

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

میلاذ 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

پذیرش: ۱۳۹۲/۰۹/۱۰

دریافت: ۱۳۹۲/۰۲/۱۵

چکیده:

مساله زمان بندی کارکنان هواپیما از مهم ترین مسائل در حوزه تحقیق در عملیات به شمار می رود و به طور عمومی شامل تخصیص گروه های کارکنان به سفرهایی است که می بایست طبق برنامه زمان بندی از پیش تعیین شده ای، توسط ناوگان موجود پوشش داده شوند. به طوری که هزینه های مربوط به تخصیص کارکنان به سفرها، کمینه شود. مسئله زمان بندی کارکنان به دو فاز کلی تقسیم می شود. در فاز اول، تمام سفرهای رفت و برگشتی که شروع و خاتمه آنها در محل استقرار کارکنان است، تحت عنوان مجموعه ماموریتها تعیین می شود. 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 زمان بندی کارکنان هواپیما ایجاد می کند. در حل مسئله زمان بندی 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.

واژه های کلیدی: زمان بندی کارکنان هواپیما، عدم قطعیت پرواز، مدلسازی فازی، بهینه سازی ذرات انبوه

۱. مقدمه

معایب و مزایایی بوده و نتایج متفاوتی را تولید کرده‌اند که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند. در خصوص استفاده از روش‌های دقیق برپایه تکنیک‌های تحقیق در عملیات می‌توان به مطالعه [Yan, Tung and Tu, 2002] اشاره کرد که از دیدگاه‌های سنتی حل مسائل بهینه‌سازی برای این مسئله استفاده کرده و برای مسائلی با ابعاد کوچک نتایج خوبی را تولید کرده است. یکی از مشکلات عمده‌ای که در استفاده از روش‌های 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 زمان‌بر می‌کند [Komilakis and Stamatopoulos, 2002]. در نتیجه در سال‌های اخیر با توجه به وجود مسائلی با ابعاد بزرگ در دنیای واقعی، استفاده از روش‌های 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 می‌توان به مطالعات [Mar-chiori and Steenbeek, 2000], [Ereamey, 1999], [Ozdemir and Mohan, 2001] اشاره کرد که از الگوریتم ژنتیک^v [Lucic and Teodorovic, 2007] [Lagerholm, Petreson, and Soderberg, 2000]، کراس آنترابی^{vi} و رشد تکاملی^{vii} [Krisnawati, 2011]، [Vanhouce and Maenhout, 2010]، [Santosa, Sunarto and Rahman, 2010] از تکنیک شبکه‌های عصبی برای حل مسئله CSP استفاده کرده‌اند و جواب‌های نسبتاً خوبی را تولید کرده‌اند. مسئله زمان‌بندی کارکنان بیشتر در صنعت هواپیمایی دارای کاربرد بوده است. از مهم‌ترین مطالعات صورت گرفته در این خصوص می‌توان به مطالعات [Mora Camino, 2001]

مسئله زمان‌بندی کارکنانⁱ یا CSP از معروف‌ترین مسائل در حوزه تحقیق در عملیات به شمار می‌رود. حوزه کاربرد مسئله CSP در سال‌های 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 سال‌های اخیر با توجه به این که بحث خصوصی‌سازی و برون‌سپاری در صنعت حمل‌ونقل به طور وسیعی مطرح شده است، این موضوع تا حدودی مورد توجه سازمان‌های ناوگان حمل‌ونقل قرار گرفته و استفاده از این مسئله و تکنیک‌های بهینه‌سازی 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 گروه‌های کارکنان به سفرهایی است که می‌بایست طبق برنامه زمان‌بندی از پیش تعیین شده‌ای 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 کارکنانⁱⁱ (CPP)

- مسئله تخصیص کارکنانⁱⁱⁱ (CAP)

مسئله CPP شامل یافتن مجموعه‌ای از سفرهای برگشتی تحت عنوان ماموریت^{iv} با حداقل هزینه است که هر یک، تعدادی از سفرها را می‌پوشاند.

مسئله CAP نیز شامل تخصیص اعضای گروه‌های کارکنان به سفرهاست که در این پژوهش به این قسمت مسئله یعنی تخصیص اعضای کارکنان به سفرها، می‌پردازیم.

