# بهینه‌سازی چند هدفه مسأله برنامه‌ریزی گیت فرودگاه با استفاده از الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب نسخه ۲

ساناز خطیبی[۱]، مرتضی خاکزار بفروئی[۲]
۱- دانشجوی دکتری، پژوهشکده توسعه تکنولوژی جهاد دانشگاهی صنعتی شریف، تهران، ایران
۲- استادیار، پژوهشکده توسعه تکنولوژی جهاد دانشگاهی صنعتی شریف، تهران، ایران

## چکیده

برنامه‌ریزی گیت یکی از فعالیت‌های کلیدی در فرودگاه‌هاست که به عنوان یک مسأله بهینه‌سازی تعریف می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد که ایجاد و بکارگیری جداول تخصیص گیت باعث کاهش تأخیر پروازها و افزایش کارآئی و بهره‌وری گیت‌ها می‌شود. هدف اصلی این مسأله پیدا کردن یک تخصیص مناسب برای پروازهای ورودی و خروجی با درنظر گرفتن مجموعه‌ایی از محدودیت‌های کاربردی است. یکی از اهدافی که کمتر مورد توجه قرار گرفته است، کنترل ازدحام مسافران در گیت‌ها می‌باشد. در این مقاله، این هدف به همراه دو هدف کمینه کردن تأخیرهای بوجود آمده در زمان تخصیص گیت به هواپیما و بیشینه کردن امتیاز اولویت تخصیص گیت به عنوان اهداف این مسأله در نظر گرفته شده است. این مسأله به شکل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط مدل‌سازی شده است. به منظور یافتن مجموعه جواب‌های پارتو، از الگوریتم ژنتیک مبتنی بر مرتب‌سازی نامغلوب نسخه ۲ استفاده شده است. همچنین این مدل با استفاده از داده‌های واقعی فرودگاه بین المللی مهرآباد در زمان کوتاه حل شده است. پارامترهای ورودی الگوریتم با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها تعیین شده است. مجموعه جواب‌های پارتو بدست آمده با استفاده از روش TOPSIS رتبه‌بندی و ۱۰ جواب نخست به همراه مقادیر توابع هدف گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد، اضافه کردن تابع هدف کنترل ازدحام به مساله منجر به کاهش ۸ درصدی هدف اولویت تخصیص گیت می‌شود، درحالیکه کنترل ازدحام می‌تواند اثرات مثبت قابل توجه‌ای بر رضایت مسافران در هنگام سوار شدن داشته باشد.

**کلید واژه:** حمل و نقل هوایی، برنامه‌ریزی گیت، چند هدفه، برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رتبه بندی نامغلوب نسخه ۲.

## ۱- مقدمه

با رشد ترافیک حمل و نقل هوایی، تکنیک‌های مدیریت و تخصیص منابع فرودگاه‌ها و خطوط هوایی در یک محیط پویا، به صورت روز افزون مورد توجه واقع شده است. همچنین رقابت شدید بین شرکت‌های هواپیمایی جهت برآورده کردن 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 روبه رو شده اند، بسیار پیچیده‌تر از مسائل زمان‌بندی سنتی است [۱].

یکی از منابع فرودگاهی که در فرآیند حمل و نقل هوایی نقش ویژه‌ای دارد گیت‌های فرودگاهی می‌باشد. بطور معمول به جایگاه‌های توقف هواپیما گیت گفته می‌شود که از طریق آن مسافران و خدمه هواپیما از ترمینال مسافربری به داخل هواپیما و بالعکس عبور و مرور می‌کنند. افزایش و تدارک این چنین منابع مستلزم هزینه‌های بسیار بالا به همراه صرف زمان، طراحی مجدد ساختمان‌های پایانه‌ها، گیت‌ها و توقفگاه‌ها است که البته این کار همیشه در کوتاه مدت امکان‌پذیر نمی‌باشد. بنابراین مسأله زمان‌بندی گیت‌های پرواز از مسائل حائز اهمیت در فرودگاهها است. هدف این تحقیق، مدلسازی مسأله زمان‌بندی گیت با سه تابع هدف همزمان، با در نظر گرفتن فاکتورهایی مانند زمان ورود و خروج پروازها، اندازه هواپیماها، تجهیزات موجود در هر یک از گیت‌ها، مسائل امنیتی و گمرکی هر یک از پروازها، به عنوان ورودی مسأله می‌باشد. در ادامه در بخش دوم، به مرور اجمالی ادبیات مسأله برنامه‌ریزی گیت پرداخته می‌شود. در بخش سوم، مسأله با جزئیات تعریف شده و مدل ریاضی آن ارائه می‌شود. جزئیات مربوط به الگوریتم پیشنهادی و تنظیم پارامترهای بکار رفته در الگوریتم و نتایج محاسباتی در بخش‌های چهارم و پنجم تشریح می‌شود. در بخش پایانی مقاله، نتیجه‌گیری تحقیق و پیشنهاداتی جهت تحقیقات آتی بیان می‌شود.

