مدل سازی فازی زمان‌بندی کارکنان هواپیما و حل آن با الگوریتم بهینه سازی ذرات انبوه

میلاد پاک سرشت (مسئول مکاتبات)، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل ، ایران

ایرج مهدوی، استاد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران

بابک شیرازی، استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران

E-mail: milad_pakseresht@yahoo.com

دریافت: ۱۳۹۲/۰۲/۱۵ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۹/۱۰

چکیده:

مساله زمان‌بندی کارکنان هواپیما از مهم‌ترین مسائل در حوزه تحقیق در عملیات به شمار می‌رود و به طور عمومی شامل تخصیص گروه های کارکنان به سفرهایی است که می بایست طبق برنامه زمان‌بندی از پیش تعیین شده ای، توسط ناوگان موجود پوشش داده شوند، به طوری که هزینه‌های مربوط به تخصیص کارکنان به سفرها، کمینه شود. مسئله زمان‌بندی کارکنان به دو فاز کلی تقسیم می‌شود. در فاز اول، تمام سفرهای رفت و برگشتی که شروع و خاتمه آنها در محل استقرار کارکنان است، تحت عنوان مجموعه ماموریتها تعیین می‌شود. در فاز دوم به دلیل عدم قطعیت در انجام پرواز به دلایلی از قبیل وضعیت جوی آب و هوا، حضور یا غیبت کارکنان هواپیما، خرابی ناگهانی هواپیما و بسیاری عوامل دیگر، با استفاده از رویکرد مجموعه های فازی به مدلسازی مسئله که خواهان تخصیص بهینه کارکنان به سفرهاست می پردازیم. استفاده از تئوری مجموعه های فازی در این مسئله شرایط واقعی تری برای زمان‌بندی کارکنان هواپیما ایجاد می‌کند. در حل مسئله زمان‌بندی کارکنان هواپیما با توجه به قرار گرفتن در گروه مسائل NP-hard ، به استفاده از الگوریتم بهینه سازی ذرات انبوه به برای حل مساله مورد پژوهش پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی: زمان‌بندی کارکنان هواپیما ، عدم قطعیت پرواز، مدلسازی فازی، بهینه سازی ذرات انبوه

۱. مقدمه

مسئله زمان‌بندی کارکنان [i] یا CSP از معروف ترین مسائل در حوزه تحقیق در عملیات به شمار می‌رود. حوزه کاربرد مسئله CSP در سال های اخیر به طور وسیعی در صنایع هواپیمایی مطرح بوده، چرا که در صنایع هوایی، ۱۵ تا ۲۰ درصد کل هزینه‌های عملیاتی شامل هزینه‌های مربوط به کارکنان است و توجه به این موضوع در این صنعت بسیار قابل ملاحظه بوده است [Mora Camino, 2001]. در سال های اخیر با توجه به این که بحث خصوصی سازی و برون سپاری در صنعت حمل‌ونقل به طور وسیعی مطرح شده است، این موضوع تا حدودی مورد توجه سازمان های ناوگان حمل‌ونقل قرار گرفته و استفاده از این مسئله و تکنیک های بهینه سازی برای کاهش هزینه عملیاتی و پرسنلی بسیار مورد نظر بوده است [Caprara, Fischetti, Toth, Vigo, and Guida, 1997]. مسئله زمان‌بندی کارکنان (CSP) به طور عمومی شامل تخصیص گروه های کارکنان به سفرهایی است که می بایست طبق برنامه زمان‌بندی از پیش تعیین شده ای توسط ناوگان موجود پوشش داده شوند، به طوری که هزینه‌های مربوط به تخصیص کارکنان به سفرها کمینه شود. مسئله CSP خود به دو زیر مسئله اصلی و مستقل تقسیم می‌شود:

- مسئله ماموریت کارکنان [ii] (CPP)
- مسئله تخصیص کارکنان [iii] (CAP)

مسئله CPP شامل یافتن مجموعه ای از سفرهای برگشتی تحت عنوان ماموریت[iv] با حداقل هزینه است که هر یک، تعدادی از سفرها را می پوشاند.

مسئله CAP نیز شامل تخصیص اعضای گروه های کارکنان به سفرهاست که در این پژوهش به این قسمت مسئله یعنی تخصیص اعضای کارکنان به سفرها، می پردازیم.

برای حل مسئله زمان‌بندی کارکنان تاکنون روش های حل متنوعی بر پایه روش های دقیق و ابتکاری ارایه شده اند که هر یک دارای معایب و مزایایی بوده و نتایج متفاوتی را تولید کرده‌اند که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند. در خصوص استفاده از روش‌های دقیق برپایه تکنیک های تحقیق در عملیات می توان به مطالعه [Yan, Tung and Tu, 2002] اشاره کرد که از دیدگاه‌های سنتی حل مسائل بهینه سازی برای این مسئله استفاده کرده و برای مسائلی با ابعاد کوچک نتایج خوبی را تولید کرده است. یکی از مشکلات عمده ای که در استفاده از روش های دقیق برای حل مساله CSP پدید می‌آید، جستجو در فضای جواب بسیار بزرگی است که این فضا با افزایش تعداد سفرها به طور نمای افزایش پیدا می‌کند و حل مسئله را در ابعاد بزرگ، بسیار پیچیده و زمان بر می‌کند[Komilakis and Stamatopoulos, 2002]. در نتیجه در سال های اخیر با توجه به وجود مسائلی با ابعاد بزرگ در دنیای واقعی، استفاده از روش های دقیق از لحاظ زمان مورد نیاز برای حل، به صرفه نیست و تمایل به استفاده از روشهای ابتکاری و فراابتکاری افزایش پیدا کرده است تا جوابی مناسب و نزدیک به جواب بهینه در مدت زمان اندک به دست آید. از مهم‌ترین مطالعاتی که در این مورد صورت گرفته می توان به مطالعات [Mar-chiori and Steenbeek, 2000], [Eremeey, 1999], [Oz-demir and Mohan, 2001] اشاره کرد که از الگوریتم ژنتیک[v] [Lucic and Teodorovic,2007] [Lagerholm, Petreson, and Soderberg, 2000]، کراس آنتروپی[vi] و رشد تکاملی[vii] [Vanhouce and Maenhout, 2010]،[Krisnawati, 2011] (Vanhoucke, 2010 & Maenhout) با استفاده از روش جستجوی پراکنده و [Santosa, Sunarto and Rahman, 2010] از تکنیک شبکه های عصبی برای حل مسئله CSP استفاده کرده‌اند و جوابهای نسبتا خوبی را تولید کرده‌اند.

