

Identifying Significant Health Measurement of Equipment Affecting the Quality of a Continuous Product (Case Study: Unit 2, Parand Gas Turbine Power Plant)

Amir Heydari

Msc., Department of Industrial Engineering and Management Systems, Amir Kabir University of Technology, Tehran, Iran, E-mail: amir.heydari@aut.ac.ir

Seyed Hamidreza Shahabi Haghghi

*Corresponding author, Assistant Prof., Department of Industrial Engineering and Management Systems, Amir Kabir University of Technology, Tehran, Iran, E-mail: shahabi@aut.ac.ir

Abbas Ahmadi

Assistant Prof., Department of Industrial Engineering and Management Systems, Amir Kabir University of Technology, Tehran, Iran, E-mail: abbas.ahmadi@aut.ac.ir

Abstract

Objective: Major producers consider quality as a major criterion in decision making. Quality characteristics are affected by maintenance and repair decisions. In this study, a model is developed to determine significant measurements of production equipment affecting the quality of a continuous product to identify which measurements are more critical in terms of quality.

Methods: Diversity of parameters affecting the quality and the delay until effects on quality come into view, are the main aspects of the issue. Genetic algorithm with a fitness function including prediction accuracy, convergence rate, and number of measurements is developed to obtain optimum set of measurements. Artificial neural networks are also used to evaluate the reliability and validity of the solutions.

Results: The proposed model was applied and evaluated by a case study in unit 2, Parand Gas Turbine Power Plant. The results demonstrated the optimum set of measurements which are significantly related to quality characteristic. In addition, the available data demonstrating that the terminal equipment in production process has more significant effects on quality.

Conclusion: The proposed model enjoys the capability of identifying the most important health measurements affecting the output quality of a continuous product in some limited steps of optimization algorithm by processing the history data from Condition Monitoring Process. With these significant measurements available, the decision makings in maintenance and repair can happen on the grounds of quality.

Keywords: Genetic algorithm, Condition monitoring, Health measurement, Identification, Quality characteristic.

Citation: Heydari, A., Shahabi Haghghi, S.H., Ahmadi, A. (2018). Identifying Significant Health Measurement of Equipment Affecting the Quality of a Continuous Product (Case Study: Unit 2, Parand Gas Turbine Power Plant). *Industrial Management Journal*, 10(3), 455-480. (in Persian)

Industrial Management Journal, 2018, Vol. 10, No.3, pp. 455-480

DOI: 10.22059/imj.2018.127321.1006879

Received: July 01, 2015; Accepted: March 08, 2018

© Faculty of Management, University of Tehran

شناسایی شاخص‌های سلامت تجهیزات، مؤثر بر کیفیت یک محصول پیوسته (مطالعه موردی: فرایند تولید برق واحد دو نیروگاه گازی پرند)

امیرحیدری

کارشناس ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌های مدیریت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران. رایانامه: amir.heydari@aut.ac.ir

سید حمیدرضا شهبابی حقیقی

* نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌های مدیریت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران. رایانامه: shahabi@aut.ac.ir

عباس احمدی

استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌های مدیریت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران. رایانامه: abbas.ahmadi@aut.ac.ir

چکیده

هدف: تولیدکنندگان برتر، کیفیت را معیاری اصلی در تصمیم‌گیری می‌دانند. در این بین مشخصه‌های کیفیتی تحت تأثیر تصمیم‌های نگهداری و تعمیرات قرار می‌گیرند. به بیان دیگر یکی از راه‌های کنترل کیفیت محصول بررسی شاخص‌های خروجی تجهیزات است. به همین دلیل در این مقاله مدلی برای تحلیل شاخص‌های اصلی دریافتی از تجهیزات تولیدی برای شناسایی شاخص‌های مؤثرتر بر کیفیت یک محصول پیوسته توسعه می‌یابد.

روش: تنوع پارامترهای مؤثر بر کیفیت و تأخیر زمانی تا بروز تأثیرات در کیفیت، دو جنبه عمده مسئله هستند. در این مقاله روشی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک همراه با تابع برازندگی شامل معیارهای دقت تخمین، سرعت همگرایی و تعداد شاخص‌ها برای شناسایی ترکیب بهینه شاخص‌ها توسعه یافته است و از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای ارزیابی میزان برازندگی پاسخ‌ها استفاده می‌شود.

یافته‌ها: مدل نهایی، در رابطه با واحد دو نیروگاه گازی پرند ارزیابی و استفاده شد. استفاده از این مدل موجب شد، مجموعه بهینه معیارهای مؤثر بر مشخصه کیفیت در نیروگاه مشخص شود. در این مورد مطالعاتی و بر اساس داده‌های در اختیار، نتایج نشان می‌دهد تجهیزات انتهایی فرایند تولید، تأثیر معنادارتری بر مشخصه کیفیتی دارند.

نتیجه‌گیری: مدل توسعه‌یافته می‌تواند در قدم‌های معین و با در دست بودن داده‌های حاصل از فرایند پایش وضعیت تجهیزات فرایند تولید شود. همچنین اطلاعات وضعیت مشخصه کیفیتی، برای یک محصول پیوسته تعیین کند کدام یک از شاخص‌های سلامت تجهیزات فرایند تولید، تأثیر بیشتری بر کیفیت خروجی دارند و لازم است در تصمیم‌گیری‌های نگهداری و تعمیرات، به آن بیشتر توجه شود.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم ژنتیک، پایش وضعیت، شاخص سلامت، شناسایی، مشخصه کیفیتی.

استناد: حیدری، امیر؛ شهبابی حقیقی، سید حمیدرضا؛ احمدی، عباس (۱۳۹۷). شناسایی شاخص‌های سلامت تجهیزات، مؤثر بر کیفیت یک محصول پیوسته (مطالعه موردی: فرایند تولید برق واحد دو نیروگاه گازی پرند). *فصلنامه مدیریت صنعتی*، ۱۰(۳)، ۴۵۵-۴۸۰.

فصلنامه مدیریت صنعتی، ۱۳۹۷، دوره ۱۰، شماره ۳، صص. ۴۵۵-۴۸۰

DOI: 10.22059/imj.2018.127321.1006879

دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۱۰، پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۱۷

© دانشکده مدیریت دانشگاه تهران

مقدمه

امروزه تنها تولید به موقع محصولات و عرضه آنها به بازار به منظور حفظ و رشد سهم تولیدکننده از سودآوری آن بازار، کافی نیست. رشد آگاهی مصرف‌کنندگان، توقعات آنها را از کیفیت محصولات افزایش می‌دهد (مونتگومری^۱، ۲۰۰۹). در این میان کارکرد تجهیزات فرایند تولید به عنوان عاملان اصلی تولید، بر تولید به موقع و باکیفیت محصول تأثیرگذارند. سلامتی کارکرد تجهیزات تولید موضوع نگهداری و تعمیرات است (آریش، سینر و واگنکناخت، ۲۰۰۶) و پایش شاخص‌های سلامت تجهیزات بیشتر با هدف در دسترس نگاه داشتن آنها برای تولید به موقع و چابکی نگهداری و تعمیرات صورت می‌گیرد (آقایی، آقایی و ناجی‌زاده، ۱۳۹۴). روش‌ها و مدل‌هایی که برای تصمیم‌گیری در نگهداری و تعمیرات تجهیزات توسعه یافته‌اند، به معیار کیفیت محصولات کمتر توجه کرده‌اند (احمد و کمارالدین^۳، ۲۰۱۲). انتخاب روش‌های نگهداری و تعمیرات توسعه یافته، در زمان‌های اخیر مبتنی بر نیازهای عملیاتی و فاکتورهای هزینه‌ای تولید بوده است (بایدیا، دی، قوش و پتریدیس^۴، ۲۰۱۸). توجه به مقوله کیفیت در نگهداری و تعمیرات به معنای ایجاد تعامل بین دو حوزه اساسی تولید یعنی نگهداری و تعمیرات و مدیریت کیفیت است. این تحقیق شناسایی شاخص‌های سلامت تجهیزات که بر کیفیت محصول نهایی تأثیرگذارند را به عنوان راهی کارآمد برای ایجاد ارتباط بین دو حوزه نگهداری و مدیریت کیفیت پیشنهاد می‌دهد. عملکرد ضعیف یک تجهیز بدون آنکه از کار بیفتد، ممکن است کیفیت محصول را تحت تأثیر قرار دهد. آرانراج و مایتی^۵ (۲۰۰۷) و آریش و همکاران (۲۰۰۶) از جمله محققانی هستند که بر ارتباط نزدیک شرایط کارکردی تجهیزات تولید و کیفیت محصولات تأکید کرده‌اند.

نگهداری وابسته به شرایط^۶، که با نام نگهداری «پیش‌بینانه»^۷ نیز شناخته می‌شود، به عنوان یکی از مدرن‌ترین رویکردهای نگهداری پیشگیرانه شناخته شده (احمد و کمارالدین، ۲۰۱۲) و می‌تواند به عنوان پلی کارآمد برای ارتباط با کیفیت محصول استفاده شود. فرایند پایش وضعیت^۸ که قلب نگهداری وابسته به شرایط است، وضعیت سلامت تجهیزات را به کمک ابزارآلات پایش، تعیین می‌کند. اطلاعات وضعیت سلامت تجهیزات به کمک مدلی، به معیار تصمیم‌گیری ارتباط می‌یابد و ارزش آن معیار را تعیین می‌کند. این معیار می‌تواند بر قابلیت اطمینان تجهیز یا نحوه تأثیر بر کیفیت محصول فرایند ناظر باشد، هرچند به میزان کافی به معیار کیفیت محصول خروجی پرداخته نشده است.

در این مقاله، برای ارتباط داده‌های فرایند پایش وضعیت به کیفیت محصول خروجی، در چارچوب فرایند تصمیم‌گیری در نگهداری پیش‌بینانه، مدلی ارائه می‌شود. در مدل پیشنهادی یک مشخصه کیفیتی از محصول خروجی، به عنوان معیار کیفیتی تصمیم‌های در نظر گرفته شده است. مدل پیشنهادی مؤثرترین گروه شاخص‌های سلامت در ارتباط با متغیر مشخصه کیفیتی را تعیین می‌کند. تأثیر سایر پارامترهای فرایند تولید به جز شاخص‌های سلامت بر مشخصه کیفیتی، همچنین حقیقت تأخیر زمانی در بروز تأثیرات پارامترهای فرایند بر مشخصه کیفیتی، از مهم‌ترین ابعاد این مسئله هستند. نحوه به کارگیری و ارزیابی مدل پیشنهادی، به کمک داده‌های واقعی از واحد دو نیروگاه گازی پرنده، صورت پذیرفته است. ادامه این گزارش به این صورت سازمان یافته است؛ در بخش بعد، اجزای مختلف مدل پیشنهادی تشریح می‌شود. سپس به کارگیری و ارزیابی

1. Montgomery
2. Aurich, Siener & Wagenknecht
3. Ahmad & Kamaruddin
4. Baidya, Dey, Ghosh & Petridis

5. Arunraj & Maiti
6. Condition Based Maintenance
7. Predictive
8. Condition Monitoring

مدل در شرایط تجربی و واقعی در دستور کار قرار می‌گیرد. در نهایت، در بخش آخر، بحث و جمع‌بندی گزارش تفصیلی داده شده است.

پیشینه پژوهش

شناسایی شاخص‌های سلامت تجهیزات که بر کیفیت محصول نهایی تأثیر گذارند موضوعی است که می‌تواند به صورت جداگانه در حوزه ادبیاتی نگهداری و تعمیرات به عنوان یک مسئله تصمیم‌گیری و همچنین در حوزه مدیریت کیفیت بررسی شود. به منظور دستیابی به درک صحیحی از ادبیات موضوع و شکاف تحقیقاتی که انجام این پژوهش را ضروری می‌کند، رویکردی تحلیلی و قدم به قدم در مرور ادبیات اتخاذ می‌شود. ابتدا شاخص‌های سلامت تجهیزات به عنوان بخشی از پارامترهای فرایند تولید که بر کیفیت محصول تأثیر گذارند، در ادبیات تحقیق بررسی می‌شوند. سپس به بررسی بخشی از ادبیات پرداخته می‌شود که به طور خاص بر تأثیر شاخص‌های سلامت تجهیزات بر کیفیت محصول نهایی می‌پردازند. حقیقت ارتباط شاخص‌های سلامت تجهیزات که موضوع نگهداری و تعمیرات است بر کیفیت محصول که موضوع مدیریت کیفیت است، سبب می‌شود مسئله نحوه تأثیرگذاری شاخص‌های سلامت بر کیفیت، در نگاهی جزء به کل، به عنوان بخشی از مسئله نحوه تعامل دو حوزه نگهداری و تعمیرات و مدیریت یا کنترل کیفیت با یکدیگر قرار بگیرند. از این رو در ادبیات بر نحوه مواجهه محققان با این مسئله مرور کلی‌تری شده و بررسی خواهد شد که نگهداری وابسته به شرایط به عنوان رویکردی مدرن در حوزه نگهداری پیش‌بینانه، به حوزه مدیریت کیفیت ورود بهتری داشته است. نگهداری وابسته به شرایط به پایش سلامت تجهیزات می‌پردازد و از طریق ایجاد تعامل بین شاخص‌های سلامت تجهیزات و کیفیت محصول نهایی، می‌تواند تعامل بین حوزه نگهداری و کیفیت را شکل دهد. در نهایت با نزدیک شدن به پیشینه پژوهش محدود به مدل پیشنهادی، شکاف‌های موجود در روش‌های قبلی تشریح می‌شود.