1-khatibi.sanaz@gmail.com
2-khakzar@acecr.ac.ir

## ۲- پژوهش های پیشین

از نخستین مطالعات انجام شده در زمینه مسأله برنامه‌ریزی گیت می‌توان به مدل ریاضی بابیک و همکاران [۲] در سال (۱۹۸۴) اشاره نمود. آن‌ها مسأله را در قالب یک مسأله برنامه‌ریزی عدد صحیح فرموله کردند و از الگوریتم شاخه و کران برای کمینه کردن مسافت پیاده‌روی مسافران در حال ورود و یا در حال عزیمت استفاده نمودند. در سال (۱۹۸۵) متیسل و همکاران [۳] برای کمینه کردن مسافت پیاده‌روی مسافران در پایانه‌ها علاوه بر مسافران در حال ورود و عزیمت، مسافران انتقالی نیز مد نظر قرار دارند. آن‌ها از الگوریتم ابتکاری حریصانه برای حل مدل استفاده کردند. در سال (۱۹۹۸) حقانی و همکاران [۴] برای نزدیک‌تر کردن مدل ریاضی به واقعیت، تخصیص چند دوره‌ای گیت در قالب فرمول جدیدی از برنامه‌ریزی عدد صحیح مدل کردند و آن‌ها این مدل را توسط یک الگوریتم کاملاً ابتکاری حل نمودند. در سال (۱۹۹۸) یان و چانگ [۵] مسأله برنامه‌ریزی گیت را بعنوان یک مسأله شبکه جریان چند کالایی به نحوه مطلوبی مدل‌سازی کردند. در سال (۲۰۰۱) زو و بیلی [۶] مدلی را برای مسأله برنامه‌ریزی گیت ارائه دادند که مجموع زمان‌های ارتباط مسافران برای رسیدن به پروازهای اتصالی با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری جستجوی 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) مسأله را در زمانی که تعداد هواپیماها بیش از گیت‌های در دسترس باشد (منابع محدود) مدل‌سازی نمودند. آنان از دو تابع هدف کمینه کردن تعداد پروازهای بدون گیت و کمینه کردن مسافت پیاده‌روی یا زمان‌های اتصال در مدل‌شان استفاده کردند. دینگ و همکاران [۹] در سال (۲۰۰۵) مدل پیشین خود را با الگوریتم حریصانه، شبیه‌سازی تبرید و جستجوی ممنوع حل نمودند. لیم و همکاران [۱۰] در سال (۲۰۰۵) مسأله تخصیص گیت در فرودگاه را با در نظر گرفتن پنجره زمان و استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری جستجوع ممنوع، ممتیک و ژنتیک مدلسازی و حل نمودند. دورندورف و همکاران [۱] در سال (۲۰۰۷) در مطالعه خود جدیدترین تکنیک‌های موجود در مسأله تخصیص گیت را بطور جامع و عمومی معرفی نمودند و تحولات اخیر در مورد استفاده از توابع هدف چند معیاره را مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. پینتی و همکاران [۱۱] در سال (۲۰۰۸) مدل ارائه شده توسط دینگ و همکاران در سال (۲۰۰۴) را با الگوریتم هیبرید مورچگان الگوریتم جستجوی ممنوع حل نمودند. نیکولین و درکسل [۱۲] در سال (۲۰۰۸) در مطالعه خود مدل اولیه دینگ و همکاران در سال (۲۰۰۴) با تعریف یک تابع هدف چند معیاره توسعه دادند. اهداف آنها حداقل کردن تعداد پروازهای بدون گیت، حداقل کردن مجموع مسافت پیاده‌روی مسافران و حداکثر کردن مجموع اولویت تخصیص گیت بود. همچنین آنها برای حل مدل از الگوریتم فرا ابتکاری پارتو آنیل شبیه سازی شده استفاده نمودند. داس [۱۳] در سال (۲۰۰۹) مدلسازی ساده‌ای از برنامه ریزی عدد صحیح ( صفر-یک) برای مسأله برنامه ریزی گیت ارائه داد. تفاوت کار او نسبت به مطالعات قبل تنها در نظر گرفتن تعدادی گوناگون محدودیت‌های کاربردی است. نیکولین و درکسل [۱۴] همچنین در سال (۲۰۰۹) مدل ریاضی ارائه شده توسط دورندوف در سال (۲۰۰۲) را با الگوریتم فرا ابتکاری پارتو آنیل شبیه سازی شده فازی حل نمود. وی از تابع چند هدفه در مسأله برنامه ریزی گیت استفاده نمود که اهداف آن بیشینه کردن مجموع اولویت‌های گیت پرواز، کمینه کردن تعداد فعالیت‌های یدک‌کشی و کمینه‌کردن انحراف مطلق تخصیص جدید گیت از برنامه مرجع بود. یائن [۱۵] در سال (۲۰۱۰) مسأله تخصیص گیت به پروازها را تنها با در نظر گرفتن یک تابع هدف بیشنه‌کردن امتیاز اولویت تخصیص گیت پرواز با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی پویا حل نمود. دیپن [۱۶] در سال (۲۰۱۲) یک مدل کاملاً جدید برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح ارائه نمود. بیشتر تمرکز مدل وی بر پیدا کردن یک تخصیص استوار برای پرواز به گیت‌ها می‌باشد. همچنین وی برای حل مدل روش تولید ستون را ارائه نمود.

