

# زمان‌بندی فرود و پرواز هواپیماها بر روی باندها با در نظر گرفتن محدودیت در

## تعداد مکان استقرار هواپیما

سعید صائمی، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران  
رضا توکلی مقدم (مسئول مکاتبات)، استاد، دانشکده مهندسی صنایع، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی تهران، ایران  
حامد نوذری، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی تهران، ایران  
پانته آملکی مقدم، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

E-mail: tavakoli@ut.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۲۰

دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۰۷

### 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 شب‌تاب.

## ۱. مقدمه

فرودگاه‌های Fiumicino Rome و Milan Malpensa 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، می‌نیم‌سازی زمان تکمیل بیشینه با در نظر گرفتن محدودیت زمان جداسازی مناسب و محدودیت پنجره‌ی زمانی است. 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 می‌نیم‌سازی تاخیرات وزنی هواپیماها است. 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 سلسله‌مراتبی شکست نامتقارن است. هدف از این نامعادلات و محدودیت‌ها، بهبود در ریلکسیشن مسئله‌ی خطی ارائه شده و کم کردن محاسبات است.

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 و همکاران [Mahmoudian, Aminnayeri and Mirzadeh, 2013]، رویکردی ابتکاری برای زمان‌بندی فرود هواپیماها با محدودیت عدم دسترسی به یکی از باندها ارائه نمودند. یعقوبی پناه و همکاران [Yaghoubi-Panah, Tavakkoli-Moghaddam and Radmehr, 2013] مدلی چندهدفه برای حالت چندباندنانه برای مسأله زمان‌بندی نشست هواپیماها تحت شرایط فازی ارائه نموده‌اند. این مدل با الگوریتم علف‌های هرز چندهدفه و الگوریتم تکاملی ژنتیک چندهدفه به- نام NSGA-II حل شده است.

در بخش دوم این مقاله، مسأله مورد نظر تعریف می‌شود. در بخش سوم مدل ریاضی مسأله ارائه می‌شود. در بخش چهارم روش الگوریتم کرم شب تاب به همراه شبه کد الگوریتم، ارائه

در برگزاری مسابقات جام جهانی فوتبال حجم انبوهی از تماشاگران از طرق مختلف نظیر وسایل نقلیه‌ی 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 پرواز می‌باشند، هستیم. بدان معنی که باید زمان مناسبی برای هواپیماها در بازه زمانی خود، چه برای پرواز 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 تری وی زاس [Trivizas, 1998]، رویکرد برنامه‌نویسی پویا برای حل بهینه مسائل زمان‌بندی فرود و پرواز هواپیماها را به صورت یکپارچه در حالت ایستا ارائه نمود. او در این مقاله با استفاده از اطلاعات واقعی استخراج شده از مشاهدات صورت گرفته 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 [Bianco et al. 2006]، مدل‌های پویا و ایستا برای 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

شده است. در بخش پنجم نتایج محاسباتی تجزیه تحلیل می‌شوند و در پایان، نتیجه‌گیری در بخش ششم ارائه می‌شود.

## ۲. تعریف مسأله

مسئله زمان‌بندی هواپیماها با استفاده از نمادسازی  $\alpha|\beta|\gamma$  که توسط لاولر و همکاران در سال ۱۹۸۲ ارائه گردید، به صورت  $P_m | r_i, t_{ai}, d_i, S_{mi}, timewindow, \# parking | \sum w_i T_i$  قابل نمایش است. این مسئله عبارت است از تعیین توالی بهینه فرود یا پرواز هواپیماها و تخصیص آن‌ها به باندهای مختلف و همانند، با در نظر گرفتن محدودیت تعداد مکان‌های استقرار به طوری که مجموع هزینه‌های ناشی از دیرکرد هواپیماها کمینه شود. به عبارت دیگر مسئله زمان‌بندی هواپیماها، به زمان‌بندی هواپیماها (کار) بر روی باندهای (ماشین) همانند می‌پردازد. هر هواپیما جرمه وزنی خاص خود را دارد و در زمان آمدگی خود قادر به عملیات بر روی یک باند است. زمان واقعی عملیات نمی‌تواند قبل از زمان آمدگی و بعد از زمان ضرب‌العجل باشد. این زمان تا جای ممکن باید نزدیک به زمان هدف هواپیما باشد. از زمان آمدگی تا زمان ضرب‌العجل، پنجره زمانی شناخته می‌شود. انحراف از زمان ضرب‌العجل غیرممکن است. هنگامی که زمان عملیات یک هواپیما از زمان ضرب‌العجل تجاوز نماید، هواپیمای مورد نظر، به باند اختصاص نیافته و زمان‌بندی صورت‌گرفته به عنوان زمان‌بندی نشدنی شناخته می‌شود. زمان هدف را می‌توان از پیش تعیین نمود، ولی زمان عملیات کاملاً به شرایط فرود یا پرواز بستگی دارد، بنابراین 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 است.

