

تعیین توالی فرود هواپیما با استفاده از الگوریتم فراابتکاری نزول همسایگی متغیر

امیر صالحی پور (استادیار)

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی - واحد گره‌سار

محمد مدرس* (استاد)

دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف

«تعیین زمان بندی فرود هواپیماها روی باند فرودگاه» مسئله‌ی پرکاربرد و در عین حال به لحاظ پیچیدگی محاسباتی دشوار است. این مسئله عبارت است از تخصیص هواپیماها برای فرود به باند فرودگاه، به طوری که مجموع خسارات ناشی از دیرکرد و زودکرد در فرود همه‌ی هواپیماها کمینه شود. پیچیدگی محاسباتی این مسئله باعث توجه خاص به الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری به عنوان رویکردی برای حل مسئله شده است. لذا در این نوشتار برای حل بهینه‌ی مسائل با ابعاد بیشتر از 10^6 هواپیما، الگوریتم فراابتکاری نزول همسایگی متغیر طراحی می‌شود. نتایج محاسباتی نشان از توانایی الگوریتم در یافتن جواب‌های با کیفیت بالا در یک زمان محاسباتی کوتاه برای مسائل تا اندازه 2×10^6 هواپیما و 5 باند فرود را دارند.

واژگان کلیدی: زمان بندی فرود هواپیما، الگوریتم نزول همسایگی متغیر، الگوریتم‌های فراابتکاری.

مقدمه

امروزه حجم بالایی از جابه‌جایی‌ها با هواپیما صورت می‌گیرد که هزینه‌ی آن در مقایسه با سایر سیستم‌های حمل و نقل بسیار بالاست. از جمله‌ی این هزینه‌ها می‌توان به خسارت ناشی از تأخیر و تعجیل در فرود نام برد که ارقام قابل توجهی را تشکیل می‌دهند، به طوری که صرفه‌جویی در آن منجر به کاهش قابل توجه کل هزینه‌ها می‌شود. به همین دلیل به برنامه‌ی بهینه‌ی زمان بندی فرود اهمیت ویژه‌ی داده می‌شود. از سوی دیگر، افزایش قیمت سوخت نیز باعث توجه بیشتر به این امر شده است. هدف این نوشتار، کمینه‌سازی هزینه‌ی ناشی از تأخیر و تعجیل هواپیماها به هنگام فرود (مجموع وزنی انحرافات از زمان تعیین شده‌ی فرود) است.

این موضوع مسئله‌ی دشوار (NP-Hard) است، به طوری که حل ابعاد بزرگ آن در یک زمان منطقی به لحاظ محاسباتی ممکن نیست. در ادامه به اختصار مهم‌ترین تحقیقات انجام شده در این زمینه معرفی شده است. در سال ۱۹۹۹ محققین یک الگوریتم سیمپلکس خاص برای مسئله طراحی، و با بهره‌گیری از آن و همچنین از یک الگوریتم ابتکاری و انشعاب و تحدید اقدام به حل مسئله تا ابعاد ۴۴ هواپیما و ۴ باند فرود کردند.^[۱] پس از آن، در سال ۲۰۰۰، محققین دیگری به حل بهینه‌ی این مسئله تا اندازه‌ی ۵ هواپیما پرداختند.^[۲] آن‌ها یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط را برای مسئله با در دست داشتن یک باند فرود ارائه کردند و آن را به حالتی که بیش از یک باند فرود موجود باشد تعمیم دادند. آنان در سال ۲۰۰۴ به دنبال توسعه‌ی

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۳/۱۰، اصلاحیه ۱۳۸۹/۱۲/۸، پذیرش ۱۳۸۹/۱۲/۱۵.

