

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

الهام آقازاده

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

اکبر عالم تبریز

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

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

کیوان شاه قلیان

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۷

چکیده:

باتوجه به آنکه تجهیزات صنعتی از ضروریات و سرمایه‌گذاری‌های مهم هر واحد تولیدی است؛ در این پژوهش مدل ریاضی ترکیبی از اینترنت اشیا و پهپادهای غیرنظامی جهت نظارت هوشمند بر عملکرد تجهیزات صنعتی با رویکرد رایانش لبه ارائه گردیده که به عنوان مطالعه موردی توربین‌های بادی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مدل، عملکرد پهپاد جهت نظارت هوشمند بر توربین‌های بادی در سه مرحله فرایند تشخیص، تخلیه محاسباتی و محاسبات محلی پهپاد مورد بررسی قرار گرفته است. 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 تقویت شده با استفاده از اعداد تصادفی حل شد. با توجه به یافته‌های پژوهش، روش محدودیت اسپیلن به دلیل پیچیدگی مدل پژوهش، با افزایش ابعاد مدل کارایی خود را از دست می‌دهد و قادر به یافتن مرز پارتو در مسائل با ابعاد بزرگ در زمان معقول نمی‌باشد. به همین منظور در ادامه مدل با استفاده از نسخه دوم روش فراابتکاری ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره حل شد. در این پژوهش به منظور عملکرد بهتر الگوریتم ژنتیک، از ساختار جدیدی برای نمایش کروموزومها استفاده شده است. این الگوریتم توانست مسائل در ابعاد بزرگ را که روش محدودیت اسپیلن قادر به حل آن نبود، در زمان بسیار کوتاهی حل نماید. طبق نتایج بدست 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. در نتیجه روش ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره به عنوان روش برتر برای حل مسأله تحقیق پیشنهاد گردیده است.

کلیدواژه‌ها: اینترنت اشیا، پهپادهای غیرنظامی، رایانش لبه، نظارت هوشمند

۱. مقدمه

امروزه در صنایع مختلف، بهره‌وری و کارایی تجهیزات موجب پیشرفت تولیدات و سودآوری واحدهای تولیدی می‌گردد. از کارافتادن تجهیزات و ماشین آلات علاوه بر هزینه تعمیرات، هزینه فرصت از دست رفته را بر واحد تولیدی تحمیل می‌نماید؛ در صورتی که راهکاری برای جلوگیری از این هزینه‌ها ارائه و اجرا نشود، می‌تواند واحدهای تولیدی را به ورشکستگی سوق دهد. 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.

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، به طور مستقیم توسط انسان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ اما با آمدن یک روند جدید، دستگاه‌هایی که به اینترنت متصل هستند، به اندازه کافی هوشمند هستند که وظایف محوله را به صورت 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 موثر در رونق و پیشرفت کسب و کارهای صنعتی امروزی و آینده تلقی می‌شود. صنایع امروزی در حال تلاش هستند تا در جهت مدرنیزه کردن تجهیزات خود اقدام نمایند تا بدین طریق با سرعت، با تغییرات رو به رشد بازار خو گرفته و از تکنولوژی‌های موجود استفاده کنند. کسب و کارهایی که از اینترنت اشیا در زیرساخت‌های خود استفاده کرده‌اند، بطور چشمگیری در زمینه‌های؛ امنیت، بهره‌وری و همچنین سودآوری، رشد داشته‌اند. به هر میزان که استفاده از اینترنت اشیا صنعتی افزایش یابد، میزان بهره‌وری‌های در صنایع نیز بالطبع افزایش خواهد یافت. اینترنت اشیا می‌تواند حجم انبوهی از

1 Internet of things (IOT)

اطلاعات و داده‌ها را جمع‌آوری نموده و به کارخانجات و شرکت‌ها این اجازه را دهد که بیشترین بهره‌وری را از سیستم‌ها و تجهیزات خود کسب نمایند، بدون اینکه محدودیت‌های تکنولوژیکی و اقتصادی مانع این امر شوند. اما مسأله‌ای که در این میان مطرح است این است که حجم داده‌های تولید شده توسط اینترنت اشیاء بسیار زیاد است و این حجم داده برای پردازش به مرکز رایانش ابری ۲ ارسال می‌گردد. به دلیل اینکه روش پردازش متمرکز (ابر) منجر به تأخیرهای ارتباطی بالا می‌شود و نرخ انتقال داده‌ها بین دستگاه‌های اینترنت اشیاء و کاربران بالقوه را پایین می‌آورد، 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 اشیاء به منظور پردازش داده به‌جای درگیر شدن در محیط ابری، در نزدیکی منابع داده و سینک‌های داده خودشان پردازش شوند. این امر منجر به پایین آمدن تأخیرهای ارتباطی و استفاده بهتر از منابع رایانشی، ذخیره‌سازی و منابع شبکه‌ای می‌شوند. همچنین زمان اجرا و میزان مصرف انرژی را کاهش می‌دهد که در واقع برای به کارگیری اینترنت اشیاء می‌تواند بسیار مفید باشد [۷]. لذا، استفاده از رایانش لبه‌ای در بستر اینترنت اشیاء برای سرعت بخشی به جمع‌آوری اطلاعات از تجهیزات و بازرسی آنها بسیار مؤثر است.

از طرفی، پهپادها 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. پهپادها یک بستر فناوری بسیار سازگار برای جمع‌آوری داده‌های کارآمد و مقرون به صرفه و نظارت بر رویدادها هستند. برای ایجاد ارتباط مؤثر بین پهپادها و مناطق صنعتی مورد نظر، استفاده از فناوری‌های مربوط به اینترنت اشیاء مانند سنسورها، موقعیت‌یاب‌ها و... ضروری است. لذا با ترکیب تکنولوژی پهپادها و اینترنت اشیاء و رایانش لبه می‌توان نظارت هوشمند بر عملکرد تجهیزات صنعتی مانند توربین‌های بادی را بهبود بخشید [۱۲].

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

باتوجه به لزوم پایش ویدیویی جهت 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 مورد نظر را داشته‌اند اما به تدریج و با گسترش مفهوم اینترنت اشیاء، 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 شده اند.

سیستم‌های نظارت هوشمند ابزارهای مشاهده‌ای هستند که به طور مداوم داده‌های مربوط به عملکرد سیستم را از زیرساخت‌های فناوری اطلاعات راه دور جمع‌آوری نموده و آن‌ها را از طریق یک رابط برای کاربر «ارسال» می‌نمایند تا به کاربر اجازه دهند بر اساس آن داده‌ها تصمیم بگیرد. به طور خاص، نقشه‌ای از زیرساخت محل مورد نظارت ارائه می‌دهند که برای عملیات و مدیریت فناوری اطلاعات کاربر مفید است. به عنوان 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؛ لذا 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 کرد و استراتژی یا زیرساخت سیستم را بر اساس آن داده‌ها تنظیم نمود [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. حول این موضوع پژوهش‌هایی صورت گرفته است اما همانطور که در ادامه مشاهده می‌شود، تاکنون پژوهشی حول نظارت هوشمند توسط پهپادها با رویکرد رایانش لبه انجام نگردیده است و این مورد به عنوان خلأ تحقیقاتی یافته شده است.

