ارایه مدلی ابتکاری جهت برنامه ریزی کار خدمه و پرسنل راه آهن

مسعود یقینی*، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
سید فرید قنادپور، کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
E-mail: yaghini@iust.ac.ir
دریافت:۱۳۸٦/۱۲/۲۱-پذیرش:۱۳۸۸/۰۲/۰۸

چکیده

ارایه مدلی برای برنامه ریزی کار خدمه راه آهن، هدف عمده از پژوهش حاضر است که در آن می‌بایست برای گروههای خدمه مورد نیاز جهت ارایه سرویس به سفرهای موجود در جدول زمان بندی حرکت قطارها، برنامه ریزی شود. مدل پیشنهادی به دو فاز مستقل تقسیم می شود که در فاز اول با استفاده از استراتژی جستجوی Depth First Search ***تمام سفرهای رفت و برگشتی که شروع و خاتمه آنها در محل استقرار خدمه است تحت عنوان مجموعه*** pairing ***ها تعیین می شوند. در فاز دوم با استفاده از مسأله*** Set Covering Problem ***به مدلسازی مسأله پرداخته می‌شود و با استفاده از الگوریتم ژنتیک با تعریف اپراتورهایی خاص بهینه می شود. در نهایت زیر مجموعه ای از*** pairing ***ها با حداقل هزینه که تمام سفرها را تحت پوشش قرار داده اند برای تخصیص به گروههای خدمه تعیین می شوند. نهایتا" برای تعیین اعتبار مدل پیشنهادی به حل چندین مسأله از مسایلی که توسط*** Beasley ***برای مسأله برنامه ریزی خدمه مطرح شده اند پرداخته می شود که به استناد نتایج حاصل شده، الگوریتم پیشنهادی جواب هایی با کیفیت و زمان حل مناسب تولید کرده است.***

واژه های کلیدی: برنامه ریزی کار پرسنل، مسأله *Set Covering Problem (SCP)*، الگوریتم ژنتیک، روش جستجوی *Depth First Search (DFS)*

۱. مقدمه

در این پژوهش به ارایه مدلی ابتکاری برای برنامه‌ریزی وظایف و کار پرسنل (خدمه) در راه‌آهن پرداخته می‌شود که معمولا" تحت عنوان کلی مسأله برنامه‌ریزی خدمه *(CSP)*[1] شناخته شده و از مسایل معروف در حوزه تحقیق در عملیات به شمار می‌رود. حوزه کاربرد مسأله *CSP* در سالهای اخیر به طور وسیعی در صنایع هواپیمایی مطرح بوده، چرا که در صنایع هوایی ۱۵ تا ۲۰٪ کل هزینه های عملیاتی شامل هزینه های مربوط به خدمه است و توجه به این موضوع در این صنعت بسیار قابل ملاحظه بوده است [۱]. در سالهای اخیر با توجه به اینکه بحث خصوصی سازی و برون سپاری در صنعت حمل و نقل ریلی به طور وسیعی مطرح شده است، این موضوع تا حدودی مورد توجه سازمانهای راه آهن و شرکت های حمل و نقل ریلی قرار گرفته و استفاده از این مسأله و تکنیک های بهینه سازی برای کاهش هزینه های عملیاتی و پرسنلی بسیار مورد نظر بوده است [۲]. با توجه به این موضوع در این پژوهش قصد بر آن است که بر پایه روش های ابتکاری و بهره گیری از مسأله معروف *SCP*[2]، مدلی برای برنامه ریزی وظایف خدمه راه آهن طراحی شود که با استفاده از آن برنامه کلیه هزینه های مربوط به استفاده از کارکنان حداقل شود.

مسأله برنامه ریزی خدمه *(CSP)* به طور عمومی شامل تخصیص گروه های خدمه به سفرهایی است که می‌بایست طبق برنامه زمان بندی از پیش تعیین شده ای توسط ناوگان موجود پوشش داده شوند، به طوری که هزینه های مربوط به تخصیص خدمه به سفرها کمینه شود. مسأله *CSP* خود به دو زیر مسأله اصلی و مستقل تقسیم می‌شود :

- مسأله *Crew Pairing Problem (CPP)*
- مسأله *Crew Assigning Problem (CAP)*

*نویسنده مسئول

مسأله *CPP* که موضوع اصلی در این پژوهش است شامل یافتن مجموعه‌ای از سفرهای برگشتی[3] تحت عنوان *Pairing* با حداقل هزینه است که هریک، تعدادی از سفرها را پوشش می‌دهد و به عنوان یک مأموریت کاری[4] به یک گروه خدمه تخصیص می‌یابد. شایان ذکر است که شروع و خاتمه هر *pairing* می بایست در محل استقرار گروههای کارکنان باشد که با نام *Home* نام گذاری می‌شود و اعزام خدمه برای انجام مأموریت و بازگشت آنها بعد از انجام مأموریت می‌بایست در *Home* باشد. مجموعه *pairing* های تعیین شده به عنوان یک جواب موجه می‌بایست کلیه سفرها را پوشش دهد و تعداد این *pairing* ها بیان کننده تعداد گروه کارکنان مورد نیاز است. مسأله *CAP* نیز شامل تخصیص اعضای گروه های خدمه به *pairing* ها و یا سفرهاست که در این پژوهش به آن پرداخته نمی‌شود.

برای حل مسأله برنامه ریزی خدمه *(CSP)* تا کنون روش های حل متنوعی بر پایه روش های دقیق و ابتکاری ارایه شده اند که هر کدام دارای معایب و مزایایی بوده و نتایج متفاوتی را تولید کرده اند که در ادامه مختصرا" مورد بررسی قرار می گیرند. در خصوص استفاده از روش های دقیق بر پایه تکنیک های تحقیق در عملیات می‌توان به مطالعه [١٦] اشاره کرد که از دیدگاههای سنتی حل مسایل بهینه سازی برای این مسأله استفاده کرده است و برای مسایلی با ابعاد کوچک نتایج خوبی را تولید کرده است. یکی از مشکلات عمده‌ای که در استفاده از روش های دقیق برای حل مسأله *CSP* پدید می آید، جستجو در فضای جواب بسیار بزرگی است که این فضا با افزایش تعداد سفرها به طور نمایی افزایش پیدا می کند و حل مسأله را در ابعاد بزرگ بسیار پیچیده و زمان بر می کند [٣]. درنتیجه در سالهای اخیر با توجه به وجود مسایلی 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 روش های ابتکاری[5] و فرا ابتکاری[6] افزایش پیدا کرده است تا جوابی مناسب و نزدیک به جواب بهینه در مدت زمان اندک به دست آید. از مهم ترین مطالعاتی که در این خصوص صورت گرفته است می‌توان به مطالعات [٦،٤،٥] اشاره کرد که از الگوریتم ژنتیک و [٧] از تکنیک شبکه های عصبی برای حل مسأله *CSP* استفاده کرده اند و جوابهای نسبتا خوبی را تولید کرده اند.همان طور که ذکر شد در سالهای اخیر استفاده از مسأله دو دیدگاه استفاده از مسایل *8SCP* و *SPP* در مسأله برنامه‌ریزی خدمه مطرح شده و پس از مدلسازی مورد مقایسه قرار گرفته اند.

CSP بیشتر در صنعت هواپیمایی دارای کاربرد بوده است. از مهم ترین مطالعات صورت گرفته در این خصوص می توان به مطالعات [١، ٨، ٩، ١٠] اشاره کرد که با استفاده از روش های برنامه ریزی ریاضی مانند تکنیک های برنامه ریزی خطی و عدد صحیح به حل مسأله *CSP* در حوزه صنایع هواپیمایی پرداخته‌اند. همچنین در استفاده از روش های ابتکاری در این حوزه می توان به مطالعات [١١، ١٢، ١٣، ١٤] اشاره کرد که از الگوریتم های شبیه سازی آنیلینگ، شبکه های عصبی، منطق فازی و الگوریتم ژنتیک در مطالعات خود استفاده کرده اند. یکی از مطالعات ارزنده ای که در این حوزه با استفاده از الگوریتم ژنتیک صورت گرفته است مطالعه [٣] است که با تقسیم مسأله *CPP* به دو فاز مستقل تولید *pairing* و فاز بهینه سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک به حل مسأله می پردازد. این مطالعه که به حل یک مسأله واقعی با ابعاد بسیار بزرگ پرداخته است به تولید نتایج بسیار عالی نیز منتج شده است. از جمله مطالعات دیگری که در این حوزه صورت گرفته است مطالعه [١٥] است که برای حل مسأله *CSP* در صنایع هوایی از الگوریتم ژنتیک ترکیبی و همچنین از دیدگاه مسأله *SPP*[7] بهره گرفته است و به تولید نتایج مناسبی نیز ختم شده است. از دیگر مطالعات مهمی که اخیرا در این حوزه صورت گرفته است می‌توان به مطالعات [١٧، ١٨] اشاره کرد که مسأله *CSP* را با تلفیقی از مسایل مسیریابی شبکه حل و نتایج بسیار خوبی را تولید کرده‌اند.

