادی بین قطعات یک مزرعه بادی ارائه کرده‌اند. به طوری که تصمیم‌گیری در رابطه با فعالیت‌های نت بر اساس دو حد آستانه احتمال خرابی و اطلاعات پایش وضعیت صورت می‌گیرد. دینگ^۸ و تیان [۱۴] به بررسی یک سیاست نت فرصت‌طلبانه مبتنی بر دو حد آستانه عمر برای کلیه قطعات یک مزرعه بادی پرداخته‌اند. در این رویکرد، زمانی گروه‌های نت به مزرعه اعزام می‌شوند که یک خرابی اتفاق افتاده باشد. این گروه‌ها پس از تعویض اصلاحی قطعات معیوب، بر اساس دو حد آستانه معرفی شده، در رابطه با تعویض پیشگیرانه، تعمیرات ناکامل یا عدم تعمیر قطعات غیر معیوب، تصمیم‌گیری می‌کنند. در پژوهشی مشابه، دینگ و تیان [۱۵] به این نکته اشاره داشتند که در تصمیم‌گیری نت فرصت‌طلبانه یک قطعه، می‌بایست ماهیت در حال کار بودن یا از کارافتاده بودن توربین در نظر گرفته شود.

اعزام پیشگیرانه گروه‌های نت نیز یکی از موضوع‌های مهم می‌باشد که می‌تواند مدل‌های نت را در یک مزرعه بادی تحت تأثیر قرار دهد. در مدل ارائه شده توسط منابع [۱۰-۱۲، ۱۴، ۱۵] فقط زمانی گروه‌های نت به مزرعه اعزام می‌شوند که یک خرابی در مزرعه اتفاق افتاده باشد (اعزام مبتنی بر خرابی^۹). این موضوع در حالی است که از مدار خارج شدن بدون برنامه‌ریزی یک توربین می‌تواند هزینه‌های بسیار بالای از دست دادن تولید و تعمیرات اصلاحی را در بر داشته باشد. در مدل ارائه شده توسط تیان و همکاران [۱۳] اعزام گروه‌های نت، مبتنی بر شرایط است. با وجود این که، رویکرد مبتنی بر زمان به صورت گسترده‌ای در صنعت تولید برق بادی به کار گرفته شده است، اما بر اساس دانش نویسندگان این مقاله، هیچ پژوهشی به بررسی اعزام مبتنی بر زمان در سیاست نت فرصت‌طلب نپرداخته است.

در این مقاله، یک رویکرد نت فرصت‌طلب مبتنی بر اعزام پیشگیرانه گروه‌های نت ارائه شده است. سیاست نت فرصت‌طلب ارائه شده در این مقاله بر اساس حدود آستانه چند سطحی عمر قطعات تعریف شده است. به این معنی که حدود آستانه مختلفی بر اساس نوع توربین، نوع قطعه و همچنین ماهیت در حال کار بودن، یا از کارافتاده بودن توربین، برای تصمیم‌گیری انجام فعالیت‌های نت فرصت‌طلبانه یک قطعه در نظر گرفته شده است. در این مقاله، به منظور بدست آوردن بهترین ترکیب از حدود آستانه معرفی شده، از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته استفاده شده است. در نهایت، رویکرد ارائه شده توسط یک مثال عددی بررسی و ارزیابی می‌گردد.

ساختار این مقاله به صورت زیر تنظیم شده است: در بخش بعدی مقاله، یک مدل پیشنهادی فرصت‌طلبانه برای یک مزرعه بادی معرفی می‌شود. بخش سوم مقاله به شبیه‌سازی مدل پیشنهادی و بهینه‌سازی عملیات نت می‌پردازد. بخش چهارم مقاله به ارزیابی و تحلیل استراتژی نت پیشنهادی اختصاص داده شده است. در نهایت، بخش آخر این مقاله به نتیجه‌گیری از مقاله می‌پردازد.

۲. مدل پیشنهادی مبتنی بر سیاست نت فرصت

طلبانه در یک مزرعه بادی

فرض کنید که در یک مزرعه بادی از $i (i = 1, \dots, n)$ نوع توربین بادی استفاده شده است. به طوری که در نقاط مختلف مزرعه تعداد M_i توربین از نوع i ام نصب شده باشد. همچنین فرض می‌شود که i امین توربین دارای N_i قطعه مهم، به صورت سری، می‌باشد. بدین ترتیب مزرعه بادی فوق که شامل $\sum_{i=1}^n M_i$ توربین است، مبتنی بر یک سیستم موازی-سری طراحی شده است. به علاوه، فرض می‌شود که خرابی هر یک از قطعات i امین

هزینه ثابت اعزام وابسته به ماهیت اعزام پیشگیرانه ($m=1$) یا اصلاحی ($m=2$) گروه‌های نت می‌باشد.

برای مدیریت هزینه‌های نت و اعزام گروه‌های تعمیراتی، تعیین حدود آستانه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. حدود آستانه در واقع مشخص می‌کند، که در یک رویکرد فرصت‌طلبانه، گروه‌های اعزامی، حتی در صورت عدم خرابی قطعات، چه زمانی به تعمیر قطعه مشخصی اقدام نمایند. بدین ترتیب، حد آستانه عمر برای یک قطعه، درصدی از متوسط زمان خرابی آن قطعه است، به طوری که اگر عمر قطعه مورد نظر بیشتر از حد آستانه گردد، لازم است عملیات نت بر روی آن انجام شود. منبع [۱۴] از دو حد آستانه عمر به منظور ارائه سه استراتژی نت فرصت طلب استفاده کرده است. در پژوهش [۱۴] حدود آستانه برای شرایطی که فقط یک نوع توربین در مزرعه باد وجود دارد، ارائه شده است. در حالی که شرایط واقعی مبین آن است که مزرعه‌های بادی از توربین‌های مختلف با مشخصه‌های فنی متفاوت استفاده می‌کنند. بدیهی است که با واقعی کردن فرضیات مدل، استراتژی‌های نت فرصت‌طلبانه تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

در مدل پیشنهادی این مقاله، به منظور مدیریت فعالیت‌های نت کامل و ناکامل در توربین‌های در حال کار و از کارافتاده، دو حد آستانه $PMH_{i,j}$ ، $PML_{i,j}$ برای قطعه j ام از توربین‌های در حال کار نوع i ام، و دو حد آستانه $PFH_{i,j}$ و $PFL_{i,j}$ برای قطعه j ام از توربین‌های از کارافتاده نوع i ام استفاده می‌گردد. همچنین به منظور پیشگیری از وقوع خرابی‌های تصادفی، یک حد آستانه اعزام پیشگیرانه ($PM_{i,j}$) برای قطعه j ام از توربین نوع i ام تعریف می‌گردد. بدین ترتیب، گروه نت زمانی به مزرعه بادی اعزام می‌شود که (۱) یک خرابی در توربین‌های مزرعه اتفاق افتاده باشد، (۲) عمر یک قطعه، برای مثال قطعه j ام از توربین نوع i ، از حد آستانه $PM_{i,j} \times MTTF_{i,j}$ عبور کرده باشد. پس از اعزام گروه نت به مزرعه (برای نت پیشگیرانه یا اصلاحی):