در پژوهش قضاوی و طباطبا (۱۳۹۹)، به بررسی کاربرد پهپادها در امنیت عمومی و پلیس هوشمند پرداخته شده است 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 [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 قيود بیان شده، ارتباط آن با دیگر پارامترهای پروازی بررسی نمودند. 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 [۱۱]. پژوهش علی‌پور و همکاران (۱۳۸۸)، نشان داد که پرنده‌های هدایت پذیر از دور (پهپاد)، نسبت به روشهای دیگر بازرسی خطوط لوله در ایران دارای برتری هستند. پهپادها با توجه به انعطاف پذیری و قابلیت حمل حسگرهای متنوع می‌توانند پاسخگوی نیازهای عملیاتی خطوط لوله در ایران باشند [۱].

در پژوهش آتریاسا (۲۰۲۱)، به تجزیه و تحلیل ترافیک جاده با استفاده از هواپیمای بدون سرنشین (پهپادها) مبتنی بر پردازش تصویر و محاسبات لبه پرداخته شده است. که 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 شده است.

نتایج منعکس کننده 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 [۳].

در پژوهشی تحت عنوان پهپادهای مجهز به 5G/IoT که توسط آل ترجمان و آل ترجمان منتشر شد، برای تحویل چندرسانه ای در برنامه‌های صنعت‌گرا، به طراحی و مسیریابی چندراهی جدا از هم ۳ در اینترنت صنعتی ایشیا برای سیستم تحمل خطا با استفاده از پهپاد برای انتقال چندرسانه‌ای به یک گره مافوق در شبکه WSN ناهمگن دو ردیفه پرداخته شده است. نتایج این پژوهش نشان داد رویکرد پیشنهادی CPS در مقایسه با بهینه سازی CPMS متداول و بهینه سازی FMPS، روش بهتری است [۲].

در پژوهش دیگری ولفوویچ و همکاران (۲۰۲۰)، 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. براساس این مطالعه پهپادها تأثیر زیادی در پزشکی از راه دور و بهداشت دارد [۱۸].

پژوهشی تحت عنوان بازرسی روتین مجهز به پهپاد مبتنی بر رایانش لبه متحرک در مزرعه بادی توسط کائو و همکاران (۲۰۱۹) مدلی را جهت نظارت بر عملکرد توربین‌های بادی ارائه نمودند 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 می‌نمود. نتایج این پژوهش نشان دهنده بهینگی مدل پیشنهادی بوده است [۶].

پژوهشی که توسط سالهوی و همکاران (۲۰۱۹) ارائه شد، به بررسی سیستم هوشمند نظارت و کنترل اینترنت ایشیا مبتنی بر پهپاد و رایانش ابری اعمال شده در یک کارخانه بتن پرداخته شده است. در محیط‌های مختلف کارخانه، پهپاد اطلاعات حاصل از تصویربرداری را به ایستگاه زمینی ارسال نموده و سیستم پیشنهادی توسط رایانش ابری پس از جمع آوری ۵۲۰۰ نمونه به بررسی بهینه سازی نحوه قرارگیری پهپاد در مکان‌های مختلف و میزان تأخیر کل پرداخته است. نتایج به دست آمده به وضوح امکان برقراری مدل پیشنهادی را در ارائه یک سیستم مطمئن و کارآمد برای کنترل از راه دور پهپاد جهت بهبود کیفیت محصول و کاهش ضایعات نشان داده است [۱۷].

پژوهش نا و همکاران (۲۰۱۹)، به ارائه یک مدل ارتباطی بیسیم WPS چندحامل ۴ به کمک پهپاد برای سناریوهای اینترنت ایشیا پرداخته است. در این پژوهش از الگوریتم تکرار جایگزین ۵ استفاده شد. ابتدا، برای

3 k-disjoined multipath

4 multi-carrier

5 Alternative iteration algorithm

مسیر پهپاد، با استفاده از روش چند منظوره لاگرانژ، مجموعه زیر حامل، قدرت زیر حامل و تخصیص زیر لبه بهینه می شود. سپس، برای تنظیم مجموعه ثابت حامل، قدرت زیر حامل و تخصیص زیر لبه، مسیر پهپاد توسط CVX برای حالت یک پرواز و حالت پرواز دوره ای بهینه می شود. در نهایت، تابع هدف با بهینه سازی تخصیص منابع و مسیر پهپاد به طور تکراری حل می شود. الگوریتم پیشنهادی می تواند مسیر پهپاد را بهینه کند و با حرکت گره سازگار شود. در مقایسه با طرح های متداول تخصیص منابع، طرح پیشنهادی نه تنها به میزان قابل توجهی نرخ حداقل قابل دستیابی را افزایش می دهد، بلکه برای دو حالت پرواز نیز به خوبی کار می کند [۱۴]. پژوهش لاگاس و همکاران (۲۰۱۸)، به طراحی سیستمی جهت امنیت پهپادهای غیرنظامی در صنایع به عنوان شیء در اینترنت اشیاء پرداختند. پارامترهای اصلی این پژوهش امنیت و حریم خصوصی پهپادها در شبکه های توزیع برق و شبکه خونرسانی بیمارستان ها بود که با استفاده از سنسورهای مادون قرمز، اینفرارد و سنسورهای موقعیت یاب چارچوبی جهت ایجاد شبکه پهپادها به عنوان جزئی از اینترنت اشیاء ارائه و کارآیی آن تأیید شده است [۱۳].

در تحقیق حاضر، مدلی ترکیبی از اینترنت اشیاء و پهپادهای غیرنظامی جهت نظارت هوشمند بر عملکرد تجهیزات صنعتی با رویکرد رایانش لبه ارائه شده است که به عنوان مطالعه موردی توربین های بادی مورد بررسی قرار گرفته است. مدل ارائه شده توسط روش های ژنتیک با مرتب سازی ناچیره و روش محدودیت اسپلین تقویت شده با استفاده از اعداد تصادفی حل شده است.

در جدول ۱ پژوهش های ذکر شده در زمینه موضوع پژوهش مرور گردیده است.