در حوزه حمل و نقل ریلی نیز مطالعات اندکی تاکنون صورت گرفته است که می‌توان به مطالعات [١٩، ٢٠] اشاره کرد که با استفاده از روش جستجوی ممنوع و الگوریتم ژنتیک به حل مسأله *CPP* در برنامه ریزی روزانه و هفتگی خدمه در متروهای زیرزمینی پرداخته اند و نتایج بسیار خوبی را نیز تولید کرده‌اند. از جمله دیگر مطالعات صورت گرفته می توان به مطالعه[٢] که به معرفی و مقایسه برخی الگوریتم های ریاضی و دیدگاههای دقیق برای حل مسأله مدیریت برنامه ریزی خدمه در صنعت راه آهن پرداخته است اشاره کرد. مطالعه مشابه دیگری که پژوهش کامل تری نسبت به مطالعه [٢] است به مطالعه [٢١] مربوط می‌شود که به معرفی انواع دیدگاههای دقیق و ابتکاری در حوزه حمل و نقل ریلی برای مسأله *CSP* پرداخته و الگوریتم های حل هرکدام را مختصرا" بیان کرده است. لازم به ذکر است که در مطالعه فوق، بنابراین با توجه به افزایش نیاز صنعت حمل نقل ریلی به استفاده از این مسأله و همچنین باتوجه به مطالعات اندکی که تاکنون در

این حوزه صورت گرفته است، پژوهش حاضر به پیشنهاد روش مناسبی برای برنامه ریزی خدمه و پرسنل راه آهن می‌پردازد که در ادامه مورد بررسی قرار می گیرد. لازم به ذکر است که در داخل کشور نیز مطالعات معتبر دیگری که به طور مستقیم به بررسی موضوع مورد مطالعه پرداخته‌اند یافت می‌شود که به عنوان نمونه می‌توان به [٢٦، ٢٧] اشاره کرد. در مطالعهٔ [٢٧] به حل برنامه‌ریزی وزمان‌بندی کار خدمه و کارکنان راه‌آهن با استفاده از روش بهینه‌یابی مورچگان پرداخته شده است که یکی از روش‌های معروف بهینه‌سازی محسوب می‌شود و نتایج بسیار خوبی را نیز تولید کرده است. مطالعهٔ دیگری که در این زمینه صورت گرفته است مطالعهٔ [٢٨] است که با استفاده از الگوریتم های تولید مأموریت و خطوط کاری به برنامه‌ریزی اعزام روسای قطار در شبکهٔ ریلی جمهوری اسلامی ایران پرداخته و نتایج خوبی را نیز تولید کرده است.

در ادامه، این پژوهش به صورت زیر ساختار دهی شده است : در بخش دوم مختصرا" در خصوص تعاریف، محدودیت ها و فرضیات در نظرگفته شده در برنامه ریزی وظایف کارکنان توضیحاتی بیان می‌شود. در بخش سوم رویه حلی که برای حل این مسأله انتخاب شده است به طور مفصل بیان می شود و در بخش چهارم به منظور نشان دادن اعتبار الگوریتم حل بیان شده شش مسأله از مسایل آزمایشی *Beasley* و *Cao* [٢٢] حل می‌شود و در انتهای بخش به تحلیل نتایج حاصل پرداخته می‌شود. در بخش پنجم نیز جمع بندی و نتیجه گیری از بحث بیان شده مطرح می شود.

٢. برنامه ریزی کار خدمه و پرسنل در راه آهن

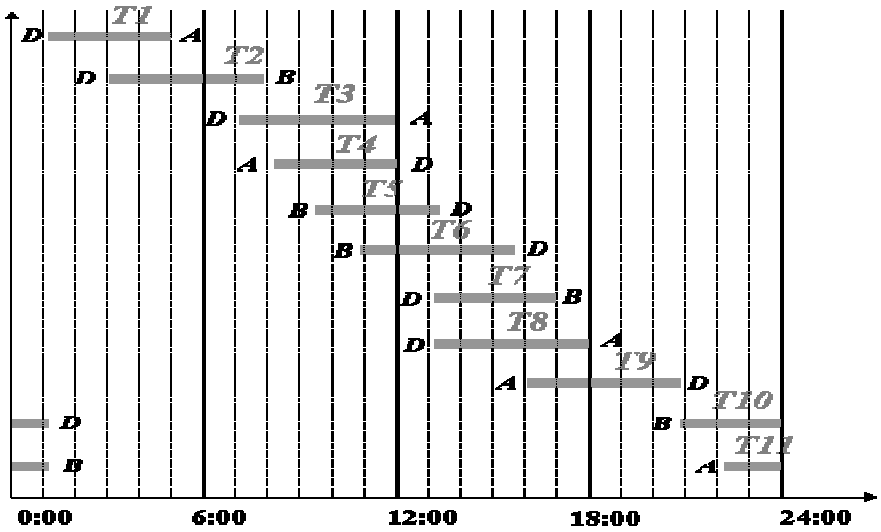
قبل از این که به بیان تعاریف، محدودیت ها و فرضیات در نظر گرفته شده پرداخته شود، درباره تفاوت های بین برنامه ریزی خدمه در صنعت راه آهن و دیگر سناریوها در صنایع دیگری مانند هواپیمایی و ... مختصرا" توضیحاتی بیان می شود [٢١] :

نمونه ها و مسایلی که در صنایع هوایی و یا شرکت های حمل و نقل شهری مطرح می شود از لحاظ ابعاد، نسبتا" بزرگ تر از نمونه های مطرح شده در حمل و نقل ریلی است. همچنین کنترل محدودیت های واقعی که در راه آهن مطرح می شود بسیار پیچیده تر و مشکل‌تر است، از قبیل پوشش دادن کلیه سفرهایی با مسافت های بسیار بلند و یا خیلی کوتاه که در این حالت بحث حداکثر زمان مأموریت خدمه، استراحت ها و وقفه های مجازی که خدمه در طول مأموریت می بایست داشته باشند مطرح می شود. علاوه بر این، یک سری محدودیت‌های خاص نیز وجود دارند که بر مدلسازی مسأله تأثیر می گذارند، مانند این نکته که گروه های خدمه می بایست به محل استقرار اولیه خود قبل از رسیدن به حداکثر زمان مجاز رسیده باشند و یا اینکه به محل های دیگری در مدت زمان معینی گسیل شوند.

یکی از ورودی های اساسی برای شروع برنامه ریزی کار خدمه و پرسنل، داشتن یک جدول برنامه ریزی از سرویس ها و خدمات قطارهایی[٩] است که برای پریودهای زمانی مشخصی تنظیم شده است و شامل جابجایی بار و مسافر و یا انتقال واگنهای خالی و تجهیزات بین ایستگاههای مختلف است. هر سرویسی که می بایست توسط قطارها صورت گیرد *(Train Service)*، باید خود به چندین سفر[١٠]متوالی و موجه تقسیم شود که هر سفر – که در برخی از مطالعات یک *Leg* نامیده می شود – شامل قسمتی از سفرهای یک قطار است که می بایست توسط یک گروه خدمه 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 می بایست به برنامه ریزی و تخصیص هر گروه خدمه به سفرها پرداخته شود، به این صورت که هر گروه خدمه موظف است، چندین سفر متوالی را تحت عنوان یک *pairing* و یا یک *roster* تحت پوشش قرار دهد و به عنوان مأموریت آن را انجام دهد. شکل شماره (١) یک جدول زمان بندی از تعدادی سفر (*T(i)*) را با پریودی روزانه در یک شبکه‌ای با سه ایستگاه *A*، *B* و *D* نمایش می‌دهد که در آن ایستگاه *D* به عنوان *Home* و یا محل استقرار گروه های خدمه درنظر گرفته می‌شود.



شکل ۱. یک برنامه زمان بندی نمونه ی روزانه از سفرها به همراه مشخصات آنها

لازم به ذکر است که در شبکه مفروض بین سه ایستگاه فوق ایستگاههای زیاد دیگری نیز وجود دارند که نشان داده نشده است چراکه می بایست توسط گروه خدمه تخصیص داده شده طی شوند و در حقیقت این سه ایستگاه، ایستگاههایی هستند که گروههای خدمه می‌توانند پست های کاری خود را در آنجا تعویض کنند. به عنوان مثال در سفر *T1* یا *D-A* که از *D* به سمت *A* آغاز می شود، ایستگاههای بیشمار دیگری نیز می‌توانند وجود داشته باشند که می‌بایست توسط همان گروه خدمه تخصیص یافته شده طی شوند و وقتی یک گروه خدمه به *A* می رسد تصمیم گیری می شود و یکی از سفرهای *A-D* (مانند *T4* یا *T9*) یا *A-B* به عنوان ادامه انجام مأموریت انتخاب می شود که البته این تصمیم گیری بر اساس برنامه‌ای که تهیه آن موضوع اصلی این پژوهش است و برای گروههای خدمه برنامه ریزی شده است اتخاذ می شود.

همان گونه که بیان شد پس از یافتن سفرها با مشخصات آنها می بایست به تولید *pairing* هایی موجه پرداخته شود که شرط موجه بودن آنها به یک سری محدودیت هایی بستگی دارد که به شرح ذیل هستند و می‌بایست تمامی آنها رعایت شوند :

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

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

۳. برای مأموریت هر گروه خدمه که با یک *pairing* مشخص می شود، یک حداکثر زمان مأموریت تعریف می‌شود که تجاوز از این زمان مجاز نیست و تا قبل از رسیدن به این زمان، گروههای خدمه می بایست به *Home* و یا محل استقرار اولیه بازگشته باشند.

