

## حل مسئله زمان بندی چندهدفه‌ی فرود هواپیما در حالت چندباند

یزدانی، مهدی<sup>1\*</sup>، فرجی مقدم، زهرا<sup>2</sup>، مقدم زرندی، زهرا<sup>3</sup>

- 1- استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران
  - 2- کارشناس ارشد، گروه مهندسی صنایع، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران
  - 3- کارشناس ارشد، گروه مهندسی صنایع، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران
- (دریافت مقاله: 1397/10/23 تاریخ پذیرش: 1398/06/23)

### چکیده

حمل و نقل هوایی به دلیل سرعت، قابلیت اطمینان بالا و مقرون به صرفه بودن در امر انتقال کالا و مسافر یکی از محبوبترین و پرطرفدارترین وسیله حمل و نقل در سراسر جهان محسوب می‌شود. با این وجود استفاده از حمل و نقل هوایی با روند صعودی، صنعت هوانوردی را با معضلات عدیده‌ای از جمله متحمل شدن هزینه تاخیرات و تعجیلات، افزایش آلودگی هوا و آلودگی‌های زیست محیطی و صوتی روبرو کرده است که افراد درگیر در این حوزه را ترغیب می‌نماید تا جدی‌تر به بحث مدیریت بهینه ترافیک هوایی و استفاده موثر از ظرفیت باندها و فرودگاه‌ها تمرکز کنند. در این مقاله مسئله زمان بندی چند هدفه فرود هواپیما به عنوان بخش پیچیده و اساسی مدیریت ترافیک هوایی با توجه به محدودیت‌های پنجره زمانی، حداقل زمان جداسازی در حالت چند باند و وابستگی بین باندها در قالب اهداف کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های زودکرد و دیرکرد و همچنین حداقل‌سازی مجموع زمان پرودها مورد مطالعه قرار گرفته است. در بخش مطالعات محاسباتی، 5 مسئله با سایزهای کوچک با کمک روش اپسیلون محدودیت حل شده است. همچنین 22 مسئله با سایزهای کوچک و بزرگ با استفاده از دو الگوریتم فراابتکاری چند هدفه NSGA-II و MOPSO حل شده و نتایج آن‌ها مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج محاسباتی برای 4 شاخص عملکردی حاکی از برتری الگوریتم NSGA-II در شاخص NPS و برتری الگوریتم MOPSO در شاخص MID می‌باشد. همچنین در دو شاخص SM و RAS نیز عملکرد الگوریتم‌ها یکسان است. **واژه‌های کلیدی:** زمان بندی فرود هواپیما، فرودگاه چند باند، مسائل چندهدفه، روش اپسیلون محدودیت، الگوریتم فراابتکاری

## Solving the Multi-objective of Aircraft Landing Scheduling Problem in Multi-Band Mode

Mehdi Yazdani, Zahra Faraji Moghaddam, Zahra Moghaddam Zarandi

### Abstract

Aviation is one of the most popular transportation throughout the world for its safety, speed, reliability and cost reduction. Increasing use of aviation has faced the aviation industry with many problems that including delay and early cost, air pollution increase, environmental and sound pollution that encourages those involved in the field to focus more seriously on the optimal management of air traffic and the effective use of the capacity of bands and airports. In this paper, Multi-objective Aircraft Landing Scheduling problem (ALSP) is studied as a complex and basic part of air traffic management according to the time window constraints and minimum separation time in multi band and independence between bands in terms of minimizing of the sum of early and delay cost and minimizing the sum of landing time. In Computational study section, five problems instances with Small size have been solved using the Epsilon Constraint Method. Also, 22 problems instances with small and large sizes have been solved with two multi-objective meta-heuristic algorithms and compared the results of them. The computational results for 4 performance metrics indicate the superiority of the NSGA-II algorithm in the NPS index and the superiority of the MOPSO algorithm in the MID index. Also, the performance of the algorithms is the same for both SM and RAS.

**Key words:** Aircraft landing scheduling, Multi-Band airport, Multi-objective problems, Epsilon constraint Method, Meta-heuristic algorithm

### مقدمه

ترافیک هوایی در سراسر جهان می باشد [1]. مسئله‌ی زمان بندی فرود هواپیماها<sup>1</sup> (ALSP) یکی از مسائل پیچیده در عملیات فرودگاهی محسوب می‌شود و در حیطه‌کاری کنترلر برج مراقبت قرار می‌گیرد. همچنین مسئله ALSP جز مسائل NP-hard دسته بندی می‌گردد [2]. آبل و همکاران [3] اولین مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط

تقاضای حمل و نقل هوایی در سال‌های اخیر با رشد صعودی رو به رو بوده است، بطوریکه برای مثال تعداد جابجایی مسافران در سال 2015 نسبت به سال 2014 با رشد 6 درصدی مواجه شده که نشان‌دهنده رشد فزاینده

\* نویسنده پاسخگو، پست الکترونیک: [m.yazdani@qiau.ac.ir](mailto:m.yazdani@qiau.ac.ir)

به صورت دقیق حل نمودند. در پژوهشی قهاری [12] یک مدل برنامه‌ریزی خطی برای حل دو مسئله تعیین توالی فرود هواپیما و تخصیص هواپیما به ورودی مسافری ارائه داد و حل مدل با استفاده از الگوریتم جستجوی ممنوعه<sup>3</sup> برای 45 هواپیما و یک باند فرود انجام شد. دستگردی [13] برای حل مدل ریاضی مسئله ALSP، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات<sup>4</sup> را پیشنهاد دادند و هدف تنها کمینه‌سازی مجموع تاخیرهای پروازی در حالت چند باند فرود بیان شد. صائمی و همکاران [14] در مقاله‌ای مسئله زمانبندی فرود و پرواز هواپیماها به صورت همزمان بر روی چندین باند را با هدف حداقل سازی دیرکرد وزنی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای حل مسئله در سباز کوچک از نرم افزار لینگو و برای حل مسائل بزرگ از الگوریتم کرم شب‌تاب<sup>5</sup> استفاده نمودند. در ادامه با مقایسه جواب‌های حاصل از الگوریتم کرم شب‌تاب و الگوریتم ژنتیک نشان دادند که الگوریتم کرم شب‌تاب توانسته در زمان کمتر جواب‌هایی تقریباً یکسان با الگوریتم ژنتیک ارائه دهد.

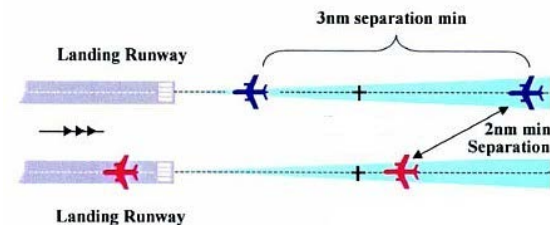
در این تحقیق با توجه به نمودار بلوکی شکل 1، ابتدا مدل ریاضی مسئله ALSP به صورت چند هدفه و در حالت چند باند معرفی می‌گردد. سپس به منظور بررسی صحت مدل ریاضی مسائل سباز کوچک با استفاده از روش اسپیلون محدودیت<sup>6</sup> حل می‌شود. با توجه به اینکه با افزایش ابعاد مسئله زمان حل آن نیز افزایش می‌یابد، روش اسپیلون محدودیت جهت حل مسائل بسیار زمانبر می‌باشد از این رو برای حل مسائل در زمان منطقی از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده می‌شود و در نهایت عملکرد الگوریتم‌ها بررسی می‌گردد.

### تعریف مسئله

در این بخش ابتدا به تعریف مسئله زمانبندی فرود هواپیما و محدودیت‌هایی که در دنیای واقعی جهت برنامه‌ریزی با آن روبرو می‌شویم پرداخته و سپس در ادامه نمایش جواب این مسئله ارائه خواهد شد. مسئله زمانبندی فرود هواپیماها در حالت استاتیکی را می‌توان تعیین نمودن توالی و زمانبندی  $n$  هواپیمای موجود بر روی  $m$  باند در دسترس با توجه به محدودیت‌های معین به منظور حداقل‌سازی یک سری اهداف مورد نظر تعریف نمود. یکی از مهمترین محدودیت‌های این مسئله، محدودیت پنجره زمانی است. این محدودیت بیان می‌کند که هر هواپیما باید در یک بازه زمانی مشخص فرود آید. این پنجره شامل زودترین زمان فرود ( $E_i$ )، دیرترین زمان فرود ( $L_i$ ) و زمان هدف ( $T_i$ ) است.