کیفیت محصول و پارامترهای فرایند تولید

لازم است عوامل مختلف که در تعامل با موضوع کیفیت محصول قرار دارند، به دقت بررسی شوند. کیفیت محصول خروجی یک فرایند تولید، تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار می‌گیرد که اصطلاحاً «پارامترهای فرایند» نامیده می‌شوند. برخی از این پارامترها عبارت‌اند از (مونتگومری، ۲۰۰۹): ۱. جنس، کیفیت و وضعیت مواد خام ورودی، ۲. مهارت و وضعیت نیروی انسانی، ۳. شیوه تولید و توالی عملیات، ۴. تنظیمات ابزار (سرعت خوراک، زاویه برش، نرخ هوادهی و ...)، ۵. شرایط محیطی کار، ۶. انرژی، ۷. نوع تجهیزات و ابزارهای مورد استفاده و ۸. وضعیت کارکردی تجهیزات و نگهداری و تعمیرات. پایش عوامل ذکر شده و نحوه تأثیر آنها بر فرایند تولید، موضوع «کنترل یا پایش فرایند» است که در برخی از منابع به عنوان «مهندسی فرایند» نیز شناخته می‌شود (ونکاتاسوبرامانیان، رنگاسوامی، کاووری و بین، ۲۰۰۳). پایش پارامترهای فرایند تولید با اهدافی چون کارا نگاه‌داری فرایند، کاهش هزینه‌های مصرفی، بهینه نگاه داشتن عملیات، عیب‌یابی و رفع عیب و همچنین کنترل کیفیت خروجی فرایند صورت می‌گیرد. پیرامون مهندسی فرایند در مقاله ونکاتاسوبرامانیان و

همکاران (۲۰۰۳) مرور جامعی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مهندسی یا کنترل فرایند، به نحوه عملکرد تجهیزات فرایند به‌عنوان یکی از عوامل و در کنار سایرین اشاره شده و نحوه تأثیر کارکرد آنها بر متغیرهای مهم فرایند از جمله کیفیت محصول خروجی بررسی می‌شود. هرچند با مطالعه پژوهش‌های صورت‌گرفته در زمینه کنترل فرایند در راستای بهبود کیفیت محصول، به موضوع شرایط کارکردی تجهیزات به‌عنوان عناصر تولید، توجه غیرتخصصی و کمتری شده است، اما رابطه بین پارامترهای فرایند تولید مانند سرعت تغذیه تجهیز، سرعت برش، زوایا و ...، حجم زیادی از مطالعات در ادبیات بهبود و کنترل کیفیت را به خود اختصاص داده‌اند. این در حالی است که شرایط کارکردی عناصر فرایند تولید مانند مؤلفه‌های تجهیزات و ابزارآلات به‌طور قابل توجهی در کنار سایر پارامترهای فرایند بر شرایط کلی تولید و در نهایت مشخصه کیفی محصول تأثیرگذار هستند. از طرفی دیگر، شرایط کارکردی و سلامتی تجهیزات تولید موضوع نگهداری و تعمیرات است. این عبارات استنتاج‌کننده رابطه نزدیک رویکردهای نگهداری و تعمیرات و مدیریت کیفیت هستند، رابطه‌ای که بن‌دایا و دوفوا^۱ (۱۹۹۵) از آن به عنوان حلقه گم‌شده یاد می‌کنند.

مسئله کیفیت - نگهداری بخشی از یک مسئله بزرگ‌تر

بسیاری از محققان این مسئله (توجه به کیفیت و نگهداری به‌صورت همزمان) را بخشی از مسئله بزرگ‌تر می‌دانند. وارد کردن تأثیرات متقابل برنامه‌ریزی در هر یک از عناصر اصلی مسائل کارگاهی، یعنی تولید، نگهداری و کیفیت مسئله‌ای است که به‌جز در سال‌های اخیر، توجه کمتری به آن شده است. آنها یکپارچگی میان تصمیم‌های تولید - نگهداری، تولید - کیفیت، کیفیت - نگهداری و تولید - نگهداری - کیفیت را موضوع مهمی ارزیابی می‌کنند که نسبت کمتری از مطالعات را به خود اختصاص داده‌اند. بن‌دایا و رحیم^۲ (۲۰۰۰)، بودای، دکر و نیکولی^۳ (۲۰۰۸)، پندی و کولکرنی و رات^۴ (۲۰۱۰) و حدیدی، التُرکی و رحیم^۵ (۲۰۱۱) مطالعاتی مروری بر این موضوع ارائه داده‌اند و تلاش‌های صورت‌گرفته در موضوع ادغام مسائل تولید، نگهداری و کیفیت را بررسی کرده‌اند.

مطالعات پیرامون مسئله کیفیت - نگهداری در ادبیات تحقیق که بیشتر از جنبه کارگاهی^۶ به آن پرداخته شده است، پیرامون این محورها صورت گرفته است (حدیدی و همکاران، ۲۰۱۱):

۱. طراحی اقتصادی نمودار کنترل کیفیت با در نظرگیری جنبه‌های نگهداری و بهینه‌سازی سیاست‌ها
۲. تصمیم‌سازی‌های نگهداری با در نظرگیری جنبه‌های کیفیتی

در این ادبیات منظور از سیاست و تصمیم در نگهداری تعیین نوع نگهداری شامل جایگزینی یا تعمیر در کنار زمان نگهداری است. رحیم^۷ (۱۹۹۳) به‌طور همزمان طراحی بهینه پارامترهای یک نمودار کنترل \bar{X} و زمان نگهداری پیشگیرانه را برای یک فرایند تولید با نرخ شکست افزایشی در نظر گرفت. بن‌دایا^۸ (۱۹۹۹)، بن‌دایا و رحیم (۲۰۰۰) و رحیم (۱۹۹۴) با فرض افت وضعیت فرایند تولید در شرایط تحت کنترل و پیروی آن از یک توزیع احتمالی با نرخ خرابی افزایشی، ادغام نگهداری پیشگیرانه و نمودار \bar{X} را بررسی کردند. کاسدی، بودن، لیو و پول^۹ (۲۰۰۰) نمودار \bar{X} را در تعامل با سیاست

1. Ben-Daya & Duffuaa
2. Ben-Daya & Rahim
3. Budai, Dekker & Nicolai
4. Pandey, Kulkarni & Vrat
5. Hadidi, Al-Turki & Rahim

6. Workshop
7. Rahim
8. Ben-Daya
9. Cassady, Bowden, Liew & Pohl

نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر جایگزینی تجهیز مطالعه کردند. رازوی، رزگ و چلبی^۱ (۲۰۰۹) نمودار کنترل و سیاست نگهداری پیشگیرانه‌ای را برای یک سیستم تولید همراه با شکست تصادفی که در حال تولید واحدهای منطبق و غیرمنطبق است توسعه دادند. پاناگیوتیدو و تاگراس^۲ (۲۰۰۷) برای بهینه‌سازی نگهداری پیشگیرانه در یک فرایند تولید و با دو حالت کیفیتی (تحت کنترل و خارج از کنترل) مدلی اقتصادی را تحلیل کردند. آنها یک سال بعد مدل بهینه‌سازی سیاست نگهداری از میان نگهداری‌های کامل و غیرکامل را برای فرایند تولید با دو حالت کیفیتی (تحت کنترل و خارج از کنترل) توسعه دادند (پاناگیوتیدو و تاگراس، ۲۰۰۸). پاناگیوتیدو و ننس^۳ (۲۰۰۹) برای رویه‌های کیفیتی و نگهداری با استفاده از نمودار کنترل شوهارت برای متغیرها، مدلی پیشنهاد دادند. مهدی، نیژال و انیس^۴ (۲۰۱۰) برای سیستم تولیدی با واحدهای منطبق و غیرمنطبق، سیاست نگهداری هماهنگ با نمودار کنترل ارائه دادند.

لزوم ورود نگهداری وابسته به شرایط در مسئله کیفیت - نگهداری

من، ساکسنا و ناپ^۵ (۱۹۹۵) روش‌های توسعه‌یافته در نگهداری پیشگیرانه را به دو دسته آماری^۶ و وابسته به شرایط^۷ طبقه‌بندی می‌کنند. روش‌های دسته آماری بر پایه تحلیل اطمینان و آمار شکست تجهیزات قرار می‌گیرند. در صورتی که روش‌های دسته دوم بر اساس پایش وضعیت تجهیز و به کمک فناوری انواع حسگرها تشکیل می‌شوند. آنها اثبات می‌کنند، زمانی که نرخ خرابی و افت سلامتی تجهیزات افزایش می‌یابد، روش‌های نگهداری پیشگیرانه موجود در دسته نخست با کاهش کارایی مواجه می‌شوند. در حالی که چنین وضعیتی برای روش‌های دسته دوم رخ نمی‌دهد.

مدل‌های مرور شده درباره مسئله کیفیت - نگهداری اغلب در دسته روش‌های آماری نگهداری پیشگیرانه قرار می‌گیرند. به نظر می‌رسد با رشد هر روزه فناوری در ارائه تجهیزات آلات پایش وضعیت تجهیزات و با توجه به کاستی‌های رویکردهای دسته نخست، نگهداری وابسته به شرایط رویکرد غالب واحدهای صنعتی مختلف قرار گیرد و با توجه به اهمیت مسائل کیفیت - نگهداری، مدل‌های بیشتری در زمینه نگهداری وابسته به شرایط با رویکرد کیفیتی ضرورت یابد.

ادبیات محدود موجود در زمینه نگهداری وابسته به شرایط و کیفیت، تمرکز اصلی را بر طراحی بهینه نمودار شوهارت به کمک داده‌های حاصل از فرایند پایش وضعیت قرار می‌دهد. در واقع نمودار کنترل به‌عنوان ابزاری برای مشاهده نتایج حاصل از انجام نگهداری وابسته به شرایط و تصمیم برای انجام اقدامات لازم دیگر، استفاده می‌شود (لیو، یو، ما و تو^۸، ۲۰۱۳). نمودارهای کیفیت چندبعدی که مشخصه کیفیتی را به تعداد محدودی از پارامترهای فرایند مرتبط می‌سازد، راه ورود نگهداری وابسته به شرایط را به مسائل کنترل کیفیت باز می‌کند. ینگ، کاسدی و اشنایدر^۹ (۲۰۰۷) از یک نمودار کنترل \bar{X} برای پایش خروجی سیستم برای انجام نگهداری اصلاحی یا پیش‌بینانه استفاده کردند. وو^{۱۰} (۲۰۰۶) و لیو^{۱۱} (۲۰۰۶) یک حالت شکست قابل رؤیت^{۱۲} را به ترتیب در طراحی اقتصادی نمودار کنترل چندبعدی مربع کای و نمودار کنترل چندبعدی میانگین متحرک موزون نمایی متناسب با نگهداری وابسته به شرایط، در نظر گرفتند. وو و ماکیس^{۱۳} (۲۰۰۸)

1. Radhoui, Rezg & Chelbi

2. Panagiotidou & Tagaras

3. Panagiotidou & Nenes

4. Mehdi, Nidhal & Anis

5. Mann, Saxena & Knapp

6. Statistical-Based Preventive Maintenance

7. Condition-Based Preventive Maintenance

8. Liu, Yu, Ma & Tu

9. Yeung, Cassady & Schneider

10. Wu

11. Liu

12. Observable failure state

13. Wu & Makis

برای نگهداری وابسته به شرایط، نمودار کنترل کای مربع طراحی کردند. یین و ماکیس^۱ (۲۰۱۰) مسئله طراحی اقتصادی و اقتصادی - آماری نمودار چندبعدی کنترل بی‌زی^۲ را در نگهداری وابسته به شرایط بررسی می‌کنند. آنها برای یک مدل سه‌حالتی از نگهداری وابسته به شرایط به کمک مدل‌های بهینه‌سازی، نمودار بهینه کنترل بی‌زی را به دست آوردند و نتیجه‌گیری کردند که نمودار کنترل چندبعدی بی‌زی، برای نگهداری وابسته به شرایط، بهتر از نمودار کای مربع توسعه‌یافته عمل می‌کند. وانگ^۳ (۲۰۱۲) بر اساس شبیه‌سازی برای نگهداری وابسته به شرایط، یک نمودار کنترل چندبعدی بی‌زی طراحی کرد. پژوهش‌های اشاره‌شده فقط سیستم‌ها و فرایندهای تک‌واحد (تجهیز) را بررسی کرده‌اند. لیو و همکاران (۲۰۱۳) مسئله طراحی نمودار کنترل \bar{X} را برای یک سیستم با دو واحد یکسان همراه با نگهداری وابسته به شرایط مطرح کردند.