- (۱) برای قطعات معیوب، تعویض اصلاحی انجام می‌شود.
- (۲) برای قطعات غیر معیوب، اگر عمر قطعات از حد آستانه $PFH_{i,j} \times MTTF_{i,j}$ (برای قطعات توربین از کارافتاده) یا $PML_{i,j} \times MTTF_{i,j}$ (برای قطعات توربین‌های سالم) عبور کند، تعویض پیشگیرانه انجام می‌شود.
- (۳) برای قطعاتی که شامل اقدام ۲ بالا نمی‌شوند، اگر عمر قطعات بیشتر از $PFL_{i,j} \times MTTF_{i,j}$ (برای قطعات توربین از کارافتاده) یا $PML_{i,j} \times MTTF_{i,j}$ (برای قطعات توربین‌های سالم) باشد، عملیات نت ناکامل که عمر قطعه را به اندازه $q_{i,j}$ کاهش می‌دهد بر روی قطعات صورت خواهد گرفت. لازم به یادآوری است که، همواره روابط زیر برقرار است:

$$\begin{aligned} PM_{i,j} > PMH_{i,j} > PML_{i,j} & \quad i=1, \dots, n \\ PFH_{i,j} > PFL_{i,j} & \quad j=1, \dots, N_i \end{aligned} \quad (2)$$

توربین بادی، تأثیری بر دیگر قطعات آن توربین و همچنین بر قطعات توربین‌های دیگر ندارد.

در این مقاله، فعالیت‌های نت به دو دسته فعالیت‌های کامل و ناکامل تقسیم شده است. منظور از فعالیت‌های نت کامل، فعالیت‌های نت پیشگیرانه‌ای هستند که با انجام تعمیرات، وضعیت قطعه را به بهترین حالت ممکن خود باز می‌گردانند. این در حالی است که یک فعالیت نت ناکامل، وضعیت قطعه را به وضعیتی مابین خرابی کامل و بهترین وضعیت ممکن، انتقال می‌دهد. در ضمن فرض می‌شود که، عمر یا سن قطعه نشان دهنده وضعیت یا کیفیت عملکرد آن قطعه می‌باشد. این رویکرد در مرجع [۱۴] نیز استفاده شده است. از این رو، در رابطه با نت ناکامل قطعه j ام ($j=1, \dots, N_i$) از توربین نوع i ام، یک نسبت (درصد) کاهش عمر $q_{i,j}$ می‌توان تعریف کرد. به این معنی که، عمر یک قطعه بعد از عملیات نت ناکامل به نسبت $q_{i,j}$ ($0 \leq q_{i,j} \leq 1$) کاهش می‌یابد. برای مثال، اگر به دلایل فنی و اقتصادی یک فعالیت تعمیرات ناکامل با درصد کاهش عمر $q=0.6$ بر روی جعبه‌دنده یک توربین صورت گیرد، و با فرض آنکه تا قبل از زمان انجام تعمیرات ناکامل، ۸ سال از عمر این جعبه‌دنده گذشته باشد؛ عمر (وضعیت) جدید این جعبه‌دنده بعد از تعمیرات برابر $3.2=8 \times 0.6$ سال خواهد بود. به بیان ساده‌تر، بعد از عملیات تعمیرات ناکامل، توربین فوق دارای یک جعبه‌دنده ۳.۲ ساله است. به عبارت دیگر، اگر برای این توربین یک عملیات نت، با کاهش عمر ۱۰۰ درصدی انجام شود (یعنی نت کامل)، به این معنی است که جعبه‌دنده توربین تعویض گردیده است. در این حالت عمر جعبه‌دنده ($age=0$) کاملاً برابر یک جعبه‌دنده جدید شده است. لازم به ذکر است، هزینه یک عملیات ناکامل، تابعی از $q_{i,j}$ می‌باشد و می‌تواند به صورت معادله (۱) تعریف گردد [۱۴].

$$CP_{i,j} = \begin{cases} q_{i,j} \times CPV_{i,j} + CPF_{i,j} & \cdot < q_{i,j} \leq 1 \\ 0 & q_{i,j} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

که در آن، $CPV_{i,j}$ هزینه متغیر نت پیشگیرانه و $CPF_{i,j}$ هزینه ثابت نت قطعه j ام از توربین نوع i می‌باشد. برای مثال، کل هزینه تعمیر کاهش عمر ۱۰۰ درصدی ($q_{i,j}=1$) برابر $CPV_{i,j} + CPF_{i,j}$ خواهد بود. از این رو، هر چه درصد عمر قطعه بیشتر کاهش پیدا کند، هزینه بیشتری نیز می‌بایست پرداخت گردد. به علاوه، در صورت خرابی یک قطعه نیز می‌بایست هزینه $CF_{i,j}$ به منظور تعویض قطعه پرداخت گردد. باید توجه داشت که انجام عملیات نت بر روی قطعات یک توربین مستلزم اعزام یک گروه نت به مزرعه می‌باشد. در ضمن، هزینه‌های اعزام گروه تعمیراتی را می‌توان به دو بخش هزینه ثابت ($C_{fix,m}$) و هزینه متغیر (CA_j) تقسیم نمود. به طوری که،

پیشنهادی، ارائه می‌شود. نتیجه حاصله از این مرحله، به عنوان تابع هدف در الگوریتم بهینه‌سازی فاخته استفاده می‌شود.

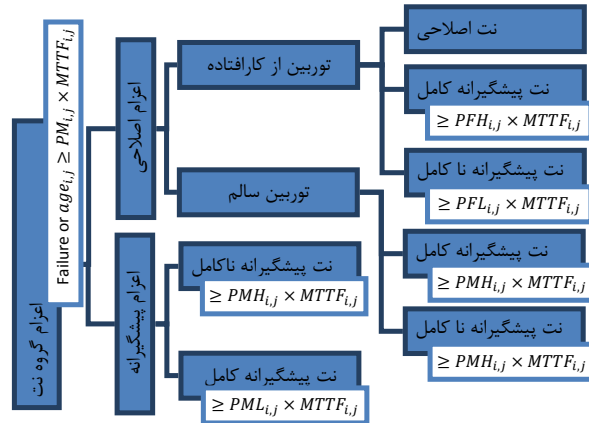
۳-۱. شبیه‌سازی مدل پیشنهادی

برای شبیه‌سازی یک مدل نت، می‌توان از یکی از دو روش برش زمانی و پیشامد بعدی، استفاده نمود. در روش برش زمانی، مدل در فواصل زمانی یکسان، به روز رسانی می‌شود. تعیین مقدار فاصله زمانی، یک پارامتر مهم در استفاده از این روش می‌باشد. اگر این فاصله زمانی بسیار بزرگ انتخاب شود، امکان بررسی همه وضعیت‌های سیستم امکان‌پذیر نخواهد بود. از سوی دیگر، در صورتی که فاصله بین دو ارزیابی، بسیار کم باشد، مدل به دفعات متعدد (بدون این که تغییر وضعیت دهد) مورد بررسی قرار می‌گیرد [۱۶].

اغلب این علاقه وجود دارد که یک مدل هنگامی بررسی و به روز رسانی شود که یک تغییر وضعیت یا یک پیشامد در سیستم ایجاد شده باشد. مدیریت گذار زمان به وسیله حرکت زمان از یک پیشامد به پیشامد بعدی را تکنیک پیشامد بعدی گویند. این رویکرد با توجه به آنکه می‌تواند پیشامدهای مختلف سیستم را تحلیل کند، نسبت به روش برش زمانی، دارای کیفیت عملکردی بهتری است [۱۶]. در این پژوهش، از رویکرد پیشامد بعدی جهت شبیه‌سازی هزینه‌های نت استفاده شده است. مراحل مختلف این رویکرد در ادامه شرح داده شده است:

مرحله اول: مقداردهی اولیه و طراحی جدول شبیه‌سازی.