مسئله زمان‌بندی کارکنان بیشتر در صنعت هواپیمایی دارای کاربرد بوده است. از مهم‌ترین مطالعات صورت گرفته در این خصوص می توان به مطالعات [[Mora Camino, 2001

[Ball and Roberts, 1985] [Desaulniers and Desrosiers, 1997] اشاره کرد که با استفاده از روش های برنامه ریزی ریاضی و عدد صحیح به حل مسئله CSP در حوزه صنایع هوای پرداخته اند. [Ahmadbeygi, 2009] نیز با استفاده از برنامه ریزی عدد صحیح به ایجاد ماموریت ها که یک فاز قبل از تخصیص ماموریت ها به کارکنان است، پرداخته است .[Hung-Tso, Yen Ting, Tsung Yu and Yi-Chun, 2012] باتوجه به در نظر گرفتن اهداف مختلف برای تخصیص ماموریتها به کارکنان، استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی در مدل سازی مسئله وارد کرده است. در استفاده از روش‌های ابتکاری در این حوزه می‌توان به مطالعات [Teodorvic and Sarra, 1988], [Beasley and Chu, 1996],[Lucic, 1998] اشاره کرد که از الگوریتم های شبیه‌سازی آنیلینگ، شبکه‌های عصبی، منطق فازی و الگوریتم ژنتیک در مطالعات خود استفاده کرده‌اند. در مطالعه[Sepehri, Najmi and Khoshalhan, 2004] به حل برنامه ریزی و زمان‌بندی کار کارکنان و کارکنان راه آهن با استفاده از روش بهینه سازی مورچگان پرداخته شده است که یکی از روش‌های معروف بهینه‌سازی محسوب می‌شود و نتایج بسیار خوبی را نیز تولید کرده است. در پژوهش‌های انجام گرفته، بیشتر محققان به دنبال حل مسئله با روش های دقیق و یا ابتکاری و یا فراابتکاری بودند و مقایسه روش های حل از این جهت که کدام یک از این روش‌ها، عملکرد بهتری نسبت به دیگری دارد، و عدم قطعیت موجود در پروازها را که به دلایل مختلفی منجمله شرایط جوی آب و هوا، وضعیت حضور یا عدم حضور کارکنان هواپیما و خرابی ناگهانی قطعاتی از هواپیما و... را در مدلسازی نادیده گرفتند، که در این پژوهش با ارائه مدلسازی فازی مسئله به جبران نارسایی های تحقیقات پیشین پرداخته شده است و در ادامه نیز به منظور حل مسئله به استفاده از الگوریتم بهینه سازی ذرات انبوه پرداختیم و با حل مسئله با ابعاد مختلف کارآ بودن الگوریتم پیشنهادی را در حل مساله به اثبات می رسانیم.

در ادامه، این پژوهش به صورت زیر سازماندهی شده است:

در بخش دوم مختصرا به معرفی تعریفات و محدودیت هایی که در برنامه زمان‌بندی کارکنان موجود است، می پردازیم.

در بخش سوم مدل سازی فازی و رویه حل بهینه سازی ذرات انبوه برای مساله مورد پژوهش بیان می‌شود.

در بخش چهارم به بیان یک مثال موردی از مسئله زمان‌بندی کارکنان پرداخته می‌شود و به منظور اثبات کارآی الگوریتم حل پیشنهادی، مسئله مورد پژوهش را در ابعاد مختلفی حل کرده و با جواب به دست آمده از الگوریتم شاخه و کران نرم افزار لینگو مقایسه شده است.

در بخش پنجم جمع بندی و نتیجه گیری و در بخش ششم نیز مراجع به کار رفته در این پژوهش ارائه می‌شود.

۲. برنامه ریزی کار کارکنان هواپیما

یکی از ورودی های اساسی برای شروع برنامه ریزی کار کارکنان، داشتن یک جدول برنامه ریزی از سرویس ها و خدمات پروازهایی است که برای پریودهای زمانی مشخصی تنظیم شده است و شامل جابجای بار و مسافر و تجهیزات بین ایستگاه های مختلف است. هر سرویسی که می بایست توسط هواپیماها صورت گیرد باید خود به چندین سفر متوالی و موجه تقسیم شودکه هر سفرشامل قسمتی از سفرهای یک هواپیما است که می بایست توسط یک گروه کارکنان بدون وقفه و استراحت طی شود. هر سفر دارای مشخصاتی به شرح ذیل است که باید به عنوان ورودی در نظر گرفته شود:

- ✓ زمان اعزام از مبدا حرکت، $td(i)$
- ✓ نام ایستگاه یا مبدا حرکت، $d(i)$
- ✓ زمان ورود به ایستگاه مقصد، $ta(i)$
- ✓ نام ایستگاه مقصد، $a(i)$

بعد از اینکه تمام سفرها با مشخصات بیان شده تعیین شدند می‌بایست به برنامه ریزی و تخصیص هر گروه کارکنان به سفرها پرداخته شود، به این صورت که هر گروه کارکنان موظف است، چندین سفر متوالی را تحت عنوان یک ماموریت تحت پوشش قرار دهد و آن را انجام دهد.

پس از یافتن سفرها با مشخصات آنها می بایست به تولید ماموریت‌های موجه پرداخته شود که شرط موجه بودن آنها به یک سری محدودیت ها بستگی دارد که به شرح ذیل هستند و می بایست تمامی آنها رعایت شوند:

۱. برای هر دو سفر متوالی در یک ماموریت می بایست ایستگاه مبدا حرکت سفر دوم منطبق بر ایستگاه مقصد سفر اول باشد. همچنین برای دو سفر متوالی مفروض می بایست زمان اعزام از ایستگاه مبدا برای سفر دوم بزرگ تر از زمان رسیدن به مقصد سفر اول باشد.