همچنین 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 است. هر هواپیما به هنگام انجام عملیات فرود یا پرواز، یک توربولانس یا آشفتگی تولید می‌کند. این آشفتگی بسته به نوع عملیات و اندازه‌ی هواپیما متفاوت است. این زمان جداسازی مورد تأیید سازمان هواپیمایی فدرال و مقامات حمل و نقل هوایی ایالات متحده آمریکا است. این نکته قابل تأمل است که نامعادله

مثلی به صورت خودکار برای زمان‌های جداسازی رعایت نمی‌شود. این نامعادله عبارت است از  $S_{ab} + S_{bc} \geq S_{ac}$ . 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 انجام‌گیری است، رعایت نمی‌شود.

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 نمی‌شود. 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 می‌آید.

مطابق این جدول، زمان جداسازی بین آن‌ها ۴۰ ثانیه است. 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 است. 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 زمان‌بندی فرود و پرواز هواپیماها به صورت هم‌زمان بر روی باندها با محدودیت تعداد آشیانه‌ها ارائه می‌شود.

### ۳-۱ پارامترها

- $I = \{1, 2, \dots, i\}$ : مجموعه‌ای از  $i$  هواپیما (به قصد پرواز یا فرود).
- $i_1$ : مجموعه‌ای از هواپیماها که قصد فرود دارند، در حقیقت  $i_1 \subset i$ .

- $i2$ : مجموعه ای از هواپیماها که قصد پرواز دارند، در حقیقت  $i2 \subset i$ .
- $J = \{1, 2, \dots, j\}$ : مجموعه ای از  $j$  باند.

جدول ۱. حداقل زمان‌های جداسازی بین دو هواپیما

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

- $r_i$ : زمانی که هواپیمادر آن آماده برای بلند شدن یا نشستن بر روی باند است.
- $t_{ai}$ : زمان هدف برای هواپیمایی که قصد بلند شدن یا نشستن بر روی باند را دارد.
- $d_i$ : زمان ضرب الاجلی برای هواپیمایی که قصد بلند شدن یا نشستن بر روی باند را دارد.
- $o_i$ : نوع عملیات هواپیمای  $i$  ام که می‌تواند فرود یا پرواز باشد.
- $c_i$ : کلاس وزنی هواپیمای  $i$  که می‌تواند 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 می‌دهد و سپس هواپیمای  $i$ .
- $w_j$ : وزن تخصیص داده شده به هواپیمای  $j$  بر مبنای نوع عملیات و کلاس وزنی آن. اولویت مقداری بالاتر به هواپیمایی که قصد فرود دارند اختصاص می‌یابد و همچنین هواپیمایی که نسبت به هواپیمای دیگر سنگین‌تر می‌باشند.
- $capac$ : ظرفیت تعداد محل های استقرار هواپیما در فرودگاه.
- $2-3$  متغیرهای تصمیم گیری
- $t_j$ : زمان آغاز عملیات پرواز یا فرود برای هواپیمای  $i$
- $T_j$ : تاخیر هواپیمای  $i$  بر مبنای زمان هدف آن

یا فرود خود به یکی از باندها اختصاص داده می‌شود. این محدودیت (۳) حد پایین تخصیص هواپیماها به باندها است که به هر باند حداقل یک هواپیما اختصاص داده می‌شود. محدودیت (۴) بیانگر محدودیت پنجره زمانی برای هر هواپیما است. 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  $\delta_{mi}$  و  $m$  واحد زمانی زودتر عملیات خود را انجام می‌دهد. محدودیت (۷) بیانگر تاخیر هواپیما مبتنی بر زمان هدف است.

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 است. محدودیت‌های (۱۱) و (۱۲) رابطه بین هواپیماهایی که قصد پرواز دارند برقرار می‌کنند. 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 است.

- $x_{ij}$ : اگر هواپیمای  $i$  بر روی باند  $j$  عملیات پرواز یا فرود انجام دهد، ۱ و در غیر این صورت ۰
- $\sigma_{im}$ : 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 است
- $KK_{o,y}$ : 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 است.
- $dd_{n,y}, dd_{y,n}$ : 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 می‌گردند.

### 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 آشیانه‌ها آمده است. رابطه (۱) تابع هدف مسئله (حداقل‌سازی تاخیر وزنی کل) است. محدودیت (۲) بیانگر آن است که هر هواپیما برای انجام عملیات پرواز

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$t_y \geq t_n * (dd_{n,y} + dd_{y,n}) \quad n \in i1, y \in i2 \quad (14)$$

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

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 محل‌های استقرار هواپیما برابر ۶۷۹، ۸۹۶ و ۱۸۴۷ است. این نکته حائز اهمیت است که اگر تعداد مکان‌های استقرار از ۴ بیشتر گردد میزان تابع هدف تغییری نمی‌کند.

#### 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 روش‌های حل دقیق امکان‌پذیر ناست. به همین منظور، برای حل از الگوریتم کرم شب‌تاب استفاده شده و پاسخ‌ها با الگوریتم ژنتیک که الگوریتم پرکاربردی برای حل مسائل بهینه‌سازی با پیچیدگی بالا است مقایسه شده است.

#### ۴-۱ الگوریتم کرم شب‌تاب

الگوریتم کرم شب‌تاب توسط یانگ [Yang, 2008] ارائه شد. برای این الگوریتم که بر اساس خصوصیات تشعشع کرم‌های شب‌تاب ارائه شده است از سه قانون دلخواه سازی زیر استفاده می‌شود.

#### جدول ۲. داده‌های مورد نیاز

زمان آماده سازی برای پرواز یا فرود

زمان ضرب الاجل

زمان هدف

وزن‌ها

حداقل زمان جداسازی بین هواپیماها

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  $dd_{n,y}$  و  $dd_{y,n}$  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.

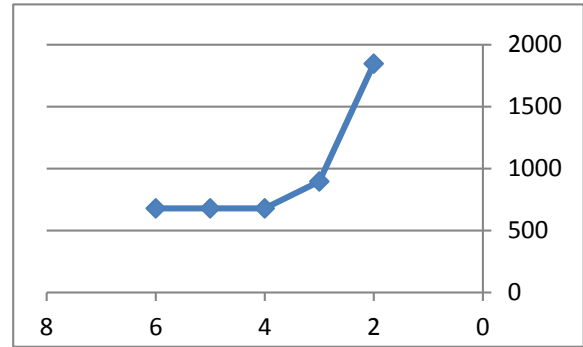
#### ۳-۴ تحلیل حساسیت

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 آماده سازی، زمان ضرب الاجل، 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.

	1	2	3	4	5	6
زمان آماده سازی برای پرواز یا فرود	173	55	47	10	147	256
زمان ضرب الاجل	773	655	647	610	747	865
زمان هدف	193	85	67	30	165	283
وزن‌ها	6	5	6	6	4	5
حداقل زمان جداسازی بین هواپیماها		1	2	3	4	5
	1	-	157	96	96	196
	2	60	-	60	60	131
	3	96	157	-	96	196
	4	96	157	96	-	196
	5	60	69	60	60	-
	6	60	69	60	60	131

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** ( $I_i < I_j$ ), 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  
 $g_*$   
**end while**  
 Post process results and visualization



شکل ۱. میزان تابع هدف به ازای مقادیر مختلف تعداد محل‌های

#### استقرار

- همه کرم‌های شب‌تاب متحداً جنس هستند، به طوری که یک شب‌تاب به سمت دیگر شب‌تاب‌ها جذب خواهد شد.
- قابلیت جذب‌کنندگی متناسب با درخشندگی آن‌ها است. بنابراین برای دو شب‌تاب چشمک‌زن، شب‌تاب با درخشندگی کم به سوی شب‌تاب پرنورتر حرکت خواهد کرد.
- درخشندگی یک کرم شب‌تاب به وسیله دورنمای تابع هدف تعیین می‌شود.