اولین مرحله در تکنیک پیشامد بعدی، طراحی و مقداردهی جدول شبیه‌سازی به منظور ذخیره‌سازی جداگانه و پیوسته وضعیت هر یک از قطعات توربین‌های مزرعه می‌باشد. جدول ۱ نشان‌دهنده جدول طراحی شده جهت ذخیره‌سازی اطلاعات مدل پیشنهادی در این پژوهش می‌باشد. ستون‌های اول، دوم و سوم این جدول، به ترتیب نشان‌دهنده نوع توربین، شماره توربین و شماره قطعه می‌باشد. در این جدول، ستون چهارم نشان‌دهنده عمر قطعات می‌باشد. با فرض آنکه تمام قطعات توربین‌ها به تازگی تعویض شده باشند، و یا توربین‌ها به تازگی نصب و راه‌اندازی شده باشند، لذا در شروع شبیه‌سازی، عمر تمامی قطعات برابر صفر است. در این شبیه‌سازی لازم است بر اساس نوع توزیعی را که خرابی قطعات توربین از آن پیروی می‌کند، عمر خرابی هر قطعه پیش‌بینی شود. در جدول ۱، ستون پنجم نشان‌دهنده عمر خرابی (زمان پیش‌بینی خرابی) برای هر یک از قطعات توربین‌ها است. عمر خرابی یک قطعه مدت زمانی است که طول می‌کشد تا یک خرابی در قطعه مورد نظر رخ دهد. برای مثال، انتظار می‌رود که قطعه ۱ از توربین شماره یک نوع اول، ۴۰۵ روز دیگر از کار بیافتد. ستون ششم نشان‌دهنده مجموع عمرهای خرابی پیش‌بینی شده، برای هر یک از قطعات



شکل ۱. ساختار کلی عملیات نت بر اساس وضعیت توربین و قطعه

شکل ۱ درخت تصمیم‌گیری گروه‌های نت را بر اساس وضعیت توربین و وضعیت قطعه نشان می‌دهد. مدل ریاضی زیر نیز شرایطی را که در بالا تشریح گردید را نشان می‌دهد:

$$\begin{aligned} \min C_E(PFL, PFH, PM, PML, PMH, q) \\ s.t. \\ PM_{i,j} > PMH_{i,j} > PML_{i,j} \quad \forall i = 1, \dots, n \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \forall j = 1, \dots, N_i \\ PFH_{i,j} > PFL_{i,j} \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \forall i = 1, \dots, n \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \forall j = 1, \dots, N_i \\ 0 \leq q_{i,j} \leq 1 \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \forall i = 1, \dots, n \\ \quad \forall j = 1, \dots, N_i \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن C_E کل هزینه انتظاری نت به ازای توربین i ام در واحد زمان است. PFL ، PFH ، PM ، PML ، PMH و q به ترتیب نشان‌دهنده بردار متغیرهای طراحی مرتبط با توربین‌های از کار افتاده و سالم به صورت زیر می‌باشد. هدف، تعیین مقدار بهینه این حدود به نحوی است که کل هزینه انتظاری نت کمینه گردد.

$$\begin{aligned} PFL &= [PFL_{1,1}, \dots, PFL_{1,N_1}, \dots, PFL_{n,N_n}] \\ PFH &= [PFH_{1,1}, \dots, PFH_{1,N_1}, \dots, PFH_{n,N_n}] \\ PM &= [PM_{1,1}, \dots, PM_{1,N_1}, \dots, PM_{n,N_n}] \\ PML &= [PML_{1,1}, \dots, PML_{1,N_1}, \dots, PML_{n,N_n}] \\ PMH &= [PMH_{1,1}, \dots, PMH_{1,N_1}, \dots, PMH_{n,N_n}] \\ q &= [q_{1,1}, \dots, q_{1,N_1}, \dots, q_{n,N_n}] \end{aligned} \quad (4)$$

۳-۲. شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مدل

در این بخش، ابتدا یک رویکرد شبیه‌سازی، به منظور ارزیابی و محاسبه کل هزینه‌های نت، یک سیاست شدنی از مدل

در فرآیند شبیه‌سازی مدل پیشنهادی این مقاله، این امکان وجود دارد که هر یک از پیشامدهای بالا، یک یا چندین بار برای توربین‌های بادی مورد مطالعه به وجود آیند. از این رو، برای مشخص شدن پیشامد بعدی، از معادله (۵) استفاده می‌شود. در حقیقت، در معادله (۵) ساعت شبیه‌سازی بر اساس کمترین مقدار دو ستون ششم و هفتم به روز می‌گردد. بر این اساس، ستون‌های چهارم و هفتم جدول شبیه‌سازی (عمر و حد آستانه اعزام پیشگیرانه یک قطعه) نیز، به ترتیب مطابق معادلات (۶) و (۷) به روز می‌شوند:

$$\forall i = 1, \dots, n$$

$$Clock_l = \min(TA_{i,j,k}, TM_{i,j,k}) \quad \forall j = 1, \dots, N_i \quad (5)$$

$$\forall k = 1, \dots, M_i$$

$$age_{i,j,k} = age_{i,j,k} + Clock_l - Clock_{l-1} \quad (6)$$

$$TM_{i,j,k} = Clock_l + PM_{i,j} \times MTTF_{i,j} - age_{i,j,k} \quad (7)$$

می‌باشد. ستون هفتم نیز نشان دهنده زمان اعزام پیشگیرانه گروه‌های نت برای یک قطعه می‌باشد. در شروع شبیه‌سازی، مقادیر این ستون برابر حد آستانه اعزام پیشگیرانه قطعات مربوطه به هر ردیف $(PM_{i,j} \times MTTF_{i,j})$ است. متغیرهای ساعت شبیه‌سازی $(Clock_l)$ و کل هزینه‌های نت (C_T) که در آخرین سطر از جدول فوق قرار دارند، به ترتیب، مدت زمان شبیه‌سازی شده تا تکرار l ام ($l = 1, 2, \dots, L$) و کل هزینه‌های نت از ابتدا تا ساعت شبیه‌سازی شده $(Clock_l)$ را نشان می‌دهند.