۲. هر ماموریت که به یک گروه کارکنان یکسان تخصیص می‌یابد، می بایست از محل استقرار آن کارکنان آغاز شود و به آنجا نیز ختم شود.

۳. مجموعه کارهای هر گروه کارکنان که با یک ماموریت مشخص می‌شود، یک زمان ماموریت تعریف می‌شود که تجاوز از این زمان مجاز نیست و تا قبل از رسیدن به این زمان، گروه های کارکنان می بایست به محل استقرار اولیه بازگشته شوند.

۴. کل مدت زمان یک ماموریت که به عنوان زمان ماموریت گروه کارکنان تخصیص یافته شده در نظر گرفته می‌شود، حاصل مجموع دو قسمت است و نباید از حداکثر زمان مجاز بیان شده تجاوز کند. یک قسمت از این زمان شامل مجموع زمان های سیری است که گروه های کارکنان می بایست آنها را طی کنند و به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$Travel\ Time = \sum_{i \epsilon p} ta(i) - td(i) \qquad (۱)$$

در رابطه فوق **i** معرف یک سفر است و **P** بیان کننده مجموعه سفرهای است که در یک ماموریت مفروض آمده است. قسمت دوم از مدت زمان یک ماموریت به مجموع زمان های بیکاری گروه های کارکنان در یک ماموریت مربوط می‌شود که بخشی از این زمان موجه است و به عنوان زمان های استراحت کارکنان در نظر گرفته می‌شود و بخش دیگر مجاز نیست و تا حد امکان باید حداقل شود. رابطه شماره (۲) محاسبه زمان بیکاری را برای دو سفر متوالی **i** و **j** در یک ماموریت نمایش می دهد که فاصله زمانی بین پایان یک سفر تا شروع سفر بعدی است.

$$Idle\ Time = td(j) - ta(i) \qquad (۲)$$

۵. نکته مهم دیگری که می بایست مورد ملاحظه قرار گیرد این است که گاهی اوقات در یک سفر و در کنار گروه کارکنان ای که به آن سفر تخصیص یافته است و در آن هواپیما در حال انجام ماموریت هستند، گروه های دیگری نیز حضور دارند که تنها به منظور رفتن به ایستگاه دیگری برای ادامه ماموریت خود در آن هواپیما حضور پیدا کرده‌اند. این گونه سفرها که به بیش از یک گروه کارکنان تخصیص می یابند و اصطلاحاً سفرهای بدون تهیه بلیط نامیده می‌شود برای شرکت مربوطه دارای هزینه ای اضافی هستند، چرا که گروه های کارکنان اضافی بدون پرداخت هزینه بلیط سوار می‌شوند و بدون اینکه کار کنند فضای از صندلی ها را نیز اشغال کرده‌اند که می بایست به مسافران دیگری تخصیص می‌یافت و در حقیقت مانند مسافرانی هستند که رایگان سوار شده اند که می بایست این حالت تا حد امکان حداقل گردد.

در نهایت هدف یافتن زیرمجموعه ای از مجموعه کل ماموریت های موجهی است که دارای حداقل هزینه عملیاتی باشند و هر کدام به یک گروه کارکنان تخصیص یافته باشند.

۳. الگوریتم حل ابتکاری برای برنامه ریزی و زمان‌بندی کار کارکنان

با توجه به اینکه فضای جواب مورد جستجو بسیار بزرگ است

در این پژوهش فرآیند حل مسأله به دو مرحله مستقل تقسیم شده و به شرح ذیل است:

۱- مرحله تولید ماموریت های موجه: در این مرحله سعی می‌شود که تمام ماموریت های موجهی که از جدول زمانی سفرهای داده شده قابل استخراج هستند تعیین شوند به طوری که تمام محدودیت های مطرح شده را رعایت کرده باشند. شایان ذکر است که دیدگاه استفاده شده در این مرحله با استفاده از روش های متنوعی از جمله جستجوی اولین عمق (DFS) صورت می پذیرد و کلیه ماموریت های موجه یافت شده به همراه محاسبه هزینه‌های مربوط به آنها در مجموعه ای نگهداری می‌شوند و وارد مرحله بعدی می‌شویم. هزینه‌های مربوط به ماموریت که محاسبه می‌شود شامل مجموع هزینه‌های دستمزد انجام هر سفر، محاسبه مجموع زمان های بیکاری که در ماموریت مورد نظر وجود دارد و کل زمان یک ماموریت از شروع در خانه تا رسیدن به آن است.

۲- مرحله بهینه سازی و تعیین جواب بهینه: در این مرحله همان‌طور که بیان شد می بایست زیر مجموعه ای از مجموعه کل ماموریت های به دست آمده از مرحله قبل با حداقل هزینه به دست آید به طوری که تمام سفرها را پوشش دهد و هر سفر حداقل به یک ماموریت تخصیص یافته باشد. شایان ذکر است که در این مرحله، مسئله مورد نظر با اطلاعات حاصل از مرحله قبل و با استفاده از رویکرد تئوری مجموعه های فازی مدلسازی می‌شود و سپس با استفاده از الگوریتم بهیته سازی ذرات انبوه که در محیط متلب کدنویسی شده است، جواب بهینه مشخص می‌شود. شکل ۱ خلاصه ای از این دو مرحله را به صورت گرافیکی نمایش می دهد.

۳-۱ مدل سازی مسئله زمان‌بندی کارکنان

بعد از آنکه تمام ماموریت های موجه با استفاده از مرحله قبل تولید شدند، به مدلسازی مسئله مورد نظر پرداخته می‌شود. ابتدا به بیان مدلسازی مسئله در حالت قطعی پرداخته تا درک بهتری از مدل داشته سپس مدل فازی مسئله را ارائه خواهیم کرد.