برای حل مسئله زمان‌بندی کارکنان تاکنون روش‌های حل متنوعی بر پایه روش‌های دقیق و ابتکاری ارائه شده‌اند که هر یک دارای

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

الگوریتم پیشنهادی را در حل مساله به اثبات می رسانیم. در ادامه، این پژوهش به صورت زیر سازماندهی شده است: در بخش دوم مختصراً به معرفی تعاریفات و محدودیت هایی که در برنامه زمان بندی کارکنان موجود است، می پردازیم. در بخش سوم مدل سازی فازی و رویه حل بهینه سازی ذرات انبوه برای مساله مورد پژوهش بیان می شود. در بخش چهارم به بیان یک مثال موردی از مسئله زمان بندی کارکنان پرداخته می شود 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 می شود.

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 پروادهای 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 شود که هر سفر شامل 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، $a(i)$

[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] با توجه به در نظر گرفتن اهداف مختلف برای تخصیص ماموریتها به کارکنان، استفاده از رویکرد برنامه ریزی آرمانی در مدل سازی مسئله وارد کرده است. در استفاده از روش های ابتکاری در این حوزه می توان به مطالعات [Teodorovic and Sarra, 1988], [Beasley and Chu, 1996], [Lucic, 1998] اشاره کرد که از الگوریتم های شبیه سازی آیلینگ، شبکه های عصبی، منطق فازی و الگوریتم ژنتیک در مطالعات خود استفاده کرده اند. در مطالعه [Sepehri, Najmi and Khoshalhan, 2004] به حل برنامه ریزی و زمان بندی کار کارکنان و کارکنان راه آهن با استفاده از روش بهینه سازی مورچگان پرداخته شده است که یکی از روش های معروف بهینه سازی محسوب می شود و نتایج بسیار خوبی را نیز تولید کرده است. در پژوهش های 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 روش ها، 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 کاراً بودن

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 می شود که بخشی از این زمان موجه است و به عنوان زمان های استراحت کارکنان در نظر گرفته می شود 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.

$$Idle Time = td(j) - ta(i) \quad (2)$$

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 کرده اند. این گونه سفرها که به بیش از یک گروه کارکنان تخصیص می یابند و اصطلاحاً سفرهای بدون تهیه بلیط نامیده می شود برای شرکت مربوطه دارای هزینه ای اضافی هستند، چرا که گروه های کارکنان اضافی بدون پرداخت هزینه بلیط سوار می شوند و بدون اینکه کار کنند فضای از صندلی ها را نیز اشغال کرده اند که می بایست به مسافران دیگری تخصیص می یافت 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 زمان بندی کار کارکنان

با توجه به اینکه فضای جواب مورد جستجو بسیار بزرگ است

بعد از اینکه تمام سفرها با مشخصات بیان شده تعیین شدند می بایست 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 ماموریت های 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 می یابد، 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 می شود، یک زمان ماموریت تعریف می شود 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 می شود، 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 می شود:

$$Travel Time = \sum_{i \in P} ta(i) - td(i) \quad (1)$$

در رابطه فوق A معرف یک سفر است و P بیان کننده مجموعه

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

که در محیط متلب کدنویسی شده است، جواب بهینه مشخص می شود. شکل ۱ خلاصه ای از این دو مرحله را به صورت گرافیکی نمایش می دهد.

۳-۱ مدل سازی مسئله زمان بندی کارکنان

بعد از آنکه تمام ماموریت های موجه با استفاده از مرحله قبل تولید شدند، به مدلسازی مسئله مورد نظر پرداخته می شود. 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 $m \times n$ با درایه های با مقادیر صفر و یک تعریف می شود 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:

$$\text{Min } z = \sum_{j=1}^n c_j X_j \quad (3)$$

$$\text{S. t: } \sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \geq 1 \quad \text{for } i = 1, \dots, m \quad (4)$$