مرحله دوم: به روز رسانی زمان. همان طور که در بخش قبل توضیح داده شد، به طور کلی دو پیشامد زیر باعث ایجاد تغییر در وضعیت یک مزرعه خواهد شد:

- رخ دادن خرابی در یک یا چند قطعه از یک یا چند توربین
- انجام نت پیشگیرانه

جدول ۱. جدول اولین مرحله شبیه‌سازی مدل پیشنهادی

نوع توربین	شماره توربین	قطعه	عمر (روز) (<i>age</i>)	عمر خرابی (روز) (<i>FA</i>)	مجموع زمان‌های خرابی (روز) (<i>TA</i>)	اعزام پیشگیرانه (روز) (<i>TM</i>)
۱	۱	۱	۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۲۰
		N_1	۰	۴۰۵	۴۰۵	۳۸۰
۱	:	۱	۰	۲۹۵	۲۹۵	۳۲۰
		M_1	۰	۳۹۸	۳۹۸	۳۸۰
:	:	۱	۰	۴۰۵	۴۰۵	۳۵۰
		N_n	۰	۴۰۰	۴۰۰	۳۷۰
:	:	۱	۰	۳۰۰	۳۰۰	۲۵۰
		M_n	۰	۳۹۸	۳۹۸	۳۷۰
		ساعت شبیه‌سازی (روز) ($Clock_l$)	۰			
		کل هزینه انتظاری (واحد پول) (C_T)				

شبیه‌سازی مرتبط با قطعه مورد نظر مطابق معادله‌های (۸) الی (۱۰) تغییر می‌کند.

$$FA_{i,j} = TL_{i,j,k} \quad (8)$$

$$TA_{i,j,k} = Clock_l + TL_{i,j,k} \quad (9)$$

$$TM_{i,j,k} = Clock_l + PM_{i,j} \times MTTF_{i,j} \quad (10)$$

در معادلات بالا $TL_{i,j,k}$ عمر خرابی پیش‌بینی شده بر اساس توزیع خرابی قطعه می‌باشد. در صورت انجام تعمیرات پیشگیرانه ناکامل، همان طور که در بخش دوم بیان شد، یک نسبت یا

مرحله سوم: تصمیم‌گیری در رابطه با فعالیت‌های نت.

همان‌طور که قبلاً بیان شد، پس از اعزام گروه نت، سه نوع اقدام شامل، تعویض اصلاحی، تعویض پیشگیرانه و تعمیرات ناکامل، ممکن است انجام پذیرد. با فرض انجام تعویض اصلاحی یا تعویض پیشگیرانه بر روی یک قطعه، در فرآیند شبیه‌سازی، عمر قطعه مورد نظر برابر صفر خواهد شد. در این مرحله با تولید عدد تصادفی بر اساس توزیع خرابی قطعه، عمر خرابی آن به روز می‌گردد. بدین ترتیب، ستون پنجم، ششم و هفتم جدول

$$TA_{i,j,k} = Clock_l + FA_{i,j,k} - age_{i,j,k} \quad (13)$$

$$TM_{i,j,k} = Clock_l + PM_{i,j} \times MTF_{i,j} - age_{i,j,k} \quad (14)$$

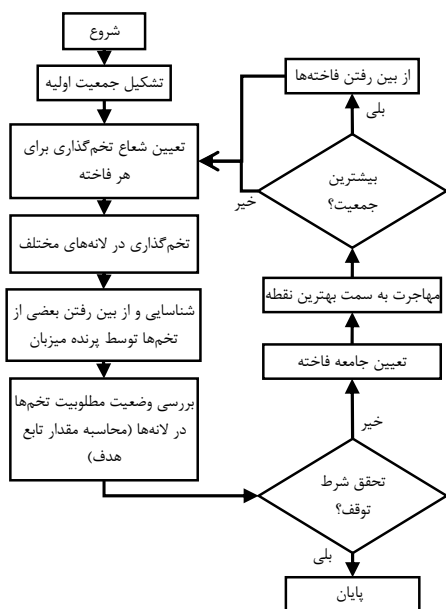
مرحله چهارم: به روز رسانی هزینه. در هر مرحله شبیه‌سازی، کل هزینه‌های نت با استفاده از معادله (۱۴) به روز می‌گردد.

$$C_T = C_T + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{M_i} \left(\sum_{j=1}^{N_i} (CP_{i,j} \times IP_{i,j,k} + CF_{i,j} \times IC_{i,j,k}) + CA_i \times IA_{i,j} \right) + \sum_{m=1}^2 C_{fix,m} \times IM_m \quad (15)$$

در این الگوریتم از دو رویکرد جستجوی محلی که بر اساس روش تخم‌گذاری و مهاجرت پرنده فاخته توسعه داده شده است، استفاده می‌شود. شکل ۲ فرآیند کلان الگوریتم بهینه‌سازی فاخته را نشان می‌دهد. بر اساس فرآیند شکل ۲ شکل ۲، برای بدست آوردن بهترین جواب ممکن مدل پیشنهادی این مقاله، گام‌های زیر انجام شده است:

الف) تشکیل جمعیت اولیه

برای حل یک مسئله بهینه‌سازی لازم است تا مقادیر متغیرهای مسئله به فرم یک آرایه نمایش داده شود. در الگوریتم ژنتیک، این آرایه‌ها با نام «کروموزوم» شناخته می‌شوند. ولی در الگوریتم بهینه‌سازی فاخته به این آرایه «محل سکونت^{۱۱}» می‌گویند. در حقیقت هر محل سکونت یک جواب شدنی از مسئله می‌باشد. در مسئله پیش‌رو، یک محل سکونت (X)، به صورت یک آرایه نمایش داده شده است. $6 * \sum_{i=1}^n N_i$ بعدی تعریف می‌گردد. این آرایه در شکل ۳



شکل ۲. فرآیند الگوریتم فاخته

درصد کاهش عمر $q_{i,j}$ برای تعمیرات ناکامل تعریف می‌گردد. از این رو، در هر مرحله شبیه‌سازی، ستون‌های چهارم، پنجم، ششم و هفتم به صورت زیر به روز می‌گردند.

$$age_{i,j,k} = age_{i,j,k} \times (1 - q_{i,j}) \quad (11)$$

$$FA_{i,j,k} = q_{i,j} \times TL_{i,j,k} + (1 - q_{i,j}) \times FA_{i,j,k} \quad (12)$$

به طوری که، در هر تکرار، اگر عملیات نت پیشگیرانه برای قطعه j در توربین شماره k از نوع i انجام شود، مقدار $IP_{i,j,k}$ برابر یک خواهد بود و در صورتی که برای همان قطعه، تعویض اصلاحی انجام شود، $IC_{i,j,k} = 1$ است. اگر حداقل یک عملیات نت بر روی توربین شماره k از نوع i صورت گیرد، $IA_{i,j} = 1$ است. همچنین در صورتی که اعزام پیشگیرانه صورت گیرد، $IM_1 = 1$ و در غیر این صورت $IM_2 = 1$ است.

مرحله پنجم: در هر تکرار شبیه‌سازی $l = l + 1$ قرار داده می‌شود و به ترتیب مراحل دوم، سوم و چهارم تا زمانی انجام می‌شوند که یکی از شروط زیر تحقق یابد: (۱) تعداد تکرارها (l) بیشتر از حداکثر تکرار شبیه‌سازی (L_{max}) باشد، (۲) مدت زمان شبیه‌سازی شده ($Clock_l$) بیشتر از حداکثر زمان شبیه‌سازی (T_{max}) گردد.

مرحله ششم: هزینه‌های نت انتظاری به ازای یک توربین در واحد زمان به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C_E = \frac{C_T}{\left(\sum_{i=1}^n M_i \right) * Clock_l} \quad (16)$$

در رابطه بالا، $Clock_l$ ، مدت زمان شبیه‌سازی برای آخرین تکرار می‌باشد.

در این تحقیق از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته جهت جستجوی بهترین جواب ممکن استفاده شده است.