از مطالعات و تحقیقات انجام گرفته در این زمینه در داخل کشور می‌توان به مطالعه برازجانی [۱۷] در سال (۱۳۸۰) اشاره کرد. وی یک مدل ریاضی برای مسأله تخصیص مجدد گیت‌ها مطرح و استفاده از روش فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید حل نمود. حسن آبادی [۱۸] در سال (۱۳۸۱) مدلی در 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 دهد. وی برای حل مسأله از روش فرا ابتکاری ژنتیک استفاده نمود. امیر جاوید [۱۹] در سال ۱۳۸۸ با استفاده از نظر خبره، زمان رسیدن پرواز به فرودگاه و آزاد شدن گیت‌ها به صورت زمان‌های فازی مثلثی با چند هدف بیان نمود و با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی خطی فازی حل نمود. خطیبی [۲۰] در سال (۱۳۸۹) به بررسی هر دو مسأله تخصیص گیت و تخصیص مجدد گیت پرداخته است. وی در مسأله اول کنترل ازدحام مسافران در گیت‌ها را بعنوان تابع هدف در نظر گرفت. همچنین در مسأله دوم گیت‌ها به پروازهای جدید و تأخیردار به گونه‌ای تخصیص داده می‌شوند که انحراف برنامه تخصیص جدید گیت از برنامه مرجع کمینه شود. کهنسال [۲۱] در سال (۱۳۹۰) در تحقیق خود یک سیستم پشتیبانی تصمیم[1]

1-Decision System Support

مبتنی بر مدل ریاضی برنامه ریزی عدد صحیح را ارائه نمود. وی همچنین کمینه کردن هزینه‌های تخصیص گیت به پرواز و کمینه کردن هزینه ایجاد شده به واسطه‌ی زمان انتظار هواپیما در تاکسی وی را به عنوان اهداف مسأله برنامه ریزی گیت در نظر گرفت. سپس با استفاده از روش وزن دهی و با پیاده سازی آن در نرم افزار لینگو[1]مدل را حل نمود.

یکی از اهداف کاربردی در فرودگاه‌های بزرگ داخل کشور کمینه‌کردن ازدحام مسافران در گیت‌ها می‌باشد که در کار خطیبی [۲۰] به تنهایی در نظر گرفته شده است. بهینه کردن این هدف به تنهایی، می‌تواند منجر به افزایش تأخیر در پروازها شود که این افزایش برای مسافران، شرکت‌های هواپیمایی و حتی مدیریت فرودگاه‌ها نامطلوب می‌باشد. جهت ایجاد تعادل بین این دو هدف در نظر گرفتن همزمان آنها می‌تواند راهکار مناسبی باشد. بنابراین در این تحقیق این دو هدف به همراه هدف بیشینه نمودن اولویت تخصیص گیت در نظر گرفته شده است. اولویت تخصیص گیت، با توجه به مسائل و عواملی که از نظر کارشناسان برنامه‌ریزی گیت در فرودگاه دارای اهمیت می‌باشد تعیین می‌شود. به عبارت دیگر، هر یک از این عوامل به تنهایی قابل مدل‌سازی نیستند و با دانش و شناخت کارشناس از محیط در قالب یک اولویت به هر پرواز- گیت تشخیص داده می‌شوند.