٤. کل مدت زمان یک *pairing* که به عنوان زمان مأموریت گروه خدمه 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 گروههای خدمه می بایست آنها را طی کنند و به صورت رابطه شماره (۱) محاسبه می شود:

$$Travel \quad \text{Time} = \sum_{i \in P} ta(i) - td(i) \qquad (۱)$$

در رابطه فوق *i* معرف یک سفر است و *P* بیان کننده مجموعه سفرهایی است که در یک *pairing* مفروض آمده است. قسمت دوم از مدت زمان یک *pairing* به مجموع زمانهای بیکاری گروههای خدمه در یک *pairing* مربوط می شود که بخشی از این زمان موجه است و به عنوان زمانهای استراحت خدمه در نظر گرفته می شود و بخش دیگر مجاز نیست و تا حد امکان می بایست حداقل شود. رابطه شماره (۲) محاسبه زمان بیکاری را برای دو سفر متوالی *i* و *j* در یک *pairing* نمایش می‌دهد که

فاصله زمانی بین پایان یک سفر تا شروع سفر بعدی است.

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

نکته دیگر که می بایست در شروع کار و تعیین سفرها به همراه مشخصات آنها مورد ملاحظه قرار گیرد این است که هر سفر به تنهایی می‌بایست از حداکثر زمان مجاز تعریف شده کمتر باشد و از آن تجاوز نکند تا شرط موجه بودن جوابها از ابتدا حفظ شود.

۵. نکته مهم دیگری که می بایست مورد ملاحظه قرار گیرد این است که گاهی اوقات در یک سفر و در کنار گروه خدمه‌ای که به آن سفر تخصیص یافته است و در آن قطار در حال انجام مأموریت هستند، گروه های دیگری نیز حضور دارند که تنها به منظور رفتن به ایستگاه دیگری برای ادامه مأموریت خود در آن قطار حضور پیدا کرده اند. این گونه سفرها که به بیش از یک گروه خدمه تخصیص می‌یابند و اصطلاحا" *deadheading trip* نامیده می شود برای شرکت مربوطه دارای هزینه ای اضافی هستند، چرا که گروه‌های خدمه اضافی بدون پرداخت هزینه بلیط سوار می‌شوند و بدون اینکه کار کنند فضایی از صندلی ها را نیز اشغال کرده‌اند که می‌بایست به مسافران دیگری تخصیص مسی یافت و در حقیقت مانند مسافرانی هستند که رایگان سوار شده اند. بنابراین واضح است که در جواب های خوب می‌بایست از چنین سفرهایی جلوگیری شود، اگرچه لزوما" همیشه نمی توان جوابی بدون سفرهای *deadhead* به دست آورد، ولی می بایست این سفرها تا حد ممکن حداقل شوند. همچنین نشان داده شده است که گاهی اوقات جوابهایی با داشتن چنین سفرهایی و با در نظر گرفتن جریمه برای آنها به مراتب جوابهایی بهتر از حالتی هستند که هیچ سفر *deadhead* نداشته باشد [۳]. علاوه بر این، اجازه دادن وجود چنین سفرهایی درجواب، حل مسأله را بسیار پیچیده تر و زمان‌برتر می کند چراکه فضای جواب بسیار بزرگ تر می شود و جستجو در این فضا برای یافتن جواب بهینه بسیار مشکل تر خواهد بود. همچنین جلوگیری از حضور سفرهای *deadhead* در جواب با اینکه باعث کاهش فضای جواب و سهولت در جستجو برای یافتن جواب بهینه می شود، ولی ممکن است بعضی جواب های خوب را از فضای جواب حذف کند.

درنهایت هدف یافتن زیر مجموعه ای از مجموعه کل *pairing* های موجهی است که دارای حداقل هزینه عملیاتی باشند و هر کدام به یک گروه خدمه تخصیص یافته باشند. شایان ذکر است که مجموعه *pairing* های فوق می‌بایست تمام سفرها را تحت پوشش قرار دهد، به این صورت که سفر تخصیص نیافته ای وجود نداشته باشد وهر سفر حداقل به یک گروه خدمه و یا یک *pairing* تعلق داشته باشد.

۳. الگوریتم حل ابتکاری برای برنامه ریزی و زمان بندی کار خدمه

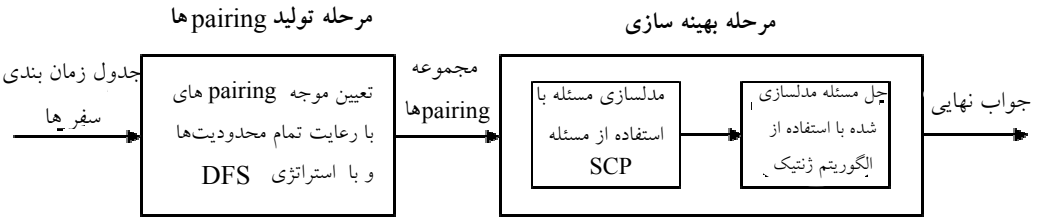
با توجه به اینکه فضای جواب مورد جستجو بسیار بزرگ است، در این پژوهش فرآیند حل مسأله به دو مرحله مستقل تقسیم می‌شود که به شرح ذیل است:

۱. مرحله تولید *pairing* های موجه : در این مرحله سعی می شود که تمام *pairing* های موجهی که از جدول زمانی سفرهای داده شده – مانند شکل نمونه شماره (۱) – 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 *DFS* [11] صورت می‌گیرد و کلیه *pairing* های موجه یافت شده به همراه محاسبه هزینه های مربوط به آنها در مجموعه ای نگهداری می‌شوند و وارد مرحله بعدی می شویم. هزینه های مربوط به هر *pairing* که محاسبه می شود شامل مجموع هزینه های دستمزد انجام هر سفر، محاسبه مجموع زمانهای بیکاری که در *pairing* مورد نظر وجود دارد و کل زمان یک *pairing* از شروع در *Home* 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 *pairing* های به دست آمده از مرحله قبل با حداقل هزینه به دست آید به طوری که تمامی سفرها را پوشش دهد و هر سفر حداقل به یک *pairing* تخصیص یافته باشد.

شایان ذکر است که در این مرحله، مسأله مورد نظر با اطلاعات حاصل از مرحله قبل و با استفاده ازمسأله *SCP* مدل سازی می‌شودو سپس با استفاده از یک الگوریتم ژنتیک پیشنهادی به همراه تعریف اپراتورهایی خاص بهینه می شود. شکل (۲) خلاصه ای از این دو مرحله را به صورت گرافیکی نمایش می دهد.



شکل ۲. فرآیند حل پیشنهادی برای برنامه ریزی کار خدمه راه آهن

۳-۱ تولید *Pairing* های موجه

به منظور تولید انبوهی از *pairing* های موجه ابتدا می‌بایست جدول زمان بندی شده از سفرها به صورت یک گراف جهت دار $G=(V,E)$ تبدیل شود که در آن V مجموعه رئوس گراف G است و هر راس i آن نیز معرف سفر i یا $T(i)$ است. لازم به ذکر است که مشخصات هر سفر i از قبیل زمان اعزام از مبدا، ایستگاه مبدا، ایستگاه مقصد و زمان رسیدن به مقصد به عنوان ویژگی های گره i در نظر گرفته شود. با توجه به توضیحات گذشته می بایست گره هایی برای محل استقرار گروههای خدمه در نظر گرفته شود که پس از مدت زمان تعیین شده به آنجا بازشوند. در گراف جهت دار G این دپوها با d_i نمایش داده می شوند که محل استقرار گروه خدمه i است. علاوه بر این در گراف جهت دار فوق، E مجموعه تمام کناره های[۱۲] گراف است که به صورت کمان (i,j) بین هر راس i و j نمایش داده می شود.باید گفت که کمان (i,j) تنها زمانی در گراف G حضور دارد که سفر j با حفظ شرایط توجیه پذیری امکان این که بلافاصله بعد از سفر i قرار گیرد را داشته باشد. به عبارت دیگر تحت دو شرط ذیل امکان برقراری کمان (i,j) بین دو راس i و j ایجاد می‌شود :

- انطباق مبدا سفر j با مقصد سفر i و یا $a(i)=d(j)$.
- شرط اساسی دیگر در نظر گرفتن یک فاصله زمانی ثابتی بین هر رسیدن و اعزام است که بر اساس ملاحظات و نیازمندیهای فنی تعیین می شود و به صورت رابطه شماره (۳) محاسبه می شود:

$$td(j) - ta(i) \geq tech.time(i, j) > 0 \qquad (۳)$$

علاوه بر کناره های فوق، کناره های دیگری نیز وجود دارند که به صورت $(d_k, i) \in E$ و $(j, d_k) \in E$ هستند و برای برقراری ارتباط گره ها با گره d_i می باشند که نشان دهنده محل استقرار گروههای خدمه است. شایان ذکر است که کمانهای فوق به ترتیب برای هر سفر i که با d_k شروع می شوند و هر سفر j که به d_k ختم می شود، تعریف می شوند.