جدول ۱. پژوهش های داخلی و خارجی پیرامون موضوع پژوهش

مقاله	نوع رایانش ابری	استفاده از پهپاد	حوزه	کاربرد مساله	عدم قطعیت	نوع - تعداد هدف	نوع مدل
Cao et al. (2019)	مه	✓	تولید نیرو	نظارت بر عملکرد توربین های بادی	احتمالی	کمینه سازی هزینه نگهداری - تک هدفه	مفهومی

ریاضی	کمینه سازی مصرف انرژی- تک هدفه	احتمالی	طراحی و مسیریابی چندراهی جدا از هم (k- multipath disjointed) در اینترنت اشیا (IIoT) برای سیستم تحمل خطا	صنعتی	✓	-	Alturjman & Alturjman (2020)
ریاضی	کمینه سازی زمان ارسال داده- تک هدفه	احتمالی	سیستم هوشمند نظارت و کنترل در یک کارخانه بتن	صنعتی	✓	ابری	Salhaoui (2019) et al.
ریاضی	کمینه سازی مسافت طی شده پهپاد و انرژی مصرف شده- چندهدفه	احتمالی	ارائه یک مدل ارتباطی بی سیم WPC چند حامل (multi-carrier) به کمک پهپاد (UAV-assisted) برای سناریوهای اینترنت اشیا	مخابرات	✓	-	Na et al. (2020)
مفهومی	-	فازی	طراحی سیستمی جهت امنیت پهپادهای غیرنظامی در صنایع به عنوان شیء در اینترنت اشیا	صنعتی	✓	-	Lagkas et (2018) al.
ریاضی	کمینه سازی سطح آلودگی هوا- تک هدفه	احتمالی	بررسی تکنولوژی LoRa بر روی پهپادهای طراحی شده جهت اندازه گیری وضعیت آب و هوا	آب و هوا	✓	ابری	Caro and (2019) Cano
مفهومی	-	استوار	آنالیزی تجربی از سیستم های رباتیکی مبتنی بر IoT را برای نظارت بر محیط زیست	محیط زیست	✓	ابری	Scilimati (2017) et al.
مفهومی	-	احتمالی	استفاده از پهپادهای غیرنظامی در بستر اینترنت اشیا برای شناسایی زود هنگام آتش سوزی در جنگل	محیط زیست	✓	ابری-لیه	Kalatzis et (2018) al.
ریاضی	کمینه سازی زمان خدمت- تک هدفه	احتمالی	سیستمی برای شرایط اضطراری در حوزه پزشکی و نظارت بر بهداشت و سلامت	سلامت	✓	ابری	Cary et al. (2018)
ریاضی	بیشینه سازی سرعت انتقال داده- تک هدفه	احتمالی	روشی برای یافتن موقعیت های هواپیماهای بدون سرنشین در منطقه ای با تراکم کاربر متفاوت با استفاده از	مخابرات		ابری	Kalantari (2016) et al.

			الگوریتم ابتکاری جهت افزایش کیفیت خدمات ارائه دهنندگان سرویس های مخابراتی				
ریاضی	کمینه کردن هزینه انرژی و بیشینه کردن احتمال موفقیت در ارسال داده‌ها- چندهدفه	احتمالی	استفاده از اینترنت اشیاء و پهپادهای غیرنظامی جهت نظارت بر عملکرد توربین های بادی	صنعتی	✓	لبه	پژوهش حاضر

۳. روش شناسی پژوهش:

این پژوهش با توجه به مبنای ماهیت، جزء پژوهش‌های کمی است؛ زیرا در این پژوهش از یک مدل ریاضی جهت بررسی داده‌ها استفاده شده است. همچنین با توجه به مبنای هدف، تحقیقی توسعه‌ای و کاربردی است؛ و در نهایت به لحاظ نوع داده‌ها، از نوع پژوهش‌های توصیفی است. از آنجایی که مدل این پژوهش از نوع چندهدفه است و برای حل آن می‌بایست از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه استفاده نمود که در این بخش به معرفی و تشریح دو روش محدودیت افسیلن تقویت شده و الگوریتم فراابتکاری ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره (نسخه دوم) پرداخته شده است.

روش محدودیت افسیلن علی رغم دارا بودن مزیت‌های فراوان نسبت به روش وزن‌دهی، در موارد زیر باید به آن توجه نمود [۱۵].

(۱) محاسبه دامنه توابع هدف در مجموعه کارا

(۲) تضمین کارا بودن جواب بدست آمده

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

به منظور اعمال روش محدودیت افسیلن 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 قرار دادن هدف مورد نظر به عنوان تابع هدف مدل، محاسبه می‌شود که این روش تضمین‌کننده بدست آوردن جواب‌های کارا برای بهینه‌سازی تک‌هدفه هر تابع هدف نمی‌باشد که به منظور غلبه بر ضعف‌های موجود در روش محدودیت افسیلن، برای محاسبه مقادیر جدول نتایج نهایی، برای هر تابع هدف از روش لکسیکوگراف استفاده می‌شود. در نتیجه جدول نتایج نهایی در این روش تنها از جواب‌های کارا تشکیل می‌گردد. همچنین جواب‌های بدست آمده ممکن است منجر به جواب کارای ضعیفی شود. بدین منظور، روش محدودیت افسیلن

تقویت شده محدودیت‌های مربوط به توابع هدف فرعی را با قرار دادن متغیرهای کمکی به تساوی تبدیل می‌نماید [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 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 تولید شده و جمعیت تکرار بعدی الگوریتم را تشکیل می‌دهند [۱۶]. در الگوریتم ژنتیک به منظور تولید فرزندان از جمعیت والد و تولید جمعیت برای تکرارهای بعدی الگوریتم، از عملگرهای انتخاب ۶، تقاطع ۷ و جهش ۸ استفاده می‌شود. الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره ۹ بر اساس الگوریتم ژنتیک برای حل مسائل چندهدفه توسعه داده شده است. از آنجاکه در بیشتر مواقع در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه نمی‌توان به یک حل بهینه منحصر به فرد دست یافت، روش ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب با مجموعه‌ای از راه‌حل‌های نامغلوب مؤثر همراه است. راه‌حل قابل قبول، راه‌حلی است که عملکرد مناسبی نسبت به تمام اهداف داشته باشد؛ بنابراین به منظور رتبه‌بندی جواب‌ها در الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی ناچیره، دو عملگر به الگوریتم ژنتیک اضافه شده است. این دو عملگر عبارتند از: عملگر فاصله ازدحامی و عملگر مرتب‌سازی سریع نامغلوب‌ها [۱۰]. دب و همکاران (۲۰۰۰)، شاخصی با عنوان فاصله ازدحامی به منظور تخمین چگالی جواب‌های اطراف یک نقطه مشخص در جمعیت ارائه کردند [۵]. در این پژوهش به منظور حل مدل ارائه شده در ابعاد بزرگ و به دلیل کاهش کارایی روش حل دقیق، نسخه دوم روش فراابتکاری ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره پیشنهاد شده است.

-
- 6 Selection operator
 - 7 Crossover operator
 - 8 Mutation operator
 - 9 Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA)

مراحل اجرای پژوهش

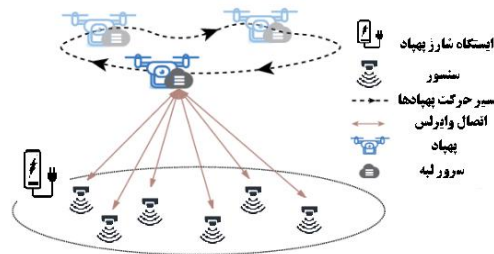
مراحل اجرای پژوهش به صورت زیر است:

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 نمایند و با استفاده از دوربین پیشرفته ای که بر روی آنها نصب شده است، از قسمت های مختلف تجهیزات صنعتی عکس برداری می نمایند. 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 نماید. این فرآیند آنقدر 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 نمایند. 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.