بر اساس این سه قانون مبنای ما حل الگوریتم کرم شب‌تاب می‌تواند بصورت شبه برنامه‌ای که در شکل ۲ نشان داده شده است ارائه شود. در الگوریتم کرم شب‌تاب دو پیامد مهم وجود دارد، نوسان شدت نور و فرمول‌بندی قابلیت جذب. برای سادگی ما همیشه می‌توانیم فرض کنیم که قابلیت جذب یک کرم شب‌تاب بوسیله درخشندگی آن تعریف می‌شود که مجتمع با تابع هدف کد شده است.

در ساده‌ترین حالت برای مسئله پیشینه‌سازی، در صورتی که  $I(x) \propto f(x)$  باشد، درخشندگی  $I$  برای یک کرم شب‌تاب در مکان خاص  $x$ ، می‌تواند انتخاب شود. هر چند که قابلیت جذب نسبی است اما باید توسط چشمان ناظر قابل مشاهده بوده یا توسط دیگر کرم‌های شب‌تاب تشخیص داده شود. بنابراین با فاصله  $r_{ij}$  بین شب‌تاب  $i$  و شب‌تاب  $j$  تغییر خواهد کرد. علاوه بر این شدت نور با فاصله از منبع کاهش می‌یابد. هم‌چنین نور توسط واسطه‌ها جذب می‌شود. بنابراین می‌بایست اجازه دهیم تا قابلیت جذب با درجه جذب تغییر کند. در ساده‌ترین حالت، شدت جذب  $I(r)$ ، بر اساس قانون مربع معکوس زیر تغییر می‌کند.

شکل ۲: شبه برنامه الگوریتم کرم شب‌تاب (FA)

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

بطوریکه  $I_s$  شدت در منبع است. برای یک واسطه داده شده با ضریب جذب نور ثابت  $\gamma$ ، شدت نور  $I$  با فاصله  $r$  تغییر می‌کند، یعنی،

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

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

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

از آنجایی که قابلیت جذب یک کرم شب‌تاب متناسب با شدت نور دیده شده توسط کرم‌های شب‌تاب مجاور است، بنابراین ما می‌توانیم قابلیت جذب یک کرم شب‌تاب را بوسیله رابطه زیر تعریف کنیم،

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

اتفاقی با توزیع نرمال یا توزیع یکنواخت است. ما برای بیشتر پیاده‌سازی‌های خود،  $\beta_0 = 1$  و  $\alpha \in [0,1]$  را در نظر می‌گیریم. نکته جالب این است که رابطه (۲۶)، پیشروی اریب اتفاقی بسوی شبتاب درخشان‌تر است. اگر  $\beta_0 = 0$  باشد در این صورت رابطه یک روند اتفاقی ساده خواهد بود.

پارامتر  $\gamma$  تغییرات قابلیت جذب‌کنندگی 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  $\Gamma$  برای سیستمی که بهینه می‌گردد تعریف می‌شود. بنابراین در بسیاری از کاربردها مقدار آن از  $(0, 1)$  تا  $10$  تغییر می‌کند.

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 داده‌های بکار رفته، هر هواپیما در قالب‌های نوع عملیات (فرود یا پرواز)، کلاس وزنی (کوچک، متوسط و بزرگ)، اولویت (جریمه تاخیر هواپیما)، زمان آمادگی، زمان هدف، زمان ضرب‌الاجل و زمان‌های جداسازی مشخص شده‌اند. داده‌ها مطابق رویکردی است که هانسریلیگولاری و همکاران [Hancerliogullari et al. 2013] برای تولید داده‌ها در مقاله خود به کار برده‌اند:

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

بطوریکه  $\beta_0$ ، قابلیت جذب در  $r=0$  است. از آنجاییکه محاسبه راحت تر از محاسبه عبارت نمایی است، بنابراین در جایی که لازم است به راحتی می‌توان 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 می‌کنند که قابلیت جذب را بطور معنی دار از  $\beta_0$  به  $\beta_0 e^{-1}$  برای معادله (۱۹) یا  $\beta_0/2$  برای معادله (۲۰) تغییر می‌دهد.

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

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

طول مشخصه بصورت زیر خواهد بود،  $\gamma$  برای مقدار ثابت

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

بالعکس برای طول مقیاس  $\Gamma$  داده شده در یک مسئله بهینه‌سازی، پارامتر  $\gamma$  می‌تواند 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 مکان‌های  $x_i$  و  $x_j$ ، فاصله ی کارترین بصورت است،

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

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

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

تاب بیش جذب‌کننده به سمت شبتاب حرکت شبتاب با استفاده از رابطه زیر تعریف می‌شود،  $J$  (درخشان تر)

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

عبارت دوم به علت جذب است، عبارت سوم تصادفی سازی بوده و  $\alpha$  پارامتر تصادفی سازی است. هم‌چنین  $\varepsilon_i$  یک بردار



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

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 ناست.