درنتیجه بعد از تشکیل گراف جهت دار G با فرضیات فوق، با استراتژی جستجوی *DFS* روی گراف عمل می شود و تمام *pairing* های موجهی که با رعایت محدودیت های بیان شده است تعیین شده و به همراه هزینه هر کدام در مجموعه ای نگهداری می گردند. شایان ذکر است که در پایان این مرحله می توان به منظور کاهش تعداد انبوه *pairing* هایی که تولید شده اند، برخی از آنها را که نامناسب هستند با تعریف شاخص هایی که با نظر تصمیم گیرنده بیان شده اند، حذف کرد. به عنوان مثال اگر زمان بیکاری خدمه در یک *pairing* بیشتر از حد ثابتی است که با نظر تصمیم گیرنده تعریف شده است، می توان آن *pairing* را حذف کرد.

۳-۲ مسأله *Set Covering Problem (SCP)*

بعد از آن که تمام *pairing* های موجه با استفاده از مرحله قبل تولید شدند، با استفاده از دیدگاه مسأله *SCP* به مدلسازی مسأله مورد نظر پرداخته می شود. در مسأله *SCP* یک ماتریس باینری $m \times n$ تعریف می شود که هدف در آن تعیین ستونهایی با حداقل هزینه از بین m ستون است به طوری که توسط آنها تمامی n سطر ماتریس، حداقل توسط یک ستون تحت پوشش قرار داشته باشد. مدلسازی ریاضی این مسأله به فرم زیر است:

$$Min \ z = \sum_{j=1}^{n} c_j x_j \qquad (٤)$$

Subject to:

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j \geq 1 \qquad for\ i = 1,...,m \qquad (٥)$$

$$x_j = 0 \text{ or } 1 \qquad for\ j = 1,...,n \qquad (٦)$$

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 می‌گیرد و اگر صفر باشد به این معناست که سطر مفروض تحت پوشش ستون j نیست. در رابطه شماره (٤) که بیان کننده انتخاب زیرمجموعه ای از ستونها در بین m ستون با حداقل هزینه است، متغیر باینری x_j نماینده ستون jام 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 (٥) 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 jام وجود داشته باشد مقدار یک را به خود می گیرد و در غیر این صورت صفر در نظر گرفته می‌شود.

به منظور مدلسازی برنامه ریزی کار خدمه راه آهن با استفاده از مسأله *SCP*، هر سطر از این ماتریس *(i= 1, ..., m)* متناظر با سفرهای *T(i)* و ستون های آن *(j= 1,..., n)* متناظر با *pairing* های به دست آمده از مرحله قبل در نظر گرفته می شود و درایه های صفر و یک داخل ماتریس بر اساس اینکه هر *pairing* چه سفرهایی را تحت پوشش خود قرار می دهد، کامل می شوند. واضح است که در این شکل از مدلسازی، داشتن سفرهای *deadhead* اجازه داده می‌شود و در صورتی که این امر مد نظر نباشد، می‌بایست علامت نامساوی در رابطه شماره (٥) به علامت مساوی تبدیل شود که در این صورت مدل در قالب مسأله *SPP* مدلسازی می شود. یکی از مطالعات خوبی که در این زمینه صورت گرفته است به مطالعه [٢٣]مربوط می‌شود که با استفاده از الگوریتم ژنتیک به حل مسأله پرداخته است.

۳-۳ الگوریتم ژنتیک

الگوریتم اصلی در این پژوهش الگوریتم ژنتیک است که ایده اولیه استفاده از آن نخستین بار توسط *J.H. Holland* در دهه ۱۹۷۰ میلادی در دانشگاه میشیگان [٢٤] مطرح شد. این الگوریتم با مجموعه ای از کروموزوم ها که هر کدام نشان دهنده یک جواب برای مسأله مفروض اند، تحت عنوان جمعیت اولیه شروع به کار می کند و سپس با یک مکانیزم انتخاب خاصی که برای انتخاب والدین در نظر گرفته می شود، آنها را تحت اپراتورهای بازترکیبی و جهش قرار داده و از آنها فرزندان جدیدی تولید و جایگزین والدین می کند. تشکیل جمعیت اولیه می تواند به صورت تصادفی و یا با استفاده از روش های ابتکاری صورت گیرد که در این صورت زمان همگرا شدن به جمعیت اولیه کمتر است. این الگوریتم آنقدر تکرار می شود تا تعداد تولید نسلها (تکرارها) به میزان تعریف شده رسیده باشد و یا دیگر بهبودی در جمعیت های جدید به دست آمده ایجاد نشده باشد.

۳-۳-۱ نمایش کروموزوم ها

گام اولیه و ابتدایی در شروع الگوریتم ژنتیک نمایش جوابها به صورت رشته ای به نام کروموزوم است. در این پژوهش هر جواب به صورت یک رشته باینری به طول n (تعداد *pairing* ها) در نظر گرفته می شود که هر ژن آن می تواند مقدار صفر یا یک را به خود بگیرد. بنابراین در صورتی که ژن jام مقدار یک را داشته باشد به این معناست که *pairing* یا ستون jام در جواب مورد نظر حضور دارد و در صورت داشتن مقدار صفر، ستون مفروض در جواب مورد نظر وجود ندارد. به عنوان نمونه، شکل شماره (۳) نمونه ای از یک جواب را به صورت رشته ای باینری نمایش می دهد:

Column	1	2	3	4	5	...	n-1	n
Bit String	1	0	1	1	0	...	1	0

شکل ۳. نمایش یک نمونه کروموزوم

۳-۳-۲ تابع برازندگی[۱۳]

به منظور ارزیابی کیفی هر کروموزوم در جمعیت فعلی و همچنین ارزیابی کروموزوم های جدیدی که در خلال فرآیند تولید نسل به وجود می آیند، می بایست تابعی با نام تابع برازندگی تعریف شود تا به وسیله آن این مهم صورت گیرد. در این پژوهش چندین پارامتر مهم در رسیدن به بهترین کروموزوم و یا جواب بهینه تأثیر گذارند. یک پارامتر عمده در این پژوهش، برنامه ریزی کار خدمه با حداقل هزینه های تخصیص و دستمزد است که به صورت C_{ij} نمایش داده می شود وبرای انجام و اتمام سفر i و شروع سفر j تعریف می شود. در این برنامه ریزی باتوجه به اینکه از مسایل پوششی بهره گرفته شده است و در آنها مطلوب است که با حداقل تعداد *pairing* به کلیهٔ سفرها پوشش داده شود، بنابراین یک عبارت جریمه نیز برای تعداد *pairing*ها درنظر گرفته شده است.

نکته دیگری که می بایست مورد ملاحظه واقع شود زمانهای بیکاری زائد پرسنل است که جدای از زمانهای بیکاری مجاز و قابل قبول، نامناسب بوده و می بایست تا حد امکان حداقل شوند. همان طور که در گذشته نیز ذکر شد، نشان داده شده است که اغلب، نیاز به سفرهای *Deadhead* ضروری است و تصمیم بر نداشتن چنین سفرهایی در برنامه ریزی، گاهی اوقات غیر ممکن است. بنابراین با توجه به اینکه این امر در عمل نامطلوب است و می‌بایست تا حد امکان حداقل شود، برای آنها جریمه ای در نظر گرفته می شود و امکان حضور این سفرها در جواب نهایی حداقل می شوند. با توجه به توضیحات فوق، تابع برازندگی در نظر گرفته شده در این پژوهش به صورت رابطه شماره (۷) است.

$$f(P)=\alpha\times K_P+\beta\times C_P+\gamma\times D_P+\kappa\times I_P \qquad (۷)$$

در رابطه شماره (۷)، K_P تعداد *pairing*های کروموزوم p ام است، C_P مجموع هزینه های تخصیص و دستمزد *pairing* های کروموزوم p ام است که برای هر *pairing* از مجموع C_{ij} های سفرهای تحت پوشش آن به دست آمده است، D_p بیان کننده تعداد سفرهای *deadhead* است که در کروموزوم p ام وجود دارد و I_P بیان کننده میزان زمانهای بیکاری زائد خدمه در کروموزوم p ام است که می‌بایست جریمه‌ای برایش در نظر گرفته شود. در ضمن ضرایب α، β، γ و κ ضرایبی هستند که به صورت تجربی به ترتیب ۰/۴۵، ۰/۰۵، ۰/۰۵ و ۰/۴۵ تنظیم شده اند.