$$X_j = 0 \text{ or } 1 \quad \text{for } j = 1, \dots, n \quad (5)$$

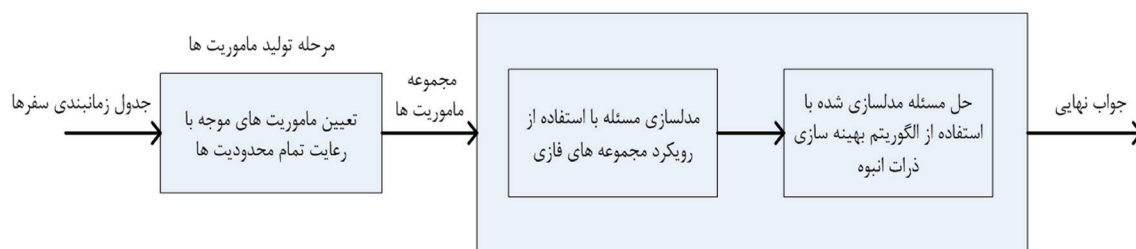
در ماتریس باینری $m \times n$ فوق، هر درایه (i, j) در ماتریس اگر یک باشد به این معناست که سطر i توسط ستون j ام تحت پوشش قرار می گیرد و اگر صفر باشد به این معناست که سطر مفروض تحت پوشش ستون j نیست. در رابطه (۴) که بیان کننده انتخاب زیر مجموعه ای از ستونها در بین n ستون با حداقل هزینه است،

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 می شود 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 هزینه های مربوط به آنها در مجموعه ای نگهداری می شوند و وارد مرحله بعدی می شویم. هزینه های مربوط به ماموریت که محاسبه می شود شامل مجموع هزینه های 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 همان طور 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 می شود و سپس با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ذرات انبوه

مرحله بهینه سازی



شکل ۱. مراحل تولید جواب موجه و جواب بهینه

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 می شود، روبه رو می شویم 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 مجموعه های 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 می شود [17].

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

قابل ذکر است که تعریف ۱ به جمع جبری^{xiii} مجموع دو مجموعه فازی معروف است.

$$1 - \mu_{j,k}(i) = 1 - \mu_j(i) - \mu_k(i) + \mu_j(i) \cdot \mu_k(i)$$

$$\mu_{j,k}(i) = (1 - \mu_j(i)) \cdot (1 - \mu_k(i))$$

(۷)

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

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 نهایی حضور دارد و در غیر این صورت این ستون در زیر مجموعه انتخاب شده از ستون ها وجود ندارد.

رابطه شماره (۵) تضمین می کند 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 این صورت صفر در نظر گرفته می شود. در مدل سازی زمان بندی کارکنان، هر سطر از این ماتریس ($i=1, \dots, m$) متناظر با سفرهای $T(i)$ و ستون های آن ($j=1, \dots, n$) متناظر با ماموریت های به دست آمده از مرحله قبل در نظر گرفته می شود و درایه های صفر و یک داخل ماتریس براساس اینکه هر ماموریت چه سفرهای را تحت پوشش خود قرار می دهد، کامل می شوند.

جدول ۱. نمادهای بکار رفته در مدل سازی 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

۳-۲-۲ حالت فازی

در دنیای واقعی استفاده از حالت دو ارزشی صفر و یک فراتر رفته و استفاده از حالات چندارزشی را الزامی می کند و منطق مجموعه های فازی به عنوان روشی برای بیان حالات چند ارزشی در این پژوهش استفاده می گردد.

در دنیای واقعی در نظر گرفتن عدم قطعیت، مدل سازی واقعی تری از مسئله ایجاد کرده و جواب های ایجاد شده از این مدل نیز قابلیت بیشتری برای پیاده سازی نیز دارند. در مسئله زمان بندی

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

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 می شوند 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 می کند. این الگوریتم با یک گروه از جوابهای تصادفی شروع به کار می کند، سپس برای یافتن جواب بهینه در فضای مسئله با بهنگام کردن موقعیت و سرعت ذره ها به جستجو می پردازد. هر ذره مکان های که در آن قرار می گیرند را در حافظه نگهداشته و از بهترین آنها جهت ادامه مسیر استفاده می کند. 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 می کنند. 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 می کنیم. $(i=1,2,\dots,n)$
- ۲- موقعیت هر ذره را بر اساس تابع هدف ارزیابی می کنیم.
- ۳- اگر موقعیت فعلی ذره بهتر از موقعیت قبلی آن باشد، آن را به روز می کنیم. (Pb_i) .

