Archive of SID.ir

Ind. Manag. Persp. 2023, 13(4), 149-178; doi: 10.48308/JIMP.13.4.149

Industrial Management Perspective

Journal hompage: https://jimp.sbu.ac.ir/?lang=en

Original Article

Design and Explanation of a Hybrid IoT and UAV Model for Intelligent Monitoring of Industrial Equipment Performance with Edge Computing Approach (Case Study: Wind Turbines)

Elham Aghazadeh*, Akbar AlemTabriz**, Keyvan Shah Qalyan***

Abstract

Investment in industrial equipment is a necessity for every industrial unit. In this study, a mathematical model for intelligent monitoring of the performance of industrial equipment of wind turbines using the Internet of Things and unmanned aerial vehicles (UAVs) with an edge computing approach is investigated. In this model, the performance of the UAV for intelligent monitoring of wind turbines is investigated in three stages: detection, computational offloading, and local computations. Considering the bi-objective nature of the final model, the model was solved by a genetic algorithm with non-dominated sorting and the epsilon constraint method using random numbers. According to the findings of the study, the epsilon constraint method loses its efficiency with increasing model dimensions and is not able to find the Pareto frontier in problems with large dimensions. For this purpose, the model was solved using the second version of the genetic metaheuristic algorithm with non-dominated sorting and a new structure for representing chromosomes. This algorithm was able to solve problems in large dimensions that the epsilon constraint method was unable to solve. According to the results, the epsilon constraint method and the genetic algorithm with non-dominated sorting differ only in the time to solve, and have similar performance in other criteria; as a result, the genetic algorithm with non-dominated sorting is proposed as the superior method.

Keywords: Internet of Things; Civilian Drones; Edge Computing; Intelligent Monitoring; Genetic Algorithm.

How to Cite: Aghazadeh, Elham; AlemTabriz, Akbar; Shah Qalyan, Keyvan (2023). Design and Explanation of a Hybrid IoT and UAV Model for Intelligent Monitoring of Industrial Equipment Performance with Edge Computing Approach (Case Study: Wind Turbines), *Ind. Manag. Persp.*, 13(4), 149-178 *(In Persian)*.

Received: Nov. 05, 2022; Revised: Des. 01, 2022; Accepted: Des. 18, 2022; Published Online: Des. 18, 2022.

* Ph.D Student, Department of Industrial Management, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
** Professor, Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
Corresponding author. Email: A-Tabriz@sbu.ac.ir
*** Assistant Professor, Department of Industrial Management, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۴۰۲، دوره ۱۳، شماره ۴، صص ۱۴۹ – ۱۷۸، doi: 10.48308/JIMP.13.4.149

چشم‌انداز مدیریت صنعتی

Journal hompage: https://jimp.sbu.ac.ir/?lang=fa

نوع مقاله: پژوهشی

طراحی و تبیین مدل ترکیبی اینترنت اشیا و پهپادهای غیرنظامی برای نظارت هوشمند بر عملکرد تجهیزات صنعتی با رویکرد رایانش لبه (مورد مطالعه: توربین‌های بادی)

الهام آقازاده*، اکبر عالم تبریز**، کیوان شاه قلیان***

چکیده

سرمایه‌گذاری برای تهیه تجهیزات صنعتی، از ضروریات هر واحد صنعتی است. در این پژوهش، مدل ریاضی نظارت هوشمند بر عملکرد تجهیزات صنعتی توربین‌های بادی با استفاده از اینترنت اشیا و پهپادهای غیرنظامی با رویکرد رایانش لبه بررسی شده است. در این مدل، عملکرد پهپاد برای نظارت هوشمند بر توربین‌های بادی در سه مرحله تشخیص، تخلیه محاسباتی و محاسبات محلی بررسی شد. با توجه به دوهدفه بودن مدل نهایی، مدل توسط الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره و روش محدودیت اپسیلون تقویت‌شده با استفاده از اعداد تصادفی حل شد. با توجه به یافته‌های پژوهش، روش محدودیت اپسیلون با افزایش ابعاد مدل کارایی خود را از دست می‌دهد و قادر به یافتن مرز پارتو در مسائل با ابعاد بزرگ نیست. به همین منظور مدل با استفاده از نسخه دوم الگوریتم فراابتکاری ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره و ساختاری جدید برای نمایش کروموزوم‌ها حل شد. این الگوریتم توانست مسائل در ابعاد بزرگ که روش محدودیت اپسیلون قادر به حل آن نبود را حل کند. طبق نتایج، روش محدودیت اپسیلون تقویت‌شده و الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره تنها در زمان حل با یکدیگر متفاوت بوده و در سایر معیارها عملکرد مشابهی دارند؛ در نتیجه، الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره به‌عنوان روش برتر پیشنهاد شد.

کلیدواژه‌ها: اینترنت اشیا؛ پهپادهای غیرنظامی؛ رایانش لبه؛ نظارت هوشمند، الگوریتم ژنتیک.

استناددهی: آقازاده، الهام؛ عالم تبریز، اکبر؛ شاه قلیان، کیوان (۱۴۰۲). طراحی و تبیین مدل ترکیبی اینترنت اشیا و پهپادهای غیرنظامی برای نظارت هوشمند بر عملکرد تجهیزات صنعتی با رویکرد رایانش لبه (مورد مطالعه: توربین‌های بادی). *چشم‌انداز مدیریت صنعتی*، ۱۳(۴)، ۱۴۹–۱۷۸.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۴، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۱۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۷، تاریخ اولین انتشار: ۱۴۰۱/۰۹/۲۷.

* دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

** استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

نویسنده مسئول: Email:A-Tabriz@sbu.ac.ir

*** استادیار، گروه مدیریت صنعتی، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

۱. مقدمه

امروزه در صنایع مختلف، بهره‌وری و کارایی تجهیزات موجب پیشرفت تولیدات و سودآوری واحدهای تولیدی می‌شود. ازکارافتادن تجهیزات و ماشین‌آلات علاوه بر هزینه تعمیرات، هزینه فرصت ازدست‌رفته را بر واحد تولیدی تحمیل می‌کند. درصورتی‌که راهکاری برای جلوگیری از این هزینه‌ها ارائه و اجرا نشود، می‌تواند واحدهای تولیدی را به سوی ورشکستی سوق دهد. واضح است که هنگام آسیب هر تجهیزی سرعت عمل برای رسیدگی به آسیب اهمیت بالایی دارد و این سرعت عمل توسط نیروی انسانی امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین برای انتقال سریع اطلاعات مربوط به هر آسیب و خرابی می‌توان از فناوری‌های پیشرفته مانند حسگرها و پهپادها در بستر اینترنت استفاده کرد که ترکیب این موارد، موضوع اینترنت اشیا[1] را یادآور می‌شود.

با ظهور فناوری‌های نوین، سیستم‌های سنتی جای خود را به سیستم‌های نوین هوشمند و خودکار می‌دهند. هدف این سیستم‌ها، جایگزینی سیستم‌های کلاسیک و عوامل انسانی با سیستم‌های کارآمدتر، کاهش هزینه زمان توسعه و عملیات، بهینه‌سازی کارایی و افزایش انعطاف‌پذیری و دقت است. امروزه بیشتر دستگاه‌هایی که به اینترنت متصل هستند، به‌طور مستقیم توسط انسان‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرند؛ اما با آمدن یک روند جدید، دستگاه‌هایی که به اینترنت متصل هستند، به‌اندازه کافی هوشمند هستند که وظایف محوله را به‌صورت خودکار و بدون دخالت انسان انجام دهند. اینترنت اشیا یک انقلاب فناورانه است که محاسبات و ارتباطات آینده را ارائه می‌دهد [۸]. اینترنت اشیا یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در رونق و پیشرفت کسب‌وکارهای صنعتی امروزی و آینده تلقی می‌شود. صنایع امروزی می‌کوشند تا تجهیزات خود را مدرنیزه کنند تا بدین طریق به‌سرعت با تغییرات رو به رشد بازار هماهنگ شوند و از فناوری‌های موجود استفاده کنند. کسب‌وکارهایی که از اینترنت اشیا در زیرساخت‌های خود استفاده کرده‌اند، به‌طور چشمگیری در زمینه‌های امنیت، بهره‌وری و همچنین سودآوری، رشد داشته‌اند. به هر میزان که استفاده از اینترنت اشیا صنعتی افزایش یابد، به‌تبع میزان بهره‌وری‌های در صنایع نیز افزایش خواهد یافت. اینترنت اشیا می‌تواند حجم انبوهی از اطلاعات و داده‌ها را جمع‌آوری کند و به کارخانه‌ها و شرکت‌ها این اجازه را بدهد که بیشترین بهره‌وری را از سیستم‌ها و تجهیزات خود کسب کنند؛ بدون اینکه محدودیت‌های فناورانه و اقتصادی مانع این امر شوند؛ اما مسئله‌ای که در این میان وجود دارد، این است که حجم داده‌های تولیدشده توسط اینترنت اشیا بسیار زیاد است و این حجم داده برای پردازش به مرکز رایانش ابری[2] ارسال می‌شود. به‌دلیل اینکه روش پردازش متمرکز (ابر) به تأخیرهای ارتباطی بالا منجر می‌شود و نرخ انتقال داده‌ها بین دستگاه‌های اینترنت اشیا و کاربران بالقوه را پایین می‌آورد، اجرای عملیاتی آن با

1. Internet of things (IOT)
2. Cloud computing

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

مشکلاتی در شبکه مواجه است. برای حل این مشکل، اخیراً مفهوم رایانش لبه‌ای پیشنهاد شده است که اجازه می‌دهد تا سرویس‌های اینترنت اشیا به‌منظور پردازش داده به‌جای درگیرشدن در محیط ابری، در نزدیکی منابع داده و سینک‌های داده خودشان پردازش شوند. این امر به پایین‌آمدن تأخیرهای ارتباطی و استفاده بهتر از منابع رایانشی، ذخیره‌سازی و منابع شبکه‌ای منجر می‌شود؛ همچنین زمان اجرا و میزان مصرف انرژی را کاهش می‌دهد که درواقع برای به‌کارگیری اینترنت اشیا می‌تواند بسیار مفید باشد [۷]؛ بنابراین استفاده از رایانش لبه‌ای در بستر اینترنت اشیا برای سرعت‌بخشی به جمع‌آوری اطلاعات از تجهیزات و بازرسی آن‌ها بسیار مؤثر است.