## ۳- تعریف مسأله

در این مسأله، گیت‌های فرودگاه، تعداد پروازها، تعداد مسافران هر پرواز، نوع هواپیما و مدت زمان اشغال گیت توسط پرواز در یک بازه زمانی معلوم فرض می‌شود. فرض می‌شود گیت‌های اشغال شده پس از ترک پرواز، بلافاصله قابل استفاده می‌باشد. گیت‌ها بصورت ناهمگن است یعنی بعضی از گیت‌ها قادر به سرویسی‌دهی به بعضی از پروازها نمی‌باشند. با در نظر گرفتن پنجره زمانی [TAi,TBi]، یک بازه زمانی $[TA_i, TB_i]$ن زمان شروع سرویس $TAi$ و دیرترین زمان شروع سرویس $TBi$ در نظر گرفته می‌شود، و پروازها فقط در این بازه زمانی مجاز به گرفتن سرویس می‌باشند. بنابراین مدل باید بهترین زمان شروع سرویس را در این بازه تعیین نماید. برای بررسی جدول زمانبندی پرواز در طول بازه‌های زمانی مختلف از شبانه‌روز، پروازها به ۶ بازه زمانی ۴ ساعته طبقه‌بندی می‌شوند. ترتیب این بازه‌های زمانی به صورت t۱=T,t۲,...,t۶: $T=t_1,t_2,\ldots,t_6$:) (۰,۴), (۴,۸), (۸,۱۲), (۱۲,۱۶),(۱۶,۲۰),

### ۳-۱- مدل ریاضی مسأله

علائم و پارامترهای مدل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$i,j \in F$: 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

$CC_{i,k}$: 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 در غیر اینصورت صفر می‌باشد.

$Vl_i$: اولویت پرواز $i$ ام $Ul_{i,k}$: اولویت تخصیص پرواز $i$ ام به دیت$k$ام

$U_{i,t}$: گر زمان ورود پرواز$i$م در بازه زمانی $t$ م باشد برابر با یک در غیر اینصورت صفر می‌باشد.

$TA_i$: د پایین پنجره زمانی برای پرواز $i$ ام $TB_i$:حد بالای پنجره زمانی برای پرواز ام

$M$: عدد بسیار بزرگ

متغیرهای متعددی در مدل ریاضی مورد استفاده قرار گرفته 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 در غیراین‌صورت صفر می‌باشد.

$X_{i,j,k}$: اگر پرواز $i$ ام و $j$ ام به گیت $k$ ام تخصیص یابد برابر با یک در غیر این‌صورت صفر می‌باشد.

$S_i$: زمان شروع پرواز $i$ ام، $Delay_i$: میزان تأخیر پرواز $i$ ام

$Z1_{i,j}$: اگر زمان شروع پرواز $j$ ام بزرگتر از پرواز $i$ ام باشد، یک در غیر این‌صورت صفر می‌باشد.

1-Lingo

$Z2_{i,j}$: گر زمان شروع پرواز $i$ ام بزرگتر از پرواز $j$ ام باشد، یک در غیر این‌صورت صفر می‌باشد.

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

مدل ریاضی پیشنهادی تخصیص گیت به پروازها در فرودگاه با توجه به محدودیت‌های تعریف شده بصورت مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط زیر می‌باشد.

۱- $$F1 = Min\left(\sum_{t=1}^{T}\left(\left[\underset{k}{Max}(W_{t,k}) - \underset{k}{Min}(W_{t,k})\right]\right)\right)$$

۲- $$F2 = Min\sum_{i=1}^{N} Delay_i$$

۳- $$F3 = Max\sum_{i=1}^{N}\sum_{k=1}^{M} Vl_i Ul_{i,k} Y_{i,k}$$

۴- $$\sum_{k=1}^{M} Y_{i,k} = 1 \quad \forall i$$

۵- $$S_i \geq A_i \qquad \forall i$$

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

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

۸- $$\mathrm{X}_{i,j,k} + \mathrm{X}_{j,i,k} \leq 1 \quad \forall \mathrm{i,j,k}$$