۳-۲. تطبیق الگوریتم فاخته با مدل پیشنهادی

رامین رجبیون [۱۷] یک الگوریتم فرا ابتکاری بر اساس الهام از روش تخم‌گذاری و تولید مثل پرنده فاخته با نام «الگوریتم بهینه‌سازی فاخته» توسعه داده است. قدرت بالای این الگوریتم در جستجوی فضای پیوسته و همچنین همگرایی بسیار سریع، از مزیت‌های این رویکرد می‌باشد. الگوریتم بهینه‌سازی فاخته با یک جمعیت اولیه کار خود را شروع می‌کند. در حقیقت، مکان یک تخم یا پرنده فاخته نشان دهنده یک جواب مسئله می‌باشد.

میزبان قرار می‌دهد. مکانیزم به کار گرفته شده در این مقاله، به صورت معادلات زیر می‌باشد:

$$Y_{d,t} = X_{d,t} + r_1 \times SR \times \sin(\text{angle}) \quad d=1,2,\dots,6 \quad (18)$$

$$- r_2 \times SR \times \cos(\text{angle}) \quad t=1,2,\dots, \sum_{i=1}^n N_i$$

$$SR \approx U(\cdot, ELR_d) \quad d=1,2,\dots,6 \quad (19)$$

$$\text{angle} \approx U(\cdot, 2\pi) \quad (20)$$

در معادلات بالا، $Y_{d,t}$ و $X_{d,t}$ به ترتیب نشان دهنده عنصر سطر d ام و ستون t ام محل سکونت فعلی و محل تخم‌گذاری جدید می‌باشند. SR نشان دهنده میزان دور شده پرنده از محل سکونت خود می‌باشد و به صورت یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه صفر تا ELR_d تعریف می‌گردد. به همین شکل، angle نیز دارای توزیع یکنواخت در بازه صفر تا 2π می‌باشد و نشان دهنده زاویه حرکت پرنده به سمت محل تخم‌گذاری است. به علاوه، r_1 و r_2 اعداد تصادفی هستند که مقادیر خود را از بازه صفر تا یک دریافت می‌کنند. به علاوه، به منظور جلوگیری از توقف در نقاط بهینه محلی، بعد از هر تخم‌گذاری، P درصد از تمام تخم‌ها که مقدار تابع هزینه آن‌ها بیشتر است نابود خواهند شد.

پ) مهاجرت فاخته‌ها

دومین فرآیند جستجوی محلی در این الگوریتم بر اساس مهاجرت پرنده فاخته، طراحی شده است. بر این اساس، ابتدا کلیه محل سکونت‌های موجود توسط روش کلاس‌بندی K -means گروه‌بندی شده و گروهی که دارای میانگین هزینه کمتری است، به عنوان نقطه هدف برای سایر محل‌های سکونت جهت مهاجرت انتخاب می‌شود. در مکانیزم به روز رسانی بکار گرفته شده، از بهترین مکان موجود در گروه برتر، مکان فعلی پرنده و یک ضریب تنظیم‌کننده استفاده می‌شود، به طوری که:

$$Y_{d,t} = X_{d,t} + C \times r \times (BP_{d,t} - X_{d,t}) \quad d=1,2,\dots,6 \quad (21)$$

$$t=1,2,\dots, \sum_{i=1}^n N_i$$

در رابطه بالا $BP_{d,t}$ ، $X_{d,t}$ و $Y_{d,t}$ به ترتیب مکان فعلی پرنده، بهترین مکان گروه برتر و مکان جدید پرنده بعد از مهاجرت هستند. C یک ضریب تنظیم‌کننده است که حداکثر مقدار حرکت پرنده را تنظیم می‌کند. r نیز یک عدد تصادفی در بازه صفر تا یک می‌باشد.

ج) تنظیم جمعیت فاخته‌ها

با توجه به این واقعیت که همیشه تعادلی بین جمعیت پرندگان در طبیعت وجود دارد، عددی مانند N_{\max} حداکثر تعداد فاخته‌هایی را که می‌توانند در یک محیط زندگی کنند

هر یک از سطرهای این آرایه نشان دهنده درصد حدود آستانه معرفی شده در بخش قبل می‌باشد. ستون‌های این آرایه نیز نشان دهنده قطعات توربین‌های مختلف می‌باشد، به طوری که به ترتیب ستون اول نشان دهنده قطعه نوع یک از توربین نوع اول می‌باشد و آخرین ستون قطعه نوع N_n از توربین نوع n می‌باشد. برای شروع الگوریتم بهینه‌سازی، یک مجموعه به عنوان جمعیت اولیه به اندازه N_{pop} از محل سکونت (جواب شدنی مسئله) به صورت تصادفی و با رعایت محدودیت‌های ذکر شده در معادلات شماره (۳) مسئله مورد نظر، تولید می‌شود.

PFL	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
PFH	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
PM	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
PML	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
PMH	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
q	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

شکل ۳. ساختار محل سکونت سیاست نت فرصت‌طلب

ب) تعیین شعاع و روش تخم‌گذاری

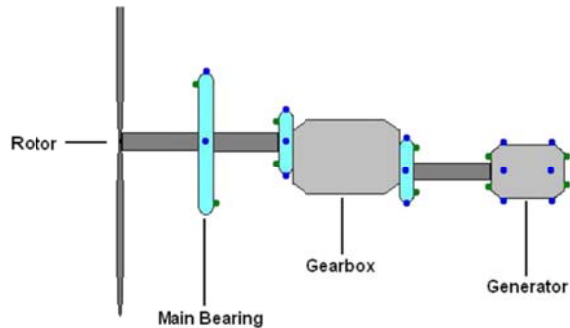
اولین گام در حلقه جستجوی این الگوریتم، تخم‌گذاری یک فاخته یا در حقیقت تولید محل‌های سکونت جدید بر اساس یک محل سکونت می‌باشد. عادت هر فاخته حقیقی این است که در یک دامنه یا شعاع مشخص از محل سکونت خود تخم‌گذاری کند. بر این اساس، در این مقاله، با توجه به تعداد سطرهای آرایه محل سکونت، شعاع تخم‌گذاری یک محل سکونت دارای شش بعد خواهد بود که متناسب با تعداد کل تخم‌ها، تعداد تخم‌های فعلی فاخته و همچنین حد بالا و پایین درصد حد آستانه مورد نظر می‌باشد:

$$ELR_d = \alpha \times \frac{\text{تعداد تخم‌های فاخته فعلی}}{\text{تعداد کل تخم‌ها}} \quad d=1,2,\dots,6 \quad (17)$$

$$\times (var_{hi,d} - var_{low,d})$$

در رابطه بالا، ELR_d بعد d ام شعاع تخم‌گذاری یک فاخته را نشان می‌دهد. به علاوه، $var_{hi,d}$ و $var_{low,d}$ به ترتیب حد بالا و پایین درصد حد آستانه سطر i ام از آرایه محل سکونت فاخته می‌باشند و همچنین α متغیری است که حداکثر مقدار ELR_d با آن تنظیم می‌شود. هر فاخته به صورت تصادفی حداقل a_{\min} و حداکثر a_{\max} تخم را در شعاع تخم‌گذاری خود در لانه پرندگان

فرض شده است که توزیع ویبول، توزیع مناسبی برای نمایش زمان خرابی هر یک از قطعات باشد. پارامترهای توزیع خرابی هر یک از چهار قطعه در نظر گرفته شده، بر اساس منابع [۱۳، ۳] در جدول ۲ آورده شده است. اطلاعات هزینه‌های مورد نیاز که شامل هزینه تعویض اصلاحی، هزینه‌های ثابت و متغیر نت پیشگیرانه و هزینه‌های اعزام و دسترسی گروه‌های نت نیز بر اساس مراجع [۱۳] در جدول ۳ آورده شده است.