۳-۱-۱ حالت قطعی

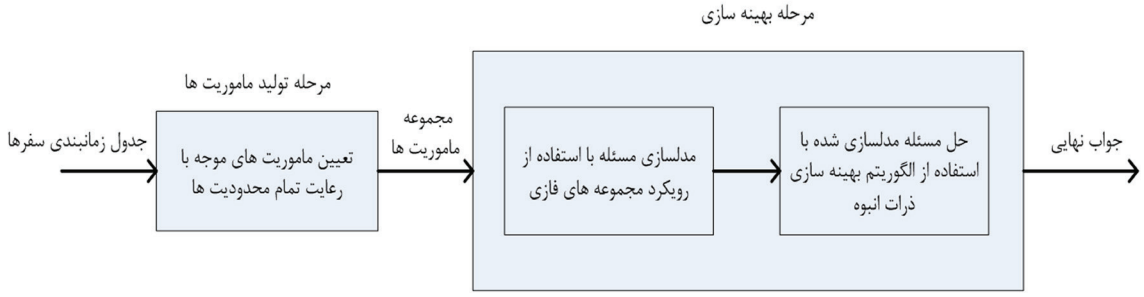
مسئله قطعی از یک ماتریس باینری m×n با درایه های با مقادیر صفر و یک تعریف می‌شود که هدف در آن تعیین ستون های با حداقل هزینه از بین n ستون است به طوری که توسط آنها تمامی m سطر ماتریس، حداقل توسط یک ستون تحت پوشش قرار داشته باشد. مدلسازی ریاضی این مسئله به فرم زیر است:

$$Min\ z = \sum_{j=1}^{n} c_j X_j \qquad (۳)$$

$$S.t:\ \sum_{j=1}^{n} a_{ij} X_j \geq 1 \quad for\ i = 1, \dots, m \qquad (۴)$$

$$X_j = 0\ or\ 1 \quad for\ j = 1, \dots, n \qquad (۵)$$

در ماتریس باینری m×n فوق، هر درایه (i,j) در ماتریس اگر یک باشد به این معناست که سطر i توسط ستون j ام تحت پوشش قرار می گیرد و اگر صفر باشد به این معناست که سطر مفروض تحت پوشش ستون j نیست. در رابطه (۴) که بیان کننده انتخاب زیر مجموعه ای از ستونها در بین n ستون با حداقل هزینه است،



شکل۱. مراحل تولید جواب موجه و جواب بهینه

متغیر باینری x_j نماینده ستون j ام در ماتریس و $c_j>0$ هزینه انتخاب این ستون است. بنابراین در صورتی که مقدار متغیر x_j برابر یک باشد، یعنی ستون j ام در جواب نهای حضور دارد و در غیر این صورت این ستون در زیر مجموعه انتخاب شده از ستون‌ها وجود ندارد.

رابطه شماره (۵) تضمین می‌کند که هر سطر حداقل توسط یک ستون تحت پوشش قرار داده شود و متغیر a_{ij} در این رابطه، یک متغیر باینری است که وقتی سطر i در ستون j ام وجود داشته باشد مقدار یک را به خود می گیرد و در غیر این‌صورت صفر در نظر گرفته می‌شود. در مدلسازی زمان‌بندی کارکنان، هر سطر از این ماتریس ($i=1,...,m$) متناظر با سفرهای $T(i)$ و ستون های آن ($j=1,...,n$) متناظر با ماموریت های به دست آمده از مرحله قبل در نظر گرفته می‌شود و درایه های صفر و یک داخل ماتریس براساس اینکه هر ماموریت چه سفرهای را تحت پوشش خود قرار می دهد، کامل می‌شوند.

جدول۱. نمادهای بکار رفته در مدلسازی مساله در حالت قطعی

متغیر	توضیحات
X_j	متغیر تصمیم مساله در حالت دودویی برای بیان انجام ماموریت
C_j	هزینه انجام ماموریت
a_{ij}	پارامتری دودویی برای بیان انجام سفر i ام در ماموریت j ام

۳-۱-۲ حالت فازی

در دنیای واقعی استفاده از حالت دو ارزشی صفر و یک فراتر رفته و استفاده از حالات چندارزشی را الزامی می‌کند و منطق مجموعه‌های فازی به عنوان روشی برای بیان حالات چند ارزشی در این پژوهش استفاده می‌گردد.

در دنیای واقعی در نظر گرفتن عدم قطعیت، مدلسازی واقعی‌تری از مسئله ایجاد کرده و جواب‌های ایجاد شده از این مدل نیز قابلیت بیشتری برای پیاده سازی نیز دارند. در مسئله زمان‌بندی کارکنان هم از این امر مستثنی نبوده و با حالت عدم قطعیت در وضعیت آب و هوایی، که در انجام پروازها تأثیرگذار است و یا عدم قطعیت حضور کارکنان برای انجام فعالیت های مرتبط با پرواز به دلایلی از قبیل دیر رسیدن کارکنان به ماموریت و یا بیماری کارکنان مربوط می‌شود، روبه رو می‌شویم که در انجام سفرهای از پیش تعیین شده تأثیر گذاشته و عدم انجام یا انجام سفر را که حالت صفر و یک است به حالتی بین صفر و یک تغییر می دهد.

بنابراین رویکرد مجموعه‌های فازی، روشی مناسب برای برخورد با مسائلی است که با شرایط عدم قطعیت در مسئله روبه رو هستیم. که در این حالت ما به جای حالت صفر و یک، یک تابع عضویت بین صفر و یک خواهیم داشت.

فرض کنید $\tilde{P}_j$ یک زیر مجموعه فازی از I که همان ماموریت است و به صورت $\tilde{P}_j=\{(i,\mu_j(i)) : i\in I\}$ و $\mu_j(i)\in[0,1]$ درجه عضویت $i\in I$ به دست آمده از تابع عضویت μ_j مجموعه فازی $\tilde{P}_j$ است. بنابراین اجتماع دو مجموعه فازی به صورت زیر تعریف می‌شود[۱۷].