۴- بهترین ذره را تعیین می کنیم (gb_1) .

۵- سرعت ذرات را در مرحله t ام براساس رابطه ۱۱ به روز می کنیم:

$$v_{ij}^{t+1} = v_{ij}^t + k_1 \cdot \text{rand}_1 \cdot (Pb_{ij}^t - x_{ij}^t) + k_2 \cdot \text{rand}_2 \cdot (gb_{ij}^t - x_{ij}^t) \quad (11)$$

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

$$\bigcup_{j=1}^n \tilde{P}_j = \{(i, \mu_{(1,2,\dots,n)}(i)) : i \in I\} \quad (8)$$

i امین درجه عضویت اجتماع به صورت زیر تعیین می شود:

$$\mu_{(1,2,\dots,n)}(i) = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - \mu_j(i)) \quad (9)$$

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

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 $-\alpha$ سطح برای

$$\forall i \in I, \bigcup_{j \in J_0} \tilde{P}_j = \{(i, \mu_{(1,2,\dots,n)}(i)) : i \in I\} \quad (10)$$

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

هم اکنون آماده تعریف مسئله زمان بندی کارکنان در حالت فازی $(FCSP)^{xiv}$ می باشیم. $FCSP$ به جستجوی $-\alpha$ سطح \tilde{R}_α بهینه با الزام خواسته های 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 j ام است، بنابراین $FCSP$ به صورت یک برنامه ریزی ریاضی که در زیر آمده است فرموله می شود:

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{j=1}^n c_j X_j \quad (P_1) \\ & \text{s.t.} \quad 1 - \prod_{j=1}^n (1 - \mu_j(i) \cdot X_j) \geq \alpha \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & \quad X_j \in \{0,1\}, \quad j = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

جدول ۲. 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_{ij}	پارامتری فازی برای بیان انجام سفر i ام در ماموریت j ام
α	سطح دسترسی برای انجام سفرها

۳- الگوریتم بهینه سازی ذرات انبوه

یک تکنیک بهینه سازی احتمالی و الگوریتم جستجو بر اساس

	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

شکل ۲. نمایش جدولی جواب ها در الگوریتم PSO باینری

۴. مثال موردی

فرض کنید قرار است برای ۵ سفر برنامه ریزی شده، $I = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ در ۴ ماموریت، $J = \{1, 2, 3, 4\}$ گنجانده شده، کم هزینه ترین ماموریت ها را مشخص کنیم، به طوری که تمام سفرهای برنامه ریزی شده برای مسافران را با حداقل اطمینان - سطح پوشش دهیم. فرض کنید که $\mu_j(i) \in [0, 1], i \in I, j \in J$ به عنوان میزان اطمینانی از انجام سفر i با ماموریت j باشد و $X_j = 1$ وقتی که ماموریت j از انتخاب شود و در غیر این صورت ۰. هزینه انجام ماموریت j ، با نشان داده شده است. جدول ۱ ماتریس درجه و میزان عضویت هر یک از سفرها را در ماموریتها، $\mu_j(i)$ و $j = 1, 2, \dots, 4, i = 1, 2, \dots, 5$ ، را نمایش می دهد.

جدول ۳. درجه عضویت هر یک از سفرها در ماموریت ها

ماموریت	$=1j(c_1 = 4)$	$=j 2(c_2 = 3)$	$=j 3(c_3 = 5)$	$=4j(c_4 = 2)$
سفر برنامه ریزی شده				
$=1i$	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 \bar{P}_j نمایش داده می شود. میزان

۲ را به خود می گیرد. Rand نیز مقادیر تصادفی بین $[0, 1]$ را می گیرد).

۷- ذرات را بر اساس رابطه ۱۲ به مکان های جدیدشان در دوره $t+1$ انتقال می دهیم:

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

۸- به مرحله دوم باز می گردیم، 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 می شود. بنابراین یک نگاشت از v_{ij} به احتمالی بین $[0, 1]$ لازم است مشخص شود که این عمل توسط تابع سیگموئید^{xv} انجام می پذیرد. تابع سیگموئید به صورت رابطه ۱۳ مشخص می شود:

$$sig(v) = \frac{1}{1 + e^{-v}} \quad (13)$$

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

$$x_{ij}^{t+1} = \begin{cases} 0 & \text{if } r_{ij}^t \geq sig(v_{ij}^{t+1}) \\ 1 & \text{if } r_{ij}^t < sig(v_{ij}^{t+1}) \end{cases} \quad (14)$$

که از توزیع یکنواخت بین صفر و یک پیروی می کند.