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 است، که این موضوع نشان‌دهنده قدرت الگوریتم در حل مسئله تعریف شده است.

- برای هر هواپیما بازه زمانی ۸۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. بنابراین زمان ضرب‌العجل از طریق  $(r_i + 800)$  برای هر هواپیما محاسبه می‌شود.
- زمان هدف از طریق  $(r_i + 20)$  (زمان آمادگی برای پرواز یا فرود به علاوه ۲۰ ثانیه) برای هر هواپیما 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 است که وابسته به نوع هواپیما (کوچک، متوسط و بزرگ)، نوع عملیات آن (فرود یا پرواز) است.

جدول ۳. نتایج محاسباتی

مدت زمان اجرا (GA)	مدت زمان تابع هدف (GA)	مدت زمان اجرا (FA)	مدت زمان تابع هدف (FA)	مدت زمان اجرا (Lingo)	تعداد تابع هدف (Lingo)	تعداد آشیانه ها در فرودگاه	تعداد باندهای فرودگاه	تعداد هواپیماها به قصد فرودگاه	تعداد هواپیماها به قصد پرواز از فرودگاه	تعداد کل هواپیماها	مسائل نمونه
۷۰	152	۷۰	۱۵۲	۶۸	۱۵۲	۲	۲	۳	۳	۶	A۶-b۲-۱
۷۲	42	۷۱	۴۲	۵۹	۴۲	۲	۲	۳	۳	۶	A۶-b۲-۲
۷۴	372	۷۵	۳۷۲	۶۲	۳۷۲	۲	۲	۳	۳	۶	A۶-b۲-۳
۷۶	79	۷۵	۷۹	۶۵	۷۹	۲	۲	۳	۳	۶	A۶-b۲-۴
80	474	۷۶	۴۷۴	۵۰	۴۷۳	۲	۲	۳	۳	۶	A۶-b۲-۵
۱65	1602	۱۵۸	1642	۲۰۱	۱۵۵۴	۴	۲	۵	۳	۸	A۸-b۲-۶
۲21	378	۲۰۱	۳۷۸	۱۹۴	۳۵۸	۴	۲	۵	۳	۸	A۸-b۲-۷
۲25	395	۲۰۲	۳۹۸	۱۸۲	۳۹۶	۴	۲	۵	۳	۸	A۸-b۲-۸
۲30	501	۲۲۳	۵۰۱	۱۸۰	۴۹۹	۴	۲	۵	۳	۸	A۸-b۲-۹
۲46	663	۲۳۵	۶۶۳	۱۹۹	۶۶۳	۴	۲	۵	۳	۸	A۸-b۲-۱۰
۲73	889	۲۴۵	۸۹۱	-	-	۶	۲	۱۰	۵	۱۵	A۱۵-b۲-۱۱
۲35	669	۲۲۳	۶۷۵	-	-	۶	۲	۹	۶	۱۵	A۱۵-b۲-۱۲
۲34	722	۲۲۱	۷۲۱	-	-	۶	۲	۱۱	۴	۱۵	A۱۵-b۲-۱۳
۲22	780	۲۱۹	۷۷۸	-	-	۶	۲	۸	۷	۱۵	A۱۵-b۲-۱۴

۲۸۲	۹۵۵	۲۵۶	۹۶۱	-	-	۶	۲	۱۲	۳	۱۵	A1۵- b2-۱۵
-----	-----	-----	-----	---	---	---	---	----	---	----	---------------

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 شب‌تاب، 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

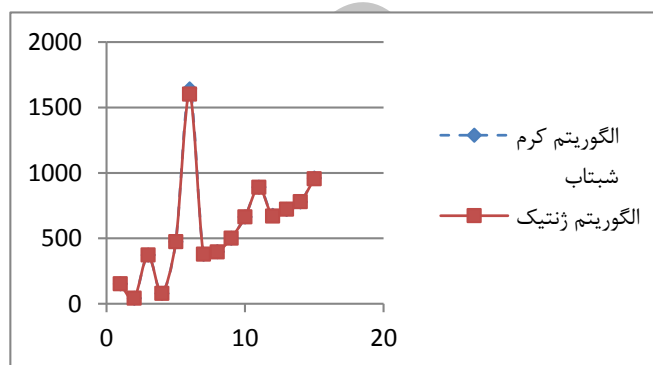
-Al-Salem, A., Farhadi, F., Kharbeche, M. and Ghoniem, A. (2012) "Multiple-runway aircraft sequencing problems using mixed-integer programming". IIE Annual Conference. Proceedings: 1-8.