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 نماید. 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 می دهد:



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 توربین بادی با $N = \{1, 2, \dots, N\}$ و مجموعه K پرواز با $K = \{1, 2, \dots, K\}$ 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 زمانیکه 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 به ویژه 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 عکس‌برداری انجام شد، پهپاد باید داده‌های خود را توسط سرور لبه یا ابر پردازش و در نهایت به ابر ارسال نماید. باتوجه به اهمیت زمان و به هنگام بودن داده‌های یافت شده، پهپاد باید قبل از تشخیص توربین بعدی داده‌ها را پردازش کند. زمانیکه تمامی توربین‌های مسیر مورد بررسی تشخیص داده شدند، پهپاد برای شارژ به ترانسفورماتور باز می‌گردد. پس از شارژ شدن پهپاد برای پرواز در مسیر جدید بلند شده و این فرآیند تا زمانیکه تمامی توربین‌ها مورد بررسی قرار گیرند، ادامه می‌یابد.

برای مدل‌سازی این فرآیند، سیستم مختصات سه بعدی اقلیدسی جهت اندازه‌گیری فاصله‌ها به کار رفته 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 می یابد. مختصات قرارگیری پهپاد در زمان t با $q[t] = (x_t, y_t)$ نمایش داده می شود. $t \in \mathcal{Q}$ و $T = \{1, 2, \dots, T\}$ و بنابراین، فاصله بین پهپاد و ترانسفورماتور ($d_{TS,t}$) و فاصله بین پهپاد و توربین ها ($d_{n,t}$) از طریق روابط زیر محاسبه می شود:

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

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

در فرآیند تشخیص، فرض می شود که زمان تشخیص توسط پهپاد ثابت (t_d) و وابسته به اندازه تیغه توربین است. برای اطمینان از دقت تشخیص، پهپاد باید به پره های 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 با پره های 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 می آید که در آن v_w سرعت باد و t_s مدت زمان عکس العمل پهپاد پس از وزش باد است.

دقت تشخیص دوربین با افزایش فاصله تشخیص بین پهپاد و توربین کاهش می یابد. برای محاسبه رابطه بین فاصله تشخیص و احتمال تشخیص موفق، از یک مدل احتمالاتی که در مقاله ژانگ و همکاران آمده، استفاده شده است [۱۹].

$$P_s = e^{-\lambda d_s} \quad (3)$$

که λ پارامتری است که عملکرد دوربین را منعکس می کند.

در این پژوهش فرض شده است که کانال بی سیم بین پهپاد و ترانسفورماتور قرار دارد. بنابراین با توجه به مقاله ژو و همکاران، افزایش قدرت این کانال از رابطه زیر به دست می آید [۲۰]:

$$g_t = \beta_0 d_{TS,t}^{-2} \quad (4)$$

β_0 میزان افزایش قدرت کانال در فاصله $d = 1m$ 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، از رابطه زیر به دست می آید [۱۹]:

$$r_{t_0}[n] = B \log_2 \left(1 + \frac{P_0[n] g_t}{\sigma^2} \right) \quad (5)$$

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 می آید:

$$R_{t_0}[n] = r_{t_0}[n] t_0[n] \quad (6)$$

$$E_{t_0}[n] = P_0[n] t_0[n] \quad (7)$$

در محیط‌های بزرگ، با افزایش فاصله انتقال، در مسیر کانال انتقال موانعی ۱۰ 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:

$$Pr_{t0} = \begin{cases} 1, & d_{TS} \leq d_{t0} \\ \frac{d_{t0}}{d_{TS}} + e^{\frac{-d_{TS} + d_{t0}}{P_0}}, & d_{TS} > d_{t0} \end{cases} \quad (8)$$

که در رابطه فوق، $d_{t0} = 294/0.5 \log(Z_S) - 94/432$ آستانه موفقیت انتقال در ارتفاع Z_S است و $0.95 - Z_S$ می‌باشد. بنابراین با توجه به روابط (۳) و (۸)، احتمال موفقیت در انتقال داده معتبر توسط پهپاد به ترانسفورماتور برابر است با:

$$Pr_{suc}[n] = Pr_S * Pr_{t0}[n] \quad (9)$$

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 نماید.

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 $t_0[n]$ که اطلاعات به سمت ابر منتقل می‌شود به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$R_{so}[n] = r_{so}[n] t_0[n] \quad (10)$$

$$E_{so}[n] = P_0[n] t_0[n] \quad (11)$$

به منظور استفاده بهینه از انرژی، پهپاد می‌تواند فرکانس $f[n]$ CPU 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 CPU است. از آنجا که همه داده‌های حساس باید قبل از شروع تشخیص توربین بعدی پردازش شوند، محدودیت پردازش داده‌ها را به شرح زیر می‌باشد:

$$R_c[n] + (1 - \sigma) R_{t0}[n] + \sigma R_{so}[n] \geq R_n, \quad \forall n \in N \quad (14)$$

10 NLOS Component

11 Effective capacitance coefficient

که R_n مقدار داده های حسی توربین n ام است و به وضعیت آسیب تیغه مربوط می شود. $\sigma = \{0, 1\}$ 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، مصرف انرژی پردازش مربوطه را برای هر توربین بادی به صورت زیر بدست می آید:

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

در حالت انتقال اطلاعات به ترانسفورماتور پهباد می تواند محاسبه محلی را تا زمانی که تمام داده های 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 می شود:

$$T_{p,to}[n] = t_d + t_{so}[n] + t_0[n] + t_{os}[n] \quad (16)$$

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

$$T_{p,so}[n] = t_d + t_c[n] \quad (17)$$

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:

$$T_f[k] = t_{f_1}[k] + \sum_1^{N_k} ((1 - \sigma)T_{p,to}[n] + \sigma T_{p,so}[n]) \quad (18)$$

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

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

$$v_u = \frac{\|q_{t+1} - q_t\|}{t} \quad (19)$$

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

$$T_d[k] = \frac{q_k}{v_u} \quad (20)$$

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

$$v_p = v_u - v_w \quad (21)$$

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

از طرفی، انرژی مورد نیاز پهباد 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:

$$E_f[t] = \frac{1}{2}mv_p^2 t_f + mgt_f = \frac{mv_p^2 s + mgs}{2v_u} \quad (22)$$

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 جابجایی‌هایی که منجر به کاهش دقت دوربین می‌شود از بین برود. بنابراین، باتوجه به مصرف انرژی برای پرواز و همچنین مصرف انرژی در فرآیند تشخیص هر توربین، مجموع انرژی مصرف شده توسط پهپاد از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

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

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 بیشترین ظرفیت باتری پهپاد است.

