



Designing an Intelligent Monitoring Model for Industrial Equipment with the Approach of Optimizing Transmission Delay and Data Processing Speed (Case Study: Wind Turbines)

Elham Aghazadeh *

PhD student in Industrial Management, Faculty of Management, Accounting and Human Sciences, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

Akbar Alem Tabriz 

Professor of Industrial Management Department, Faculty of Management and Accounting, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract

In today's industrial units, operators monitor equipment performance, and the challenging coordination between units in vast operating environments with high volumes of equipment can lead to irreparable damage. Despite considerable technological advancements in inspection and surveillance, this responsibility can be effectively delegated to smart devices and the Internet of Things (IoT). Furthermore, the emergence of "edge computing" technology has prompted researchers to explore edge-based computing designs due to their numerous benefits. This study presents a combined model of IoT and civilian drones for intelligent monitoring of industrial equipment performance, employing an edge computing approach. The model is specifically investigated through a case study involving wind turbines. The model evaluates the performance of drones for intelligent monitoring of wind turbines in three stages: 1) Detection process, 2) UAV computational evacuation process, and 3) UAV local computation process. Given the dual purpose of the final model, which involves a combination of the aforementioned three steps, a genetic method was employed for problem-solving with negligible sorting. The amplified epsilon restriction method, utilizing random numbers, was also considered, but the combination of

* Corresponding Author: elhamaghzadeh11@gmail.com

How to Cite: Aghazadeh, E., Alem Tabriz, A. (2024). Designing an Intelligent Monitoring Model for Industrial Equipment with the Approach of Optimizing Transmission Delay and Data Processing Speed (Case Study: Wind Turbines), *Industrial Management Studies*, 21(71), 1-41.

genetic and negligible sorting methods outperformed it, particularly in large problems where the enhanced epsilon restriction method struggled to provide timely responses due to the inherent complexity of the problem.

Introduction

Today, in various industries, the productivity and efficiency of equipment contribute to the advancement of production and the profitability of production units. Beyond repair costs, equipment breakdowns also result in the expense of lost opportunities for the production unit. Without a solution to prevent these costs, bankruptcy for production units becomes a real possibility. Therefore, consideration should be given to a solution for the optimal monitoring of equipment. Clearly, swift action is crucial when any equipment is damaged, and such rapid response is unattainable through human effort alone. Despite significant technological advances in inspection and monitoring, this task can be delegated to smart tools and the Internet of Things (IoT). The IoT is regarded as one of the most crucial factors for the prosperity and progress of today's and future industrial businesses. Modernizing equipment is a priority for today's industries to quickly adapt to the evolving market changes and harness existing technologies. Businesses incorporating IoT into their infrastructure experience substantial growth in areas such as security, productivity, and profitability. As the use of industrial IoT increases, productivity levels in industries are naturally expected to rise. The IoT can accumulate massive amounts of information and data, enabling factories and companies to optimize their systems and equipment without being hindered by technological and economic limitations. However, a challenge arises from the substantial volume of data generated by the IoT, which is sent to cloud computing centers for processing. Centralized (cloud) processing results in high communication delays and lowers the data transfer rate between IoT devices and potential users, creating operational challenges in the network. To address this issue, the concept of edge computing has been proposed. Edge computing allows IoT services to process data near their own data sources and data sinks instead of relying on the cloud environment. This approach leads to reduced communication delays and more efficient utilization of computing, storage, and network resources. It also minimizes execution time and energy consumption, proving to be highly beneficial for IoT applications.

3 | Designing an Intelligent Monitoring Model ... ; Aghazadeh & Alem Tabriz

Consequently, with the advent of "edge computing" technology, many researchers have embraced edge computing-based designs due to its numerous advantages.

Materials and Methods

In this research, a combined model of the Internet of Things and civilian drones was presented for the intelligent monitoring of industrial equipment, utilizing an edge computing approach. The model was investigated through a case study involving wind turbines. The performance of UAVs for intelligent monitoring of wind turbines was examined in three stages: 1) Detection process, 2) UAV computational evacuation process, and 3) UAV local computing process. Given the dual purpose of the final model, which involved a combination of the aforementioned three steps, the model was addressed using genetic methods with sparse sorting and the enhanced epsilon constraint method employing random numbers. The genetic method with sparse sorting outperformed the enhanced epsilon limit method, particularly in problems with large dimensions. The complexity of the problem made it challenging for the enhanced epsilon constraint method to provide timely responses in such cases.

Results

The findings of this research offer valuable insights for the effective and accurate management and monitoring of industrial equipment across various industrial units, aiming to optimize costs, quality, and inspection time. Additionally, this research can provide guidance in considering regulatory restrictions in equipment placement before constructing an industrial unit. During the equipment arrangement phase, the model presented in this research can be utilized for optimal energy consumption and time management. As the combined model of the Internet of Things and civilian drones for intelligent monitoring of industrial equipment is a novel concept in the literature, there exist numerous opportunities for further development in this field. This may include the application of the model in additional case studies, such as enhancing the intelligent monitoring of power supply systems, fire services, etc. Moreover, there is potential for refining the mentioned model under conditions where drones operate simultaneously without a specific sequence.

Conclusion


Failure to monitor industrial equipment properly can result in substantial financial losses for factories and production units. The improper operation of equipment may lead to complete failure, necessitating the need for replacement. Additionally, increased equipment downtime, quality issues, reduced production speed, safety hazards, and environmental pollution can be consequences of equipment failure, ultimately diminishing the profitability of the production unit. Considering factors such as embargoes, emphasis on domestic production, and self-sufficiency, accurate supervision becomes economically crucial for factories.

Effective management of the proper operation of industrial equipment is a fundamental requirement for every production unit, given that industrial equipment represents a significant investment for the unit. If device maintenance is limited to repairs only after breakdowns occur, production devices will consistently face unexpected halts, preventing production productivity from reaching its predetermined goals. Therefore, designing a framework for the "intelligent monitoring of the performance of all relevant industrial equipment" stands as one of the most crucial actions for any production unit. Depending on the type of equipment, monitoring the performance of industrial equipment may encompass periodic inspections, maintenance and repair planning, and scheduling the optimal operational time for the equipment.

Keywords: IoT, UAV, Edge Computing, Intelligent Monitoring.


طراحی مدل نظارت هوشمند بر تجهیزات صنعتی با رویکرد بهینه‌سازی تأخیر انتقال و سرعت پردازش داده‌ها (مطالعه موردی: توربین‌های بادی)

دانشجوی دکتری رشته مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، حسابداری و علوم

الهام آقازاده * 

انسانی، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

استاد گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید

اکبر عالم تبریز 

بهشتی، تهران، ایران

چکیده

امروزه در واحدهای صنعتی نظارت بر عملکرد تجهیزات توسط اپراتور انجام می‌شود و به علت گستردگی محیط عملیاتی و حجم بالای تجهیزات، هماهنگی بین واحدها به سختی امکان‌پذیر بوده و صدمات جبران‌ناپذیری در پی دارد. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر تکنولوژی در زمینه بازرسی و نظارت، می‌توان این وظیفه را به ابزارهای هوشمند و اینترنت اشیاء سپرد. همچنین، با ظهور فناوری محاسبات «رایانش لبه»، بسیاری از محققان به دلیل مزایای آن، از طراحی‌های مبتنی بر محاسبات لبه‌ای بهره‌بردارند. لذا در این پژوهش مدلی ترکیبی از اینترنت اشیاء و بهیادهای غیرنظامی جهت نظارت هوشمند بر عملکرد تجهیزات صنعتی با رویکرد رایانش لبه ارائه شد که به عنوان مطالعه موردی توربین‌های بادی مورد بررسی قرار گرفت. در این مدل، عملکرد بهیاد جهت نظارت هوشمند بر توربین‌های بادی در سه مرحله مورد بررسی قرار گرفت. (۱) فرآیند تشخیص (۲) فرآیند تخلیه محاسباتی بهیاد (۳) فرآیند محاسبات محلی بهیاد. با توجه به دو هدفه بودن مدل نهایی که ترکیبی از سه مرحله فوق بود، مدل توسط روش‌های ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره و روش محدودیت اسپیلن تقویت‌شده با استفاده از اعداد تصادفی حل شد و روش ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره عملکرد بهتری داشت؛ زیرا در مسائل با ابعاد بزرگ، به دلیل پیچیدگی مسئله، روش محدودیت اسپیلن تقویت‌شده قادر به پاسخگویی در زمان مناسب نبود.

کلیدواژه‌ها: اقتصادمدور، انقلاب صنعتی چهارم (صنعت ۴.۰)، پایداری، توانمندسازی، دیمتلفازی.

* نویسنده مسئول: elhamaghzadeh11@gmail.com

مقدمه

امروزه در صنایع مختلف، بهره‌وری و کارایی تجهیزات موجب پیشرفت تولیدات و سودآوری واحدهای تولیدی می‌شود. از کارافتادن تجهیزات و ماشین‌آلات علاوه بر هزینه تعمیرات، هزینه فرصت ازدست‌رفته را بر واحد تولیدی متحمل می‌سازد و در صورتی که راهکاری برای جلوگیری از این هزینه‌ها ارائه و اجرا نشود، می‌تواند واحدهای تولیدی را رو به ورشکستی ببرد. لذا باید در جهت نظارت بهینه تجهیزات چاره‌ای اندیشید. واضح است، هنگام آسیب هر تجهیز سرعت عمل برای رسیدگی به آسیب اهمیت بالایی دارد و این سرعت عمل توسط نیروی انسانی امکان‌پذیر نیست. لذا برای انتقال سریع اطلاعات مربوط به هر آسیب و خرابی می‌توان از تکنولوژی‌های پیشرفته مانند سنسورها و پهپادها در بستر اینترنت استفاده کرد که ترکیب این موارد، موضوع اینترنت اشیا^۱ را یادآور می‌شود.

اینترنت اشیا یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در رونق و پیشرفت کسب‌وکارهای صنعتی امروزی و آینده تلقی می‌شود. صنایع امروزی در حال تلاش هستند تا در جهت مدرنیزه کردن تجهیزات خود برآیند تا بدین طریق با سرعت، با تغییرات رو به رشد بازار خو گرفته و از تکنولوژی‌های موجود استفاده کنند. کسب‌وکارهایی که از اینترنت اشیا در زیرساخت‌های خود استفاده کرده‌اند، به‌طور چشمگیری در زمینه‌هایی همچون امنیت، بهره‌وری و همچنین سودآوری، رشد داشته‌اند. هرچه استفاده از اینترنت اشیا صنعتی افزایش یابد، میزان بهره‌وری‌های ذکرشده در صنایع نیز بالطبع افزایش خواهد یافت. اینترنت اشیا می‌تواند حجم انبوهی از اطلاعات و داده‌ها را جمع‌آوری کند و به کارخانجات و شرکت‌ها این اجازه را دهد که بیشترین بهره‌وری را از سیستم‌ها و تجهیزات خود کسب کنند، بدون اینکه محدودیت‌های تکنولوژیکی و اقتصادی مانع این امر شوند؛ اما مسئله‌ای که در این میان موجود است این است که حجم داده‌های تولیدشده توسط اینترنت اشیا بسیار زیاد است و این حجم داده برای پردازش به مرکز رایانش ابری^۲ فرستاده می‌شود. به دلیل اینکه روش پردازش متمرکز (ابر) منجر به تأخیرهای ارتباطی بالا شده و نرخ انتقال داده‌ها بین دستگاه‌های اینترنت اشیا و کاربران بالقوه را پایین می‌آورد،

1. Internet of Things (IOT)
2. Cloud Computing

طراحی مدل نظارت هوشمند بر تجهیزات صنعتی با رویکرد بهینه‌سازی ...؛ آقازاده و عالم تبریز | ۷

اجرای عملیاتی آن با مشکلاتی در شبکه مواجه است. برای حل این مشکل، اخیراً مفهوم رایانش لبه‌ای پیشنهاد شده است که اجازه می‌دهد تا سرویس‌های اینترنت اشیا به منظور پردازش داده به جای درگیر شدن در محیط ابری، در نزدیکی منابع داده و سینک‌های داده خودشان پردازش شوند. این منجر به پایین آمدن تأخیرهای ارتباطی و استفاده بهتر از منابع رایانشی، ذخیره‌سازی و منابع شبکه‌ای می‌شوند. همچنین می‌تواند در زمان اجرا و میزان مصرف انرژی را کاهش دهد که در واقع برای به کارگیری اینترنت اشیا می‌تواند بسیار مفید باشد (Chagh, Guennoun, Jouihri, 2016,119). لذا، برای سرعت بخشی به بازرسی تجهیزات واحدهای تولیدی و جمع‌آوری اطلاعات آن‌ها می‌توان از رایانش لبه‌ای در بستر اینترنت اشیا بهره گرفت.

