

مدل‌سازی چندهدفه مسئله تخصیص گیت با استفاده از الگوریتم NSGA-II و محدودیت اپسیلون

ساناز خطیبی^۱، مرتضی خاکزار بفرولی^{۲*}، مرتضی رحمانی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۱۳	برنامه‌ریزی گیت یکی از فعالیت‌های کلیدی در فرودگاه‌هاست که به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی تعریف می‌شود. هدف اصلی این پژوهش، پیدا کردن یک تخصیص مناسب برای پروازهای ورودی و خروجی با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از محدودیت‌های کاربردی است. یکی از اهدافی که کمتر مورد توجه قرار گرفته، بالانس کردن بار کاری گیت‌ها با استفاده از تعداد مسافران است. در این مقاله، این هدف همراه دو هدف کمینه کردن تأخیرهای به‌وجود آمده در زمان تخصیص گیت به هواپیما و بیشینه کردن امتیاز اولویت تخصیص گیت (کنترل ازدحام مسافران) که تاکنون با هم در نظر گرفته نشده‌اند، به‌عنوان اهداف مسئله در نظر گرفته شده است. مسئله به شکل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط مدل‌سازی شده، همچنین این مدل با استفاده از داده‌های واقعی فرودگاه بین‌المللی مهرآباد در ابعاد کوچک و متوسط حل شده است. به منظور یافتن مجموعه جواب‌های پارتو، الگوریتم NSGA-II پیشنهاد و برای نشان دادن کارایی الگوریتم جواب‌های به‌دست‌آمده در ابعاد کوچک با جواب‌های به‌دست‌آمده از روش محدودیت اپسیلون مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد درصد خطای توابع هدف نسبت به روش محدودیت اپسیلون در تمامی مسائل حل شده کمتر از ۱.۵٪ است که کارایی الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. افزایش نمایی زمان حل با استفاده از روش محدودیت اپسیلون در مقابل افزایش خطی توسط NSGA-II نشان‌دهنده کارایی روش حل توسعه‌داده شده، برای حل مسئله در ابعاد واقعی و بزرگ است.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۸/۱۷	
واژگان کلیدی: حمل و نقل هوایی، برنامه‌ریزی گیت، تصمیم‌گیری چندهدفه، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، الگوریتم NSGA-II، روش محدودیت اپسیلون.	

۱- مقدمه

با رشد ترافیک حمل و نقل هوایی، تکنیک‌های مدیریت و تخصیص منابع فرودگاه‌ها و خطوط هوایی در یک محیط پویا، به صورت روزافزون مورد توجه است. همچنین رقابت شدید بین شرکت‌های هواپیمایی برای برآوردن هرچه بیشتر رضایت مشتریان، منجر به بروز مسائل برنامه‌ریزی پیچیده‌ای شده است که به مدل‌ها و روش‌های جدیدی نیاز دارد. از طرفی مسائلی از نوع زمان‌بندی که امروزه مدیران فرودگاه با آن‌ها روبه‌رو شده‌اند، بسیار پیچیده‌تر از مسائل زمان‌بندی سنتی است [۱]. یکی از منابع فرودگاهی که در فرآیند حمل و نقل هوایی

نقش ویژه‌ای دارد، گیت‌های فرودگاهی است. به‌طور معمول به جایگاه‌های توقف هواپیما گیت گفته می‌شود که از طریق آن مسافران و خدمه هواپیما از ترمینال مسافری به داخل هواپیما و برعکس عبور و مرور می‌کنند. افزایش و تدارک این چنین منابع مستلزم هزینه‌های بسیار بالا همراه با صرف زمان و طراحی مجدد ساختمان‌های پایانه‌ها، گیت‌ها و توقفگاه‌هاست که البته این کار همیشه در کوتاه‌مدت امکان‌پذیر نیست. بنابراین مسئله زمان‌بندی گیت‌های پرواز از مسائل حائز اهمیت در فرودگاه‌هاست. هدف این تحقیق عبارت است از:

- مدل‌سازی مسئله زمان‌بندی گیت با هدف

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: khakzar@acecr.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری، پژوهشکده توسعه تکنولوژی، جهاددانشگاهی

۲. استادیار، پژوهشکده توسعه تکنولوژی، جهاددانشگاهی

۳. دانشیار، پژوهشکده توسعه تکنولوژی، جهاددانشگاهی

و آن را توسط یک الگوریتم کاملاً ابتکاری حل کردند. در سال ۱۹۹۸ یان و چانگ [۵] مسئله برنامه‌ریزی گیت را به‌عنوان یک مسئله شبکه جریان چندکالایی به نحوه مطلوبی مدل‌سازی کردند. در سال ۲۰۰۱ زو و بیلی [۶] مدلی را برای مسئله برنامه‌ریزی گیت ارائه دادند که مجموع زمان‌های مسافران را برای رسیدن به پروازهای اتصالی با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری جست‌وجوی ممنوع، کمینه می‌کرد. یان و هو [۷] در سال ۲۰۰۱ مدل جدیدی برای محاسبه تأخیرهای تصادفی میان دو پرواز متوالی با استفاده از حافظه موقت برای جذب این تأخیرها ارائه دادند. دینگ و همکاران [۸] در سال ۲۰۰۴ مسئله را در زمانی که تعداد هواپیماها بیش از گیت‌های در دسترس باشد (منابع محدود) مدل‌سازی کردند. آنان از دو تابع هدف کمینه‌کردن تعداد پروازهای بدون گیت و کمینه‌کردن مسافت پیاده‌روی یا زمان‌های اتصال در مدشان بهره گرفتند. دینگ و همکاران [۹] در سال ۲۰۰۵ مدل پیشین خود را با الگوریتم حریم‌صانه، شبیه‌سازی تبرید و جست‌وجوی ممنوع حل کردند. لیم و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۰۵ مسئله تخصیص گیت در فرودگاه را با در نظر گرفتن پنجره زمان و استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری جست‌وجوی ممنوع، ممیتیک و ژنتیک مدل‌سازی و حل کردند. دورندورف و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۰۷ در مطالعه خود جدیدترین تکنیک‌های موجود در مسئله تخصیص گیت را به‌طور جامع و عمومی معرفی کرده، تحولات اخیر را در مورد استفاده از توابع هدف چندمعیاره مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. پینتی و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۰۸ مدل ارائه‌شده توسط دینگ و همکاران در سال ۲۰۰۴ را با الگوریتم هیبرید مورچگان و الگوریتم جست‌وجوی ممنوع حل کردند. نیکولین و درکسل [۱۲] در سال ۲۰۰۸ در مطالعه خود مدل اولیه دینگ و همکاران در سال ۲۰۰۴ را با تعریف یک تابع هدف چندمعیاره توسعه دادند. اهداف آن‌ها حداقل‌کردن تعداد پروازهای بدون گیت، حداقل‌کردن مجموع مسافت پیاده‌روی مسافران و حداکثر کردن مجموع اولویت تخصیص گیت بود. همچنین آن‌ها برای حل مدل از الگوریتم فرا ابتکاری پارتو آنیل شبیه‌سازی شده استفاده کردند. داس [۱۳] در سال ۲۰۰۹ مدل‌سازی ساده‌ای از برنامه‌ریزی عدد صحیح (صفر-یک) برای مسئله برنامه‌ریزی گیت ارائه داد.

بالانس کردن بار کاری گیت‌ها با استفاده از تعداد مسافران، همراه با دو هدف کمینه‌کردن تأخیرهای به‌وجودآمده در زمان تخصیص گیت به هواپیما و بیشینه‌کردن امتیاز اولویت تخصیص گیت (کنترل ازدحام مسافران) است که تاکنون به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفته نشده‌اند.

- به‌علاوه، در نظر گرفتن مجموعه‌ای از محدودیت‌های کاربردی و فاکتورهایی مانند زمان ورود و خروج پروازها، اندازه هواپیماها، تجهیزات موجود در هریک از گیت‌ها و مسائل امنیتی و گمرکی هریک از پروازها، به‌منظور واقعی‌تر کردن مدل‌سازی مسئله، در نظر گرفته می‌شود.
- حل کردن مدل ارائه‌شده با روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه (دقیق و فرا ابتکاری).

در ادامه در بخش دوم، به مرور اجمالی پیشینه تحقیق در مسئله برنامه‌ریزی گیت پرداخته می‌شود. در بخش سوم، مسئله با جزئیات تعریف شده، مدل ریاضی آن ارائه می‌شود. جزئیات مربوط به الگوریتم پیشنهادی و تنظیم پارامترهای به‌کاررفته در الگوریتم و نتایج محاسباتی در بخش‌های چهارم و پنجم تشریح می‌شود. در بخش پایانی مقاله، نتیجه‌گیری تحقیق و پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی بیان می‌شود.

۲- پیشینه تحقیق

از نخستین مطالعات انجام‌شده در زمینه مسئله برنامه‌ریزی گیت می‌توان به مدل ریاضی بابیک و همکاران [۲] در سال ۱۹۸۴ اشاره کرد. آن‌ها مسئله را در قالب یک مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح فرموله کرده، از الگوریتم شاخه و کران برای کمینه‌کردن مسافت پیاده‌روی مسافران در حال ورود یا در حال عزیمت استفاده کردند. در سال ۱۹۸۵ متیسل و همکاران [۳] برای کمینه‌کردن مسافت پیاده‌روی مسافران در پایانه‌ها علاوه بر مسافران در حال ورود و عزیمت، مسافران انتقالی را نیز مدنظر قرار دادند. آن‌ها از الگوریتم ابتکاری حریم‌صانه^۱ برای حل مدل استفاده کردند. در سال ۱۹۹۸ حقانی و همکاران [۴] برای نزدیک‌تر کردن مدل ریاضی به واقعیت، تخصیص چنددوره‌ای گیت را در قالب فرمول جدیدی از برنامه‌ریزی عدد صحیح مدل‌سازی

^۱ Greedy algorithm

این زمینه ارائه داد که با تعریف پارامترهای ورودی به صورت فازی که با عدم قطعیت در خصوص میزان و مقدار آن‌ها مواجه بود، استواری جدول تخصیص نهایی را افزایش می‌داد. وی برای حل مسئله از روش فراابتکاری ژنتیک استفاده کرد. امیر جاوید [۲۱] در سال ۱۳۸۸ با استفاده از نظر خبره، زمان رسیدن پرواز به فرودگاه و آزاد شدن گیت‌ها را به صورت زمان‌های فازی مثلثی با چند هدف بیان و با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی خطی فازی آن را حل کرد. خطیبی [۲۲] در سال ۱۳۸۹ به بررسی هر دو مسئله تخصیص گیت و تخصیص مجدد گیت پرداخته است. وی در مسئله اول بالانس کردن بار کاری گیت‌ها را به عنوان تابع هدف در نظر گرفت. همچنین در مسئله دوم گیت‌ها به پروازهای جدید و تأخیردار به گونه‌ای تخصیص داده می‌شوند که انحراف برنامه تخصیص جدید گیت از برنامه مرجع کمینه شود. کهنسال [۲۳] در سال ۱۳۹۰ در تحقیق خود یک سیستم پشتیبانی تصمیم^۱ مبتنی بر مدل ریاضی برنامه‌ریزی عدد صحیح را ارائه کرد. وی همچنین کمینه کردن هزینه‌های تخصیص گیت به پرواز و هزینه ایجاد شده به واسطه زمان انتظار هواپیما در تاکسی وی^۲ را به عنوان اهداف مسئله برنامه‌ریزی گیت در نظر گرفت. سپس مدل را با استفاده از روش وزن‌دهی و با پیاده‌سازی آن در نرم‌افزار لینگو^۳ حل کرد.

یکی از اهداف کاربردی در فرودگاه‌های بزرگ داخل کشور بالانس کردن بار کاری گیت‌هاست که در کار خطیبی [۲۲] به‌تنهایی در نظر گرفته شده است. بهینه کردن این هدف به‌تنهایی، می‌تواند منجر به افزایش تأخیر در پروازها شود که برای مسافران، شرکت‌های هواپیمایی و حتی مدیریت فرودگاه‌ها نامطلوب است. برای ایجاد تعادل بین این دو هدف، در نظر گرفتن هم‌زمان آن‌ها می‌تواند راهکار مناسبی باشد. بنابراین در این تحقیق این دو هدف همراه با هدف پیشینه‌کردن اولویت تخصیص گیت (که منجر به کنترل ازدحام مسافران می‌شود) در نظر گرفته شده است. اولویت تخصیص گیت، باتوجه به مسائل و عواملی تعیین می‌شود که از نظر کارشناسان برنامه‌ریزی گیت در فرودگاه دارای اهمیت است. به عبارت دیگر، هر یک از این عوامل به‌تنهایی قابل مدل‌سازی نیستند و با دانش و شناخت کارشناس از

تفاوت کار او نسبت به مطالعات قبل تنها در نظر گرفتن تعدادی محدودیت متفاوت کاربردی است. نیکولین و درکسل [۱۴] همچنین در سال ۲۰۰۹ مدل ریاضی ارائه شده توسط دورندوف در سال ۲۰۰۲ را با الگوریتم فراابتکاری پارتو آنیل شبیه‌سازی شده فازی حل کردند. آن‌ها از تابع چندهدفه در مسئله برنامه‌ریزی گیت استفاده کردند که اهداف آن پیشینه‌کردن مجموع اولویت‌های گیت پرواز، کمینه کردن تعداد فعالیت‌های یدک‌کشی و کمینه کردن انحراف مطلق تخصیص جدید گیت از برنامه مرجع بود. یائن [۱۵] در سال ۲۰۱۰ مسئله تخصیص گیت به پروازها را تنها با در نظر گرفتن یک تابع هدف پیشینه‌کردن امتیاز اولویت تخصیص گیت پرواز با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی پویا حل کرد. دپین [۱۶] در سال ۲۰۱۲ یک مدل کاملاً جدید برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح ارائه کرد. بیشتر تمرکز مدل وی بر پیدا کردن یک تخصیص استوار برای پرواز به گیت‌هاست. همچنین وی برای حل مدل روش تولید ستون را ارائه کرد.

بوراس و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۴ به مرور ادبیات کامل مسئله برنامه‌ریزی گیت فرودگاه پرداختند. این تحقیق تمامی ابعاد این مسئله را مانند بعد تئوری و واقعی همراه با تحلیل فرمول‌های ریاضی مورد توجه قرار داده است. همچنین آنان در تحقیقات انجام شده به دسته‌بندی روش‌های حل مانند روش دقیق، ابتکاری و فراابتکاری پرداخته‌اند.

ماریلینی و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۵ یک روش فراابتکاری کلونی زنبورها برای حل یک مدل دومعیاره برای تخصیص گیت ارائه کردند. اهداف در نظر گرفته شده برای این مدل کمینه کردن مسافت پیاده‌روی مسافران و تعداد پروازهای تخصیص داده شده به پارکینگ است. نتایج حاصل از این روش با داده‌های واقعی فرودگاه میلان ایتالیا نشان‌دهنده اعتبار روش فوق است.

از مطالعات و تحقیقات انجام شده در این زمینه در داخل کشور می‌توان به مطالعه برازجانی [۱۹] در سال ۱۳۸۰ اشاره کرد. وی یک مدل ریاضی برای مسئله تخصیص مجدد گیت‌ها مطرح و با استفاده از روش فراابتکاری شبیه‌سازی تیرید حل کرد. حسن‌آبادی [۲۰] در سال ۱۳۸۱ مدلی در

¹ Decision System Support

² Taxi-way

³ Lingo

$CC_{i,k}$: ماتریس محدودیت تخصیص پرواز i ام به گیت k ام: صفر ممنوعیت، ۱ الزامی بودن و ۲ مجاز بودن تخصیص i ام به گیت k ام

$q_{i,e}$: ماتریس نیازمندی پرواز i ام به تجهیزات e ام، :

$g_{k,l}$: ماتریس مجاورت گیت؛

$wing_i$: اگر هواپیمای پرواز i ام پهن پیکر باشد برابر با یک و در غیر این صورت صفر است؛

VI_i : اولویت پرواز i ام $UI_{i,k}$: اولویت تخصیص پرواز i ام به گیت k ام

$U_{i,t}$: اگر زمان ورود پرواز i ام در بازه زمانی t ام باشد، برابر با یک و در غیر این صورت صفر است؛

TA_i : حد پایین پنجره زمانی برای پرواز i ام؛

TB_i : حد بالای پنجره زمانی برای پرواز i ام؛

M : یک عدد بسیار بزرگ؛

ε : یک عدد بسیار کوچک.

۳-۱-۲- متغیرهای مدل

متغیرهای متعددی در مدل ریاضی استفاده شده است که تعریف هر یک از آن‌ها به شرح زیر است:

$Y_{i,k}$: اگر پرواز i ام به گیت k ام تخصیص یابد، برابر با یک و در غیر این صورت صفر است؛

$LN1_{i,k}, LN2_{i,k}$: متغیرهای عدد صحیح صفر و یک که برای خطی کردن محدودیت‌های پروازهای ثابت و ممنوع استفاده شده‌اند (باتوجه به اینکه بدون تعریف این دو متغیر قادر به مدل‌سازی خطی این مدل نیستیم؛ زیرا باید به صورت غیرخطی یا شرطی نوشته شود، به تعریف آن‌ها می‌پردازیم)؛ یعنی اگر پرواز i ام به گیت k ام تخصیص یابد، برابر با یک و در غیر این صورت صفر است؛

$X_{i,j,k}$: اگر پرواز i ام و j ام به گیت k ام تخصیص یابد، برابر با یک و در غیر این صورت صفر است؛

S_i : زمان شروع پرواز i ام؛

$Z1_{i,j}$: اگر زمان شروع سرویس پرواز j ام بزرگ‌تر از پرواز i ام باشد، یک و در غیر این صورت صفر است؛

$Z2_{i,j}$: اگر زمان خاتمه سرویس پرواز j ام بزرگ‌تر از پرواز i ام باشد، یک و در غیر این صورت صفر است.

$W_{t,k}$: مجموع کل مسافران در بازه زمانی t ام در گیت k ام؛

مدل ریاضی پیشنهادی تخصیص گیت به پروازها در فرودگاه باتوجه به محدودیت‌های تعریف شده به صورت مدل

محیط در قالب یک اولویت به هر پرواز - گیت تشخیص داده می‌شوند.

۳- تعریف مسئله

در این مسئله، گیت‌های فرودگاه، تعداد پروازها، تعداد مسافران هر پرواز، نوع هواپیما و مدت زمان اشغال گیت توسط پرواز در یک بازه زمانی معلوم است. فرض می‌شود گیت‌های اشغال شده پس از ترک پرواز، بلافاصله قابل استفاده است. گیت‌ها به صورت ناهمگن است؛ یعنی بعضی از گیت‌ها قادر به سرویسی دهی به بعضی از پروازها نیستند. برای نزدیک تر شدن مسئله تخصیص گیت به دنیای واقعی، این مسئله با پنجره زمانی مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین با در نظر گرفتن پنجره زمانی $[TA_i, TB_i]$ یک بازه زمانی برای زودترین زمان شروع سرویس TA_i و دیرترین زمان شروع سرویس TB_i در نظر گرفته می‌شود و پروازها فقط در این بازه زمانی مجاز به گرفتن سرویس هستند که در شکل (۱) نمایش داده شده است. بنابراین مدل باید بهترین زمان شروع سرویس را در این بازه تعیین کند. برای تخصیص پرواز i ام به گیت j ام اولویت $UI_{i,k}$ در نظر گرفته می‌شود، همچنین پرواز i ام باتوجه به تعداد مسافران دارای اولویت VI_i است. برای بررسی جدول زمان بندی پروازها در طول بازه‌های زمانی مختلف از شبانه روز، پروازها به شش بازه زمانی چهارساعته طبقه بندی می‌شوند. ترتیب این بازه‌های زمانی به صورت $T = t_1, t_2, \dots, t_6$: $(0, 4)$, $(4, 8)$, $(8, 12)$, $(12, 16)$, $(16, 20)$ و $(20, 24)$ است.



شکل ۱: سرویس دهی در حالت پنجره زمانی سخت

۳-۱-۱- مدل ریاضی مسئله

۳-۱-۱-۱- علائم و پارامترهای مدل

$i, j \in F$: اندیس پروازها، $k, l \in G$: اندیس گیت‌ها؛

$t \in T$: اندیس بازه‌های زمانی، $e \in E$: اندیس تجهیزات؛

$N = |F|$: تعداد کل پروازهای ورودی و خروجی؛

$M = |G|$: تعداد کل گیت‌های در دسترس؛

A_i : زمان ورود پرواز i ام، Pas_i : تعداد مسافران پرواز i ام،

P_i : زمان پردازش پرواز i ام؛

$$Y_{i,k} \in \{0,1\} \quad \forall i,k \quad (25)$$

$$X_{i,j,k} \in \{0,1\} \quad \forall i,j,k \quad (26)$$

$$Z1_{i,j} \in \{0,1\} \quad \forall i,j \quad (27)$$

$$Z2_{i,j} \in \{0,1\} \quad \forall i,j \quad (28)$$

$$W_{t,k} \geq 0 \quad \forall t,k \quad (29)$$

$$S_i \geq 0 \quad \forall i \quad (30)$$

$$LN1_{i,k} \in \{0,1\} \quad \forall i,k \quad (31)$$

$$LN2_{i,k} \in \{0,1\} \quad \forall i,k \quad (32)$$

رابطه (۱) تا (۳)، به ترتیب اهداف مدل، یعنی بالانس کردن بار کاری گیت‌ها با استفاده از تعداد مسافران، کمینه کردن تأخیرهای به وجود آمده در زمان تخصیص گیت به هواپیما و بیشینه کردن اولویت بندی تخصیص گیت‌هاست. تابع هدف اول سعی می‌کند تعداد پروازهای تخصیص داده شده به هر گیت را کنترل کند تا از ظرفیت تمام گیت‌ها به طور یکنواخت استفاده شود. با توجه به اینکه تأخیر بیش از حد مجاز (انتظار هواپیما در توقفگاه) موجب تحمیل هزینه‌های تأخیر می‌شود، برای کاهش این هزینه‌ها تابع هدف دوم میزان تأخیر به وجود آمده را در زمان شروع سرویس به پرواز حداقل می‌کند. با توجه به اینکه هر پرواز دارای اولویت تخصیص ویژه‌ای برای کارشناسان فرودگاهی است، افزایش اولویت تخصیص گیت باعث نزدیک تر شدن جواب تخصیص به نظر کارشناسان فرودگاهی و افزایش رضایت آن‌ها از جدول تخصیص خواهد شد. همچنین این تابع هدف باعث کاهش ازدحام مسافران در سالن‌های ترمینال می‌شود. بنابراین تابع هدف سوم برای جلب رضایت این کارشناسان و کاهش ازدحام مسافران در سالن‌های ترمینال در نظر گرفته می‌شود.

رابطه (۴) بیان می‌کند که هر پرواز به یک گیت تخصیص یابد. رابطه (۵) تضمین می‌کند که زمان شروع سرویس پرواز i ام در گیت بزرگ‌تر یا مساوی زمان ورود پرواز i ام باشد. رابطه (۶) و (۷) بیان می‌کند که هر گیت در هر زمان تنها توانایی سرویس دهی به یک هواپیما را دارد. رابطه (۸) تضمین می‌کند که اگر پرواز i ام بعد از پرواز j ام باشد، پرواز i ام بعد از پرواز j ام قرار نگیرد. رابطه (۹) بیان می‌کند که اگر پرواز i ام بعد از پرواز j ام در گیت k ام بیاید، پرواز j ام نمی‌تواند بلافاصله بعد از پروازهای دیگر در گیت‌های دیگر بیاید. رابطه (۱۰) و (۱۱) می‌گوید تنها

برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط زیر است.

$$F1 = \text{Min} \left(\sum_{i=1}^T \left[\text{Max}_k(W_{t,k}) - \text{Min}_k(W_{t,k}) \right] \right) \quad (1)$$

$$F2 = \text{Min} \sum_{i=1}^N (S_i - A_i) \quad (2)$$

$$F3 = \text{Max} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M V_i U_{i,k} Y_{i,k} \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^M Y_{i,k} = 1 \quad \forall i \quad (4)$$

$$S_i \geq A_i \quad \forall i \quad (5)$$

$$S_j \geq (S_i + P_j - M(X_{i,j,k} - 1) + 2M(Y_{i,k} + Y_{j,k} - 2)) \quad \forall i,j,k \quad (6)$$

$$S_i \geq (S_j + P_j - M(X_{i,j,k}) + M(Y_{i,k} + Y_{j,k} - 2)) \quad \forall i,j,k \quad (7)$$

$$X_{i,j,k} + X_{j,i,k} \leq 1 \quad \forall i,j,k \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^M X_{i,j,k} \leq 1 \quad \forall i,j,k \quad (9)$$

$$X_{i,j,k} \leq Y_{i,k} \quad \forall i,j,k \quad (10)$$

$$X_{i,j,k} \leq Y_{j,k} \quad \forall i,j,k \quad (11)$$

$$TA_i \leq S_i \quad \forall i \quad (12)$$

$$S_i \leq TB_i \quad \forall i \quad (13)$$

$$LN1_{i,k} + 2 * LN2_{i,k} = CC_{i,k} \quad \forall i,k \quad (14)$$

$$LN1_{i,k} + LN2_{i,k} \leq 1 \quad \forall i,k \quad (15)$$

$$Y_{i,k} \geq LN1_{i,k} \quad \forall i,k \quad (16)$$

$$Y_{i,k} \leq LN1_{i,k} + LN2_{i,k} \quad \forall i,k \quad (17)$$

$$S_j - S_i + \varepsilon \leq M(Z1_{i,j}) \quad \forall i,j \quad (18)$$

$$S_j - S_i + \varepsilon \geq M(Z1_{i,j} - 1) \quad \forall i,j \quad (19)$$

$$C_i - S_j + \varepsilon \leq M(Z2_{i,j}) \quad \forall i,j \quad (20)$$

$$C_i - S_j + \varepsilon \geq M(Z2_{i,j} - 1) \quad \forall i,j \quad (21)$$

$$g_{k,l} (q_{i,e} Y_{i,k} + q_{j,e} Y_{j,l}) + M(Z1_{i,j} + Z2_{i,j} - 2) \leq 1 \quad \forall i,j,k,l,e \quad (22)$$

$$g_{k,l} (\text{wing}_i Y_{i,k} + \text{wing}_j Y_{j,l}) + M(Z1_{i,j} + Z2_{i,j} - 2) \leq 1 \quad \forall i,j,k,l \quad (23)$$

$$W_{t,k} = \sum_{i=1}^M U_{i,t} \text{Pas}_i Y_{i,k} \quad \forall t,k \quad (24)$$

NSGA-II توضیح داده می‌شود.

۴-۱- الگوریتم بهینه‌سازی توابع چندهدفه

مسئله بهینه‌سازی چندهدفه زیرشاخه‌ای از مجموعه روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که در میان مجموعه نامحدودی از جواب‌های ممکن صورت می‌گیرد. مسئله بهینه‌سازی چندهدفه برخاسته از روش‌های تصمیم‌گیری در دنیای واقعی است که شخص تصمیم‌گیرنده با مجموعه‌ای اهداف و معیارهای متضاد و متعارض روبه‌روست. در این‌گونه مسئله‌ها برخلاف مسائل بهینه‌سازی تک‌هدفه و به دلیل وجود چند هدف متعارض به جای تنها یک جواب، مجموعه‌ای از جواب‌ها حاصل می‌شود. هدف از بهینه‌سازی چندهدفه، یافتن مجموعه جواب‌های پارتو (نامغلوب) مسئله موردنظر است. به منظور حل مسائل چندهدفه در سال‌های گذشته، الگوریتم‌های بهینه‌سازی توابع چندهدفه توسعه داده شده‌اند که ساختار کلی آن بر اساس رابطه (۱) است.

$$\begin{aligned} & \text{Min} \\ & F(x) = (f_1(x_1), f_2(x_2), \dots, f_m(x_n)) \\ & \text{s.t.} \end{aligned} \quad (1)$$

$$g(x) \geq 0$$

در رابطه (۱)، m تعداد توابع هدف، $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ تعداد متغیرهای تصمیم و $F(x) = (f_1(x_1), f_2(x_2), \dots, f_m(x_n))$ بیانگر فضای جواب‌های موجه در نظر گرفته می‌شود. همچنین $g(x)$ بیانگر قیود مسئله است. جواب‌های پارتو در مسئله چندهدفه به مجموعه‌ای از نقاط غیرمغلوب گفته می‌شود که تمام جواب‌های دیگر را مغلوب می‌کنند. شایان ذکر است جواب‌های به دست آمده در صورتی همدیگر را مغلوب می‌کنند که دارای شرایط زیر باشند [۲۴]:

$$f_i(y) \leq f_i(z) \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (2)$$

$$f_i(y) < f_i(z) \quad \exists i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (3)$$

۴-۲- روش محدودیت افسیلون

یکی از رویکردهای شناخته شده برای مواجهه با مسائل چندهدفه، روش محدودیت افسیلون است. در این روش با انتقال تمامی توابع هدف‌ها به جز یکی از آن‌ها به محدودیت‌ها، به حل این نوع مسائل پرداخته می‌شود. با

در صورتی که پرواز i ام به گیت k ام و پرواز z ام به گیت k ام تخصیص یابد، متغیر $X_{i,j,k}$ برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود. این محدودیت الزام تخصیص دو پرواز به یک گیت است. رابطه (۱۲) و (۱۳) محدودیت پنجره زمانی و رابطه (۱۴) و (۱۷) محدودیت پروازهای ثابت و ممنوع است. برخی از پروازها تنها اجازه استفاده از برخی از گیت‌ها را دارند؛ یعنی تنها باید به گیت‌های از قبل مشخص شده که متعلق به شرکت هواپیمایی خود هستند، تخصیص یابند و برعکس برخی دیگر اجازه تخصیص به گیت‌های ویژه‌ای که از قبل توسط شرکت‌های هواپیمایی دیگر در نظر گرفته شده‌اند، ندارند. به عنوان مثال گیت‌های در نظر گرفته شده برای پروازهای VIP نباید توسط پروازهای عادی مورد استفاده قرار گیرد. برای این امر محدودیت‌ها مذکور در نظر گرفته می‌شوند. رابطه (۱۸) تا (۲۱) بیان می‌کند، زمان شروع و خاتمه سرویس کدام یک از پروازها با هم تداخل دارند. رابطه (۲۲) بیان می‌کند دو پروازی که به تجهیزاتی مشترک نیازمند هستند، در یک زمان نمی‌توانند به گیت‌های مجاور همدیگر تخصیص یابند. از جمله این تجهیزات می‌توان تجهیزات کنترل زمینی^۱ مانند سرویس رمپ^۲ و سرویس کترینگ^۳ را نام برد که برای هر شرکت هوایی متفاوت است. به عنوان مثال، وقتی برخی از خطوط هوایی خاص به منظور ارائه سرویس در روی زمین نیازمند برخی از تجهیزات ثابت باشند و این تجهیز ویژه توسط یک گیت اشغال شده باشد، دیگر توسط سایر پروازها در گیت مجاور قابل دسترسی نخواهد بود. [۱۳] رابطه (۲۳) بیان می‌کند دو پرواز پهن‌پیکر در یک زمان نمی‌توانند به گیت‌های مجاور همدیگر تخصیص یابند. رابطه (۲۲) تعداد کل مسافران در بازه زمانی t ام در گیت k ام را محاسبه می‌کند. رابطه (۲۴) تا (۳۰) متغیرهای غیرمنفی و صفر و یک را مشخص می‌کند که در مدل مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۴- رویکردهای حل مسئله

در این بخش مفاهیم اصلی روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه همراه با روش محدودیت افسیلون که مرتبط به حل مدل پیشنهادی است، ارائه می‌شود. همچنین روش حل مدل پیشنهادی در ابعاد متوسط و بزرگ، توسط الگوریتم

³ Catering Service

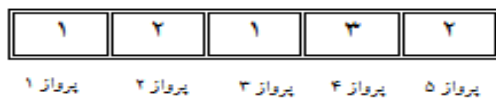
¹ Ground handler

² Ramp Service

ولی به منظور انتخاب ذره‌های غالب و پیچیدگی محاسباتی، دارای ضعف‌هایی است. به همین منظور، نسخه دوم الگوریتم NSGA با نام NSGA-II توسط دب و همکارانش در سال ۲۰۰۰ معرفی شد. [۲۷] گام‌های این الگوریتم به‌طور کلی عبارت‌اند از: ۱. تولید جمعیت اولیه بر مبنای مقیاس و قیود مسئله؛ ۲. ارزیابی جمعیت تولیدشده با توجه به توابع هدف؛ ۳. اعمال روش مرتب‌سازی نامغلوب؛ ۴. محاسبه پارامتر کنترلی به نام فاصله ازدحامی^۳؛ ۵. انتخاب جمعیت والدین برای تولیدمثل؛ ۶. انجام عملگر تقاطع و جهش. [۲۴] در ادامه گام‌های فوق به‌طور جامع‌تری برای مسئله تحقیق تشریح می‌شوند.

۴-۳-۱- شیوه نمایش جواب‌ها

در این بخش شیوه نمایش جواب‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای ایجاد جمعیت اولیه در الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب، ابتدا باید چندین کروموزوم یا به عبارت دیگر چندین ترکیب مختلف از مشخصه‌ها به صورت تصادفی به کار گرفته شوند. برای این کار در ابتدا به‌طور تصادفی، کروموزوم‌هایی به طول تعداد پروازها ایجاد می‌شود. به عنوان مثال، اگر تعداد پروازها ۵ باشد، طول کروموزوم برابر با ۵ است. مقدار هر ژن از کروموزوم به صورت تصادفی از طریق تولید اعداد تصادفی به تعداد گیت‌ها تولید می‌شود. برای مثال، اگر تعداد گیت‌ها برابر با ۳ باشد، اعداد تصادفی تولیدشده بین مجموعه ۱ تا ۳ خواهد بود؛ یعنی مقادیر داخل این ژن‌ها بیانگر گیت تخصیص داده شده به این پروازهاست. بنابراین برای هر گیت، مجموعه‌ای از پروازها برای سرویس‌دهی وجود دارد.



شکل ۲: نمونه‌ای یک کروموزوم با تعداد ۵ ژن

پس از تولید جواب‌های اولیه (به تعداد اندازه جمعیت) و بررسی شدنی بودن جواب‌ها، اعداد برازش برای هر کدام از کروموزوم‌ها با توجه به توابع هدف، مشخص می‌شود. بنابراین برای هر کروموزوم، به میزان تعداد توابع هدف اعداد برازندگی به دست می‌آید. از میان جواب‌های هر نسل برای

استفاده از این روش می‌توان جبهه پارتو را برای مسائل چندهدفه ایجاد کرد. این یکی از روش‌های پسین^۱ است؛ یعنی تصمیم‌گیرنده بعد از به دست آمدن جواب‌ها اقدام به انتخاب آن بر اساس اولویت و ترجیحات خود می‌کند. مدل محدودیت اپسیلون به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} & \text{Min } f_1(x_1) \\ & \text{s.t.} \\ & g(x) \geq 0 \\ & f_2(x) \geq e_2 \\ & f_3(x) \geq e_3 \\ & \dots \\ & f_m(x) \geq e_m \\ & x \in S. \end{aligned} \quad (4)$$

به‌طور کلی گام‌های روش محدودیت اپسیلون به صورت زیر است:

- ۱) یکی از توابع هدف به عنوان تابع هدف اصلی انتخاب می‌شود؛
- ۲) هر بار با توجه به یکی از توابع هدف، مسئله حل شده، مقادیر هر تابع هدف گزارش می‌شود؛
- ۳) بازه بین دو مقدار بهینه توابع هدف فرعی به تعداد از قبل مشخص تقسیم‌بندی می‌شود و در یک جدول مقادیر برای اپسیلون‌ها e_2, \dots, e_m ، به دست می‌آید؛
- ۴) هر بار مسئله با توجه به مقدار تابع هدف اصلی با هر یک از مقادیر e_2, \dots, e_m ، حل می‌شود؛
- ۵) مجموعه‌ای از جواب‌های پارتو تولید شده در یک جدول ارائه می‌شود؛
- ۶) تصمیم‌گیرنده از بین جواب‌های تولیدشده اقدام به انتخاب یکی از آن‌ها بر اساس ترجیحات و اولویت‌ها می‌کند [۲۵].

۴-۳-۲ الگوریتم NSGA-II

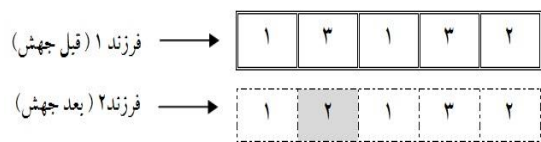
الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب^۲ (NSGA) توسط دب و همکاران [۲۶] ارائه شد. این الگوریتم با اضافه شدن دو عملگر ضروری به الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه معمولی، به یک الگوریتم چندهدفه تبدیل شده است که به جای یافتن بهترین جواب، دسته‌ای از بهترین جواب‌ها را ارائه می‌دهد که با نام جبهه پارتو شناخته می‌شوند. این الگوریتم یک روش کارآمد به منظور حل مسائل با چند تابع هدف است

³ Crowding distance

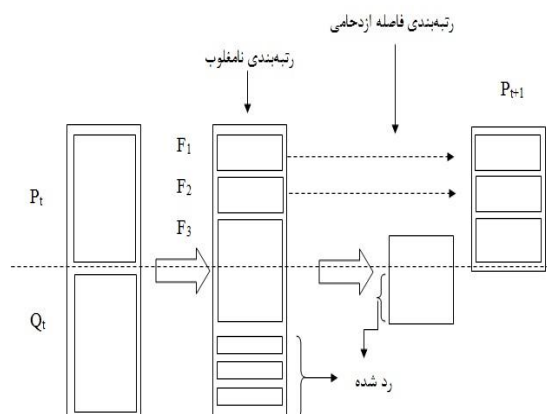
¹ Posterior method

² Non-dominated sorting genetic algorithm

دو دسته جواب وجود دارد؛ یک دسته جمعیت والدین از مرحله قبل که در شکل (۵) با P_t مشخص شده و دسته دیگر جمعیت فرزندان حاصل از عملکرد دو عملگر تقاطع و جهش بر روی والدین که با Q_t مشخص شده است.



شکل ۴: نمونه‌ای از عملکرد اپراتور جهش تصادفی کروموزوم



شکل ۵: نحوه عملکرد اپراتورها در مرحله انتخاب جواب‌ها در الگوریتم NSGA-II

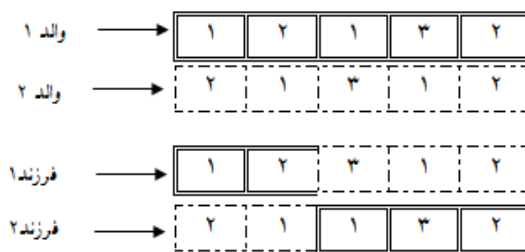
این مسئله را با مثالی شرح می‌دهیم. فرض کنیم نقاط موجود در شکل (۶)، مربوط به مجموعه‌ای با رتبه یکسان هستند. از بین این نقاط ما مجبوریم یک نقطه را حذف کنیم. بنابراین سعی می‌شود آن نقطه طوری انتخاب شود که تنوع پاسخ‌های ما را تا حدودی محفوظ نگه دارد. برای مثال، بین نقاط ۳ و ۵، نقطه ۳ انتخاب بهتری برای حذف شدن است؛ زیرا با حذف نقطه ۵، در محدوده زیادی از محور f_1 و f_2 ، یعنی به ترتیب d و g و بین n و p نماینده‌ای از جواب حضور نخواهد داشت. اما اگر نقطه ۲ برای حذف شدن انتخاب شود، تنوع جواب از بین نمی‌رود؛ زیرا در مجاورت این نقطه، پاسخ‌های دیگری نیز وجود دارد. [۲۴] سپس الگوریتم به همان شکل قبل ادامه می‌یابد.

حال باید از بین این دو جمعیت، عده‌ای را برای ثابت نگه داشتن تعداد جمعیت اولیه برای آغاز سیکل بعدی حذف کرد. بنابراین بر اساس مرتب‌سازی نامغلوب، ابتدا آن دسته از اعضای جمعیت را که هرگز مغلوب نشده‌اند مشخص

انجام عمل تقاطع، به تعداد n_c از جمعیت با استفاده از روش انتخاب تورنومنت دودویی (دو بار)، دو کروموزوم انتخاب می‌شود.

در روش انتخاب دودویی، دو جواب به تصادف از میان جمعیت انتخاب و سپس میان این دو جواب، مقایسه انجام می‌گیرد. در نهایت هر کدام که بهتر باشد، به‌عنوان یکی از والدها انتخاب می‌شود. معیارهای انتخاب در الگوریتم NSGA-II در درجه اول، رتبه جواب و در درجه دوم فاصله تراکمی مربوط به جواب است. هر قدر رتبه جواب کمتر و دارای فاصله تراکمی بیشتری باشد، مطلوب‌تر است. برای انجام عمل تقاطع، باید دو والد در هر مرحله انتخاب شوند. همچنین در این الگوریتم نرخ تقاطع ۰.۷ در نظر گرفته شده است. برای این عمل، از روش تقاطع تک‌نقطه‌ای و ژن آخر، نقطه مورد نظر انتخاب شده، دو کروموزوم از محل مورد نظر با یکدیگر ادغام می‌شوند. شکل (۳) بیانگر این امر است.

حال برای انجام عمل جهش^۱، از بین فرزندان تولیدشده (از طریق عملگر تقاطع)، به تعداد n_m از جمعیت با استفاده از روش تورنومنت دودویی، یک کروموزوم برای عمل جهش انتخاب می‌شود. عمل جهش برای فرار از به دام افتادن الگوریتم در بهینه محلی بسیار مفید است. در این الگوریتم نرخ جهش ۰.۵ در نظر گرفته شده است. عمل جهش در این مسئله به این ترتیب انجام می‌شود که ابتدا یک پرواز به صورت تصادفی انتخاب می‌شود (که نباید از نوع پروازهای ثابت یا ممنوع باشد)، سپس گیت تخصیص داده شده به آن به صورت تصادفی با گیت دیگری تعویض می‌شود. شکل (۴) بیانگر این امر است.



شکل ۳: نمونه‌ای از عملکرد اپراتور تقاطع تک‌نقطه‌ای دو کروموزوم

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، از شروع سیکل دوم به بعد،

^۱ Mutation

۴-۳-۲- تعیین پارامترهای الگوریتم

الگوریتم‌های فراابتکاری معمولاً روی پارامترهای خود حساس هستند و جواب‌های ارائه شده به مقدار بسیار زیادی به پارامترها بستگی دارند. در این تحقیق، برای تنظیم این پارامترها از روش طراحی آزمایش‌های سه‌عاملی (تعداد نسل‌ها، عملگر جهشی و عملگر تقاطع) هر دام در سه سطح استفاده شده است. برای این منظور مسئله، ۲۷ بار اجرا شده است و بهترین مقادیر پارامترهای الگوریتم بر اساس مقادیر تابع هدف و بیشترین تعداد جواب پارتو^۳، تنوع^۴ هرچه بیشتر جواب‌ها و فاصله^۴ هرچه کمتر جواب‌ها به دست آمده است. جدول ۱ بیانگر این امر است.

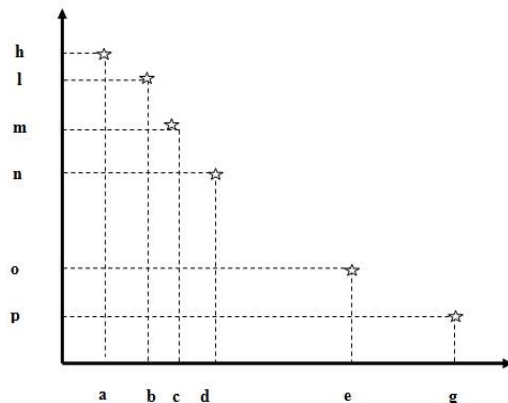
جدول ۱: پارامترهای الگوریتم NSGA-II

شماره	پارامترها	مقادیر
۱	تعداد نسل‌ها	۵۰
۲	تعداد تکرار	۷۰
۳	عملگر جهشی	۰.۵
۴	عملگر تقاطعی	۰.۷

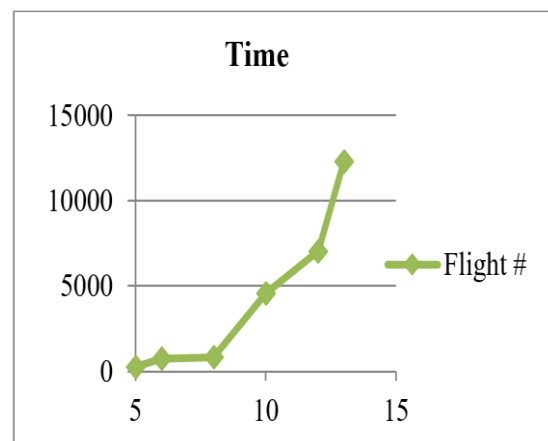
۵- نتایج محاسباتی

در این بخش نتایج محاسباتی ناشی از حل مدل در ابعاد کوچک و ابعاد بزرگ نشان داده خواهد شد. برای بررسی نتایج عددی، مدل طراحی شده با استفاده از داده‌های واقعی فرودگاه بین‌المللی مهرآباد برای پروازهای خروجی ترمینال ۲ حل شده است. برای نشان دادن کارایی الگوریتم NSGA-II شش مسئله در ابعاد کوچک تولید شده، نتایج حاصل با نتایج به دست آمده از روش دقیق محدودیت اپسیلون مقایسه شد. در روش محدودیت اپسیلون تعداد ۱۱ نقطه شکست برای هر تابع هدف در نظر گرفته شد و در مجموع حداکثر ۵۵ نقطه پارتویی برای هر مسئله تولید گردید. همچنین مدل عدد صحیح مختلط در نرم‌افزار LINGO 11.0 و الگوریتم در NSGA-II در نرم‌افزار MATLAB 13.0 پیاده‌سازی شد. به علاوه، این نرم‌افزارها در کامپیوتر شخصی با مشخصات Pentium® 4 CPU 2.53 GHz, RAM 4GB اجرا شده است. به دلیل NP-Hard بودن مسئله، روش حل دقیق محدودیت اپسیلون

کرده، به آن‌ها رتبه ۱ اختصاص می‌دهیم ($Rank = 1$) سپس برای بقیه اعضا، با نادیده گرفتن اثر اعضای با رتبه ۱ بر جمعیت، مجدداً مرتب‌سازی نامغلوب را انجام داده، اعضای را که در این مرحله هرگز مغلوب نشدند، با رتبه ۲ مشخص می‌کنیم و این روند را تا جایی ادامه می‌دهیم که رتبه همه اعضای جمعیت مشخص شود.



شکل ۶: نقاط فرضی مربوط به یک مجموعه با رتبه برابر



شکل ۷: رشد نمایی زمان حل با افزایش ابعاد مسئله

همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، باید به تعداد P_{t+1} از اعضای $P_t \cup Q_t$ بر اساس رتبه‌شان انتخاب و بقیه حذف شوند تا تعداد جمعیت اصلی ثابت بماند. بدین‌وسیله مطابق شکل، اعضای با رتبه ۱ و ۲ همگی انتخاب می‌شوند اما برای اعضای با رتبه ۳ باید تعدادی حذف و بقیه انتخاب شوند. همان‌طور که مشخص است، همگی آن‌ها رتبه برابر دارند و باید معیار دیگری برای انتخاب اعمال شود که همان معیار حفظ تنوع پاسخ‌هاست. عملگر این مرحله به نام فاصله ازدحامی^۱ شناخته می‌شود.

^۳ Diversity

^۴ Spacing

^۱ Crowding distance

^۲ Number of Pareto

مقادیر مرتبط با روش NSGA-II نشان داده شده است. در سه ستون انتهایی نیز خطای حاصل از روش NSGA-II در هریک از توابع هدف گزارش شده است. این مقادیر میزان خطا را برای بهترین پاسخ از هر تابع هدف در بین نقاط پارتویی الگوریتم NSGA-II نسبت به بهترین مقادیر توابع هدف حاصل از روش محدودیت اپسیلون نشان می‌دهد. برای محاسبه خطا از رابطه (۵) استفاده شده است.

$$PRD = \frac{Best_{NSGA-II} - Best_{\epsilon-constraint}}{Best_{\epsilon-constraint}} \quad (5)$$

قابلیت حل مدل را در ابعاد متوسط و بزرگ ندارد؛ بنابراین تنها قادر بودیم حداکثر نمونه‌ای با سیزده پرواز و سه گیت را حل کنیم که پس از ۱۲۳۰۰ ثانیه حل مدل متوقف و جواب حاصل گزارش شد.

در جدول ۲ نتایج مربوط به حل مسائل کوچک و متوسط نشان داده شده است. در این جدول دو ستون اول مربوط به مشخصات مسئله است. بهترین جواب یافته‌شده برای تابع هدف اول، دوم و سوم در بین نقاط پارتویی روش دقیق محدودیت اپسیلون و زمان حل مسئله به ترتیب در ستون سوم الی ششم ارائه و در ستون‌های هشتم الی یازدهم

جدول ۲: نتایج محاسباتی برای حل مسائل با ابعاد کوچک

خطای NSGA-II			NSGA-II			e-constraint			تعداد پرواز	رتبه		
هدف ۳	هدف ۲	هدف ۱	زمان (ثانیه)	هدف ۳	هدف ۲	هدف ۱	زمان (ثانیه)	هدف ۳			هدف ۲	هدف ۱
٪۰,۰۰	٪۰,۰۰	٪۰,۰۰	۱۲	۳۵۵۰۰	۰	۶۴	۲۶۱	۳۵۵۰۰	۰	۶۴	۵	۱
٪۰,۰۰	٪۰,۰۰	٪۰,۰۰	۱۳	۴۲۵۰۰	۵	۱۲۲	۷۵۱	۴۲۵۰۰	۵	۱۲۲	۶	۲
٪۰,۰۰	٪۰,۰۰	٪۰,۰۰	۱۵	۵۴۵۰۰	۱۰	۱۹۲	۸۲۹	۵۴۵۰۰	۱۰	۱۹۲	۸	۳
٪۷,۰۰	٪۰,۰۰	٪۰,۰۰	۳۳	۵۲۵۰۰	۱۰	۲۶۰	۴۵۶۰	۵۶۵۰۰	۱۰	۲۶۰	۱۰	۴
٪۰,۰۰	٪۰,۰۰	٪۰,۰۰	۱۲۵	۷۵۵۰۰	۱۵	۱۴۰	۷۰۳۰	۷۵۵۰۰	۱۵	۱۴۰	۱۲	۵
٪۲,۰۰	٪۰,۰۰	٪۹,۰۰	۲۲۷	۸۶۵۰۰	۱۵	۳۰۰	۱۲۳۰۰	۸۸۵۰۰	۱۵	۳۳۰	۱۳	۶
٪۱,۵	٪۰,۰۰	٪۱,۵	۷۰,۸۳	۵۷۸۳۳,۳۳	۹,۱۶	۱۷۹,۶۶	۴۲۸۸,۵	۵۸۳۳,۳۳	۹,۱۶	۱۸۴,۶۶		میانگین

جدول ۳: جواب‌های غیرمغلوب رتبه‌بندی شده پارتو

رتبه	تابع هدف اول (نفر)	تابع هدف دوم (دقیقه)	تابع هدف سوم
۱	۹۶۰	۲۵	۴۷۷۵۰۰
۲	۱۱۹۲	۲۵	۴۹۴۵۰۰
۳	۱۲۹۲	۲۵	۵۰۱۰۰۰
۴	۱۱۶۴	۳۰	۴۸۲۰۰۰
۵	۱۱۷۴	۳۰	۴۸۶۵۰۰
۶	۱۰۵۲	۳۵	۴۹۷۵۰۰
۷	۱۴۵۶	۲۵	۵۲۸۵۰۰
۸	۱۲۱۶	۳۵	۵۱۵۵۰۰
۹	۱۴۰۸	۳۰	۵۰۸۵۰۰
۱۰	۱۲۷۶	۳۵	۵۱۶۵۰۰

جدول ۴: تخصیص پروازها به گیت‌ها، ترمینال ۲

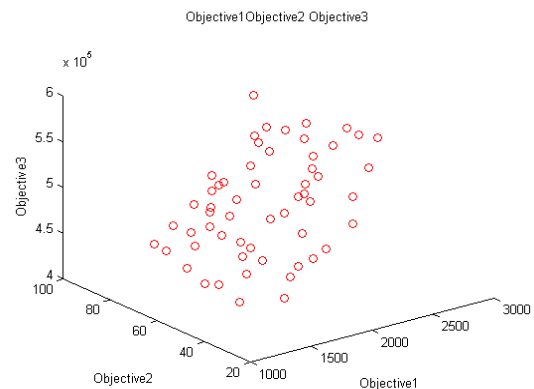
Gate 1	Gate 2	Gate3	Gate 4	Gate 5	Gate 6	Gate 7	Gate 8
F2	F10	F3	F5	F4	F1	F6	F9
F8	F12	F15	F14	F7	F16	F13	F17
F11	F20	F21	F24	F25	F27	F22	F26
F18	F33	F37	F35	F28	F40	F31	F39
F23	F41	F44	F38	F32	F48	F36	F42
F29	F46	F51	F49	F34	F54	F47	F50
F30	F57	F56	F59	F45		F58	F53
F43				F55			
F52							
F60							

بزرگ حل کرد. بنابراین برای بررسی نتایج عددی مدل با ابعاد متوسط پروازهای خروجی ترمینال ۲ فرودگاه بین‌المللی مهرآباد در طول یک شبانه‌روز با تعداد پروازها و گیت‌ها به ترتیب ۶۰ و ۸ در نظر خواهیم گرفت. پس از اجرای الگوریتم با پارامترهای تعیین‌شده، ۵۴ جواب پارتو به دست آمده است.

۵-۱- روش رتبه‌بندی جواب‌های پارتو

به‌منظور رتبه‌بندی جواب‌های پارتو حاصل از حل الگوریتم، از روش TOPSIS به معنی روش ترجیح بر اساس مشابهت از راه‌حل ایدئال استفاده شده است. این روش برای اولین بار توسط هوانگو یون در سال ۱۹۸۱ پیشنهاد شد. در این روش m گزینه به‌وسیله n شاخص ارزیابی می‌شود. منطق اصولی این مدل راه‌حل ایدئال مثبت و راه‌حل ایدئال منفی را تعریف می‌کند. راه‌حل ایدئال مثبت، راه‌حلی است که معیار سود را افزایش و معیار هزینه را کاهش می‌دهد. گزینه بهینه، گزینه‌ای است که کمترین فاصله از راه‌حل ایدئال و درعین‌حال دورترین فاصله از راه‌حل ایدئال منفی دارد. به‌عبارتی در رتبه‌بندی گزینه‌ها به روش TOPSIS گزینه‌هایی که بیشترین تشابه را با راه‌حل ایدئال داشته باشند، رتبه بالاتری کسب می‌کنند. همچنین گام‌های روش TOPSIS عبارت‌اند از: ۱. تشکیل ماتریس تصمیم؛ ۲. نرمال کردن ماتریس تصمیم؛ ۳. تعیین بردار وزن معیارها؛ ۴. تشکیل ماتریس تصمیم نرمال موزون؛ ۵. محاسبه ایدئال مثبت و منفی؛ ۶. فاصله از ایدئال‌های مثبت و منفی و محاسبه راه‌حل ایدئال. [۲۹] همچنین برای محاسبه وزن توابع هدف (معیارها) با نظر کارشناسان خبره و با استفاده

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ابعاد مسئله، زمان حل آن نیز افزایش می‌یابد. نمودار شکل (۷) تصریح می‌کند این افزایش زمان حل به‌صورت نمایی است. به‌طور متوسط زمان حل مسائل توسط روش محدودیت اسپیلون برابر با ۴۲۸۸.۵ ثانیه است که این مقدار برای روش فراابتکاری ۷۰.۸۳ ثانیه است. همچنین پیندو [۲۸] در کتاب خود مسئله تخصیص گیت را از جنس مسائل زمان‌بندی ماشین‌های موازی معرفی کرده، نشان می‌دهد پیچیدگی زمانی این مسئله NP-Hard است.



شکل ۸: کل جواب‌های بهینه پارتوی در فضای هدف

این امر نشان از حل بسیار مناسب روش فراابتکاری دارد. کیفیت جواب‌های ارائه‌شده در روش NSGA-II از نظر بهترین جواب حاصل برای هر یک از توابع هدف نیز قابل قبول و میانگین خطا برای توابع هدف به ترتیب برابر با ۱.۵٪، ۰.۰۰۰٪ و ۱.۵٪ است.

باتوجه به میانگین خطای کم روش فراابتکاری NSGA-II می‌توان این مسئله را با روش مذکور در ابعاد متوسط و

امر باعث کاهش چشمگیر زمان بیکاری گیت‌ها می‌شود. در تحقیق حاضر، دیگر اهداف برای بهینه‌سازی، کمینه‌کردن تأخیرهای به‌وجودآمده در زمان تخصیص گیت به هواپیما و بیشینه‌کردن اولویت‌بندی تخصیص گیت‌هاست. تأخیر بیش از حد مجاز (انتظار هواپیما در توقفگاه) نیز موجب تحمیل هزینه‌های تأخیر می‌شود. افزایش اولویت تخصیص گیت باعث نزدیک‌تر شدن جواب تخصیص به نظر کارشناسان فرودگاهی و افزایش رضایت آن‌ها از جدول تخصیص و نیز باعث کنترل ازدحام مسافران بر روی گیت‌ها می‌شود.

مدل توسعه‌داده‌شده با داده‌های واقعی از فرودگاه مهرآباد توسط روش دقیق محدودیت اپسیلون و الگوریتم NSGA-II در ابعاد کوچک حل و مشخص شد که میانگین درصد خطای تابع هدف نسبت به روش محدودیت اپسیلون در تمامی مسائل حل‌شده، کمتر از ۱.۵٪ بود که کارایی الگوریتم طراحی شده را نشان می‌دهد. باتوجه به NP-Hard بودن مسئله، برای حل مسئله در ابعاد متوسط از الگوریتم فراابتکاری NSGA-II استفاده و مجموعه جواب‌های پارتو با استفاده از روش TOPSIS رتبه‌بندی شد. همچنین ۱۰ جواب نخست همراه مقادیر توابع هدف گزارش شده است. نتایج حاصل نشان دهنده اعتبار مدل فوق است.

به‌منظور نزدیک‌تر شدن مدل ارائه‌شده به شرایط واقعی موجود در فرودگاه‌ها، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی پارامترهای مسئله (مانند زمان ورود و خروج، زمان سرویس و سایر پارامترها) به‌صورت غیرقطعی در نظر گرفته شود. ضمناً روش‌های حل مسئله قابل توسعه بوده، می‌توان از سایر تکنیک‌ها همچون الگوریتم‌های فراابتکاری و ابتکاری استفاده کرد. همچنین می‌توان مسئله را به تفکیک بازه‌های زمانی مختلف حل و راهکارهای مطلوبی را باتوجه به تعداد پروازها در بازه‌های مختلف ارائه کرد.

از روش تحلیل سلسله‌مراتبی^۱ $w_1 = 0.34$ ، $w_2 = 0.52$ ، $w_3 = 0.14$ محاسبه شده است. پس از رتبه‌بندی مجموعه جواب‌های پارتو، ۱۰ جواب نخست در جدول ۳ همراه با مقادیر توابع هدف مشخص شده است.

مجموعه جواب‌های پارتو در فضای هدف در شکل (۸) نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد دو تابع هدف کنترل ازدحام مسافر و اولویت تخصیص گیت با هم در تضاد هستند؛ یعنی بهینه‌گی یکی از اهداف باعث دور شدن از بهینه‌گی هدف دیگر خواهد شد. به‌علت مشابه نبودن امکان محیطی گیت‌ها (مانند دسترسی آسان بعضی از گیت‌ها منجر به ازدحام و شلوغی فضای ترمینال و بالاتر رفتن زمان بیکاری سایر گیت‌ها خواهد شد).

باتوجه به اهمیت در نظر گرفتن تابع هدف کنترل ازدحام، نتایج نشان می‌دهد اضافه‌کردن این هدف منجر به کاهش ۸ درصدی هدف بیشینه‌کردن اولویت تخصیص گیت می‌شود. همچنین برای تابع هدف دوم، باتوجه به بیشترین مقدار وزن اختصاص‌داده‌شده توسط کارشناسان خبره کمترین مقدار تابع هدف، یعنی مقدار ۲۵ دقیقه به رتبه اول جواب‌ها تخصیص داده شده، درحالی‌که بدترین مقدار آن در بین جواب‌های پارتو ۱۲۰ دقیقه است. همچنین جدول ۴ نمونه‌ای از تخصیص پروازها را به گیت برای جواب پارتو با رتبه نخست نمایش می‌دهد. F_i ، پرواز i ام تخصیص‌داده‌شده به گیت را نمایش می‌دهد.

۶- نتیجه‌گیری و تحقیقات آتی

در این تحقیق، مسئله برنامه‌ریزی گیت در قالب یک مدل چندهدفه برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارائه شد. مهم‌ترین هدف در تابع هدف این مدل، بالانس‌کردن بار کاری گیت‌ها با استفاده از تعداد مسافران بود. کمینه‌کردن این هدف باعث تعادل بار کاری بر روی گیت‌ها و استفاده یکسان از ظرفیت تمامی گیت‌ها خواهد شد. در نتیجه این

۶- مراجع

- [1] Dorndorf, U., Drexl, A., Nikulin, Y., and Pesch, E., "Flight gate scheduling state-of-the-art and recent development", The international Journal of management science, Vol.35, 2007, PP.326-334.

^۱ AHP

- [2] Babic O, Teodorovic D, Tosic V., "Aircraft stand assignment to minimize walking", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 110, 1984, PP.55–66.
- [3] Mangoubi DFX, Mathaisel RS., "Optimizing gate assignments at airport terminals", *Transportation Science*, Vol.19, 1985, PP. 173–88.
- [4] Haghani A, Chen MC., "Optimizing gate assignments at airport terminals", *Transportation Research A*, Vol. 32, 1998, PP. 437–54.
- [5] Yan S, Chang C-M., "A network model for gate assignment", *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 32(2), 1998, PP.176–89.
- [6] Xu J, Bailey G., "The airport gate assignment problem: Mathematical model and a tabu search algorithm", *Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences*, Island of Maui, Hawaii, USA, 2001.
- [7] Yan S, Huo C-M., "Optimization of multiple objective gate assignments", *Transportation Research Part A, Policy and Practice*, Vol. 35, 2001, PP. 413–32.
- [8] Ding H, Lim A, Rodrigues B, Zhu Y., "Aircraft and gate scheduling optimization at airports", *Proceedings of the 37th Hawaii International Conference on System Sciences*, Big Island, Hawaii, USA, 2004.
- [9] Ding, H., Lim, A., Rodrigues, B., Zhu, Y., "The over-constrained airport gate assignment problem", *Computer & Operation Research*, Vol. 32, 2005, PP. 1867-1880.
- [10] Lim, A., Rodrigues, B., Zhu, Y., "Airport gate scheduling with time windows", *Artificial intelligence Review*, Vol. 24, 2005, PP. 5-31.
- [11] Pinteá, C., Pop, P., Chira, C., Dumitrescu, D., "A hybrid ant-based system for gate Assignment Problem", *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2008, PP. 273-280.
- [12] Drexl, A., Nikulin, Y., "Multicriteria airport gate assignment and pareto simulated annealing", *IIE Transactions*, Vol. 40, 2008, PP.385-397.
- [13] Das, N., "The airport gate assignment problem with some practical constraints", *Applied Management Science*, Vol. 1, No. 3, 2009, PP. 315-323.
- [14] Nikulin, Y., Drexl, A., "Theoretical aspect of multicriteria flight gate scheduling: deterministic and fuzzy models", *Springer Science*, 2009.
- [15] Jaehn, F., "Solving the flight gate assignment problem using dynamic programming", *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, Vol. 80, No. 10, 2010, pp. 1027-1039.
- [16] Diepen, G., Pieters, B., van den Akker, J., Hoogeveen, J., "Finding a robust assignment of flights to gates at Amsterdam Airport Schiphol", *Journal of Scheduling*, Vol. 15, No. 6, 2012, pp. 703-715.
- [17] Bouras, A., Ghaleb, M., Suryahatmaja, U., Salem, A., "The airport gate assignment problem: A survey", *The scientific world journal*, 2014, PP. 1-27.
- [18] Marinelli, M., Dell'Orco, M., Sassanelli, D., "Transportation Research Procedia", Vol 5, 2015, PP. 211-220.
- [19] س. برازجانی، «حل مسئله تخصیص مجدد ورودی‌ها در فرودگاه‌ها»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس، ایران، ۱۳۸۰.
- [20] م. حسن‌آبادی، «حل و تجزیه تحلیل مسئله تخصیص هواپیماها به گیت‌های فرودگاه در شرایط عدم قطعیت»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، ایران، ۱۳۸۱.
- [21] ف. امیر جاوید، «مدل‌سازی تخصیص هواپیماها به گیت‌های فرودگاه در شرایط عدم قطعیت با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب، ایران، ۱۳۸۸.
- [22] س. خطیبی، «بهینه‌سازی برنامه‌ریزی گیت‌های فرودگاه»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی صنایع، سیستم‌های اقتصادی و اجتماعی، مؤسسه آموزش عالی الغدیر تبریز، ایران، ۱۳۸۸.
- [23] ک. کهنسال، «متدولوژی سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری (D.S.S.) جهت تخصیص گیت در فرودگاه‌های بین‌المللی»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران، ۱۳۹۰.
- [24] Deb, K., Pratap, A., Sameer A. and Meyarivan T., "A fast elitist multiobjective genetic algorithm", *NSGA-II, IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 6, 2008, pp. 182-197.
- [25] Mavrotas G., "Effective implementation of the e-constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems", *Applied Mathematics Computation*, 213, 2009, PP. 455–465.
- [26] N. Srinivas and K. Deb, (1995), "Multiobjective function optimization using nondominated sorting genetic algorithms", *Evol. Comput.*, Vol. 2, No. 3, 1995, pp. 221–248.
- [27] Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., Meyarivan, T., "A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization", *NSGA-II, Parallel problem solving from nature PPSN VI*, Vol. 1917,

2000, pp. 849-858.

[28] Pinedo, M.L., *Scheduling Theory, Algorithms and Systems*, Springer, 2008.

[29] آرش حبیبی، صدیقه ایزدیار و اعظم سرافرازی، تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی، انتشارات کتیبه گیل، ایران، ۱۳۹۳.