۳-۳-۳ تشکیل جمعیت اولیه

به منظور شروع تکرارهای الگوریتم ژنتیک می بایست در ابتدا جمعیت اولیه ای[۱۴] از کروموزوم ها تحت عنوان والدین تشکیل شود و در خلال تکرارهای الگوریتم ژنتیک، فرزندان جدید تولید و جایگزین والدین شوند تا جمعیت جدیدی تشکیل شود. نکته قابل ملاحظه در این پژوهش این است که کروموزوم های تشکیل دهنده جمعیت اولیه و همچنین کروموزوم های جدیدی که در نسل های آینده وارد جمعیت می شوند، همواره می‌بایست موجه باشند. به عبارت دیگر الگوریتم پیشنهادی تنها با کروموزوم های موجه در تکرارهای متوالی کار می کند. شرط موجه بودن هر کروموزوم این است که تمامی سفرها و یا سطرهای ماتریس مدلسازی شده می‌بایست توسط *pairing* هایی که انتخاب شده اند و ژن مربوط به آنها در کروموزوم مربوطه مقدار یک را به خود گرفته است، تحت پوشش قرار داشته باشند و سفر تخصیص نیافته ای وجود نداشته باشد. بنابراین در این پژوهش برای تشکیل جمعیت اولیه ای از کروموزوم های موجه از الگوریتمی مطابق با شکل شماره (٤) استفاده می شود که به تولید جمعیتی موجه با اندازه ثابت و تعیین شده‌ای می‌پردازد. در الگوریتم شکل شماره (٤) پارامترهایی به شرح ذیل تعریف و استفاده شده اند:

- اندازه جمعیت : N
- مجموعه ستونهایی که در هر کروموزوم وجود دارند یا ژن مربوط به آنها یک است: S_P
- مجموعه تمام ردیف ها یا سفرها : I
- هر ردیف یا سفر : i
- هر ستون یا *pairing* : j
- تعداد ستونهایی که در هر جواب S ردیف i ام را پوشش می دهند : w_i
- مجموعه ستونهایی که ردیف i ام را تحت پوشش قرار می دهند : α_i
- مجموعه ردیف هایی که تحت پوشش ستون jام قرار دارند : β_j

۱. **یک جمعیت خالی را تشکیل دهید**

۲. **تازمانی که اندازهٔ جمعیت به تعداد N نرسیده است اقدامات ذیل را انجام دهید:**

- **یک جواب S_P خالی ایجاد کنید و به ازای هر سفر در I قرار دهید . $w_i=0$**
- **به ازای هر سفر i در مجموعهٔ I : یک ستون مانند j را از مجموعهٔ α_i به صورت تصادفی انتخاب کنید و پس از اضافه کردن به S_P، به ازای هر i در β_j قرار دهید $w_i=w_i+1$.**
- **مقدار T را برابر با جواب S_P قرار دهید.**
- **به ازای هر ستون j در T، درصورتیکه شرط $w_i\geq 2$ برای هر i در مجموعهٔ β_j برقرار است، آن ستون را از مجموعهٔ S_P حذف کنید و قرار دهید $w_i=w_i-1$ (به ازای هر i در β_j).**
- **جواب SP حاصل شده را در صورتی که باعث تکرار در جمعیت نمی‌شود، وارد جمعیت کنید.**

شکل ٤. الگوریتم تولید جمعیت اولیه کاملاً موجه

در این فرآیند همان طور که ملاحظه می شود ابتدا برای تمام سطرها یک *pairing* انتخاب می شود، به طوری که در انتها تمامی سطرها تحت پوشش قرار گیرند، سپس به بررسی تمام ستون ها می پردازد و آنهایی را که با حذفشان هیچ سطر پوشش نیافته ای ایجاد نمی شود حذف می کند. بنابراین با توجه به این فرآیند، جمعیتی موجه از کروموزوم ها با نام جمعیت اولیه والدین تولید می شود و با استفاده از آن، تکرارها و یا تولید نسل های الگوریتم ژنتیک با تعریف اپراتورهایی خاص که در ادامه مطرح می شوند، آغاز می شود.

۳-۳-٤ اپراتور انتخاب

در این پژوهش، به منظور انتخاب دو والد از جمعیت برای ورود به مرحله تولید نسل، از انتخاب تورنمنتی استفاده شده است که در آن ابتدا می بایست دو زیرمجموعه‌ای از کروموزوم ها به اندازه T از جمعیت فعلی به طور تصادفی انتخاب شوند و سپس از هر زیر مجموعه بهترین کروموزوم برای ورود به مرحله بازترکیبی انتخاب شوند. لازم به ذکر است که یکی از مزیت های روش انتخاب تورنمنتی این است که به کروموزوم هایی که دارای برازندگی متوسطی هستند نیز اجازه ورود به مرحله بازترکیبی برای تولید جوابهای مناسب داده می شود. بنابراین انتخاب پارامتر T می تواند در تعیین جواب بهینه تأثیر گذار باشد، چرا که تعیین اندازه های بسیار بزرگ باعث می شود که احتمال انتخاب بهترین کروموزوم ها در هر تکرار بیشتر شود و این فرصت برای کروموزوم های متوسط کمتر شود. در این پژوهش از انتخاب تورنمنتی باینری استفاده شده است که در آن اندازه T برابر ۲ در نظر گرفته می شود و در مطالعه [١٤] نشان داده شده است که این انتخاب جواب های مناسب تری را نسبت به سایرین برای مسأله *SCP* تولید می کند.

۳-۳-۵ اپراتور بازترکیبی[15]

اپراتور بازترکیبی استفاده شده در این مقاله از دو والد انتخاب شده یک فرزند[16]جدید تولید می کند که در آن ژن های دو والد انتخابی نظیر به نظیر مورد مقایسه قرار می گیرند و درصورتی که دو ژن مورد مقایسه در هردو والد دارای مقدار برابر صفر و یا یک باشد، ژن نظیر آنها در فرزند جدید نیز دارای همان مقدار می شود. ولی در صورتی که یکی از ژن ها در یک والد دارای مقدار صفر و در دیگری دارای مقدار یک باشد، به صورت احتمالی عمل می شود و با احتمال P ژن نظیر آنها در فرزند جدید برابر مقدار والد اول و یا با احتمال $1\text{-}P$ برابر با ژن والد دوم می‌شود. تابع احتمالی P می بایست طوری انتخاب شود که احتمال انتخاب از کروموزوم شایسته تر بیشتر شود، بنابراین با توجه به اینکه در این مسأله تابع برازندگی کمتر به معنای شایستگی بیشتر است، تابع P به صورت رابطه شماره (۸) تعریف می شود.

$$P = \frac{f(p_2)}{f(p_1)+f(p_2)} \qquad (۸)$$

۳-۳-٦ اپراتور جهش[17]

استفاده از اپراتور جهش در الگوریتم ژنتیک که معمولا" با احتمال کمی صورت می گیرد به این دلیل است که در خلال فرآیند جستجو در نقاط بهینه محلی به دام نیفتاده و با جهش به نقاط دیگری از فضای جواب نیز به جستجو پرداخته می شود.. اپراتور استفاده شده در این پژوهش به این صورت عمل می کند که در هر تکرار تعداد ثابتی از ژن ها را از فرزند جدید به صورت تصادفی انتخاب می کند و در هر کدام در صورتی که دارای مقدار صفر باشد، با احتمال *P1* به یک و در صورتی که دارای مقدار صفر باشد با احتمال *P0* به صفر تبدیل می کند. مقدار احتمالی *P1* و *P0* بر اساس بهترین کروموزوم جمعیت فعلی در هر تکرار تعیین می شود، به صورتی که *P1* به صورت مجموع تعداد ژن های با مقدار یک بر کل تعداد ژن های کروموزوم (تعداد *pairing* ها) و *P0* به صورت مجموع تعداد ژن های با مقدار صفر بر کل تعداد ژن ها تعیین می شوند.

باید گفت که معمولا" برای اعمال اپراتور جهش یک مقدار احتمالی ثابت و کمی که حداکثر ۰/۵است درنظر گرفته می شود. در این پژوهش یک رابطه احتمالی برای اعمال اپراتور جهش تعریف می شود که وابسته به انحراف استاندارد و تغییرات میزان برازندگی کروموزوم‌ها در جمعیت و در هر تکرار است. با توجه به این رابطه که تغییر آن به صورت تجربی از ۰/۰٦ تا ۰/٤٦ تنظیم شده است، زمانی که انحراف معیار برازندگی کروموزوم ها در خلال تولید نسل کاهش می یابد و احتمال به دام افتادن در نقاط بهینه محلی افزایش می یابد، مقدار احتمالی اعمال اپراتور جهش افزایش می یابد و زمانی که پراکندگی در جمعیت زیاد است این احتمال کاهش می یابد. لازم به ذکر است که این رابطه برای اولین بار توسط قصیری و قنادپور [۲۵] برای مسأله تخصیص لکوموتیو با استفاده از مسأله مسیر یابی وسایل نقلیه

(VRP) [18] مطرح شده است و نتایج بسیار قابل قبولی را در مقایسه با تعریف مقدار ثابت احتمالی برای اعمال اپراتور جهش تولید کرده است که به صورت رابطه‌ی شماره (۹) است.

$$P_{mutation} = 0.4 \times (1 - \frac{S}{S_{\max}}) + 0.06 \qquad (۹)$$
$$(S = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} (x_i - \bar{x})^2}{N-1}})$$

در رابطه شماره (۹)، xi مقدار تابع برازندگی برای کروموزوم i و $\bar{x}$ متوسط برازندگی برای جمعیت، و S انحراف معیار تغییرات برازندگی در جمعیت است. شایان ذکر است که S_{max} حداکثر میزان انحراف استاندارد در خلال فرآیند تولید نسل است که در ابتدا بر اساس جمعیت اولیه تنظیم شده است و در صورتی که در طی فرآیند تولید نسل بیشتر از آن یافت شود جایگزین آن می‌شود.