صفر و یک را برای این مسئله ارائه نموده و یک الگوریتم شاخه و کران و یک الگوریتم ابتکاری بر اساس الگوریتم ژنتیک برای حل این مسئله توسعه دادند. در ادامه بیسلی و همکاران [2]، با اضافه نمودن 6 نوع محدودیت اضافی به مدل ریاضی عدد صحیح مختلط، برای کاهش فضای صفر و یک تلاش نمودند. آن‌ها سپس مسئله را با بهره‌گیری از روش جستجوی درختی تا اندازه 50 هواپیما حل کردند. پینول و بیسلی [4] با استفاده از الگوریتم فراابتکاری جستجوی پراکنده و الگوریتم بوم‌شناسی جواب‌هایی با کیفیت بالا برای مسائل تا اندازه 500 هواپیما و 5 باند فرود ارائه دادند. صالحی پور و همکاران [5] مدل ریاضی را با در نظر گرفتن هدف حداقل سازی مجموع هزینه‌های زودکرد و دیرکرد فرود هواپیما در حالت چند باند گسترش دادند و با ترکیب الگوریتم آنیل شبیه‌سازی به همراه الگوریتم نزول همسایگی متغیر و الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر، مسئله را تا حداکثر اندازه 500 هواپیما و 5 باند حل نمودند. لی و انجی [6] مسئله ALSP را با کمک الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر اصلاح شده با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های زودکرد و دیرکرد، در حالت چند باند حل کردند. آن‌ها در این تحقیق تلاش کردند تا یک عامل جدید تغییر در الگوریتم VNS لحاظ شود. گریش [7] با ترکیب الگوریتم ازدحام ذرات به همراه یک روش جستجوی محلی، توانایی بهره‌برداری الگوریتم را افزایش داد. رودریگوئز دیاز و همکاران [8] مسئله زمانبندی ترکیبی فرود و برخاست هواپیما را در فرودگاه گتویک<sup>2</sup> در حالت دینامیک با هدف حداقل سازی هزینه تاخیرات و یک باند فرود مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها الگوریتم آنیل شبیه‌سازی را برای این مسئله پیشنهاد نمودند. ریاحی و همکاران [9] مسئله زمانبندی فرود و برخاست هواپیما به طور همزمان و با دو زمان جداسازی متفاوت در حالت چند باند با هدف کمینه‌سازی مقادیر وزنی دیرکرد را بررسی نمودند. برای حل مسئله از روش جدیدی که بر پایه دانش ساختاری خاص است استفاده و بجای تصمیم‌گیری تصادفی از تصمیم‌گیری آگاهانه استفاده کردند. برای حل مسئله، آن‌ها نمونه‌ها و پارامترهای لازم را از یک فرودگاه بدست آوردند و در ارزیابی نهایی مشخص شد که این روش بر روش‌های هیوریستیک و متاهیوریستیک برتری دارد. فی [10] در تحقیقی مسئله زمانبندی فرود هواپیماها را با هدف حداقل‌سازی هزینه انحراف از زمان هدف در حالت تک باند مورد بررسی قرار داد. او الگوریتم زمان درجه دوم را پیشنهاد داد و با الگوریتم برنامه‌ریزی خطی مقایسه نمود. در این تحقیق هر دو الگوریتم در یک الگوریتم تکرارشونده بر پایه آنیل شبیه‌سازی قرار داده شدند و نتایج محاسباتی نشان داد که هیورستیک معرفی شده، در زمان یکسان خیلی سریع‌تر به جواب‌هایی با کیفیت بهتر می‌رسد. محمودیان و همکاران [11] با در نظر گرفتن عدم دسترسی به یکی از باندها در بازه زمانی مشخص، مسئله ALSP را با کمک لینگو برای 15 هواپیما و 2 باند

مجاور هم در فاصله عرضی کمتر از 760 متر قرار می‌گیرند. در فرود هواپیماها علاوه بر اطمینان از رعایت حداقل فاصله زمانی ایمن بین دو هواپیمای متوالی که بر روی باند یکسان فرود می‌آیند، باید فاصله زمانی ایمن بین دو هواپیمایی که بر روی دو باند مجاور نیز فرود می‌آیند نیز رعایت گردد. در این تحقیق مسئله زمان‌بندی فرود هواپیماها با در نظر گرفتن اهداف حداقل‌سازی هزینه‌های زودکرد و دیرکرد و همچنین کمینه‌سازی مجموع زمان فرود هواپیماها در حالت چند باند ( توجه به شرایط فاصله عرضی کمتر از 760 متر بین باندها ) معرفی و با استفاده از روش های ریاضی و فرا ابتکاری مورد بهینه‌سازی قرار گرفته است. شکل 2، نحوه رعایت حداقل فاصله جداسازی بین هواپیمایی که بر روی باند یکسان و مجاور فرود می‌آیند را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که حداقل زمان جداسازی بین دو هواپیمای متوالی که بر روی دو باند مجاور هم فرود می‌آیند، کمتر از حداقل زمان جداسازی بین دو هواپیمای متوالی است که بر روی باند یکسان فرود خواهند آمد.



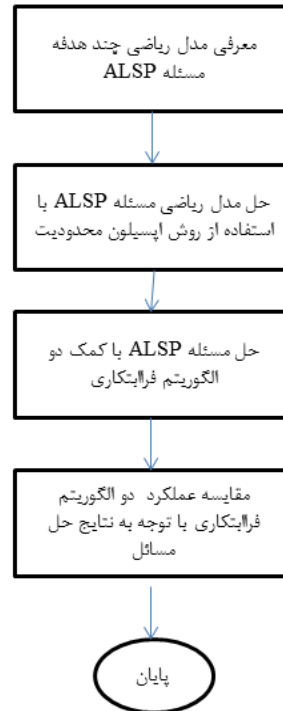
شکل 2- نحوه نمایش زمان جداسازی بین دو هواپیمای متوالی که بر روی باندهای یکسان و مجاور فرود می‌آیند

نمایش جواب در مسئله ALSP، با کمک مثالی شامل 7 هواپیما و 2 باند در قالب ماتریسی  $2 \times N$  نمایش داده می‌شود. در شکل 3، نحوه نمایش جواب مسئله نشان داده شده است.

0/56	0/32	0/87	0/92	0/75	0/41	0/53
1	2	1	1	2	2	1

شکل 3- نمایش جواب

در این ماتریس، بخش اول مربوط به اولویت بندی فرود هواپیماها با توجه به پنجره زمانی آن‌ها می‌باشد. این بخش از یک رشته به طول تعداد هواپیما تشکیل شده است. هر یک از درایه‌های این رشته مربوط به یک هواپیما بوده و مقادیر آن حقیقی و در بازه [0 1] قرار دارند که این مقدار، اولویت فرود هواپیما را با در نظر گرفتن پنجره زمانی آن مشخص می‌کند. هرچه عدد درایه سطر اول بزرگتر باشد نشان دهنده اولویت بالاتر هواپیما در فرود آمدن است. بخش دوم نیز با ابعاد مشابه با بخش اول، مربوط به باند فرود اختصاص داده شده به هر هواپیما است که با مقادیر صحیح نمایش داده می‌شود.



شکل 1 - نمودار بلوکی روند انجام تحقیق

توجه به اختلاف زمان هدف و زمان واقعی فرود ( $x_i$ ) اهمیت بالایی دارد. محدودیت مهم دیگر، رعایت حداقل زمان جداسازی بین هواپیماها می‌باشد. تمام هواپیماها در هنگام پرواز گردبادهایی در پشت سر خود تولید می‌کنند. این گردبادهای تغییر شکل و چرخش نامنظمی دارند و می‌توانند آشفتگی جدی برای هواپیمای عقبی ایجاد کنند. بدین ترتیب به منظور رعایت فاصله جدایی ایمن بین دو هواپیما، حداقل زمان جداسازی با توجه به سایز (کوچک، متوسط و بزرگ) دو هواپیمای متوالی در نظر گرفته می‌شود. در تحقیقات صورت گرفته نشان داده شده است که مسئله زمان‌بندی فرود هواپیما را می‌توان به عنوان یک مسئله زمان‌بندی ماشین‌های موازی در نظر گرفت [16,15].

در اکثر تحقیقات انجام شده در ارتباط با مسئله تک هدفه زمان بندی فرود هواپیما با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های زودکرد و دیرکرد در حالت چند باند، وابستگی بین باندها در نظر گرفته نشده است. حتی در تعداد اندکی از مقالات که وابستگی بین باندها معرفی شده نیز، عملاً در روند حل مسائل توسط روش‌های دقیق و فرا ابتکاری این موضوع مورد توجه قرار نگرفته است. براساس قوانین سازمان بین المللی هوانوردی کشوری، به منظور نشست همزمان دو هواپیما بر روی دو باند مجاور هم لازم است فاصله عرضی بین باندها که حداقل 760 متر است رعایت گردد. این در حالی است که در بسیاری از فرودگاه‌های جهان به دلیل کمبود فضای مناسب جهت ساخت زیربنایی باندها و محوطه عملیاتی فرودگاه‌ها، مقدار مجاز فاصله بین باندها رعایت نمی‌گردد و دو باند

$S_{ij}$  (زمان جداسازی ایمن برای هواپیماهای  $i$  و  $j$  که روی باند یکسان فرود می آیند) و  $t_{ij}$  (زمان جداسازی ایمن برای هواپیمای  $i$  و  $j$  که روی دو باند مجاور هم فرود می آیند) و  $\delta_{ij}$  (اگر هواپیمای  $i$  و هواپیمای  $j$  روی یک باند فرود آیند برابر با 1 و در غیر این صورت برابر با 0 است) در محدودیت شماره (5) نشان داده شده اند. این رابطه نشان می دهد که فاصله بین زمان فرود دو هواپیمای متوالی ( $i$ ) و ( $j$ ) باید با توجه به  $S_{ij}$  و یا  $t_{ij}$  محاسبه گردد.  $M$  یک عدد بزرگ می باشد.

$$\text{MIN } Z = \sum_{i=1}^n (\alpha_i g_i + \beta_i h_i) \quad (1)$$

$$\delta_{ij} \geq \gamma_{ir} + \gamma_{jr} - 1 \quad (6)$$

$$i, j = 1 \dots n \quad i \neq j \quad r = 1 \dots m$$

در رابطه (6)،  $r$  نشان دهنده تعداد باندها می باشد و متغیر  $\gamma_{ir}$  (اگر هواپیمای  $i$  برای فرود به باند  $r$  تخصیص یابد برابر با 1 و در غیر این صورت برابر با 0 است) نیز معرفی شده است. این محدودیت نشان می دهد که اگر هواپیمای  $i$  بر روی باند  $r$  فرود آید و همچنین هواپیمای  $j$  بر روی باند  $r$  فرود آید دو هواپیما بر روی یک باند فرود خواهند آمد.

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

محدودیت شماره (7) بیان می کند که هر هواپیما فقط بر روی یک باند می تواند فرود آید.

$$x_i = T_i - \alpha_i + \beta_i \quad i = 1 \dots n \quad (8)$$

محدودیت شماره (8) مشخص می کند که هر هواپیما یا دچار زودکرد شده است و یا نه دیرکرد. هر دو حالت برای یک هواپیما امکان پذیر نیست.  $T_i$  معرف زمان هدف است.

$$\gamma_{ij}, y_{ij}, \delta_{ij} \in 0, 1 \quad (9)$$

$$i, j = 1 \dots n \quad i \neq j \quad r = 1 \dots m$$

$$x_i, \alpha_i, \beta_i \geq 0 \quad i = 1 \dots n \quad (10)$$

رابطه های (9) و (10) نیز حدود متغیرهای تصمیم را نشان می دهند.

### مدلسازی ریاضی

یکی از هدف هایی که همواره مورد توجه کنترلرها قرار گرفته، نشان دادن هرچه زودتر هواپیماها در باندهای پرواز می باشد. در این تحقیق با اضافه نمودن هدف کمینه سازی مجموع زمان فرود هواپیماها به مدل پایه ای بیسلی و همکاران [2]، مسئله زمان بندی هواپیما به صورت دو هدفه و در حالت چندبند در نظر گرفته شده است. مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط<sup>7</sup> به صورت توابع هدف و محدودیت های زیر خواهد بود:

در رابطه (1)،  $n$  نشان دهنده تعداد هواپیماها،  $\alpha_i$  میزان زودکرد فرود هواپیمای  $i$  و  $\beta_i$  میزان دیرکرد فرود هواپیمای  $i$  است. همچنین  $g_i$  برابر هزینه (جریمه) هر واحد زودکرد و پارامتر  $h_i$  نیز برابر هزینه (جریمه) هر واحد دیرکرد می باشد. در این رابطه هدف حداقل سازی مجموع هزینه های زودکرد و دیرکرد هواپیماها است.

$$\text{MIN } Z = \sum_{i=1}^n (x_i) \quad (2)$$

با توجه به رابطه (2)، متغیر تصمیم  $x_i$  زمان فرود واقعی برای هواپیمای  $i$  را نشان می دهد. در این رابطه هدف حداقل سازی مجموع زمان فرود هواپیماهاست.

$$E_i \leq x_i \leq L_i \quad i = 1 \dots n \quad (3)$$

در رابطه (3)، پارامترهای  $E_i$  و  $L_i$  به ترتیب معرف زودترین زمان فرود هواپیمای  $i$  و دیرترین زمان فرود هواپیمای  $i$  می باشند. این رابطه بیان می کند که هر هواپیما ملزم به فرود در یک بازه زمانی مشخص و منحصر به فرد است.

$$y_{ij} + y_{ji} = 1 \quad i, j = 1 \dots n; i \neq j \quad (4)$$

در محدودیت شماره (4)، اگر هواپیمای  $i$  قبل از هواپیمای  $j$  فرود آید  $y_{ij}$  برابر با 1 و در غیر این صورت برابر با 0 است. این رابطه نشان می دهد که در میان دو هواپیمای ( $j$ ) و ( $i$ )، یا باید هواپیمای  $i$  زودتر فرود آید و یا هواپیمای  $j$ .

$$x_j \geq x_i + S_{ij} \delta_{ij} + t_{ij} (1 - \delta_{ij}) - M y_{ji} \quad (5)$$

$$i, j = 1 \dots n \quad i \neq j$$

### الگوریتم های حل

### الگوریتم MOPSO

الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات (MOPSO) از رفتار اجتماعی حیوانات و هوش جمعی الگو می‌گیرد و ایده اصلی آن به اشتراک‌گذاری اطلاعات بین اعضای گروه می‌باشد که توسط کونلو در سال 2004 معرفی شده است [20]. در این الگوریتم هر پاسخ، با عنوان ذره شناخته می‌شود و حرکت ذرات برای یافتن پاسخ‌های جدیدتر بر اساس یک قاعده و اصل در فضایی که از تعداد مشخصی ذرات تشکیل شده است ادامه می‌یابد. در نهایت با توجه به تجربیات فردی و جمعی ذرات که منجر به تبادل اطلاعات و ایجاد همگرایی اعضای جمعیت خواهد شد، نزدیکترین جواب بهینه پیدا می‌شود. در این روش معادله سرعت، ضامن حرکت ذرات به سمت ناحیه بهینه است. این معادله معمولاً بر اساس سه عنصر اصلی مولفه شناختی Pbest، مولفه جمعی Gbest و سرعت ارائه می‌شود.

### عملگر تقاطع و جهش

در این پژوهش از سه نوع عملگر تقاطع استفاده شده است بطوریکه در هر مرحله اجرای تقاطع بر روی جواب‌های والد، ابتدا از میان این سه نوع، یکی به شکل تصادفی انتخاب می‌شود. در نوع اول که با عنوان تقاطع یکنواخت شناخته می‌شود از یک ماتریس راهنما جهت اعمال تقاطع بهره گرفته خواهد شد. ابعاد این ماتریس،  $2^*N$  و مقادیر درایه‌های آن برابر صفر و یک می‌باشند. این درایه‌ها که متناظر با درایه‌های والدین هستند، به صورت تصادفی تولید می‌شوند. در این روش درایه‌های ماتریس راهنما تعیین می‌کنند که کدام ژن از والد اول و کدام ژن از والد دوم انتقال یابد. مطابق شکل 4، برای تولید فرزند اول، درایه‌هایی از والد 1 انتقال می‌یابند که درایه‌های متناظر با آن‌ها در ماتریس راهنما برابر صفر و درایه‌هایی از والد 2 منتقل می‌شوند که درایه‌های متناظر با آن‌ها در ماتریس راهنما برابر 1 باشند. برای تولید فرزند دوم نیز همین روش به صورت عکس اجرا می‌شود. لازم به ذکر است که این تقاطع بر روی هر دو سطر جواب اعمال می‌شود.



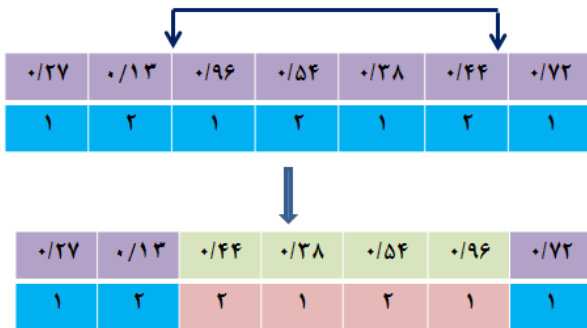
شکل 4 - فرآیند عملگر تقاطع یکنواخت

در برخی از مسائل عملی بهینه‌سازی، تعدادی از متغیرهای مسئله مورد نظر پیوسته و تعدادی دیگر گسسته هستند. همچنین فضای جستجو در این مسائل گاهی نامحدوب و یا ناپیوسته است. این دو عامل در کنار عوامل دیگر سبب می‌شوند که استفاده از روش‌های استاندارد بهینه‌سازی برای حل این‌گونه مسائل، ناکارآمد و پرهزینه باشد. یک راه ممکن برای حل این مسائل پیچیده استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری است [17]. از انواع این الگوریتم‌ها می‌توان به الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی تراکم ذرات اشاره کرد. این الگوریتم‌ها هم در حالت تک هدفه و هم در حالت چند هدفه بودن مسئله کاربرد دارند. در حالت تک هدفه به دنبال بدست آوردن بهترین جواب از بین جواب‌های موجود هستیم، در حالی‌که برای حل مسائل چند هدفه با یک مجموعه از جواب‌های نامغلوب سروکار خواهیم داشت. از بین این مجموعه جواب‌های متناهی، جوابی مناسب است که عملکرد مطلوبی نسبت به همه اهداف داشته باشد. برای حل مسائل چند هدفه از الگوریتم‌های فراابتکاری مبتنی بر رویکرد پارتو می‌توان بهره گرفت. در این تحقیق نیز از الگوریتم‌های ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب<sup>8</sup> (NSGA-II) و بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات<sup>9</sup> (MOPSO) برای حل مسئله ALSP استفاده شده است. بدین ترتیب مروری بر تعاریف الگوریتم‌های تکاملی چند هدفه NSGA-II و MOPSO خواهیم داشت و سپس به بیان عملکرد تقاطع و جهش در این مسئله و تنظیم پارامتر فاکتورهای هر الگوریتم خواهیم پرداخت. همچنین در ادامه یک روش جدید ابتکاری با عنوان تعادل‌سازی برای بهبود کیفیت جواب‌های مسئله معرفی خواهیم کرد.

### الگوریتم NSGA-II

الگوریتم NSGA-II که یک الگوریتم تکاملی چند هدفه نخبه‌گرا است، توسط دب و همکارانش [18] ارائه شد. این الگوریتم علاوه بر داشتن یک استراتژی مناسب برای نگهداری جواب‌های برتر، از مرتب‌سازی نامغلوب<sup>10</sup> و فاصله ازدحامی<sup>11</sup> به ترتیب به منظور همگرایی و همچنین حذف جواب‌های نامناسب برای دستیابی به جواب‌های بهتر استفاده می‌کند [19]. الگوریتم NSGA-II، در ابتدا یک جمعیت به نام pop به اندازه npop به صورت کاملاً تصادفی تولید می‌کند و سپس جمعیت تولید شده از دید توابع هدف ارزیابی می‌گردند. مبنای انتخاب و گزینش اعضای جمعیت در روش NSGA-II بر اساس دو عامل رتبه صاف نامغلوب و فاصله ازدحامی می‌باشد. دو عضو به طور تصادفی انتخاب می‌شوند و انتخاب عضو با رتبه بهتر (عدد کوچکتر رتبه نشان دهنده رتبه بهتر است) مبنای انتخاب قرار می‌گیرد. در صورتی‌که هر دو عضو از یک رتبه در صف نامغلوب برخوردار باشند، هرکدام که فاصله ازدحامی بیشتری را دارا بود انتخاب می‌شود.

عملگر جهش وجود دارد که در این تحقیق از نوع وارون<sup>12</sup> استفاده شده است. در این نوع جهش که بر روی هر دو سطر جواب اعمال می‌شود، ابتدا دو درایه به تصادف انتخاب می‌گردند. دو درایه منتخب و همچنین درایه‌های بین آن‌ها، به صورت برعکس تغییر می‌یابند. در شکل 7، نحوه عملکرد این عملگر نشان داده شده است.