تعریف ۱. اجتماع دو مجموعه فازی به صورت زیر مشخص شده است:

$$\tilde{P}_j \cup \tilde{P}_k = \{(i,\mu_{j,k}(i)) : i\in I\}$$

که $\mu_{j,k}(i)=\mu_j(i)+\mu_k(i)-\mu_j(i).\mu_k(i)$ است.

قابل ذکر است که تعریف ۱ به جمع جبری[xiii] مجموع دو مجموعه فازی معروف است.

$$1-\mu_{j,k}(i)=1-\mu_j(i)-\mu_k(i)+\mu_j(i).$$
$$\mu_k(i)=\big(1-\mu_j(i)\big).\big(1-\mu_k(i)\big) \quad (۷)$$

بنابراین i امین درجه عضویت اجتماع دو مجموعه فازی $\tilde{P}_j, \tilde{P}_k$ به صورت $\mu_{j,k}(i)=1-\big[\big(1-\mu_j(i)\big).\big(1-\mu_k(i)\big)\big]$ نمایش داده می‌شود. برای اجتماع بیشتر از دو مجموعه فازی،

$$\bigcup_{j=1}^{n} \tilde{P}_j = \left\{\left(i, \mu_{(1,2,\dots,n)}(i)\right) : i \in I\right\} \quad (۸)$$

i امین درجه عضویت اجتماع به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\mu_{(1,2,\dots,n)}(i) = 1 - \prod_{j=1}^{n}\left(1 - \mu_j(i)\right) \quad (۹)$$

فرض کنید $\tilde{R} = \{\tilde{P}_j : j \in J_0\}$ مجموعه ای از مجموعه های فازی باشد. پوشش فازی به صورت زیر تعریف می‌شود.

تعریف ۲. $\tilde{R}_\alpha = \{\tilde{P}_j : j \in J_0\}$ یک پوشش فازی با درجه $\alpha \in [0,1]$ است و یا همچنین α- سطح برای

$$\forall\, i \in I, \bigcup_{j \in J_0} \tilde{P}_j = \left\{\left(i, \mu_{(1,2,\dots,n)}(i)\right) : i \in I\right\} \quad (۱۰)$$

که $min_i \mu_{(1,2,\dots,n)}(i) = \alpha$ و $j \in J_0$ (۱۰)

هم اکنون آماده تعریف مسئله زمان‌بندی کارکنان در حالت فازی $(FCSP)^{xiv}$ می باشیم. $FCSP$ به جستجوی α- سطح $\tilde{R}_\alpha$ بهینه با الزام خواسته‌های مجموعه I و درجه تعریف شده α است. برای هر مجموعه فازی $\tilde{P}_j$ از I ، یک مقدار مثبت C_j به عنوان هزینه انجام ماموریت jام است، بنابراین FCSP به صورت یک برنامه ریزی ریاضی که در زیر آمده است فرموله می‌شود: P_1

$$Min \sum_{j=1}^{n} c_j X_j \qquad (P_1)$$

$$s.t. \quad 1 - \prod_{j=1}^{n}\left(1 - \mu_j(i).X_j\right) \geq \alpha \quad i = 1,2,\dots,m$$

$$X_j \epsilon \{0,1\}, \quad j = 1,2,\dots,n$$

جدول۲. نمادهای بکار رفته در مدلسازی مساله در حالت فازی

متغیر	توضیحات
X_j	متغیر تصمیم مساله در حالت دودویی برای بیان انجام ماموریت j ام
C_j	هزینه انجام ماموریت j ام
μ_{ji}	پارامتری فازی برای بیان انجام سفر i ام در ماموریت j ام
α	سطح دسترسی برای انجام سفرها

۳-۲ الگوریتم بهینه سازی ذرات انبوه

یک تکنیک بهینه سازی احتمالی و الگوریتم جستجو بر اساس جمعیت است و اولین بار توسط آقایان کندی و ابرهارت در سال ۱۹۹۵ ارائه گردید و الهام گرفته از رفتار اجتماعی دسته پرندگان و گروه های ماهی ها است. در PSO هر یک از ذرات در فضای جستجو جاری می‌شوند بنابراین این ذرات حرکت داشته و دارای سرعت می باشند. تغییر مکان ذرات در فضای جستجو تحت تأثیر تجربه و دانش خودشان و همسایگانشان است. این الگوریتم با بهنگام کردن موقعیت ذره ها با توجه به میزان شایستگی آنها مجموعه را به سمت جواب بهینه هدایت می‌کند. این الگوریتم با یک گروه از جوابهای تصادفی شروع به کار می‌کند، سپس برای یافتن جواب بهینه در فضای مسئله با بهنگام کردن موقعیت و سرعت ذره ها به جستجو می‌پردازد. هر ذره مکان های که در آن قرار می گیرند را در حافظه نگهداشته و از بهترین آنها جهت ادامه مسیر استفاده می‌کند. ذره ها در دسته های خود با هم فعالیت دارند به این معنی که ذره ها اطلاعات مربوط به مکان های حضورشان را با هم تبادل می‌کنند. برای جلوگیری از یکنواختی حرکت از پارامترهای تصادفی استفاده شده است که گام های الگوریتم در زیر بیان شده است:

۱- جمعیتی از ذرات اولیه را به صورت تصادفی تولید می‌کنیم. (i=۱,۲,...,n)

۲- موقعیت هر ذره را بر اساس تابع هدف ارزیابی می‌کنیم.

۳- اگر موقعیت فعلی ذره بهتر از موقعیت قبلی آن باشد، آن را به‌روز می‌کنیم(Pb_i).

۴- بهترین ذره را تعیین می‌کنیم (gb_i).