زمانیکه یک پرواز به طور کامل انجام شد، مدت زمان شارژ در K امین پرواز تحت قدرت شارژ d_c برابر است با:

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

در جدول ۲ پارامترها و متغیرهای مدل مشخص گردیده است.

جدول ۲. پارامترها و متغیرهای مدل

شرح	پارامتر/متغیر
مدت زمان انتقال اطلاعات برای هر توربین	$T_f[K]$
مدت زمان شارژ در K امین پرواز	$T_{ch}[k]$
احتمال موفقیت در انتقال داده معتبر توسط پهپاد به لبه	$Pr_{suc}[n]$
آستانه احتمال موفقیت در انتقال داده معتبر توسط پهپاد به لبه	Pr_{th}
سرعت پرواز پهپاد	$v_p[t]$
بیشینه سرعت پرواز پهپاد	v_{max}
قدرت انتقال اطلاعات توسط پهپاد	$P_0[n]$
بیشینه قدرت انتقال اطلاعات توسط پهپاد	$P_{0,max}$
فرکانس محاسبات	$f[n]$
بیشینه فرکانس محاسبات	f_{max}
مختصات مکان اولیه پهپاد (لبه)	$q[0]$
مختصات مکان پهپاد در هر لحظه	$q[T]$

هزینه هر واحد انرژی مصرفی در پهپاد	β
مجموع انرژی مصرف شده توسط پهپاد	E_k
بیشینه ظرفیت باتری پهپاد	E_u
مجموعه متغیرهای بهینه شامل $P_0[n], f[n], q[T]$	γ

مدلسازی مساله

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

در جدول ۳، اندیس های مدل ذکر گردیده است.

جدول ۳. اندیس مدل

توضیح اندیس	اندیس
شماره پهپاد	n
شماره پرواز	k

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

جدول ۴. پارامترهای فرضی مدل

مقدار	پارامتر
۵۰ متر	ارتفاع توپی تیغه توربین‌ها نسبت به زمین
۱۰ MHz	پهنای باند ارتباطی (B)
-96 dBm	واریانس نویز (σ^2)
-50 dB	افزایش قدرت کانال (β_0)
33 dBm	حداکثر قدرت انتقال ($P_{0,max}$)
10^{-28}	ضریب خازنی مؤثر (θ_u)
10 GHz	ماکزیمم فرکانس CPU
15 m/s	حداکثر سرعت پیشرانه پهپاد (v_{max})
۰.۹	حداقل میزان موفقیت در ارسال اطلاعات (Pr_{th})

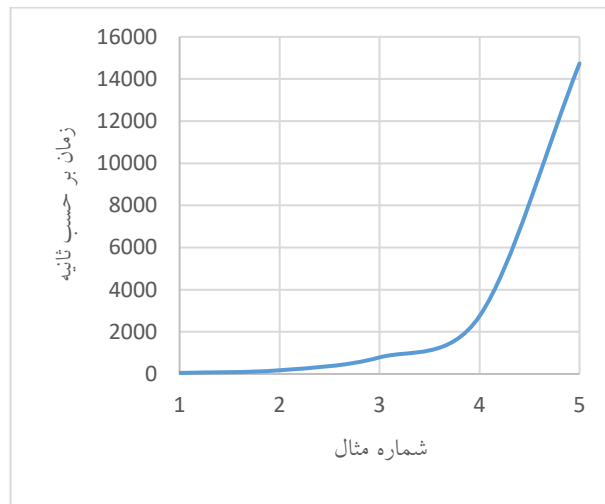
۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش:

حل آزمایشات عددی به کمک روش محدودیت اپسیلن تقویت شده

برای بررسی و تحلیل مدل پیشنهادی ارائه شده؛ تعدادی مثال عددی در ابعاد مختلف به کمک روش محدودیت اپسیلن تقویت شده در نرم افزار گمز ۲۴.۱.۲ کدنویسی شده است.

نمودار زمان حل این روش به ازای آزمایشات عددی در ابعاد مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود. با اندکی افزایش در ابعاد مسأله، زمان حل به شدت افزایش می‌یابد. بنابراین به دلیل پیچیدگی بالای مسأله روش حل دقیق محدودیت اپسیلن قادر به محاسبه جواب پارتو در زمان معقول نمی‌باشد. به همین منظور در ادامه این پژوهش، به ارائه روش حل فراابتکاری پرداخته خواهد شد.

مسأله برای شرایط (ابعاد) مختلف توسط روش محدودیت اپسیلن تقویت شده حل شده و نتایج آن در جدول ۵، مشخص گردیده است که M تعداد توربین‌های موجود در مزرعه بادی و N تعداد پهپادهای موجود برای پرواز است. معیارهای عملکردی آزمایشات عددی در جدول ۶ مشخص گردیده است.



شکل ۲. نمودار زمان حل روش محدودیت اِپسِلین تقویت‌شده در آزمایشات عددی مختلف

حل آزمایشات عددی به کمک روش ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره

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 نرم افزار متلب ۲۰۱۵ کدنویسی شده است.

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 به طور تصادفی انتخاب و جواب بهتر وارد استخر جفت‌گیری می‌شود. انتخاب کروموزوم‌ها براساس عدد تصادفی صحیح بین ۱ تا اندازه جمعیت تعیین شده است.

عملگر تقاطع (جابجایی): در هر بار دو کروموزوم به طور تصادفی انتخاب می‌شود و عملگر تقاطع روی آن‌ها اعمال می‌شود که در این پژوهش از عملگرهای تقاطع پیوسته و تقاطع تک نقطه ای استفاده شده است. عملگرهای تقاطع به صورت 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 به طور تصادفی انتخاب شده و دو ژن از هر کروموزوم هم به صورت تصادفی انتخاب و با یکدیگر جابجا می‌شوند.