در ادبیات توسعه‌یافته برای مسئله کیفیت - نگهداری در حیطه نگهداری وابسته به شرایط، همان‌طور که از مرور پژوهش‌های بالا مشخص می‌شود، از ابزار نمودار کیفیت برای پایش وضعیت سیستم استفاده شده است. این نوع برخورد ماهیتی انتها به ابتدا دارد و در عمل خروجی فرایند تولید (انتهای خط) تعیین‌کننده وضعیت فرایند تولید (میانه تا ابتدای خط) است. در مورد این وضعیت ذکر چند نکته ضروری است:

۱. انحرافات مشاهده‌شده در مشخصه کیفیتی فقط مربوط به وضعیت کارکردی تجهیزات نیست و سایر پارامترهای فرایند نیز در آن تأثیرگذارند. این عامل هم در دقت طراحی نمودارها تأثیرگذار بوده و هم در فرایند تصمیم‌گیری نگهداری وابسته به شرایط مؤثر است.

۲. استفاده از نمودار کنترل (حتی به‌طور خاص طراحی‌شده برای نگهداری وابسته به شرایط) در راستای تصمیم‌گیری برای نگهداری وابسته به شرایط، ماهیت تأخیر زمانی اثر پارامترهای فرایند را در نظر نمی‌گیرد. این موضوع احتمال تشخیص‌های اشتباه را افزایش می‌دهد.

۳. این نوع مدل کردن مسئله نگهداری - کیفیت با ماهیت فرایندی تولید که متشکل از ایستگاه‌ها و تجهیزات متعدد تولید است، دارای عدم توافق است. زیرا اکثر مدل‌ها بیانگر رفتار فرایندی، تک‌واحد هستند و برای افزایش مؤلفه‌های فرایند به افزایش فرض‌های غیرواقعی نیاز دارند.

۴. نمودارهای کنترل، وضعیت فرایند را در فواصل زمانی معین نشان می‌دهند و مانند بسیاری از روش‌های کنترل فرایند آماری اقدامات اصلاحی را پس از وقوع آن آغاز می‌کنند. این موضوع به کاهش کیفیت بخشی از محصولات فرایند منجر می‌شود. مسئله پیش‌بینی مشخصه کیفی در فواصل قابل قبول از نظر عملیاتی، مطرح نشده است.

۵. تعامل پارامترهای مختلف فرایند، خطا در اندازه‌گیری و از دست رفتن بخشی از اطلاعات فرایند می‌توانند دقت تصمیم‌های نگهداری پیش‌بینانه را در این گونه مدل‌ها کاهش دهند.

ژانگ، دنگ، ژو و یین^۴ (۲۰۱۵) در پژوهشی، موضوع تأخیر زمانی در مسئله کیفیت - نگهداری و در نگهداری وابسته به شرایط را بررسی کرده‌اند. آنان سیاستی را پیشنهاد دادند که اجازه تأخیری مشخص را پس از دریافت یک هشدار توسط نمودار کنترل کیفیت برای انجام عملیات نگهداری، می‌دهد. بوزلا، غربی و پلرین^۵ (۲۰۱۶) مسئله کنترل کیفیت، نگهداری

1. Yin & Makis
2. Bayesian control chart
3. Wang

4. Zhang, Deng, Zhu & Yin
5. Bouslah, Gharbi & Pellerin

پیشگیرانه و تولید را به صورت مسئله‌ای واحد برای یک سیستم تولید تصادفی^۱ مخاطب قرار دادند. در این تحقیق نحوه تأثیر سلامت تجهیزات بر مشخصه کیفیت نهایی بررسی نشده است. بلکه هدف بهینه‌سازی همزمان اندازه انباشته تولید^۲، محدوده‌های موجودی^۳ و پارامترهای طرح نمونه‌برداری از انباشته است.

آریش و همکاران (۲۰۰۶) مسئله پیش‌بینی مستقیم مشخصه کیفی را از وضعیت کارکردی تجهیزات تولید به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی مطرح کردند. هرچند ایشان برای محاسبه شرایط کارکردی تجهیزات (استفاده از زمان‌بندی عملیات نگهداری به‌جای استفاده از فرایند پایش وضعیت) از روشی غیرمستقیم استفاده کردند، اما از معدود تلاش‌هایی است که سعی بر ایجاد رابطه مستقیم میان متغیرهای بیانگر سلامت تجهیز و مشخصه‌های کیفی دارد. برای ایجاد ارتباط بین این دو متغیر، به‌دلیل ناشناخته بودن و پیچیدگی، از شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده می‌شود. ورودی این مدل مدت زمان سپری‌شده از انواع فعالیت‌های نگهداری تجهیز، تحت فرایندهای تولیدی با بار کاری مختلف توصیف می‌شود. بدین ترتیب تعداد این ورودی‌ها با افزایش تعداد ماشین‌آلات بسیار زیاد می‌شود. با توجه به تعریفی که از شرایط تجهیزات صورت گرفت، در این مطالعه شرایط را می‌توان از برنامه تولیدی پیش‌بینی کرد.

جدول ۱ ادبیات مرور شده مربوط به حوزه کیفیت - نگهداری وابسته به شرایط را خلاصه می‌کند.

جدول ۱. خلاصه ادبیات توسعه یافته در حوزه کیفیت نگهداری با رویکرد نگهداری وابسته به شرایط

نویسندگان	موضوع توسعه	روش عمل
وو ^۴ (۲۰۰۶) و لیو (۲۰۰۶)	طراحی اقتصادی نمودار کنترل چند بعدی کای مربع و میانگین متحرک موزون	استفاده از داده‌های حاصل از پایش وضعیت فرایند برای تنظیم پارامترهای نمودار کنترل
پینگ و همکاران (۲۰۰۷)	طراحی نمودار کنترل میانگین معمولی	استفاده از نمودار کنترل به‌عنوان ابزار پایش و اقدام به نگهداری پیش‌بینانه
وو ^۵ و ماکیس (۲۰۰۸)	طراحی نمودار کنترل کای مربع	این نمودار متناسب با نگهداری وابسته به شرایط طراحی شده است.
یین و ماکیس (۲۰۱۱)	طراحی نمودار کنترل چندبعدی بی‌زی	طراحی اقتصادی و اقتصادی - آماری این نمودار برای یک مدل سه‌حالتی و با فرض وجود فرایند پایش وضعیت
وانگ (۲۰۱۲)	طراحی نمودار کنترل چندبعدی بی‌زی	روش طراحی به کمک شبیه‌سازی فرایند صورت گرفته و ابزاری در اختیار نگهداری وابسته به شرایط در سیستم‌های پیچیده قرار می‌دهد.
لیو و همکاران (۲۰۱۳)	طراحی نمودار کنترل میانگین معمولی	با در نظرگیری مقتضیات نگهداری وابسته به شرایط، برای نخستین بار دو واحد یکسان بررسی شد.
ژانگ و همکاران (۲۰۱۴)	ورود موضوع تأخیر زمانی در مسئله کیفیت - نگهداری	سیاستی ارائه شد که اجازه تأخیری مشخص را پس از دریافت یک هشدار توسط نمودار کنترل کیفیت برای انجام عملیات نگهداری، می‌دهد.
بوزلا و همکاران (۲۰۱۶)	در نظرگیری همزمان مسئله کیفیت، تولید و نگهداری	بهینه‌سازی همزمان اندازه انباشته تولید، محدوده‌های موجودی و پارامترهای طرح نمونه‌برداری از انباشته در یک فرایند تولید تصادفی صورت گرفته است.

در نگاهی وسیع‌تر به مسئله نگهداری - کیفیت، برخی تلاش‌ها در تحقیقات اخیر با هدف ارتقای کیفیت، به دنبال یافتن شاخص‌هایی بهینه در سازمان یا بخش تولید که تأثیرگذاری بیشتری بر کیفیت دارند، بوده‌اند. به‌طور مثال صفری، صادقی مقدم و عبادی ضیایی (۱۳۹۵) در تحقیقی توسعه‌ای و کاربردی و از طریق توزیع پرسشنامه، روابط علی و معلولی میان معیارهای مدل EFQM را به‌عنوان مشخصه تعالی کیفی سازمان، بررسی کردند. همچنین می‌توان گفت در مدلی که قاسمی، کاظمی و حسین‌زاده (۱۳۹۵) برای به حداکثر رساندن رضایت مشتریان از طریق مدل QFD و ابزار برنامه‌ریزی خطی ارائه دادند، نیازهای مشتریان را به‌عنوان شاخص اصلی تأثیرگذار در کیفیت در نظر گرفتند و آن را بهینه کردند. اسماعیلیان، لورک‌زاده و زارعیان (۱۳۹۴) نحوه تأثیر و تأثر سیستم نگهداری و تعمیرات را در یک شرکت تولیدکننده سیم و کابل بر سایر بخش‌ها بررسی کردند. در مدل ایشان، تغییرات در سیستم نگهداری و تعمیرات با تغییرات تعداد مشتریان مدل شد تا تأثیرات عبور از نگهداری اصلاحی به نگهداری پیشگیرانه تحلیل شود. هرچند بین سیستم نگهداری و مشخصه‌های کیفیتی ارتباط مستقیمی برقرار نشد.

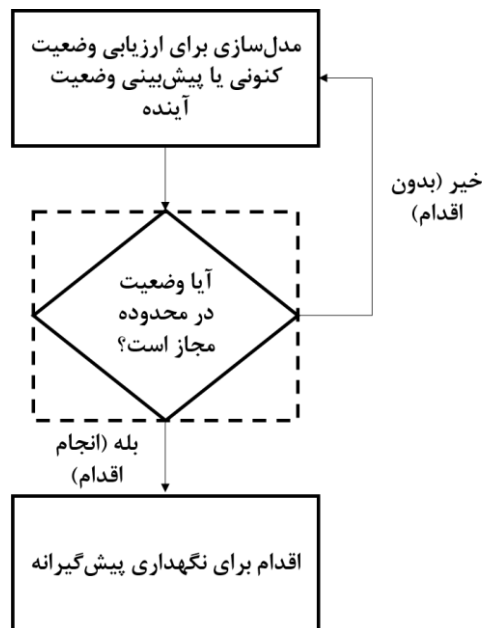
حوزه پیش‌بینی کیفیت بخشی از ادبیات است که می‌تواند نزدیک به موضوع کیفیت نگهداری در نظر گرفته شود. تمرکز اصلی این بخش بر استفاده از ابزارهای محور و مدل‌های ریاضی برای مدل‌سازی کیفیت قرار داده شده، اما به مسئله کیفیت - نگهداری به‌صورت یک کل پرداخته نشده است. به‌طور مثال، نشاط و محلوجی (۱۳۸۸) متدولوژی مدل‌سازی فرایندها با استفاده سلسله‌مراتبی تحلیل رگرسیونی و الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی را به‌کار بردند و مدلی برای کنترل پیش‌بینانه کیفیت ارائه دادند.

با در نظرگیری محدودیت‌های اشاره‌شده در ادبیات توسعه‌یافته برای مسئله کیفیت - نگهداری در حیطه نگهداری وابسته به شرایط، لازم است این ادبیات را از بعد یک مسئله تصمیم‌گیری در نگهداری وابسته به شرایط توسعه دهیم نه یک مسئله کیفیتی با ابزارهای مخصوص به آن. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، تصمیم‌گیری در این رویکرد مشخص می‌کند در چه زمانی، کدام تجهیز به چه نوع نگهداری وابسته به شرایطی نیاز دارد. این از ویژگی‌های منحصر به فرد رویکرد پیش‌بینانه است که موجب می‌شود عملیات نگهداری فقط هنگام نیاز اجرا شود (احمد و کمارالدین، ۲۰۱۲). اگر مسئله کیفیت - نگهداری در نگهداری وابسته به شرایط به‌عنوان یک مسئله تصمیم‌گیری در نگهداری تلقی شود، می‌توان گفت پنج نکته اشاره‌شده در بالا، ابعاد مختلف مسئله را تشکیل می‌دهند که حل همزمان آنها در مسئله تصمیم‌گیری مطرح است.

روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش از لحاظ هدف از نوع پژوهش‌های کاربردی است. بر اساس ماهیت روش‌ها، از نوع تحقیقات کمی یا غیرکیفی و نزدیک به تحقیقات کمی آزمایشی قابل دسته‌بندی است.

فرایند تصمیم‌گیری در نگهداری وابسته به شرایط را می‌توان در یک رویه ساده شامل گام‌های ۱. مدل‌سازی شرایط بدترشونده در راستای تعیین شرایط حال آینده سیستم، ۲. فرایند ارزیابی وضعیت مدل‌شده در راستای تصمیم‌گیری‌های لازم و ۳. اقدام به نگهداری پیشگیرانه، خلاصه کرد. شکل ۱ این رویه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. فرایند تصمیم گیری در نگهداری وابسته به شرایط

مدل پیشنهادی با گنجانیدن معیار کیفیت در قدم دوم برای تصمیم گیری، مدل لازم برای ارتباط داده های حاصل از فرایند پایش وضعیت به معیار کیفیت را، که لازمه قدم نخست فرایند بالا است، توسعه می دهد. معیار کیفیت که می تواند به سادگی مشخصه کیفیتی محصول در نظر گرفته شود، به جز سلامتی تجهیزات با سایر پارامترهای فرایند چون شرایط محیطی، مهارت نیروی انسانی، سرعت خوراک مواد اولیه و همانند آن رابطه دارد. به علاوه می توان برای تعیین وضعیت کارکردی تجهیزات در نقاط مختلف هر یک از تجهیزات در هر نقطه از فرایند، شاخص های متفاوتی در نظر گرفت. بدیهی است که تأثیر همگی این شاخص ها بر خروجی فرایند با اهمیت نیست. از طرف دیگر وضعیت خوب یا بد یک تجهیز ممکن است با اندکی تأخیر بر کیفیت محصول خروجی تأثیرگذار باشد. مدل توسعه یافته باید قادر به تشخیص این تأخیر باشد. در راستای ارائه راه حلی برای مسئله بالا، گزاره هایی مفروض است. ۱. متخصص یا متخصصان مجرب و با شناخت کافی نسبت به فرایند تولید، در کنار فرایند تولید وجود دارند. آنها می توانند نسبت به متغیرهای تأثیرگذار بر مشخصه کیفیتی، برآورد اولیه ای ارائه دهند. همچنین تأخیرات زمانی میان تغییرات در فرایند و تأثیر آنها بر خروجی فرایند دارد را برآورد کنند؛ ۲. برخی از شاخص های بیانگر وضعیت کارکردی تجهیزات فرایند تولید، بر مشخصه کیفیتی محصول خروجی فرایند تأثیرگذارند. این تأثیر می تواند با اختلاف زمانی (تأخیر زمانی) مشخص روی دهد؛ ۳. محصول خروجی فرایند از نوع پیوسته است و مقادیر مشخصه کیفیتی آن در زمان های پیوسته قابل محاسبه است و ۴. پارامترهای مختلف فرایند تولید با یکدیگر در تعامل اند و می توانند بر یکدیگر تأثیرگذار باشند. این موضوع درباره شاخص های سلامت تجهیزات نیز صدق می کند. شناسایی شاخص های تأثیرگذار بر مشخصه کیفیتی نهایی بر اساس یک رویکرد چندمرحله ای و مطابق با شکل ۲ انجام می شود.



شکل ۲. مراحل اصلی مدل پیشنهادی در راستای یافتن جمعیت بهینه شاخص‌های سلامت مؤثر در کیفیت

به‌منظور بررسی دقیق‌تر ارتباط بین فرایند تولید و کیفیت محصول رابطه رگرسیونی مناسب بین متغیرهای مسئله شناسایی می‌شود. با توجه به آنچه مونت‌گومری (۲۰۰۹) درباره عوامل مؤثر بر کیفیت محصول بیان می‌کند، مدل ریاضی بیانگر رابطه میان وضعیت آینده یک متغیر مشخصه کیفیتی محصول و داده‌های فرایند پایش وضعیت تجهیزات و سایر پارامترهای فرایند تولید، به‌صورت رابطه ۱ به دست می‌آید.

$$q(t + kr) = f \left(M_i(t - k'_i r'_i), q(t - k'' r''), P_j(t - k''' r'''_j), \varepsilon_i \right). \quad \text{رابطه ۱}$$

در توصیف نمادهای این رابطه:

$q(\cdot)$ مقدار مشخصه کیفیتی در زمان‌های مختلف

$M_i(\cdot)$ مقدار معیار i ام بیانگر سلامت تجهیزات خط تولید در زمان‌های مختلف و $i = 1, 2, 3, \dots, n_M$

$P_j(\cdot)$ مقدار پارامتر j ام از سایر پارامترهای فرایند تولید (به غیر از وضعیت سلامت تجهیزات) در زمان‌های مختلف و $j = 1, 2, 3, \dots, n_p$

ε_i متغیر تصادفی اغتشاش^۱ که یک متغیر تصادفی با میانگین صفر و واریانس ثابت است. اغتشاش در زمان‌های مختلف مقادیر تصادفی مختلفی می‌گیرد.

$f(\cdot)$ بیانگر رابطه‌ای نامشخص است که متغیر مشخصه کیفیتی را به متغیرهای وضعیت تجهیزات، پارامترهای فرایند تولید و مقادیر گذشته مشخصه با مقداری نوسان تصادفی مربوط می‌کند.

t زمان جاری را با مبدأ مشخص نشان می‌دهد.

r, r'_i, r'', r'''_j ثابت‌هایی به‌عنوان فواصل زمانی معین

k, k'_i, k'', k'''_j ضرایب صحیح مشخص که به آنها ضرایب پنجره زمانی گفته می‌شود.

مفهوم تأخیر زمانی اشاره‌شده در ابعاد مسئله، مفهوم پنجره زمانی را در مدل‌سازی حل مسئله ایجاد می‌کند. پنجره زمانی برای هر یک از متغیرهای فرایند یعنی شاخص‌های سلامت تجهیزات، سایر پارامترهای فرایند و از جمله متغیر مشخصه کیفیتی محصول، قابل طرح است. زمان جاری به‌علاوه مضربی (k که شامل اعداد صحیح مثبت است) از یک فاصله زمانی معین (r) برای وضعیت آینده مشخصه کیفیتی محصول در سمت راست معادله و زمان جاری منهای مضربی

(k'_i, k'', k''') که شامل اعداد صحیح غیرمنفی هستند) از یک فاصله زمانی معین (r'_i, r'', r''') برای متغیرهای سمت چپ، پنجره زمانی مربوط به هر متغیر است. واضح است هرچه بتوان مقادیر r, r'_i, r'', r''' را کوچکتر در نظر گرفت، تابع f میان دو سمت معادله رابطه دقیق‌تری برقرار می‌کند. اما محدودیت توانایی سیستم پایش، ثبت و نگهداری مقادیر پارامترهای فرایند تولید به کمک فرایند پایش وضعیت در تعیین این فواصل زمانی تعیین‌کننده است. به‌منظور تمرکز بر تصمیم‌گیری در نگهداری وابسته به شرایط، در رابطه جدید تأثیرات سایر پارامترها نادیده گرفته می‌شود و فرض بر آن است که اقدام به اصلاح در صورت خارج از کنترل شدن فرایند به‌دلیل تغییرات آن پارامترها قابل پیگیری است. بنابراین رابطه ۱ به صورت رابطه ۲ تغییر می‌یابد.

$$q(t+kr) = g(M_i(t-k'r'), q(t-k''r''), \varepsilon_i), \quad (\text{رابطه ۲})$$

که $g(\cdot)$ تابع جدید برای بیان رابطه بین مشخصه کیفیتی و وضعیت حال و گذشته سلامتی تجهیزات و مشخصه کیفیتی فرایند است. به دست آوردن $g(\cdot)$ به صورت یک تابع ریاضی و مشخص به‌دلیل وجود فاکتورهای فراوان و گاهی اوقات نامعین و تعاملات چندگانه این فاکتورها در شرایط مختلف، کار پیچیده‌ای خواهد بود (آریش و همکاران، ۲۰۰۶). استفاده از ابزارهای محاسباتی نرم^۱ برای تحلیل و به‌کارگیری داده‌های تاریخی ثبت‌شده در یک سیستم، همواره راه‌گشای تخمین توابعی با پیچیدگی‌های غیرقابل پیش‌بینی بوده است (کری و دی‌سیلوا، ۲۰۰۴).

ترکیب بهینه M_i ها ($i = 1, 2, 3, \dots, n_M$) به‌عنوان شاخص‌های بیانگر وضعیت سلامت تجهیزات و پنجره زمانی هر یک یعنی r'_i/k'_i به‌گونه‌ای تعیین می‌شوند تا داده‌ها و ابزارهای محاسباتی در دست، بهترین رابطه $g(\cdot)$ را مدل کنند. در تعیین پنجره زمانی قابل توجه است که علاوه بر تعیین کردن پنجره زمانی شاخص‌های سلامت تجهیزات (r'_i/k'_i)، پنجره زمانی رو به آینده مشخصه کیفیتی مورد تخمین یعنی r/k نیز باید بهینه‌یابی شود. این موضوع ویژگی خاص نوع مدل‌بندی مسئله و به‌خصوص بعد تأخیر زمانی مسئله است.

با توجه به نوع مسئله در دست، روش پیشنهادی ترکیبی از الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی چندلایه پرسپترون^۳ است. نمونه‌ای از این روش نخستین بار توسط پک، ژاوان و مییر^۴ (۱۹۹۳) به‌منظور پایش سلامت و عیب‌یابی موتور اصلی شاتل فضایی^۵ استفاده شده است. قابلیت اطمینان بالا در حذف و تشخیص نوسانات غیرتصادفی در داده‌ها، توانایی در کشف اثرهای متقابل بین متغیرها، صرفه‌جویی اقتصادی قابل توجه در به‌کارگیری، فراغت از مفروضات و قیود دست و پاگیر مدل‌های کلاسیک و توانایی کاهش تأثیر متغیرهای غیرمؤثر بر مدل از طریق تنظیم پارامترهای داخلی، از جمله ویژگی‌هایی است که موجب شده تا الگوریتم‌های فراابتکاری بر سایر روش‌های کلاسیک مدل‌سازی و پیش‌بینی از جمله رگرسیون برتری یابد (نشاط و محلوچی، ۱۳۸۸). الگوریتم ژنتیک در دسته الگوریتم‌های تکاملی^۶ طبقه‌بندی می‌شود و دارای خواص حل مسئله بسیار قدرتمند است. این الگوریتم قادر است میان فضای جواب بسیار وسیع جست‌وجو کند و بهترین پاسخ‌ها را برای مسئله فراهم آورد. تنظیم پارامترهای ترتیب‌داده‌شده در اجرای الگوریتم دقت و سرعت دستیابی به جواب را ارتقا

1. Soft computing tools
2. Karray & De Silva
3. Multi-Layer Perceptron (MLP)

4. Peck, Dhawan & Meyer
5. Space Shuttle Main Engine (SSME)
6. Evolutionary Algorithms

می‌دهد (کولی^۱، ۱۹۹۹). از طرفی لازم است برای شناسایی شاخص‌های تأثیرگذار بر کیفیت از داده‌های سیستم پایش وضعیت استفاده شود. سیستم پایش وضعیت ممکن است داده‌هایی را از دست بدهد یا در ثبت داده‌ها دچار اشتباه شود. از این رو باید روشی را انتخاب کرد که کیفیت پایین برخی داده‌ها در آن عملکرد آن تأثیر چندانی نگذارد که این ویژگی را در الگوریتم ژنتیک در دسترس داریم. همچنین این الگوریتم قادر است برازندگی پاسخ‌ها را در قالب توابع ریاضی و غیرریاضی دریافت کند. این موضوع سبب تطبیق مناسب MLP به عنوان تابع برازندگی برای الگوریتم شده است.

از دیدگاه روش شناختی تکنیک مورد استفاده، الگوریتم ژنتیک ساده‌ای است که شبکه MLP در برازندگی جواب‌های تولیدی شرکت دارد. به دلیل ماهیت وفق‌پذیر این شبکه‌ها وجود داده‌های اشتباه یا از دست‌رفته به کمک سایر داده‌ها ترمیم می‌شود. در راستای استفاده از یک الگوریتم ژنتیک، تعیین تکلیف سه جنبه اساسی از الگوریتم ضروری است که در زیربخش‌های بعدی شرح داده می‌شود.