۳-۳-۷ اپراتور اصلاحی[19]

همان طور که بیان شد الگوریتم پیشنهادی با جمعیتی از کروموزوم های کاملا موجه شروع می کند و به صورتی نیز پیش می‌رود که در خلال تکرارهای متوالی، این شرط موجه بودن به طور کامل حفظ شود. ولی با توجه به اینکه امکان تولید کروموزومی غیرموجه بعد از اعمال اپراتور بازترکیبی و جهش بسیار زیاد است، لازم است که فرزند جدید تولید شده قبل از اینکه برای ورود به جمعیت فعلی تحت شرایط پذیرش قرار گیرد، بررسی شود که شرط موجه بودن را داراست یا خیر. در صورتی که کروموزوم تولید شده غیر موجه باشد اپراتور اصلاحی روی آن اعمال می شود و کروموزوم را به حالت موجه تبدیل می کند. منطق اپراتور ابتکاری اصلاحی استفاده شده در این پژوهش به صورت الگوریتم شکل شماره (۵) است.

لازم به ذکر است که فرآیند شکل شماره (۵) در دو فاز اصلی عمل می کند، در فاز اول به شناسایی سفرهای تخصیص نیافته می پردازد و سپس به اضافه کردن ستون هایی به مجموعه جواب می پردازد، به طوری که سفرهای تخصیص نیافته تحت پوشش قرار گیرند. بعد از اینکه فاز یک اتمام می شود در فاز دوم مجدداً تمام ستون ها مورد بررسی قرار می گیرند و آن ستونهایی که با حذفشان تأثیری در موجه کردن جواب ایجاد نمی شود، از مجموعه جواب حذف می شوند تا کروموزومی موجه ایجاد شود. در این فرآیند مجوعه جواب S مجموعهٔ تمام ستونهایی است که از کروموزوم مربوطه استخراج شده است و U مجموعه ردیف هایی است که توسط هیچ ستونی تحت پوشش قرار نمی گیرند.

۳-۳-۸ پذیرش

بعد از اینکه کروموزوم یا فرزند جدیدی تحت اپراتورهای بازترکیبی و جهش تولید می شود و در صورت نیاز به اعمال اپراتور اصلاحی، موجه می شود می بایست در این مرحله تصمیم گیری در خصوص پذیرش یا عدم پذیرش این کروموزوم در جمعیت صورت گیرد. لازم به ذکر است کروموزوم جدیدی که تحت اپراتورهای تولید مثل تولید می شود، تنها درصورتی به جمعیت فعلی وارد می شود که مقدار برازندگی آن از بدترین کروموزوم جمعیت فعلی بهتر باشد و همچنین باعث تکرار در جمعیت فعلی نشود. در این صورت کروموزوم مربوطه جایگزین بدترین کروموزوم جمعیت فعلی می شود و فرآیند تولید نسل برای شروع تکرار دیگری آغاز می شود.

۱. به ازای هر سفر i در مجموعهٔ I مقدار $w_i = |S \cap \alpha_i|$ و سفرهایی را که برای آنها $w_i = 0$ را در مجموعهٔ U قرار دهید.

۲. به ازای هر سفر i در مجموعهٔ U: آن ستون j از مجموعهٔ α_i که دارای حداقل $k = C_j / (U \cap \beta_j)$ می‌باشد را به مجموعه جواب S اضافه کنید. با اضافه کردن ستون jبه جواب S، برای هر سطری در β_j قرار دهید $w_i = w_i + 1$ و همچنین سطرهای مشترک β_j و U را از مجموعهٔ U حذف کنید.

فاز اول ↑

فاز دوم ↓

۳. به ازای هر ستون jدر جواب S، درصورتیکه شرط $w_i \geq 2$ برای هر i در مجموعهٔ β_j برقرار است آن ستون را از S حذف کنید و برای هر سطری در β_j قرار دهید $w_i = w_i - 1$.

شکل شماره ۵. الگوریتم عملکرد اپراتور اصلاحی

٤. تعیین اعتبار مدل بیان شده و تحلیل نتایج حاصل

در این قسمت به منظور تعیین اعتبار الگوریتم حل پیشنهادی به حل ٦ مسأله‌ی نمونه ای که توسط مرجع [٢٢] برای مسأله برنامه ریزی خدمه مطرح شده است پرداخته می شود و نتایج حاصل شده با نتایج حاصل از مطالعه [٢٢] مقایسه می شوند. شایان ذکر است که مطالعه مفروض با فرض ثابت بودن تعداد *pairing*ها به حل این مسایل پرداخته و روش حل استفاده شده در آن، روش جستجوی درختی و استفاده از روش‌های دقیق[٢٠] است. همچنین در مطالعه مفروض موضوع زمانهای بیکاری و سفرهای *deadhead* مطرح نشده است و تنها معیار دست یابی به جواب مناسب، مجموع هزینه های دستمزد و تخصیص در نظر گرفته شده است. در پژوهش حاضر همان طور که بیان شد تعداد *pairing*ها ثابت نبوده و حداقل تعداد مورد نیاز و بهینه را برای پوشش به تمامی سفرها تعیین می کند. برای تعیین این تعداد حداقل و همچنین یافتن یک جواب مناسب و بهینه، معیار های متفاوت دیگری نیز مانند زمانهای بیکاری، سفرهای *deadhead* و هزینه های دستمزد و تخصیص دخیل هستند و الگوریتم در پی یافتن جوابی است که از نظر تمام معیار های بیان شده مناسب و بهینه باشد. بنابراین الگوریتم پیشنهادی با تمام معیارهای بیان شده به حل مسایل مفروض می پردازد و جواب های حاصل، از لحاظ هزینه‌های دستمزد و تخصیص که تنها معیار بیان شده در مطالعه [٢٢] است مورد مقایسه قرار می گیرند. شایان ذکر است که این مسایل از ٥٠ تا ٣٠٠ سفر به صورت کاملا تصادفی تعریف شده اند و حداکثر زمان مجاز برای مأموریت هر گروه خدمه برای تمام مسایل ٤٨٠ واحد زمانی تعریف شده است. جدول شماره (١) جواب های تولید شده از الگوریتم را در مقایسه با سایر جواب ها نمایش می‌دهد. شایان ذکر است که جوابهای گزارش شده بهترین جواب های بدست آمده در١٠ بار اجرای برنامه برای هر مسأله هستند که در آن اندازه هر جمعیت برابر ٣٠٠ و تعداد تکرارها برابر با ١٠٠٠٠تولید نسل در نظر گرفته شده است.

همان طور که در گذشته نیز ذکر شد، روش پیشنهادی به دنبال یافتن جوابی است که در آن پارامترهای گوناگونی دخیل اند و این جواب با درنظر گرفتن تمامی این پارامترها به دست آمده است. شایان ذکر است که از جواب‌های حاصل از روش پیشنهادی میزان هزینه دستمزد و تخصیص که بخشی از مقدار برازندگی است استخراج شده و مطابق با جدول شماره (١) با جوابهای مطالعه [٢٢] که با تعداد *pairing* ثابت و تنها با درنظر گرفتن هزینه دستمزد و تخصیص برای خدمه به دست آمده‌اند مقایسه شده است. مطابق با این جدول همان طور که مشاهده می‌شود برای سه مسأله اول جواب‌های بسیار خوب با خطای قابل قبول نسبت به جواب‌های دقیق مطالعه [٢٢] و جوابهای خوبی نیز برای سه مسأله دوم تولید شده‌اند. به عنوان مثال برای مسأله سوم بهترین جواب به دست آمده دارای هزینه دستمزد و تخصیصی برابر ٥٤٩٥ است که با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای فرض شده به دست آمده است. در این جواب ٤ سفر *deadhead* وجود دارد و برای پوشش کل سفرها ٧٦ گروه *pairing* نیز مورد نیازند.

در جدول (١) علاوه بر نشان دادن بهترین جواب، یک سری جواب‌های دیگر نیز برای هر مسأله نشان داده شده است که تأثیر سفرهای *deadhead* و *pairing* ها را مورد بررسی قرار می‌دهد. به عنوان مثال در مسأله دوم با کاهش تعداد سفرهای *deadhead* و بکارگیری تعداد بیشتری از *pairing*ها برای پوشش سفرها هزینه نهایی دارای کاهش بوده است (البته با در نظر گرفتن ضرایب و پارامترهای جریمه‌ای که در بخش ٣-٣-٢ برای افزایش *pairing* و ایجاد سفرهای *deadhead* فرض شده است). این نکته برای مسایل مختلف رفتار گوناگونی داشته است. به عنوان مثال برای مسأله پنجم اگر تعداد سفرهای *deadhead* بیشتر باشد و برای این منظور جریمه نیز پرداخت شود، هزینه نهایی ایجاد شده کمتر از زمانی است که تصمیم گیرنده از تعداد *pairing*های بیشتری برای کمتر کردن سفرهای *deadhead* استفاده می کند. باید گفت که مدت زمان مورد نیاز برای حل مسایل مختلف به ترتیب از ١٥ دقیقه (برای مسأله اول) تا ٣ ساعت (برای مسأله ششم) بوده است. زمان‌های بیان شده، زمان اجرای برنامه برای هر مسأله در ١٠.٠٠٠ تکرار است و لازم به بیان این نکته است که در تمامی آنها، بهترین جواب تا قبل از تکرار ٧٠٠٠ به دست آمده‌اند. درنهایت به استناد نتایج حاصل شده می‌توان گفت که روش پیشنهادی با درنظر گرفتن پارامترهای گوناگونی برای برنامه ریزی کار خدمه راه‌آهن، در مدت زمان مناسبی به تولید جوابهای خوب و قابل قبولی پرداخته است. شکل شماره (٦) کردار همگرایی مسأله اول را نشان می-دهد که در آن در طول ١٠.٠٠٠ تولید نسل، تغییرات بهترین برازندگی نسل‌ها نشان داده است.