۵- سرعت ذرات را در مرحله tام براساس رابطه ۱۱ به روز می‌کنیم:

$$v_{ij}^{t+1} = v_{ij}^{t} + k_1.\mathrm{rand}_1.\left(Pb_{ij}^{t} - x_{ij}^{t}\right) + k_2.\mathrm{rand}_2.\left(gb_{ij}^{t} - x_{ij}^{t}\right) \quad (۱۱)$$

۶- (k_1 عامل یادگیری فردی و k_2 عامل یادگیری اجتماعی است که به این ضرایب شتاب نیز گفته می‌شود که عددی بین ۱/۵ تا

۲ را به خود می گیرد. Rand نیز مقادیر تصادفی بین [۰,۱] را می گیرد).

۷- ذرات را بر اساس رابطه ۱۲ به مکان های جدیدشان در دوره t+۱ انتقال می دهیم:

$$x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^{t} + v_{ij}^{t+1}$$

۸- به مرحله دوم باز می‌گردیم، مگر این که محدودیت متوقف کننده برآورده شود. الگوریتم PSO ذاتا یک الگوریتم بهینه سازی پیوسته است اما با توجه به باینری بودن متغیرها نیاز به تغییر در الگوریتم ارائه شده داریم، زیرا سرعت به دست آمده از طریق رابطه ۱۱ عددی پیوسته خواهد بود که با قرار دادن در رابطه ۱۲ نیز عددی حقیقی و طبیعتا پیوسته خواهد بود، بنابراین این الگوریتم را با شرایط باینری وفق داده ایم. با این شرایط متغیر مربوط به مکان ذرات به حالت باینری تبدیل شده اما سرعت که از رابطه ۱۱ به دست آمده به عنوان احتمال تغییر یک بیت از صفر به یک یا از یک به صفر در موقع بهنگام کردن مکان ذره بیان می‌شود. بنابراین یک نگاشت از v_{ij} به احتمالی بین [0,1] لازم است مشخص شود که این عمل توسط تابع سیگموید[xv] انجام می پذیرد. تابع سیگموید به صورت رابطه ۱۳ مشخص می‌شود:

$$sig(v) = \frac{1}{1+e^{-v}} \qquad (۱۳)$$

بنابراین معادله به روز رسانی موقعیت ذره (رابطه ۱۲) بوسیله معادله به روز رسانی احتمالی معرفی شده جایگزین می‌شود که در رابطه ۱۴ بیان شده است:

$$x_{ij}^{t+1} = \begin{cases} 0 & if\ r_{ij}^{t} \geq sig(v_{ij}^{t+1}) \\ 1 & if\ r_{ij}^{t} < sig(v_{ij}^{t+1}) \end{cases} \qquad (۱۴)$$

که r_{ij}^{t} از توزیع یکنواخت بین صفر و یک پیروی می‌کند.

ممکن است بعد از به روز رسانی موقعیت ذره، این تغییر موجه نباشد که در این رویکرد حل، از مکانیزم رد جواب های غیرموجه استفاده می‌کنیم. بعد از به روز رسانی مربوط به سرعت و موقعیت ذرات، ذرات بوجود آمده به صورت جدولی زیر نمایش داده می‌شوند.

	J	1	2	3	4	5
X_1^1	x_{1j}^1	1	0	0	1	0
V_1^1	v_{1j}^1	2/90	1/35	-1/80	3/75	-1/60
	$sig(v_{1j}^1)$	0/95	0/79	0/14	0/98	0/17
	r_{1j}^1	0/12	0/99	0/90	0/60	0/34
X_2^1	x_{2j}^1	1	0	1	1	0
V_2^1	v_{2j}^1	3/10	2/17	2/25	-0/27	-0/90
	$sig(v_{2j}^1)$	0/96	0/90	0/90	0/43	0/29
	r_{2j}^1	0/89	0/99	0/12	0/21	0/63
X_3^1	x_{3j}^1	1	0	0	1	1
V_3^1	v_{3j}^1	-3/00	1/5	-2/70	2/00	0/90
	$sig(v_{3j}^1)$	0/50	0/82	0/06	0/88	0/71
	r_{3j}^1	0/02	0/98	0/19	0/34	0/49

شکل۲. نمایش جدولی جواب ها در الگوریتم PSO باینری

۴. مثال موردی

فرض کنید قرار است برای ۵ سفر برنامه ریزی شده، $I=\{۱,۲,۳,۴,۵\}$ که در ۴ ماموریت، $J=\{۱,۲,۳,۴\}$ گنجانده شده، کم هزینه ترین ماموریت ها را مشخص کنیم، به طوری که تمام سفرهای برنامه‌ریزی شده برای مسافران را با حداقل اطمینان - سطح پوشش دهیم. فرض کنید که $\mu_j(i) \epsilon [0,1], i \epsilon I, j \epsilon J$ به عنوان میزان اطمینانی از انجام سفر **i**ام با ماموریت**j**ام باشد و $x_j=1$ وقتی که ماموریت j ام انتخاب شود و در غیر این صورت . هزینه انجام ماموریت j ام، با نشان داده شده است. جدول ۱ ماتریس درجه و میزان عضویت هریک از سفرها را در ماموریت‌ها، $\mu_j(i)$ و $i = 1,2,\dots,5$ ، $j = 1,2,\dots,4$ را نمایش می‌دهد.

جدول۳. درجه عضویت هر یک از سفرها در ماموریت ها

ماموریت / سفر برنامه ریزی شده	$=1j(c_1=4)$	$=j\ 2(c_2=3)$	$=j\ \ 3(c_3=5)$	$=4j(c_4=2)$
=1i	*0/4*	*0/1*	*0/3*	*0/5*
=2i	*0/1*	*0/3*	*0/7*	*0/9*
=3i	*0/5*	*0/8*	*0/2*	*0/4*
=4i	*0/7*	*0/2*	*0/9*	*0/1*
=5i	*0/8*	*0/6*	*0/4*	*0/2*

هر یک از ماموریت ها را به صورت یک مجموعه فازی از سفرهای برنامه ریزی شده که با $\tilde{P}_j$ نمایش داده می‌شود. میزان

اطمینان انجام سفر iام با ماموریت jام با $\mu_j(i)$. $i \in I$, $j \in J$.

بنابراین مجموعه های فازی زیر را داریم:

$$\tilde{P}_1 = \{(1,0/4), (2,0/1), (3,0/5), (4,0/7), (5,0/8)\}$$
$$\tilde{P}_2 = \{(1,0/1), (2,0/3), (3,0/8), (4,0/2), (5,0/6)\}$$
$$\tilde{P}_3 = \{(1,0/3), (2,0/7), (3,0/2), (4,0/9), (5,0/4)\}$$
$$\tilde{P}_4 = \{(1,0/5), (2,0/9), (3,0/4), (4,0/1), (5,0/2)\}$$

بنابراین بر طبق مدل فازی ارائه شده P_1 ، مسئله زمان‌بندی کارکنان به صورت برنامه ریزی ریاضی زیر فرموله می‌شود: P_2

$$\text{Min} \sum_{j=1}^{n} c_j x_j = 4x_1 + 3x_2 + 5x_3 + 2x_4 \qquad P_2$$

$$\begin{aligned}
\text{s.t. } & 1 - [(1 - 0/4x_1)(1 - 0/1x_2)(1 - 0/3x_3)(1 - 0/5x_4)] \geq \alpha \\
& 1 - [(1 - 0/1x_1)(1 - 0/3x_2)(1 - 0/7x_3)(1 - 0/9x_4)] \geq \alpha \\
& 1 - [(1 - 0/5x_1)(1 - 0/8x_2)(1 - 0/2x_3)(1 - 0/4x_4)] \geq \alpha \\
& 1 - [(1 - 0/7x_1)(1 - 0/2x_2)(1 - 0/9x_3)(1 - 0/1x_4)] \geq \alpha \\
& 1 - [(1 - 0/8x_1)(1 - 0/6x_2)(1 - 0/4x_3)(1 - 0/2x_4)] \geq \alpha \\
& x_j \in \{0,1\} \; j = 1,2,3,4
\end{aligned}$$

فرض کنید حداقل سطح تعریف شده برای انجام سفرها با α=0/5 مشخص شده باشد. مدل غیر خطی مسئله زمانبندی فازی کارکنان را با نرم افزار LINGO 11 حل کرده و به جواب بهینه زیر دست یافته ایم:

$x_1^* = 1, x_2^* = 0, x_3^* = 0, x_4^* = 1$ با α- سطح 0/5

۴-۱ حل مسئله در ابعاد مختلف

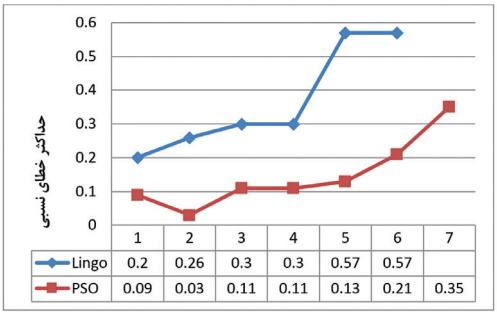
به منظور اطمینان از کارآ بودن الگوریتم پیشنهادی بهینه سازی ذرات انبوه در حل مسئله، مساله مورد پژوهش را در ابعاد مختلفی حل کرده و با جواب دقیق به دست آمده از الگوریتم شاخه و کران نرم افزار لینگو [xvi] 11 مقایسه شده است.

نتایج محاسباتی حاصل از حل مسئله مورد پژوهش در ابعاد گوناگون و روش های حل با الگوریتم بهینه سازی ذرات انبوه کد شده در محیط MATLAB و Lingo11 در جدول ۲ نشان داده شده است. سیستمی که به حل مسائل با ابعاد گوناگون پرداخته دارای مشخصات با پردازنده Intel و ۱/۸ گیگا هرتز و رم ۱/۵گیگا بایت است.

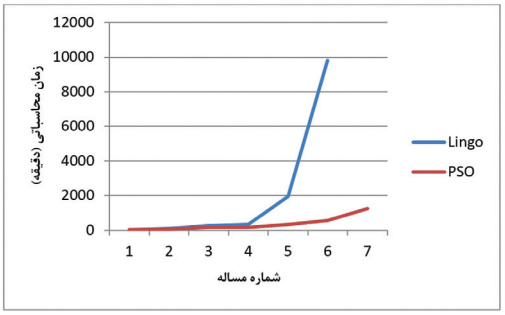
جدول۴. نتایج حاصل از انجام مساله در ابعاد گوناگون

شماره مسئله	افق برنامه ریزی (روز)	تعداد کارکنان	تعداد ماموریت	لینگو				بهینه سازی ذرات انبوه		
				حد بالای مقدار تابع هدف	بهترین جواب	حداکثر خطای نسبی مدل (٪)	زمان محاسباتی (min)	جواب	حداکثر خطای نسبی الگوریتم (٪)	زمان محاسباتی (min)
۱	۱۴	۳۰	۲۲۵	۷۴۲۵	۷۴۱۰	۰/۲	۲۲	۷۴۱۷	۰/۰۹	۱۹
۲	۱۴	۳۰	۳۵۰	۷۳۴۲	۷۳۲۳	۰/۲۶	۸۹	۷۳۲۱	۰/۰۳	۶۳
۳	۱۴	۳۵	۵۴۰	۷۵۶۱	۷۵۳۸	۰/۳	۲۴۷	۷۵۴۰	۰/۰۳	۱۵۸
۴	۳۰	۳۰	۸۵۰	۷۶۰۰	۷۵۷۷	۰/۳	۳۳۶	۷۵۶۹	۰/۱۱	۱۷۶
۵	۳۰	۴۰	۱۱۵۰	۱۳۵۰۰	۱۳۴۲۳	۰/۵۷	۱۹۶۰	۱۳۴۸۲	۰/۱۳	۳۱۴
۶	۳۰	۵۵	۲۲۰۰	۱۵۴۰۰	۱۵۳۱۲	۰/۵۷	۹۸۰۰	۱۵۳۶۷	۰/۲۱	۵۴۵
۷	۳۰	۸۰	۴۵۰۰	۲۱۳۰۰	---	---	---	۲۱۲۲۵	۰/۳۵	۱۲۴۰

درصد خطای محاسباتی الگوریتم های حل در کردار ۱ به تصویر کشیده است. کوچک بودن درصد خطای محاسباتی الگوریتم بهینه سازی ذرات انبوه از یک طرف و مدت زمان کمتر برای دست یافتن به جواب از طرف دیگر، برتری الگوریتم بهینه سازی ذرات انبوه را به اثبات می رساند.