کد کردن گزینه‌های فضای جواب به رشته‌های باینری

فضای جواب مسئله به صورت رابطه ۳ خواهد بود:

$$\left\{ M_i(t), M_i(t-r'_i), M_i(t-2r'_i), \dots, M_i(t-R'_i), q(t), \right. \\ \left. q(t+r), q(t+2r), \dots, q(t+R) \right\} \quad \text{رابطه ۳}$$

در رابطه ۳ ثابت‌های R, R'_i ($i = 1, 2, \dots, n_M$) حداکثر طول پنجره زمانی تعیین‌شده برای به ترتیب شاخص‌های سلامت تجهیزات و مشخصه کیفیتی است. اختصاص عدد یک به معنای احتساب هر یک از متغیرهای بردار به عنوان متغیر با اهمیت و اختصاص عدد صفر به معنای عدم احتساب هر یک از آنها به عنوان متغیر با اهمیت، قابل بیان است. در مورد مشخصه کیفیتی و در جواب بهینه نهایی، اگر سلول مختص مقادیر مشخصه کیفیتی در هر یک از زمان‌های آینده صفر بگیرد، به این معناست که ماهیت فرایند تولید اطلاعات کمی در شناسایی الگوهای مربوط به آن فاصله زمانی از زمان حاضر در اختیار می‌گذارد. شکل ۳ نحوه طراحی رشته باینری (کروموزوم) را در اختیار می‌گذارد.

$M_i(t)$	$M_i(t-r'_i)$	$M_i(t-2r'_i)$...	$M_i(t-R'_i)$	$q(t)$	$q(t+r)$	$q(t+2r)$...	$q(t+R)$
1/0	1/0	1/0		1/0	1/0	1/0	1/0		1/0

شکل ۳. نحوه کد کردن فضای جواب به فضای باینری

خارج کردن از کد و ارزیابی یک رشته باینری

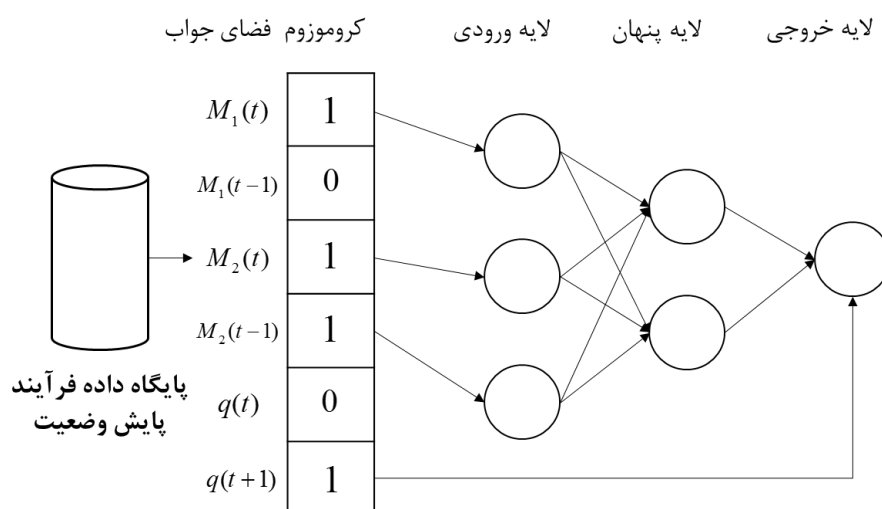
با معماری در نظر گرفته شده برای کد کردن فضای جواب، ابتدا تعداد سلول‌های حاوی ارزش یک در کروموزوم به همراه متغیر مربوطه معین می‌شود. این تعداد سلول‌های مربوط به پنجره زمانی مشخصه کیفیتی، در محاسبه وارد نمی‌شوند. سپس یک شبکه عصبی MLP با مشخصات ساختاری زیر برای این کروموزوم طراحی می‌شود:

الف) لایه ورودی: تعداد گره‌های (نودهای) لایه ورودی برابر است با تعداد سلول‌های حاوی ارزش یک در کروموزم (بدون احتساب سلول‌های مشخصه کیفیتی). پنجره زمانی رو به گذشته مشخصه کیفیتی در این مرحله وارد محاسبات نمی‌شود و از مقادیر متغیرهای آن در تخمین‌زننده مرحله بعد استفاده می‌شود.

ب) لایه پنهان: هر شبکه فقط حاوی لایه‌ای پنهان است. نشان داده شده است که یک شبکه عصبی با فقط یک لایه پنهان، می‌تواند هر تابع پیوسته غیرخطی را با دقت قابل قبولی تخمین بزند (کری و د سیلوا، ۲۰۰۴).

ج) لایه خروجی: این لایه به متغیر مشخصه کیفیتی فرایند در پنجره زمانی رو به آینده خود اختصاص دارد. سلول‌های انتهایی کروموزوم که اختصاص به فضای جواب این متغیرها دارند، تعداد گره‌ها و نوع خروجی این لایه را مشخص می‌کنند. توجه کنید که حداقل یکی از سلول‌های مربوط به مشخصه کیفیتی در کروموزوم باید دارای ارزش یک باشد.

شکل ۴ رابطه بین فضای جواب، کروموزوم و ساختار شبکه را از طریق یک مثال مشخص می‌کند.



شکل ۴. رابطه میان فضای جواب، کروموزوم و ساختار شبکه عصبی ارزیابی‌کننده

با تعیین ساختار شبکه عصبی مربوط به کروموزوم، وزن‌های اولیه به صورت تصادفی تعیین می‌شوند. یک مجموعه داده آموزشی از متغیرهای تعیین‌شده در کروموزوم ایجاد می‌شود. در فراهم کردن مجموعه داده‌های ورودی باید به پنجره زمانی شاخص‌ها دقت شود. سپس شبکه تحت آموزش قرار می‌گیرد. با توجه به گستردگی ممکن در جست‌وجوی فضای جواب توسط الگوریتم ژنتیک، به منظور کاهش الزامات محاسباتی در شبکه MLP در دست، از الگوریتم آموزشی موسوم به انتشار سریع^۱ استفاده می‌شود. این الگوریتم توسط فالمن در سال ۱۹۸۸ برای سرعت بخشیدن به روند آموزش از روش شیب کاهشی^۲ معرفی شد (پک و همکاران، ۱۹۹۳). رابطه ۴ خطای آموزشی یک داده را محاسبه می‌کند.

$$E = \frac{1}{2}(O - d)^2 \quad \text{(رابطه ۴)}$$

که O خروجی شبکه و d خروجی مطلوب است. قوانین به‌روزرسانی به صورت رابطه ۵ تغییر می‌کند.

$$\Delta w(p) = \frac{S(p)}{S(p-1) - S(p)} \Delta w(p-1) \quad (\text{رابطه ۵})$$

در رابطه بالا p شمارنده داده (بردار) آموزشی در هر دوره آموزش است. $S(\cdot)$ از طریق رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

$$S(p) = \frac{\partial E_p}{\partial w} \quad (\text{رابطه ۶})$$

توسعه یک تابع برازندگی برای راهنمایی الگوریتم به سمت نتایج دلخواه

با توجه به ابعاد مسئله و روش مورد استفاده در حل آن، معیارهای زیر، اجزای تشکیل دهنده تابع برازندگی هستند. الف) دقت شبکه در پیش‌بینی مجموعه داده‌های آزمایشی، معیار مهم ارزیابی یک کروموزوم به عنوان ترکیبی مناسب از شاخص‌های سلامت، پنجره زمانی آن شاخص‌ها و پنجره زمانی مشخصه کیفیتی مورد پیش‌بینی، میزان دقت شبکه توسعه یافته متناسب با این کروموزوم برای تخمین مشخصه کیفیتی است. روش پیشنهادی روشی بر اساس آزمون میانگین‌های دانکن^۱ (هینس و مونتگومری^۲، ۱۹۸۰) است که در مراحل زیر، معیار مد نظر را ارائه می‌دهد:

گام نخست: محاسبه باقی‌مانده‌ها؛ در ابتدا مجموعه داده‌های آزمایشی که مؤلفه‌های بردار رابطه ۳ را در تناسب با کروموزوم مورد بحث ارائه می‌دهد، به شبکه آموزش دیده ارائه می‌شود. اندازه این مجموعه n_{test}^p بردار است که پیش‌تر به شبکه ارائه نشده است. با این داده، خروجی حاصل از شبکه محاسبه می‌شود و با در دست بودن مقادیر واقعی خروجی‌ها، مقدار باقی‌مانده^۳ برای هر خروجی در هر بردار قابل محاسبه است. رابطه ۷ نحوه محاسبه باقی‌مانده را نشان می‌دهد (به ازای k و $p = 1, 2, \dots, n_{test}^p$).

$$res.^{(P)}(t+kr) = q_o^{(P)}(t+kr) - q_d^{(P)}(t+kr) \quad (\text{رابطه ۷})$$

در این رابطه داریم:

p : شمارنده داده (بردار) در مجموعه آزمایشی

$res.^{(P)}(\cdot)$: باقی‌مانده پیش‌بینی مشخصه کیفیتی در پنجره زمانی برای بردار p

$q_o^{(P)}(\cdot)$: مقدار مشخصه کیفیتی تخمینی به وسیله شبکه MLP مربوط به بردار p ام در مجموعه

$q_d^{(P)}(\cdot)$: مقدار مشخصه کیفیتی مطلوب (واقعی) مربوط به بردار p ام در مجموعه

گام دوم: محاسبه پارامترهای آماری باقی‌مانده‌ها؛ در این قدم میانگین باقی‌مانده‌های محاسبه شده برای هر مشخصه کیفیتی در هر یک از مقاطع پنجره زمانی طبق رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

$$\overline{res.}(t+kr) = \frac{1}{n_{test}^p} \sum_{p=1}^{n_{test}^p} res.^{(P)}(t+kr) \quad (\text{رابطه ۸}) \quad \text{به‌ازای هر } k$$

همچنین مقدار مجموع مجذور خطای تصادفی پیش‌بینی از طریق رابطه ۹ محاسبه می‌شود.

$$S^2_E = \sum_k \sum_{p=1}^{n_{test}^p} \left(res.^{(p)}(t+kr) - \overline{res}.(t+kr) \right)^2 \quad \text{رابطه ۹}$$

میانگین مجذور خطای تصادفی پیش‌بینی برابر خواهد بود با:

$$MSE = \frac{S^2_E}{df} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

در رابطه بالا df درجه آزادی تخمین خطای تصادفی و مقدار آن برابر $(n_{test}^p - 1)(K - 1)$ است و K تعداد مقاطع زمانی که مشخصه کیفیتی در آن محاسبه می‌شود را نشان می‌دهد. به کمک روابط ذکر شده می‌توان تخمینی از خطای استاندارد برای پیش‌بینی هر مشخصه کیفیتی را به دست آورد. این تخمین رابطه ۱۱ قابل محاسبه است.

$$SD_E = \sqrt{\frac{MSE}{n_{test}^p}} \quad \text{رابطه ۱۱} \quad \text{به‌ازای هر } k$$

گام سوم: تشخیص اثرهای دوره‌ای (روش دانکن)؛ با در دست بودن میانگین و تخمینی از خطای استاندارد پیش‌بینی برای مقاطع مختلف پنجره زمانی، به کمک روش دانکن، می‌توان از دقت شبکه در تخمین مقادیر مشخصه در دوره‌های مختلف پنجره زمانی، دسته‌بندی‌ای به دست آورد. دوره‌هایی که در یک دسته قرار می‌گیرند، با در نظرگیری ریسک خطایی مشخص، با یک دقت پیش‌بینی شده‌اند. حال دسته با کمترین میانگین مطلق خطا، نماینده‌ای از اثرهای دوره‌ای خواهد بود که شبکه بهتر از سایرین قادر به تخمین آنها است. بدین ترتیب به کمک ابزاری که دانکن در اختیار می‌گذارد، می‌توان اعضای دسته کمترین میانگین مطلق خطا (قدر مطلق میانگین باقی‌مانده‌ها) را شناسایی کرد.

بدین منظور، ابتدا دوره‌ها بر اساس روند صعودی میانگین خطا $\overline{res}.(t+kr)$ مرتب می‌شوند. روش دانکن برای شناسایی دسته‌ها، هر یک از میانگین‌ها را متناسب با جایگاه مرتب‌شده خود، با سایر میانگین‌ها به صورت دو به دو مقایسه می‌کند. به این صورت که اختلاف میانگین دو جایگاه را با ثابتی به نام ثابت حداقل اهمیت دانکن مقایسه می‌کند. این ثابت بر اساس اختلاف جایگاهی دو میانگین در روند مرتب‌شده متفاوت است. برای به دست آوردن این ثابت در سطح اطمینان α ($0 < \alpha < 1$)، با درجه آزادی خطای df و با اختلاف جایگاهی ρ ($\rho = 2, 3, \dots, K$) ابتدا محدوده‌های با حداقل اهمیت دانکن به دست می‌آید. اگر مقادیر به دست آمده را $d_\alpha(df, \rho)$ نشانه‌گذاری کنیم، $D_\alpha(df, \rho)$ به عنوان ثابت حداقل اهمیت دانکن از طریق رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود.

$$D_\alpha(df, \rho) = SD_E d_\alpha(df, \rho) \quad \text{رابطه ۱۲}$$

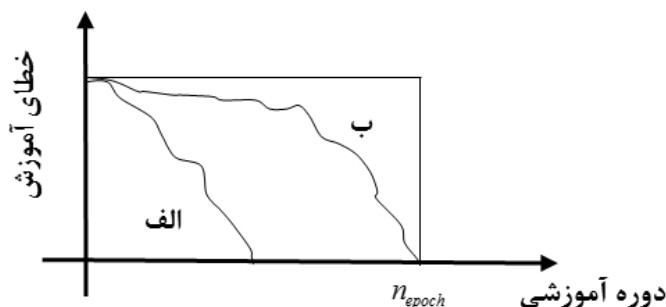
اختلاف میانگین‌های جایگاه‌های مختلف با جایگاه کمترین خطا (کمترین قدر مطلق میانگین باقی‌مانده در دوره‌ها) در چپ‌تر مرتب‌شده صعودی، با ثابت محاسبه‌شده از طریق رابطه ۱۲ مقایسه شده و در صورت قرارگیری در محدوده (کوچک‌تر بودن اختلاف میانگین‌ها از ثابت)، آنها را از یک دسته قلمداد می‌کنیم.

حال به مسئله تعیین معیار برای وارد کردن دقت شبکه در پیش‌بینی مجموعه داده‌های آزمایشی باز می‌گردیم. با

نتایج حاصل از قدم‌های ذکر شده، به نظر می‌رسد رابطه مناسب برای اندازه‌گیری این معیار برای شبکه به صورت رابطه ۱۳ باشد.

$$NE = \frac{1}{n_{\min}} \text{Min}_k \{ |\overline{res}_k|. (t + kr) \} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

در رابطه ۱۳ n_{\min} تعداد اعضای گروه کمترین میانگین مطلق باقی‌مانده‌ها است و به کمک قدم‌های اشاره شده در بالا محاسبه می‌شود. در استفاده از این رابطه باید دقت داشت که تابع برازندگی نهایی برای الگوریتم ژنتیک، تابعی منفی در نظر گرفته شده است. به این معنا که مقادیر پایین‌تر برازندگی بهتری را نشان می‌دهند. (ب) سرعت همگرایی شبکه؛ در آموزش شبکه مربوط به یک کروموزوم، ممکن است هم سرعت کم همگرایی و هم سرعت بالای همگرایی ارزشمند باشند (پک و همکاران، ۱۹۹۳)، زیرا شبکه در این مرحله تحت دوره‌های آموزشی زیادی قرار نمی‌گیرد. در این رابطه به شکل ۵ توجه شود.



شکل ۵. رفتار خطای آموزشی نسبت به دوره‌های آموزشی برای دو بردار جواب متفاوت
منبع: پک و همکاران (۱۹۹۳)

n_{epoch} تعداد دوره‌های آموزشی و مقداری ثابت برای تمامی کروموزوم‌ها است. به منظور محاسبه معیار سرعت همگرایی می‌توان از مساحت زیر نمودار خطا - دوره (قسمت الف از شکل ۵) استفاده کرد. معیار سرعت کل که از جمع مساحت ذوزنقه‌های زیر نمودار دوره - خطا به دست می‌آید، طبق رابطه ۱۴ محاسبه می‌شود.

$$TCR = \frac{\text{Min} \left\{ \sum_{e=2}^{n_{epoch}} \left(E_e + \frac{|E_e - E_{e-1}|}{2} \right) - n_{epoch} \times \text{Min} \{ E_e \}, n_{epoch} \times \text{Max} \{ E_e \} - \sum_{e=2}^{n_{epoch}} \left(E_e + \frac{|E_e - E_{e-1}|}{2} \right) \right\}}{\sum_{e=1}^{n_{epoch}} E_e} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

که e شمارنده دوره آموزشی است. E_e خطای آموزش دوره آموزشی e ام است. در صورت استفاده از الگوریتم‌های آموزشی مبتنی بر روش شیب کاهش نزولی مانند الگوریتم پس‌انتشار یا انتشار سریع، انتظار می‌رود همواره $E_{e-1} > E_e$ باشد و بنابراین نوساناتی در روند نزولی خطای شبکه مشاهده نشود. هرچند مشاهده نوسان ممکن است دقت رابطه ۱۴ را برای معیار سرعت همگرایی کاهش دهد. عبارت $\frac{\sum_{e=1}^{n_{epoch}} E_e}{n_{epoch}}$ در مخرج رابطه ۱۴ به منظور حذف اثر بزرگی خطا در سرعت همگرایی است.

مقدار E_e مطابق رابطه ۱۵ حاصل می‌شود.

$$E_e = \frac{1}{n_{\min} n_{train}^p} \sum_{k_{\min}}^{n_{train}^p} \sum_{p=1}^{n_{train}^p} |q_o^{(p)}(t+kr) - q_d^{(p)}(t+kr)| \quad \text{رابطه ۱۵}$$

n_{\min} تعداد اعضای دسته کمترین خطای میانگین مطلق محاسبه شده در معیار دقت شبکه، n_{train}^p تعداد بردارهای آموزشی در یک دوره آموزشی و k_{\min} شمارنده اعضای دسته کمترین خطای میانگین مطلق است. (ج) تعداد ورودی‌های شبکه؛ مطلوب است با تعداد ورودی کمتری به دقت مناسب در تخمین مشخصه کیفیتی دست یافت. با ضرب تعداد ورودی‌های شبکه در معیار دقت شبکه می‌توان این معیار را در تابع برازندگی لحاظ کرد. اما تجربه نشان می‌دهد ضرب مستقیم تعداد ورودی‌ها در معیار دقت شبکه، برای تعداد ورودی‌ها محدودیتی قدرتمند قائل می‌شود. به منظور کاهش قدرت محدودیت تعداد ورودی‌ها، می‌توان تعداد ورودی‌ها را به علاوه ثابتی معین در دقت شبکه ضرب کرد. هر مقدار اندازه این ثابت بزرگ‌تر باشد، قدرت محدودیت تعداد ورودی‌ها کمتر می‌شود. از آنجا که ممکن است ابعاد فضای جواب مسئله بزرگ شود، مطلوب است برای افزایش یک واحدی تعداد ورودی‌ها در مقادیر ورودی بالاتر، ممانعت قدرتمندتری صورت بگیرد. این عمل با مجذور کردن عدد ورودی‌ها به علاوه ثابت اضافه شده امکان‌پذیر است. با در نظرگیری این نکات، معیار تعداد ورودی‌ها به شبکه، که در تابع برازندگی ضریبی است از دقت شبکه، تابعی عمومی به شکل رابطه ۱۶ پیشنهاد می‌شود.

$$IC = (n_{input} + h(G))^2 \quad \text{رابطه ۱۶}$$

n_{input} تعداد ورودی‌های شبکه، G تعداد نسل‌های گذشته از الگوریتم ژنتیک و $h(G)$ تابعی نزولی از تعداد نسل‌های گذشته از الگوریتم ژنتیک است که می‌تواند با توجه به اندازه فضای جواب و مقیاس (دامنه) خطای شبکه به صورت تجربی تعیین شود.

سه معیار دقت شبکه، سرعت همگرایی و تعداد ورودی‌های شبکه که به جزئیات محاسبات آنها در بالا اشاره شد، با یکدیگر ترکیب شده و تابع برازندگی در الگوریتم ژنتیک را تشکیل می‌دهند. بنابراین با توجه به روابط توسعه یافته در سه معیار مورد اشاره، تابع برازندگی به صورت رابطه ۱۷ پیشنهاد می‌شود.

$$FF = \frac{IC * NA}{TCR} \quad \text{رابطه ۱۷}$$

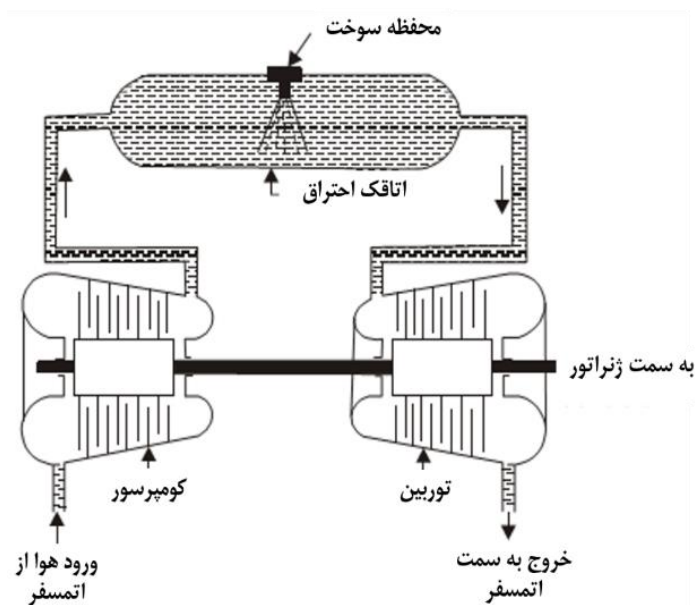
بار دیگر اشاره می‌شود که تابع برازندگی پیشنهادی معیاری منفی است. به این معنا که مقادیر کم آن دارای مطلوبیت است و در اجرای الگوریتم ژنتیک باید به آن توجه کرد.

جواب بهینه‌ای که از اجرای الگوریتم ژنتیک به دست می‌آید، بهترین ترکیب ورودی‌ها را شامل شاخص‌های سلامت تجهیزات، پنجره زمانی آنها و پنجره زمانی رو به آینده مشخصه کیفیتی، مشخص می‌کند.

یافته‌های پژوهش

نیروگاه گازی پرنده از تجهیزات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری بروز و پیشرفته برای پایش وضعیت فرایند تولید بهره‌مند است. در کنار سیستم پیشرفته پایش وضعیت، وجود متخصصان عالم و با تجربه که همکاری قابل تقدیری در ارتقای غنای این

پژوهش داشتند، مزیت مهم دیگری است که مورد نیاز این مطالعه موردی است. فرایند کنونی تولید برق در واحد دو مانند شکل ۶ است.



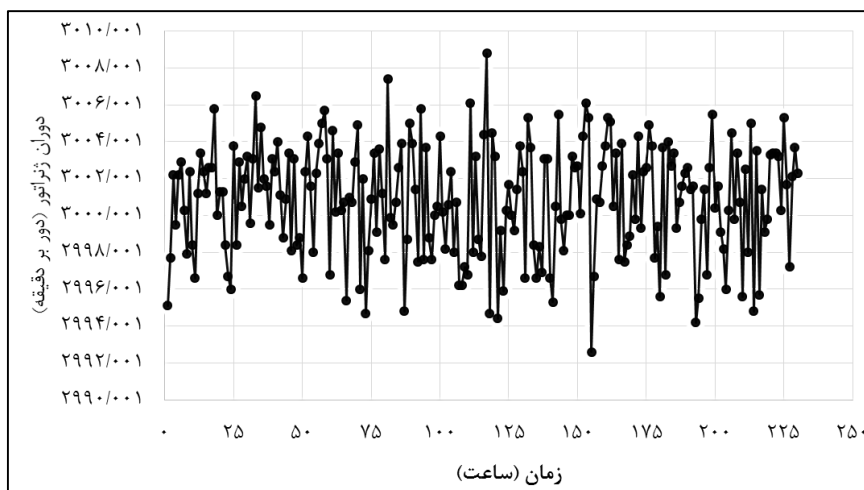
شکل ۶. شماتیکی از فرایند تولید برق واحد دو نیروگاه گازی پرنده

داده‌های تاریخی مورد استفاده برای آموزش شبکه‌ها، از پایگاه اطلاعاتی فرایند پایش وضعیت نیروگاه دریافت شد. این پایگاه اطلاعات اندازه‌گیری شده توسط حسگرها را به فاصله زمانی یک ساعت تا ده روز نگهداری می‌کند. مقادیر ثبت شده برای فضای جواب انتخابی در فاصله بین ۳۱ خرداد ۱۳۹۳ تا ۹ تیر ۱۳۹۳ به عنوان مجموعه داده آموزشی، از پایگاه اطلاعاتی فرایند پایش وضعیت استخراج شد. لازم بود دوره‌ای انتخاب شود که فرایند واحد دو در طول ده روز، بدون توقف مشغول تولید انرژی بوده باشد. بنابراین با احتساب ثبت ساعتی مقادیر، تعداد ۲۴۰ بردار آموزشی در دسترس قرار گرفت. در کنار داده‌های آموزشی، نیاز به بردارهایی از داده‌های آزمایشی است، تا عملکرد شبکه‌های آموزش دیده، در مواجهه با داده‌هایی که پیش‌تر به آنها ارائه نشده است، ارزیابی شود. به این دلیل داده‌های ثبت شده برای ۲۹ تیر ۱۳۹۳ به عنوان یک روز تصادفی، با تعداد ۲۴ بردار آزمایشی، به مجموعه داده‌های تاریخی مورد استفاده اضافه می‌شود.

نیروی دورانی منتقل شده به ژنراتور، نتیجه عملکرد اجزای مختلف فرایند است که سبب تولید برق می‌شود. سرعت دوران ژنراتور، رقم‌زننده ویژگی‌های کیفیتی مهمی در برق نظیر «فرکانس»^۱ است. این مشخصه باید همواره در یک مقدار ثابت، با تغییرات بسیار ناچیز نگاه داشته شود، در غیر این صورت، سبب آسیب‌های جدی در تجهیزات برقی خانگی و صنعتی خواهد شد. فرکانس رایجی که لوازم برقی خانگی بر اساس آن طراحی و ساخته می‌شوند، فرکانس ۵۰ هرتز است و ورود جریان برق با فرکانسی غیر از ۵۰ هرتز، به تجهیز آسیب می‌زند.

بنابراین سرعت دوران ژنراتور با مشخصه کیفیتی پیش‌بینی شده به کمک مدل پیشنهادی انتخاب می‌شود که واحد

محاسبه آن در فرایند پایش وضعیت نیروگاه «RPM^۱» به معنای دور در دقیقه است. شکل ۷ تغییرات مشخصه کیفیتی انتخابی در یک دوره ده روزه را به تصویر کشیده است.



شکل ۷. تغییرات سرعت دوران ژنراتور در یک دوره ده روزه که هر یک ساعت ثبت شده است.

توصیف پارامترهای به کاررفته در اجرای الگوریتم عبارتند از:

الف) اندازه جمعیت جواب‌ها؛ اندازه جمعیت کروموزوم‌ها در هر نسل، مطابق با نامساوی به دست آمده توسط آلاندر^۲ (۱۹۹۲) برای تعیین اندازه بهینه جمعیت نسل‌ها در الگوریتم ژنتیک، ۷۵ کروموزوم تعیین شد. رابطه ۱۸ نامساوی آلاندر را در این رابطه نشان می‌دهد.

$$n_G < S_{opt}(n) < 2n_G \quad \text{رابطه ۱۸}$$

که n_G تعداد ژن‌های درون هر کروموزوم و $S_{opt}(n_G)$ بیانگر اندازه جمعیت بهینه است. در مورد مسئله دست داریم:

$$71 < S_{opt}(n) < 142 \quad \text{رابطه ۱۹}$$

که عدد ۷۵ از این بازه انتخاب گشته است.

ب) ابزار انتخاب^۳؛ انتخاب از میان جمعیت ارزیابی شده، برای انجام عمل تقاطع و جهش، به کمک ابزار چرخه گردان^۴ صورت می‌گیرد.

ج) نرخ تقاطع؛ به صورت تجربی برابر ۰/۶ انتخاب شد.

د) نرخ جهش؛ به صورت تجربی برابر ۰/۰۱ انتخاب شد.

ه) شرط توقف؛ زمانی که اختلاف برازندگی بهترین کروموزوم‌ها در دو نسل پیاپی کمتر از ۰/۰۰۱ شود، الگوریتم متوقف و بهترین کروموزوم به عنوان جواب بهینه انتخاب می‌شود.

جواب بهینه به دست آمده از ۲۲ نسل اجرای الگوریتم ژنتیک، بردار فضای جواب ۲۰ را می‌دهد،

$$\left\{ M_3(t), M_3(t-1), M_3(t-2), M_6(t), M_6(t-1), M_7(t), M_8(t), \right. \\ \left. M_9(t), M_9(t-1), M_{15}(t), M_{18}(t), M_{18}(t-1), M_{22}(t), q(t+1) \right\} \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

در جدول ۲ مشخصات متغیرهای فضای جواب انتخابی توسط الگوریتم ژنتیک، قابل مشاهده است. به منظور ارزیابی اعتبار جواب حاصل شده، عملکرد جواب بهینه در مقابل جواب‌های تصادفی در یک تخمین‌زننده MLP بررسی می‌شود. شبکه MLP تخمین‌زننده تعداد دوران ژنراتور در دقیقه، با ۱۶ گره در لایه ورودی، ۱۱ گره در تنها لایه پنهان و یک گره در لایه خروجی، تشکیل می‌شود. عدد ۱۶ برای تعداد ورودی‌های شبکه، مجموع ۱۳ متغیر بیانگر سلامت تجهیزات در جواب بهینه، به علاوه مقادیر حال تا دو ساعت گذشته مشخصه کیفیتی است برای اینکه دقت تخمین شبکه افزایش یابد. با در دست بودن مجموعه داده‌های آموزشی و آزمایشی مورد استفاده در مرحله قبل و همچنین استفاده از الگوریتم انتشار سریع، عملکرد شبکه با فضای جواب بهینه قابل ارزیابی است. علاوه بر آزمایش جواب بهینه، در راستای ارزیابی عملکرد مدل، دسته دیگری از جواب‌های مسئله، به تخمین‌زننده ارائه می‌شوند. تعداد ۵ پاسخ خوب ولی غیربهینه است که به صورت تصادفی از نسل‌های آخر اجرای الگوریتم ژنتیک حاصل می‌شود. شرط توقف عبارت است از کوچک‌تر شدن اختلاف خطای شبکه در دو دوره پیاپی، از عدد ۰/۰۱. همچنین هنگام افزایش دوره‌های آموزشی، از فرآیند آموزش شبکه جلوگیری می‌شود. پس از ارائه داده‌های آزمایشی به شبکه‌های آموزش دیده، نتایج ارزیابی جواب بهینه و غیربهینه در جدول ۳ خلاصه شده است.

جدول ۲. مشخصات شاخص‌های سلامت انتخابی به کمک الگوریتم ژنتیک در مسئله نیرگاہ پرنده

ردیف	کد شاخص	تجهیز مربوطه	عنوان شاخص	نماد ریاضی	واحد اندازه‌گیری	پنجره زمانی
۱	2MKD20CY021Q01	ژنراتور	ارتعاش نسبی برینگ MKD۱۲	M _۳	micron	t, t-۱, t-۲
۲	2MKD10CY021Q01	ژنراتور	ارتعاش نسبی برینگ MKD۱۱	M _۶	micron	t, t-۱
۳	2MKD21CT001AQ1	ژنراتور	دمای برینگ MKD۱۲	M _۷	°C	t
۴	2MKD11CT001AQ1	ژنراتور	دمای برینگ MKD۱۱	M _۸	°C	t
۵	2MKC02CT005Q01	ژنراتور	دمای روتور	M _۹	°C	t, t-۱
۶	2MBD11CT011AQ1	توربین	دمای برینگ MBD۱۱	M _{۱۵}	°C	t
۷	2MBD11CY041Q01	توربین	ارتعاش نسبی برینگ MBD۱۱	M _{۱۸}	micron	t, t-۱
۸	2MBD12CY041Q01	کمپرسور	ارتعاش نسبی برینگ MBD۱۲	M _{۲۲}	micron	t

با در نظرگیری ستون درصد خطا از جدول ۳ مشاهده می‌شود که جواب به دست آمده از مدل پیشنهادی دارای برتری

نسبی است. هرچند می‌توان با تغییر پارامترهای مدل، به ساختار بهینه‌تری دست یافت.

جدول ۳. نتایج حاصل از ارائه پاسخ‌های مختلف به یک تخمین‌زننده MLP

دسته جواب	شماره جواب	درصد خطا از مقدار واقعی (برای فرکانس)
جواب‌های غیربهبینه	۱	۰/۰۳۵
	۲	۰/۰۵۱
	۳	۰/۰۷۴
	۴	۰/۰۵۹
	۵	۰/۰۷۲
	۶	۰/۰۴۹

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

اهمیت توجه به معیار کیفیت در کنار معیار دسترس‌پذیری تجهیزات تولید، توسعه مدلی برای ایجاد ارتباط میان فرایند پایش وضعیت و معیار کیفیت محصول را جذاب می‌کند. در این مطالعه مشخصه‌ای کیفیتی از محصولی پیوسته به‌عنوان معیاری کیفیتی در نظر گرفته شد تا مبنای تصمیم‌گیری در نگهداری وابسته به شرایط باشد.

برای توسعه مدلی برای ایجاد ارتباط میان وضعیت سلامت تجهیزات و مشخصه کیفیتی، در راستای شناسایی شاخص‌های مؤثر در کیفیت محصول، توجه به حقایقی ضروری است. نگهداری و تعمیرات، سلامت تجهیزات را تحت نظر دارد و سلامت تجهیزات فرایند تولید، فقط بخشی از پارامترهای فرایند هستند که پتانسیل تعیین کیفیت محصول خروجی را دارند. از طرف دیگر، تأثیر پارامترهای فرایند تولید (که به کمک فرایند پایش وضعیت تحت رصد هستند) همراه با مقداری تأخیر، به مشخصه کیفیتی منتقل می‌شود. دو موضوع ذکر شده به‌همراه برخی موضوعات دیگر، مهم‌ترین ابعاد مسئله توسعه مدل را تشکیل می‌دهند.

با در نظرگیری مفروضاتی چون وجود متخصصان مجرب، تولید محصول پیوسته، وجود فرایند تولید پایدار، پذیرش اثرهای متقابل پارامترهای فرایند بر یکدیگر و بر کیفیت محصول خروجی و وجود تأخیر زمانی در شهود این تأثیرات، مدل پیشنهادی به کمک الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی مصنوعی برای تعیین شاخص‌های سلامت با اهمیت در کیفیت محصول پیوسته توسعه یافت.

مسئله یافتن بردار فضای جواب بهینه‌ای است که مؤلفه‌های آن شاخص‌های سلامت تجهیزات و مشخصه کیفیتی، در مقاطع مختلف پنجره زمانی است. قبل از بهینه‌یابی میان پاسخ‌های موجود، به کمک متخصص فرایند، برخی از شاخص‌ها که نسبت به مشخصه کیفیتی با اهمیت نیستند، کنار گذاشته می‌شوند. همچنین به کمک متخصص، عمق پنجره زمانی شاخص‌ها و مشخصه کیفیتی، تحدید می‌شود. به‌منظور تشکیل الگوریتم ژنتیک، سه جنبه اساسی یعنی نحوه کد کردن بردار فضای جواب به فضای باینری، خارج‌سازی از کد و ارزیابی هر جواب و تعیین تابع برازندگی هر جواب، ضروری است. تعلق یا عدم تعلق مؤلفه‌های بردار جواب به جواب نهایی، باعث ساده شدن انتقال بردار جواب به فضای باینری می‌شود. یک شبکه عصبی که از نوع MLP انتخاب شد، رشته‌های باینری را دریافت کرده و برای ارزیابی آنها از کد خارج می‌کند. میزان برازندگی هر پاسخ با سنجش سه معیار ارزیابی شد؛ دقت پیش‌بینی شبکه عصبی، سرعت همگرایی و تعداد مؤلفه‌های موجود در هر پاسخ.

در این پژوهش، نحوه به‌کارگیری و ارزیابی مدل پیشنهادی به کمک داده‌های واقعی حاصل از فرایند تولید برق در واحد دو نیروگاه گازی پرند، انجام گرفت. در بردار واجب بهینه تعداد شاخص‌های سلامت از ۲۳ عدد به ۸ عدد کاهش می‌یابند که با احتساب پنجره زمانی، از ۶۹ متغیر به ۱۳ متغیر کاهش می‌یابند. نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند مبنایی برای تصمیم‌های نگهداری و تعمیرات فرایند تولید قرار بگیرد تا با تمرکز هزینه‌های تعمیراتی بر نقاط حساس‌تر، از میزان هزینه‌های کیفیت به میزان محسوسی کاسته شود.

با نگاهی دوباره به جواب به‌دست‌آمده در انتهای الگوریتم بهینه‌یابی ژنتیک، نتایج زیر قابل استخراج است:

۱. تخمین مقادیر مشخصه کیفیتی، فقط در یک ساعت آینده و نه بیشتر، پیشنهاد شده است. تخمین مقادیر دورتر از زمان جاری از مشخصه کیفیتی، درباره این مسئله، معیارهای برازندگی را بهینه نمی‌کند. این موضوع نتیجه‌ای جنبی نیز دارد. نخست اینکه (با فرض صحت نظر متخصص در تحدید پنجره زمانی) اگر محدودیت سیستم پایش وضعیت فرایند، اجازه ثبت مقادیر در بازه‌های کمتر از یک ساعت را می‌داد، احتمال برتری جواب‌ها نسبت به جواب‌های این وضعیت قوت می‌گیرد. زیرا پاسخ مسئله، با مقادیر مشخصه کیفیتی در فواصل نزدیک‌تر، موافق‌تر از فواصل دورتر است.