شبه کد الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره به صورت زیر می‌باشد:

```
input :sizepop, probmut, stopping_criterion
1 P0 ) Generate initial population of sizepop individuals ;
2 Q0 ) ;
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
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 بدست آمده مطابق با جدول ۷ می‌باشد. مقادیر معیارهای عملکرد جواب‌های پارتو نیز برای هر یک از آزمایشات عددی حل شده به روش ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره، به شرح جدول ۸ است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود روش ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره آزمایشات در ابعاد بزرگ، که روش محدودیت اسپیلن از حل آن‌ها عاجز بود، را به خوبی و در زمان معقول پاسخ داده است.

موسسه انتشارات
پایس

جدول ۵. نتایج حل مدل با استفاده از روش محدودیت افسیلین تقویت شده

شماره مثال	ابعاد مسأله (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	-/۰.۳۷
				۲	۱۰۷۳۸۴	-/۰.۴۱
				۳	۱۰۲۴۷۵	-/۰.۵۷
۲	۱۰-۲	۵	۱۷۶/۵۶۴	۱	۲۴۹۲۸۴	-/۰.۴۲
				۲	۲۳۹۵۹۳	-/۰.۳۷
				۳	۲۱۶۸۳۵	-/۰.۵۵
۳	۲۰-۳	۷	۷۸۶/۷۲۳	۱	۳۸۹۲۸۲	-/۰.۳۸
				۲	۳۶۲۸۴۸	-/۰.۴۴
۴	۳۰-۴	۱۰	۲۷۴۵/۷۱۹	۱	۷۲۸۵۹۳	-/۰.۲۸
				۲	۶۸۱۰۹۲	-/۰.۴۴
				۳	۶۶۲۴۲۳	-/۰.۵۲
				۴	۵۷۳۹۵۹	-/۰.۵۶
				۵	۵۲۸۵۰۵	-/۰.۶۱
۵	۵۰-۵	۱۵	۱۴۷۳۶/۴۳۷	۱	۱۰۹۳۰۴۳	-/۰.۳۱
				۲	۱۰۸۳۷۰۴	-/۰.۳۳
				۳	۱۰۵۴۴۷۳	-/۰.۴۷
				۴	۱۰۳۶۵۲۰	-/۰.۵۳
				۵	۱۰۲۴۴۰۳	-/۰.۵۸
				۶	۱۰۰۹۰۴۳	-/۰.۶۰
				۷	۹۹۳۹۴۸	-/۰.۶۶

جدول ۶. معیارهای عملکرد آزمایشات عددی روش محدودیت افسیلین تقویت شده

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

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

شماره مثال	ابعاد مسأله (M-N)	زمان حل (ثانیه)	شماره جواب یار تویی	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم
۱	۵-۱	۸/۲۴	۱	۱۰۱۵۱۵	۰۰۳۴
			۲	۱۰۰۸۷۴	۰۰۳۸
			۳	۹۸۲۵۶	۰۰۴۲
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
			۴	۳۳۲۱۹۴۶	۰/۰۷۸
			۵	۳۲۷۶۵۱۷	۰/۰۸۱
			۶	۳۱۹۸۲۳۵	۰/۰۸۲
			۷	۳۱۱۳۴۹۲	۰/۰۸۳

۰/۰۸۳	۳۰۶۳۷۴۶	۸			
-------	---------	---	--	--	--

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

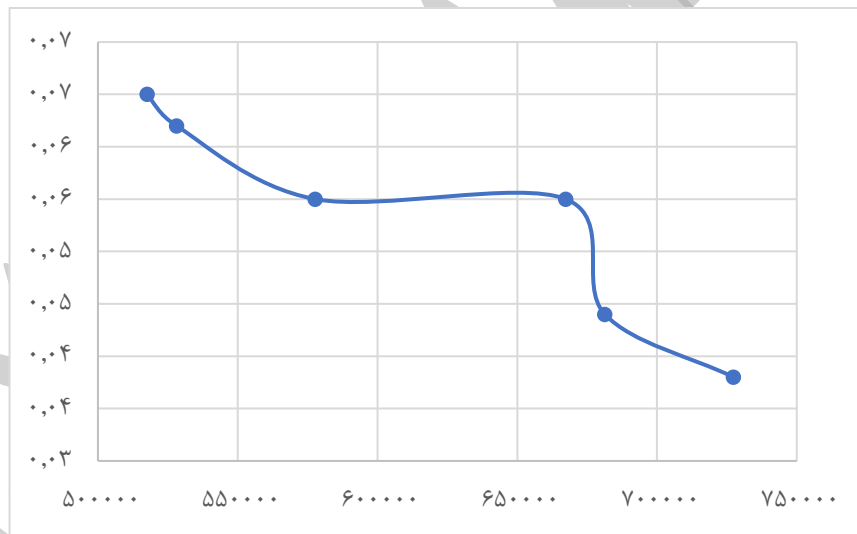
شماره آزمایش	تعداد جواب‌های پارتو	زمان محاسبه (ثانیه)	میانگین فاصله از جواب ایده‌آل	پراکندگی	فاصله
۱	۳	۸/۲۴	۰.۹۵۱۰۳۴	۰.۷۶۸۹۲۳	۰
۲	۳	۱۲/۲۷	۰.۹۷۲۶۵۳	۰.۷۱۷۵۴۵	۰
۳	۲	۱۲/۶۹	۰.۷۳۸۴۷۳	۰.۶۴۷۵۵۳	۰/۱۷۳۸۶۵
۴	۶	۱۴/۸۳	۰.۹۷۹۰۵۹	۰.۷۳۹۳۰۳	۰
۵	۸	۱۶/۵۵	۰.۵۷۹۴۴۳	۰/۴۷۱۲۷۰	۰/۱۱۷۰۹۳
۶	۸	۱۷/۶۱	۰/۶۱۶۱۳۷	۰/۲۲۸۸۳۹	۰/۰۳۸۴۶۲

با توجه به نتایج بدست آمده، روش محدودیت اِپسِلین تقویت‌شده با افزایش ابعاد مسأله قادر به بدست آوردن جواب‌های پارتو در زمان معقول نبوده است و زمان حل روش محدودیت اِپسِلین با افزایش ابعاد مسأله به شدت افزایش می‌یابد، به طوری که این روش در ابعاد بزرگ قادر به حل مسأله در زمان معقول نمی‌باشد. اما روش ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره توانست مسائل با ابعاد بزرگ را نیز در زمان بسیار کوتاه حل کند و همچنین این روش جواب‌های خوبی تولید نماید.

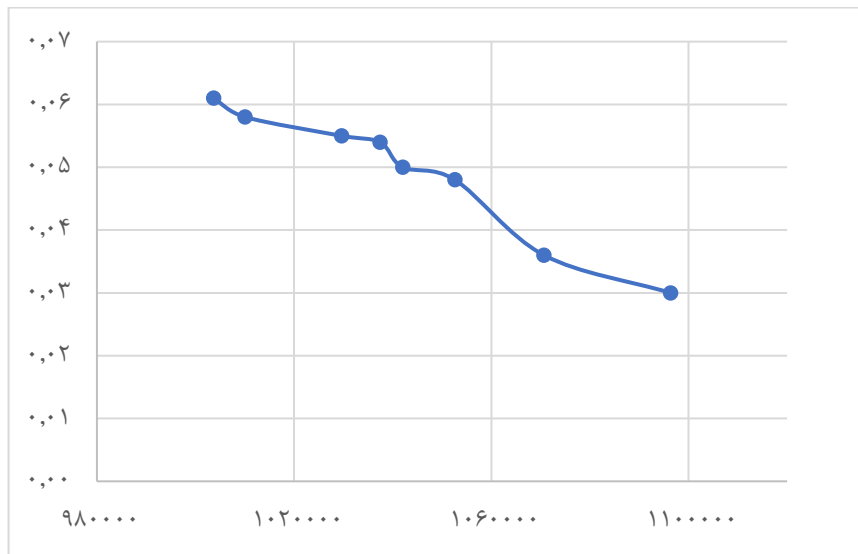
همچنین به دلیل پیچیدگی مسئله باید از روش‌های حل ابتکاری یا فرا ابتکاری استفاده شود. از دلایل پیچیده بودن این مسأله می‌توان به غیرخطی بودن مدل، چند هدفه بودن مدل، وجود تعداد زیاد متغیر و پارامتر و محدودیت در مسأله اشاره کرد. این پیچیدگی خود را در ابعاد بزرگ تر مسأله بیشتر نشان می‌دهد. بنابراین در این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

با توجه نتایج حاصل از حل مسأله به دو روش محدودیت اِپسِلین 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 اِپسِلین تولید شده اند. همچنین مقادیر معیارهای عملکرد دو روش (به غیر 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 کوتاه تری را به خود اختصاص داده است.

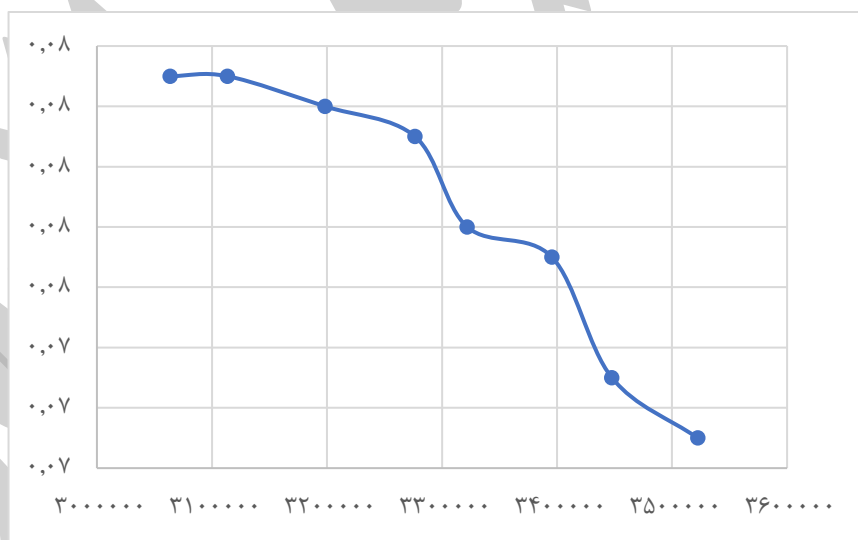