نمودار ۱. مقایسه درصد خطاهای محاسباتی دو رویکرد حل ارائه شده



نمودار ۲. مقایسه زمان محاسباتی دو رویکرد حل ارائه شده

۵. نتیجه گیری

در این پژوهش مسئله زمان‌بندی کارکنان هواپیما را با تخصیص کارکنان به مجموعه ماموریت های از پیش تعیین شده ارائه کردیم. مسئله زمان‌بندی کارکنان هواپیما در دنیای واقعی به دلیل شرایط عدم قطعیت در انجام سفرهای از پیش تعیین شده که به دلایلی از قبیل غیبت ناگهانی کارکنان، تغییرات ناگهانی وضعیت آب و هوایی و ... که مستقیما در انجام پروازها تأثیرگذار است، اتفاق می‌افتد و وضعیت پرواز را در هر ماموریت از عددی که صفر و یا یک در حالت قطعی است به عددی بین صفر و یک در برنامه ریزی ها تغییر داده است که این تغییر لزوم استفاده از رویکردی مناسب برای مدلسازی مسئله، ما را به استفاده از تئوری مجموعه های فازی سوق داد که مدلسازی فازی از این مسئله بدنبال آن ارائه شد. به دلیل پیچیدگی محاسباتی مسئله مورد پژوهش و NP-hard بودن این مسئله لزوم استفاده از الگوریتم بهینه سازی ذرات انبوه که کاراً بودنش در این پژوهش با حل این مسئله در ابعاد مختلف و مقایسه با جواب های به دست آمده از نرم افزار Lingo به اثبات رسیده است.

۶. پی نوشت ها

1- Crew Scheduling Problem

2- Crew Pairing Problem

3- Crew Assignment Problem

4- Pairing

5- Genetic Algorithm

6- Cross Entropy

7- Differential Evolution

8- Particle Swarm Optimization

9- Branch and Bound Algorithm

10- Deadheading trip

11- Depth First Search

12- Home

13- Sigmoid Function

۷. مراجع

- Ahmadbeygi, E. A.(2009) "An integer programming approach to generatinig airline crew pairing", Computers and Operations Research, pp. 1284-1294

- Ball, M. and Roberts, A. (1985)"A graph partitioning approach to airline crew scheduling", Transportation Science ,pp. 107-126

- Beasley, J. and Chu, P. (1996) "A genetic algorithm for the set covering problem", European Journal of Operation Research, vol. No 94. pp. 392- 404

- Caprara, A., Fischetti, M., Toth, P., Vigo, D. and Guida, P. (1997) "Algorithm for railway crew management", Mathematical Programming, Vol. No 79, pp. 125-141

- Desaulniers, G. and Desrosiers, J. (1997) "Crew pairing at air France", European Journal of Operation Researcg,pp. 245-259.

- El Mouadani, E. A. (2001) "A bi-criterion approach for the airline crew rostering problem",Lecture Notes in Computer Science ,pp. 486-500.

- Eremeey, A. (1999)"A genetic algorithm with a none-binary repersentation for the set covering problem", In Proceedings of Operation Research No. 98, pp. 175.181

- Hung-Tso, L., Yen-Ting, C., Tsung-Yu, C. and Yi-Chun, L. (2012) "Crew rostering with multiple goals: An empirical study", Computers and Industrial Engineering, pp.,483-493 .

- Komilakis, H.and Stamatopoulos, P.(2002) "Crew pairing optimization with genetic algorithm", Lecture Notes in Computer Science, pp. 109-120.

- Krisnawati. S. (2011) "Comparison of cross entropy and differential evaluation to solve crew rostering problem", Industrial Engineering and Service Science pp.129-137 .

- Lagerholm, M., Petreson, C. and Soderberg, B.(2000)"Airline crew scheduling using Potts Meas Field Techniques", European Journal of Operation Research ,Vol .120, pp. 81-96.

- Lucic, Panta and Teodorovic, Dusan (2007) "Meta heuristics approach to the aircrew rostering problem", Annals of Operations Research . pp.311-338.

- Marchiori, E. and Steenbeek, A. (2000) "An evolutionary algorithm for large scale set covering problem with application to airline crew scheduling", In Real World Application of Evolutionary Computing. LNCS(1803) ,pp.367-381.

- Mora - Camino, F. (2001) "A bi-critertion approach for the airline crew rostering problem ", Lecture Notes in Computer Science , pp.93-102.

- Ozdemir, H. and Mohan, C.(2001) "Flight graph based genetic algorithm for crew scheduling in airlines", Information Sciences, Vol. No 133, pp.165-173.

- Santosa, B., Sunarto, A. and Rahman, A. (2010) "Using differential evolution method to solve crew rostering problem", Applied Mathematics, pp. 316-325.

- Sara, D.(1988) "The automatic assignment model" 28th. AGIFORS Symposium, Massachusetts, US

- Teodorvic, D. and Lucic, P.(1998) "A fuzzy set theory approach to the aircrew rostering problem". FUZZY Sets and System ,Vol. No 95, pp.261-271 .

- Vanhoucke, Mario and Maenhout, Broos (2010) "A hybrid scatter search heuristic for personalized crew rostering in the airline industry", European Journal of

Operational Research ,pp.155-167

- Yan, S., Tung, T. and Tu, Y.(2009)"Optimal construction of airline individual crew pairing", Computer and Operation Research, No 29, pp.. 147-159.

- سپهری, م. م.، نجمی, م. ر.، و خوش الحان، ف. (۱۳۸۳) "حل مساله زمان‌بندی خدمه راه آهن به کمک روش بهینه سازی مورچگان"، مجله فنی و مهندسی- دانشگاه تربیت مدرس .