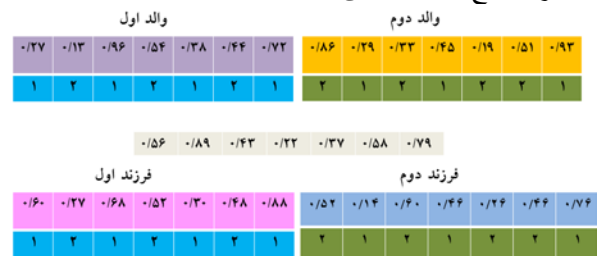
شکل 7 - فرآیند عملگر جهش وارون

در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (MOPSO)، هر پاسخ، با عنوان ذره معرفی می‌شود، همانطور که در الگوریتم ژنتیک به هر پاسخ کروموزم گفته می‌شود. نکته قابل توجه پیوسته بودن الگوریتم MOPSO می‌باشد که موجب می‌شود نمایش جواب نیز به حالت پیوسته تغییر نماید. در نمایش جواب مسئله ALSP، اعداد سطر اول به دلیل داشتن ماهیت حقیقی، به صورت پیوسته هستند ولی سطر دوم جواب که مربوط به تخصیص باند است باید اعداد صحیح باشند. به همین ترتیب برای ایجاد اعداد صحیح در سطر دوم نمایش جواب در این الگوریتم، اعداد حقیقی در بازه [1 2] تولید می‌کنیم سپس اعداد حقیقی کوچکتر از 0/5 به یک و اعداد بزرگتر از 0/5 به دو رند می‌شوند.

### روش تعادل‌سازی

در این تحقیق یک روش تعادل‌سازی ابتکاری برای بهبود جواب‌ها مورد استفاده قرار گرفته است، با اجرای الگوریتم‌های فراابتکاری معرفی شده، این روش در مرحله اول بر روی جواب‌های جمعیت اولیه و بار دیگر بر روی جواب‌های جمعیت نهایی اعمال می‌گردد. بدین ترتیب بکارگیری این روش کمک می‌کند تا الگوریتم‌ها به جواب‌هایی بهتر و در زمان محاسباتی کمتر دست یابند. این روش شامل دو بخش می‌باشد. در بخش اول، تابع هدف کمینه‌سازی مجموع زمان فرود هواپیماها و در بخش دوم، تابع هدف کمینه‌سازی مجموع هزینه زودکرد و دیرکرد هواپیماها مد نظر قرار گرفته است. در این روش ابتدا در بخش اول هواپیماها در زودترین زمان ممکن زمانبندی می‌شوند سپس در بخش دوم، با جایجایی زمان فرود هواپیماها به سمت زمان هدفشان، به یک زمانبندی بهتر دست می‌یابیم.

نوع دوم تقاطع بکار گرفته شده، تقاطع محدب می‌باشد. این نوع تقاطع تنها بر روی بخش اول ماتریس که پیوسته است اعمال می‌شود. بدین‌صورت که یک ماتریس تصادفی با ابعاد  $1*N$  تولید شده و مقادیر آن به صورت تصادفی و با توزیع یکنواخت در بازه [0 و 1] تولید خواهد شد. برای محاسبه هر یک از درایه‌ها در کروموزوم‌های فرزند نیز از رابطه‌های (11) و (12) استفاده می‌شود. در این روابط  $F_{ij}^1$  و  $F_{ij}^2$  فرزندان،  $P_{ij}^1$  و  $P_{ij}^2$  والدین و  $Rand_{ij}$  نیز مربوط به مقادیر درایه‌های ماتریس  $1*N$  می‌باشند. به‌طور مثال نحوه محاسبه درایه اول از فرزند 1، از رابطه 11 بدست می‌آید. در این رابطه  $P_{ij}^1$  و  $P_{ij}^2$  به ترتیب برابر 0/27 و 0/86 و مقدار  $Rand_{ij}$  برابر 0/56 می‌باشند. با قرارگرفتن مقادیر در رابطه، مقدار درایه فرزند 1 برابر 0/60 بدست می‌آید. مقادیر دیگر درایه‌ها نیز به همین صورت محاسبه می‌گردند. در شکل 5 نحوه فرآیند عملگر تقاطع محدب نشان داده شده است.

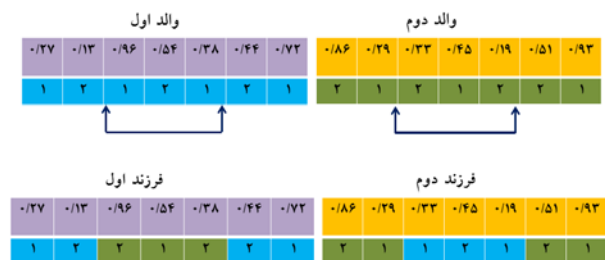


شکل 5 - فرآیند عملگر تقاطع محدب

$$F_{ij}^1 = P_{ij}^1 + Rand_{ij} * (P_{ij}^2 - P_{ij}^1) \quad (11)$$

$$F_{ij}^2 = P_{ij}^2 + Rand_{ij} * (P_{ij}^1 - P_{ij}^2) \quad (12)$$

نوع سوم عملگر تقاطع، تقاطع دو نقطه‌ای می‌باشد که تنها بر روی سطر دوم اعمال می‌گردد. در این نوع تقاطع دو والد انتخاب شده و سپس دو محل به طور تصادفی بر روی هر کدام از آن‌ها مشخص می‌شود. کروموزوم از این نقاط شکسته شده و ترکیب می‌شوند. در شکل 6، نحوه اجرای عملگر تقاطع دو نقطه‌ای نمایش داده شده است.



شکل 6 - فرآیند عملگر تقاطع دو نقطه‌ای

قبل از این‌که کروموزوم‌ها به نسل بعدی بروند، یک تغییر ناگهانی در ژن آن‌ها به وجود می‌آید که این تغییر را با عنوان عملگر جهش معرفی می‌کنند. انواع مختلفی از

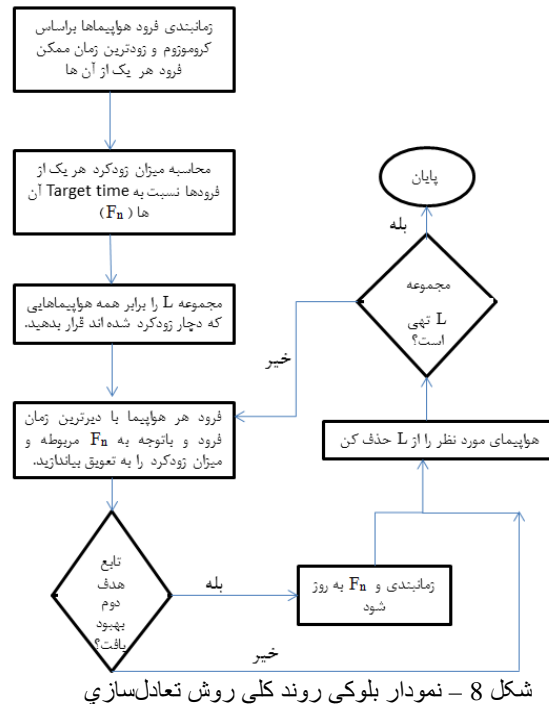
هواپیما در جدول 1 مشخص شده‌اند. در این جدول،  $E_i$  برابر زودترین زمان فرود،  $L_i$  برابر دیرترین زمان فرود،  $T_i$  برابر زمان هدف،  $g_i$  و  $h_i$  به ترتیب جریمه زودکرد و دیرکرد فرود هواپیما می‌باشند. همچنین  $S_{ij}$  برابر حداقل زمان جداسازی بین دو هواپیمای متوالی است که بر روی باند یکسان فرود می‌آیند (جدول 2) و  $t_{ij}$  نیز برابر حداقل زمان جداسازی دو هواپیمای متوالی است که بر روی دو باند مجاور هم فرود می‌آیند (جدول 3) می‌باشند (جدول 2 و 3 بر حسب ناتیکیال مایل می‌باشند). برای زمانبندی هواپیماها طبق گام اول، ابتدا کوچکترین مقدار  $L_i$  در جدول شماره 1 را مشخص نموده و برابر  $t$  قرار می‌دهیم (در این مثال برابر  $t=12$  است). هواپیماهایی که  $t=12$ ، در پنجره زمانی آن‌ها قرار گرفته است شامل هواپیماهای شماره 1، 2، 6، می‌باشند. با بررسی مقادیر اولویت آن‌ها در نمایش جواب، مشخص می‌شود هواپیمای شماره 1 اولین هواپیمایی است که در زودترین زمان خود بر روی باند 1، فرود خواهد آمد. از میان دو هواپیمای شماره 2 و 6 نیز اولویت با هواپیمای شماره 6 خواهد بود، بنابراین هواپیمای شماره 6، دومین هواپیمایی است که بر روی باند 2 می‌نشیند. طبق جدول 1، زودترین زمان فرود هواپیمای شماره 6، زمان 7 است که بدلیل وجود حداقل زمان جداسازی بین هواپیماهای شماره 1 و 6 (طبق جدول 3، این مقدار 3 می‌باشد)، این هواپیما باید در زمان 8 فرود آید. و سرانجام هواپیمای شماره 2، با رعایت فاصله 8 واحد زمانی نسبت به هواپیمای شماره 6 (طبق جدول 2)، بر روی باند 2 فرود خواهد آمد. در این مرحله تمامی هواپیماهایی که  $t=12$  در پنجره زمانی آن‌ها وجود داشته به صورت ایمن در زودترین زمان ممکن فرود آمده‌اند. برای زمانبندی هواپیماهای دیگر نیز مقدار  $t$  باید به روز گردد. برای تغییر  $t$  به مقدار جدید باید به زمان فرود آخرین هواپیمای فرود آمده توجه نمود و سپس مقدار آن را برابر  $t$  قرار داد. از بین 3 هواپیمای شماره 1 و 2 و 6، هواپیمای شماره 2، آخرین هواپیمایی است که در زمان 16 فرود می‌آید. بنابراین مطابق روند مرحله قبل، تمام هواپیماهایی که  $t=16$ ، در پنجره زمانی آن‌ها قرار گرفته است انتخاب و با توجه به اولویت‌شان فرود خواهند آمد. بدین ترتیب تمامی هواپیماهای موجود زمانبندی می‌شوند و در زودترین زمان ممکن فرود خواهند آمد. در شکل شماره 9، نحوه زمانبندی فرود هواپیماها در زودترین زمان فرودشان نمایش داده شده است. محور عمودی نشان دهنده شماره باند و محور افقی معرف واحد زمان است.