۹- $$\sum_{k=1}^{M} X_{i,j,k} \leq 1 \quad \forall \mathrm{i,j,k}$$

۱۰- $$S_i - A_i \leq \mathrm{Delay}_i \quad \forall i$$

۱۱- $$\mathrm{TA}_i \leq \mathrm{S}_i \leq TB_i \quad \forall i$$

۱۲- $$\mathrm{Y}_{i,k} = 1 \;\; if \;\; \mathrm{CC}_{i,k} = 1 \quad \forall \mathrm{i,k}$$

۱۳- $$\mathrm{Y}_{i,k} = 0 \;\; if \;\; \mathrm{CC}_{i,k} = 0 \quad \forall \mathrm{i,k}$$

۱۴- $$\mathrm{S}_j - \mathrm{S}_i \leq \mathrm{M}(\mathrm{Z1}_{i,j}) \quad \forall i,j$$

۱۵- $$\mathrm{S}_j - \mathrm{S}_i \geq \mathrm{M}(\mathrm{Z1}_{i,j} - 1) \quad \forall i,j$$

۱۶- $$\mathrm{C}_i - \mathrm{S}_j \leq \mathrm{M}(\mathrm{Z2}_{i,j}) \quad \forall i,j$$

۱۷- $$\mathrm{C}_i - \mathrm{S}_j \geq \mathrm{M}(\mathrm{Z2}_{i,j} - 1) \quad \forall i,j$$

۱۸- $$\mathrm{g}_{k,l}(\mathrm{q}_{i,e}\mathrm{Y}_{i,k} + \mathrm{q}_{i,e}\mathrm{Y}_{\mathrm{j,l}}) + \mathrm{M}(\mathrm{Z1}_{i,j} + \mathrm{Z2}_{i,j} - 2) \leq 1 \quad \forall \mathrm{i,j,k,l,e}$$

$$g_{k,l}(\text{wing}_i Y_{i,k} + wing_j\ Y_{j,l}) + M(Z1_{i,j} + Z2_{i,j} - 2) \le 1 \quad \forall i,j,k,l \qquad -19$$

$$W_{t,k} = \sum_{i=1}^{M} U_{i,t} Pas_i Y_{i,k} \quad \forall t,k \qquad -20$$

$$Y_{i,k} \in \{0,1\} \quad \forall i,k \qquad -21$$

$$X_{i,j,k} \in \{0,1\} \quad \forall i,j,k \qquad -22$$

$$Z1_{i,j} \in \{0,1\} \quad \forall i,j \qquad -23$$

$$Z2_{i,j} \in \{0,1\} \quad \forall i,j \qquad -24$$

$$Delay_i \ge 0 \quad \forall i \qquad -25$$

$$S_i \ge 0 \quad \forall i \qquad -26$$

$$W_{t,k} \ge 0 \quad \forall t,k \qquad -27$$

رابطه (۱) تا (۳)، اهداف مدل یعنی کمینه کردن ازدحام مسافران در گیت‌ها، کمینه کردن تأخیرهای بوجود آمدن در زمان تخصیص گیت به هواپیما و بیشینه کردن اولویت‌بندی تخصیص گیت‌ها است. رابطه (۴) بیان می‌کند که هر پرواز دقیقاً به یک گیت تخصیص یابد. رابطه (۵) تضمین می کند که زمان شروع سرویس پرواز ام در گیت بزرگتر یا مساوی زمان ورود پرواز ام باشد. رابطه (۶) و (۷) بیان می‌کند که هر گیت در هر زمان تنها توانایی سرویس‌دهی به یک هواپیما را دارد. رابطه (۸) تضمین می‌کند که اگر پرواز $j$ ام بعد از پرواز $i$ ام باشد آنگاه پرواز $i$ ام بعد از پرواز $j$ ام قرار نگیرد. رابطه (۹) بیان می‌کند اگر پرواز $j$ ام بعد از پرواز $i$ ام در گیت $k$ ام بیاید آنگاه پرواز $j$ ام نمی‌تواند بلافاصله بعد از پروازهای دیگر در گیت‌های دیگر بیاید. رابطه (۱۰) نشان می‌دهد میزان تأخیر پرواز بزرگتر یا مساوی زمان تخصیص پرواز $i$ ام به گیت منهای زمان ورود پرواز $i$ ام می‌باشد. رابطه (۱۱) محدودیت پنجره زمانی می‌باشد. رابطه (۱۲) و (۱۳) محدودیت پروازهای ثابت و ممنوع می‌باشد. رابطه (۱۴) تا (۱۷) بیان می‌کنند، زمان شروع سرویس کدام‌یک از پروازها باهم تداخل دارند. رابطه (۱۸) بیان می‌کند دو پروازی که به یک تجهیز مشترک نیازمند می‌باشند در یک زمان نمی‌توانند به گیت‌های مجاور همدیگر تخصیص یابند. رابطه (۱۹) بیان می‌کند دو پرواز پهن پیکر در یک زمان نمی‌توانند به گیت‌های مجاور همدیگر تخصیص یابند. رابطه (۲۰) تعداد کل مسافران در بازه زمانی $t$ ام در گیت $k$ ام را محاسبه می‌کند. رابطه (۲۱) تا (۲۷) متغیرهای غیر منفی و صفر و یک که در مدل مورد استفاده قرار گرفته‌اند را مشخص می‌کند.