شکل ۴. قطعات کلیدی توربین بادی

کنترل و محدود می‌کند. در مسئله پیش‌رو، به منظور انتخاب محل سکونت از مجموعه محل سکونت‌های موجود، N_{max} از مکان‌های برتر به نسل بعد انتقال پیدا می‌کنند و مابقی به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند.

د) شرط توقف

حلقه جستجو این الگوریتم زمانی متوقف می‌شود که یکی از دو شرط زیر تحقق یابد: (۱) انجام حداکثر I_{max} تکرار (۲) عدم تغییر تابع هدف پس از n تکرار.

۴. ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی

یک مزرعه بادی متشکل از دو نوع توربین را در نظر بگیرید که دارای ظرفیت تولید برابر هستند. فرض می‌شود که از توربین نوع اول و دوم به ترتیب چهار و سه عدد در مزرعه فوق وجود دارد. به منظور ساده‌سازی، در این مطالعه، چهار قطعه مهم و اساسی توربین‌ها که شامل روتور، بلبرینگ اصلی، جعبه دنده و ژنراتور است، در نظر گرفته شده است. شکل شماره (۴) این قطعات اصلی را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

جدول ۲. پارامترهای توزیع زمان خرابی ویبول

توربین	توربین نوع یک	توربین نوع دو
قطعه	پارامتر مقیاس α (روز)	پارامتر شکل β (روز)
روتور	۳۰۰۰	۳
بلبرینگ	۳۷۵۰	۲
جعبه‌دنده	۲۴۰۰	۳
ژنراتور	۳۳۰۰	۲

جدول ۳. هزینه‌های مختلف قطعات یک توربین

قطعه	هزینه تعویض اصلاحی (CF_k)	هزینه متغیر نت پیشگیرانه (CPV_k)	هزینه ثابت نت پیشگیرانه (CPF)	توربین (CA)	هزینه اعزام یک گروه (C_{fix})
روتور	۱۱۲	۲۲۴	۲۸	۵۶	۲۰
بلبرینگ	۶۰	۱۲۰	۱۵	۳۰	۲۰
جعبه‌دنده	۱۵۲	۳۰۴	۳۸	۷۶	۲۰
ژنراتور	۱۰۰	۲۰۰	۲۵	۵۰	۲۰

هزینه‌های در نظر گرفته شده بر اساس ۱,۰۰۰ واحد پولی هستند.

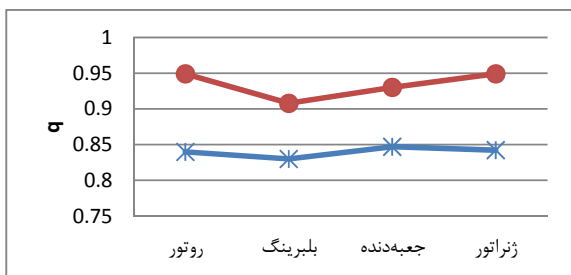
پیشگیرانه گروه‌های نت زمانی صورت می‌گیرد که ریسک خرابی یک قطعه به بیشترین حد خود رسیده باشد. یکی از مهم‌ترین نوآوری‌های این پژوهش، توجه محققان به در نظر گرفتن نوع توربین و نوع قطعات در ارائه و تعریف سیاست نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بوده است. با توجه به متفاوت بودن مشخصات فنی قطعات مختلف دو نوع توربین معرفی شده در مثال مورد بررسی در این بخش، مدل پیشنهادی برای هر یک از انواع قطعات دو نوع توربین حد آستانه متفاوتی را نشان می‌دهد. این موضوع به صورت شفاف در نمودارهای ۵ الی ۱۰ نشان داده شده است. در این نمودارها علامت‌های ستاره و دایره به ترتیب نشان دهنده داده‌های مرتبط با توربین‌های نوع یک و نوع دو می‌باشد. برای مثال در شکل شماره (۵)، با توجه به دو برابر بودن نرخ خرابی توربین‌های نوع اول نسبت به توربین‌های نوع دوم، حد آستانه اعزام پیشگیرانه قطعات توربین نوع یک کمتر از حد آستانه اعزام پیشگیرانه قطعات توربین نوع دو بدست آمده است. به علاوه، با توجه به برابر بودن نرخ خرابی جعبه‌دنده در دو نوع توربین، حد آستانه تعمیرات ناکامل این قطعه زمانی که توربین مورد نظر در حال کار باشد و حدود آستانه تعمیرات ناکامل و کامل این قطعه زمانی که توربین از کار افتاده باشد در نمودارهای (۷)، (۹) و (۱۰) تقریباً با یکدیگر برابر هستند. به طور کلی، تفاوت در مقدار حدود آستانه بدست آمده توسط مدل پیشنهادی نشان دهنده اهمیت در نظر گرفتن نوع توربین و نوع قطعه در تعریف سیاست نگهداری و تعمیرات می‌باشد.

همان‌طور که مشخص است، این هزینه‌ها به نوع قطعه، نوع توربین یا نوع عملیات صورت گرفته وابسته است. برای مثال، هزینه‌های تعویض اصلاحی و هزینه‌های متغیر نت پیشگیرانه وابسته به نوع قطعه و نوع توربین می‌باشد. همچنین فرض شده است که، هزینه‌های ثابت نت پیشگیرانه و هزینه‌های دسترسی به یک توربین، تنها به نوع توربین وابسته است. هزینه‌های اعزام یک گروه نت نیز به ماهیت عملیات صورت گرفته بستگی دارد. برای ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. در این ارزیابی ۵۰۰ بار تکرار یا ۹۰۰۰ روز (بیش از ۲۴ سال) شبیه‌سازی به عنوان شرط توقف در نظر گرفته شده است. در این تحقیق با انجام تحلیل حساسیت، جمعیت اولیه فاخته‌ها برابر ۲۰ در نظر گرفته شده است، به طوری که هر فاخته می‌تواند بین ۲ تا ۵ تخم داشته باشد. جدول ۴ نشان دهنده بهترین سیاست بدست آمده با استفاده از مدل پیشنهادی این مقاله می‌باشد.

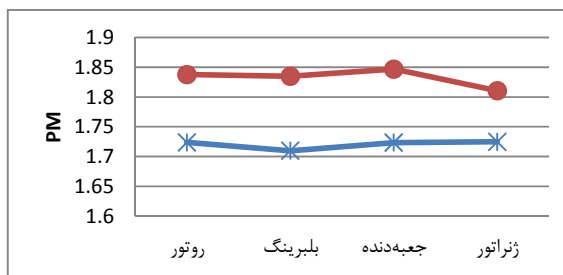
بر اساس جواب بدست آمده، متوسط هزینه‌های نت به ازای یک توربین در روز برابر ۱۶۴ واحد پولی بدست آمده است. نتایج نشان می‌دهند که در رویکرد نت فرصت طلب ارائه شده، اعزام پیشگیرانه گروه زمانی صورت می‌گیرد که به طور متوسط عمر قطعات به ترتیب در توربین‌های نوع یک و دو از ۱/۷۲ و ۱/۸۳ برابر میانگین زمان بین دو خرابی بیشتر باشد. برای مثال، با توجه به اطلاعات مرتبط با بلبرینگ توربین نوع یک در جدول ۴ در صورتی که این قطعه بیشتر از ۱/۷۰ برابر متوسط زمان بین دو خرابی خود عمر کند، باعث اعزام گروه نت خواهد شد. در حقیقت، اعزام

جدول ۴. بهترین سیاست نت فرصت طلب

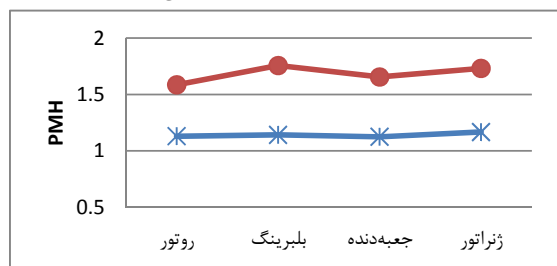
توربین	توربین نوع یک			توربین نوع دو		
	روتور	بلبرینگ	جعبه‌دنده	روتور	بلبرینگ	جعبه‌دنده
<i>q</i>	۰/۸۰	۰/۸۲	۰/۸۴	۰/۹۴	۰/۹۰	۰/۹۳
<i>PM</i>	۱/۷۲	۱/۷۰	۱/۷۲	۱/۸۳	۱/۸۳	۱/۸۴
<i>PMH</i>	۱/۱۳	۱/۱۴	۱/۱۲	۱/۵۸	۱/۷۵	۱/۶۵
<i>PML</i>	۰/۳۴	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۸	۰/۴۰	۰/۳۶
<i>PFH</i>	۱/۳۳	۱/۲۸	۱/۳۳	۱/۲۸	۱/۳۵	۱/۳۵
<i>PFL</i>	۰/۳۱	۰/۳۲	۰/۳۲	۰/۳۴	۰/۳۶	۰/۳۱



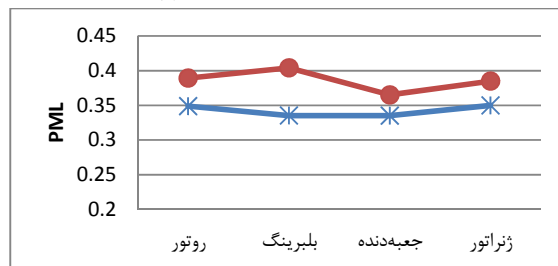
شکل ۶. تغییرات حدود آستانه درصد کاهش عمر تعمیرات



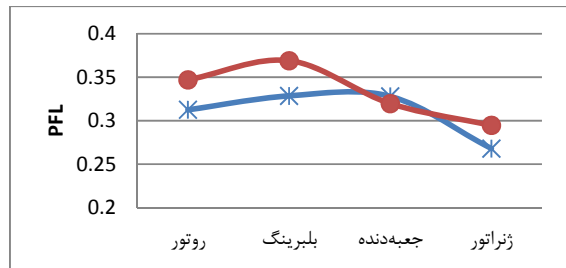
شکل ۵. تغییرات حدود آستانه اعزام پیشگیرانه



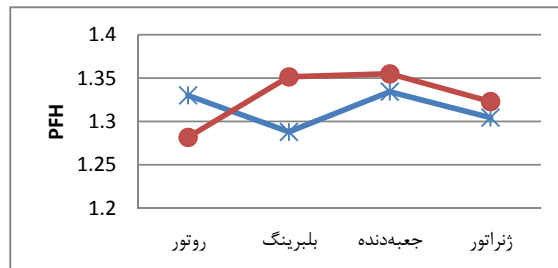
شکل ۸. تغییرات حدود آستانه تعمیرات کامل توربین‌های سالم



شکل ۷. تغییرات حدود آستانه تعمیرات ناکامل توربین‌های سالم



شکل ۱۰. تغییرات حدود آستانه تعمیرات ناکامل توربین‌های از کارافتاده



شکل ۹. تغییرات حدود آستانه تعمیرات کامل توربین‌های از کارافتاده

قطعاتی با عمر بیشتر از ۱/۳۲ درصد از میانگین زمان بین دو خرابی خود، تعویض پیشگیرانه صورت می‌گیرد. متوسط هزینه به ازای یک توربین در روز برابر ۱۹۷ می‌باشد.

سیاست ۳- با اعزام گروه‌های نت، ابتدا تعویض اصلاحی بر روی قطعه یا قطعات از کارافتاده صورت می‌گیرد. بهترین جواب بدست آمده نشان می‌دهد که تعمیرات ناکامل با ۰/۸۲ درصد کاهش عمر بر روی قطعاتی از توربین‌های از کارافتاده صورت می‌گیرد که عمر آن‌ها بین ۰/۳۳ تا ۱/۳۹ درصد از میانگین زمان بین دو خرابی خود باشد و در توربین‌های سالم بین ۰/۳۴ تا ۱/۱۲ درصد باشد. در غیر این صورت، تعویض پیشگیرانه به ترتیب در توربین‌های از کار افتاده و سالم بر روی قطعاتی صورت می‌گیرد که عمر آن‌ها بیشتر از ۱/۳۹ و ۱/۱۲ درصد از میانگین زمان بین دو خرابی خود باشند. متوسط هزینه به ازای یک توربین در روز برابر ۱۷۱ می‌باشد.

مقایسه نتایج به کارگیری سیاست نت فرصت‌طلبانه ارائه شده در این مقاله برای مثال عددی ارائه شده در این بخش با نتایج

به منظور مقایسه عملکرد مدل پیشنهادی با دیگر نتایج حاصل از دیگر سیاست‌های پیشنهاد شده در ادبیات موضوع، سه سیاست نت مبتنی بر اعزام اصلاحی بر اساس مراجع [۱۴، ۱۵] مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. لازم به ذکر است که سیاست‌های پیشنهاد شده توسط مراجع [۱۴، ۱۵] فقط اعزام اصلاحی را در نظر گرفته است، حال آنکه مدل پیشنهادی این مقاله علاوه بر سیاست اصلاحی، سیاست پیشگیرانه را نیز می‌تواند پیشنهاد دهد.

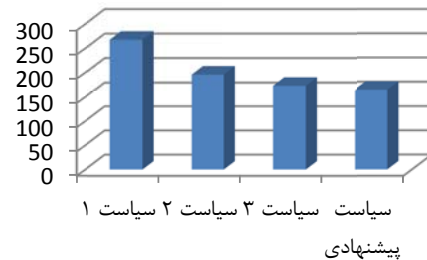
سیاست ۱- با اعزام گروه‌های نت، تنها تعویض اصلاحی بر روی قطعه یا قطعات از کار افتاده صورت می‌گیرد. متوسط هزینه به ازای یک توربین در یک روز برابر ۲۶۸ خواهد بود.

سیاست ۲- با اعزام گروه‌های نت، در بهترین جواب بدست آمده، ابتدا تعویض اصلاحی بر روی قطعه یا قطعات از کارافتاده صورت می‌گیرد. تعمیرات ناکامل با درصد کاهش عمر ۰/۹۷ درصد بر روی تمامی قطعاتی صورت می‌گیرد که عمر آن‌ها بین ۰/۷ و ۱/۳۲ درصد از میانگین زمان بین دو خرابی خود باشد. به علاوه، بر روی

چند در ادبیات موضوع، مدل‌های مختلفی برای نت فرصت طلبانه توربین‌ها در یک مزرعه، توسط محققین ارائه شده است، ولی تنوع توربین‌های موجود در یک مزرعه، و اعزام پیشگیرانه گروه‌های نت، به‌مراه دیگر عوامل موثر، در مدل‌های پیشنهادی، مورد توجه قرار نگرفته است. همان‌طور که در جدول ۵ زیر نشان داده شده است، می‌توان پژوهش‌های موجود را بر اساس چهار شاخص رویکرد اعزام گروه‌های نت، ماهیت فعالیت‌های نت، در نظر گرفتن ماهیت سالم یا از کارافتاده بدون توربین‌ها و همچنین نوع قطعات در ارائه سیاست نگهداری و تعمیرات دسته‌بندی نمود. در عین حال، ستون آخر این جدول، ویژگی‌ها و برتری پژوهش حاضر را در مقایسه با گزارشات موجود در ادبیات نشان می‌دهد.