از نتایج حاصل از حل مدل پژوهش که در جداول بالا نمایش داده شده است، می‌توان دریافت که با افزایش ابعاد مسأله، تعداد جواب‌های پارتویی بیشتری تولید می‌شود. همچنین با مشاهده هر یک از جبهه‌های پارتویی در می‌یابیم که در بهینه‌سازی چند هدفه نمی‌توان به یک جواب واحدی دست یافت که همزمان همه توابع هدف را بهینه کند. یعنی در مجموعه جواب‌های پارتویی، جواب‌ها نمی‌توانند بدون بدتر شدن مقدار حداقل یکی از توابع هدف دیگر، بهتر شوند. به عنوان مثال در مسأله شماره ۵، با حرکت از نقطه پارتویی اول به سمت نقاط پارتویی بعدی، مقدار تابع هدف اول (هزینه انرژی مصرف شده توسط پهپاد) کمتر شده (بهبود می‌یابد) و مقدار تابع هدف دوم (احتمال عدم موفقیت در ارسال اطلاعات) بیشتر (بدتر) می‌شود. در نمودارهای زیر، جبهه پارتویی مثال‌های شماره ۴، ۵ و ۶ به عنوان نمونه ترسیم شده اند که از روش فرابتنکاری چندهدفه ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره به دست آمده است. در این نمودارها مجموعه جواب‌های پارتویی هر مسأله مشاهده می‌شود.



شکل ۳- نمودار پارتویی مثال ۴ روش NSGAI



شکل ۴- نمودار پارتویی مثال ۵ روش NSGAI



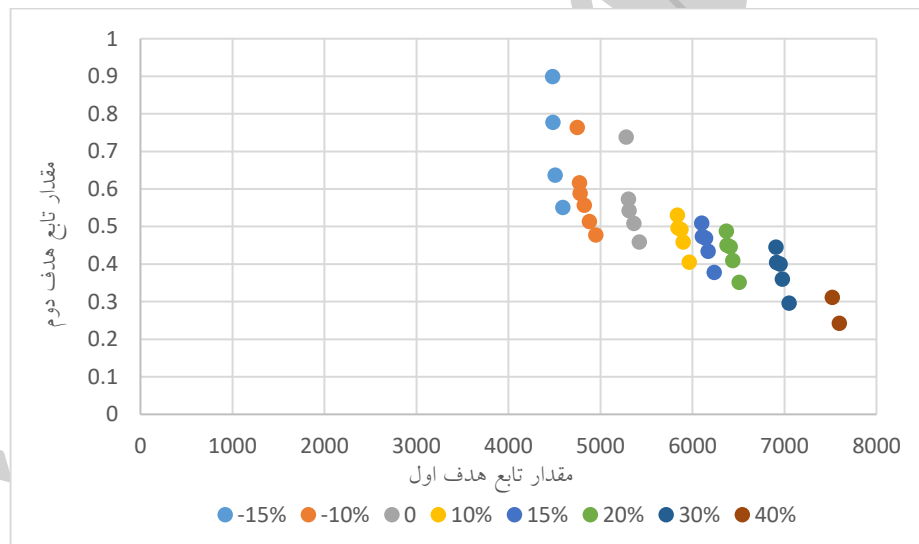
شکل ۵- نمودار پارتویی مثال ۶ روش NSGAI

تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی

در این بخش، به منظور ارزیابی مدل پیشنهادی و اعتبارسنجی آن، پارامترهای مهم مسأله تحلیل حساسیت میگردند. 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 مسأله بررسی شده است. نتایج بدست آمده در تصویرهای ۶ و ۷ 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 پیشرانه پهپاد:

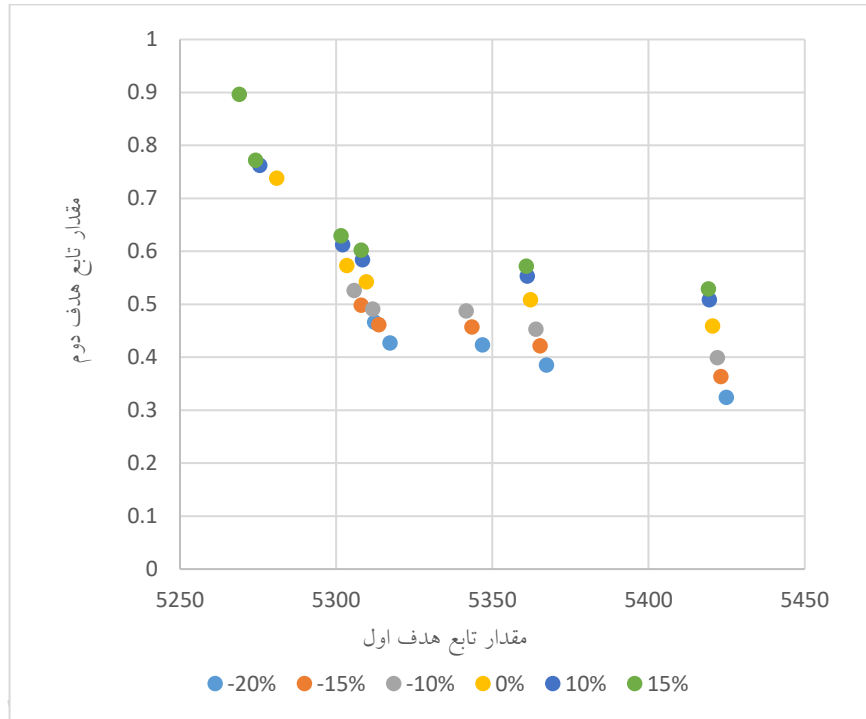
همانگونه که در شکل ۶ مشاهده می‌گردد، با افزایش حداکثر سرعت پیشرانه پهپاد، مجموع انرژی مصرفی در سیستم افزایش می‌یابد و احتمال موفقیت در ارسال صحیح اطلاعات پردازش شده توسط پهپاد کاهش می‌یابد.



شکل ۶ تغییرات توابع هدف به ازای درصدهای تغییر در سرعت پیشرانه پهپاد

تحلیل حساسیت توابع هدف نسبت به پهنای باند ارتباطی:

همان‌طور که در شکل ۷ 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 پهپاد افزایش (تابع هدف دوم) افزایش می‌یابد. در نتیجه باید تا حد ممکن پهنای باند ارتباطی را در سیستم بیشینه نمود.



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

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

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 شده است. برای این منظور مدلی دو هدفه شامل هفت محدودیت ارائه گردیده است. با توجه به اینکه تصویربرداری توسط پهپاد از مزرعه بادی باید در یک روز انجام گردد، لذا در این مسأله مجموع انرژی مصرفی در پهپاد مورد مدلسازی قرار گرفته است و به عنوان تابع هدف اول استفاده می‌شود و احتمال موفقیت در ارسال اطلاعات توسط پهپاد به عنوان تابع هدف دوم در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه مدل مشابه این پژوهش در هیچ مقاله‌ای استفاده نگردیده است، از تولید داده‌های مورد نیاز مدل به صورت تصادفی استفاده شده است. در ادامه؛ مدل با استفاده از ابزار تحلیل حساسیت اعتبارسنجی گردید. نتایج حاصل شده رفتاری مطابق با آنچه مورد انتظار بود را نشان می‌دهد که حاکی از صحت مدل پیشنهادی تحقیق می‌باشد. سپس مدل ارائه شده به کمک روش حل

محدودیت اِپسِیلِن تقویت‌شده و با استفاده از نرم‌افزار گمز حل شد. با توجه به تحقیقات به عمل آمده، روش محدودیت اِپسِیلِن بهترین روش برای بدست آوردن جواب‌های پارتو در مسائل چندهدفه می‌باشد، اما به دلیل پیچیدگی مسأله در این تحقیق، این روش با افزایش ابعاد مسأله کارایی خود را از دست داده است 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 شده است. این الگوریتم توانست مسائل در ابعاد بزرگ را که روش محدودیت اِپسِیلِن قادر به حل آن نبود، در زمان بسیار کوتاهی حل نماید. طبق نتایج بدست آمده روش محدودیت اِپسِیلِن تقویت‌شده 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 قابل قبول و مناسب حاصل گردید. در نتیجه روش ژنتیک با مرتب‌سازی ناچیره به عنوان روش برتر برای حل مسأله تحقیق پیشنهاد گردیده است. از نتایج این تحقیق می‌توان جهت مدیریت و نظارت مؤثر و صحیح بر تجهیزات صنعتی در واحدهای صنعتی مختلف جهت 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 جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی و زمان را با توجه به مدل این پژوهش انجام داد. از آنجایی که مدل ترکیبی اینترنت اشیا و پهپادهای غیرنظامی جهت هوشمندسازی نظارت بر تجهیزات صنعتی در ادبیات موضوع جدید است، زمینه‌های زیادی برای توسعه در این موضوع وجود دارد که از آن جمله می‌توان به استفاده از مدل ذکر شده در مطالعه‌های موردی دیگر مانند هوشمندسازی نظارت بر سیستم‌های برق‌رسانی، خدمات آتش‌نشانی و ... اشاره نمود و هم چنین بررسی مدل ذکر شده در شرایطی که پهپادها به صورت همزمان پرواز کرده و توالی وجود نداشته باشد قابل توسعه است.