شکل شماره (۷) تغییرات احتمالی اعمال اپراتور جهش به ازای تغییرات انحراف معیار جمعیت را برای مسأله اول نشان می‌دهد. مطابق با این کردار که منظور وضوح بیشتر تا ۳۰۰۰ تکرار اول آن نمایش داده شده است، مشاهده می‌شود که وقتی انحراف معیار جمعیت کاهش می‌یابد، به منظور جلوگیری از به دام افتادن در نقاط بهینه محلی، احتمال اعمال جهش افزایش می‌یابد (البته تا سقف ۰/٤٦) و زمانی که انحراف معیار جمعیت زیاد است به منظور جلوگیری از پراکندگی بیشتر در جمعیت، احتمال اعمال اپراتور جهش کاهش می‌یابد. نکتهٔ دیگری که می‌بایست در این خصوص مورد بررسی قرار گیرد مربوط می‌شود به بررسی کارآیی اجزای طراحی شده در الگوریتم پیشنهادی و بررسی اینکه آیا این اجزا در ارتباط با یکدیگر موثر عمل می کنند یا خیر.

باتوجه به اینکه در اکثر مطالعاتی که در این حوزه صورت گرفته است و از الگوریتم ژنتیک برای این منظور استفاده کرده‌اند، مانند مطالعهٔ حاضر، کروموزوم‌ها را به صورت باینری نشان داده‌اند، ولی از اپراتورهای کلاسیک برای این منظور استفاده کرده‌اند، بنابراین قصد بر آن است که به آزمایش اپراتور انتخابی به همراه سایر اجزای طراحی شده در الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با اپراتورهای استفاده شده توسط سایر پژوهشگران پرداخته شود. یاد آوری می شود که در این روش‌ها از اپراتورهای *1-Point Crossover* و *2-Point Crossover* استفاده شده است و با استفاده از آنها به تولید جواب‌های مورد نظر پراخته شده است. خروجی حاصل از این مقایسه که روی مسایل آزمایشی حل شده انجام شده است و در مقالهٔ حاضر نیز آمده است به صورت کردار همگرایی ذیل است که برای مسالهٔ اول نشان داده شده است. شایان ذکر است که این کردار، کردار همگرایی در ۱۰،۰۰۰ تولید نسل بوده است که روند هر کدام از روش‌ها را به خوبی نشان می‌دهد.

همان گونه که مشاهده می‌شود برتری الگوریتم پیشنهادی در اثر ارتباط اجزای طراحی شده در آن در مقایسه با دو الگوریتم ژنتیکی که در این حوزه صورت گرفته است به وضوح قابل مشاهده است. در این خصوص الگوریتم مورد نظر در زمان زودتری به سمت بهترین جواب همگرا شده و همچنین به جوابی با کیفیت بهتر نیز منجر شده است. همچنین در این مقاله برای اعمال اپراتور جهش نیز، برای اولین بار از یک رابطهٔ احتمالی استفاده شده است که اعمال این اپراتور را وابسته به انحراف معیار جمعیت مورد نظر دانسته است. در ادامه کرداری آورده شده است که تأثیر این تابع را در کیفیت جواب به دست آمده نشان داده شده است. در این کردار الگوریتم پیشنهادی با تابع بیان شده در مقایسه با حالتی قرار گرفته است که از این رابطه استفاده نشده است و مانند سایر مطالعات، احتمال اعمال اپراتور به صورت ثابت و ۵۰٪ است. این کردار به صورت شکل شمارهٔ ۹ است. درنتیجه همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود تابع احتمالی تعریف شده به صورت کاملاً موثر عمل می کند. در مقایسه با حالتی که از آن استفاده نشود بسیار کارآتر عمل می‌کند.

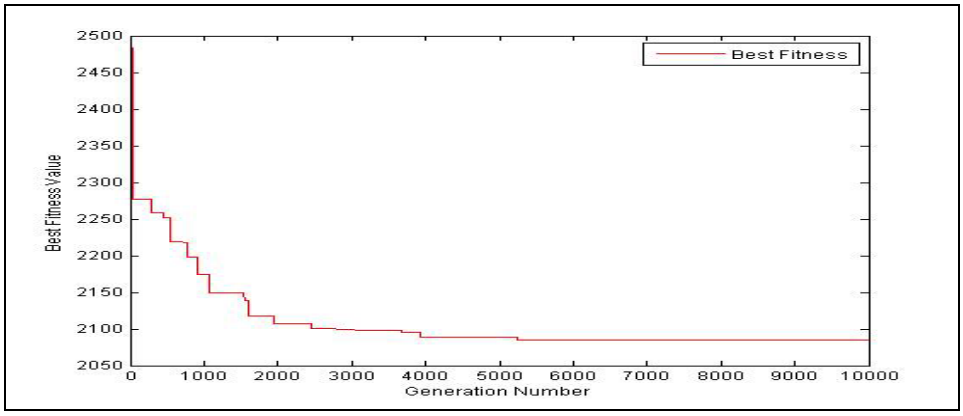
۵. نتیجه گیری

در این پژوهش مدلی ابتکاری برای برنامه ریزی کار خدمه راه-آهن پیشنهاد شد که در آن می‌بایست برای گروههای خدمه مورد نیاز برای ارایه سرویس به سفرهای موجود در جدول زمان بندی حرکت قطارها، برنامه ریزی صورت گیرد.

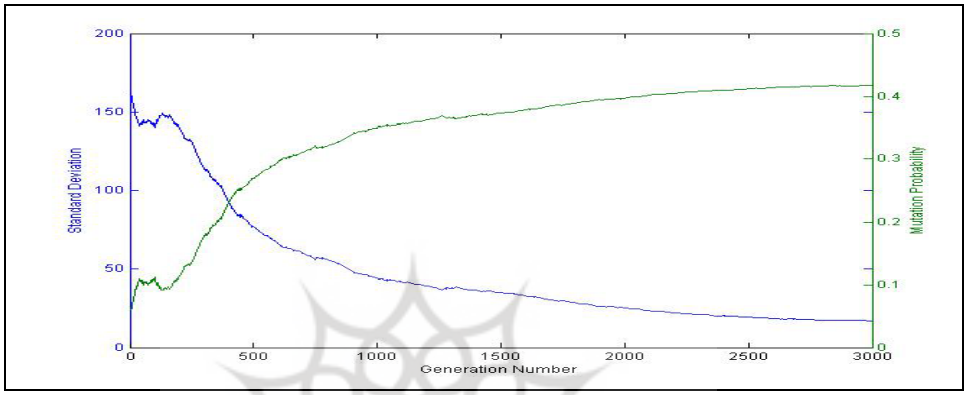
مدل پیشنهادی به دو فاز مستقل تقسیم شد که در فاز اول با استفاده از راهبرد جستجوی *Depth First Search* تمام سفرهای رفت و برگشتی که شروع و خاتمه آنها در محل استقرار خدمه است با نام مجموعه *pairing* ها تعیین شدند. در فاز دوم با استفاده از مسأله *Set Covering Problem* به مدلسازی مسأله پرداخته شد و با استفاده از الگوریتم ژنتیک با تعریف اپراتورهایی خاص بهینه شد. در انتها نیز برای تعیین اعتبار مدل پیشنهادی به حل شش مسأله از مسایلی که توسط *Beasley* برای مسأله برنامه ریزی خدمه مطرح شده‌اند پرداخته شد که به استناد نتایج حاصل شده الگوریتم پیشنهادی جواب‌هایی با کیفیت بسیار خوب را در مدت زمان مناسبی تولید کرد.