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

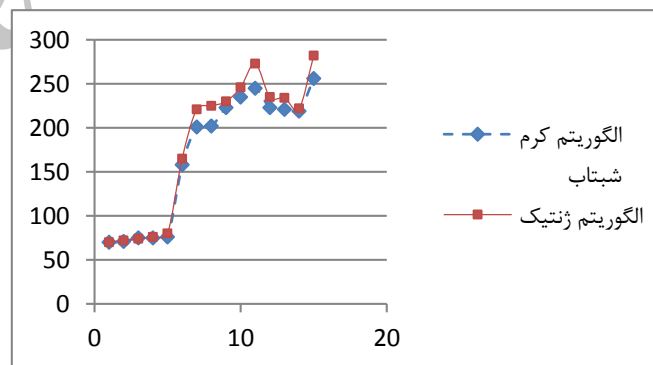
-Federal Aviation Administration (2003) "Aeronautical information manual/Federal Aviation Regulation", McGraw-Hill, New York.

-Hancerliogullari, G. Rabadi, G., Al-Salem, A. H. and Kharbeche, M. (2013) "Greedy algorithms and metaheuristics for a multiple runway combined arrival-departure aircraft

همچنین پاسخ‌های بدست آمده با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب با پاسخ‌های حاصله از الگوریتم ژنتیک مقایسه شده است (شکل ۳). این مقایسه نشان می‌دهد که پاسخ‌ها دارای کیفیت مناسبی بوده و جواب‌ها تقریباً همسان هستند. اما پاسخ‌های بدست آمده دارای زمان کوتاه‌تری نسبت به الگوریتم ژنتیک هستند که این خود نشان از قابلیت الگوریتم کرم شب‌تاب دارد (شکل ۴).



شکل ۳. مقایسه پاسخ‌های الگوریتم‌های ژنتیک و کرم شب‌تاب



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

شب‌تاب

## ۵. نتیجه‌گیری

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

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, Vol. 51, pp.250-266.

-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, Vol. 25, pp.15-18.

-Yang, X. S. (2008) "Firefly algorithm, In: Nature-inspired metaheuristic algorithms, Yang, X.-S. (ed.)", Wiley Online, pp.79-90.

sequencing problem", Journal of Air Transport Management, Vol. 32, pp.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.

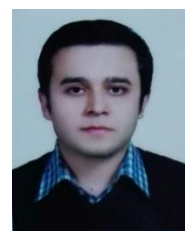
-Mahmoudian, M, Aminnayeri, M. and Mirzadeh, A. (2013) "Aircraft landing scheduling based on unavailability of runway constraint through a time segment heuristic method", International Journal of Conceptions on Management and Social Sciences, 1, No. 2, 2357-2787.

-Sherali, H.D., Ghoniem, A., Baik, H. and Trani, A. A. (2010) "A combined arrival-

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 سوئین برن - استرالیا گردید. زمینه‌های 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.



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 دکترای مهندسی صنایع در دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران مرکز است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان زمان‌بندی، الگوریتم‌های فراابتکاری و دقیق‌ا.



حامد نوذری، درجه کارشناسی در رشته مهندسی مکانیک را در سال ۱۳۸۸ و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع را در سال ۱۳۹۱ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. وی در حال حاضر دانشجوی دکتری مهندسی صنایع در دانشگاه آزاد اسلامی است.



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

پانته آملکی مقدم، درجه کارشناسی در رشته آمار را در سال ۱۳۸۶ از دانشگاه علامه طباطبایی و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع - سیستمهای اقتصادی و اجتماعی را در سال ۱۳۹۱ از دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران اخذ نمود. در سال ۱۳۹۶ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی صنایع - مهندسی سیستم از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان متاهوریستیک،



داده کاوی، تحلیل پوششی داده ها است.

Archive of SID