مطالعه‌ی قبلی خود مسئله را در حالت پویا نیز بررسی کردند.^[۳] در یک کار تحقیقی دیگر و با بهره‌گیری از الگوریتم فراابتکاری «جست‌وجوی پراکنده»^[۴] جواب‌هایی با کیفیت بالا برای مسائل تا ابعاد 5×10^6 هواپیما ارائه شد.^[۴] محققین دیگری نیز به بررسی این مسئله پرداخته‌اند، اما در سال ۲۰۰۴، هانسن با در نظر گرفتن مفروضات بسیار و با استفاده از الگوریتم ژنتیک اقدام به حل مسئله تنها تا ابعاد ۲۰ هواپیما کرده است.^[۵] در سال ۲۰۰۷، با ارائه‌ی مدلی تحلیلی بر پایه‌ی نظریه صف مسائلی با دو باند فرود حل شد.^[۶] در سال ۲۰۰۸، با در نظر گرفتن این مسئله که هزینه‌های ناشی از تأخیر و تعجیل در فرود می‌تواند از یک خط هوایی به خط هوایی دیگر متفاوت باشد، مورد بررسی قرار گرفت.^[۷] اگرچه محققین در مطالعه‌ی یادشده ادعا کرده‌اند که مدل ریاضی جدیدی برای مسئله در حالت یک باند فرود توسعه داده‌اند، درحقیقت مدل آن‌ها همان مدل پینول و بیزلی^[۴] است. آن‌ها برای حل مسئله یک الگوریتم ابتکاری طراحی و مسائل شامل 10^6 هواپیما را حل کردند. پیچیدگی محاسباتی مسئله باعث شده تا محققین از الگوریتم‌های ابتکاری و نه دقیق برای حل مسئله استفاده کنند. اگرچه کاربرد این الگوریتم‌ها متضمن بهینه‌ی جواب‌های حاصله نیست، می‌تواند منجر به جواب‌هایی با کیفیت بالا در مدت زمانی کوتاه شود. در این نوشتار یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط توسعه می‌یابد که برای مسئله‌ی با ابعاد 10^6 هواپیما و ۴ باند فرود ممکن است به رسیدن به جواب بهینه بینجامد. علاوه بر آن، یک الگوریتم فراابتکاری «نزول همسایگی متغیر»^[۲] برای حل مسئله با ابعاد بزرگ‌تر نیز طراحی می‌شود.

ساختار این نوشتار چنان است که ابتدا به تعریف مسئله می‌پردازیم و سپس یک

مدل جدید برنامه‌ریزی عدد صحیح برای آن ارائه می‌کنیم. پس از آن یک الگوریتم نزول همسایگی متغیر طراحی می‌شود و نتایج و تحلیل‌های محاسباتی آن نیز ارائه می‌شود.

تعریف مسئله

چنان که پیش‌تر نیز اشاره شد، مسئله‌ی تحت بررسی عبارت است از «تعیین توالی بهینه‌ی فرود هواپیماها و تخصیص آن‌ها به باندهای مختلف فرودگاه، به طوری که مجموع خسارات ناشی از دیرکرد و زودکرد فرود هواپیماها کمینه شود». به منظور تعیین دیرکرد و زودکرد، باید انحراف از برنامه‌ی زمان‌بندی فرود هواپیماها نسبت به زمان فرود هدف محاسبه شود. فرود هواپیما زودتر از زمان هدف منجر به تحمل جریمه‌ی زودکرد و در مقابل، فرود آن دیرتر از زمان هدف منجر به تحمل خسارت دیرکرد می‌شود. زمان هدف را می‌توان از پیش تعیین کرد، اما زمان فرود کاملاً به شرایط عملیاتی فرود بستگی دارد. لذا ممکن است یک هواپیما نتواند در زمان هدف خودش یا بسیار نزدیک به آن فرود آید. در مدل پیشنهادی ما، تابع هدف مسئله در پی کمینه‌سازی مجموع انحرافات زمان فرود از زمان هدف و هزینه‌های ناشی از آن است.

علاوه بر دو زمان هدف و زمان‌بندی شده‌ی فرود، می‌توان برای هر هواپیما یک بازه زمانی (پنجره زمانی) در نظر گرفت که در آن برای هر هواپیما زودترین و دیرترین زمان فرود مشخص می‌شود. به علاوه به منظور فرود ایمن، بین هر دو هواپیمایی که پشت سر هم فرود می‌آیند باید یک زمان جداسازی در نظر گرفته شود. معمولاً این زمان جداسازی به نوع هواپیما (بزرگ، کوچک، متوسط، باری و...) وابسته است ولی به باند فرود بستگی ندارد. به علاوه چنانچه دو هواپیمایی متوالی در برنامه‌ی زمان‌بندی فرود روی یک باند فرود نیایند، طبیعتاً زمان جداسازی آن‌ها کم‌تر از هنگامی است که آن دو هواپیما روی یک باند فرود آیند. بدون از دست دادن کلیت مسئله، در این نوشتار زمان جداسازی دو هواپیمایی متوالی در برنامه‌ی زمان‌بندی فرود -- به طوری که روی یک باند فرود نیایند -- یک واحد زمانی در نظر گرفته شده‌است.

مدل ریاضی پیشنهادی

در این بخش یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط برای مسئله توسعه داده می‌شود. نمادهای مدل، شامل متغیرها و پارامترهای مدل، به شرح زیر تعریف می‌شوند:

الف) متغیرهای تصمیم

x_i : زمان برنامه‌ریزی شده‌ی فرود هواپیمای i در فرودگاه ($i = 1, \dots, n$)؛
 y_{ij} : اگر هواپیمای i قبل از هواپیمای j فرود آید ۱ و در غیر این صورت ۰؛
 γ_{ir} : اگر هواپیمای i برای فرود به باند r تخصیص یابد ۱ و در غیر این صورت ۰ ($r = 1, \dots, m$)؛
 δ_{ij} : اگر هواپیمای i و هواپیمای j روی یک باند فرود آیند ۱ و در غیر این صورت ۰؛

a_i : میزان دیرکرد فرود هواپیمای i در فرودگاه یا ($a_i = \max(0, x_i - T_i)$)؛
 b_i : میزان زودکرد فرود هواپیمای i در فرودگاه یا ($b_i = \max(0, T_i - x_i)$)؛

ب) پارامترهای مدل

S_{ij} : فاصله‌ی زمانی برای جداسازی هواپیماهای i و j روی یک باند؛

T_i : زمان هدف فرود هواپیمای i در فرودگاه؛ c_i^+ و c_i^- : هزینه‌ی ناشی از تأخیر و تعجیل در فرود هواپیمای i ؛
 E_i : زودترین زمان فرود هواپیمای i ؛
 L_i : دیرترین زمان فرود هواپیمای i ؛

مدل ریاضی حاصل چنین است:

$$\min Z = \sum_{i=1}^n (a_i c_i^+ + b_i c_i^-) \quad (1)$$

S.t.

$$E_i \leq x_i \leq L_i \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$x_i - T_i = -a_i + b_i \quad i = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$(x_j - x_i) \geq S_{ij} \delta_{ij} + (1 - \delta_{ij}) - M y_{ji} \quad i, j = 1, \dots, n, i \neq j \quad (4)$$

$$y_{ij} + y_{ji} = 1 \quad i, j = 1, \dots, n, i \neq j \quad (5)$$

$$\delta_{ij} \geq \gamma_{ir} + \gamma_{jr} - 1 \quad i, j = 1, \dots, n, i \neq j, r = 1, \dots, m \quad (6)$$

$$\sum_{r=1}^m \gamma_{ir} = 1 \quad i = 1, \dots, n \quad (7)$$

$$y_{ij}, \gamma_{ir}, \delta_{ij} \in \{0, 1\} \quad i, j = 1, \dots, n, r = 1, \dots, m \quad (8)$$

$$x_i, a_i, b_i \geq 0 \quad i = 1, \dots, n \quad (9)$$

در این مدل ریاضی، رابطه‌ی ۱ مجموع هزینه‌ی ناشی از تأخیر و تعجیل در فرود را کمینه می‌کند. محدودیت ۲ هر هواپیما را ملزم می‌کند که در بازه زمانی تعیین‌شده (زودترین و دیرترین زمان مجاز) فرود آید. محدودیت ۳ ارتباط متغیر تصمیم x_i و پارامتر T_i را با متغیرهای تصمیم a_i و b_i برقرار می‌کند. با محدودیت ۴ اطمینان حاصل می‌شود که فاصله‌ی زمانی بین دو هواپیمای i و j حداقل برابر S_{ij} است مشروط بر آن که روی یک باند فرود آیند، و در غیر این صورت برابر با ۱ است. محدودیت ۵ امکان‌پذیر بودن فرود هر دو هواپیما را بررسی می‌کند. محدودیت ۶ ارتباط بین متغیرهای تصمیم δ_{ij} ، γ_{ir} و γ_{jr} را برقرار می‌کند. با محدودیت ۷ تخصیص هر هواپیما تنها به یک باند فرود عملی می‌شود.

چنان که در ادامه، در بررسی نتایج محاسباتی، مطرح خواهیم کرد، برای حل این مدل از Cplex استفاده شده‌است. مدل ارائه شده در بالا بسیار توانمند بوده و می‌تواند مسائل تا اندازه ۱۰۰ هواپیما و بیش از ۱ باند فرود را به راحتی حل کند. اما به دلیل ماهیت دشوار (NP-Hard) مدل و پیچیدگی مسائل دارای بیش از ۱۰۰ هواپیما، امکان به دست آوردن جواب بهینه در زمان مناسب میسر نیست. بنابراین به منظور حل مدل با ابعاد بزرگ‌تر، الگوریتم فراابتکاری «نزول همسایگی متغیر» متناسب با این مسئله طراحی می‌شود.

الگوریتم فراابتکاری نزول همسایگی متغیر

الگوریتم نزول همسایگی متغیر به دسته‌ی از الگوریتم‌های فراابتکاری موسوم به «جست‌وجوی همسایگی متغیر»^[۸] تعلق دارد که توسط ملادنویچ و هانسن در سال ۱۹۹۷ ارائه شده‌است. برای مطالعات بیشتر در خصوص این الگوریتم را می‌توان به دو مقاله‌ی هانسن و ملادنویچ که در آن‌ها عملکرد و جزئیات الگوریتم به طور

A_n	...	A_1	باند ۱
-------	-----	-------	--------

شکل ۱. ساختار همسایگی ۱.

A_n	...	A_1	باند ۱
B_n	...	B_1	باند ۲

شکل ۲. ساختار همسایگی ۲.

A_n	...	A_1	باند ۱
B_n	...	B_1	باند ۲
C_n	...	C_1	باند ۳

شکل ۳. ساختار همسایگی ۳.

A_n	...	A_1	باند ۱
B_n	...	B_1	باند ۲

A_n	B_1	A_1	باند ۱
B_n	...	-	باند ۲

شکل ۴. ساختار همسایگی ۴.

ساختار همسایگی ۲: جابه جایی دو هواپیما از دو باند مختلف. در این همسایگی ترتیب فرود دو هواپیما روی دو باند مختلف با یکدیگر جابه جا می شود (شکل ۲).
 ساختار همسایگی ۳: جابه جایی دو باند فرود. در این همسایگی دو باند فرود با یکدیگر جابه جا می شوند ولی توالی فرود هواپیماها تغییری نمی کند. به عبارت دیگر در این همسایگی تنها هواپیماهای یک باند با باند دیگر جابه جا می شود (شکل ۳).

ساختار همسایگی ۴: حذف و اضافه کردن یک هواپیما. در این همسایگی یک هواپیما از توالی فرود روی یک باند حذف شده و به توالی فرود روی باند دیگری تخصیص داده می شود (شکل ۴).

چنان که نتایج محاسباتی نشان می دهد به کارگیری این ۴ ساختار همسایگی در چهارچوب الگوریتم فرابتنکاری نزول همسایگی منجر به جواب هایی با کیفیت بسیار بالا شده است. اگرچه ساختارهای همسایگی طراحی شده تصادفی است، به دلیل طراحی هوشمندانه ی آنها و به همراه استفاده از الگوریتم نزول همسایگی متغیر، می توان به جواب هایی با کیفیت بالا دست یافت.

جواب اولیه و شرط توقف

جواب اولیه در عملکرد الگوریتم های ابتکاری و فرابتنکاری بسیار تأثیرگذار است و بنابراین افزایش کیفیت جواب اولیه باعث افزایش کیفیت جواب نهایی می شود. از طرفی جواب اولیه باید قابلیت تولید جواب های با کیفیت بسیار خوب را داشته باشد. از این رو جواب اولیه را به صورت تصادفی تولید کردیم. به منظور حصول اطمینان از کیفیت بالای جواب اولیه، تعداد ۱۰ جواب اولیه تولید و بهترین آنها به عنوان نقطه ی شروع وارد الگوریتم فرابتنکاری جهت بهبود شد.

در طراحی الگوریتم پیش رواج ضابطه ی پذیرش قطعی برای پذیرش جواب ها استفاده شده است. یعنی تنها جواب های برتر که منجر به بهبود مقدار تابع هدف

الگوریتم ۱. نزول همسایگی متغیر.

شروع

مجموعه یی از ساختارهای همسایگی N_k را تعیین کنید که $k = 1, 2, \dots, k_{max}$.
 جواب اولیه را x بنامید.

تکرار. تا وقتی که هیچ بهبودی رخ ندهد گام های زیر را تکرار کنید:

قرار دهید: $k = 1$.

تا وقتی که $k = k_{max}$ مراحل زیر را انجام دهید:

بهترین همسایه ی \hat{x} از x را بیابید، یعنی $\hat{x} \in N_k(x)$.

اگر \hat{x} از بهترین جواب موجود یعنی x بهتر است قرار دهید: $x = \hat{x}$.

در غیر این صورت: $k = k + 1$.

کامل ارائه شده، مراجعه کرد. [۱۰] ایده ی اصلی این الگوریتم تغییر ساختارمند ساختارهای همسایگی در حین جست و جوی فضای جواب است. انجام این کار سبب می شود علاوه بر جست و جوی کامل فضای جواب، نواحی مختلف فضای جواب نیز جست و جو شوند. در نتیجه احتمال یافتن جواب های با کیفیت بالا افزایش می یابد (الگوریتم ۱).

همانند بسیاری از الگوریتم های فرابتنکاری، این الگوریتم نیز کار خود را با یک جواب اولیه شروع می کند. سپس با استفاده از اولین ساختار همسایگی برای بهبود جواب اولیه، تا زمانی که این ساختار همسایگی منجر به جواب های بهتر می شود الگوریتم با استفاده از این همسایگی به جست و جوی خود ادامه می دهد. هنگامی که جست و جو با استفاده از همسایگی فعلی نتواند منجر به بهبود در جواب شود الگوریتم از همسایگی بعدی برای بهبود جواب استفاده می کند. معمولاً این الگوریتم هنگامی متوقف می شود که دیگر هیچ بهبودی در جواب رخ ندهد. البته از دیگر شرط های توقف همانند تعداد تکرار، میزان خطا و برخی موارد دیگر نیز می توان بهره جست. در ادامه ساختارهای همسایگی به کار گرفته شده در این الگوریتم ارائه شده است.

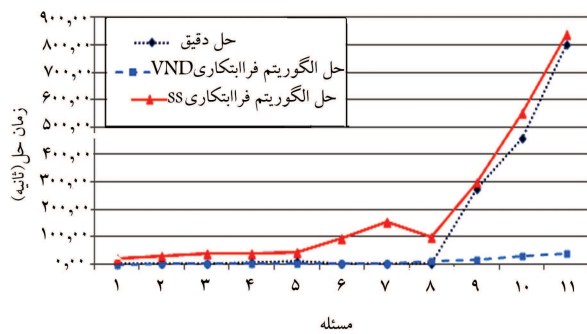
ساختارهای همسایگی

ساختارهای همسایگی عبارت اند از جواب هایی که با یک تغییر در یک جواب حاصل می شوند. ساختارهای همسایگی وابسته به مسئله اند و برای هر مسئله به طور متمایز تعریف می شوند. اگرچه الگوهای برای به کارگیری مناسب این ساختارها وجود دارد، اغلب برای مسائل زمان بندی و توالی عملیات با تغییر ترتیب توالی عناصر تحت مطالعه (در اینجا هواپیماها) می توان ساختارهای همسایگی متعددی را تعریف کرد و به کار برد. به عنوان مثال، اگر جای دو هواپیما در جواب فعلی تغییر کند، منجر به جواب دیگری خواهد شد. در الگوریتم طراحی شده از ۴ ساختار همسایگی استفاده شده است. این ساختارهای همسایگی تصادفی اند، بدین معنا که تمامی عملیات اجرا شده در آنها به صورت تصادفی انجام می شود. دلیل این امر جلوگیری از افتادن در دام جواب های بهینه ی محلی با کیفیت پایین است. ایده ی مشابهی نیز توسط دیگر محققین به کار گرفته شده است. [۱۱] ساختارهای همسایگی مذکور عبارت اند از:

ساختار همسایگی ۱: جابه جایی دو هواپیما از یک باند فرود. در این همسایگی ترتیب فرود دو هواپیما روی یک باند با یکدیگر جابه جا می شود (شکل ۱).

جدول ۱. نتایج محاسباتی مربوط به حل دقیق و حل ابتکاری (با استفاده از الگوریتم فراابتکاری نزول همسایگی متغیر).

نام مسئله	تعداد هواپیما	تعداد باند	حل دقیق		الگوریتم فراابتکاری VND		خطا (%)	الگوریتم فراابتکاری SS	
			تابع هدف	زمان (ثانیه)	تابع هدف	زمان (ثانیه)		تابع هدف	زمان (ثانیه)
۱	۱۰	۳	۷۰۰	۰,۶۶	۷۰۰	۰	۰	۷۰۰	۴
			۹۰	۰,۱۲	۹۰	۰	۰	۹۰	۲۴
			۰	۰,۱۰	۰	۰	۰	۰	۳۹
۲	۱۵	۳	۱۴۸۰	۰,۴۹	۱۴۸۰	۱,۵۹	۰	۱۴۸۰	۶
			۲۱۰	۰,۲۴	۲۱۰	۱,۶۶	۰	۲۱۰	۴۵
			۳۰	۰,۲۸	۳۰	۱,۹۸	۰	۳۰	۴۶
۳	۲۰	۳	۸۲۰	۰,۳۹	۸۲۰	۱,۷۸	۰	۸۲۰	۸
			۷۰	۰,۳۰	۷۰	۳,۱۲	۰	۷۰	۴۸
			۱۰	۰,۲۶	۱۰	۳,۲۹	۰	۱۰	۶۲
۴	۲۰	۴	۲۵۲۰	۵,۱۲	۲۵۲۰	۱,۹۸	۰	۲۵۲۰	۸
			۶۶۰	۱۲,۶۲	۶۶۰	۳,۵۶	۰	۶۶۰	۵۲
			۱۶۰	۰,۸۴	۱۶۰	۳,۷۴	۰	۱۶۰	۴۶
			۳۰	۰,۴۱	۳۰	۴,۰۶	۰	۳۰	۵۶
۵	۲۰	۴	۳۱۰۰	۲۰,۴۴	۳۱۰۰	۱,۸۵	۰	۳۱۰۰	۹
			۶۵۰	۱۵,۰۳	۶۵۰	۳,۰۴	۰	۶۵۰	۵۰
			۱۷۰	۱,۴۷	۱۷۰	۴,۱۱	۰	۱۷۰	۵۴
			۳۰	۰,۳۳	۳۰	۴,۳۵	۰	۳۰	۵۶
۶	۳۰	۳	۲۴۴۴۲	۰,۱۰	۲۴۴۴۲	۲,۱۲	۰	۲۴۴۴۲	۱۵۸
			۵۵۴	۰,۸۱	۵۵۴	۳,۹۸	۰	۵۵۴	۷۰
			۰	۰,۲۲	۰	۴,۴۱	۰	۰	۵۴
۷	۴۴	۲	۱۵۵۰	۰,۸۶	۱۵۵۰	۲,۶۸	۰	۱۵۵۰	۱۹۵
			۰	۰,۲۶	۰	۲,۸۳	۰	۰	۱۱۸
۸	۵۰	۳	۱۹۵۰	۰,۹۸	۱۹۵۰	۷,۱۰	۰	۱۹۵۰	۴۲
			۱۳۵	۱,۵۳	۱۳۵	۱۰,۷۳	۰	۱۳۵	۱۲۱
			۱۰	۱,۴۲	۱۰	۱۴,۱۱	۰	۱۰	۱۳۹
۹	۱۰۰	۴	۶۰۹۱,۸۸	۱۰۰۰	۵۶۱۱,۷۰	۱۱,۵۹	۷,۸۸	۶۰۹۱,۸۸	۱۱۹
			۴۴۴,۱	۹۴,۶۲	۴۴۴,۵۶	۱۳,۷۸	۰,۱	۴۴۴,۹۲	۳۴۲
			۷۵,۷۵	۴,۱۱	۷۸,۱۵	۱۷,۹۵	۳,۱۷	۷۸,۱۵	۳۹۰
			۰	۲,۵۶	۰	۱۹,۶۹	۰	۰	۳۳۶
۱۰	۱۵۰	۵	۱۲۹۴۸,۰۷	۱۰۰۰	۱۲۳۲۹,۳۱	۲۰,۱۲	۴,۷۸	۱۲۳۲۹,۳۱	۲۲۷
			۱۱۴۴,۰۴	۱۰۰۰	۱۱۵۹,۳۸	۲۱,۳۴	۱,۳۴	۱۲۸۸,۷۳	۶۰۸
			۲۰۶,۲۷	۲۸۴,۰۵	۲۲۰,۷۹	۲۷,۶۲	۷,۰۴	۲۲۰,۷۹	۶۶۸
			۳۵,۲۸	۷,۸۴	۳۵,۲۸	۳۰,۱۲	۰	۳۵,۲۸	۶۴۷
			۱,۰۶	۶,۸۷	۱,۰۶	۳۹,۸۵	۰	۱,۰۶	۶۰۷
۱۱	۲۰۰	۵	۱۲۶۹۹,۶۹	۱۰۰۰	۱۲۴۱۸,۳۲	۲۴,۱۷	۲,۲۲	۱۲۴۱۸,۳۲	۲۵۶
			۱۳۳۲,۵۲	۱۰۰۰	۱۴۹۱,۱۷	۲۹,۰۹	۱۱,۹۱	۱۵۴۰,۸۴	۹۵۹
			۲۵۳,۰۷	۱۰۰۰	۲۷۲,۹۲	۴۱,۲۲	۷,۸۴	۲۸۰,۸۲	۱۰۲۱
			۵۴,۵۳	۱۰۰۰	۵۴,۵۳	۴۲,۴۰	۰	۵۴,۵۳	۹۹۳
			۰	۱۱,۳۷	۰	۶۶,۲۳	۰	۰	۹۵۶



شکل 5. مقایسه‌ی سرعت سه رویکرد حل دقیق، حل الگوریتم فراابتکاری VND و حل الگوریتم فراابتکاری SS.

پراکنده می‌توان دریافت که علی‌رغم تشابه بسیار در رایانه‌های استفاده‌شده توسط این دو الگوریتم، الگوریتم توسعه‌یافته در این مقاله بسیار سریع‌تر است؛ این در حالی است که کیفیت جواب‌های آن نیز به‌طور قابل توجهی بالاتر است.

مقایسه‌ی سرعت دو رویکرد حل در شکل 5 نشان داده شده است. در این شکل متوسط زمان محاسباتی برای هر مسئله ارائه شده است. خطوط پیوسته مربوط به حل فراابتکاری و خط چین‌ها مربوط به حل دقیق است. چنان‌که در این شکل نیز مشاهده می‌شود، عملکرد زمانی الگوریتم فراابتکاری طراحی شده از ثبات خوبی برخوردار است. این در حالی است که براساس نتایج ارائه شده در جدول 1 جواب‌های این الگوریتم نیز از کیفیت بسیار بالایی برخوردارند. اگرچه عملکرد حل دقیق برای مسائل تا اندازه 100 هاپیما بسیار توانمند بوده، افزایش سریع زمان محاسباتی (شکل 5) نشان از عملکرد زمانی نامناسب حل دقیق برای مسائل بزرگ‌تر از 100 هاپیما دارد. نویسندگان معتقدند استفاده از الگوریتم فراابتکاری نزول همسایگی متغیر برای اولین بار در حل این مسئله‌ی دشوار بازگشای افق‌هایی جدید در راستای حل دیگر مسائل دشوار توالی عملیات و زمان‌بندی است.^[12]

نتیجه‌گیری

یافتن توالی فرود هاپیماها روی باندهای فرود با هدف کمینه‌سازی مجموع تأخیر و تعجیل ناشی از دیرکرد و زودکرد در فرود هاپیماها از جمله مسائل بسیار دشوار بهینه‌سازی ترکیبی حتی در ابعاد متوسط است. در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح جدید برای مسئله‌ی مذکور ارائه شده، و سپس حل مسئله با این مدل جدید مورد مطالعه قرار گرفته است. دشواری‌های محاسباتی این مسئله امکان حل دقیق آن را در ابعاد بزرگ‌تر از 100 هاپیما ناممکن ساخته است. بنابراین در این نوشتار به منظور حل ابعاد بزرگ‌تر این مسئله تا اندازه‌ی 200 هاپیما، یک الگوریتم فراابتکاری بسیار توانمند توسعه داده شده است. الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم نزول همسایگی متغیر است که به همراه چهار ساختار همسایگی طراحی شده برای آن، مشجر به جواب‌های با کیفیت بالا و قابل مقایسه با جواب‌های بهینه برای مسئله‌ی مورد بررسی شده است. نویسندگان انتظار دارند ساختارهای همسایگی توانمندتر منجر به نتایج محاسباتی بهتری شوند. لذا در این زمینه می‌توان از همسایگی‌های قطعی در مقابل همسایگی‌های احتمالی و تصادفی نیز بهره جست. تحقیق در این خصوص و بهره‌گیری از الگوریتم‌های گروه جست‌وجوی همسایگی متغیر می‌تواند افق‌های جدیدی را در حل مسائل دشوار توالی عملیات و زمان‌بندی بگشاید.

(کاهش تابع هدف) می‌شوند مورد پذیرش قرار می‌گیرند. این الگوریتم تا آنجا اجرا می‌شود که دیگر هیچ بهبودی توسط هیچ یک از ساختارهای همسایگی ممکن نباشد.

نتایج محاسباتی

به منظور بررسی توانایی محاسباتی الگوریتم طراحی شده از مسائل نمونه‌ی موجود در ادبیات تحقیق استفاده شده است.^[4] در مجموع 11 مسئله با ابعاد 10 الی 200 هاپیما و 5 تا باند فرود بررسی شده‌اند. نرم‌افزار مورد استفاده برای حل دقیق مسئله (مبتنی بر مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارائه شده در این مقاله)، Cplex و ویرایش 12.0 است. الگوریتم فراابتکاری طراحی شده نیز با استفاده از زبان برنامه‌نویسی ++C برنامه‌نویسی شده است. این الگوریتم روی یک کامپیوتر شخصی با پردازنده‌ی پنتیوم 4 شامل 2.4 گیگاهرتز و 512 مگابایت حافظه‌ی داخلی اجرا شده است.

در جدول 1 نتایج محاسباتی برای 11 مسئله‌ی حل شده ارائه شده است. در این جدول نتایج محاسباتی مربوط به مدل ریاضی (حل دقیق)، نتایج محاسباتی مربوط به الگوریتم فراابتکاری نزول همسایگی متغیر (توسعه داده شده در این مقاله)، و نتایج مربوط به الگوریتم جست‌وجوی پراکنده^[4] ثبت شده است. در این جدول ستون اول نام مسئله، ستون‌های دوم و سوم به ترتیب تعداد هاپیما و تعداد باند فرود، ستون‌های چهارم و پنجم نتایج مربوط به حل دقیق با استفاده از Cplex و ستون‌های ششم و هفتم نتایج مربوط به الگوریتم فراابتکاری نزول همسایگی متغیر را نشان می‌دهند. در تمامی مسائل ارائه شده زمان محاسباتی براساس ثانیه ارائه شده است. ستون هشتم نیز نشان‌دهنده درصد خطا بین تابع هدف حاصله توسط Cplex (حل دقیق) و الگوریتم فراابتکاری نزول همسایگی متغیر است. ستون‌های نهم و دهم مربوط به نتایج الگوریتم فراابتکاری جست‌وجوی پراکنده است.^[4] در ستون چهارم برخی از مسائل (تابع هدف حل دقیق) در کنار تابع هدف، اختلاف بین حد پایین و بهترین جواب -- که توسط Cplex حل شده -- آورده شده است. این عدد فقط برای مسائلی آورده شده که Cplex نتوانسته جواب بهینه را برای آن‌ها ارائه کند. در این دسته از مسائل، حد بالا برای زمان محاسباتی معادل 1000 ثانیه در نظر گرفته شده است و بنابراین Cplex بعد از 1000 ثانیه متوقف و بهترین جواب حاصله توسط آن به همراه اختلاف بین حد پایین و بهترین جواب آورده شده است.

با تمرکز بر جدول 1 می‌توان دریافت که مدل ریاضی ارائه شده توانسته برای اولین بار مسائل تا 100 هاپیما و بیشتر از 1 باند فرود را در زمان کوتاهی به‌طور بهینه حل کند. در دیگر مقالات که در پیشینه تحقیق به آن‌ها اشاره شده، مسائل تا اندازه‌ی 50 هاپیما به‌طور بهینه حل شده‌اند. الگوریتم فراابتکاری به‌کار گرفته شده برای تمامی مسائل تا اندازه 50 هاپیما به جواب بهینه انجامیده است و با احتساب مسائل دارای 100 هاپیما (در کل 29 حالت)، الگوریتم فراابتکاری طراحی شده در 89.66٪ از حالت‌ها موفق به ارائه‌ی جواب بهینه شده است (جواب‌های بهینه برای الگوریتم فراابتکاری به صورت پررنگ نشان داده شده‌اند). برای مسائل با 100، 150 و 200 هاپیما، اگرچه الگوریتم فراابتکاری توانسته در چند مورد جواب بهینه ارائه کند، کیفیت جواب‌های آن از حل دقیق پایین‌تر است. البته با دقت در این نتایج می‌توان دریافت که خطا (اختلاف بین تابع هدف حل دقیق و تابع هدف الگوریتم فراابتکاری) برای مسائل مذکور به‌طور میانگین پایین‌تر از 5٪ و حدود 3.31٪ است. به علاوه میانگین کل خطا حدود 1.87٪ است که نشان از عملکرد بسیار بالای الگوریتم فراابتکاری طراحی شده برای مسئله‌ی مذکور است. به علاوه، از مقایسه‌ی نتایج حاصل از الگوریتم نزول همسایگی متغیر با الگوریتم فراابتکاری جست‌وجوی

پانوشتها

1. scatter search
2. variable neighborhood descent (VND)
3. variable neighborhood search (VNS)

منابع (References)

1. Ernst, A.T.; Krishnamoorthy, M. and Storer, R.H. "Heuristic and exact algorithms for scheduling aircraft landings", *Networks*, **34**(3), pp. 229-241 (1999).
2. Beasley, J.E.; Krishnamoorthy, M.; Sharaiha, Y.M. and Abramson D. "Scheduling aircraft landings-the static case", *Transportation Science*, **34**(2), pp. 180-197 (2000).
3. Beasley, J.E.; Krishnamoorthy, M.; Sharaiha, Y.M. and Abramson, D. "Displacement problem and dynamically scheduling aircraft landings", *Journal of the Operational Research Society*, **55**(1), pp. 54-64 (2004).
4. Pinol, H. and Beasley, J.E. "Scatter search and bi-nomic algorithms for the aircraft landing problem", *European Journal of Operational Research*, **171**, pp. 439-462 (2006).
5. Hansen, J.V. "Genetic search methods in air traffic control", *Computers & Operations Research*, **31**(3), pp. 445-459 (2004).
6. Bäuerle, N.; Engelhardt-Funke, O. and Kolonko, M. "On the waiting time of arriving aircrafts and the capacity of airports with one or two runways", *European Journal of Operational Research*, **177**(2), pp. 1180-1196 (2007).
7. Soomer, M.J. and Franx, G.J. "Scheduling aircraft landings using airlines' preferences", *European Journal of Operational Research*, **190**, pp. 277-291 (2008).
8. Mladenovic, N. and Hansen, P. "Variable neighborhood search", *Computers & Operations Research*, **24**(11), pp. 1097-1100 (1997).
9. Hansen, P. and Mladenović, N. "Variable neighborhood search: Principles & applications", *European Journal of Operational Research*, **130**(3), pp. 449-467 (2001).
10. Hansen, P. and Mladenović, N., *A Tutorial on Variable Neighborhood Search*, Working Paper, Les Cahiers Du GERAD (2003).
11. Aloise, D.J.; Aloise, D.; Rocha, C.T.M.; Ribeiro Filho, J.C.; Moura, L.S.S. and Ribeiro, C.C. "Scheduling workover rigs for onshore oil production", *Discrete Applied Mathematics*, **154**(5), pp. 695-702 (2006).