از طرفی پهپادها یکی از بهترین ابزارهای سنجش ازراه‌دور برای جمع‌آوری داده‌ها در محیط‌های وسیع مانند کارخانه‌ها هستند. آن‌ها در محیط‌های صنعتی برای حل مشکلات پیچیده، جلوگیری از خسارات احتمالی، کمک در تصمیم‌گیری و تولید باکیفیت مورداستفاده بهینه قرار می‌گیرند. پهپادها یک بستر فناوری بسیار سازگار برای جمع‌آوری داده‌های کارآمد و مقرون‌به‌صرفه و نظارت بر رویدادها هستند. برای ایجاد ارتباط مؤثر بین پهپادها و مناطق صنعتی موردنظر، استفاده از فناوری‌های مربوط به اینترنت اشیا مانند حسگرها، موقعیت‌یاب‌ها و غیره ضروری است؛ بنابراین با ترکیب فناوری پهپادها و اینترنت اشیا و رایانش لبه می‌توان نظارت هوشمند بر عملکرد تجهیزات صنعتی مانند توربین‌های بادی را بهبود بخشید [۱۲].

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

با توجه به لزوم پایش ویدیویی برای نظارت بر محیط‌های صنعتی و قابلیت بالای پهپادها در این امر، استفاده از آن‌ها در حوزه نظارت و پایش صنعتی گسترش یافته است. در ابتدا پهپادهای نظارتی تنها وظیفه فیلم‌برداری و عکس‌برداری از محیط‌های موردنظر را داشتند؛ اما به‌تدریج و با گسترش مفهوم اینترنت اشیا، با نصب حسگرها بر روی آن‌ها، علاوه بر قابلیت فیلم‌برداری و عکس‌برداری، کارکردهای بیشتری ازجمله پردازش داده‌های حاصل از فیلم‌ها و عکس‌ها و ارسال داده‌های پردازش‌شده به اپراتور یا ابر یا سرور را نیز پشتیبانی می‌کنند و درواقع به سیستمی برای نظارت هوشمند تبدیل شده‌اند.

سیستم‌های نظارت هوشمند ابزارهای مشاهده‌ای هستند که به‌طور مداوم داده‌های مربوط به عملکرد سیستم را از زیرساخت‌های فناوری اطلاعات راه دور جمع‌آوری کرده 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 موردنظارت ارائه می‌دهند که برای عملیات و مدیریت فناوری اطلاعات کاربر مفید است. برای مثال، ممکن است در بازه‌های زمانی خاصی افزایش مصرف قابل‌توجهی در سیستم رخ دهد که به تأخیر در زمان پاسخگویی برای کاربران سیستم

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

منجر شود؛ بنابراین بدون داده‌ها و گزارش‌های بی‌درنگ ارائه‌شده توسط نظارت هوشمند، ممکن است نتوان تعیین کرد که چه زمانی و به چه دلیل این جهش‌ها رخ می‌دهند. با نظارت هوشمند می‌توان دلایل را محدود کرده و استراتژی یا زیرساخت سیستم را بر اساس آن داده‌ها تنظیم کرد [۴]. در این پژوهش با توجه به اهمیت نظارت بر تجهیزات صنعتی، نیاز است تا به بررسی مدلی بهینه برای نظارت هوشمند بر تجهیزات صنعتی توسط پهپادها پرداخته شود. پیرامون این موضوع پژوهش‌هایی صورت گرفته است؛ اما همان‌طور که در ادامه مشاهده می‌شود، تاکنون پژوهشی درباره نظارت هوشمند توسط پهپادها با رویکرد رایانش لبه انجام نشده است و این مورد به‌عنوان خلأ پژوهشی به‌شمار می‌رود.

قضاوی و طباطبا (۱۳۹۹)، کاربرد پهپادها در امنیت عمومی و پلیس هوشمند را بررسی کردند و مزایا و معایب استفاده از انواع پهپاد در امنیت عمومی را موردبررسی قرار دادند. آن‌ها تعدادی از پروتکل‌های مناسب برای استفاده پهپادها در اینترنت اشیا را نیز معرفی و تحلیل کردند [۹].

در پژوهش 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 را بررسی کردند. نتایج نشان داد که در سرعت‌های بالای پهپاد موردنظر، افزایش تعداد پهپاد در یک مساحت مشخص، کارایی چندانی در بهبود کمینه زمان بازبینی ندارد و می‌توان بازه‌ای بر اساس سرعت و تعداد پهپادها تعیین کرد که در این بازه زمان بیشینه بازبینی همواره کمینه باشد [۱۱].

پژوهش علی‌پور و همکاران (۱۳۸۸)، نشان داد 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 [۱].

آتریاسا[1] (۲۰۲۱)، به تجزیه‌وتحلیل ترافیک جاده با استفاده از هواپیمای بدون سرنشین (پهپادها) مبتنی بر پردازش تصویر و محاسبات لبه پرداخت. وی با ترکیب مفاهیم تشخیص لبه در پردازش تصویر و محاسبات لبه، روشی ساده برای تجزیه‌وتحلیل ترافیک جاده با استفاده از پهپادها ارائه کرد. نتایج منعکس‌کننده انعطاف‌پذیری بالا و نمای واضح کلی گرفته‌شده توسط فیلم‌ها و عکس‌های پهپادها بود و سیستم تجزیه‌وتحلیل ترافیک مبتنی بر پهپاد تأیید شد [۳].

1. Athreyasa

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

در پژوهش آل‌ترجمان و آل‌ترجمان[1]، با عنوان «پهپادهای مجهز به 5G/ IoT»، برای تحویل چندرسانه‌ای در برنامه‌های صنعت‌گرا، به طراحی و مسیریابی چندراهی جداازهم[2] در اینترنت صنعتی اشیا برای سیستم تحمل خطا با استفاده از پهپاد برای انتقال چندرسانه‌ای به یک گره مافوق در شبکه WSN ناهمگن دوردیفه پرداخته شده است. نتایج این پژوهش نشان داد رویکرد پیشنهادی CPS در مقایسه با بهینه‌سازی CPMS متداول و بهینه‌سازی FMPS، روش بهتری است [۲].

ولفوویچ و همکاران[3] (۲۰۲۰)، عملکرد پهپادها را در عملیات نجات و فوریت‌های پزشکی کشف و بررسی کردند. پارامترهای مختلف مانند سرعت پهپادها، مسافت پهپادها تا ایستگاه‌های مرکزی و 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 [۱۸].

کائو و همکاران[4] (۲۰۱۹)، در پژوهشی باعنوان «بازرسی روتین مجهز به پهپاد مبتنی بر رایانش لبه متحرک در مزرعه بادی»، مدلی را برای نظارت بر عملکرد توربین‌های بادی ارائه کردند که شامل سه بخش زمینی، فضایی و هوایی بود. در این مدل یک پهپاد با عکس‌برداری از تجهیزات توربین و ارسال اطلاعات به سرور لبه از صدمات ناشی از خرابی توربین‌ها جلوگیری می‌کرد. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده بهینگی مدل پیشنهادی بود [۶].

سالهوی و همکاران[5] (۲۰۱۹)، سیستم هوشمند نظارت و کنترل اینترنت اشیا مبتنی بر پهپاد و رایانش ابری را در یک کارخانه بتن بررسی کردند. در محیط‌های مختلف کارخانه، پهپاد اطلاعات حاصل از تصویربرداری را به ایستگاه زمینی ارسال کرده و سیستم پیشنهادی توسط رایانش ابری پس از جمع‌آوری ۵۲۰۰ نمونه به بررسی بهینه‌سازی نحوه قرارگیری پهپاد در مکان‌های مختلف و میزان تأخیر کل پرداخته است. نتایج به‌وضوح امکان برقراری مدل پیشنهادی را در ارائه یک سیستم مطمئن و کارآمد برای کنترل ازراه‌دور پهپاد به‌منظور بهبود کیفیت محصول و کاهش ضایعات را نشان داد [۱۷].