از طرفی، پهنابندها یکی از بهترین ابزارهای سنجش از راه دور برای جمع‌آوری داده‌ها در محیط‌های وسیع مانند کارخانجات هستند. آن‌ها در محیط‌های صنعتی برای حل مشکلات پیچیده، جلوگیری از خسارات احتمالی، کمک در تصمیم‌گیری و تولید با کیفیت مورد استفاده بهینه قرار می‌گیرند. پهنابندها یک بستر فناوری بسیار سازگار برای جمع‌آوری داده‌های کارآمد و مقرون به صرفه و نظارت بر رویدادها هستند. برای ایجاد ارتباط مؤثر بین پهنابندها و مناطق صنعتی مورد نظر، استفاده از فناوری‌های مربوط به اینترنت اشیا مانند سنسورها، موقعیت‌یاب‌ها و... ضروری است. لذا با ترکیب تکنولوژی پهنابندها و اینترنت اشیا و رایانش لبه می‌توان نظارت هوشمند بر عملکرد تجهیزات صنعتی مانند توربین‌های بادی را بهبود بخشید (کاظمی و الهیان، ۱۳۹۹، ۵۴).

پیشینه پژوهش

باتوجه به لزوم پایش ویدیویی جهت نظارت بر محیط‌های صنعتی و قابلیت بالای پهنابندها در این امر، استفاده از آن‌ها در حوزه نظارت و پایش صنعتی گسترش یافته است. در ابتدا پهنابندهای نظارتی تنها وظیفه فیلمبرداری و عکسبرداری از محیط‌های مورد نظر را داشتند اما به تدریج و با گسترش مفهوم اینترنت اشیا، با نصب حسگرها بر روی آن‌ها، علاوه بر قابلیت فیلمبرداری و عکسبرداری، کارکردهای بیشتری از جمله پردازش داده‌های حاصل از فیلم‌ها و عکس‌ها و ارسال داده‌های پردازش شده به اپراتور یا ابر یا سرور را نیز پشتیبانی

کردند و در واقع تبدیل به سیستمی جهت نظارت هوشمند شدند (Al-Khafaji, 2022,) (91).

سیستم‌های نظارت هوشمند ابزارهای مشاهده‌ای هستند که به‌طور مداوم داده‌های مربوط به عملکرد سیستم را از زیرساخت‌های فناوری اطلاعات راه دور جمع‌آوری می‌کنند و آن‌ها را از طریق یک رابط برای کاربر «ارسال» می‌کنند تا به کاربر اجازه دهند بر اساس آن داده‌ها تصمیم بگیرد. به‌طور خاص، نقشه‌ای از زیرساخت محل مورد نظارت ارائه می‌دهد که برای عملیات و مدیریت فناوری اطلاعات کاربر مفید است. به‌عنوان مثال، ممکن است در بازه‌های زمانی خاصی افزایش مصرف قابل توجهی در سیستم رخ دهد که منجر به تأخیر در زمان پاسخگویی برای کاربران سیستم شود؛ بدون داده‌ها و گزارش‌های بی‌درنگ ارائه‌شده توسط نظارت هوشمند، ممکن است نتوان تعیین کرد که چه زمانی و چرا این جهش‌ها رخ می‌دهند. با نظارت هوشمند، می‌توان دلایل را محدود کرد و استراتژی یا زیرساخت سیستم را بر اساس آن داده‌ها تنظیم کرد (Bahhar, Chokri, Sofiene, 2021). لذا در این پژوهش با توجه به اهمیت نظارت بر تجهیزات صنعتی و توضیحاتی که در رابطه با هوشمندسازی ذکر شد، نیاز است تا به بررسی مدلی بهینه برای نظارت هوشمند بر تجهیزات صنعتی توسط پهپادها پرداخت. حول این موضوع تاکنون پژوهش‌های صورت گرفته است اما همانطور که در ادامه مشاهده می‌شود، تاکنون پژوهشی حول نظارت هوشمند توسط پهپادها با رویکرد رایانش لبه صورت نگرفته است و این مورد به‌عنوان خلأ تحقیقاتی یافت شد.

قضاوی و رحمانی (۱۴۰۰)، در پژوهشی تحت عنوان ارائه مدلی برای مسیریابی پهپاد برای نظارت بر مناطق آسیب‌دیده پس از بحران، یک مدل برنامه‌ریزی خطی - عدد صحیح برای این مسئله ارائه دادند که برخلاف مسئله مسیریابی کلاسیک که فقط ترتیب بازدید مجموعه‌ای از گره‌ها را تعیین می‌کند، ارتفاع بازدید از هر گره توسط یک پهپاد نیز مشخص می‌شود. به‌علاوه، به‌علت اینکه میزان محدودیت باتری بر زمان پرواز پهپاد تأثیر می‌گذارد، مصرف انرژی هر پهپاد را در نظر خواهد گرفت تا به واقعیت نزدیک‌تر باشد. هدف از این مدل به حداقل رساندن کل زمان و برآورده کردن اولویت گره‌ها برای نظارت

طراحی مدل نظارت هوشمند بر تجهیزات صنعتی با رویکرد بهینه‌سازی ...؛ آفازاده و عالم تبریز | ۹

بود که در نرم‌افزار گمز کدنویسی شده و عملکرد آن با یک مثال عددی مورد تحلیل قرار گرفت.

قضاوی و طباطبا (۱۳۹۹)، به بررسی کاربرد پهپادها در امنیت عمومی و پلیس هوشمند پرداختند و مزایا و معایب استفاده از انواع پهپاد در امنیت عمومی را مورد بررسی قرار دادند. همچنین تعدادی از پروتکل‌های مناسب برای استفاده پهپادها در اینترنت اشیا را نیز معرفی و مورد تحلیل قرار دادند.

حقیقی و همکاران (۱۳۹۷)، ضمن تشریح حالت‌های مختلف پیمایش و گشت‌زنی برای سامانه‌های هوایی تک و چند فروندی، رابطه زمان کمینه بازبینی استخراج و برای یک پهپاد مشخص با قیود بیان‌شده، ارتباط آن با دیگر پارامترهای پروازی بررسی کردند. همچنین تأثیر تغییر تعداد عامل‌ها و سرعت بر کارایی نظارت مداوم و کمینه‌سازی زمان بازبینی ارزیابی‌شده و با حالت‌های دیگر پیمایش مقایسه گردید. نتیجه کارکردهای بیان‌شده در این مقاله، بسط و توسعه روابط پایه نظارت مداوم برای تعداد عامل‌های مشخص، به سایر شرایط یا سایر رفتارهای پیمایشی است. نتایج نشان می‌دهد که در سرعت‌های بالای پهپاد موردنظر، افزایش تعداد پهپاد در یک مساحت مشخص، کارایی چندانی در بهبود کمینه زمان بازبینی ندارد و بازه‌ای بر اساس سرعت و تعداد پهپادها می‌توان تعیین نمود که در این بازه زمان بیشینه بازبینی همواره کمینه باشد.

علی‌پور و همکاران (۱۳۸۸)، نشان دادند که پرنده‌های هدایت‌پذیر از دور (پهپاد)، نسبت به روش‌های دیگر بازرسی خطوط لوله در ایران دارای برتری هستند. پهپادها با توجه به انعطاف‌پذیری و قابلیت حمل حسگرهای متنوع می‌توانند پاسخگوی نیازهای عملیاتی خطوط لوله در ایران باشند.

آتریاسا (Athreya, 2021)، به تجزیه و تحلیل ترافیک جاده با استفاده از هواپیمای بدون سرنشین (پهپادها) مبتنی بر پردازش تصویر و محاسبات لبه پرداخت. او با ترکیب مفاهیم تشخیص لبه در پردازش تصویر و محاسبات لبه، یک روش ساده برای تجزیه و تحلیل ترافیک جاده با استفاده از پهپادها ارائه داد. نتایج منعکس‌کننده

انعطاف پذیری بالا و نمای واضح کلی گرفته شده توسط فیلم‌ها و عکس‌های پهپادها است و سیستم تجزیه و تحلیل ترافیک مبتنی بر پهپاد مورد تأیید قرار گرفت.

در پژوهشی تحت عنوان پهپادهای مجهز به 5G/ IoT که توسط آل ترجمان و آل ترجمان (Alturjman, Alturjman, 2020) منتشر شد، برای تحویل چندرسانه‌ای در برنامه‌های صنعت گرا، به طراحی و مسیریابی چندراهی جدا از هم^۱ در اینترنت صنعتی اسیا برای سیستم تحمل خطا با استفاده از پهپاد برای انتقال چندرسانه‌ای به یک گره مافوق در شبکه WSN ناهمگن دو ردیفه پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد رویکرد پیشنهادی CPS در مقایسه با بهینه‌سازی CPMS متداول و بهینه‌سازی FMPS، روش بهتری است.

در پژوهش دیگری ولفوویچ و همکاران (Wulfovich, Rivas, Matabuena, 2020)، عملکرد پهپادها را در صورت عملیات نجات، فوریت‌های پزشکی کشف مورد بررسی قرار دادند. پارامترهای مختلف مانند سرعت پهپادها، مسافت پهپادها تا ایستگاه‌های مرکزی، مصرف انرژی پهپادها برای درک عملکرد پهپادها بسیار مهم هستند. بر اساس این مطالعه پهپادها تأثیر زیادی در پزشکی از راه دور و بهداشت دارند.

پژوهشی تحت عنوان بازرسی روتین مجهز به پهپاد مبتنی بر رایانش لبه متحرک در مزرعه بادی توسط کائو و همکاران (Cao, Chao, Shengli, Kan, 2019) مدلی را جهت نظارت بر عملکرد توربین‌های بادی ارائه نمود که شامل سه بخش زمینی، فضایی و هوایی بود. در این مدل یک پهپاد با عکس برداری از تجهیزات توربین و ارسال اطلاعات به سرور لبه از خدمات ناشی از خرابی توربین‌ها جلوگیری می‌کرد. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده بهینگی مدل پیشنهادی بود.

پژوهشی که توسط سالهوی و همکاران (Salhaoui, Guerrero, Antonio, Arioua, Francisco, Ortiz, Oualkadi, Torregrosa, 2019) ارائه شد، به بررسی سیستم هوشمند نظارت و کنترل اینترنت اسیا مبتنی بر پهپاد و رایانش ابری اعمال شده در یک کارخانه بتن پرداخته است. در محیط‌های مختلف کارخانه پهپاد، اطلاعات حاصل از تصویربرداری را به ایستگاه زمینی ارسال کرده و سیستم پیشنهادی توسط رایانش ابری پس از جمع‌آوری

طراحی مدل نظارت هوشمند بر تجهیزات صنعتی با رویکرد بهینه‌سازی...؛ آقازاده و عالم تبریز | ۱۱

۵۲۰۰ نمونه به بررسی بهینه‌سازی نحوه قرارگیری پهپاد در مکان‌های مختلف و میزان تأخیر کل می‌پردازد. نتایج به دست آمده به وضوح امکان برقراری مدل پیشنهادی را در ارائه یک سیستم مطمئن و کارآمد برای کنترل از راه دور پهپاد برای بهبود کیفیت محصول و کاهش ضایعات نشان داد.

نا و همکاران (Na, Mengshu, Jun, 2019)، به ارائه یک مدل ارتباطی بیسیم WPS چندحامل^۱ به کمک پهپاد برای سناریوهای اینترنت اشیا پرداختند. در این پژوهش از الگوریتم تکرار جایگزین^۲ استفاده شد. ابتدا، برای مسیر پهپاد، با استفاده از روش چندمنظوره لاگرانژ، مجموعه زیر حامل، قدرت زیر حامل و تخصیص زیر لبه بهینه می‌شوند. سپس، برای تنظیم مجموعه ثابت حامل، قدرت زیر حامل و تخصیص زیر لبه، مسیر پهپاد توسط CVX برای حالت یک پرواز و حالت پرواز دوره‌ای بهینه می‌شود. در نهایت، تابع هدف با بهینه‌سازی تخصیص منابع و مسیر پهپاد به طور تکراری حل می‌شود. الگوریتم پیشنهادی می‌تواند مسیر پهپاد را بهینه کند و با حرکت گره سازگار شود. در مقایسه با طرح‌های متداول تخصیص منابع، طرح پیشنهادی نه تنها به میزان قابل توجهی نرخ حداقل قابل دستیابی را افزایش می‌دهد، بلکه برای دو حالت پرواز نیز به خوبی کار می‌کند. لاگاس و همکاران (Lagkas, Bibi, Argyriou, Panagiotis, 2018)، به طراحی سیستمی جهت امنیت پهپادهای غیرنظامی در صنایع به‌عنوان شیء در اینترنت اشیا پرداختند. پارامترهای اصلی این پژوهش امنیت و حریم خصوصی پهپادها در شبکه‌های توزیع برق و شبکه خون‌رسانی بیمارستان‌ها بود که با استفاده از سنسورهای مادون قرمز، اینفرارد و سنسورهای موقعیت‌یاب چارچوبی جهت ایجاد شبکه پهپادها به‌عنوان جزئی از اینترنت اشیا ارائه و کارایی آن تأیید شد.

در تحقیق حاضر، مدلی ترکیبی از اینترنت اشیا و پهپادهای غیرنظامی جهت نظارت هوشمند بر عملکرد تجهیزات صنعتی با رویکرد رایانش لبه ارائه شده است که به‌عنوان مطالعه موردی توربین‌های بادی مورد بررسی قرار گرفت. مدل ارائه شده توسط روش‌های

-
1. Multi-Carrier
 2. Alternative Iteration Algorithm

ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره و روش محدودیت اِپسِلین تقویت‌شده با استفاده از اعداد تصادفی حل شده است.

جنبه نوآوری پژوهش

براساس مطالعه پیرامون موضوعات اینترنت اشیا، نظارت هوشمند، رایانش لبه و پهنادهای غیرنظامی، مقالات زیادی در رابطه با هر یک از این موضوعات منتشر شده‌اند. تعدادی از مقالات به نظارت هوشمند بر مبنای اینترنت اشیا پرداخته‌اند. تعداد دیگری از مقالات به نظارت هوشمند بر مبنای اینترنت اشیا با استفاده از پهنادهای پرداخته‌اند؛ اما مقاله‌ای که از مفهوم رایانش لبه جهت نظارت هوشمند بر مبنای اینترنت اشیا بهره گرفته باشد، موجود نیست و این مسئله نشان‌دهنده جدید بودن موضوع پژوهش است.

همچنین در رابطه با مدل ارائه‌شده در این پژوهش، لازم به ذکر است که دلایل وجود محدودیت‌ها و توابع هدف با توضیحات کامل در بخش مراحل اجرای پژوهش شرح داده شده است و دو تابع هدف و شش محدودیت مدل پیشنهادی به‌طور کامل جزو نوآوری پژوهش محسوب می‌شود و از مرجع دیگری اقتباس نشده است.

روش پژوهش

از آنجایی که مدل این پژوهش از نوع چندهدفه است و برای حل آن نیازمند روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه هستیم، در این بخش به معرفی و تشریح دو روش محدودیت اِپسِلین تقویت‌شده و الگوریتم فراالبتکاری ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره (نسخه دوم) پرداخته‌ایم.

روش محدودیت اِپسِلین علی‌رغم دارا بودن مزیت‌های فراوان نسبت به روش

وزن‌دهی، در موارد زیر باید به آن توجه کرد (Mavrotas, 2009):

(۱) محاسبه دامنه توابع هدف در مجموعه کارا

(۲) تضمین کارا بودن جواب به‌دست‌آمده

(۳) افزایش زمان حل مسئله در صورت وجود بیش از دو تابع هدف

به‌منظور اعمال روش محدودیت اِپسِلین باید دامنه هر یک توابع هدف (حداقل $k-1$ تابع

طراحی مدل نظارت هوشمند بر تجهیزات صنعتی با رویکرد بهینه‌سازی...؛ آفازاده و عالم تبریز | ۱۳

هدف که در محدودیت‌ها قرار می‌گیرند) را در اختیار داشته باشیم. در روش محدودیت اِپسِلِن بهترین و بدترین مقادیر به‌راحتی از طریق بهینه‌سازی تک‌هدفه و با قرار دادن هدف موردنظر به‌عنوان تابع هدف مدل، محاسبه می‌شوند که این روش تضمین‌کننده به دست آوردن جواب‌های کارا برای بهینه‌سازی تک‌هدفه هر تابع هدف نمی‌باشد.

در روش محدودیت اِپسِلِن تقویت‌شده به‌منظور غلبه بر ضعف‌های موجود در روش محدودیت اِپسِلِن، برای محاسبه مقادیر جدول نتایج نهایی، برای هر تابع هدف از روش لکسیکوگراف استفاده می‌کند. در نتیجه جدول نتایج نهایی در این روش تنها از جواب‌های کارا تشکیل می‌شود. همچنین جواب‌های به‌دست‌آمده از روش محدودیت اِپسِلِن، ممکن است منجر به جواب کارای ضعیفی شود. بدین منظور، روش محدودیت اِپسِلِن تقویت‌شده محدودیت‌های مربوط به توابع هدف فرعی را با قرار دادن متغیرهای کمکی به تساوی تبدیل می‌کند (Mavrotas, 2009).

الگوریتم ژنتیک در ابتدا با مجموعه‌ای از جواب‌های تصادفی که به آن جمعیت اولیه گفته می‌شود، آغاز می‌گردد. جمعیت از تعدادی کروموزوم تشکیل می‌شود که هر کروموزوم نشان‌دهنده یک نقطه از فضای جواب می‌باشد. هر کروموزوم نیز از تعدادی ژن تشکیل می‌شود که هر ژن نشانگر یک ویژگی خاص است. در هر تکرار از الگوریتم، کروموزوم‌ها ارزیابی می‌شوند. کروموزوم‌های با شایستگی بالاتر شانس بیشتری برای تولید فرزندان دارند. بر همین اساس، عمل انتخاب والدین انجام می‌گیرد و با اعمال عملگرهای ژنتیک بر روی آن‌ها فرزندان تولیدشده و جمعیت تکرار بعدی الگوریتم را تشکیل می‌دهند (Pasandideh, Niaki, 2012).

در الگوریتم ژنتیک به‌منظور تولید فرزندان از جمعیت والد و تولید جمعیت برای تکرارهای بعدی الگوریتم، از عملگرهای انتخاب^۱، تقاطع^۲ و جهش^۳ استفاده می‌شود. الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره^۴ بر اساس الگوریتم ژنتیک برای حل مسائل

-
1. Selection Operator
 2. Crossover Operator
 3. Mutation Operator
 4. Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA)

چندهدفه توسعه داده شده است. در این تحقیق به منظور حل مدل ارائه شده در ابعاد بزرگ و به دلیل کاهش کارایی روش حل دقیق ارائه شده در بخش های پیشین، نسخه دوم روش فراابتکاری ژنتیک با مرتب سازی ناچیره پیشنهاد شده است.

مراحل اجرای پژوهش

مراحل اجرای این تحقیق به صورت زیر است:

الف- تولید داده با استفاده از پهپادها: با استفاده از پهپادهایی که روی محدوده مورد نظر مستقر شده اند، از تجهیزات صنعتی مورد مطالعه در بازه های زمانی مشخص تصویربرداری می شود. در ابتدا پهپادها بر روی محدوده قرار گرفته اند و شروع به پرواز می کنند و با استفاده از دوربین پیشرفته ای که بر روی آنها نصب شده است، از قسمت های مختلف تجهیزات صنعتی عکس برداری می کنند. عکس برداری تا جایی ادامه می یابد که شارژ پهپاد در حال پرواز به اتمام برسد. پس از کاهش شارژ، پهپاد به محلی از محدوده صنعتی که ایستگاه شارژ قرار گرفته است فرود می آید تا شارژ مجدد شود و پهپادی که شارژ دارد شروع به پرواز می کند. این فرآیند آن قدر ادامه می یابد تا از تمامی تجهیزات مورد بررسی عکس برداری شود.

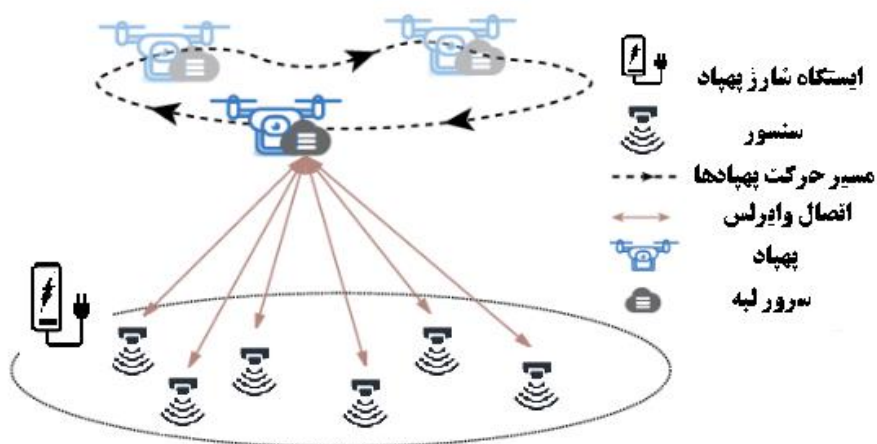
ب- رایانش لبه و رایانش ابری: یک سرور لبه جهت دریافت و پردازش داده های ارسالی از پهپادها در بخشی از محدوده صنعتی مستقر شده است و پهپادها پس از عکس برداری از هر یک از تجهیزات اطلاعات حاصل از عکس برداری را به سرور لبه یا ابر جهت پردازش ارسال می کنند. اینکه تخلیه اطلاعات در لبه صورت گیرد یا ابر بستگی به مدت زمان مورد نیاز برای تخلیه اطلاعات و انرژی مورد نیاز دارد. لازم به ذکر است که هم بر روی تجهیزات صنعتی و هم بر روی پهپادها، سنسورهای مختلفی از قبیل سنسور تشخیص فاصله، سنسور ژيروسکوپ (سرعت زاویه ای) جهت تشخیص سرعت حرکت تیغه توربین، سنسور تشخیص حرکت جهت تشخیص حرکت تیغه های توربین، سنسور تشخیص آتش و شعله، سنسور تشخیص رنگ برای بررسی زدگی یا شکستگی در تیغه توربین ها نصب می گردد.

در این پژوهش، یک مزرعه بادی در نظر گرفته شده است که در آن تعداد زیادی

طراحی مدل نظارت هوشمند بر تجهیزات صنعتی با رویکرد بهینه‌سازی...؛ آفازاده و عالم تبریز | ۱۵

توربین بادی برای تولید برق وجود دارد. در این مزرعه یک پست ترانسفورماتور مجهز به سرور لبه قرار گرفته است تا پوشش محدودی برای خدمات ارتباطی و محاسباتی برای پهپاد ایجاد کند. همچنین این ترانسفورماتور مجهز به ایستگاه شارژ پهپاد است. در مدل پژوهش، چندین پهپاد وجود دارد که مجهز به دوربین HD، واحدهای ارتباطی و واحدهای محاسباتی هستند. شکل ۱، نمای کلی معماری مدل پژوهش را نشان می‌دهد:

شکل ۱. طریقه عملکرد سیستم پیشنهادی



مأموریت پهپاد شناسایی N توربین بادی در مزرعه مورد نظر است. از آنجا که شارژ پهپاد محدود است، برای شناسایی تمام توربین‌ها پهپاد نیازمند انجام K پرواز است. مجموعه $N = \{1, 2, \dots, N\}$ و مجموعه $K = \{1, 2, \dots, K\}$ پرواز با K مشخص می‌شوند. هر پرواز پهپاد شامل سه مرحله تشخیص تیغه توربین، انتقال محاسبات و شارژ مجدد است. پس از شارژ شدن پهپاد، در مسیر برنامه‌ریزی شده پرواز مجدد را شروع می‌کند و زمانی که به یک توربین بادی می‌رسد، شروع به تشخیص و بررسی آن می‌کند و با عکس‌برداری و فیلم‌برداری و همچنین استفاده از سنسور تشخیص رنگ نصب شده بر روی پهپاد، وضعیت سطح تجهیزات توربین به‌ویژه تیغه‌های آن مشخص می‌شود. بدین صورت که فرضاً اگر رنگ تیغه سالم پهپاد سفید باشد، در صورت شکستگی بخشی از تیغه، در قسمت

شکسته شده رنگ سفید توسط سنسور تشخیص داده نمی‌شود. پس از اینکه عکس برداری انجام شد، پهپاد باید داده‌های خود را توسط سرور لبه یا ابر پردازش کند و در نهایت به ابر ارسال کند. با توجه به اهمیت زمان و به هنگام بودن داده‌های یافت شده، پهپاد باید قبل از تشخیص توربین بعدی داده‌ها را پردازش کند. زمانی که تمامی توربین‌های مسیر مورد بررسی تشخیص داده شدند، پهپاد برای شارژ به ترانسفورماتور بازمی‌گردد. پس از شارژ شدن پهپاد برای پرواز در مسیر جدید بلند شده و این فرآیند تا زمانی که تمامی توربین‌ها مورد بررسی قرار گیرند، ادامه می‌یابد.

برای مدل‌سازی این فرآیند، سیستم مختصات سه‌بعدی اقلیدسی جهت اندازه‌گیری فاصله‌ها به کاررفته است. در این سیستم فرض بر این است که مرکز تیغه توربین‌ها همگی در ارتفاع Z_n از زمین قرار گرفته‌اند و موقعیت افقی آن‌ها از نظر عرض و ارتفاع با $l_n = (x_n, y_n)$ نمایش داده می‌شود. همچنین فرض بر این است که ترانسفورماتور در مرکز زمین و در ارتفاع H_0 قرار گرفته است $(0, 0, H_0)$. پهپادها در حین فرآیند تشخیص توربین در ارتفاعی برابر تیغه توربین‌ها (Z_n) هستند. در حالی که پهپاد در طول فرایند پرواز و تخلیه اطلاعات به دست آمده برای کاهش تأثیر باد در کمترین ارتفاع Z_s در حال پرواز است، زیرا سرعت باد با ارتفاع پرواز افزایش می‌یابد. مختصات قرارگیری پهپاد در زمان t با $q[t] = (x_t, y_t)$ و $t \in T$ و $T = \{1, 2, \dots, T\}$ بنابراین، فاصله بین پهپاد و ترانسفورماتور $(d_{TS,t})$ و فاصله بین پهپاد و توربین‌ها $(d_{n,t})$ از طریق روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$d_{TS,t} = \sqrt{x_t^2 + y_t^2 + (z_s - H_0)^2} \quad (1)$$

$$d_{n,t} = \sqrt{(x_t - x_n)^2 + (y_t - y_n)^2} \quad (2)$$

در فرآیند تشخیص، فرض می‌شود که زمان تشخیص توسط پهپاد ثابت (t_d) و وابسته به اندازه تیغه توربین است. برای اطمینان از دقت تشخیص، پهپاد باید به پره‌های توربین نزدیک شود. با توجه به این که ممکن است سرعت باد در هر زمان تغییر کند، هنگامی که در حین فرایند تشخیص وزش باد رخ داد، ممکن است باعث برخورد پهپاد

طراحی مدل نظارت هوشمند بر تجهیزات صنعتی با رویکرد بهینه‌سازی...؛ آفازاده و عالم تبریز | ۱۷

با پره‌های توربین و صدمه به هر دو شود. برای جلوگیری از آسیب به تیغه ناشی از برخورد پهپاد، فاصله تشخیص ایمنی با رابطه $d_s = v_w t_s$ به دست می‌آید که در آن v_w سرعت باد و t_s مدت زمان عکس‌العمل پهپاد پس از وزش باد است.

دقت تشخیص دوربین با افزایش فاصله تشخیص بین پهپاد و توربین کاهش می‌یابد. برای محاسبه رابطه بین فاصله تشخیص و احتمال تشخیص موفق، از یک مدل احتمالاتی که در مقاله ژانگ و همکاران آمده، استفاده شده است.

$$P_s = e^{-\lambda d_s} \quad (۳)$$

که λ پارامتری است که عملکرد دوربین را منعکس می‌کند.

در این پژوهش فرض شده که کانال بی‌سیم بین پهپاد و ترانسفورماتور قرار دارد. بنابراین با توجه به مقاله ژو و همکاران (Zhao, Zhou, Guo, X, Zhao, Niu, 2016)، افزایش قدرت این کانال از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$g_t = \beta_0 d_{TS,t}^{-2} \quad (۴)$$

β_0 میزان افزایش قدرت کانال در فاصله $d=1\text{m}$ است.

باتوجه به قدرت انتقال اطلاعات در هر پهپاد $P_0[n]$ ، نرخ انتقال اطلاعات در توربین n ام $(r_{t_0}[n])$ براساس پژوهش ژانگ و همکاران (Zhang, Mao, Leng,) (Vinel, Zhang, 2016)، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$r_{t_0}[n] = B \log_2 \left(1 + \frac{P_0[n]g_t}{\sigma^2} \right) \quad (۵)$$

که در آن، B پهنای باند ارتباط و σ^2 واریانس نویز سفید با میانگین صفر است. بنابراین، میزان انتقال محاسبات $R_{t_0}[n]$ و میزان مصرف انرژی در انتقال محاسبات $E_{t_0}[n]$ در زمان $t_0[n]$ در حالتی که اطلاعات به ترانسفورماتور منتقل شوند از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R_{t_0}[n] = r_{t_0}[n]t_0[n] \quad (۶)$$

$$E_{t_0}[n] = P_0[n]t_0[n] \quad (۷)$$

در محیط‌های بزرگ، با افزایش فاصله انتقال، در مسیر کانال انتقال موانعی^۱ قرار می‌گیرد و این مورد باعث کاهش نرخ موفقیت در انتقال می‌شود. در این رساله برای محاسبه احتمال موفقیت در ارسال اطلاعات از مدل احتمال 3GPP استفاده شده است که به صورت زیر است:

$$Pr_{t0} = \begin{cases} 1, & d_{TS} \leq d_{t0} \\ \frac{d_{t0}}{d_{TS}} + e^{\frac{-d_{TS} + d_{t0}}{P_0}}, & d_{TS} > d_{t0} \end{cases} \quad (۸)$$

که در رابطه فوق، $d_{t0} = ۲۹۴/۰۵ \log(z_s) - ۹۴/۴۳۲$ آستانه موفقیت انتقال در ارتفاع z_s است و $P_0 = ۲۳۳/۹۸ \log(z_s) - ۰/۹۵$ می‌باشد. بنابراین با توجه به روابط (۳) و (۸)، احتمال موفقیت در انتقال داده معتبر توسط پهپاد به ترانسفورماتور برابر است با:

$$Pr_{suc}[n] = Pr_s * Pr_{t0}[n] \quad (۹)$$

بنابراین، در حالت انتقال اطلاعات به ترانسفورماتور، به منظور کاهش احتمال از دست دادن بسته اطلاعاتی و مصرف انرژی بارگیری، پهپاد باید نزدیک ترانسفورماتور حرکت کند.

در صورتی که پهپاد اطلاعات را توسط شبکه مخابراتی به ابر منتقل کند، فرض می‌شود که نرخ انتقال اطلاعات به ابر r_{so} (که کوچک‌تر از نرخ انتقال به ترانسفورماتور r_{t0} است) به صورت خطی وابسته به قدرت انتقال اطلاعات $P_0[n]$ است. سپس میزان انتقال اطلاعات به ابر $(R_{so}[n])$ و تخلیه مصرف انرژی $(E_{so}[n])$ در زمان تخلیه $t_0[n]$ زمانی که اطلاعات به سمت ابر منتقل می‌شود به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$R_{so}[n] = r_{so}[n] t_0[n] \quad (۱۰)$$

$$E_{so}[n] = P_0[n] t_0[n] \quad (۱۱)$$

به منظور استفاده بهینه از انرژی، پهپاد می‌تواند فرکانس $cpu\ f[n]$ را با توجه به کار محاسبه به صورت تطبیقی تنظیم کند. مقدار محاسبه $R_c[n]$ و مصرف انرژی محاسبه

$E_c[n]$ در زمان محاسبه $t_c[n]$ را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$R_c[n] = \frac{t_c[n]f[n]}{C_u} \quad (12)$$

$$E_c[n] = \theta_u t_c[n]f[n]^3 \quad (13)$$

که C_u تعداد چرخه‌های CPU برای تکمیل محاسبات را نمایش می‌دهد و θ_u ضریب خازنی مؤثر^۱ CPU است. از آنجا که همه داده‌های حسی باید قبل از شروع تشخیص توربین بعدی پردازش شوند، محدودیت پردازش داده‌ها را به شرح زیر می‌باشد:

$$R_c[n] + (1 - \sigma)R_{t_0}[n] + \sigma R_{so}[n] \geq R_n, \forall n \in N \quad (14)$$

که R_n مقدار داده‌های حسی توربین n ام است و به وضعیت آسیب تیغه مربوط می‌شود. $\sigma = \{0, 1\}$ که مربوط به نوع ارسال اطلاعات است. $\sigma = 0$ به معنی انتقال اطلاعات به ترانسفورماتور و $\sigma = 1$ مربوط به ارسال اطلاعات به ابر است. علاوه بر این، با توجه به محاسبه حالت بارگذاری، می‌توانیم مصرف انرژی پردازش مربوطه را برای هر توربین بادی به صورت زیر به دست آوریم:

$$E_p[n] = E_c[n] + (1 - \sigma)E_{t_0}[n] + \sigma E_{so}[n] \quad (15)$$

در حالت انتقال اطلاعات به ترانسفورماتور پهنای می‌تواند محاسبه محلی را تا زمانی که تمام داده‌های حسی پردازش شوند انجام دهد. بنابراین مدت زمان فرآیند محاسبات برابر است با مجموع مدت تشخیص توربین $t_d()$ و مدت زمان پرواز از نقطه تشخیص به نقطه انتقال اطلاعات $(t_{so}[n])$ و مدت زمان محاسبات $(t_0[n])$ و مدت زمان پرواز از نقطه انتقال به توربین بعدی $(t_{os}[n])$ که مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$T_{p,to}[n] = t_d + t_{so}[n] + t_o[n] + t_{os}[n] \quad (16)$$

همچنین در صورتی که انتقال اطلاعات به ابر صورت گیرد، مدت زمان فرآیند محاسبات از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T_{p,so}[n] = t_d + t_c[n] \quad (۱۷)$$

که در آن $t_c[n]$ مدت زمان انتقال اطلاعات به ابر است. بنابراین با توجه به روابط ذکر شده، مدت زمان انتقال اطلاعات برای هر توربین در حالت کلی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$T_f[k] = t_{f_1}[k] + \sum_1^{N_k} ((1 - \sigma)T_{p,to}[n] + \sigma T_{p,so}[n]) \quad (۱۸)$$

که در آن، $t_{f_1}[k]$ مدت زمان پرواز پهپاد از ایستگاه شارژ به سمت اولین توربین در k امین پرواز و N_k مجموعه توربین های منتخب در k امین پرواز است.

مصرف انرژی در پرواز پهپاد

سرعت پرواز پهپاد را می توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$v_u = \frac{\|q_{t+1} - q_t\|}{t} \quad (۱۹)$$

بنابراین، مدت زمان پرواز در k امین پرواز برابر است با:

$$T_d[k] = \frac{q_k}{v_u} \quad (۲۰)$$

اما در فرآیند پرواز، پهپاد باید با سرعت باد مقاومت کند و لذا، سرعت نسبی پهپاد برابر است با:

$$v_p = v_u - v_w \quad (۲۱)$$

همچنین برای رعایت موارد ایمنی، بیشینه سرعت مجاز پهپاد برابر است با v_{max} . از طرفی، انرژی مورد نیاز پهپاد از مصرف انرژی محرکه و انرژی بالقوه گرانشی که باید بر آن غلبه کرد، تشکیل شده است که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$E_f[t] = \frac{1}{2}mv_p^2 t_f + mgt_f = \frac{mv_p^2 s + mgs}{2v_u} \quad (۲۲)$$

که در رابطه فوق، m برابر وزن پهپاد، g گرانش زمین، t_f مدت زمان پرواز و s فاصله پرواز است. در فرآیند تشخیص توربین توسط پهپاد، برای اطمینان از دقت تشخیص، پهپاد باید بر سرعت باد غلبه کند تا جابجایی هایی که منجر به کاهش دقت دوربین

طراحی مدل نظارت هوشمند بر تجهیزات صنعتی با رویکرد بهینه‌سازی ...؛ آفازاده و عالم تبریز | ۲۱

می‌شود از بین برود. بنابراین، باتوجه به مصرف انرژی برای پرواز و همچنین مصرف انرژی در فرآیند تشخیص هر توربین، مجموع انرژی مصرف‌شده توسط پهپاد از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E_k = \sum_0^{T_f[k]} E_f[t] + \sum_1^{N_k} E_p[n] \quad (23)$$

با توجه به محدود بودن انرژی باتری پهپاد، محدودیت زیر را می‌توان تعریف کرد:

$$E_k \leq E_u, k \in K \quad (24)$$

که E_u بیشترین ظرفیت باتری پهپاد است.

زمانی که یک پرواز به‌طور کامل انجام شد، مدت‌زمان شارژ در K امین پرواز تحت قدرت شارژ d_c برابر است با:

$$T_{ch}[k] = \frac{E_k}{d_c} \quad (25)$$

با توجه به اینکه تصویربرداری توسط پهپاد از مزرعه بادی باید در یک روز انجام شود، لذا در این مسئله مجموع انرژی مصرفی در پهپاد مورد مدل‌سازی قرار گرفته است و به‌عنوان تابع هدف اول استفاده می‌شود و احتمال موفقیت در ارسال اطلاعات توسط پهپاد به‌عنوان تابع هدف دوم در نظر گرفته شده است. بنابراین مدل ریاضی زیر ارائه می‌گردد:

$$Z1: \min_{\gamma} \sum_0^K \beta E_k (T_f[K] + T_{ch}[k])$$

$$Z2: \min_{\gamma} \sum_0^K (1 - Pr_{suc}[n])$$

$$C_1: Pr_{suc}[n] \geq Pr_{th}, \forall n \in N$$

$$C_2: v_p[t] \leq v_{max}, \forall t \in T$$

$$C_3: 0 \leq P_0[n] \leq P_{0,max}, \forall n \in N$$

$$C_4: 0 \leq f[n] \leq f_{max}, \forall n \in N$$

$$C_5: q[0] = q[T] = q_0$$

$$C_6: R_c[n] + (1 - \sigma)R_{t_0}[n] + \sigma R_{s_0}[n] \geq R_n$$

$$C_7: E_k \leq E_u, k \in K$$

محدودیت (۱) این محدودیت بیان می‌کند که احتمال موفقیت در انتقال داده معتبر توسط پهپاد به لبه همواره کوچک‌تر از آستانه این احتمال است. فرمول محاسبه $Pr_{suc}[n]$ در رابطه ۹ بیان شده است.

محدودیت (۲) این محدودیت بیان می‌کند که سرعت پرواز پهپاد همواره کوچک‌تر از بیشینه سرعت پهپاد است.

محدودیت (۳) این محدودیت بیان می‌کند که قدرت انتقال اطلاعات توسط پهپاد همواره کوچک‌تر از مقدار بیشینه آن است.

محدودیت (۴) این محدودیت بیان می‌کند که فرکانس محاسبات همواره کوچک‌تر از بیشینه فرکانس محاسبات است.

محدودیت (۵) این محدودیت بیان می‌کند که مختصات مکان اولیه و نهایی پهپاد یکسان است و پهپاد در همان مختصاتی که شروع به پرواز کرده است، فرود می‌آید.

محدودیت (۶) این محدودیت در رابطه ۱۴ شرح داده شده است.

محدودیت (۷) این محدودیت در رابطه ۲۴ شرح داده شده است.

جدول ۱. پارامترها و متغیرهای مدل پیشنهادی

پارامتر/متغیر	شرح
$T_f[K]$	مدت زمان انتقال اطلاعات برای هر پهپاد
$T_{ch}[k]$	مدت زمان شارژ در K امین پرواز
$Pr_{suc}[n]$	احتمال موفقیت در انتقال داده معتبر توسط پهپاد به لبه
Pr_{th}	آستانه احتمال موفقیت در انتقال داده معتبر توسط پهپاد به لبه
$v_p[t]$	سرعت پرواز پهپاد
v_{max}	بیشینه سرعت پرواز پهپاد
$P_0[n]$	قدرت انتقال اطلاعات توسط پهپاد

طراحی مدل نظارت هوشمند بر تجهیزات صنعتی با رویکرد بهینه‌سازی...؛ آفازاده و عالم تبریز | ۲۳

پارامتر/متغیر	شرح
$P_{0,max}$	بیشینه قدرت انتقال اطلاعات توسط پهپاد
$f[n]$	فرکانس محاسبات
f_{max}	بیشینه فرکانس محاسبات
$q[0]$	مختصات مکان اولیه پهپاد (لبه)
$q[T]$	مختصات مکان پهپاد در هر لحظه
β	هزینه هر واحد انرژی مصرفی در پهپاد
E_k	مجموع انرژی مصرف شده توسط پهپاد
E_u	بیشینه ظرفیت باتری پهپاد
γ	مجموعه متغیرهای بهینه شامل $P_0[n], f[n], q[T]$

لذا با توجه به مدل بسط یافته، اندیس مدل به شرح جدول ۱ است:

جدول ۲. اندیس‌های مدل پیشنهادی

اندیس	توضیح اندیس
n	شماره پهپاد
k	شماره پرواز

برای حل مدل لازم است تا برای پارامترهای مدل مقداری فرضی در نظر گرفت که در جدول ۲ مشاهده می‌شود:

جدول ۳. پارامترهای فرضی مدل پیشنهادی

پارامتر	مقدار
ارتفاع تویی تیغه توربین‌ها نسبت به زمین	۵۰ متر
پهنای باند ارتباطی (B)	۱۰ MHz
واریانس نویز (σ^2)	-96 dBm
افزایش قدرت کانال (β_0)	-50 dB
حداکثر قدرت انتقال ($P_{0,max}$)	33 dBm
ضریب خازنی مؤثر (θ_u)	۲۸-۱۰

مقدار	پارامتر
10 GHz	ماکزیمم فرکانس CPU
15 m/s	حداکثر سرعت پیشرانه پهپاد (v_{max})
۰,۹	حداقل میزان موفقیت در ارسال اطلاعات (Pr_{th})

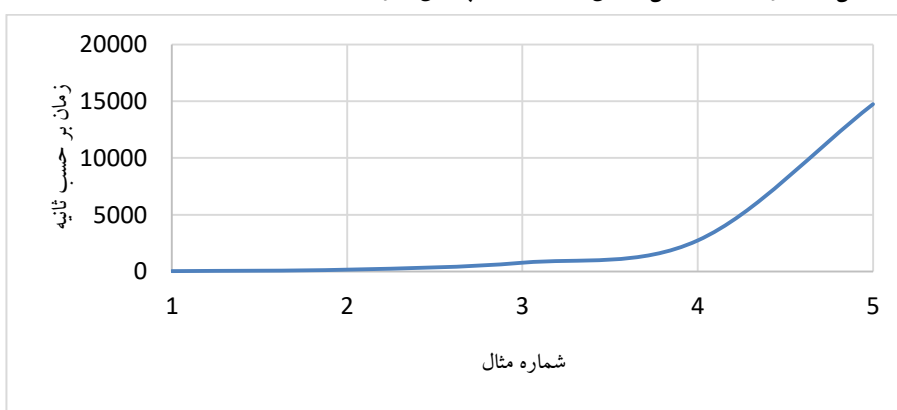
برای بررسی و تحلیل مدل پیشنهادی ارائه شد، تعدادی مثال عددی در ابعاد مختلف به کمک روش محدودیت افسیلن تقویت شده در نرم افزار گمز ۲،۱،۲ کدنویسی شده است.

یافته ها

نمودار زمان حل این روش به ازای آزمایشات عددی در ابعاد مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است. همان طور که در نمودار مشاهده می شود با اندکی افزایش در ابعاد مسئله، زمان حل به شدت افزایش می یابد. بنابراین به دلیل پیچیدگی بالای مسئله روش حل دقیق محدودیت افسیلن قادر به محاسبه جواب پارتو در زمان معقول نمی باشد. به همین منظور در ادامه این پژوهش، به ارائه روش حل فراابتکاری پرداخته خواهد شد.

در جدول ۱، M تعداد توربین های موجود در مزرعه بادی، N تعداد پهپادهای موجود برای پرواز است که مسئله برای شرایط (ابعاد) مختلف توسط روش محدودیت افسیلن تقویت شده حل شده و نتایج آن در جدول ۳ مشخص است.

شکل ۲. نمودار زمان حل روش محدودیت افسیلن تقویت شده در آزمایشات عددی مختلف



حل آزمایشات عددی به کمک روش ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره

در این الگوریتم به ترتیب از عملگرهای انتخاب، تقاطع و جهش استفاده شده است. عملگر انتخاب: در این پژوهش، از روش انتخاب مسابقه‌ای برای عملگر انتخاب استفاده شده است. در روش انتخاب مسابقه‌ای در هر بار دو کروموزوم به‌طور تصادفی انتخاب و جواب بهتر وارد استخر جفت‌گیری می‌شود. انتخاب کروموزوم‌ها بر اساس عدد تصادفی صحیح بین ۱ تا اندازه جمعیت تعیین شده است.

عملگر تقاطع (جابجایی): در هر بار دو کروموزوم به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود و عملگر تقاطع روی آن‌ها اعمال می‌شود که در این پژوهش از عملگرهای تقاطع پیوسته و تقاطع تک نقطه‌ای استفاده شده است. عملگرهای تقاطع به‌صورت تصادفی با استفاده از عدد صحیح تصادفی بین ۱ و ۲ انتخاب می‌شوند. انتخاب نوع عملگر تقاطع بر اساس این عدد تصادفی است.

عملگر جهش: در این پژوهش از عملگر جهش جانشینی و باهدف ایجاد تنوع در جمعیت ایجاد شده است که در آن در هر بار یک کروموزوم به‌طور تصادفی انتخاب شده و دو ژن از هر کروموزوم هم به‌صورت تصادفی انتخاب و با یکدیگر جابجا می‌شوند.

در این بخش، مثال‌های عددی بخش قبل (محدودیت اِپسِلین) به همراه تعدادی آزمایشات عددی در ابعاد بزرگ‌تر، به کمک نسخه دوم الگوریتم فراابتکاری ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره در نرم‌افزار متلب ۲۰۱۵ کدنویسی شده است. نتایج به‌دست آمده مطابق با جدول ۳ می‌باشد. مقادیر معیارهای عملکرد جواب‌های پارتو نیز برای هر یک از آزمایشات عددی حل شده به روش ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره، به شرح جدول ۴ است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود روش ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره آزمایشات در ابعاد بزرگ، که روش محدودیت اِپسِلین از حل آن‌ها عاجز بود، را به‌خوبی و در زمان معقول پاسخ داد.

جدول ۴. نتایج حل مدل با استفاده از روش محدودیت اسپیلن تقویت شده

شماره مثال	ابعاد مسئله (M-N)	مقدار ni	زمان حل (ثانیه)	شماره جواب پارتویی	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم
۱	۱-۵	۵	۴۷/۸۱۸	۱	۱۰۹۳۸۵	۰/۰۳۷
				۲	۱۰۷۳۸۴	۰/۰۴۱
				۳	۱۰۲۴۷۵	۰/۰۵۷
۲	۲-۱۰	۵	۱۷۶/۵۶۴	۱	۲۴۹۲۸۴	۰/۰۴۲
				۲	۲۳۹۵۹۳	۰/۰۳۷
				۳	۲۱۶۸۳۵	۰/۰۵۵
۳	۳-۲۰	۷	۷۸۶/۷۲۳	۱	۳۸۹۲۸۲	۰/۰۳۸
				۲	۳۶۲۸۴۸	۰/۰۴۴
۴	۴-۳۰	۱۰	۲۷۴۵/۷۱۹	۱	۷۲۸۵۹۳	۰/۰۳۸
				۲	۶۸۱۰۹۲	۰/۰۴۴
				۳	۶۶۲۴۲۳	۰/۰۵۲
				۴	۵۷۲۹۵۹	۰/۰۵۶
				۵	۵۲۸۵۰۵	۰/۰۶۱
۵	۵-۵۰	۱۵	۱۴۷۳۶/۴۳۷	۱	۱۰۹۳۰۴۳	۰/۰۳۱
				۲	۱۰۸۳۷۰۴	۰/۰۳۳
				۳	۱۰۵۴۴۷۳	۰/۰۴۷
				۴	۱۰۳۶۵۲۰	۰/۰۵۳
				۵	۱۰۲۴۴۰۳	۰/۰۵۸
				۶	۱۰۰۹۰۴۳	۰/۰۶۰
				۷	۹۹۲۹۴۸	۰/۰۶۶

جدول ۵. معیارهای عملکرد آزمایشات عددی روش محدودیت اسپیلن تقویت شده

شماره آزمایش	تعداد جواب‌های پارتو	زمان محاسبه (ثانیه)	میانگین فاصله از جواب ایده‌آل	پراکندگی	فاصله
۱	۳	۴۷/۸۱۸	۰/۹۴۶۴۱۱	۰/۷۷۱۶۰۹	۰
۲	۳	۱۷۶/۵۶۴	۰/۸۷۱۱۱۴	۰/۷۳۲۶۶۵	۰/۱۷۴۶۳
۳	۲	۷۸۶/۷۲۳	۰/۹۷۴۱۵۴	۰/۷۸۳۵۶۳	۰
۴	۵	۲۷۴۵/۷۱۹	۰/۶۳۵۱۷	۰/۵۹۴۶۴	۰/۱۲۷۵۶
۵	۷	۱۴۷۳۶/۴۳۷	۰/۶۴۴۱۸	۰/۲۶۳۵۵۳	۰/۰۵۸۳۳۴

طراحی مدل نظارت هوشمند بر تجهیزات صنعتی با رویکرد بهینه‌سازی...؛ آفازاده و عالم تبریز | ۲۷

جدول ۶. نتایج حل مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره

شماره مثال	ابعاد مسئله (M-N)	مقدار ni	زمان حل (ثانیه)	شماره جواب پارتویی	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم
۱	۲-۱۰	۵	۱۲/۲۷	۱	۲۴۳۶۲۷	۰/۰۳۵
				۲	۲۳۲۷۳۸	۰/۰۴۲
				۳	۲۱۷۴۳۶	۰/۰۵۵
۲	۳-۲۰	۵	۱۲/۶۹	۱	۳۸۹۲۶۲	۰/۰۳۸
				۲	۳۶۲۷۷۳	۰/۰۴۴
۳	۴-۳۰	۷	۱۴/۸۳	۱	۷۲۷۳۵۰	۰/۰۳۸
				۲	۶۸۱۳۵۵	۰/۰۴۴
				۳	۶۶۷۳۷۳	۰/۰۵۲
				۴	۵۷۷۷۳۷	۰/۰۵۵
				۵	۵۲۸۱۲۲	۰/۰۶۲
				۶	۵۱۷۵۷۳	۰/۰۶۰
۴	۵-۵۰	۱۰	۱۶/۵۵	۱	۱۰۹۶۳۷۷	۰/۰۳۰
				۲	۱۰۷۰۶۹۳	۰/۰۳۶
				۳	۱۰۵۲۶۱۵	۰/۰۴۸
				۴	۱۰۴۲۰۱۸	۰/۰۵۰
				۵	۱۰۳۷۴۵۴	۰/۰۵۴
				۶	۱۰۲۹۶۳۳	۰/۰۵۵
				۷	۱۰۱۰۰۵۲	۰/۰۵۸
				۸	۱۰۰۳۶۶۲	۰/۰۶۱
۵	۶-۱۰۰	۱۵	۱۷/۶۱	۱	۳۵۲۲۲۸۲	۰/۰۷۱
				۲	۳۴۴۷۶۸۸	۰/۰۷۳
				۳	۳۳۹۵۵۰۱	۰/۰۷۷
				۴	۳۳۲۱۹۴۶	۰/۰۷۸
				۵	۳۲۷۶۵۱۷	۰/۰۸۱
				۶	۳۱۹۸۲۳۵	۰/۰۸۲
				۷	۳۱۱۳۴۹۲	۰/۰۸۳
				۸	۳۰۶۳۷۴۶	۰/۰۸۳

جدول ۷. معیارهای عملکرد آزمایشات عددی الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره

شماره آزمایش	تعداد جواب‌های پارتو	زمان محاسبه (ثانیه)	میانگین فاصله از جواب ایده‌آل	پراکندگی	فاصله
۱	۳	۱۲/۲۷	۰/۹۷۲۶۵۳	۰/۷۱۷۵۴۵	۰
۲	۲	۱۲/۶۹	۰/۷۳۸۴۷۳	۰/۶۴۷۵۵۳	۰/۱۷۳۸۶۵
۳	۶	۱۴/۸۳	۰/۹۷۹۰۵۹	۰/۷۲۹۳۰۳	۰
۴	۸	۱۶/۵۵	۰/۵۷۹۴۴۳	۰/۴۷۱۲۷۰	۰/۱۱۷۰۹۳
۵	۸	۱۷/۶۱	۰/۶۱۶۱۳۷	۰/۲۲۸۸۳۹	۰/۰۳۸۴۶۲

همچنین به دلیل پیچیدگی مسئله باید از روش‌های حل ابتکاری یا فرا ابتکاری استفاده شود. از دلایل پیچیده بودن این مسئله می‌توان به غیرخطی بودن مدل، چند هدفه بودن مدل، وجود تعداد زیاد متغیر و پارامتر و محدودیت در مسئله اشاره کرد. این پیچیدگی خود را در ابعاد بزرگ‌تر مسئله بیشتر نشان می‌دهد. بنابراین در این تحقیق برای مثال‌های با ابعاد بزرگ از روش فراابتکاری استفاده کرده‌ایم.

با توجه نتایج حاصل از حل مسئله به دو روش محدودیت افسیلین تقویت شده و ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره مشاهده می‌شود که جواب‌های حاصل از این روش‌ها در مسائل با ابعاد کوچک هم با یکدیگر تفاوت معناداری ندارند و مجموعه جواب‌های پارتویی روش ژنتیک تقریباً مشابه و نزدیک روش افسیلین تولید شده‌اند. همچنین مقادیر معیارهای عملکرد دو روش (به‌غیر از معیار زمان) در مقایسه با یکدیگر بسیار نزدیک به هم می‌باشند. پس می‌توان گفت هر دو روش در ابعاد کوچک هم جواب‌های خوب و تقریباً دقیقی ارائه می‌دهند. اما در روش ژنتیک در معیار زمان هم بهتر عمل کرده و زمان حل کوتاه‌تری را به خود اختصاص داده است.

اعتبارسنجی مدل پیشنهادی

به منظور اعتبارسنجی مدل ارائه شده در این پژوهش، داده‌های مقاله کائو و همکاران (۲۰۱۹) مبنای کار قرار گرفته و مدل با استفاده از این داده‌ها حل و با نتایج مقاله کائو و

طراحی مدل نظارت هوشمند بر تجهیزات صنعتی با رویکرد بهینه‌سازی...؛ آفازاده و عالم تبریز | ۲۹

همکاران مقایسه می‌شود.

در مدل این پژوهش، تابع هدف اول هزینه انرژی پرواز پهپاد است اما در مقاله کائو و همکاران (۲۰۱۹) تابع هدف برابر میزان انرژی مصرف‌شده پهپاد است. همچنین مقاله کائو و همکاران (۲۰۱۹)، تابع هدف دوم موجود نیست چراکه مدل این مقاله تک هدفه است. لذا برای استفاده از داده‌های این مقاله ضرب هزینه هر واحد انرژی در تابع هدف اول مدنظر قرار گرفته است. در جدول ۴-۷، نتایج به دست آمده برای تابع هدف اول با توجه به متغیرها و پارامترهای مدل در مقاله مربوطه نمایش داده شده است:

جدول ۸. نتایج مقاله کائو و همکاران (۲۰۱۹)

شماره مسئله	تعداد توربین	سرعت باد (m/s)	سرعت متوسط پهپاد (m/s)	میزان انرژی مصرف‌شده در مقاله کائو	میزان انرژی مصرف‌شده با توجه به مدل پیشنهادی	درصد اختلاف نتیجه
۱	۵	۰	۲	۵۲۴۶۵	۵۱۰۶۳	۳٪
۲	۵	۰٫۵	۲٫۷۷	۶۸۳۶۹	۶۸۰۸۱	۰٪
۳	۵	۱	۴	۸۶۳۷۲	۸۵۹۲۷	۱٪
۴	۱۰	۰	۲	۱۸۹۴۸۳	۱۸۶۳۹۹	۲٪
۵	۱۰	۰٫۵	۲٫۷۷	۲۴۸۲۷۹	۲۴۳۰۷۲	۲٪
۶	۱۰	۱	۴	۲۹۰۳۲۳	۲۹۰۱۶۲	۰٪
۷	۱۵	۰	۲	۳۱۵۹۲۰	۳۰۷۲۷۹	۳٪
۸	۱۵	۰٫۵	۲٫۷۷	۳۵۷۹۰۴	۲۵۵۹۸۱	۲٫۸٪
۹	۱۵	۱	۴	۳۷۳۰۸۳	۳۷۱۲۲۱	۰٪
۱۰	۲۰	۰	۲	۴۰۵۷۳۴	۴۰۱۹۳۴	۱٪
۱۱	۲۰	۰٫۵	۲٫۷۷	۴۳۹۲۸۰	۴۳۱۲۳۲	۲٪
۱۲	۲۰	۱	۴	۴۶۶۱۱۹	۴۶۱۵۲۵	۱٪

همان‌طور که از جدول ۸ مشخص است، اختلاف نتایج حاصل از مدل پیشنهادی پژوهش با مدل ارائه‌شده در مقاله کائو و همکاران (۲۰۱۹) بسیار کم (زیر ۵٪) است و تمامی نتایج با

هر شرایط جواب نزدیک به مقاله مورد نظر دارد.

۷,۴. مقایسه معیارهای عملکرد مرز پارتو در روش محدودیت افسیلین تقویت شده و ژنتیک با مرتب سازی ناچیره

با توجه به نتایج به دست آمده، روش محدودیت افسیلین تقویت شده با افزایش ابعاد مسئله قادر به به دست آوردن جواب های پارتو در زمان معقول نبوده است. به عنوان عواملی که منجر به پیچیدگی مسئله و طولانی شدن زمان حل شده است می توان از غیرخطی بودن مدل، تعداد زیاد محدودیت های مدل، ماهیت صفر و یک بودن متغیرها و چندهدفه بودن مدل یاد کرد.

مقایسه معیارهای عملکرد مرز پارتو در آزمایشاتی که روش محدودیت افسیلین در زمان معقول به جواب رسید به شرح زیر می باشد. این مقادیر در نمودارهای ۵-۱۷ تا ۵-۲۱ نمایش داده شده اند.

مقایسه معیار زمان حل: در تمامی آزمایشات الگوریتم ژنتیک با اختلاف چشمگیری بهتر از روش محدودیت افسیلین عمل کرده است.

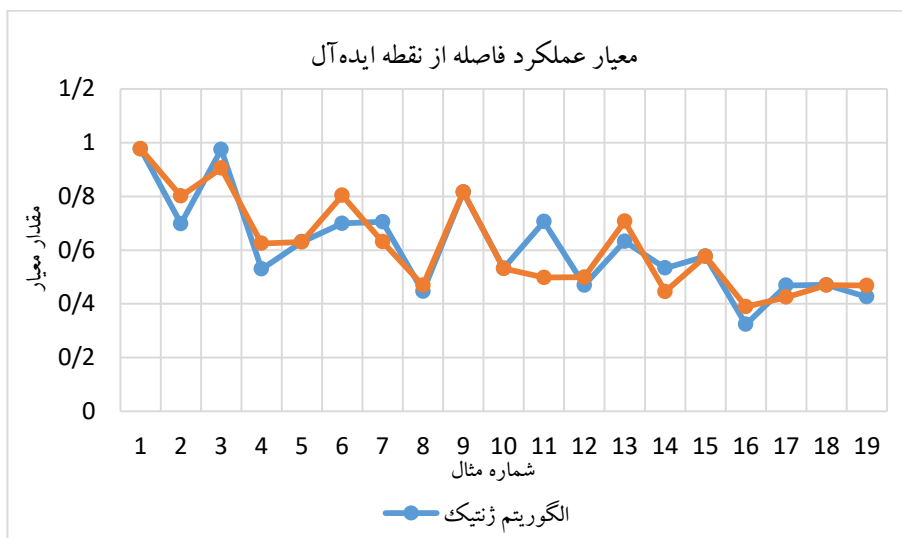
مقایسه معیار تعداد نقاط پارتو: در ۷۴,۹۵٪ آزمایشات الگوریتم ژنتیک در حد روش محدودیت افسیلین یا بهتر عمل کرده است.

مقایسه معیار میانگین فاصله از نقطه ایده آل: در ۶۸,۴۲٪ آزمایشات الگوریتم ژنتیک در حد روش محدودیت افسیلین یا بهتر عمل کرده است.

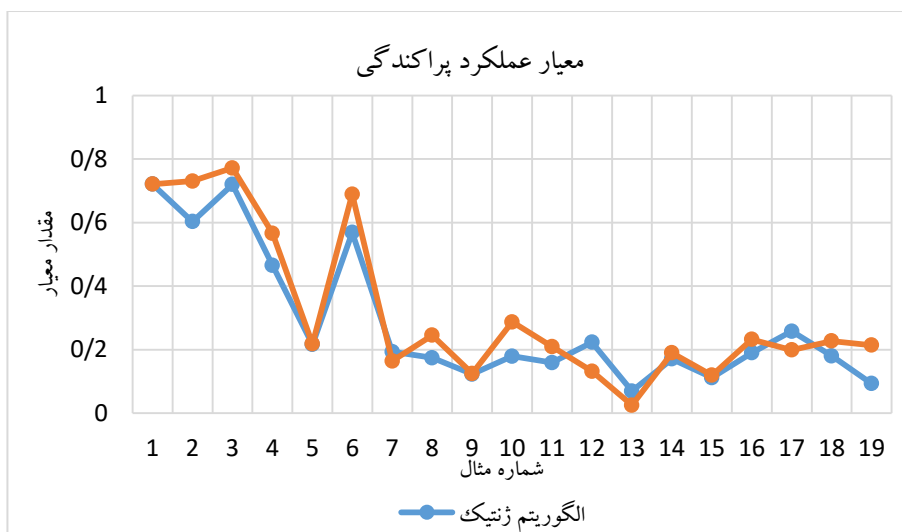
مقایسه معیار پراکندگی: در ۷۴,۹۵٪ آزمایشات الگوریتم ژنتیک بهتر از روش محدودیت افسیلین عمل کرده است.

مقایسه معیار فاصله: در ۶۸,۴۲٪ آزمایشات الگوریتم ژنتیک در حد روش محدودیت افسیلین یا بهتر عمل کرده است.

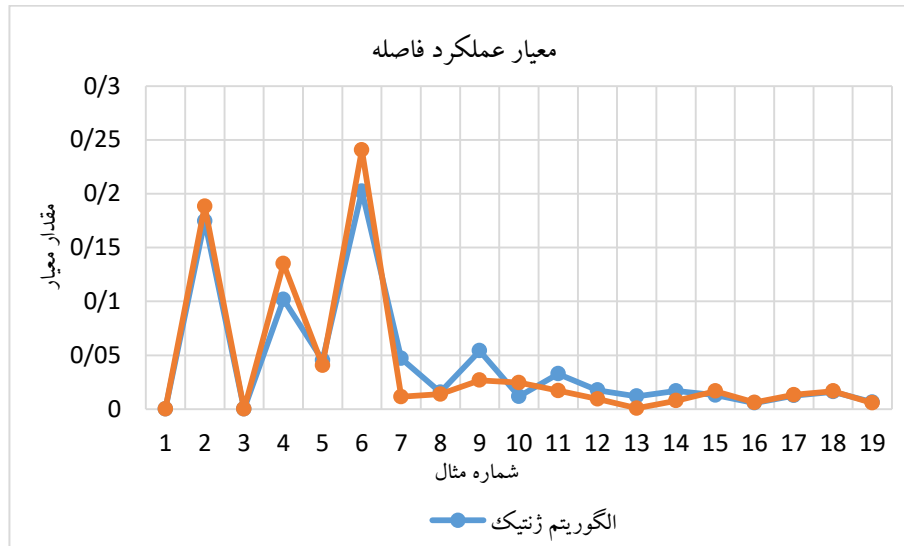
شکل ۳. مقایسه معیار فاصله از نقطه ایده‌آل در دو روش حل ارائه شده



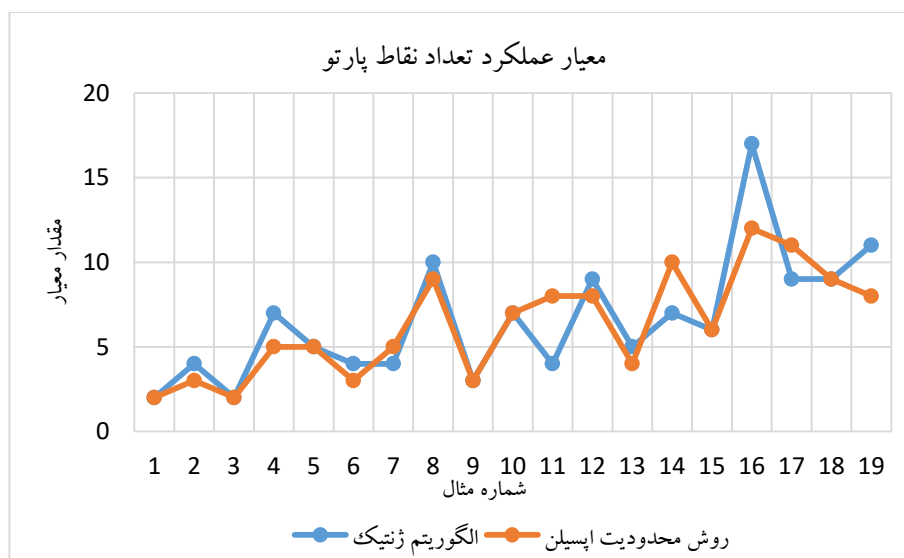
شکل ۴. مقایسه معیار پراکندگی در دو روش حل ارائه شده



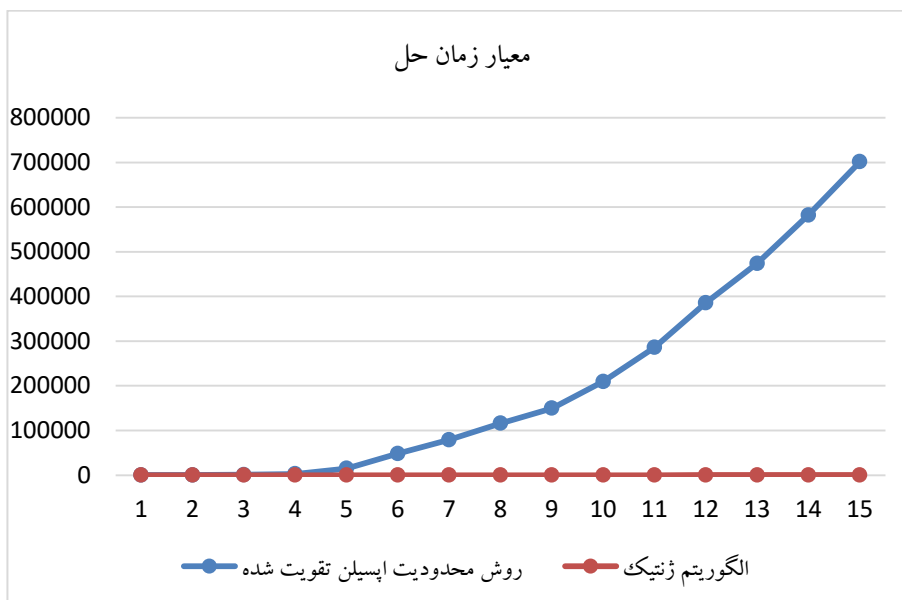
شکل ۵. مقایسه معیار فاصله در دو روش حل ارائه شده



شکل ۶. مقایسه معیار تعداد نقاط پارتو در دو روش حل ارائه شده



شکل ۷. مقایسه معیار زمان حل در دو روش حل ارائه‌شده



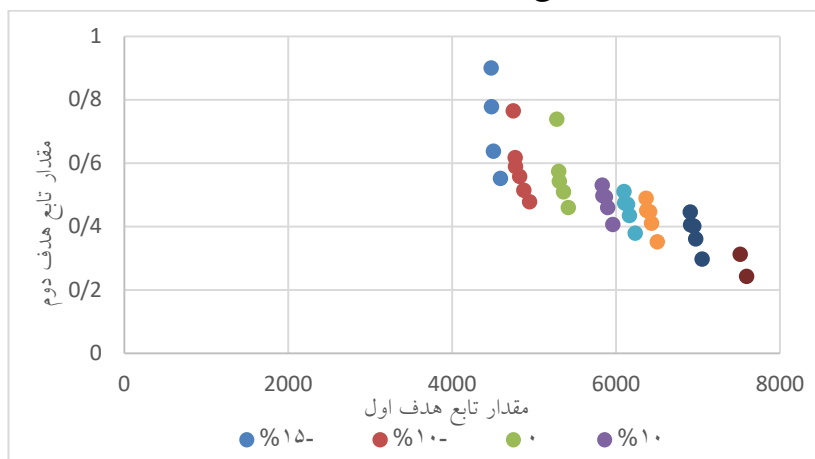
تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی

در این بخش، به منظور ارزیابی مدل پیشنهادی و اعتبارسنجی آن، پارامترهای مهم مسئله تحلیل حساسیت می‌شوند. هدف از تحلیل حساسیت، بررسی تأثیر تغییرات محتمل پارامترها بر روی جواب بهینه و حصول اطمینان از صحت مدل است. بدین منظور مثال ۵ جدول ۳ (تعداد ۱۰۰ توربین و ۶ پهپاد) به ازای مقادیر مختلف پارامترهای مسئله بررسی شده است. نتایج به دست آمده در شکل‌های ۳ و ۴ رسم شده‌اند. لازم به ذکر است اعداد مربوط به تابع هدف اول در نمودار برای وضوح بیشتر بر مبنای هزار ریال نمایش داده شده‌اند.

تحلیل حساسیت توابع هدف نسبت به حداکثر سرعت پيشرانه پهپاد

همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش حداکثر سرعت پيشرانه پهپاد، مجموع انرژی مصرفی در سیستم افزایش می‌یابد و احتمال موفقیت در ارسال صحیح اطلاعات پردازش شده توسط پهپاد کاهش می‌یابد.

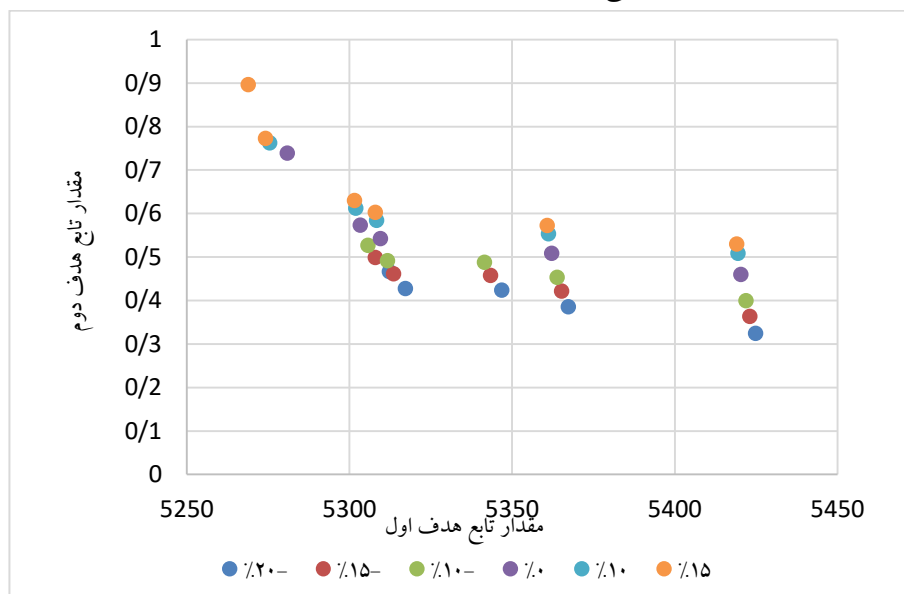
شکل ۸. تغییرات توابع هدف به ازای درصدهای تغییر در سرعت پیشرانه پهباد



تحلیل حساسیت توابع هدف نسبت به پهنای باند ارتباطی

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، با افزایش پهنای باند ارتباطی، مجموع انرژی مصرفی در سیستم کاهش می‌یابد و در نتیجه تابع هدف اول کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش پهنای باند ارتباطی، احتمال موفقیت در ارسال صحیح اطلاعات پردازش شده توسط پهباد افزایش (تابع هدف دوم) افزایش می‌یابد. در نتیجه باید تا حد ممکن پهنای باند ارتباطی را در سیستم حداکثرسازی کرد.

شکل ۹. تغییرات توابع هدف به ازای درصدهای تغییر در پهنای باند ارتباطی



مقایسه هزینه استفاده از سیستم هوشمندسازی توسط پهنابندها با عدم استفاده از آن

در این بخش به مقایسه میزان هزینه در صورت هوشمندسازی و عدم هوشمندسازی نظارت بر توربین‌های بادی پرداخته شده است. با حل مدل ارائه شده در این پژوهش، مقدار تابع هدف اول (میزان انرژی مصرف شده توسط پهنابندها) در صورت وجود تعداد توربین‌های مختلف در مزرعه بادی به دست آمد. در قدم بعد باید به محاسبه هزینه نگهداری و تعمیرات پهنابندها در صورت عدم هوشمندسازی پرداخت. بر اساس آمارهای منتشر شده توسط بانک جهانی (۲۰۲۰) و ترازنامه انرژی ایران منتشر شده توسط وزارت نیرو (۱۳۹۹) و مقاله مطهری و همکاران (۱۳۹۳)، هزینه تعمیرات و نگهداری توربین‌های بادی به ازای هر کیلووات ساعت تولید انرژی برابر ۰٫۸ سنت است. با توجه به نرخ تسعیر ارز در ایران (هر دلار آمریکا ۵۰ هزار ریال)، محاسبات مربوط به تعمیرات و نگهداری مثال‌های این پژوهش به شرح زیر می‌باشد و با مقایسه مقدار تابع هدف اول و هزینه تعمیرات و نگهداری

توربین‌ها می‌توان به این نتیجه دست یافت که هوشمندسازی نظارت بر توربین‌های بادی در بستر اینترنت اشیا نسبت به هزینه تعمیرات و نگهداری آن‌ها بسیار مقرون به صرفه است. از طرفی، یک توربین 1.8 مگاواتی قادر است سالانه بیش از ۲,۵ میلیون کیلووات ساعت برق تولید کند.