## ۴- رویکرد حل مسأله

پیچیدگی زمانی حل مسأله برنامه‌ریزی گیت فرودگاه از نوع مسائل NP-hard می‌باشد[۱]. رویکرد پیشنهادی برای حل مدل ارائه شده روشی بر مبنای الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب نسخه ۲ (NSGA-II)[1] است. با استفاده از این الگوریتم جواب‌های بهینه پارتو برای مدل چند هدفه بدست آورده می‌شود.

### ۴-۱- الگوریتم NSGA-II

الگوریتم NSGA-II یک روش متداول برای حل مسائل با چند تابع هدف بر مبنای الگوریتم ژنتیک است[۲۲]. این الگوریتم یک روش کارآمد به منظور حل مسایل با چند تابع هدف است. گام‌های این الگوریتم عبارتند از: ۱) تولید جمعیت اولیه بر مبنای مقیاس و قیود مسأله، ۲) ارزیابی جمعیت تولید شده با توجه به توابع هدف، ۳) اعمال روش مرتب‌سازی نامغلوب، ۴) محاسبه پارامتر کنترلی به نام فاصله جمعیت[2]، ۵) انتخاب جمعیت والدین برای تولید مثل و ۶) انجام جهش و تقاطع می باشد[۲۳].

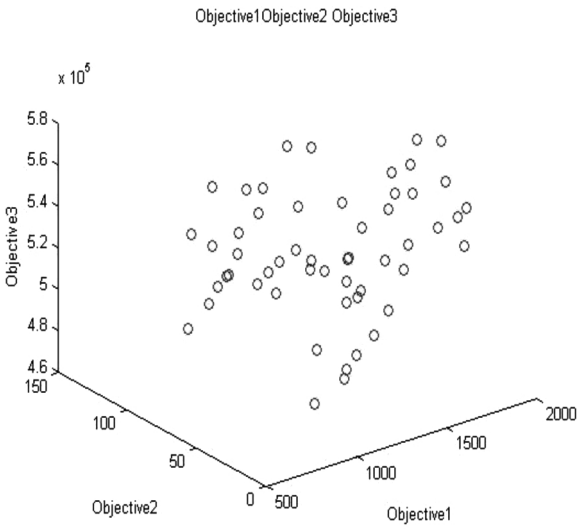
1-Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
2-Crowding Distance

### ۴-۱-۱- تنظیم پارامترهای الگوریتم NSGA-II

برای تنظیم پارامترهای مسأله از روش طراحی آزمایش‌های سه عاملی (تعداد نسل‌ها، عملگر جهشی و عملگر تقاطع هر کدام در سه سطح) با ۲۷ بار اجرا استفاده شده است. بهترین مقادیر پارامترهای الگوریتم بر اساس بیشترین تعداد جواب پارتو[1]، تنوع[2] هر چه بیشتر جواب‌ها و فاصله[3] هر چه کمتر جواب‌ها بدست آمده است. مقدار بهینه تعداد نسلها ۵۰، تعداد تکرار الگوریتم ۷۰، ضریب عملگر تقاطع ۰,۷ و ضریب عملگر جهش ۰,۵ بدست آمده است.