۲. استفاده از جواب بهینه حاصل از الگوریتم مرحله نخست در تخمین‌زننده مرحله دوم، به این معنا نیست که شبکه ساخته‌شده برای تخمین‌زننده، برگرفته از جواب بهینه، در هر سه معیار نسبت به سایر جواب‌ها بهترین عملکرد را دارد. بلکه در نظرگیری هر سه معیار در تعامل با یکدیگر، جواب مرحله قبل را تعیین کرده است.

۳. تعداد ۹ متغیر از ۱۳ متغیر، وضعیت سلامت ژنراتور را ارزیابی می‌کنند. این موضوع به این معناست که شاخص‌های بیانگر وضعیت سلامت ژنراتور، بیشترین گویایی را در تعیین وضعیت مشخصه کیفیتی دارند. از این رو تمرکز بیشتر در رصد این مشخصه‌ها، می‌تواند انحرافات آینده مشخصه کیفیتی را پیش‌گویی کند. در یک روند کلی می‌توان برآورد کرد که در این مطالعه، تجهیزات انتهایی و نزدیک‌تر به محصول نهایی، ارتباط نزدیک‌تری با مشخصه کیفیتی محصول خروجی دارند.

۴. در استفاده از این ابزار برای عیب‌یابی فرایند تولید در راستای ارتقای کیفیت محصول خروجی، باید توجه داشت که ممکن است هماهنگ شدن مشخصه کیفیتی با برخی شاخص‌های بیانگر سلامت تجهیزات، به دلیل تأثیر همزمان آنها از یک عامل سوم باشد. از این رو شاخص‌های سلامت ژنراتور، می‌توانند برای پیش‌بینی مشخصه کیفیتی استفاده شوند، اما وجود انحراف در مشخصه کیفیتی به صورت قطع به معنای تأثیر بد ژنراتور در تولید برق نیست.

آنچه به‌عنوان مسئله در این مطالعه بررسی شد، نگاهی جدید در نگهداری وابسته به شرایط از نقطه تمرکز فرایند تصمیم‌گیری در نگهداری است. قطعاً این نوع نگاه، ایده‌های پژوهشی دیگر را خلق می‌کند که برخی از آنها عبارت‌اند از:

۱. توسعه مدل برای شرایطی که محصول، فیزیکی غیرپیوسته دارد. در مطالعات مربوط به محصولات غیرپیوسته، موضوعاتی همچون نمونه‌گیری و آزمایش‌های سنجش کیفیت وارد ابعاد مسئله خواهد شد.

۲. افزایش کارایی مدل با ایجاد مکانیسمی در راستای تشخیص خروج از حالت غیرپایدار

۳. ارتقای کارایی مدل با بهره‌گیری از ابزارها و تخمین‌زنده‌های قوی‌تر مانند شبکه‌های نوروفازی، بازگشتی و ...
۴. طراحی ماژول‌های مدیریت دانش و تجربه‌های تاریخی مطالعه مفهومی و جمله‌بندی
۵. تحلیل نحوه تأثیر تک تک تجهیزات فرایند تولید بر تک تک مشخصه‌های کیفیتی محصولات

منابع

- آقایی، رضا؛ آقایی، اصغر؛ حسینی ناجی‌زاده، رامین محمد (۱۳۹۴). شناسایی و رتبه‌بندی شاخص‌های کلیدی مؤثر بر نگهداری و تعمیرات چابک با استفاده از رویکرد دلفی فازی و دیمتل فازی (مطالعه موردی: صنعتی خودروسازی ایران). *مجله مدیریت صنعتی*، ۴(۴)، ۶۴۱-۶۷۲.
- اسماعیلیان، غلامرضا؛ لورک‌زاده، فروزان؛ زارعیان، رحمان (۱۳۹۴). ارزیابی و مقایسه اثربخشی پیاده‌سازی نت اصلاحی و نت پیشگیرانه با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها (مطالعه موردی: شرکت سیمکان). *مجله مدیریت صنعتی*، ۷(۲)، ۱۸۹-۲۱۴.
- حسن قاسمی، جلیل؛ کاظمی، عالییه؛ حسین‌زاده، مهناز (۱۳۹۵). گسترش عملکرد کیفیت (QFD) با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی فازی. *مجله مدیریت صنعتی*، ۸(۲)، ۲۴۱-۲۶۲.
- صفری، حسین؛ صادقی‌مقدم، محمدرضا؛ عبادی ضیایی، علی (۱۳۹۵). مدل‌سازی علی روابط میان معیارهای مدل تعالی سازمانی EFQM در بانک توسعه تعاون. *مجله مدیریت صنعتی*، ۸(۳)، ۴۲۳-۴۴۶.
- نشاط، نجمه؛ محلوچی، هاشم (۱۳۸۸). کنترل پیش‌بینانه کیفیت با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs) و روش ترکیبی تحلیل رگرسیون و ANNs. *مجله مدیریت صنعتی*، ۱(۳)، ۱۵۳-۱۷۰.

References

- Aghaee, R., Aghaee, A., & Najizadeh, R. M. H. (2016). Key effective factors on Agile Maintenance in vehicle industry using fuzzy Delphi method and Fuzzy DEMATEL. *Journal of Industrial Management*, 7(4), 641-672. (in Persian)
- Ahmad, R., & Kamaruddin, S. (2012). An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application. *Computers & Industrial Engineering*, 63(1), 135-149.
- Alander, J.T. (1992). On optimal population size of genetic algorithms. In *CompEuro '92. Computer Systems and Software Engineering, Proceedings*. (pp. 65-70). IEEE.
- Arunraj, N.S. & Maiti, J. (2007). Risk-based maintenance-Techniques and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 142(3), 653-661.
- Aurich, J. C., Siener, M., & Wagenknecht, C. (2006). Quality Oriented Productive Maintenance within the life cycle of a manufacturing system. In *13th CIRP international conference on life cycle engineering* (pp. 669-673). Citeseer.
- Baidya, R., Dey, P. K., Ghosh, S. K., & Petridis, K. (2018). Strategic maintenance technique selection using combined quality function deployment, the analytic hierarchy process and the benefit of doubt approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(1-4), 31-44.

- Ben-Daya, M. (1999). Integrated production maintenance and quality model for imperfect processes. *IIE Transactions*, 31(6), 491–501.
- Ben-Daya, M., & Duffuaa, S. O. (1995). Maintenance and quality: the missing link. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 1(1), 20–26.
- Ben-Daya, M., & Rahim, M. A. (2000). Effect of maintenance on the economic design of x-control chart. *European Journal of Operational Research*, 120(1), 131–143.
- Bouslah, B., Gharbi, A., & Pellerin, R. (2016). Integrated production, sampling quality control and maintenance of deteriorating production systems with AOQL constraint. *Omega*, 61, 110–126.
- Budai, G., Dekker, R., & Nicolai, R. P. (2008). Maintenance and production: a review of planning models. In *Complex system maintenance handbook* (pp. 321–344). Springer.
- Cassady, C. R., Bowden, R. O., Liew, L., & Pohl, E. A. (2000). Combining preventive maintenance and statistical process control: a preliminary investigation. *Iie Transactions*, 32(6), 471–478.
- Coley, D. A. (1999). *An introduction to genetic algorithms for scientists and engineers*. World Scientific Publishing Company.
- Esmailian, G., Zadeh, F. L., & Zareayan, R. (2015). Evaluating and comparing the implementation effectiveness of corrective maintenance and preventive maintenance with a systems dynamic approach (case study: Symcan company). *Journal of Industrial Management*, 7(2), 189–214. (in Persian)
- Hasan Ghasemy, J., Kazemi, A., & Hoseinzadeh, M. (2016). Quality Function Deployment by Using Fuzzy Linear Programming Model. *Journal of Industrial Management*, 8(2), 241–262. (in Persian)
- Hadidi, L. A., Al-Turki, U. M., & Rahim, A. (2011). Integrated models in production planning and scheduling, maintenance and quality: a review. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 10(1), 21–50.
- Hines, W. W., & Montgomery, D. C. (n.d.). *Probability and Statistics in Engineering and Management Science*, 1980. John Wiley & Sons.
- Karray, F. O., & De Silva, C. W. (2004). *Soft computing and intelligent systems design: theory, tools, and applications*. Pearson Education.
- Liu, B. (2006). Vibration data monitoring and design of multivariate ewma chart for cbm. Ph. D. Dissertation, University of Totonto.
- Liu, L., Yu, M., Ma, Y., & Tu, Y. (2013). Economic and economic-statistical designs of an X control chart for two-unit series systems with condition-based maintenance. *European Journal of Operational Research*, 226(3), 491–499.
- Mann, L., Saxena, A., & Knapp, G. M. (1995). Statistical-based or condition-based preventive maintenance? *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 1(1), 46–59.
- Mehdi, R., Nidhal, R., & Anis, C. (2010). Integrated maintenance and control policy based on quality control. *Computers & Industrial Engineering*, 58(3), 443–451.

- Montgomery, D. C. (2009). *Introduction to statistical quality control*. John Wiley & Sons (New York).
- Neshat, N., & Mahlooji, H. (2009). Predictive Process Control Using Artificial Neural Networks (ANNs) and A Combined Method of Regression Analysis and ANNs. *Journal of Industrial Management, 1*(3), 153–170. (in Persian)
- Panagiotidou, S., & Nenes, G. (2009). An economically designed, integrated quality and maintenance model using an adaptive Shewhart chart. *Reliability Engineering & System Safety, 94*(3), 732–741.
- Panagiotidou, S., & Tagaras, G. (2007). Optimal preventive maintenance for equipment with two quality states and general failure time distributions. *European Journal of Operational Research, 180*(1), 329–353.
- Panagiotidou, S., & Tagaras, G. (2008). Evaluation of maintenance policies for equipment subject to quality shifts and failures. *International Journal of Production Research, 46*(20), 5761–5779.
- Pandey, D., Kulkarni, M. S., & Vrat, P. (2010). Joint consideration of production scheduling, maintenance and quality policies: a review and conceptual framework. *International Journal of Advanced Operations Management, 2*(1–2), 1–24.
- Peck, C. C., Dhawan, A. P., & Meyer, C. M. (1993). Genetic algorithm based input selection for a neural network function approximator with applications to SSME health monitoring. In *Neural Networks, 1993., IEEE International Conference on* (pp. 1115–1122). IEEE.
- Radhoui, M., Rezg, N., & Chelbi, A. (2009). Integrated model of preventive maintenance, quality control and buffer sizing for unreliable and imperfect production systems. *International Journal of Production Research, 47*(2), 389–402.
- Rahim, M. A. (1993). Economic design of \bar{x} control charts assuming Weibull in-control times. *Journal of Quality Technology, 25*(4), 296–305.
- Rahim, M. A. (1994). Joint determination of production quantity, inspection schedule, and control chart design. *IIE Transactions, 26*(6), 2–11.
- Safari, H., Moghaddam, M.R.S., & Ziaei, A.E. (2016). Causal modeling of relationships between criteria for EFQM excellence model in TOSE'E TA'AVON bank. *Journal of Industrial Management, 8*(3), 423–446. (in Persian)
- Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Kavuri, S. N., & Yin, K. (2003). A review of process fault detection and diagnosis: Part III: Process history based methods. *Computers & Chemical Engineering, 27*(3), 327–346.
- Wang, W. (2012). A simulation-based multivariate Bayesian control chart for real time condition-based maintenance of complex systems. *European Journal of Operational Research, 218*(3), 726–734.
- Wu, J. (2006). *CBM optimization models with multivariate observations* (Vol. 68).
- Wu, J., & Makis, V. (2008). Economic and economic-statistical design of a chi-square chart for CBM. *European Journal of Operational Research, 188*(2), 516–529.

- Yeung, T. G., Cassady, C. R., & Schneider, K. (2007). Simultaneous optimization of [Xbar] control chart and age-based preventive maintenance policies under an economic objective. *IIE Transactions*, 40(2), 147–159.
- Yin, Z., & Makis, V. (2010). Economic and economic-statistical design of a multivariate Bayesian control chart for condition-based maintenance. *IMA Journal of Management Mathematics*, 22(1), 47–63.
- Zhang, G., Deng, Y., Zhu, H., & Yin, H. (2015). Delayed maintenance policy optimisation based on control chart. *International Journal of Production Research*, 53(2), 341–353.