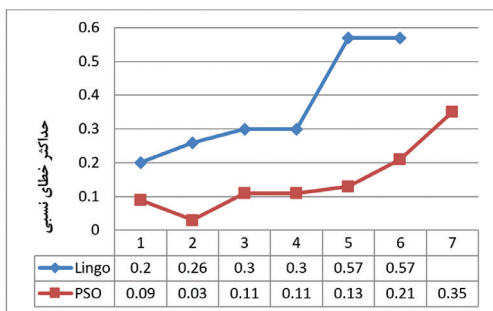
ممکن است بعد از به روز رسانی موقعیت ذره، این تغییر موجه نباشد که در این رویکرد حل، از مکانیزم رد جواب های غیرموجه استفاده می کنیم. بعد از به روز رسانی مربوط به سرعت و موقعیت ذرات، ذرات بوجود آمده به صورت جدولی زیر نمایش داده می شوند.

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

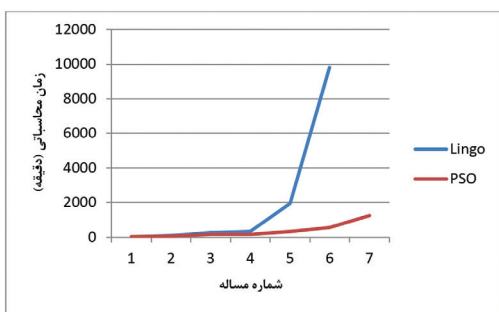
جدول ۴. نتایج حاصل از انجام مساله در ابعاد گوناگون

شماره مسئله	لش 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	۷۳۳۳	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	۱۳۴۳۳	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

اطمینان انجام سفر نام با ماموریت نام با $\mu_j(i)$, $i \in I, j \in J$. بنابراین مجموعه های فازی زیر را داریم:

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

بنابراین بر طبق مدل فازی ارائه شده P_1 ، مسئله زمان بندی

کارکنان به صورت برنامه ریزی ریاضی زیر فرموله می شود:

$$\begin{aligned} \text{Min } \sum_{j=1}^n c_j x_j &= 4x_1 + 3x_2 + 5x_3 + 2x_4 & P_2 \\ \text{s.t. } 1 - [(1 - 0/4x_1)(1 - 0/1x_2)(1 - 0/3x_3)(1 - 0/5x_4)] &\geq \alpha \\ 1 - [(1 - 0/1x_1)(1 - 0/3x_2)(1 - 0/7x_3)(1 - 0/9x_4)] &\geq \alpha \\ 1 - [(1 - 0/5x_1)(1 - 0/8x_2)(1 - 0/2x_3)(1 - 0/4x_4)] &\geq \alpha \\ 1 - [(1 - 0/7x_1)(1 - 0/2x_2)(1 - 0/9x_3)(1 - 0/1x_4)] &\geq \alpha \\ 1 - [(1 - 0/8x_1)(1 - 0/6x_2)(1 - 0/4x_3)(1 - 0/2x_4)] &\geq \alpha \\ x_j \in \{0,1\} & \quad j = 1,2,3,4 \end{aligned}$$

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

$$x_1^* = 1, x_2^* = 0, x_3^* = 0, x_4^* = 1 \text{ سطح } \alpha = 0/5$$

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 11^{xvi} 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 ۱/۵ گیگا بایت است.

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.

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 مستقیماً 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

- lutionary 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-criterion 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
- Teodorovic, 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
- Eremeev, A. (1999)"A genetic algorithm with a none-binary representation 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 evo-

میلاذ پاک سرشت، ایرج مهدوی، بابک شیرازی

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 زمان بندی خدمه راه آهن به کمک روش بهینه سازی
مورچگان"، مجله فنی و مهندسی- دانشگاه تربیت مدرس .