منابع و مأخذ

- [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. pp. 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. *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] Fazlolahtabar, H. (2022). An Intelligent Sales Management System Based on Internet of Things and Bayesian Network. *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. *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.
- [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.

Designing and Explaining a Hybrid Model of IOT and Civilian UAVs to Intelligent Monitoring of the Industrial Equipment Performance with the Edge Computing Approach (Case Study: Wind Turbines)

Elham Aghazadeh

PhD student, Department of Industrial Management, Qazvin Branch,
Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Akbar AlemTabriz

Professor, Department of Industrial Management, Faculty of Management
and Accounting, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
Email: A-Tabriz@sbu.ac.ir (Corresponding author)

Keyvan Shah Qalyan

Assistant Professor, Department of Industrial Management, Qazvin
Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Abstract

Considering that industrial equipment is one of the essentials and important investments of every production unit; In this research, a mathematical model combining Internet of Things and civilian drones for intelligent monitoring of industrial equipment performance with an edge computing approach is presented, which has been investigated as a case study of wind turbines. In this model, the performance of UAV for intelligent monitoring of wind turbines has been investigated in three stages of the detection process, computational evacuation and local UAV calculations. Considering the dual purpose of the final model, which was a combination of the above three steps, the model was solved by genetic methods with sparse sorting and the enhanced epsilon constraint method using random numbers. According to the findings of the research, due to the complexity of the research model, the epsilon limit method loses its efficiency with the increase of the dimensions of the model and is not able to find the Pareto

frontier in problems with large dimensions in a reasonable time. For this purpose, the model was solved by using the second version of the meta-heuristic method of genetics with random sorting. In this research, in order to make the genetic algorithm work better, a new structure has been used to display chromosomes. This algorithm was able to solve large-scale problems that the epsilon constraint method could not solve, in a very short time. According to the obtained results, the enhanced epsilon constraint method and genetics with random sorting differ from each other only in the time of solving and have significant differences and have similar performance in other criteria. As a result, the genetic method with random sorting has been suggested as the best method to solve the research problem.

Keywords: Internet of Things, Civilian Drones, Edge Computing, Intelligent Surveillance