نا و همکاران[6] (۲۰۱۹)، یک مدل ارتباطی بیسیم WPS چندحامل[7] به کمک پهپاد برای سناریوهای اینترنت اشیا ارائه کردند. در این پژوهش از الگوریتم تکرار جایگزین[8] استفاده شد. ابتدا برای مسیر پهپاد، با استفاده از روش چندمنظوره لاگرانژ، مجموعه زیرحامل، قدرت زیرحامل و تخصیص زیرلبه بهینه می‌شود؛ سپسبرای تنظیم مجموعه ثابت حامل، قدرت زیرحامل و

1. Alturjman & Alturjman
2. K-Disjoined Multipath
3. Wulfovich et al.
4. Cao et al.
5. Salhaoui et al.
6. Na et al.
7. Multi-Carrier
8. Alternative iteration algorithm

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

تخصیص زیرلبه، مسیر پهپاد توسط CVX برای حالت یک پرواز و حالت پرواز دوره‌ای بهینه می‌شود. درنهایت تابع هدف با بهینه‌سازی تخصیص منابع و مسیر پهپاد به‌طور 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 نه‌تنها به میزان زیادی نرخ حداقل قابل‌دستیابی را افزایش می‌دهد، بلکه برای دو حالت پرواز نیز به‌خوبی کار می‌کند [۱۴].

لاگکاس و همکاران[1] (۲۰۱۸)، سیستمی برای امنیت پهپادهای غیرنظامی در صنایع به‌عنوان شیء در اینترنت اشیا طراحی کردند. پارامترهای اصلی این پژوهش امنیت و حریم خصوصی پهپادها در شبکه‌های توزیع برق و شبکه خون‌رسانی بیمارستان‌ها بود که با استفاده از حسگرهای مادون‌قرمز، اینفرارد[2] و حسگرهای موقعیت‌یاب چارچوبی برای ایجاد شبکه پهپادها به‌عنوان جزئی از اینترنت اشیا ارائه و کارایی آن تأیید شد [۱۳].

در پژوهش حاضر، مدلی ترکیبی از اینترنت اشیا و پهپادهای غیرنظامی برای نظارت هوشمند بر عملکرد تجهیزات صنعتی با رویکرد رایانش لبه ارائه شده است که به‌عنوان مورد مطالعاتی توربین‌های بادی موردبررسی قرار گرفته است. مدل ارائه‌شده توسط روش‌های ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره و روش محدودیت اپسیلون تقویت‌شده با استفاده از اعداد تصادفی حل شده است.

مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده در رابطه با موضوع پژوهش حاضر در جدول ۱، ارائه شده است.

جدول ۱. پژوهش‌های داخلی و خارجی پیرامون موضوع پژوهش

پژوهشگر / سال	نوع رایانش ابر، مه	استفاده از پهپاد	حوزه	کاربرد مسئله	عدم قطعیت	نوع - تعداد هدف	نوع مدل
کائو و همکاران (۲۰۱۹)	مه	✓	تولید نیرو	نظارت بر عملکرد توربین‌های بادی	احتمالی	کم‌ینه‌سازی هزینه نگهداری ـ تک‌هدفه	مفهومی
آل‌ترجمان و آل‌ـ ترجمان (۲۰۲۰)	ـ	✓	صنعتی	طراحی و مسیریابی چندراهی جدا از هم در اینترنت صنعتی اشیا (IIoT) برای سیستم تحمل خطا	احتمالی	کمّینه‌سازی مصرف انرژی ـ تک‌هدفه	ریاضی
سالهوی و همکاران	ابری	✓	صنعتی	سیستم هوشمند نظارت و کنترل در یک کارخانه بتن	احتمالی	کمّینه‌سازی زمان ارسال	ریاضی

1. Lagkas et al.
2. Infrared

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

پژوهشگر/ سال	نوع رایانش ابر،	استفاده از پهپاد	حوزه	کاربرد مسئله	عدم قطعیت	نوع - تعداد هدف	نوع مدل
(۲۰۱۹)						داده ـ تک‌هدفه	
نا و همکاران (۲۰۲۰)	ـ	✓	مخابرات	ارائه یک مدل ارتباطی بی‌سیم WPC چند حامل[1] به کمک پهپاد (UAV-assisted) برای سناریوهای اینترنت اشیا	احتمالی	کمّینه‌سازی مسافت طی‌شده پهپاد و انرژی مصرف‌شده ـ چندهدفه	ریاضی
لاگکاس و همکاران (۲۰۱۸)	ـ	✓	صنعتی	طراحی سیستمی برای امنیت پهپادهای غیرنظامی در صنایع به‌عنوان شیء در اینترنت اشیا	فازی	–	مفهومی
کارو و کانو (۲۰۱۹)[2]	ابری	✓	آب‌وهوا	بررسی فناوری LoRa بر روی پهپادهای طراحی‌شده برای اندازه‌گیری وضعیت آب‌وهوا	احتمالی	کمّینه‌سازی سطح آلودگی هوا ـ تک‌هدفه	ریاضی
اسلیماتی و همکاران[3] (۲۰۱۷)	ابری	✓	محیط زیست	تحلیلی تجربی از سیستم‌های رباتیکی مبتنی بر IoT برای نظارت بر محیط‌زیست	استوار	–	مفهومی
کالاتزیس و همکاران[4] (۲۰۱۸)	ابری – لبه	✓	محیط زیست	استفاده از پهپادهای غیرنظامی در بستر اینترنت اشیا برای شناسایی زودهنگام آتش‌سوزی در جنگل	احتمالی	–	مفهومی
کری و همکاران[5] (۲۰۱۸)	ابری	✓	سلامت	سیستمی برای شرایط اضطراری در حوزه پزشکی و نظارت بر بهداشت و سلامت	احتمالی	کمّینه‌سازی زمان خدمت ـ تک‌هدفه	ریاضی
کلانتری و همکاران[6] (۲۰۱۶)	ابری		مخابرات	روشی برای یافتن موقعیت‌های هواپیماهای بدون سرنشین در منطقه‌ای با تراکم کاربر متفاوت با استفاده از الگوریتم ابتکاری برای	احتمالی	بیشینه‌سازی سرعت انتقال داده ـ تک‌هدفه	ریاضی

1. Multi- Carrier
2. Caro and Cano
3. Scilimati et al.
4. Kalatzis et al.
5. Cary et al.
6. Kalantari et al.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

پژوهشگر / سال	نوع رایانش ابر،	استفاده از پهپاد	حوزه	کاربرد مسئله	عدم قطعیت	نوع - تعداد هدف	نوع مدل
				افزایش کیفیت خدمات ارائه‌دهندگان سرویس‌های مخابراتی			
پژوهش حاضر	لبه	✓	صنعتی	استفاده از اینترنت اشیا و پهپادهای غیرنظامی برای نظارت بر عملکرد توربین‌های بادی	احتمالی	کمّینه‌کردن هزینه انرژی و بیشینه‌کردن احتمال موفقیت در ارسال داده‌ها ـ چندهدفه	ریاضی

۳. روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش از نظر ماهیت، جزو پژوهش‌های کمّی است؛ زیرا در این پژوهش از یک مدل ریاضی برتی بررسی داده‌ها استفاده شده است؛ همچنین از لحاظ هدف، پژوهشی توسعه‌ای و کاربردی به‌شمار می‌رود و به لحاظ نوع داده‌ها از نوع پژوهش‌های توصیفی است. ازآنجاکه مدل این پژوهش از نوع چندهدفه است و برای حل آن باید از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه استفاده کرد، در این بخش دو روش «محدودیت اپسیلون تقویت‌شده» و «الگوریتم فراابتکاری ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره» (نسخه دوم) معرفی و تشریح شده است.

روش محدودیت اپسیلون علی‌رغم دارابودن مزیت‌های فراوان نسبت به روش وزن‌دهی، در موارد زیر باید موردتوجه قرار گیرد [۱۵]:

۱. محاسبه دامنه توابع هدف در مجموعه کارا؛

۲. تضمین کارابودن جواب به‌دست‌آمده؛

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

به‌منظور اعمال روش محدودیت اپسیلون باید دامنه هر یک توابع هدف (حداقل k-1 تابع هدف که در محدودیت‌ها قرار می‌گیرند) را در اختیار داشت. بهترین و بدترین مقادیر به‌راحتی از طریق بهینه‌سازی تک‌هدفه و با قراردادن هدف موردنظر به‌عنوان تابع هدف مدل، محاسبه می‌شود که این روش تضمین‌کننده به‌دست‌آوردن جواب‌های کارا برای بهینه‌سازی تک‌هدفه هر تابع هدف نیست که به‌منظور غلبه بر ضعف‌های موجود در روش محدودیت اپسیلون، به‌منظور محاسبه مقادیر جدول نتایج نهایی، برای هر تابع هدف از روش لکسیکوگراف استفاده می‌شود؛

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

درنتیجه جدول نتایج نهایی در این روش تنها از جواب‌های کارا تشکیل می‌شود؛ همچنین جواب‌های به‌دست‌آمده ممکن است به جواب کارای ضعیفی منجر شود. بدین منظور روش محدودیت اپسیلون تقویت‌شده محدودیت‌های مربوط به توابع هدف فرعی را با قراردادن متغیرهای کمکی به تساوی تبدیل می‌کند [۱۶].

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 است. هر کروموزوم نیز از تعدادی ژن تشکیل می‌شود که هر ژن نمایانگر 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 [۱۶]. در الگوریتم ژنتیک به‌منظور تولید فرزندان از جمعیت والد و تولید جمعیت برای تکرارهای بعدی الگوریتم از عملگرهای انتخاب[1]، تقاطع[2] و جهش[3] استفاده می‌شود.

الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره[4] بر اساس الگوریتم ژنتیک برای حل مسائل چندهدفه توسعه داده شده است. ازآنجاکه در بیشتر مواقع در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه نمی‌توان به یک حل بهینه منحصربه‌فرد دست یافت، روش ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب با مجموعه‌ای از راه‌حل‌های نامغلوب مؤثر همراه است. راه‌حل قابل‌قبول، راه‌حلی است که عملکرد مناسبی نسبت به تمام اهداف داشته باشد؛ بنابراین به‌منظور رتبه‌بندی جواب‌ها در الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی ناچیره، دو عملگر به الگوریتم ژنتیک اضافه شده است. این دو عملگر عبارت‌اند از: عملگر فاصله ازدحامی و عملگر مرتب‌سازی سریع نامغلوب‌ها [۱۰]. دب و همکاران (۲۰۰۰)، شاخصی با عنوان فاصله ازدحامی به‌منظور تخمین چگالی جواب‌های اطراف یک نقطه مشخص در جمعیت ارائه کردند [۵]. در این پژوهش به‌منظور حل مدل ارائه‌شده در ابعاد بزرگ و به‌دلیل کاهش کارایی روش حل دقیق، نسخه دوم روش فراابتکاری ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره پیشنهاد شده است.

مراحل اجرای پژوهش

مراحل اجرای پژوهش به‌صورت زیر است:

الف) تولید داده با استفاده از پهپادها: با استفاده از پهپادهایی که روی محدوده موردنظر مستقر شده‌اند، از تجهیزات صنعتی موردمطالعه در بازه‌های زمانی مشخص تصویربرداری می‌شود. ابتدا

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

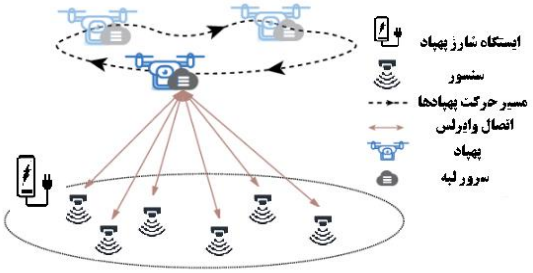
Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

پهپادها بر روی محدوده قرار می‌گیرند و شروع به پرواز می‌کنند و با استفاده از دوربین پیشرفته‌ای که بر روی آن‌ها نصب شده است، از قسمت‌های مختلف تجهیزات صنعتی عکس‌برداری می‌کنند. عکس‌برداری تا جایی ادامه می‌یابد که شارژ پهپاد درحال‌پرواز به اتمام برسد. پس از کاهش شارژ، پهپاد در محلی از محدوده صنعتی که ایستگاه شارژ قرار گرفته است، فرود می‌آید تا مجدداً شارژ شود و پهپادی که شارژ دارد شروع به پرواز کند. این فرآیند آنقدر ادامه می‌یابد تا از تمامی تجهیزات موردبررسی عکس‌برداری شود.

ب) رایانش لبه و رایانش ابری: یک سرور لبه برای دریافت و پردازش داده‌های ارسالی از پهپادها در بخشی از محدوده صنعتی مستقر می‌شود و پهپادها پس از عکس‌برداری از هر یک از تجهیزات، اطلاعات حاصل از عکس‌برداری را برای پردازش به سرور لبه یا ابر ارسال می‌کنند. اینکه تخلیه اطلاعات در لبه صورت گیرد یا ابر، به مدت‌زمان موردنیاز برای تخلیه اطلاعات و انرژی موردنیاز بستگی دارد. یادآوری این نکته لازم است که هم بر روی تجهیزات صنعتی و هم بر روی پهپادها، حسگرهای مختلفی از قبیل حسگر تشخیص فاصله، حسگر ژیروسکوپ (سرعت زاویه‌ای) برای تشخیص سرعت حرکت تیغه توربین، حسگر تشخیص حرکت برای تشخیص حرکت تیغه‌های توربین، حسگر تشخیص آتش و شعله و حسگر تشخیص رنگ برای بررسی زدگی یا شکستگی در تیغه توربین‌ها نصب می‌شود.

معرفی پارامترهای مدل. در این پژوهش، یک مزرعه بادی در نظر گرفته شده است که در آن تعداد زیادی 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. این ترانسفورماتور همچنین 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

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

مأموریت پهپاد، شناسایی N توربین بادی در مزرعه موردنظر است. ازآنجاکه شارژ پهپاد محدود است، برای شناسایی تمام توربین‌ها پهپاد نیازمند انجام K پرواز است. مجموعه N توربین بادی با N={1,2,…,N} و مجموعه K پرواز با K={1,2,…,K} مشخص می‌شوند. هر پرواز پهپاد شامل سه مرحله تشخیص تیغه توربین، انتقال محاسبات و شارژ مجدد است. پس از شارژشدن پهپاد، در مسیر برنامه‌ریزی‌شده 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 حسگر تشخیص رنگ نصب‌شده بر روی پهپاد، وضعیت سطح تجهیزات توربین به‌ویژه تیغه‌های آن مشخص می‌شود. بدین صورت که بر فرض اگر رنگ تیغه سالم پهپاد سفید باشد، در صورت شکستگی بخشی از تیغه، در قسمت شکسته‌شده رنگ سفید توسط حسگر تشخیص داده نمی‌شود. پس از اینکه عکس‌برداری انجام شد، پهپاد باید داده‌های خود را توسط سرور لبه یا ابر پردازش و درنهایت به ابر ارسال کند. با توجه به اهمیت زمان و بهنگام‌بودن داده‌های یافت‌شده، پهپاد باید قبل از تشخیص توربین بعدی داده‌ها را پردازش کند. زمانی که تمامی توربین‌های مسیر موردبررسی تشخیص داده شدند، پهپاد برای شارژ به ترانسفورماتور بازمی‌گردد. پس از شارژشدن پهپاد برای پرواز در مسیر جدید بلند می‌شود و این فرآیند تا زمانی که تمامی توربین‌ها بررسی شوند، ادامه می‌یابد.

برای مدل‌سازی این فرآیند، سیستم مختصات سه‌بعدی اقلیدسی برای اندازه‌گیری فاصله‌ها به‌کاررفته 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؛ درحالی‌که پهپاد در طول فرایند پرواز و تخلیه اطلاعات به‌دست‌آمده 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] نمایش داده می‌شود. 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:

$$d_{TS,t} = \sqrt{x_t^2 + y_t^2 + (z_s - H_0)^2}$$ رابطه (۱)

$$d_{n,t} = \sqrt{(x_t - x_n)^2 + (y_t - y_n)^2}$$ رابطه (۲)

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

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 اینکه ممکن است سرعت باد در هر زمان تغییر کند، هنگامی که در حین فرایند تشخیص وزش باد رخ داد، ممکن است باعث برخورد پهپاد با پره‌های توربین و صدمه به هر دو شود. برای جلوگیری از آسیب به تیغه ناشی از برخورد پهپاد، فاصله تشخیص ایمنی با رابطه $d_s = v_w t_s$ به‌دست می‌آید که در آن v_w سرعت باد و t_s مدت‌زمان 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[1] آمده، استفاده شده است [۱۹].

$$P_s = e^{-\lambda d_s}$$ رابطه (۳)

در رابطه ۳، λ پارامتری است که عملکرد دوربین را منعکس می‌کند.

در این پژوهش فرض شده است که کانال بی‌سیم بین پهپاد و ترانسفورماتور قرار دارد؛ بنابراین با توجه به پژوهش ژو و همکاران[2]، افزایش قدرت این کانال از رابطه ۴، به‌دست می‌آید [۲۰].

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

β_0 میزان افزایش قدرت کانال در فاصله d=۱m است.

با توجه به قدرت انتقال اطلاعات در هر پهپاد ($P_0[n]$)، نرخ انتقال اطلاعات در توربین ام n ($r_{t_0}[n]$) بر اساس پژوهش ژانگ و همکاران، از رابطه ۵، به دست می‌آید [۱۹].

$$r_{t_0}[n] = Blog_2(1 + \frac{P_0[n]g_t}{\sigma^2})$$ رابطه (۵)

در رابطه ۵، 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 به‌دست می‌آید:

1. Zhang et al.
2. Zhao er al.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

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

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

در محیط‌های بزرگ، با افزایش فاصله انتقال، در مسیر کانال انتقال موانعی[1] قرار می‌گیرد و این مورد باعث کاهش نرخ موفقیت در انتقال می‌شود. در این پژوهش برای محاسبه احتمال موفقیت در ارسال اطلاعات از مدل احتمال 3GPP استفاده شده است که به‌صورت زیر است.

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

در رابطه ۸، $d_{t0} = ۲۹۴/۰۵\log(z_s) - ۹۴/۴۳۲$ آستانه موفقیت انتقال در ارتفاع z_s است و $P_0 = ۲۳۳/۹۸\log(z_s) - ۰/۹۵$ است؛ بنابراین با توجه به روابط ۳ و ۸، احتمال موفقیت در انتقال داده معتبر توسط پهپاد به ترانسفورماتور برابر با رابطه ۹، است.

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

بنابراین در حالت انتقال اطلاعات به ترانسفورماتور، به‌منظور کاهش احتمال ازدست‌دادن بسته اطلاعاتی و مصرف انرژی بارگیری، پهپاد باید نزدیک ترانسفورماتور حرکت کند.

درصورتی‌که 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_{to} است) به‌صورت 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، به‌صورت زیر به‌دست می‌آید.

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

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

1 NLOS Component

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

به‌منظور استفاده بهینه از انرژی، پهپاد می‌تواند فرکانس CPU f [n] را با توجه به کار محاسبه به‌صورت تطبیقی تنظیم کند. مقدار محاسبه $R_c[n]$ و مصرف انرژی محاسبه $E_c[n]$ در زمان محاسبه $t_c[n]$ را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه کرد:

$$R_c[n] = \frac{t_c[n]f[n]}{C_u}$$ رابطه (۱۲)

$$E_c[n] = \theta_u t_c[n] f[n]^3$$ رابطه (۱۳)

C_u تعداد چرخه‌های CPU برای تکمیل محاسبات را نشان می‌دهد و θ_u ضریب خازنی مؤثر[1] CPU است. ازآنجاکه همه داده‌های حسی باید قبل از شروع تشخیص توربین بعدی پردازش شوند، محدودیت پردازش داده‌ها به شرح رابطه ۱۴ است.

$$R_c[n] + (1-\sigma)R_{t_0}[n] + \sigma R_{so}[n] \geq R_n \quad ,\forall\, n \in N$$ رابطه (۱۴)

در رابطه ۱۴، R_n مقدار داده‌های حسی توربین nام است و به وضعیت آسیب تیغه مربوط می‌شود. $\sigma = \{0,1\}$که مربوط به نوع ارسال اطلاعات است. $\sigma = 0$ به معنای انتقال اطلاعات به ترانسفورماتور و $\sigma = 1$ مربوط به ارسال اطلاعات به ابر است. علاوه بر این، با توجه به محاسبه حالت بارگذاری، مصرف انرژی پردازش مربوطه برای هر توربین بادی با استفاده از رابطه ۱۵، به‌دست می‌آید.

$$E_p[n] = E_c[n] + (1-\sigma)E_{t_0}[n] + \sigma E_{so}[n]$$ رابطه (۱۵)

در حالت انتقال اطلاعات به ترانسفورماتور، پهپاد می‌تواند محاسبه محلی را تا زمانی که تمام داده‌های حسی پردازش شوند، انجام دهد؛ بنابراین مدت‌زمان فرآیند محاسبات برابر است با مجموع مدت تشخیص توربین (t_d) و مدت‌زمان پرواز از نقطه تشخیص به نقطه انتقال اطلاعات $(t_{so}[n])$ و مدت‌زمان محاسبات $(t_0[n])$ و مدت‌زمان پرواز از نقطه انتقال به توربین بعدی $(t_{os}[n])$ که مطابق رابطه ۱۶، محاسبه می‌شود.

$$T_{P,to}[n] = t_d + t_{so}[n] + t_o[n] + t_{os}[n]$$ رابطه (۱۶)

1. Effective capacitance coefficient

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

همچنین درصورتی‌که انتقال اطلاعات به ابر صورت گیرد، مدت‌زمان فرآیند محاسبات از رابطه ۱۷، به‌دست می‌آید.

$$T_{P,so}[n] = t_d + t_c[n]$$ رابطه (۱۷)

در رابطه ۱۷، $t_c[n]$ مدت‌زمان انتقال اطلاعات به ابر است؛ بنابراین با توجه به روابط ذکرشده، مدت‌زمان انتقال اطلاعات برای هر توربین در حالت کلی به‌صورت رابطه ۱۸، محاسبه می‌شود.

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

در رابطه ۱۸، $t_{f_1}[k]$ مدت‌زمان پرواز پهپاد از ایستگاه شارژ به سمت اولین توربین در kاُمین پرواز و N_k مجموعه توربین‌های منتخب در kاُمین پرواز است.

سرعت پرواز پهپاد را می‌توان از رابطه ۱۹، به‌دست آورد.

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

بنابراین مدت‌زمان پرواز در kاُمین پرواز برابر با رابطه ۲۰، است.

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

اما در فرآیند پرواز، پهپاد باید با سرعت باد مقاومت کند و بنابراین سرعت نسبی پهپاد برابر با رابطه ۲۱، است.

$$v_p = v_u - v_w$$ رابطه (۲۱)

همچنین برای رعایت موارد ایمنی، بیشینه سرعت مجاز پهپاد برابر با v_{max} است.

از طرفی انرژی موردنیاز پهپاد از مصرف انرژی محرکه و انرژی بالقوه گرانشی که باید بر آن غلبه کرد، تأمین می‌شود که با استفاده از رابطه ۲۲، به‌دست می‌آید.

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

در رابطه ۲۲، m برابر وزن پهپاد، g گرانش زمین، t_f مدت‌زمان 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 جابه‌جایی‌هایی که به کاهش دقت دوربین منجر می‌شود از بین برود؛ بنابراین با توجه

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

به مصرف انرژی برای پرواز و همچنین مصرف انرژی در فرآیند تشخیص هر توربین، مجموع انرژی مصرف‌شده توسط پهپاد از رابطه ۲۳، محاسبه می‌شود:

$$E_k = \sum_0^{T_f[k]} E_f[t] + \sum_1^{N_k} E_p[n]$$ رابطه (۲۳)

با توجه به محدودبودن انرژی باتری پهپاد، محدودیت ۲۴، را می‌توان تعریف کرد.

$$E_k \leq E_u \ , k \in K$$ رابطه (۲۴)

در رابطه ۲۴، E_u بیشترین ظرفیت باتری پهپاد است.

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

$$T_{ch}[k] = \frac{E_k}{d_c}$$ رابطه (۲۵)

پارامترها و متغیرهای مدل در جدول ۲، ارائه شده است.

جدول ۲. پارامترها و متغیرهای مدل

پارامتر / متغیر	شرح
$T_f[K]$	مدت‌زمان انتقال اطلاعات برای هر توربین
$T_{ch}[k]$	مدت‌زمان شارژ در Kاُمین 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
$P_{0,max}$	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 مصرف‌شده توسط پهپاد
E_u	بیشینه ظرفیت باتری پهپاد
γ	مجموعه متغیرهای بهینه شامل $P_0[n], f[n], q[T]$

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

مدل‌سازی مسئله. با توجه به اینکه تصویربرداری توسط پهپاد از مزرعه بادی باید در یک روز انجام شود، در این مسئله مجموع هزینه 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 می‌شود:

$$Z1: \min_{\gamma} \sum_{0}^{K} \beta E_k\left(T_f[K] + T_{ch}[k]\right)$$

$$Z2: \min_{\gamma} \sum_{0}^{K} (1 - Pr_{suc}[n])$$

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

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

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

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

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

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

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

اندیس‌های مدل در جدول۳، ذکر شده است.

جدول۳. اندیس‌های مدل

اندیس	توضیح اندیس
n	شماره پهپاد
k	شماره پرواز

برای حل مدل لازم است تا برای پارامترهای مدل مقداری فرضی در نظر گرفته شود که در جدول ۴، مشاهده می‌شود.

جدول ۴. پارامترهای فرضی مدل

پارامتر	مقدار
ارتفاع توپی تیغه توربین‌ها نسبت به زمین	۵۰ متر
پهنای باند ارتباطی (B)	۱۰ MHz
واریانس نویز (σ2)	-۹۶ dBm
افزایش قدرت کانال (β_0)	-۵۰ dB
حداکثر قدرت انتقال ($P_{0,max}$)	۳۳ dBm
ضریب خازنی مؤثر (θ_u)	$۱۰^{-۲۸}$
حداکثر فرکانس CPU	۱۰ GHz
حداکثر سرعت پیشرانه پهپاد (v_{max})	15 m/s
حداقل میزان موفقیت در ارسال اطلاعات (Pr_{th})	۰/۹

Archive of SID.ir

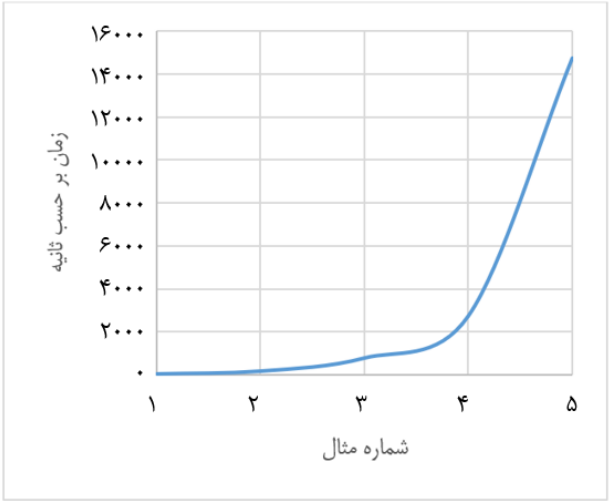
Archive of SID.ir

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

حل آزمایش‌های عددی به کمک روش محدودیت اپسیلون تقویت‌شده. برای بررسی و تحلیل مدل پیشنهادی ارائه شده، تعدادی مثال عددی در ابعاد مختلف به کمک روش محدودیت اپسیلون تقویت‌شده در نرم‌افزار گمز ۲۴.۱.۲ کدنویسی شد.

نمودار زمان حل این روش به‌ازای آزمایش‌های عددی در ابعاد مختلف در شکل ۲، نشان داده شده است. با توجه به نمودار شکل ۲، با اندکی افزایش در ابعاد مسئله، زمان حل به‌شدت افزایش می‌یابد؛ بنابراین به‌دلیل پیچیدگی بالای مسئله روش حل دقیق محدودیت اپسیلون قادر به محاسبه جواب پارتو در زمان معقول نیست. به همین منظور در ادامه این پژوهش، روش حل فراابتکاری ارائه خواهد شد.

مسئله برای شرایط (ابعاد) مختلف توسط روش محدودیت اپسیلون تقویت‌شده حل شده و نتایج آن در جدول ۵، مشخص شده است که M تعداد توربین‌های موجود در مزرعه بادی و N تعداد پهپادهای موجود برای پرواز است. معیارهای عملکردی آزمایش‌های عددی در جدول ۶ مشخص شده است.



شکل ۲. نمودار زمان حل روش محدودیت اپسیلون تقویت‌شده در آزمایش‌های عددی مختلف

حل آزمایش‌های عددی به کمک روش ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره. در این بخش، مثال‌های عددی بخش قبل (محدودیت اپسیلون) به همراه تعدادی آزمایش‌های عددی در ابعاد بزرگ‌تر، به کمک نسخه دوم الگوریتم فراابتکاری ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره در نرم‌افزار متلب ۲۰۱۵ کدنویسی شده است.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

در این الگوریتم به‌ترتیب 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 (جابه‌جایی): در هر بار دو کروموزوم به‌طور تصادفی انتخاب و عملگر تقاطع روی آن‌ها اعمال می‌شود که در این پژوهش از عملگرهای تقاطع پیوسته و تقاطع تک‌نقطه‌ای 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 با هدف ایجاد تنوع در جمعیت ایجاد شده است که در آن در هر بار یک کروموزوم به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود و دو ژن از هر کروموزوم هم به‌صورت تصادفی انتخاب و با یکدیگر جابه‌جا می‌شوند.

شبه‌کد الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره به‌صورت زیر است:

```
input :sizepop, probmut, stopping_criterion
1 P 0 )Generate initial population of sizepop individuals ;
2 Q 0 ) ;
3 t )0 ;
4 while stopping_criterion not satisfied do
5 Rt )Pt ∪Qt ;
6 F )Fast non-dominated sorting(Rt ) ;
7 Pt+1 ) ;
8 i)1 ;
9 while |Pt+1 |+|Fi| ≤ sizepop do
10 Compute Crowding Distance of Fi ;
11 Pt+1 )Pt+1 ∪Fi;
12 i)i+1 ;
13 end
14 if |Pt+1 | < sizepop then
15 Sort (Fi, ≺n);
16 j = 1 ;
17 while |Pt+1 | < sizepop do
18 Pt+1 )Pt+1 ∪ Fi[ j] ;
19 j) j+1 ;
20 end
```

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir


```
21 end
22 Qt+1 )Crossover(Pt+1 ) ;
23 Qt+1 )Qt+1 ∪ Mutation(Pt+1 , probmut ) ;
24 t )t +1 ;
25 end
26 NDS)non-dominated solutions of Pt ;
27 return NDS ;
```

نتایج به‌دست‌آمده مطابق با جدول ۷، است. مقادیر معیارهای عملکرد جواب‌های پارتو نیز برای هر یک از آزمایش‌های عددی حل‌شده به روش ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره در جدول ۸، ارائه شده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، روش ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره آزمایش‌ها در ابعاد بزرگ که روش محدودیت اپسیلون از حل آن‌ها عاجز بود را به‌خوبی و در زمان معقول پاسخ داده است.

جدول ۵. نتایج حل مدل با استفاده از روش محدودیت اپسیلون تقویت‌شده

شماره مثال	ابعاد مسئله (M-N)	مقدار ni	زمان حل (ثانیه)	شماره جواب پارتویی	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم
۱	۵–۱	۵	۴۷/۸۱۸	۱	۱۰۹۳۸۵	۰/۰۳۷
				۲	۱۰۷۳۸۴	۰/۰۴۱
				۳	۱۰۲۴۷۵	۰/۰۵۷
۲	۱۰–۲	۵	۱۷۶/۵۶۴	۱	۲۴۹۲۸۴	۰/۰۴۲
				۲	۲۳۹۵۹۳	۰/۰۳۷
				۳	۲۱۶۸۳۵	۰/۰۵۵
۳	۲۰–۳	۷	۷۸۶/۷۲۳	۱	۳۸۹۲۸۲	۰/۰۳۸
				۲	۳۶۲۸۴۸	۰/۰۴۴
۴	۳۰–۴	۱۰	۲۷۴۵/۷۱۹	۱	۷۲۸۵۹۳	۰/۰۳۸
				۲	۶۸۱۰۹۲	۰/۰۴۴
				۳	۶۶۲۴۲۳	۰/۰۵۲
				۴	۵۷۲۹۵۹	۰/۰۵۶
				۵	۵۲۸۵۰۵	۰/۰۶۱
۵	۵۰–۵	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

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول ۶. معیارهای عملکرد آزمایش‌های عددی روش محدودیت اپسیلون تقویت‌شده

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

جدول ۷. نتایج حل مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره

شماره مثال	ابعاد مسئله (M-N)	زمان حل (ثانیه)	شماره جواب پارتویی	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم
۱	۵-۱	۸/۲۴	۱	۱۰۱۵۱۵	۰.۰۳۴
			۲	۱۰۰۸۷۴	۰.۰۳۸
			۳	۹۸۲۵۶	۰.۰۴۲
۲	۱۰-۲	۱۲/۲۷	۱	۲۴۳۶۲۷	۰/۰۳۵
			۲	۲۳۲۷۳۸	۰/۰۴۲
			۳	۲۱۷۴۳۶	۰/۰۵۵
۳	۲۰-۳	۱۲/۶۹	۱	۳۸۹۲۶۲	۰/۰۳۸
			۲	۳۶۲۷۷۳	۰/۰۴۴
۴	۳۰-۴	۱۴/۸۳	۱	۷۲۷۳۵۰	۰/۰۳۸
			۲	۶۸۱۳۵۵	۰/۰۴۴
			۳	۶۶۷۳۷۳	۰/۰۵۲
			۴	۵۷۷۷۳۷	۰/۰۵۵
			۵	۵۲۸۱۲۲	۰/۰۶۲
			۶	۵۱۷۵۷۳	۰/۰۶۵
۵	۵۰-۵	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
۶	۱۰۰-۶	۱۷/۶۱	۱	۳۵۲۲۲۸۲	۰/۰۷۱
			۲	۳۴۴۷۶۸۸	۰/۰۷۳
			۳	۳۳۹۵۵۰۱	۰/۰۷۷

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

شماره مثال	ابعاد مسئله (M-N)	زمان حل (ثانیه)	شماره جواب پارتویی	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم
			۴	۳۳۲۱۹۴۶	۰/۰۷۸
			۵	۳۲۷۶۵۱۷	۰/۰۸۱
			۶	۳۱۹۸۲۳۵	۰/۰۸۲
			۷	۳۱۱۳۴۹۲	۰/۰۸۳
			۸	۳۰۶۳۷۴۶	۰/۰۸۳

جدول ۸. معیارهای عملکرد آزمایش‌های عددی الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره

شماره آزمایش	تعداد جواب‌های پارتو	زمان محاسبه (ثانیه)	میانگین فاصله از جواب ایده‌آل	پراکندگی	فاصله
۱	۳	۸/۲۴	۰.۹۵۱۰۳۴	۰/۷۶۸۹۲۳	۰
۲	۳	۱۲/۲۷	۰/۹۷۲۶۵۳	۰/۷۱۷۵۴۵	۰
۳	۲	۱۲/۶۹	۰/۷۳۸۴۷۳	۰/۶۴۷۵۵۳	۰/۱۷۳۸۶۵
۴	۶	۱۴/۸۳	۰/۹۷۹۰۵۹	۰/۷۲۹۳۰۳	۰
۵	۸	۱۶/۵۵	۰/۵۷۹۴۴۳	۰/۴۷۱۲۷۰	۰/۱۱۷۰۹۳
۶	۸	۱۷/۶۱	۰/۶۱۶۱۳۷	۰/۲۲۸۸۳۹	۰/۰۳۸۴۶۲

با توجه به نتایج، روش محدودیت اپسیلون تقویت‌شده با افزایش ابعاد مسئله قادر به به‌دست‌آوردن جواب‌های پارتو در زمان معقول نبوده است و زمان حل روش محدودیت اپسیلون با افزایش ابعاد مسئله به‌شدت افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که این روش در ابعاد بزرگ قادر به حل مسئله در زمان معقول نیست؛ اما روش ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره توانست مسائل با ابعاد بزرگ را نیز در زمان بسیار کوتاه حل کرده و جواب‌های خوبی تولید کند؛ همچنین به‌دلیل پیچیدگی مسئله باید از روش‌های حل ابتکاری یا فراابتکاری استفاده شود. از دلایل پیچیده‌بودن این مسئله می‌توان به غیرخطی‌بودن مدل، چندهدفه‌بودن 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 پژوهش برای مثال‌های با ابعاد بزرگ از روش فراابتکاری استفاده شده است.

با توجه نتایج حاصل از حل مسئله به دو روش محدودیت اپسیلون تقویت‌شده 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 اپسیلون تولید شده‌اند. همچنین مقادیر معیارهای عملکرد دو روش (به غیر از معیار زمان) در مقایسه با یکدیگر بسیار نزدیک به هم هستند؛ پس می‌توان گفت هر دو روش

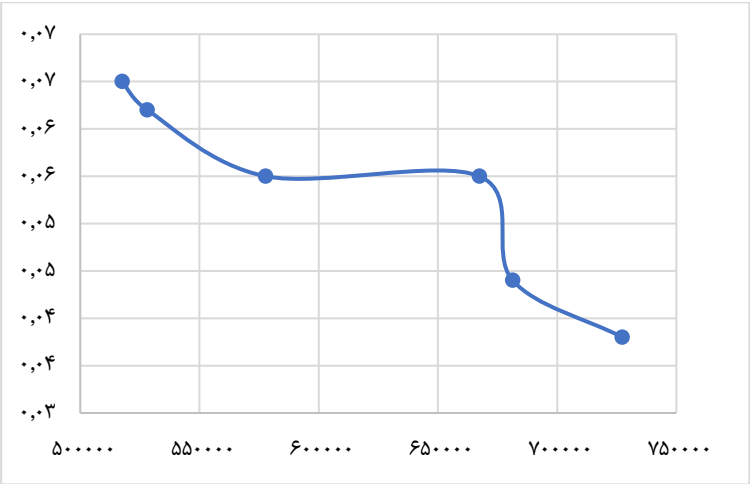
Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

در ابعاد کوچک هم جواب‌های خوب و تقریباً دقیقی ارائه می‌دهند؛ اما روش ژنتیک در معیار زمان نیز بهتر عمل کرده و زمان حل کوتاه‌تری را به خود اختصاص داده است.

از نتایج حاصل از حل مدل پژوهش، می‌توان دریافت که با افزایش ابعاد مسئله، تعداد جواب‌های پارتویی بیشتری تولید می‌شود؛ همچنین با مشاهده هر یک از جبهه‌های پارتویی می‌توان دریافت که در بهینه‌سازی چندهدفه نمی‌توان به یک جواب واحدی دست یافت که هم‌زمان همه توابع هدف را بهینه کند؛ یعنی در مجموعه جواب‌های پارتویی، جواب‌ها نمی‌توانند بدون بدترشدن مقدار حداقل یکی از توابع هدف دیگر، بهتر شوند. برای مثال در مسئله شماره ۵، با حرکت از نقطه پارتویی اول به سمت نقاط پارتویی بعدی، مقدار تابع هدف اول (هزینه انرژی مصرف‌شده توسط پهپاد) کمتر شده (بهبود می‌یابد) و مقدار تابع هدف دوم (احتمال عدم‌موفقیت در ارسال اطلاعات) بیشتر (بدتر) می‌شود.

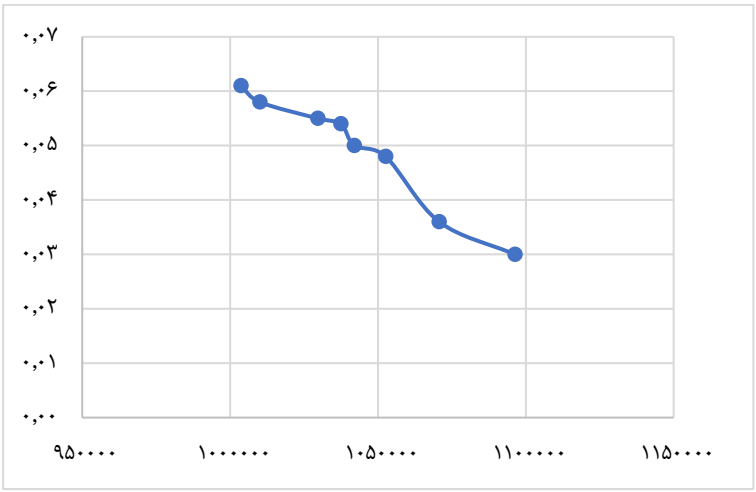
در شکل‌های ۳ تا ۵، جبهه پارتویی مثال‌های شماره ۴، ۵ و ۶ به‌عنوان نمونه ترسیم شده‌اند که از روش فراابتکاری چندهدفه ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره به‌دست آمده‌اند. در این نمودارها مجموعه جواب‌های پارتویی هر مسئله مشاهده می‌شود.



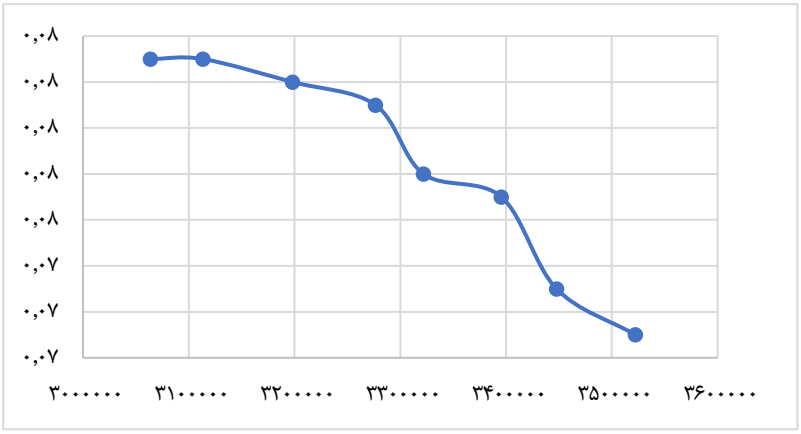
شکل ۳. نمودار پارتویی مثال ۴ روش NSGAII

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



شکل ۴. نمودار پارتویی مثال ۵ روش NSGAII



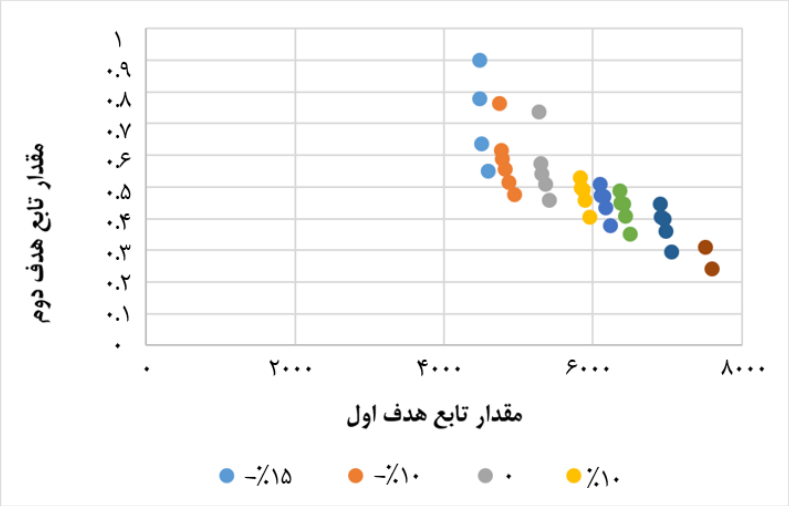
شکل ۵. نمودار پارتویی مثال ۶ روش NSGAII

تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی. در این بخش به‌منظور 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) به‌ازای مقادیر مختلف پارامترهای مسئله بررسی شده است. نتایج در شکل‌های ۶ و ۷، مشاهده می‌شوند. یادآوری این نکته لازم است که اعداد مربوط به تابع هدف اول در نمودار برای وضوح بیشتر بر مبنای هزار ریال نمایش داده شده‌اند.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

تحلیل حساسیت توابع هدف نسبت به حداکثر سرعت پیشرانه پهپاد. با توجه به شکل ۶، با افزایش حداکثر سرعت پیشرانه پهپاد، مجموع انرژی مصرفی در سیستم، افزایش و احتمال موفقیت در ارسال صحیح اطلاعات پردازش‌شده توسط پهپاد کاهش می‌یابد.

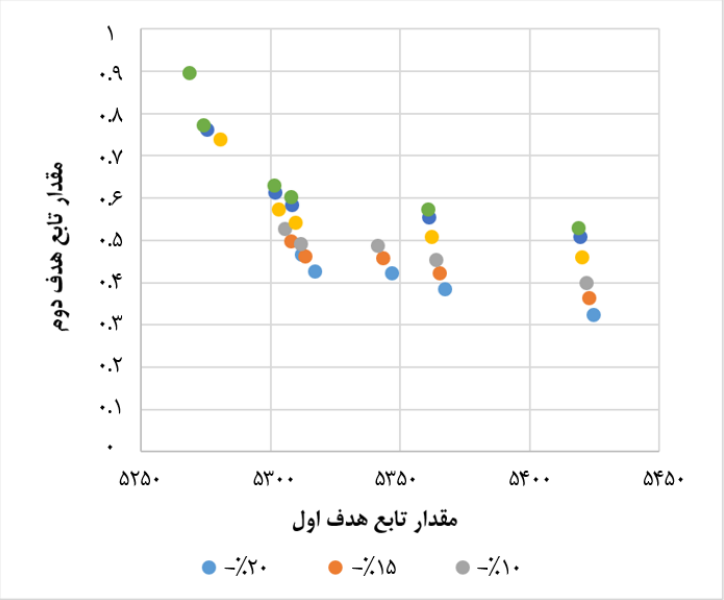


شکل ۶. تغییرات توابع هدف به‌ازای درصدهای تغییر در سرعت پیشرانه پهپاد

تحلیل حساسیت توابع هدف نسبت به پهنای باند ارتباطی. با توجه به شکل ۷، با افزایش پهنای باند ارتباطی، مجموع انرژی مصرفی در سیستم کاهش یافته و درنتیجه تابع هدف اول کاهش می‌یابد؛ همچنین با افزایش پهنای باند ارتباطی، احتمال موفقیت در ارسال صحیح اطلاعات پردازش‌شده توسط پهپاد افزایش (تابع هدف دوم) افزایش پیدا می‌کند؛ درنتیجه باید تا حد ممکن پهنای باند ارتباطی را در سیستم بیشینه کرد.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



شکل ۷. تغییرات توابع هدف به‌ازای درصدهای تغییر در پهنای باند ارتباطی

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش به طراحی و تبیین مدل ترکیبی اینترنت اشیا و پهپادهای غیرنظامی برای نظارت هوشمند بر عملکرد تجهیزات صنعتی با رویکرد رایانش لبه (مورد مطالعه: توربین‌های بادی) پرداخته شده است. برای این منظور مدلی دوهدفه شامل ۷ محدودیت ارائه شده است. با توجه به اینکه تصویربرداری توسط پهپاد از مزرعه بادی باید در یک روز صورت گیرد، در این مسئله مجموع انرژی مصرفی در پهپاد مدل‌سازی شده و به‌عنوان تابع هدف اول استفاده شده است. احتمال موفقیت در ارسال اطلاعات توسط پهپاد نیز به‌عنوان تابع هدف دوم در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه مدل مشابه این پژوهش در هیچ پژوهشی استفاده نشده، از تولید داده‌های موردنیاز مدل به‌صورت تصادفی استفاده شده است. در ادامه، مدل با استفاده از ابزار تحلیل حساسیت اعتبارسنجی شد. نتایج، رفتاری مطابق با آنچه موردانتظار بود را نشان داد که حاکی از صحت مدل پیشنهادی پژوهش است؛ سپس مدل ارائه‌شده به کمک روش حل محدودیت اپسیلون تقویت‌شده و با استفاده از نرم‌افزار گمز حل شد. با توجه به پژوهش‌های به‌عمل‌آمده، روش محدودیت اپسیلون بهترین روش برای به‌دست‌آوردن جواب‌های پارتو در مسائل چندهدفه است؛ اما به‌دلیل پیچیدگی مسئله در پژوهش حاضر، این روش با افزایش ابعاد مسئله کارایی خود را ازدست داده است و قادر به یافتن مرز پارتو در مسائل با ابعاد بزرگ در زمان معقول نیست؛ همچنین به‌دلیل غیرخطی‌بودن مدل چنین اتفاقی خارج از انتظار نبوده است. به همین منظور در

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

ادامه مدل با استفاده از نسخه دوم روش فراابتکاری ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره و به کمک نرم‌افزار متلب حل شد. در این پژوهش به‌منظور عملکرد بهتر الگوریتم ژنتیک از ساختار جدیدی برای نمایش کروموزوم‌های استفاده شد. این الگوریتم توانست مسائل در ابعاد بزرگ را که روش محدودیت اپسیلون قادر به حل آن نبود، در زمان بسیار کوتاهی حل کند. با توجه به نتایج، روش محدودیت اپسیلون تقویت‌شده و ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره تنها در زمان حل با یکدیگر متفاوت بوده و دارای اختلاف معنادار هستند و در سایر معیارها عملکرد مشابهی دارند؛ به‌عبارت‌دیگر الگوریتم فراابتکاری پژوهش از لحاظ زمان حل بسیار بهتر عمل کرد و در سایر معیارها در حد روش حل دقیق پژوهش بود و جواب‌های قابل‌قبول و مناسب به‌دست آمد. درنتیجه روش ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره به‌عنوان روش برتر برای حل مسئله پژوهش پیشنهاد می‌شود. از نتایج این پژوهش می‌توان برای مدیریت و نظارت مؤثر و صحیح بر تجهیزات صنعتی در واحدهای صنعتی مختلف به‌منظور بهینه‌سازی هزینه، کیفیت و زمان بازرسی استفاده کرد؛ همچنین می‌توان قبل از احداث یک واحد صنعتی، محدودیت‌های نظارتی را در جانمایی تجهیزات در نظر گرفت و در زمان چینش تجهیزات، مدیریت لازم برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و زمان را با توجه به مدل این پژوهش انجام داد. ازآنجاکه مدل ترکیبی اینترنت اشیا و پهپادهای غیرنظامی برای هوشمندسازی نظارت بر تجهیزات صنعتی در مبانی نظری موضوع جدیدی است، زمینه‌های زیادی برای توسعه در این موضوع وجود دارد که از آن جمله می‌توان به استفاده از مدل ذکرشده در مطالعه‌های موردی دیگر مانند هوشمندسازی نظارت بر سیستم‌های برق‌رسانی، خدمات آتش‌نشانی و غیره اشاره کرد؛ همچنین بررسی مدل ذکرشده در شرایطی که پهپادها به‌صورت هم‌زمان پرواز کنند و توالی وجود نداشته باشد، قابل‌توسعه است.

تعارض منافع. برای ارائه مطالب و نگارش این مقاله هیچ‌گونه کمک مالی از هیچ فرد، نهاد و سازمانی دریافت نشده است و نتایج و دستاوردهای این مقاله به نفع یا ضرر سازمان یا فردی خاص نخواهد بود. حضور نویسندگان در این پژوهش به عنوان شاهدی بی‌طرف ولی متخصص بوده است و نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافعی ندارند.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

منابع

1. Alipour, M.M., Rajoli Dezfouli, A., & Danesh Kohan, H. (2010). Using drones to inspect oil and gas pipelines. *The second pipe and related industries conference*. Tehran. (In Persian).
2. Alturjman, F., & Alturjman, S. (2020). 5G/IoT-enabled UAVs for multimedia delivery in industry-oriented applications. *Multimedia Tools and Applications, 79(25)*, 74-89.
3. 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*, 122-131.
4. 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)*.
5. Baradaran, V., & Hosseinian, A.H. (2021). A Multi-Objective Mathematical Formulation for the Airline Crew Scheduling Problem: MODE and NSGA-II Solution Approaches. *The Journal of Industrial Management Perspective, 11(41)*, 247-269. (In Persian)
6. 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.
7. 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.
8. Fazllolahtabar, H. (2022). An Intelligent Sales Management System Based on Internet of Things and Bayesian Network. *The Journal of Industrial Management Perspective, 11(44)*, 60-84. (In Persian).
9. Ghazavi, A., & Tabataba, F.A. (2020). UAVs and their application in public security and smart police. *Scientific Journal of Police Information and Communication Technology, 1(1)*, 67-90. (In Persian)
10. Ghiasvand Ghiasi, F., Yazdani, M., Vahdani, B., & Kazemi, A. (2022). Meta-Heuristic Algorithms for Multi-Objective Home Health Care Routing and Scheduling Problem Considering Time Windows and Workload Balance of Nurses. *The Journal of Industrial Management Perspective, 12(45)*, 226-260. (In Persian)
11. Haghighi, H., Sadati, S.H., Karimi, J., & Dehghani, S.M.M. (2018). Continuous monitoring of multi-vehicles by basic survey patterns with the aim of minimizing review time. *Aeronautical engineering, 20(1)*, 1-12. (In Persian)
12. Kazami, H., & Elahian, S. (2020). The development of civilian drones in Iran and the challenges facing it. *Technology in aerospace engineering, 2(23)*, 45-64. (In Persian)
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.
14. 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.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

15. Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the e-constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems. *Applied mathematics and computation, 213(3)*, 455–465.
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.
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.
18. Wulfovich, S., Rivas, H., Matabuena, P. (2020). Drones in Healthcare. *Digital Health, 4(22)*, 159–168.
19. 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.
20. 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.

Archive of SID.ir