## ۵- نتایج محاسباتی

برای بررسی نتایج عددی مدل طراحی شده، از مسأله برنامه‌ریزی گیت برای پروازهای خروجی ترمینال ۲ فرودگاه بین المللی مهرآباد استفاده شده است. تعداد پروازها و گیت‌ها در طول یک شبانه روز به ترتیب ۶۰ و ۸ گزارش شده است. پس از اجرای الگوریتم با پارامترهای تعیین شده، ۵۴ جواب پارتو بدست آمده است. به منظور رتبه‌بندی جواب‌ها، مقادیر وزن‌های توابع هدف با نظر کارشناسان خبره و با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی[4] $w_1$=۰/۳۴ ,$w_2$=۰/۵۲ ,$w_3$=۰/۱۴ محاسبه شده است. با استفاده از روش TOPSIS جواب‌های پارتو رتبه‌بندی و ۱۰ جواب نخست در جدول ۲ به همراه مقادیر توابع هدف مشخص شده است. مجموعه جواب‌های پارتو در فضای هدف در شکل ۱نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد دو تابع هدف کنترل ازدحام مسافر و اولویت تخصیص گیت باهم در تضاد می‌باشند. یعنی بهینگی یکی از اهداف باعث دور شدن از بهینگی هدف دیگر خواهد شد. به علت مشابه نبودن امکان محیطی گیت‌ها (مانند دسترسی آسان بعضی از گیت‌ها به تجهیزات ) و مطلوبیت بعضی از آنها، تمایل کارشناسان به تخصیص پروازها به برخی از گیت‌ها منجر به ازدحام و شلوغی فضای ترمینال و بالاتر رفتن زمان بیکاری سایر گیت‌ها خواهد شد. با توجه به اهمیت در نظر گرفتنتابع هدف کنترل ازدحام، نتایج نشان می‌دهد اضافه کردن این هدف منجر به کاهش ۸٪ درصدی هدف بیشینه کردن اولویت تخصیص گیت می‌شود. همچنین برای تابع هدف دوم، با توجه به بیشترین مقدار وزن اختصاص داده شده توسط کارشناسان خبره کمترین مقدار تابع هدف یعنی مقدار ۲۵ دقیقه به رتبه اول جواب‌ها تخصیص داده شده است، این در حالی است که بدترین مقدار آن در بین جواب‌های پارتو ۱۲۰ دقیقه می‌باشد.




شکل ۱: کل جواب‌های بهینه پارتوی در فضای هدف

| 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 ۱ : جواب‌های غیر مغلوب رتبه‌بندی شده پارتو

1-Number of Pareto
2-Diversity
3-Spacing
4-AHP

## ۶- نتیجه‌گیری و تحقیقات آتی

۱- در این تحقیق، مسأله برنامه‌ریزی گیت در قالب یک مدل چند هدفه برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارائه شد. مهمترین هدف این مدل،کمینه کردن ازدحام مسافران در گیت‌ها بود. این هدف به دنبال کاهش ازدحام مسافران در فضای ترمینال و گیت‌ها و همچنین استفاده یکسان از ظرفیت تمامی گیت‌ها می‌باشد.

۲- کمینه کردن تأخیرهای بوجود آمده در زمان تخصیص گیت به هواپیما و بیشینه کردن اولویت‌بندی تخصیص گیت‌ها از اهداف دیگر تحقیق می‌باشند. تأخیر بیش از حد مجاز (انتظار هواپیما در توقفگاه) نیز موجب تحمیل هزینه‌های تأخیر می‌گردد و افزایش اولویت تخصیص گیت باعث نزدیکتر شدن جواب تخصیص به نظر کارشناسان فرودگاهی و افزایش رضایت آن‌ها از جدول تخصیص خواهد شد.

۳- مدل توسعه داده شده با داده‌های واقعی از فرودگاه مهرآباد توسط الگوریتم فراابتکاری NSGA-II حل و مجموعه جواب‌های پارتو حاصل از آن با استفاده از روش TOPSIS رتبه بندی شده است. همچنین ۱۰ جواب نخست به همراه مقادیر توابع هدف گزارش شده است. نتایج حاصله نشان دهنده‌ی اعتبار مدل فوق می‌باشند.

۴- به منظور نزدیک‌تر شدن مدل ارائه شده به شرایط واقعی موجود در فرودگاه‌ها، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی پارامترهای مسأله (مانند زمان ورود و خروج، زمان سرویس و سایر پارامترها) بصورت غیرقطعی در نظر گرفته شوند. ضمناً روش‌های حل مسأله قابل توسعه بوده و می‌توان از سایر تکنیک‌ها هم چون الگوریتم‌های فراابتکاری و ابتکاری استفاده کرد. همچنین می‌توان مساله را به تفکیک بازه‌های زمانی مختلف حل نمود و راهکارهای مطلوبی را با توجه به تعداد پروازها در بازه‌های مختلف ارائه نمود.

## ۶- منابع


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

2- Babic O, Teodorovic D, Tosic V., (1984), Aircraft stand assignment to minimize walking. Journal of Transportation Engineering, Vol. 110, PP.55–66.

3- Mangoubi DFX, Mathaisel RS., (1985), Optimizing gate assignments at airport terminals, Transportation Science, Vol.19, PP. 173–88.

4- Haghani A, Chen MC., (1998), Optimizing gate assignments at airport terminals, Transportation Research A, Vol. 32, PP. 437–54.

5- Yan S, Chang C-M.,(1998), A network model for gate assignment, Journal of Advanced Transportation, Vol. 32(2), PP.176–89.

6- Xu J, Bailey G., (2001), The airport gate assignment problem: Mathematical model and a tabu search algorithm. In: Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences, Island of Maui, Hawaii, USA.

7- Yan S, Huo C-M., (2001), Optimization of multiple objective gate assignments, Transportation Research Part A, Policy and Practice, Vol. 35, PP. 413–32.

8- Ding H, Lim A, Rodrigues B, Zhu Y., (2004), Aircraft and gate scheduling optimization at airports, In: Proceedings of the 37th Hawaii International Conference on System Sciences, Big Island, Hawaii, USA.

9- Ding, H., Lim, A., Rodrigues, B., Zhu, Y., (2005) , The over-constrained airport

gate assignment problem, Computer & Operation Research, Vol. 32, PP.1867-1880.

10- Lim, A., Rodrigues, B., Zhu, Y., (2005), Airport gate scheduling with time windows, Artificial intelligence Review, Vol.24, PP.5-31.

11- Pintea, C., Pop, P., Chira, C., Dumitrescu, D., (2008) , A hybrid ant-based system

for gate Assignment Problem, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, PP.273-280.

12- Drexl, A., Nikulin, Y., (2008), Multicriteria airport gate assignment and pareto simulated annealing, IIE Transactions, Vol.40, PP.385-397.

13- Das, N., (2009), The airport gate assignment problem with some practical constraints, Applied Management Science, Vol.1, No.3,PP.315-323.

14- Nikulin, Y., Drexl, A., (2009), Theoretical aspect of multicriteria flight gate

scheduling: deterministic and fuzzy models, Springer Science.

15- Jaehn, F., (2010), “Solving the flight gate assignment problem using dynamic programming”, Zeitschrift für Betriebswirtschaft, Vol. 80, No. 10, pp. 1027-1039.

16- Diepen, G., Pieters, B., van den Akker, J., Hoogeveen, J.,(2012), “Finding a robust assignment of flights to gates at Amsterdam Airport Schiphol”, Journal of Scheduling, Vol. 15, No. 6, pp. 703-715.

۱۷- برازجانی، س.، (۱۳۸۰)، حل مسأله تخصیص مجدد ورودی‌ها در فرودگاه‌ها، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس، ایران.

۱۸- حسن آبادی، م.، (۱۳۸۱)، حل و تجزیه تحلیل مسأله تخصیص هواپیماها به گیت‌های فرودگاه در شرایط عدم قطعیت، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، ایران.

۱۹- امیر جاوید، ف.، (۱۳۸۸)، مدل سازی تخصیص هواپیماها به گیت‌های فرودگاه در شرایط عدم قطعیت با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب.

۲۰- خطیبی، س.، (۱۳۸۸)، بهینه سازی برنامه ریزی گیت‌های فرودگاه پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی صنایع- سیستم‌های اقتصادی و اجتماعی، موسسه آموزش عالی الغدیر تبریز.

۲۱- کهنسال، ک.، (۱۳۹۰)، متدولوژی سیستم پشتیبان تصمیم گیری (D.S.S.) جهت تخصیص گیت در فرودگاه‌های بین المللی، پایان نامه کارشناسی ارشد رشته برنامه ریزی حمل و نقل، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران.

22- Srinivas, N. and Deb, K. (1994), Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms, Evolutionary Computation, Vol. 2, pp.221-248.

23- Deb, K., Pratap, A., Sameer A. and Meyarivan T. (2008), A fast elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 6, pp. 182-197.