در این مقاله، یک رویکرد بهینه‌سازی سیاست‌های نت فرصت طلب به منظور بهره‌گیری از فرصت‌های ایجاد شده در انجام فعالیت‌های نت پیشگیرانه ارائه گردید. مدل پیشنهادی این مقاله، توانست با در نظر گرفتن نوع توربین‌های موجود در یک مزرعه، نوع قطعات و ماهیت سالم یا از کارافتاده بودن توربین‌ها، حدود آستانه مختلفی جهت مدیریت فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات کامل و ناکامل تولید نماید. استفاده از الگوریتم فاخته، و نتایج بدست آمده از عملکرد شبیه‌سازی شده مدل پیشنهادی، و نتایج عملکرد مقایسه‌ای این مدل با دیگر مدل‌های موجود در این مقاله نشان داد، که مدل پیشنهادی این مقاله می‌تواند بصورت اثربخشی در نیروگاه‌های بادی برای انجام نت، فرصت طلبانه با قابلیت اطمینان بالایی مورد استفاده قرار گیرد.

حاصل از سیاست‌های شماره ۱، ۲ و ۳ که بر اساس مدل‌های ارائه شده در مراجع [۱۴، ۱۵] طراحی شده‌اند، در نمودار (۱۱) آورده شده است. علاوه وجود دیگر مزیت‌های ذکر شده برای مدل پیشنهادی، این نمودار نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی این مقاله به ترتیب ۳۸، ۱۶ و ۴ درصد کاهش در متوسط هزینه به ازای یک توربین در روز نسبت به سه سیاست شماره ۱، ۲ و ۳ ایجاد کرده است. از این رو صرفه‌جویی قابل توجهی با به کارگیری سیاست نت فرصت‌طلبانه ارائه شده در این مقاله نسبت به مطالعات گذشته ایجاد خواهد شد.



شکل ۱۱. مقایسه چهار سیاست ارائه شده

۵. نتیجه‌گیری

به دلیل افزایش رو به رشد تقاضای انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر در سال‌های اخیر، توجه به استقرار و بهینه‌سازی نت در صنعت نیروگاه‌های بادی بسیار اهمیت دارد. توربین‌های نیروگاه‌های بادی عموماً در مناطق خاص و یا در سایت‌های دریایی استقرار می‌یابند. از این رو، هزینه‌های اعزام یک گروه نت برای توربین‌های بادی بسیار بالا می‌باشد. این مقاله نشان داد که هر

جدول ۵. دسته‌بندی پژوهش‌های نت فرصت طلب در مزارع باد

فاکتور	مرجع [۱۰]	مرجع [۱۱]	مرجع [۱۲]	مرجع [۱۳]	مرجع [۱۴]	مرجع [۱۵]	پژوهش حاضر
مبتنی بر خرابی	■	■	■	■	■	■	■
رویکرد اعزام	■	■	■	■	■	■	■
مبتنی بر شرایط	■	■	■	■	■	■	■
نوع نت	■	■	■	■	■	■	■
کامل	■	■	■	■	■	■	■
ناکامل	■	■	■	■	■	■	■
نوع توربین و قطعه	■	■	■	■	■	■	■
سالم یا از کارافتاده بودن	■	■	■	■	■	■	■

4. Crocker & Kumar
5. Besnard
6. Gustavsson
7. Tian

پی‌نوشت

1. Opportunistic maintenance
2. Proactive maintenance
3. Laggoune

- [11] Besnard F, Patriksson M, Stromberg A, Wojciechowski A, Fischer K, Bertling L. A stochastic model for opportunistic maintenance planning of offshore wind farms. Power Tech, 2011 IEEE Trondheim: IEEE, (2011), pp. 1-8.
- [12] Gustavsson E, Patriksson M, Strömberg AB, Wojciechowski A, Önnheim M. Preventive maintenance scheduling of multi-component systems with interval costs, Computers & Industrial Engineering, (2014).
- [13] Tian Z, Jin T, Wu B, Ding F. Condition based maintenance optimization for wind power generation systems under continuous monitoring, Renewable Energy, Vol. 36, (2011), pp. 1502-1509.
- [14] Ding F, Tian Z. Opportunistic maintenance optimization for wind turbine systems considering imperfect maintenance actions, International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, Vol. 18, (2011), pp. 463-81.
- [15] Ding F, Tian Z. Opportunistic maintenance for wind farms considering multi - level imperfect maintenance thresholds, Renewable Energy, Vol. 45, (2012), pp. 175-82.
- [16] Pidd M. Computer Simulation in Management Science, (1998).
- [17] Rajabioun R. Cuckoo Optimization Algorithm, Applied Soft Computing, Vol. 11, (2011), pp. 5508-18.
8. Ding
9. Failure-based dispatching
10. Mean time to failure
11. Habitat
- مراجع**
- [1] Andrawus JA, Watson J, Kishk M, Adam A. The selection of a suitable maintenance strategy for wind turbines, Wind Engineering, Vol. 30, (2006), pp. 471-86.
- [2] Martinot E. Renewables. Global Status Report: Worldwatch Institute Washington, DC, (2011).
- [3] Hau E, Von Renouard H. Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics, Springer, (2013).
- [4] Shahanaghi K, Babaei H, Bakhsha A. A chance constrained model for a two units series critical system suffering from continuous deterioration, International Journal of Industrial Engineering & Production Research, Vol. 20, (2009), pp. 69-75.
- [5] Arabi AY, Jahromi AE, Shabannataj M. Developing a new model for availability optimization applied to a series-parallel system, International Journal of Industrial Engineering, Vol. 24, (2013), pp. 101-106.
- [6] Barzegar A, Shahanaghi K, Aryanezhad M. Maintenance strategy selection by risk based inspection approach, International Journal of Industrial Engineering & Production Management, Vol. 22, (2011), pp. 193-204.
- [7] Hassan G. Concerted Action on Offshore Wind Energy in Europe: Delft University Wind Energy Research Institute, (2011).
- [8] Laggoune R, Chateaneuf A, Aissani D. Opportunistic policy for optimal preventive maintenance of a multi-component system in continuous operating units, Computers & Chemical Engineering, (2009), Vol. 33, pp. 1499-510.
- [9] Crocker J, Kumar UD. Age-related maintenance versus reliability centred maintenance: a case study on aero-engines, Reliability Engineering & System Safety, Vol. 67, (2000), pp. 113-8.
- [10] Besnard F, Patriksson M, Stromberg AB, Wojciechowski A, Bertling L. An optimization framework for opportunistic maintenance of offshore wind power system, Power Tech 2009 IEEE Bucharest, (2009), pp. 1-7.