جدول ۹. مقایسه هزینه هوشمندسازی و عدم هوشمندسازی نظارت بر توربین‌های بادی

شماره مثال	ابعاد مسئله (M-N)	شماره جواب پارتویی	مقایسه توابع هدف	
			مقدار تابع هدف اول (ریال)	میزان تولید برق سالانه (کیلووات ساعت در سال)
۱	۲-۱۰	۱	۲۴۳۶۲۷	۲۵,۰۰۰,۰۰۰
		۲	۲۳۲۷۳۸	
		۳	۲۱۷۴۳۶	
۲	۳-۲۰	۱	۳۸۹۲۶۲	۵۰,۰۰۰,۰۰۰
		۲	۳۶۲۷۷۳	
۳	۴-۳۰	۱	۷۲۷۳۵۰	۷۵,۰۰۰,۰۰۰
		۲	۶۸۱۳۵۵	
		۳	۶۶۷۳۷۳	
		۴	۵۷۷۷۳۷	
		۵	۵۲۸۱۲۲	
		۶	۵۱۷۵۷۳	
۴	۵-۵۰	۱	۱۰۹۶۳۷۷	۱۲۵,۰۰۰,۰۰۰
		۲	۱۰۷۰۶۹۳	
		۳	۱۰۵۲۶۱۵	
		۴	۱۰۴۲۰۱۸	
		۵	۱۰۳۷۴۵۴	
		۶	۱۰۲۹۶۳۳	
		۷	۱۰۱۰۰۵۲	
		۸	۱۰۰۳۶۶۲	
۵	۶-۱۰۰	۱	۳۵۲۲۲۸۲	۲۵۰,۰۰۰,۰۰۰
		۲	۳۴۴۷۶۸۸	

شماره مثال	ابعاد مسئله (M-N)	شماره جواب پارتویی	مقادیر توابع هدف	
			میزان تولید برق سالانه (کیلووات ساعت در سال)	هزینه تعمیرات و نگهداری توربین‌ها (میلیون ریال)
		۳	۳۳۹۵۵۰۱	
		۴	۳۳۲۱۹۴۶	
		۵	۳۲۷۶۵۱۷	
		۶	۳۱۹۸۲۳۵	
		۷	۳۱۱۳۴۹۲	
		۸	۳۰۶۳۷۴۶	

بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق به طراحی و تبیین مدل ترکیبی اینترنت اشیا و پهپادهای غیرنظامی جهت نظارت هوشمند بر عملکرد تجهیزات صنعتی با رویکرد رایانش لبه با مطالعه موردی: توربین‌های بادی پرداخته شد. برای این منظور مدلی دو هدفه شامل هفت محدودیت ارائه گردید. با توجه به اینکه تصویربرداری توسط پهپاد از مزرعه بادی باید در یک روز انجام شود، لذا در این مسئله مجموع انرژی مصرفی در پهپاد مورد مدل‌سازی قرار گرفته است و به‌عنوان تابع هدف اول استفاده می‌شود و احتمال موفقیت در ارسال اطلاعات توسط پهپاد به‌عنوان تابع هدف دوم در نظر گرفته شده است. بنابراین مدل ریاضی زیر ارائه می‌گردد:

با توجه به اینکه مدل مشابه این پژوهش در هیچ مقاله‌ای استفاده نشده بود، از تولید داده‌های موردنیاز مدل به‌صورت تصادفی کمک گرفته شد. در ادامه مدل با استفاده از ابزار تحلیل حساسیت اعتبارسنجی شد. نتایج حاصل شده رفتاری مطابق با آنچه مورد انتظار بود را نشان می‌دهد که حاکی از صحت مدل پیشنهادی تحقیق می‌باشد. سپس مدل ارائه‌شده به کمک روش حل محدودیت افسیلن تقویت شده و با استفاده از نرم‌افزار گمز حل شد. با توجه به تحقیقات به‌عمل آمده، روش محدودیت افسیلن بهترین روش برای به‌دست آوردن جواب‌های پارتو در مسائل چندهدفه می‌باشد، اما به دلیل پیچیدگی مسئله در این تحقیق، این روش با افزایش ابعاد مسئله کارایی خود را از دست داده و قادر به یافتن مرز پارتو در مسائل با ابعاد بزرگ در زمان معقول نمی‌باشد. همچنین به دلیل غیرخطی بودن مدل چنین

اتفاقی خارج از انتظار نبوده است. به همین منظور در ادامه مدل با استفاده از نسخه دوم روش فراابتکاری ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره و به کمک نرم‌افزار متلب حل شد. در این پژوهش به منظور عملکرد بهتر الگوریتم ژنتیک، از ساختار جدیدی برای نمایش کروموزوم‌های استفاده شد. این الگوریتم توانست مسائل در ابعاد بزرگ را که روش محدودیت اسپیلن از حل آن عاجز بود، در زمان بسیار کوتاهی حل کند. طبق نتایج به دست آمده روش محدودیت اسپیلن تقویت شده و ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره تنها در زمان حل با یکدیگر متفاوت بوده و دارای اختلاف معنادار هستند و در سایر معیارها دارای عملکرد مشابهی می‌باشند. به عبارت دیگر الگوریتم فراابتکاری تحقیق از لحاظ زمان حل بسیار بهتر عمل کرده و در سایر معیارها در حد روش حل دقیق تحقیق بوده و جواب‌های خوب و با کیفیتی حاصل شد. در نتیجه روش ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره به عنوان روش برتر برای حل مسئله تحقیق پیشنهاد می‌گردد. بنابراین به تمامی پرسش‌های تحقیق که در فصل اول مطرح شد، پاسخ داده شده است.

تعارض منافع

تعارض منافع ندارم.

ORCID

Elham Aghazadeh
Akbar Alem Tabriz



<https://orcid.org/0009-0002-7904-5094>



<https://orcid.org/0000-0002-4562-8032>

منابع

۱. کاظمی، حمید و الهیان، سمانه. (۱۳۹۹). توسعه پهپادهای غیرنظامی در ایران و چالش‌های پیش روی آن. *فناوری در مهندسی هوافضا*. ۲ (۲۳). ۴۵-۶۴.
۲. قضاوی، علیرضا و طباطبای، فروغ السادات. (۱۳۹۹). پهپادها و کاربرد آنها در امنیت عمومی و پلیس هوشمند. *نشریه علمی فناوری اطلاعات و ارتباطات انتظامی*. ۱ (۱). ۶۷-۹۰.
۳. حقیقی، حسن و ساداتی، سید حسین و کریمی، جلال و دهقانی، سید محمدمهدی. (۱۳۹۷). نظارت مداوم چندفروندی به وسیله الگوهای پیمایشی پایه باهدف کمینه‌سازی زمان بازبینی. *مهندسی هوانوردی*. ۲۰ (۱). ۱-۱۲.
۴. علی پور، میرزامحمد و رجول دزفولی، علی و دانش کهن، حسین. (۱۳۸۸). استفاده از هواپیماهای بدون سرنشین به منظور بازرسی خطوط لوله نفت و گاز. *دومین کنفرانس لوله و صنایع وابسته*. تهران.
۵. قضاوی، نفیسه و رحمانی، دنیا. (۱۴۰۰). ارائه مدلی برای مسیریابی پهپاد برای نظارت بر مناطق آسیب‌دیده پس از بحران. *هجدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی صنایع*. ۵۸-۸۳.

References

6. Al-Khafaji, H. (2022). Data Collection in IoT Using UAV Based on Multi-Objective Spotted Hyena Optimizer. *Sensors*. 22(22). pp. 88-96. Doi: 10.3390/s22228896
7. Alturjman, F., Alturjman, S. (2020). *5G/IoT-enabled UAVs for multimedia delivery in industry-oriented applications*. *Multimedia Tools and Applications*, 79 (25), 74-89. DOI:10.1007/s11042-018-6288-7
8. Athreyasa, G. (2021). Roadway Traffic Analysis Scheme using Unmanned Aerial Vehicle Based on Image Processing and Edge Computing. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*. 12(3). 122-131. DOI: <https://doi.org/10.17762/turcomat.v12i12.7788>
9. Bahhar, C., Chokri, B., Sofiene, B., Hedi, S. (2021). *Real-time intelligent monitoring system based on IoT*. 18th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD). DOI:10.1109/SSD52085.2021.9429358
10. Cao, P., Yi, L., Chao, Y., Shengli, X., Kan, X. (2019). MEC-Driven UAV-Enabled Routine Inspection Scheme in Wind Farm Under Wind Influence. *Digital Object Identifier*, 51(33). 342-361. DOI:10.1109/ICICTA49267.2019.00148

11. Caro, M., Cano, M. (2019). IoT System Integrating Unmanned Aerial Vehicles and LoRa Technology: A Performance Evaluation Study. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 36(4). 134-151. DOI:10.1155/2019/4307925
12. Chagh, Y., Guennoun Z., Jouihri, Y. (2016). Voice service in 5G network: Towards an edge-computing enhancement of voice over Wi-Fi, in Proc. *Conf. Telecommun. Signal Process. (TSP)*. 65(5). 116–120. DOI:10.1109/TSP.2016.7760841
13. Lagkas, T., Bibi, S., Argyriou, V., Panagiotis, G. (2018). UAV IoT Framework Views and Challenges: Towards Protecting Drones as “Things”. *Sensors*. 18(1). 18-25. <https://doi.org/10.3390/s18114015>
14. Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the e-constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems. *Applied mathematics and computation*. 213(3), 455–465. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2009.03.037>
15. Na, Z., Mengshu, Z., Jun, W. (2020). UAV-assisted wireless powered Internet of Things: Joint trajectory optimization and resource allocation. *Ad Hoc Networks*. 98(23). 254-276. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2019.102052>
16. Pasandideh, S.H.R., Niaki, S.T.A. (2012). Genetic application in a facility location problem with random demand within queuing framework. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 23(3). 651-659. DOI:10.1007/s10845-010-0416-1
17. Salhaoui, M., Guerrero, Antonio., Arioua, M., Francisco, J., Ortiz, A., Oualkadi, E., Luis Torregrosa, C. (2019). Smart Industrial IoT Monitoring and Control System Based on UAV and Cloud Computing Applied to a Concrete Plant. *Sensors*. 19(3). 16-30. <https://doi.org/10.3390/s19153316>
18. Wulfovich, S., Rivas, H., Matabuena, P. (2020). Drones in Healthcare. *Digital Health*. 4(22). 159–168. DOI:10.1007/978-3-319-61446-5_11
19. Zhao, T., Zhou, S., Guo, X., Zhao, Y., Niu, Z. (2016). Pricing policy and computational resource provisioning for delay-aware mobile edge computing. *IEEE/CIC Int. Conf. Commun. China (ICCC)*. 1–6. DOI:10.1109/ICCChina.2016.7636891
20. Zhang, K., Mao, Y., Leng, S., Vinel, A., Zhang, Y. (2016). Delay constrained offloading for mobile edge computing in cloud-enabled vehicular networks. *Workshop Resilient Netw. Design Modeling (RNDM)*. 33(2). 288–294. DOI:10.1109/RNDM.2016.7608300

References (in persian)

1. Alipour, Mirzamohammad, Rajoul Dezfuli, Ali, and Danesh Kohan, Hossein. (2009). *The Use of Unmanned Aerial Vehicles for the Inspection of Oil and Gas Pipelines*. Second Conference on Pipelines and Related Industries. Tehran (in persian).
2. Ghazawi, Alireza, and Tabataba, Forough Alsadat. (2020). Drones and Their Applications in Public Security and Smart Policing. *Scientific Journal of Information and Communication Technology in Law Enforcement*, 1(1), 67-90 (in persian).
3. Ghazawi, Nafiseh, and Rahmani, Donya. (2021). Proposing a Model for Drone Routing for Post-Crisis Damage Assessment in Affected Areas. *Eighteenth International Industrial Engineering Conference*, 58-83 (in persian).
4. Haghghi, Hassan, Sadati, Seyed Hossein, Karimi, Jalal, and Dehghani, Seyed Mohammad Mehdi. (2018). Continuous Multi-UAV Surveillance Using Base Scan Patterns to Minimize Review Time. *Aeronautical Engineering*, 20(1), 1-12 (in persian).
5. Kazemi, Hamid, and Elhian, Samaneh. (2020). Development of Non-military Drones in Iran and Its Challenges. *Technology in Aerospace Engineering*, 2(23), 45-64 (in persian).

استناد به این مقاله: آقازاده، الهام، عالم تبریز، اکبر. (۱۴۰۲). طراحی مدل نظارت هوشمند بر تجهیزات صنعتی با رویکرد بهینه‌سازی تأخیر انتقال و سرعت پردازش داده‌ها (مطالعه موردی: توربین‌های بادی)، مدیریت صنعتی، ۲۱(۷۱)، ۴۳-۱. DOI: 10.22054/jims.2023.66540.2769



Industrial Management Studies is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.