جدول شماره ۱. مقایسه نتایج به دست آمده با سایر نتایج

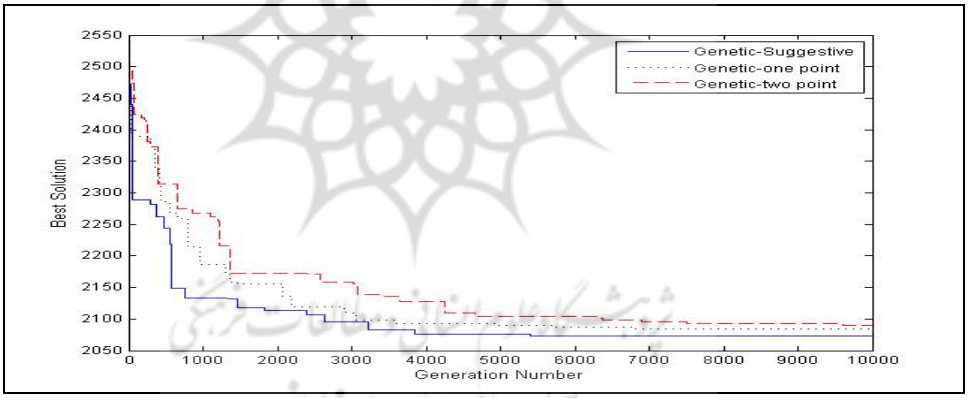
مسأله	تعداد سفر	تعداد کمانها در تشکیل گراف G	جوابهای مطالعه [۲۲]		جوابهای حاصل از الگوریتم پیشنهادی		
			تعداد *pairing*	هزینه های دستمزد و تخصیص	هزینه های دستمزد و تخصیص	تعداد سفرهای *deadheading*	تعداد *pairing*
۱	۵۰	۱۷۳	۳۱ ۳۰ ۲۹ ۲۸ ۲۷	۱۸۷۲ ۲۰۹۲ ۲۳۹۹ ۲۷۰۶ ۳۱۳۹	۲۹۳۶ ۲۴۹۸	۰ ۰	۲۸ ۳۰
۲	۱۰۰	۷۱۵	۴۸ ۴۷ ۴۶ ۴۵ ۴۴	۳۹۰۵ ۴۱۰۷ ۴۳۱۰ ۴۵۱۴ ۴۸۱۲	۴۶۶۷ ۴۹۶۶	۴ ۶	۴۹ ۴۶
۳	۱۵۰	۱۳۵۵	۷۳ ۷۲ ۷۱ ۷۰ ۶۹	۵۳۴۷ ۵۵۵۱ ۵۷۵۴ ۵۹۹۹ ۶۲۷۵	۵۴۹۵ ۶۲۱۷ ۶۸۶۹	۴ ۳ ۸	۷۶ ۷۴ ۷۳
۴	۲۰۰	۲۵۴۳	۹۷ ۹۶ ۹۵ ۹۴ ۹۳	۶۲۸۸ ۶۴۳۰ ۶۵۸۳ ۶۷۴۷ ۶۹۱۴	۸۸۰۶	۱۲	۹۳
۵	۲۵۰	۴۱۵۲	۱۱۲ ۱۱۱ ۱۱۰ ۱۰۹ ۱۰۸	۷۷۰۷ ۷۸۶۳ ۸۰۲۳ ۸۲۱۲ ۸۴۰۶	۹۵۷۵ ۹۱۰۵	۱۰ ۱۲	۱۱۳ ۱۱۰
۶	۳۰۰	۶۱۰۸	۱۳۳ ۱۳۲ ۱۳۱ ۱۳۰ ۱۲۹	۹۰۲۶ ۹۲۰۰ ۹۳۷۸ ۹۵۸۰	۱۰۲۰۰ ۱۲۷۶۳	۳۸ ۴۰	۱۴۵ ۱۴۴



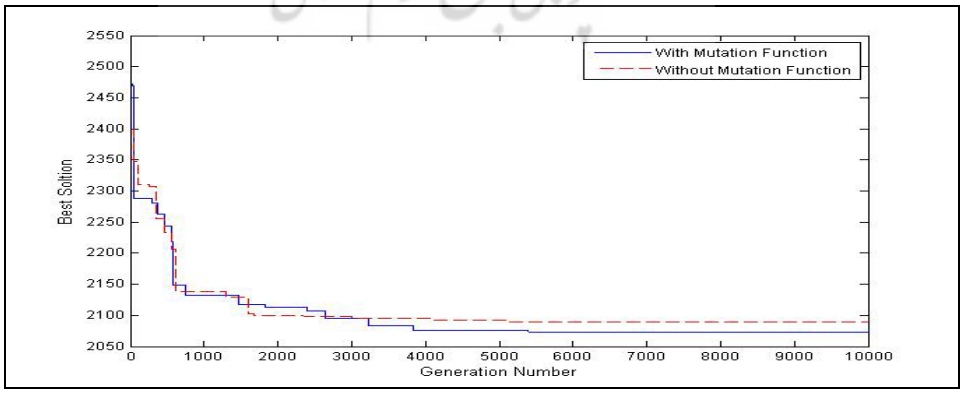
شکل ٦. کردار همگرایی مسأله اول در ۱۰۰۰۰ تولید نسل



شکل ۷. تغییرات احتمالی اعمال جهش در هر تکرار در مقابل انحراف معیار هر جمعیت



شکل ۸. مقایسهٔ الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با سایر اپراتورهای استفاده شده



شکل ۹. مقایسهٔ الگوریتم پیشنهادی درحالت استفاده از تابع احتمالی پیشنهادی و بدون آن

٦. پانویس‌ها

1. Crew Scheduling Problem
2. Set Covering Problem
3. Round Trips
4. Duty
5. Heuristic
6. Metaheuristic
7. Set Partitioning Problem (SPP)
8. Set Covering Problem (SCP)
9. Train Services
10. Trip
11. Depth First Search Algorithm
12. Edge
13. Fitness Function
14. Initial Population
15. Crossover
16. Offspring
17. Mutation
18. Vehicle Routing Problem
19. Repair
20. Exact Algorithm

٧. مراجع

1. EL Moidani, W., Cosenza, C., de Cligny M. and Mora-Camino, F. (2001) "A bi-criterion approach for the airline crew rostering problem", Lecture Notes in Computer Science.

2. Caprara, A., Fischetti, M., Toth, P., Vigo, D. and Guida, P.L. (1997) "Algorithms for railway crew management", Mathematical Programming, 79, pp. 125-141.

3. Kornilakis, H. and Stamatopoulos, P. (2002) "crew pairing optimization with genetic algorithms", Lecture Notes in Computer Science, pp.109-120.

4. Eremeev, A. (1999) "A genetic algorithm with a non-binary representation for the set covering problem", In Proceedings of Operation Research, 98, pp.175-181.

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

6. Ozdemir, H.T. and Mohan, C. (2001) "Flights graph based genetic algorithm for crew scheduling in airlines", Information Sciences, 133, pp. 165-173.

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

8. Ball, M. and Roberts, A. (1985) "A graph partitioning approach to airline crew scheduling", Transportation Science, 19/2, pp. 107-126.

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

10. Crainic, T.G. and Rousseau, J.M. (1987) "The column generation principle and the airline crew scheduling problem", INFOR 25, pp. 136-151.

11. Byrne, J. (1988) "A preferential bidding system for technical aircrew", the 28th AGIFORS Symposium, Massachusetts, US.

12. Sarra, D. (1988) "The automatic assignment model", the 28th AGIFORS Symposium, Massachusetts, US.

13. Teodorovic, P. and Lucic, P. (1998) "A fuzzy set theory approach to the aircrew rostering problem", Fuzzy Sets and Systems, 95, pp. 261-271.

14. Beasley, J.E., Chu, P.C. (1996) "A genetic algorithm for the set covering problem", European Journal of Operational Research, 94, pp. 392-404.

15. Levine, D. (1996) "Application of a Hybrid Genetic Algorithm to Airline Crew Scheduling", Computer and Operations Research, 23(6), pp. 547-558.

16. Yan, S., Tung, T.T. and Tu, Y.P. (2002) "Optimal construction of airline individual crew pairings", Computer and Operations Research, 29, pp. 341-363.

17. Desaulniers, G. (2007) "Managing large fixed costs in vehicle routing and crew scheduling problem solved by column generation", Computers & Operations Research, 34, pp. 1221-1239.

18. Hollis, B.L., Forbes, M.A. and Douglas, B.E. (2006) "Vehicle routing and crew scheduling for metropolitan mail distribution at Australia post", European Journal of Operational Research, 173, pp. 133-150.

19. park, T. and Ryel Ryu, K. (2006) "Crew pairing optimization by a genetic algorithm with

unexpressed genes ", Journal of Intelligent Manufacturing, 17, pp.375-383.

20. Hwang, J., Kang, C.S., Ryn, K.R., Han, Y. and Choi, H.R. (2002) "A hybrid of Tabu search and integer programming for subway crew pairing optimization", In Proceedings of the 6th IASTED International Conference Artificial Intelligence & Soft Computing (ASC).

21. Moller, J. (2002) "Seminar on algorithms and models for railway optimization crew scheduling", University of Konstanz, Computer & Information Science.

22. Beasley, J.E. and Cao, J.F. (1996) "A tree search algorithm for the crew scheduling problem", European Journal of Operation Research, 94, pp. 517-526.

23. Solar, M., Parado, V. and Urrutia, R. (2002) "A parallel genetic algorithm to solve the set covering problem", Computer & Operation Research, 29, pp. 1221-1235.

24. Holland, J.H. (1975) "Adaptation in natural and artificial system", Ann Arbor, Michigan: The University of Michigan Press.

25. Ghoseiri, K. and Ghannadpour, S.F. (2008) "A hybrid genetic algorithm for multi-depot homogeneous locomotive assignment with time windows", Submitted to Applied Soft Computing (ASC).

۲۶. حاج فتحعلیها، عباس (۱۳۸۰) "زمان‌بندی خدمه در راه‌آهن" رسالهٔ دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲۷. سپهری، محمد مهدی، نجمی. محمدرضا و خوش‌الحان، فرید (۱۳۸۳) "حل مسالهٔ زمان‌بندی خدمهٔ راه‌آهن به کمک روش بهینه‌سازی مورچگان"، مجلهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.

۲۸. پورسیدآقایی، محسن، صلاحی پروین، اسماعیل(۱۳۸۵) "برنامه‌ریزی اعزام خدمه در شبکهٔ راه‌آهن ایران با استفاده از الگوریتم‌های تولید تولید مأموریت و خطوط کاری"، پژوهشنامهٔ حمل و نقل، سال سوم، شمارهٔ سوم، پاییز، ص ۱۶۳-۱۷۲.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی