

زمان‌بندی فرود و پرواز هواپیماها بر روی باندها با در نظر گرفتن محدودیت در تعداد مکان استقرار هواپیما

سعید صائمی، دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز، گروه مهندسی صنایع، تهران، ایران
رضا توکلی مقدم (مسئول مکاتبات)، دانشکده مهندسی صنایع، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران، ایران

E-mail: tavakoli@ut.ac.ir

حامد نوذری، دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز، گروه مهندسی صنایع، تهران، ایران
پانته آملکی مقدم، دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز، گروه مهندسی صنایع، تهران، ایران

پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۲۸

دریافت: ۱۳۹۴/۰۷/۱۰

چکیده

در این مقاله، به مسئله زمان‌بندی فرود و پرواز هواپیماها به صورت هم‌زمان بر روی چندین باند با در نظر گرفتن محدودیت در تعداد مکان‌های استقرار هواپیما (Parking space) با تابع هدف کمینه‌سازی دیرکرد وزنی کل پرداخته می‌شود. این قبیل مسائل در قالب زمان‌بندی ماشین‌ها همراه با زمان آمادگی (Ready time)، زمان هدف (Target time) و زمان ضرب‌العجل (Deadline)، مدل‌سازی می‌شود. به منظور اجتناب از پدیده‌ی ارتعاش ناشی از فرود یا پرواز هواپیماها (Wake-vortex effects)، بازه زمانی مشخصی را بعد از فرود و پرواز هواپیماها در نظر می‌گیرند. نظر به احتمال رخداد چنین محدودیت‌هایی در پاره‌ای از اوقات در فرودگاه‌ها، با هدف برنامه‌ریزی در رویارویی هر چه بهتر با چنین مسائلی، مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط (MIP) ارائه می‌شود. در این مقاله، از الگوریتم فراابتکاری کرم شب تاب (Firefly algorithm) برای حل مدل استفاده می‌شود. در نهایت، عملکرد این الگوریتم پیشنهادی با استفاده از مجموعه‌ای مسائل معیار، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد که رضایت‌بخش بودن عملکرد الگوریتم را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: زمان‌بندی فرود و پرواز هواپیماها، زمان‌های جداسازی وابسته به توالی، مکان استقرار هواپیما، الگوریتم کرم شب تاب

۱. مقدمه

زمان‌بندی فرود و پرواز هواپیماها در پایانه کنترل ترافیکی ارائه نمود. وی در این مقاله از مدل زمان‌بندی کار کارگاهی استفاده کرده است. نتایج محاسباتی نشان از کاهش ۴۰٪ میانگین تاخیرات و افزایش ۳۰٪ ظرفیت پایانه کنترل ترافیکی در مقایسه با رویکرد زمان‌بندی اولین ورود، اولین خروج (FCFS) در فرودگاه‌های Milan Malpensa و Fiumicino Rome Airports است.

شرالی و همکاران [Sherali et al., 2010]، مسئله پرواز و فرود هواپیماها بر روی یک باند را بررسی نموده‌اند. آن‌ها مسئله را در قالب مسئله‌ی فروشنده‌ی دورگرد نامتقارن مدل کردند. در این مقاله هدف، کمینه‌سازی زمان تکمیل بیشینه با در نظر گرفتن محدودیت زمان جداسازی مناسب و محدودیت پنجره‌ی زمانی می‌باشد. السالم و همکاران [Al-Salem et al., 2012]، مدلی برای مسئله فرود و پرواز هواپیماها به صورت یکپارچه بر روی چندین باند ارائه نموده‌اند. هدف آن‌ها کمینه‌سازی تاخیرات وزنی هواپیماها می‌باشد. آن‌ها مسئله را در قالب برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و به صورت مسئله فروشنده دورگرد نامتقارن فرمول‌بندی کردند. آنچه که کار آن‌ها را متمایز می‌سازد ارتقاء مسئله با استفاده از نامعادلات معتبر و محدودیت‌های سلسله مراتبی شکست نامتقارن می‌باشد. هدف از این نامعادلات و محدودیت‌ها، بهبود در آزادسازی مسئله‌ی خطی ارائه شده و کم کردن محاسبات می‌باشد.

هنسرلیگولاری و همکاران [Hancerliogullari et al., 2013]، با استفاده از مدل ارائه شده در السالم و همکاران [Al-Salem et al., 2012] و با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری و ابتکاری نظیر تبرید شبیه‌سازی شده و حتی با ترکیب آن‌ها توانستند در زمان‌های بسیار کوتاه به جواب‌های بهینه و یا نزدیک به بهینه مورد قبول، دست یابند. در مورد عدم دسترسی به باندها، محمودیان، امین‌نیری و میرزاده [Mahmoudian, Aminnayeri and Mirzadeh, 2013]، رویکردی ابتکاری برای زمان‌بندی فرود هواپیماها با محدودیت عدم دسترسی به

در برگزاری مسابقات جام جهانی فوتبال حجم انبوهی از تماشاگران از طرق مختلف نظیر وسایل نقلیه شخصی، هواپیما، قطار و کشتی خود را به محل برگزاری مسابقات به قصد تماشای بازی‌های تیم ملی خود و سایر تیم‌ها می‌رسانند. بنابراین در بحث حمل و نقل هوایی باید مسئولان فرودگاه‌ها در تدارک شرایط لازم برای رویارویی با حجم انبوهی از پروازها به فرودگاه‌های شهرهای محل برگزاری مسابقات باشند. در شرایطی دیگر، هر ساله در ایام حج حجم انبوه زائران و پروازها، ترافیک شدید هوایی را در فرودگاه‌های شهرهای مکه و مدینه بوجود می‌آورند. بنابراین در مواجهه با حجم انبوهی از مسافران و پروازها مسئله تعداد مکان‌های استقرار بعد از فرود اهمیت پیدا می‌کند به طوری که یک فرودگاه بزرگ با توجه به انبوه تقاضا برای فرود و پرواز هواپیماها، با کمبود فضا برای استقرار هواپیماها بعد از فرود، مواجه می‌شود. در چنین شرایطی نیازمند به زمان‌بندی مناسب برای هواپیماهایی که در محدوده راداری فرودگاه در حال فرود یا پروازند، هستیم. به این معنی که باید زمان مناسبی برای هواپیماها در بازه زمانی خود، چه برای پرواز و چه فرود در نظر گرفته شود تا محدودیت تعداد محل‌های استقرار هواپیما نقض نشود و علاوه بر آن زمان تاخیر نیز کمینه شود.

از دیر باز تاکنون مقالات گوناگونی در زمینه زمان‌بندی فرود و پرواز صورت گرفته است. برای مثال تریویزاس [Trivizas, 1998]، رویکرد برنامه‌نویسی پویا برای حل بهینه مسائل زمان‌بندی فرود و پرواز هواپیماها به صورت یکپارچه در حالت ایستا ارائه نمود. او در این مقاله با استفاده از اطلاعات واقعی استخراج شده از مشاهدات صورت‌گرفته به همراه اطلاعات مربوط به مشخصات فرودگاه‌ها، نشان داد که می‌توان ظرفیت باندها را تا ۲۰٪ افزایش داد. رویکرد بکاررفته در این مقاله با رویکرد اولین ورود، اولین خروج (FCFS) مقایسه شده است. بیانکو، دل‌اولمو و گیوردانی [Bianco, Dell'Olmo and Giordani, 2006]، مدل‌های پویا و ایستا برای

زمان بندی فرود و پرواز هواپیماها بر روی باندها با در نظر گرفتن محدودیت در تعداد مکان استقرار هواپیما

نماید، هواپیمای مورد نظر به باند اختصاص نیافته و زمان بندی صورت گرفته به عنوان زمان بندی نشدنی شناخته می شود. زمان هدف را می توان از پیش تعیین نمود ولی زمان عملیات کاملاً به شرایط فرود یا پرواز بستگی دارد، لذا ممکن است یک هواپیما نتواند در زمان هدف خودش یا بسیار نزدیک به آن فرود یا پرواز نماید. اولویت با فرود است تا پرواز و همچنین اولویت با هواپیماهای بزرگ می باشد.

هم چنین باید زمان جداسازی مورد نیاز بین هواپیمای مورد نظر با هواپیماهای دیگر در نظر گرفته شود. علت وجود زمان جداسازی، جلوگیری از خطر اثر ارتعاشات ناشی از پرواز یا فرود می باشد. هر هواپیما به هنگام انجام عملیات فرود یا پرواز، یک توربولانس یا آشفتگی تولید می کند. این آشفتگی بسته به نوع عملیات و اندازه ی هواپیما متفاوت می باشد. این زمان جداسازی مورد تایید سازمان هواپیمایی فدرال و مقامات حمل و نقل هوایی ایالات متحده آمریکا می باشد. این نکته قابل تامل می باشد که نامعادله ی مثلثی به صورت خودکار برای زمان های جداسازی رعایت نمی شود. این نامعادله عبارت است از $S_{ac} \geq S_{ab} + S_{bc}$. در این نامعادله زمان جداسازی بین هواپیمای پیش رو a و هواپیمای دنباله رو b برابر S_{ab} در نظر گرفته شده است. این نامعادله لزوماً زمانی که هر دو نوع عملیات پرواز و فرود با هم در حال انجام گیری است، رعایت نمی شود.

حتی در هر دو مقاله شرالی و همکاران [Sherali et al., 2010] به این موضوع اشاره شده که زمان جداسازی به کاررفته در جدول ۱ به صورت خودکار بین دو نوع هواپیمایی که عملیات مشابهی در بین یک هواپیمایی که عملیات نامشابه آنها را دارد، رعایت نمی شود. به عنوان مثال هواپیمایی با اندازه بزرگ به قصد فرود را در نظر بگیرید. این هواپیما، مقدم بر هواپیمایی مشابه خود که قصد پرواز دارد، فرود می آید.

یکی از باندها ارائه نمودند. یعقوبی پناه، توکلی مقدم و رادمهر [Yaghoubi-Panah, Tavakkoli-Moghaddam and Radmehr, 2013] مدلی چندهدفه برای حالت چندباندی برای مسأله زمان بندی نشست هواپیماها تحت شرایط فازی ارائه نموده اند. این مدل با الگوریتم علف های هرز چندهدفه و الگوریتم تکاملی ژنتیک چندهدفه به نام NSGA-II حل شده است. در بخش دوم این مقاله، مسأله مورد نظر تعریف می شود. در بخش سوم مدل ریاضی مسأله ارائه می شود. در بخش چهارم روش الگوریتم کرم شب تاب به همراه شبه کد الگوریتم، ارائه شده است. در بخش پنجم نتایج محاسباتی تجزیه تحلیل می شوند و در پایان، نتیجه گیری در بخش ششم ارائه می شود.

۲. تعریف مسئله

مسئله زمان بندی هواپیماها با استفاده از نمادسازی $\alpha | \beta | \gamma$ که توسط لاولر، لنترا و رینوی [Lawler, Lenstra, and Rinnooy] ارائه گردید، به صورت $P_m | r_i, t_{aj}, d_i, S_{mi}, timewindow, \# parking | \sum w_i T_i$ قابل نمایش است. این مسئله عبارت است از تعیین توالی هوایی فرود یا پرواز هواپیماها و تخصیص آنها به باندهای مختلف و همانند، با در نظر گرفتن محدودیت تعداد مکان های استقرار به طوری که مجموع هزینه های ناشی از دیرکرد هواپیماها کمینه شود. به عبارت دیگر مسئله زمان بندی هواپیماها، به زمان بندی هواپیماها (کار) بر روی باندهای (ماشین) همانند می پردازد. هر هواپیما جریمه ی وزنی خاص خود را دارد و در زمان آمادگی خود قادر به عملیات بر روی یک باند می باشد. زمان واقعی عملیات نمی تواند قبل از زمان آمادگی و بعد از زمان ضرب العجل باشد. این زمان تا جای ممکن باید نزدیک به زمان هدف هواپیما باشد. از زمان آمادگی تا زمان ضرب العجل، پنجره ی زمانی شناخته می شود. انحراف از زمان ضرب العجل غیرممکن می باشد. هنگامی که زمان عملیات یک هواپیما از زمان ضرب العجل تجاوز

جدول ۱. حداقل زمان‌های جداسازی بین دو هواپیما

فرودی → پروازی	هواپیمای غول پیکر	هواپیمای متوسط	هواپیمای کوچک
هواپیمای غول پیکر	۴۰	۴۰	۴۰
هواپیمای متوسط	۳۵	۳۵	۳۵
هواپیمای کوچک	۳۰	۳۰	۳۰
پروازی → پروازی	هواپیمای غول پیکر	هواپیمای متوسط	هواپیمای کوچک
هواپیمای غول پیکر	۹۹	۱۳۳	۱۹۶
هواپیمای متوسط	۷۴	۱۰۷	۱۳۱
هواپیمای کوچک	۷۴	۸۰	۹۸
فرودی → فرودی	هواپیمای غول پیکر	هواپیمای متوسط	هواپیمای کوچک
هواپیمای غول پیکر	۶۰	۹۰	۱۲۰
هواپیمای متوسط	۶۰	۶۰	۹۰
هواپیمای کوچک	۶۰	۶۰	۶۰
پروازی → فرودی	غول پیکر	متوسط	کوچک
غول پیکر	۵۰	۵۳	۶۵
متوسط	۵۰	۵۳	۶۵
کوچک	۵۰	۵۳	۶۵

۳-۱ پارامترها

- $I = \{1, 2, \dots, i\}$: مجموعه‌ای از i هواپیما (به قصد پرواز یا فرود).
- $i1$: مجموعه‌ای از هواپیماها که قصد فرود دارند، در حقیقت $i1 < i$.
- $i2$: مجموعه‌ای از هواپیماها که قصد پرواز دارند، در حقیقت $i2 < i$.
- $J = \{1, 2, \dots, j\}$: مجموعه‌ای از j باند.
- rj : زمانی که هواپیمادر آن آماده برای بلند شدن یا نشستن بر روی باند می‌باشد.
- ta_i : زمان هدف برای هواپیمایی که قصد بلند شدن یا نشستن بر روی باند را دارد.
- dj : زمان ضرب الاجلی برای هواپیمایی که قصد بلند شدن یا نشستن بر روی باند را دارد.

مطابق این جدول، زمان جداسازی بین آن‌ها ۴۰ ثانیه می‌باشد. حال اگر بعد از پرواز هواپیمای دوم، هواپیمای بزرگی فرود بیاید، زمان جداسازی بین آن‌ها ۵۰ ثانیه خواهد بود. حال زمان جداسازی مطابق جدول بین دو هواپیمای سنگینی که قصد فرود دارند برابر $99 > 40 + 50$ ثانیه می‌باشد. بنابراین نه تنها باید زمان جداسازی مطمئنی بین دو هواپیمایی متوالی که بر روی یک باند عملیات خود را انجام می‌دهند، در نظر گرفته شود بلکه، باید این زمان بین دو هواپیمای نامتوالی که بر روی یک باند عملیات خود را انجام می‌دهند، محاسبه گردد.

۳. مدل ریاضی پیشنهادی

در این بخش، مدل پیشنهادی برای مسأله‌ی زمان بندی فرود و پرواز هواپیماها به صورت هم زمان بر روی باندها با محدودیت تعداد آشیانه‌ها ارائه می‌شود.

زمان بندی فرود و پرواز هواپیماها بر روی باندها با در نظر گرفتن محدودیت در تعداد مکان استقرار هواپیما

- o_i : نوع عملیات هواپیمای i ام که می تواند فرود یا پرواز باشد.
- c_i : کلاس وزنی هواپیمای i که می تواند سبک، متوسط یا سنگین باشد.
- S_{mi} : فاصله زمانی بین دو هواپیمای m و i که در ابتدا هواپیمای m عملیات پرواز یا فرود را انجام می دهد و سپس هواپیمای i .
- w_i : وزن تخصیص داده شده به هواپیمای i بر مبنای نوع عملیات و کلاس وزنی آن. اولویت مقداری بالاتر به هواپیماهایی که قصد فرود دارند اختصاص می یابد و همچنین هواپیماهایی که نسبت به هواپیماهای دیگر سنگین تر می باشند.
- $capac$: ظرفیت تعداد محل های استقرار هواپیما در فرودگاه.
- x_{ij} : اگر هواپیمای i بر روی باند j عملیات پرواز یا فرود انجام دهد، ۱ و در غیر این صورت ۰.
- σ_{im} : اگر هواپیمای i قبل از هواپیمای m عملیات خود را انجام دهد، ۱ در غیر این صورت ۰.
- z_h, n : اگر هواپیمای n قبل از هواپیمای h که قصد فرود دارد، فرود آید متغیر z_h, n برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر می باشد.
- $KK_{o,y}$: اگر هواپیمای o قبل از هواپیمای y که قصد پرواز دارد، پرواز کند $KK_{o,y}$ برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر می باشد.
- $dd_{n,y}, dd_{y,n}$: اگر هواپیمای n که قصد فرود دارد قبل از هواپیمای y که قصد پرواز دارد، فرود آید این متغیرها برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر می گردند.

۳-۳ مدل ریاضی پیشنهادی

در زیر مدل ریاضی پیشنهادی برای مسئله فرود و پرواز هواپیماها به صورت هم زمان بر روی باندها با محدودیت تعداد آشیانه ها آمده است:

۲-۳ متغیرهای تصمیم گیری

- t_i : زمان آغاز عملیات پرواز یا فرود برای هواپیمای i
- T_i : تاخیر هواپیمای i بر مبنای زمان هدف آن

$$\sum_{i=1}^I w_i T_i \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, I \quad (2)$$

$$1 \leq \sum_{i=1}^I x_{ij} \quad j = 1, \dots, J \quad (3)$$

$$r_i \leq t_i \leq d_i \quad i = 1, \dots, I \quad (4)$$

$$\sigma_{im} + \sigma_{mi} = 1 \quad \forall i, m \in \{1, \dots, I\}, i \neq m \quad (5)$$

$$t_i \geq [t_m + S_{mi} + M \cdot (2 - x_{mj} - x_{ij}) - M \cdot \sigma_{im}] \quad \forall i, m \in \{1, \dots, I\}, i \neq m \quad j = 1, \dots, J \quad M \geq 0 \quad (6)$$

$$T_i \geq t_i - ta_i \quad i = 1, \dots, I \quad (7)$$

$$0 \leq T_i \leq d_i - ta_i \quad i = 1, \dots, I \quad (8)$$

$$t_n \geq t_h - M \cdot z_{h,n} \quad h, n \in i_1 \quad (9)$$

$$z_{n,h} + z_{h,n} = 1 \quad h, n \in i_1 \quad (10)$$

$$t_o \geq t_y - M \cdot KK_{o,y} \quad o, y \in i_2 \quad (11)$$

$$KK_{o,y} + KK_{y,o} = 1 \quad o, y \in i_2 \quad (12)$$

$$(2 - dd_{n,y} - dd_{y,n}) \cdot (t_n - t_y) \geq 0 \quad n \in i_1, y \in i_2 \quad (13)$$

$$t_y \geq t_n * (dd_{n,y} + dd_{y,n}) \quad n \in i_1, y \in i_2 \quad (14)$$

$$\sum_m dd_{i,m} + kk_{i,m} + z_{i,m} \leq capac \quad \forall i \in \{1, \dots, I\} \quad (15)$$

غیر این صورت برابر صفر می‌باشد. محدودیت‌های (۱۳) و (۱۴) نیز رابطه بین یک هواپیما که قصد فرود دارد n با یک هواپیما که قصد پرواز دارد y را بیان می‌کند. در این حالت اگر هواپیمای n که قصد فرود دارد قبل از هواپیمای y که قصد پرواز دارد، فرود آید متغیرهای $dd_{n,y}$ ، $dd_{y,n}$ برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر می‌گردند. نهایتاً محدودیت آخر (۱۵)، ظرفیت مکان‌های استقرار را بیان می‌کند. در حقیقت این محدودیت نشان می‌دهد در هر لحظه از فرود یا پرواز نباید محدودیت محل‌های استقرار هواپیما نقض شود.

۳-۴ تحلیل حساسیت

به منظور بررسی تاثیر تغییر تعداد محل‌های استقرار بر جواب کلی مساله، مثالی در زیر آورده شده است. در این مثال شش هواپیما، که سه هواپیمای اول به قصد فرود و سه هواپیمای دوم به قصد پرواز از فرودگاه در نظر گرفته شده است. در جدول (۲) اطلاعات مربوط به زمان آماده‌سازی، زمان ضرب‌الاجل، زمان هدف، وزن اختصاص داده شده به هواپیماها و حداقل زمان جداسازی بین هواپیماها آمده است. لازم به ذکر می‌باشد که محدودیت تعداد مکان‌های استقرار در این مثال، ۲ در نظر گرفته شده است. با تغییر مقدار ظرفیت تعداد مکان‌های استقرار می‌توان تاثیر تغییرات این پارامتر بر مقدار تابع هدف (میزان تاخیر وزنی) را مطابق شکل ۱ مشاهده نمود.

رابطه (۱) تابع هدف مسئله (حداقل‌سازی تاخیر وزنی کل) می‌باشد. محدودیت (۲) بیانگر آن است که هر هواپیما برای انجام عملیات پرواز یا فرود خود به یکی از باندها اختصاص داده می‌شود. این محدودیت (۳) حد پایین تخصیص هواپیماها به باندها می‌باشد که به هر باند حداقل یک هواپیما اختصاص داده می‌شود. محدودیت (۴) بیانگر محدودیت پنجره زمانی برای هر هواپیما می‌باشد. برای بدست آوردن ترتیبی برای عملیات هواپیماها و این که هواپیمای i قبل از هواپیمای m عملیات خود را انجام می‌دهد یا خیر از محدودیت (۵) استفاده می‌شود. محدودیت (۶) جداسازی باید تضمین کند زمانی که هواپیمای i و m روی باند یکسان عملیات خود را انجام دهند و هواپیمای m قبل از هواپیمای i عملیات خود را انجام دهد، هواپیمای i و m واحد زمانی زودتر عملیات خود را انجام می‌دهد. محدودیت (۷) بیانگر تاخیر هواپیما مبتنی بر زمان هدف می‌باشد.

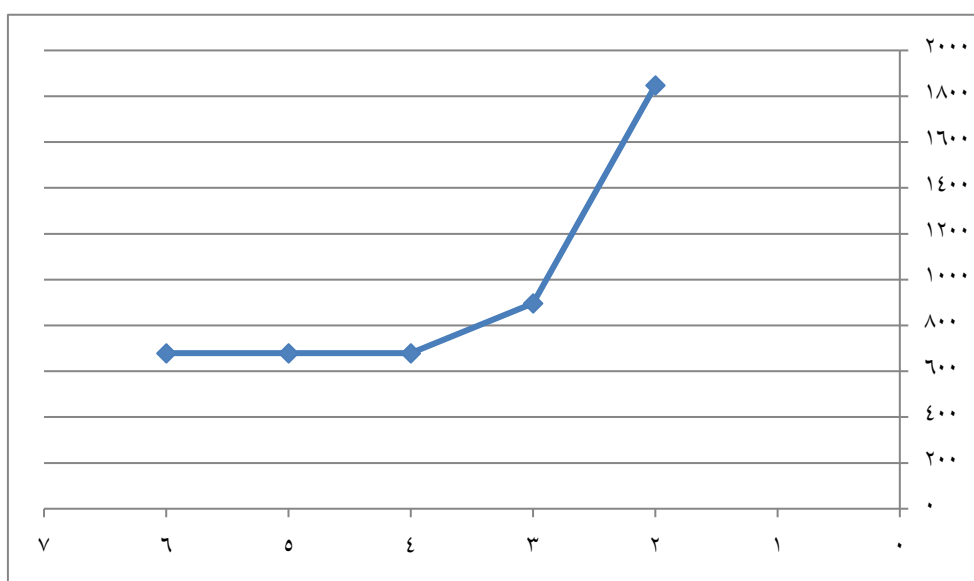
محدودیت (۸) حد بالا برای تاخیر هر هواپیما را بیان می‌کند به طوری که مانع از منفی شدن آن می‌شود. محدودیت‌های (۹) و (۱۰) رابطه بین هواپیماهایی که قصد فرود دارند را نشان می‌دهد. اگر هواپیمای n قبل از هواپیمای h که قصد فرود دارد، فرود آید متغیر $z_{h,n}$ برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر می‌باشد. محدودیت‌های (۱۱) و (۱۲) رابطه بین هواپیماهایی که قصد پرواز دارند برقرار می‌کنند. اگر هواپیمای 0 قبل از هواپیمای y که قصد پرواز دارد، پرواز کند $KK_{0,y}$ برابر یک و در

جدول ۲. داده‌های مورد نیاز

	۱	۲	۳	۴	۵	۶
	۱	-	۱۵۷	۹۶	۱۹۶	۱۵۷
	۲	۶۰	-	۶۰	۱۳۱	۶۹
حداقل زمان جداسازی بین هواپیماها	۳	۹۶	۱۵۷	-	۹۶	۱۵۷
	۴	۹۶	۱۵۷	۹۶	-	۱۵۷
	۵	۶۰	۶۹	۶۰	-	۶۹

زمان بندی فرود و پرواز هواپیماها بر روی باندها با در نظر گرفتن محدودیت در تعداد مکان استقرار هواپیما

	۶	۶۰	۶۹	۶۰	۶۰	۱۳۱	-
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	
زمان آماده سازی برای پرواز یا فرود	۱۷۳	۵۵	۴۷	۱۰	۱۴۷	۲۵۶	
زمان ضرب الاجل	۷۷۳	۶۵۵	۶۴۷	۶۱۰	۷۴۷	۸۶۵	
زمان هدف	۱۹۳	۸۵	۶۷	۳۰	۱۶۵	۲۸۳	
وزن ها	۶	۶	۶	۶	۴	۵	



شکل ۱. میزان تابع هدف به ازای مقادیر مختلف تعداد محل های استقرار

الگوریتم پرکاربردی برای حل مسائل بهینه سازی با پیچیدگی بالا است مقایسه شده است.

۴-۱ الگوریتم کرم شب تاب

الگوریتم کرم شب تاب توسط یانگ [Yang, 2008] ارائه شد. برای این الگوریتم که بر اساس خصوصیات تشعشع کرم های شب تاب ارائه شده است از سه قانون دلخواه سازی زیر استفاده می شود.

- همه کرم های شب تاب متحداً جنس هستند به طوری که یک شبتاب به سمت دیگر شبتاب ها جذب خواهد شد.
- قابلیت جذب کنندگی متناسب با درخشندگی آن ها است. بنابراین برای دو شب تاب چشمک زن، شب تاب با درخشندگی کم به سوی شب تاب پرنورتر حرکت خواهد کرد.

لازم به ذکر است که مسئله به ازای در نظر گرفتن یک مکان برای محل استقرار هواپیما نشدنی بوده و مقدار تابع هدف به ازای ۲، ۳ و ۴ مکان برای محل-های استقرار هواپیما برابر ۶۷۹، ۸۹۶ و ۱۸۴۷ می باشد. این نکته حائز اهمیت است که اگر تعداد مکان های استقرار از چهار بیشتر گردد میزان تابع هدف تغییری نمی کند.

۴. رویکرد حل مسأله

با توجه به آن که مساله زمان بندی فرود و پرواز جز مسایل NP-Hard است حل مساله در ابعاد بزرگ توسط روش های حل دقیق امکان پذیر نمی باشد. به همین منظور، برای حل از الگوریتم کرم شب تاب استفاده شده و پاسخ ها با الگوریتم ژنتیک که

دارد، نوسان شدت نور و فرمول بندی قابلیت جذب. برای سادگی ما همیشه می توانیم فرض کنیم که قابلیت جذب یک کرم شب-تاب بوسیله درخشندگی آن تعریف می شود که مجتمع با تابع هدف کد شده است.

• درخشندگی یک کرم شب تاب به وسیله دورنمای تابع هدف تعیین می شود.
بر اساس این سه قانون مبنای ما حل الگوریتم کرم شب تاب می تواند بصورت شبه برنامه ای که در شکل ۲ نشان داده شده است ارائه شود. در الگوریتم کرم شب تاب دو پیامد مهم وجود

```

Objective function  $f(x), x = (x_1, \dots, x_d)^T$ 
Generate initial population of fireflies  $x_i, (i = 1, 2, \dots, n)$ 
Light intensity  $I_i$  at  $x_i$  is determined by  $f(x_i)$ 
Define light absorption coefficient  $\gamma$ 
while ( $t < \text{MaxGeneration}$ )
  for  $i = 1 : n$  all  $n$  fireflies
    for  $j = 1 : n$  all  $n$  fireflies (inner loop)
      if ( $I_j < I_i$ ), Move firefly  $i$  towards  $j$ ; end if
    Vary attractiveness with distance  $r$  via  $\exp[-\gamma r]$ 
    Evaluate new solutions and update light intensity
  end for  $j$ 
end for  $i$ 
Rank the fireflies and find the current global best  $g_s$ 
end while
Post process results and visualization
    
```

شکل ۲. شبه برنامه الگوریتم کرم شب تاب (FA)

بطوریکه I_s شدت در منبع می باشد. برای یک واسطه داده شده با ضریب جذب نور ثابت γ ، شدت نور I با فاصله r تغییر می کند، یعنی،

$$I = I_0 e^{-\gamma r} \quad (17)$$

I_0 شدت نور اولیه می باشد. برای اجتناب از تکینی (Singularity) در $r=0$ در عبارت I_s / r^2 ، اجرای مرکب قانون مربع معکوس و جذب می تواند بفرم گوسین زیر تخمین زده شود،

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma r^2} \quad (18)$$

از آنجایی که قابلیت جذب یک کرم شب تاب متناسب با شدت نور دیده شده توسط کرم های شبتاب مجاور است، بنابراین ما می توانیم قابلیت جذب یک کرم شب تاب را بوسیله رابطه زیر تعریف کنیم،

در ساده ترین حالت برای مسئله پیشینه سازی، در صورتی که $I(x) \propto f(x)$ باشد، درخشندگی I برای یک کرم شب تاب در مکان خاص x می تواند انتخاب شود. هر چند که قابلیت جذب نسبی است اما باید توسط چشمان ناظر قابل مشاهده بوده یا توسط دیگر کرم های شب تاب تشخیص داده شود. بنابراین با فاصله r_{ij} بین شب تاب i و شب تاب j تغییر خواهد کرد. علاوه بر این شدت نور با فاصله از منبع کاهش می یابد. هم چنین نور توسط واسطه ها جذب می شود. بنابراین می بایست اجازه دهیم تا قابلیت جذب با درجه جذب تغییر کند. در ساده ترین حالت، شدت جذب $I(r)$ ، بر اساس قانون مربع معکوس زیر تغییر می کند.

$$I(r) = \frac{I_s}{r^2} \quad (16)$$

زمان بندی فرود و پرواز هواپیماها بر روی باندها با در نظر گرفتن محدودیت در تعداد مکان استقرار هواپیما

عبارت دوم به علت جذب می باشد، عبارت سوم تصادفی سازی بوده و α پارامتر تصادفی سازی است. هم چنین ε_i یک بردار اتفاقی با توزیع نرمال یا توزیع یکنواخت می باشد. ما برای بیشتر پیاده سازی های خود، $\beta_0 = 1$ و $\alpha \in [0,1]$ را در نظر می گیریم. نکته جالب این است که رابطه (۲۶)، پیشروی اریب اتفاقی بسوی شبتاب درخشان تر می باشد. اگر $\beta_0 = 0$ باشد در این صورت رابطه یک روند اتفاقی ساده خواهد بود. پارامتر γ تغییرات قابلیت جذب کنندگی را مشخص کرده و مقدار آن به شدت برای تعیین کردن سرعت همگرایی و رفتار الگوریتم کرم شب تاب (FA) مهم است. در تئوری، $\gamma \in [0, \infty)$ است، اما در عمل $\gamma = O(1)$ که بوسیله طول مشخصه Γ برای سیستمی که بهینه می گردد تعریف می شود. بنابراین در بسیاری از کاربردها مقدار آن از ۰٫۱ تا ۱۰ تغییر می کند.

بر اساس آنچه که برای الگوریتم کرم شب تاب توصیف شد. پاسخهای بدست آمده در جدول ۳ نشان داده شده است. در این جدول، ۱۵ مثال ذکر شده است. در داده های به کار رفته، هر هواپیما در قالب های نوع عملیات (فرود یا پرواز)، کلاس وزنی (کوچک، متوسط و بزرگ)، اولویت (جریمه تاخیر هواپیما)، زمان آمادگی، زمان هدف، زمان ضرب الاجل و زمان های جداسازی مشخص شده اند. داده ها مطابق رویکردی است که هانسریلیگولاری و همکاران [Hancerliogullari et al., 2013] برای تولید داده ها در مقاله خود به کار برده اند:

- نوع عملیات هواپیماها توسط مقادیر تصادفی ۰ و ۱ که به ترتیب بیانگر پرواز و فرود است، تولید می شوند.
- کلاس وزنی هواپیماها توسط مقادیر تصادفی ۱، ۲ و ۳ که به ترتیب بیانگر هواپیمای بزرگ (سنگین)، متوسط و کوچک است، تولید می شوند.
- جریمه تاخیر هر هواپیما بین ۱ تا ۶ متغیر می باشد و تابعی بر اساس کلاس وزنی هواپیما و نوع عملیات آن می باشد. برای مثال، حداقل وزن ۱ به هواپیمای کوچک که قصد پرواز دارد

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (19)$$

بطوریکه β_0 ، قابلیت جذب در $r=0$ است. از آنجاییکه محاسبه راحت تر از محاسبه عبارت نمایی است، بنابراین در جایی که لازم است به راحتی می توان رابطه زیر را نوشت،

$$\beta = \frac{\beta_0}{1 + \gamma r^2} \quad (20)$$

دو روابط (۱۹) و (۲۰) یک فاصله مشخصه $\Gamma = 1/\sqrt{\gamma}$ را تعریف می کنند که قابلیت جذب را بطور معنی دار از β_0 به $\beta_0 e^{-1}$ برای معادله (۱۹) یا $\beta_0/2$ برای معادله (۲۰) تغییر می دهد.

در پیاده سازی عملی، تابع قابلیت جذب کنندگی $\beta(r)$ ، می تواند هر تابع نزولی یکنواخت مانند تابع با فرم عمومی زیر باشد.

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^m}, \quad (m \geq 1) \quad (21)$$

برای مقدار ثابت γ ، طول مشخصه بصورت زیر خواهد بود،

$$\Gamma = \gamma^{-\frac{1}{m}} \rightarrow m \rightarrow \infty \quad (22)$$

بالعکس برای طول مقیاس Γ داده شده در یک مسئله بهینه سازی، پارامتر γ می تواند به عنوان یک مقدار اولیه نوعی زیر مورد استفاده واقع شود،

$$\gamma = \frac{1}{\Gamma^m} \quad (23)$$

فاصله بین دو شبتاب i و j به ترتیب در مکان های x_i و x_j ، فاصله ی کارترین بصورت می باشد،

$$r_{ij} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (24)$$

بطوری که $x_{i,k}$ ، k امین عنصر مختصات فضایی x_i ، برای شبتاب i ام می باشد. در حالت دو بعدی داریم،

$$r_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (25)$$

حرکت شبتاب i به سمت شبتاب j بیش جذب کننده (درخشان تر) j با استفاده از رابطه زیر تعریف می شود،

$$x_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{i,j}^2} (x_j - x_i) + \alpha \varepsilon_i \quad (26)$$

هوایما (کوچک، متوسط و بزرگ)، نوع عملیات آن (فرود یا پرواز) می‌باشد.

همان طور که از جدول ۳ مشهود است، الگوریتم کرم شب‌تاب توانسته برای مثال‌های کوچک در مدت زمانی تقریباً کمتر از مدت زمان اجرایی کد نوشته شده در لینگو به جواب بهینه دست یابد. در مورد مسائل بزرگ از آن جهت که نرم افزار لینگو قادر به حل آن در مدت زمان معقول نمی‌باشد. الگوریتم کرم شب‌تاب، جواب‌های قابل قبولی در مورد مسائل کوچک به ما می‌دهد، می‌توان این گونه برداشت کرد که استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب در مسائل بزرگ نیز ما را به جواب نزدیک به بهینه می‌رساند. در ضمن زمان اجرای الگوریتم در مورد این مسائل بسیار کم می‌باشد، که این موضوع نشان‌دهنده قدرت الگوریتم در حل مسئله تعریف شده می‌باشد.

و بیشترین وزن ۶ به هوایمای سنگینی که قصد فرود دارد، اختصاص می‌یابد.

- زمان آمادگی توسط توزیع یکنواخت گسسته تولید می‌شود که پارامتری است که به صورت تصادفی بین ۳۰ و ۹۰ تولید می‌شود.
- برای هر هوایما بازه زمانی ۸۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. بنابراین زمان ضرب‌العجل از طریق $(ri + 800)$ برای هر هوایما محاسبه می‌شود.
- زمان هدف از طریق $(ri + 20)$ (زمان آمادگی برای پرواز یا فرود به علاوه ۲۰ ثانیه) برای هر هوایما محاسبه می‌شود.
- همان‌طور که اشاره شده حداقل زمان جداسازی از مقاله شرالی و همکاران [Sherali et al., 2010] استخراج شده است. این مقادیر بین ۳۰ تا ۲۰۰ می‌باشد که وابسته به نوع

جدول ۳. نتایج محاسباتی

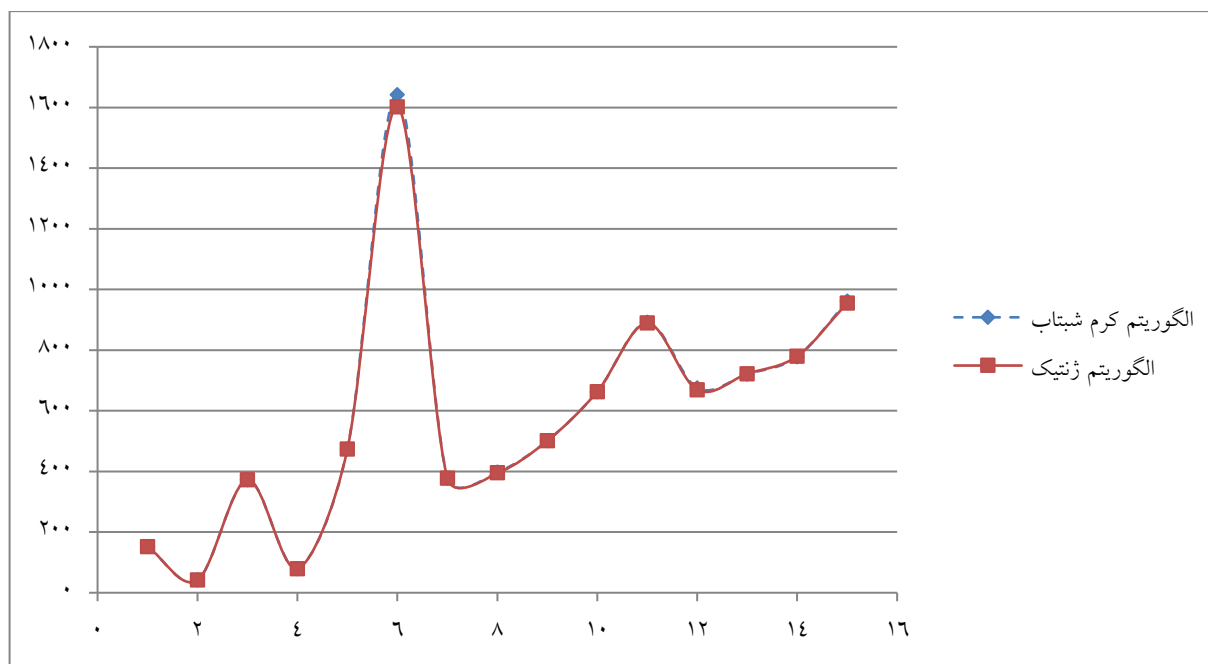
مسائل نمونه	تعداد کل هوایماها	تعداد هوایماها به قصد پرواز از فرودگاه	تعداد هوایماها به قصد فرودگاه	تعداد باند های فرودگاه	تعداد آشیانه ها در فرودگاه	تابع هدف (Lingo)	مدت زمان اجرا (Lingo)	تابع هدف (FA)	مدت زمان اجرا (FA)	تابع هدف (GA)	مدت زمان اجرا (GA)	تعداد کل هوایماها
A6-b2-1	6	3	3	2	2	152	68	152	70	152	70	6
A6-b2-2	6	3	3	2	2	42	59	42	71	42	72	6
A6-b2-3	6	3	3	2	2	372	62	372	75	372	74	6
A6-b2-4	6	3	3	2	2	79	65	79	75	79	76	6
A6-b2-5	6	3	3	2	2	473	50	473	76	474	80	6
A8-b2-6	8	3	5	2	4	1554	201	1642	158	1602	165	8
A8-b2-7	8	3	5	2	4	358	194	378	201	378	221	8
A8-b2-8	8	3	5	2	4	396	182	398	202	395	225	8
A8-b2-9	8	3	5	2	4	499	180	501	223	501	230	8
A8-b2-10	8	3	5	2	4	663	199	663	235	663	246	8
A15-b2-11	15	5	10	2	6	-	-	891	245	889	273	15
A15-b2-12	15	6	9	2	6	-	-	675	223	669	235	15
A15-b2-13	15	4	11	2	6	-	-	721	221	722	234	15

زمان بندی فرود و پرواز هواپیماها بر روی باندها با در نظر گرفتن محدودیت در تعداد مکان استقرار هواپیما

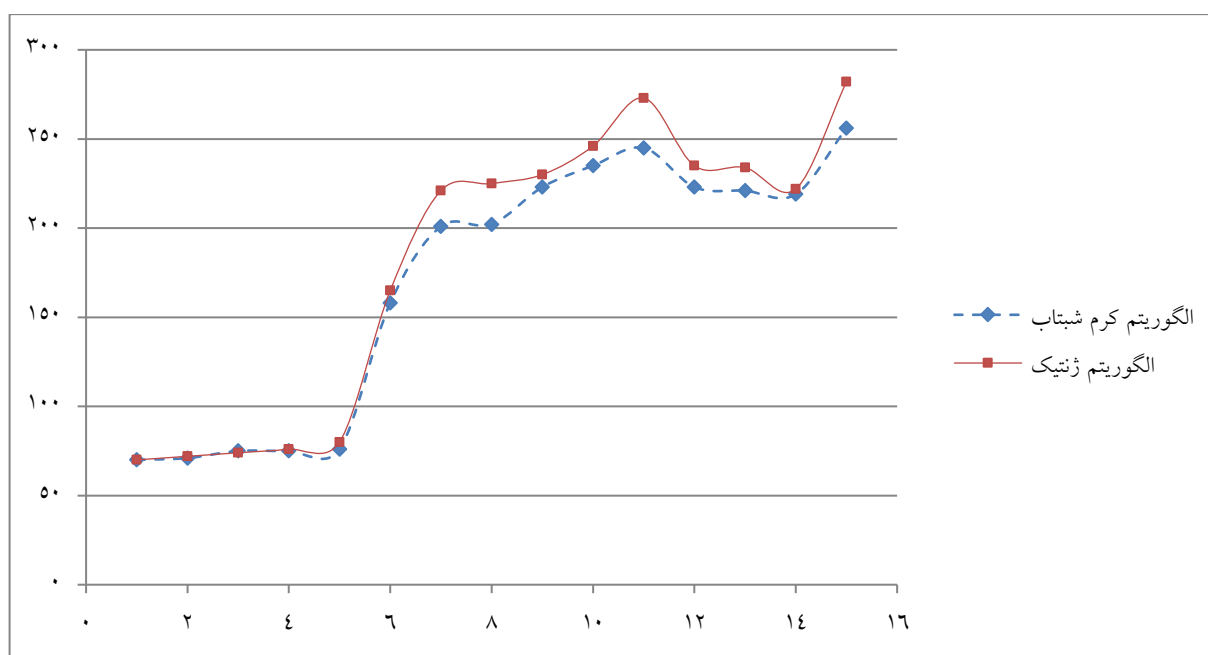
۲۲۲	۷۸۰	۲۱۹	۷۷۸	-	-	۶	۲	۸	۷	۱۵	A1۵-b2-1۴
۲۸۲	۹۵۵	۲۵۶	۹۶۱	-	-	۶	۲	۱۲	۳	۱۵	A1۵-b2-1۵

بدست آمده دارای زمان کوتاهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک هستند که این خود نشان از قابلیت الگوریتم کرم شب تاب دارد (شکل ۴).

همچنین پاسخ های بدست آمده با استفاده از الگوریتم کرم شب تاب با پاسخ های حاصله از الگوریتم ژنتیک مقایسه شده است (شکل ۳). این مقایسه نشان می دهد که پاسخ ها دارای کیفیت مناسبی بوده و جواب ها تقریباً همسان هستند. اما پاسخ های



شکل ۳. مقایسه پاسخ های الگوریتم های ژنتیک و کرم شب تاب



شکل ۴. مقایسه زمان حل مسئله برای الگوریتم‌های ژنتیک و کرم شتاب

integer programming". IIE Annual Conference. Proceedings: 1-8.

– Bianco, L., Dell'Olmo, P. and Giordani, S. (2006) "Scheduling models for air traffic control in terminal areas. Journal of Scheduling" Journal of Scheduling, Volume 9, Issue 3, pp 223-253.

– Federal Aviation Administration, (2003) "Aeronautical Information Manual/Federal Aviation Regulation". McGraw-Hill, New York.

– Hancerliogullari, G. Rabadi, G. Al-Salem, A.H. and Kharbeche, M. (2013) "Greedy algorithms and metaheuristics for a multiple runway combined arrival-departure aircraft sequencing problem". Journal of Air Transport Management, 32, 39-48.

– Lawler, E.L., Lenstra, J.K. and Rinnooy, A.H.G. (1982) "Recent Developments in Deterministic Sequencing and Scheduling and Stochastic Scheduling". Reidel, Dordrecht, pp. 35e73.

– Mahmoudian, M, Aminnayeri, M. and Mirzadeh, A. (2013) "Aircraft landing scheduling based on unavailability of runway constraint through a time segment heuristic method", International Journal of Conceptions on Management and Social Sciences, 1, No. 2, 2357-2787.

– Sherali, H.D., Ghoniem, A., Baik, H. and Trani, A.A. (2010) "A combined arrival-departure aircraft sequencing problem. Manuscript", Grado Department of Industrial and Systems Engineering (0118).

– Trivizas, D. A. (1998) "Optimal scheduling with maximum position shift (MPS) constraints: a runway scheduling application". Journal of Navigation, 51, 250–266.

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال شانزدهم / شماره چهارم (۶۵) / تابستان ۱۴۰۴

۵. نتیجه گیری

هر هواپیما در یک بازه زمانی مشخصی باید اقدام به فرود یا پرواز کند به طوری که به زمان هدف در این بازه نزدیک باشد. نکته حائز اهمیت این است که با توجه به محدودیت تعداد مکان‌های استقرار، هواپیماها در بازه مشخص نزدیک به زمان هدف می‌بایست زمانی را انتخاب کنند که این محدودیت ارضا شود. به عبارت دیگر زمان برای هواپیمایی که قصد فرود دارد نباید به گونه‌ای انتخاب شود که ظرفیتی در فرودگاه برای استقرار آن نداشته باشیم. بنابراین بهترین زمان در بازه زمانی فوق برای هر هواپیما، حتی المقدور باید نزدیک به زمان هدف هواپیما باشد به طوری که محدودیت تعداد مکان‌های استقرار را نقض نکند و فاصله زمانی بین دو هواپیما نیز رعایت شود. سپس با توجه به توضیحات داده شده، مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارائه شد و از طریق رویکرد به کار رفته در هنسرلیگولاری و همکاران [Hancerliogullari et al., 2013] برای تولید داده‌ها، نمونه مسایل معیاری تعریف گردید. در بخش تحلیل حساسیت، تاثیر کاهش یا افزایش در مقدار این محدودیت (تعداد مکان‌های استقرار هواپیماها بعد از فرود) بر تابع هدف مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت در بخش رویکرد حل مسئله، با استفاده از الگوریتم کرم شتاب، جواب‌های قابل قبولی برای این نمونه مسایل بدست آمد. به طوری که این الگوریتم توانست برای مسایل کوچک جواب‌های بهینه‌ای با زمان‌های معقول بدست آورد و در مورد مسایل بزرگ نیز جواب‌های نزدیک به بهینه با زمان‌های مناسب ایجاد نمود. جواب‌های بدست آمده با استفاده از این الگوریتم دارای زمان نسبتاً پایین‌تری نسبت به الگوریتم ژنتیک می‌باشند.

۶. مراجع

– Al-Salem, A., Farhadi, F., Kharbeche, M. and Ghoniem, A. (2012) "Multiple-runway aircraft sequencing problems using mixed-

زمان‌بندی فرود و پرواز هواپیماها بر روی باندها با در نظر گرفتن محدودیت در تعداد مکان استقرار هواپیما

- Yaghoubi-Panah, M., Tavakkoli-Moghaddam, R. and Radmehr, F., (2012) "Scheduling the sequence of aircraft landing with a single runway by a fuzzy programming approach", J. of Air Transport Management, 25, 15-18.
- Yang, X.S., (2008) Firefly algorithm, In: Nature-inspired metaheuristic algorithms, Yang, X.-S. (ed.), Wiley Online, 79-90.

سعید صائمی، رضا توکلی مقدم، حامد نوذری، پانته آملکی مقدم

سعید صائمی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۹۱ از دانشگاه قم و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع در سال ۱۳۹۳ را از دانشگاه علوم و فنون مازندران اخذ نمود. در حال حاضر دانشجوی دکتری مهندسی صنایع در دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران مرکز است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان زمانبندی، الگوریتم‌های فراابتکاری و دقیق می‌باشد.



رضا توکلی مقدم، درجه کارشناسی در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۶۷ از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع در سال ۱۳۷۲ را از دانشگاه ملیورن - استرالیا اخذ نمود. در سال ۱۳۷۶ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع از دانشگاه سوئین‌برن - استرالیا گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان طراحی سیستم‌های صنعتی (مکان‌یابی و استقرار تسهیلات)، مسیریابی وسایط حمل و نقل، لجستیک و طراحی شبکه زنجیره تامین، زمانبندی و توالی عملیات، الگوریتم‌های فراابتکاری در بهینه‌سازی بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استاد تمام در دانشگاه تهران است.



حامد نوذری، درجه کارشناسی در رشته مهندسی مکانیک را در سال ۱۳۸۸ و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع در سال ۱۳۹۱ را از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در حال حاضر ایشان دانشجوی دکتری مهندسی صنایع در دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران مرکز می‌باشند.



پانته آملکی مقدم، درجه کارشناسی در رشته آمار را در سال ۱۳۸۶ از دانشگاه علامه طباطبایی و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی سیستم‌های اقتصادی و اجتماعی در سال ۱۳۹۱ را از دانشگاه آزاد اسلامی - واحد علوم و تحقیقات تهران اخذ نمود. در حال حاضر ایشان دانشجوی دکتری مهندسی صنایع در دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران مرکز است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان الگوریتم‌های فراابتکاری، داده‌کاوی و تحلیل پوششی داده هاست.