برای محاسبه میزان هزینه‌های زودکرد و دیرکرد هواپیماهای زمانبندی شده طبق شکل 9، ابتدا میزان تاخیر و تجعیل هر هواپیما مشخص شده و سپس در واحد هزینه (جریمه) دیرکرد و یا زودکرد آن هواپیما ضرب می‌شود. در نهایت مجموع هزینه‌های دیرکرد و زودکرد گزارش می‌گردد. به طور مثال هواپیمای شماره 7، 1 واحد

در بخش اول روش تعادل‌سازی، تلاش می‌شود تا تمامی هواپیماها در زودترین زمان ممکن، فرود ایمن داشته باشند. در این راستا 3 گام صورت خواهد پذیرفت: گام اول، برای تعیین اولویت فرود هواپیماها، ابتدا یک زمان معین ( $t$ ) در نظر گرفته می‌شود سپس تمامی  $L_i$  (دیرترین زمان فرود) هواپیماهای موجود مورد بررسی قرار می‌گیرند و کوچکترین مقدار آن‌ها انتخاب شده و برابر  $t$  قرار داده می‌شود.

گام دوم، تمام هواپیماهایی که  $t$  در پنجره زمانی آن‌ها قرار گرفته است انتخاب می‌شوند.

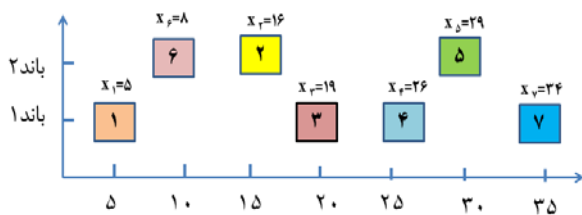
گام سوم، از بین هواپیماهای منتخب، هر هواپیمایی که بیشترین اولویت (بیشترین مقدار تصادفی) را داراست انتخاب شده و در زودترین زمان ممکن فرود می‌آید. بعد از آن که چیدمان هواپیماهای منتخب تمام شد، مقدار  $t$  بر اساس زمان آخرین هواپیمای موجود به روز می‌شود. این روند ادامه پیدا می‌کند تا زمانی که تمامی هواپیماها در زودترین زمان ممکن فرود آیند. روند کلی این روش ابتکاری در قالب یک نمودار بلوکی در شکل 8 به نمایش در آمده است. در این نمودار  $F_n$  نشان دهنده میزان زودکرد هر هواپیما و  $L$  نیز شامل تمام هواپیماهایی است که بعد از اعمال تابع هدف اول، دچار زودکرد شده‌اند. منظور از تابع هدف دوم، تابع هدف مینیمم سازی هزینه‌های دیرکرد و زودکرد می‌باشد.



شکل 8 - نمودار بلوکی روند کلی روش تعادل‌سازی

در همین راستا به منظور درک بیشتر از نحوه چیدمان هواپیماها، مثال شماره (1) بیان می‌شود. در این مثال، اطلاعات مسئله شامل 7 هواپیمای موجود و 2 باند در دسترس می‌باشد. اطلاعات مربوط به داده‌های پنجره زمانی

هواپیما	1	0	3	3	3	3	3
1	0	3	3	3	3	3	3
2	3	0	3	3	3	3	3
3	3	3	0	3	3	3	3
4	3	3	3	0	3	3	3
5	3	3	3	3	0	3	3
6	3	3	3	3	3	0	3
7	3	3	3	3	3	3	0



شکل 9 - زمان بندی هواپیماها در زودترین زمان ممکن فرود

از این رو هواپیماهایی که در زودترین زمان فرود ( $E_i$ ) خود فرود آمده‌اند، واحد به واحد به سمت زمان هدفشان ( $T_i$ ) انتقال می‌یابند. در هر واحد انتقال به سمت راست، مجموع هزینه‌های زودکرد و دیرکرد و هواپیماها محاسبه شده و با حالت قبل از انتقال مقایسه می‌گردند. اگر مقدار هزینه بدست آمده کمتر از حالت قبل از انتقال به سمت راست باشد، چیدمان هواپیماها تغییر می‌کند، در غیر این صورت چیدمان آن‌ها تغییری نمی‌یابد. به منظور درک نحوه اجرای بخش دوم روش تعادل‌سازی، این روش را بر روی ادامه مثال (1) پیاده سازی خواهیم کرد.

با توجه به مثال (1) در بخش اول روش تعادل‌سازی، تمامی هواپیماها با در نظر گرفتن محدودیت‌های مورد نظر، در زودترین زمان فرودشان فرود آمده‌اند. جهت اجرای بخش دوم روش تعادل‌سازی، از آخرین هواپیمای فرود آمده شروع کرده و این روش یک به یک بر روی همه هواپیماها اعمال می‌گردد. هواپیمای شماره 7، آخرین هواپیمایی است که در واحد زمانی 35 فرود آمده است بنابراین از هواپیمای شماره 7 شروع می‌کنیم ولی بدلیل آن‌که این هواپیما از زمان هدفش عبور کرده، جابجایی به راست بر روی آن اعمال نمی‌شود. هواپیمای شماره 5، دومین هواپیمایی است که مورد بررسی قرار می‌گیرد. زمان هدف آن 32 و زمان فرود آن 29 می‌باشد، بنابراین این هواپیما 3 واحد زمانی زودکرد دارد. با جابجایی هواپیما به سمت راست، زمان فرود این هواپیما به واحد زمانی 30 تغییر خواهد کرد. با این جابجایی میزان مجموع هزینه‌های زودکرد و دیرکرد به 182 تقلیل می‌یابد. این

زمانی از زمان هدفش دیرکرد دارد، از طرفی هزینه هر واحد دیرکرد هواپیمای شماره 7 برابر 15 می‌باشد. بنابراین هزینه دیرکرد این هواپیما نیز برابر 15 است.

جدول 1 - داده های پنجره زمانی هواپیماها

شماره هواپیما	$E_i$	$T_i$	$L_i$	$g_i$	$h_i$
1	5	8	12	15	15
2	5	19	20	10	10
3	15	19	40	15	15
4	18	27	58	10	10
5	25	32	45	10	15
6	7	17	26	8	8
7	20	33	63	5	5

جدول 2- داده های حداقل زمان جداسازی بین دو هواپیمای متوالی که بر روی باند یکسان فرود می‌آیند ( $S_{ij}$ )

شماره هواپیما	1	2	3	4	5	6	7
1	0	8	8	5	8	8	8
2	8	0	5	12	10	8	10
3	8	8	0	5	8	10	12
4	5	12	8	0	8	12	8
5	8	10	8	8	0	12	10
6	7	8	10	12	12	0	8
7	8	10	12	8	10	8	0

به همین ترتیب هزینه دیرکرد و یا زودکرد هواپیماهای زمانبندی شده شکل 9 تا انتها محاسبه شده و مجموع هزینه‌های زودکرد و دیرکرد آن‌ها برابر مقدار 192 و مجموع زمان فرود هواپیماها برابر 137 بدست می‌آید. بخش دوم روش تعادل‌سازی، به منظور تعادل برقرار کردن میان توابع هدف کمینه‌سازی مجموع زمان فرود هواپیماها و کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های زودکرد و دیرکرد آن‌ها استفاده می‌شود.

در این بخش تلاش می‌شود تا با انتقال زمان فرود هواپیماهای زمانبندی شده در بخش اول به زمان هدفشان مجموع هزینه‌های زودکرد و دیرکرد فرود هواپیماها به میزان قابل توجهی کاهش یابد.

جدول 3- داده های حداقل زمان جداسازی بین دو هواپیمای متوالی که بر روی دو باند مجاور هم فرود می‌آیند ( $t_{ij}$ )

شماره	1	2	3	4	5	6	7
-------	---	---	---	---	---	---	---



هدفه استفاده نمود. بدین ترتیب از شاخص MID (فاصله از نقطه ایده آل) استفاده می‌نماییم. این شاخص از جنس "هرچه کمتر بهتر" می‌باشد.

در این تحقیق با توجه به سایز مسائل که در دو دسته بزرگ و کوچک دسته‌بندی شده‌اند، تنظیم پارامتر در هر دو دسته انجام گرفته است. برای تنظیم پارامتر فاکتورهای مورد نظر هر دو الگوریتم، سه سطح در نظر گرفته شد. سطوح مورد بررسی برای سایز کوچک و بزرگ الگوریتم NSGA-II در جداول 4 و 5 و برای الگوریتم MOPSO در جداول 6 و 7 نشان داده شده‌اند. در شکل 11 که مربوط به سایز کوچک الگوریتم NSGA-II است، سه سطح برای فاکتور Popsiz با عنوان A(1)، A(2)، A(3) و برای فاکتور Crossover با عنوان B(1)، B(2)، B(3) نمایش داده شده است. در شکل 11 نیز که مربوط به سایز کوچک الگوریتم MOPSO است، سطوح فاکتور Popsiz با A(1)، A(2)، A(3) و سطوح فاکتور V1 با B(1)، B(2)، B(3) و سطوح فاکتور V2 با C(1)، C(2)، C(3) به نمایش در آمده‌اند. بعد از تعیین تعداد فاکتورهای مورد بررسی و تعداد سطوح آنها جهت تنظیم پارامتر هر دو الگوریتم توسط روش تاگوچی، مشخص شد که تعداد آرایه‌های متعامد انتخاب شده باید حداقل 9 سطر داشته باشند. هر بار نیز با توجه به اعداد هر سطر ارتوگونال، سطوح فاکتورها انتخاب شده و مثال اجرا گردید. سپس نتایج بدست آمده با روش RPD بی مقیاس شده و در نهایت با کمک تحلیل تاگوچی مشخص شد که هر فاکتور در کدام سطح بهتر می‌باشد. در اشکال 11 و 12، متوسط نرخ سیگنال به اغتشاش برای هر فاکتور نشان داده شده است.

جدول 4 - تنظیم پارامتر سایز کوچک الگوریتم NSGA-II

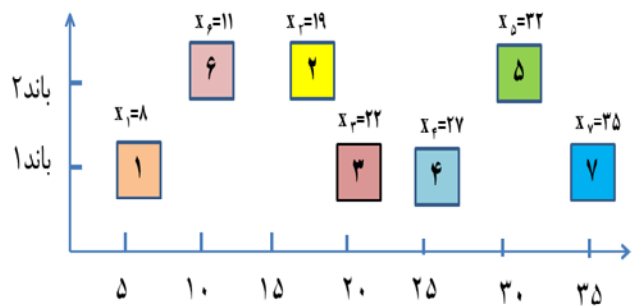
	سطح			بهترین مقدار فاکتور
	اول	دوم	سوم	
Popsiz	100	120	150	150
Crossover	0/8	0/7	0/6	0/7

جدول 5 - تنظیم پارامتر سایز بزرگ الگوریتم NSGA-II

	سطح			بهترین مقدار فاکتور
	اول	دوم	سوم	
Popsiz	300	400	500	400
Crossover	0/9	0/8	0/7	0/7

کاهش مقدار هزینه نشان می‌دهد تا این مرحله اجرای این روش به صرفه بوده است.

بار دیگر، با اعمال این روش هواپیمای شماره 5، یک واحد زمانی به سمت راست جابجا شده و زمان فرود آن می‌شود. در این چیدمان نیز مجموع هزینه‌ها برابر 31 بدست می‌آید. سرانجام با انتقال زمان فرود هواپیمای شماره 5 به زمان هدفش، این هواپیما به موقع فرود آمده و هزینه مربوط به زودکرد و دیرکرد آن صفر می‌شود. نکته قابل توجه وجود حداقل زمان جداسازی بین دو هواپیمای شماره 5 و 7 می‌باشد که در این مثال برابر 3 در نظر گرفته شده است (مطابق جدول 3). در نظر گرفتن این پارامتر باعث می‌شود تا با انتقال هواپیمای شماره 5 به زمان هدفش، هواپیمای شماره 7 نیز جهت رعایت حداقل زمان جداسازی یک واحد به سمت راست جابجا گردد. در این حالت مجموع هزینه‌های زودکرد و دیرکرد چیدمان برابر 162 می‌شود. این روند برای تمامی هواپیماها محاسبه شده و در نهایت چیدمان شکل 10، با مجموع هزینه‌های زودکرد و دیرکرد 113 و مجموع زمان فرود 154 بدست می‌آید. این فرآیند نشان می‌دهد که با اجرای روش تعادل‌سازی مقدار هزینه‌ها از 192 به 113 کاهش یافته است. از طرفی با کاهش هزینه‌ها، مجموع زمان پرودها از 137 به 154 افزایش داشته‌اند.



شکل 10 - زمان‌بندی هواپیماهای مثال 1

### تنظیم پارامتر

انتخاب مقادیر مناسب پارامترهای الگوریتم‌ها تاثیر چشم‌گیری در عملکرد بهتر آنها خواهد داشت. یکی از روش‌های تعیین مقادیر فاکتورها، استفاده از روش تاگوچی است. این روش که یکی از روش‌های بهبود کیفیت می‌باشد، و جهت کاهش تعداد آزمایشات از طرح عمل‌های جزئی یا آرایه‌های متعامد (ارتوگونال) استفاده می‌کند. فاکتورها در روش تاگوچی به دو دسته قابل کنترل و غیر قابل کنترل (اغتشاش) دسته بندی می‌شوند. از آنجا که کنترل مستقیم روی فاکتورهای غیر قابل کنترل وجود ندارد، روش تاگوچی تاثیر فاکتورهای غیر قابل کنترل را کاهش داده و سطح بهینه‌ای از فاکتورهای قابل کنترل را به منظور افزایش کارایی الگوریتم تعیین می‌نماید. در این تحقیق با توجه به چند هدفه بودن ماهیت مسئله، باید از شاخص‌های معمول بررسی کیفیت جواب‌های مسائل چند

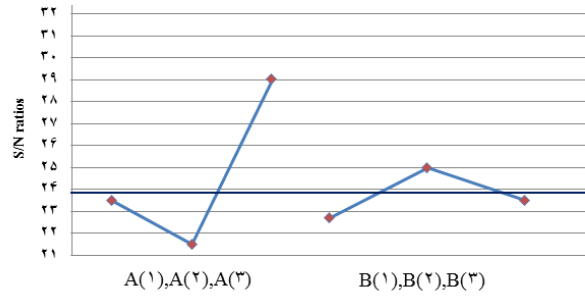
نتایج آن‌ها گزارش می‌شوند. سپس با توجه به شاخص‌های در نظر گرفته شده عملکرد دو الگوریتم فراابتکاری چند هدفه در مقام مقایسه و ارزیابی قرار می‌گیرند.

### روش اپسیلون محدودیت

یکی از روش‌های دقیق بدست آوردن جواب‌های پارتوی بهینه استفاده از روش اپسیلون محدودیت است. این روش با انتقال تمامی توابع هدف به محدودیت‌ها به جز یکی از آن‌ها در هر مرحله، مسئله را حل می‌نماید. در ابتدا نقطه ابتدایی و انتهایی لبه پارتو که بهترین مقادیر هر تابع هستند بدست می‌آید و سپس بازه بین این دو مقدار بهینه توسط مقداری به نام اپسیلون، به تعداد مشخصی تقسیم بندی می‌شوند. یک تابع هدف را در نظر گرفته و هربار با کم کردن مقدار اپسیلون از آن مقدار تابع هدف دیگر بدست می‌آید و بدین صورت لبه اول پارتو تعیین می‌گردد.

در این بخش 5 مسئله سایز کوچک تولید و به روش اپسیلون محدودیت با کمک نرم افزار Lingo9 حل شده و نتایج آن‌ها در جدول 8 گزارش شده است. در این جدول اطلاعات مربوط به مسائل قرار داده شده است که در آن ستون اول شامل مسائل تعریف شده، ستون دوم شامل تعداد هواپیماها، ستون سوم شامل تعداد باندهای مورد بررسی و ستون چهارم شامل تعداد نقاط پارتوی بدست آمده از این روش با توجه به مقدار اپسیلون منحصر بفرد هر مسئله می‌باشد. همچنین ستون پنجم نیز شامل مقادیر تابع هدف اول و دوم می‌باشند (عدد اول از سمت چپ مقدار تابع هدف اول و عدد دوم مقدار تابع هدف دوم است). در نهایت ستون ششم شامل مقادیر MID برای هر مسئله می‌باشد که ناشی از اطلاعات خروجی روش اپسیلون محدودیت است. در شکل 13، نقاط پارتوی لبه‌ی اول مسئله 5 نشان داده شده است. با توجه به این شکل متوجه خواهیم شد که با کاهش مقادیر تابع هدف دوم، مقادیر تابع هدف اول افزایش می‌یابد و این موضوع حاکی از تناقض بین اهداف است. برای مثال‌های سایز کوچک تناقض بین اهداف توسط روش اپسیلون محدودیت بررسی شد.

با حل مسائل به روش اپسیلون محدودیت، مشخص شد که با افزایش اندازه مسئله، زمان حل مسائل نیز افزایش می‌یابد و از طرفی بدلیل آن‌که مسئله ALSP جز مسائل NP-hard محسوب می‌شود، حل آن با استفاده از روش‌های ریاضی در یک زمان منطقی و در سایز بزرگ امکان‌پذیر نیست به همین ترتیب بهتر است که برای حل مسائل با سایزهای بزرگ از روش‌های فراابتکاری استفاده گردد. در بخش بعدی به حل مسائل با کمک روش‌های فراابتکاری خواهیم پرداخت.



شکل 11 - متوسط نرخ S/N برای فاکتورهای الگوریتم NSGA-II (سایز کوچک)

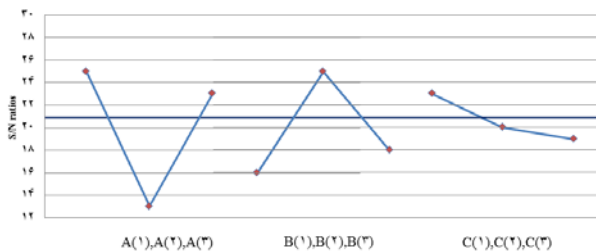
نکته قابل ذکر در الگوریتم MOPSO وجود دو فاکتور سرعت  $V1$  و  $V2$  می‌باشد. در نظر گرفتن دو سرعت خارجی در این مسئله بدین دلیل است که سطر اول ماتریس جواب به صورت عدد حقیقی است و سطر دوم مقادیر عدد صحیح است. بنابراین برای حرکت ذرات باید دو مقدار جداگانه سرعت در نظر گرفت. بدین ترتیب مقدار حداکثر سرعتی بین صفر و یک برای سطر اول و اعداد صحیح برای سطر دوم در نظر گرفته شد.

جدول 6 - تنظیم پارامترهای سایز کوچک الگوریتم MOPSO

	سطح اول	سطح دوم	سطح سوم	بهترین مقدار فاکتور
Popsize	120	150	180	120
V1	0/3	0/5	0/7	0/5
V2	2	3	4	2

جدول 7 - تنظیم پارامترهای سایز بزرگ الگوریتم MOPSO

	سطح اول	سطح دوم	سطح سوم	بهترین مقدار فاکتور
Popsize	400	500	600	600
V1	0/3	0/5	0/7	0/7
V2	1	2	3	1



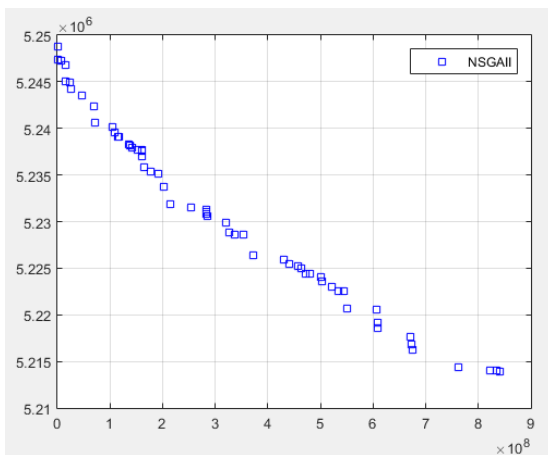
شکل 12 - متوسط نرخ S/N برای فاکتورهای الگوریتم MOPSO (سایز کوچک)

### ارزیابی عددی

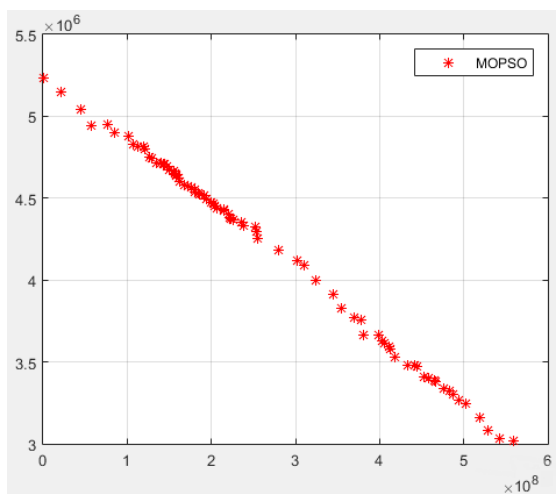
در این بخش ابتدا به منظور اعتبارسنجی مدل ریاضی مسائلی در سایز کوچک توسط روش اپسیلون محدودیت حل می‌شوند و همچنین مسائلی در سایز کوچک و بزرگ توسط الگوریتم‌های فراابتکاری معرفی شده حل گردیده و

شاخص را برای کل نتایج الگوریتم‌ها نشان می‌دهد. برای برنامه‌نویسی الگوریتم‌های مورد استفاده در این تحقیق از نرم افزار MATLAB-12015a استفاده شده است. جهت حل مسائل نیز از کامپیوتری با مشخصات سرعت پردازنده 2/5 گیگاهرتز و حافظه 4 گیگابایت استفاده نمودیم.

در بخش قبل، توسط شکل 13 که نشان دهنده نمودار پارتوی بدست آمده با روش اپسیلون محدودیت است، نشان داده شد که اهداف در تناقض با یکدیگر می‌باشند. در همین راستا در جهت بررسی عملکرد الگوریتم‌ها، نمودارهای پارتوی حاصل از حل مسائل توسط الگوریتم‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفتند. برای نمونه، نمودار جواب‌های پارتو بدست آمده از حل مسئله شماره 22 توسط دو الگوریتم NSGA-II و MOPSO در اشکال 14 و 15 به نمایش در آمده است.

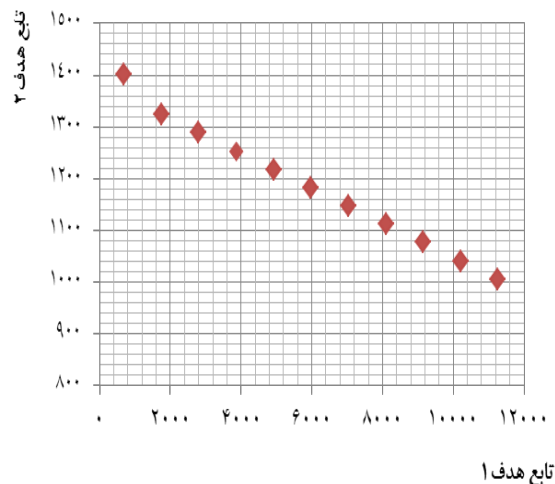


شکل 14 - مجموعه‌های پارتو تقریبی به دست آمده الگوریتم NSGA-II برای مثال 22



شکل 15 - مجموعه‌های پارتو تقریبی به دست آمده الگوریتم MOPSO برای مثال 22

### نتایج آماری



شکل 13 - لبه‌ی پارتوی بدست آمده از روش اپسیلون محدودیت در مسئله 5 (15 هواپیما و 1 باند)

### نتایج الگوریتم‌های فراابتکاری

جهت پیاده‌سازی الگوریتم‌های پیشنهادی توسعه داده شده برای مسئله چندهدفه ALSP، 22 مسئله در دو سایز کوچک و بزرگ در نظر گرفته شده است. این مثال‌ها از مجموعه مثال‌های موجود در ادبیات تحقیق و کتابخانه‌ای [21] استفاده شده است. لازم به ذکر است مقادیر داده‌های مربوط به حداقل زمان جداسازی دو هواپیما بر روی دو باند مختلف ( $t_{ij}$ ) تولید شده‌اند. و در جدول 9، اطلاعات مربوط به این مسائل که شامل شماره مسائل، تعداد هواپیماها و تعداد باند فرود و همچنین نتایج حاصل از الگوریتم‌های NSGA-II و MOPSO می‌باشد، بیان شده است. نتایج با توجه به شاخص‌های تعداد جواب پارتو 13 (NPS)، شاخص فاصله از جواب ایده‌آل 14 (MID)، شاخص فاصله گذاری 15 (SM) و شاخص نرخ دستیابی همزمان به دو تابع هدف 16 (RAS) گزارش شده است. مقدار شاخص NPS بیانگر تعداد جواب‌های بهینه پارتو هستند. شاخص MID برای محاسبه میانگین فاصله جواب‌های پارتو از نقطه ایده‌آل استفاده می‌شود و هرچه کمتر باشد کارایی الگوریتم بیشتر است. شاخص SM یکنواختی توزیع‌های پارتو در فضای حل را نشان می‌دهد و هرچه مقدار آن کمتر باشد نشان‌دهنده مجموعه پارتوی بهتری است. در شاخص RAS جواب‌هایی مناسب هستند که یک توازن قابل قبول بین اهداف مسئله را نشان دهند، از جمله خصوصیات این روش می‌توان به این نکته اشاره کرد که وجود جواب‌هایی در امتداد یک محور که مقدار یک هدف در آن مناسب و مقدار هدف دیگر نامناسب باشد (جواب‌های نامتوازن) باعث افزایش در مقدار معیار خواهد شد.

مقادیر شاخص‌های قابل مشاهده در این جدول میانگین پنج مرتبه اجرای هر الگوریتم برای هر مسئله می‌باشد. یعنی ارزش شاخص برای هر مسئله و هر الگوریتم با توجه به میانگین پنج مرتبه اجرا بدست آمده است. سطر آخر این جدول نیز میانگین مقادیر مربوط به ارزش هر

بعد از مشخص نمودن شاخص‌ها به مقایسه مقادیر شاخص‌های دو الگوریتم می‌پردازیم. در ابتدا برای آزمون نرمال بودن نتایج حاصل از الگوریتم‌ها با توجه به کل شاخص‌ها آزمون اندرسون دارلینگ 17 استفاده شد. با توجه به نتایج آزمون مشخص شد در نرمال بودن شاخص‌ها در الگوریتم‌ها دلایل کافی وجود دارد. بدین ترتیب برای مقایسه کارایی دو الگوریتم، از آزمون t-student با کمک نرم افزار MINITAB 17 بهره گرفته شد. با بررسی مقادیر p-value بدست آمده برای هر کدام از شاخص‌ها در این آزمون مشخص شد که در شاخص‌های SM و RAS بین دو الگوریتم تفاوت معناداری وجود ندارد ولی برای شاخص‌های NPS و MID تفاوت معناداری بین میانگین‌های دو الگوریتم وجود دارد. با تحلیل مقادیر میانگین دو الگوریتم در این دو شاخص نشان داده شد که الگوریتم MOPSO الگوریتم برتر در شاخص MID است، همچنین در شاخص NPS الگوریتم NSGA-II کارایی بهتری داشته است.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله مسئله ALSP که یک مسئله NP-hard است، با دو هدف کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های دیرکرد و زودکرد و کمینه‌سازی مجموع زمان فرود هواپیماها در حالت چند باند بررسی شد. در ابتدا مدل ریاضی با کمک روش اسپیلون محدودیت مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. سپس الگوریتم‌های NSGA-II, MOPSO که دو الگوریتم تکاملی چند هدفه مبتنی بر رویکرد پارتو هستند برای این مسئله ارائه شدند. برای ارزیابی عملکرد این الگوریتم‌ها از 4 شاخص استفاده گردید و جهت مقایسه دو به دو الگوریتم‌ها از نقطه نظر آماری نیز از آزمون t استفاده شد. با توجه به نتایج این آزمون‌ها مشخص گردید که از نظر دستیابی به تعداد جواب‌های نامغلوب بیشتر الگوریتم NSGA-II و از نظر شاخص فاصله از جواب ایده آل الگوریتم MOPSO عملکرد بهتری دارند. در شاخص فاصله‌گذاری و دستیابی همزمان به توابع هدف نیز دو الگوریتم عملکرد یکسانی داشته اند.

جدول 8- نتایج حل نمونه مسائل سایز کوچک به روش اپسیلون محدودیت

اطلاعات مسئله			نقاط پارتو	Obj	MID
شماره مسئله	تعداد هواپیما	تعداد باند			
1	5	1	1	(990 , 128)	0/816
			2	(902 , 134/57 )	
			3	(814 , 140)	
			4	(726 , 147)	
			5	(638 , 153/42)	
			6	(550 , 164)	
2	5	2	1	(1140 , 93)	0/811
			2	(922 , 97)	
			3	(704 , 104)	
			4	(486 , 111/46)	
			5	(268 , 120)	
			6	(50 , 130)	
3	10	1	1	(4940 , 523)	0/786
			2	(4325 , 543)	
			3	(3710 , 564)	
			4	(3095 , 584)	
			5	(2480,605)	
			6	(1865 , 630/166 )	
			7	(1250 , 682)	
4	10	2	1	(4730 , 440)	0/752
			2	(4025 , 463/5)	
			3	(3320 , 487)	
			4	(2615 , 510/5)	
			5	(1910 , 534)	
			6	(1205 , 557/5)	
			7	(500 , 653)	
5	15	1	1	(11270 , 1006)	0/794
			2	(10212 , 1041/26)	
			3	(9154 , 1076/533)	
			4	(8096 , 1111/8)	
			5	(7038 , 1147/06)	
			6	(5980 , 1182/33)	
			7	(4922 , 1217/6)	
			8	(3864 , 1252/86)	
			9	(2806 , 1288/13)	
			10	(1748 , 1323/4)	
			11	(690 , 1402)	

جدول 9- نتایج محاسباتی الگوریتم‌ها بر روی 4 شاخص عملکردی

شماره مسنله	تعداد هواپیما	تعداد باند	MID				SM				NPS				RAS			
			میانگین جواب‌ها		بهترین جواب		میانگین جواب‌ها		بهترین جواب		میانگین جواب‌ها		بهترین جواب		میانگین جواب		بهترین جواب	
			NSGA-II	MOPSO	NSGA-II	MOPSO	NSGA-II	MOPSO	NSGA-II	MOPSO	NSGA-II	MOPSO	NSGA-II	MOPSO	NSGA-II	MOPSO	NSGA-II	MOPSO
1	10	1	0/8037	0/8002	0/7986	0/7986	0/5024	0/6213	0/4156	0/6143	4/4	4	5	4	0/4864	0/4855	0/4516	0/4726
2		0/7808	0/4742	0/7808	0/4736	3/4577	0/7861	3/4577	0/7808	14	14	14	14	200/9544	3/4596	200/5152	3/4577	
3	15	1	0/6213	0/6213	0/5979	0/5482	1/0367	0/9854	0/9691	0/8826	18/2	17/6	20	19	1/9452	1/9265	1/76	1/7551
4		2	0/5798	0/5248	0/5458	0/5059	0/842	0/925	0/8364	0/8649	42/4	33	46	35	4/1724	4/929	3/8285	4/7819
5	20	1	0/5504	0/5202	0/5161	0/4426	0/6117	0/755	0/5118	0/5613	105/8	63	113	76	1/4242	1/5281	1/3718	1/368
6		2	0/5537	0/5039	0/5033	0/4654	0/7161	0/6834	0/5503	0/5762	181	70/8	187	75	5/0233	7/8619	4/8977	7/0924
7	20	1	0/6045	0/4955	0/6037	0/4441	0/7374	1/0283	0/706	0/883	20/2	21/4	21	24	0/1873	0/2607	0/1873	0/1931
8		2	0/613	0/4729	0/5703	0/5275	0/7658	0/8272	0/6295	0/629	65/6	50/4	72	52	1/6022	1/855	1/6022	1/6767
9	20	1	0/7223	0/6704	0/7222	0/5791	0/4513	0/5162	0/4513	0/4634	23	18	23	19	0/1666	0/1652	0/1665	0/1543
10		2	0/6525	0/5982	0/6409	0/4795	0/5287	0/6607	0/5063	0/53	64/2	44/2	67	59	1/1943	1/5887	1/4915	1/3606
11	44	1	0/6919	0/4755	0/6673	0/4149	0/4864	0/8145	0/4554	0/6725	98/6	35/4	112	39	65/016	51/777	62/5489	45/6344
12		2	0/5551	0/3867	0/3665	0/3573	0/6108	0/906	0/3021	0/8523	329/8	41/2	438	49	125/804	133/4601	143/4516	137/5112
13	50	1	0/6518	0/5629	0/539	0/5366	6/4253	0/8611	6/1733	0/7756	30	45/8	32	50	200/6044	2/9107	200/2255	2/8071
14		2	0/6549	0/3651	0/6115	0/3018	0/6855	1/1392	0/6082	0/8421	31/4	134/4	36	146	6/044	7/6759	4/9411	6/5721
15	100	1	0/6785	0/8815	0/6462	0/8529	0/6332	0/8125	0/6019	0/7751	242/4	107/2	309	118	79/1567	60/6042	78/0999	59/8508
16		2	0/6138	0/6787	0/6032	0/5999	0/6032	0/5782	0/6019	0/4893	430/2	129/6	526	142	225/4837	166/423	207/344	161/2563
17	150	1	0/6787	0/8545	0/6136	0/7733	0/7014	0/566	0/621	0/5399	133	61/2	228	68	91/9147	65/3757	89/2649	6/1464
18		2	0/6203	0/8336	0/5559	0/7015	0/6632	0/6729	0/5962	0/5782	295/6	145/6	345	154	275/8373	141/1828	243/544	137/9327
19	200	1	0/677	0/7895	0/6526	0/7486	0/6161	0/637	0/5887	0/5816	119/2	51/2	159	60	141/871	87/076	136/217	86/331
20		2	0/6208	0/806	0/5781	0/7511	0/6536	0/5685	0/6061	0/512	162/2	74/4	209	88	289/7642	182/6047	262/8808	179/296
21	300	1	0/6884	0/5499	0/59	0/5046	0/7539	0/942	0/7022	0/8842	148/8	116/2	161	120	274/8971	170/0549	278/3796	163/4217
22		2	0/7022	0/627	0/6883	0/6133	0/715	0/7812	0/7047	0/7011	288/66	213/8	186	221	81/0168	58/8441	62/1517	55/5971
میانگین			0/6507	0/6132	0/6087	0/5645	1/054	0/7758	0/9816	0/6813	129/4845	67/8363	142/1545	64/3363	90/8158	49/8911	90/2418	45/2644

## پی‌نوشت‌ها

- [8]. Rodrigues-Diaz, A., Adenso-Diaz, B., Gonzalez-Torre, p.l., "Minimizing deviation from scheduled time in a single mixed-operation runway", Computer & Operation Research, 78, pp. 193-202, 2017
- [9]. Riahi, V., Hkim Newton, M.A., Polash, M.M.A., Su, K., "Constraint guided search for aircraft sequencing", Expert System with Applications, 118, pp. 440-458., 2019
- [10]. Fay, A., "A quadration time algorithm for computing the optimal landing times of a fixed sequence of planes" European Journal of Operational Research, pp. 1148-1157, 2018
- [11] محمودیان کفشگرکلانی، محمد، امین نیری، مجید، سلماسی، ناصر. "زمان‌بندی فرود هواپیما با محدودیت زمانی عدم دسترسی به باندها"، هفتمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی صنایع. دانشگاه صنعتی اصفهان، 14 و 15 مهرماه 1389.
- [12] قهاری کرمانی، امیر. "زمان‌بندی یکپارچه مسئله فرود هواپیماها و تخصیص آنها به ورودی‌های سالن مسافری"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده صنایع، دانشگاه شریف 1390.
- [13] دستگردی، کاظم. "ارائه یک رویکرد هوشمند جدید در کنترل بهینه‌ی تراکم ترافیک هوایی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده برق، دانشگاه آزاد واحد گناباد 1392.
- [14] صائمی، سعید، توکلی مقدم، رضا، نوزری، حامد، ملکی مقدم، پانته‌ا"، زمان‌بندی فرود و پرواز هواپیماها بر روی باندها با در نظر گرفتن محدودیت در تعداد مکان استقرار هواپیما"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، سال هشتم، شماره چهارم، صفحات 517-528، 1397.
- [15]. Hancerliogullari, G., Rabadi, G., Al-Salem, A.H., Kharbeche, M., "Greedy algorithms and metaheuristics for a multiple runway combined arrival-departure aircraft sequencing problem", Journal of Air Transport Management, 32 pp. 39-48, 2013
- [16]. Soykan, B., Rabadi, G., "A Tabu search algorithm for the multiple runway aircraft scheduling problem", In G. Rabadi (Ed.), Heuristics metaheuristics and approximate methods in planning and scheduling. Springer International Publishing, pp. 165-186., 2016
- [17]. Holland, J.H., "Adaptation in natural and artificial systems", University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975
- [18]. Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., Meyarivan, T., "A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II", In: Proceedings of the Parallel Problem Solving From Nature VI (PPSN-VI) Conference, pp. 849-858, 2000

- 1 Aircraft Landing Scheduling Problem (ALSP)
- 2 Gatwick Airport
- 3 Tabu Search
- 4 Particle Swarm Optimization
- 5 Firefly Algorithm
- 6 Epsilon Constraint
- 7 Mixed Integer Programming
- 8 Non-dominate Sorting Genetic Algorithm-II
- 9 Multiple Objective Particle Swarm Optimization
- 10 Non-Dominated Sorting
- 11 Crowding Distance
- 12 Revers
- 13 Number of Pareto Solution (NPS)
- 14 Mean Ideal Distance (MID)
- 15 Spacing Metric (SM)
- 16 The Rate of Achievement to Two Objective Simultaneously (RAS)
- 17 Anderson Darling

## منابع و مراجع

- [1]. www.aci.aero/data-center/monthly-traffic-data/passenger-summary/year-todat.
- [2]. Beasley, J. E., Krishnamoorthy, M., Sharaiha, Y., Abramson, D., "Scheduling aircraft landings—the static case", Transportation Science, 34(2), pp. 180-197, 2000
- [3]. Abela, J., Abramsosn, D., Krishnamoorthy, M., De Silva, A., Mills, G., "Computing optimal schedules for landing aircraft", In Proceedings of 12th national conference of the Australian Society for Operations Research, Adelaide, Australia, pp. 71-90, 1993
- [4]. Pinol, H., Beasley, J.E., "Scatter search and sionomic algorithms for the aircraft landing problem", European Journal of Operational Research, 171, pp. 439-462, 2006
- [5]. Salehipour, A., Modarres, M., Naeni, L.M., "An efficient hybrid meta-heuristic for aircraft landing problem", Computer & Operation Research, 40(1), pp. 207-213, 2013.
- [6]. Ng, K.K.H., Lee, C.K.M., "A modified variable neighborhood search for aircraft landing problem", IEEE International Conference on Management of Innovation and Technology, ICMIT, 2016
- [7]. Girish, B.S., "An efficient hybrid particle swarm operation algorithm in a rolling horizon framework for the aircraft landing problem", Applied Soft Computing, 44, pp. 200-221, 2016

- [19]. Amiri, M., Khajeh, M., “*Developing a bi-objective optimization model for solving the availability allocation problem in repairable series-parallel systems by NSGA II*”, Journal of Industrial Engineering International 12(1), pp. 61-69, 2016
- [20]. Coello, C.A.C., Lamont, G.B., “*Applications of multi-objective evolutionary algorithms*”, World Scientific Publishing, London, 2004.
- [21]. <http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/orlib/files/>.