تعیین توالی اعزام و برنامه توقف قطارها در مسیرهای دوخطه راه آهن به کمک الگوریتم فرابتکاری جستجوی تصادفیِ تطابقیِ حریصانه

عرفان حسن‌نایبی*، دانشجوی کارشناسی‌ارشد، دانشکدهٔ مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
فریدون کیانفر، استاد، دانشکدهٔ مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
E-mail: e_hassannayebi@ie.sharif.edu
دریافت: ۱۳۹۱/۰۲/۲۰- پذیرش: ۱۳۹۱/۰۵/۲۵

چکیده

بهره‌برداری بهینه از ظرفیت حمل و نقل ریلی، یکی از اهداف اساسی در برنامه‌ریزی حرکت قطارها محسوب می‌شود. با توجه به هزینه‌های بسیار بالای احداث خطوط ریلی جدید، بهره‌برداری بهینه از ظرفیت خطوط ریلی موجود در اولویت قرار دارد. از این رو، به‌کارگیری روش‌های مناسب برای تحلیل حداکثر ظرفیت خطوط ریلی و استفاده بهینه از ظرفیت موجود بدون نیاز به احداث خطوط جدید، از تحلیل‌های اساسی در صنایع حمل و نقل ریلی به‌شمار می‌آید. ترتیب اعزام قطارها از ایستگاه مبدأ و همچنین برنامه توقف قطارها در ایستگاه‌های مسیرهای دوخطه ریلی، دو عامل اساسی در استفاده بهینه از ظرفیت حمل و نقل ریلی می‌باشند. در این تحقیق، مسئله تعیین توالی اعزام و همچنین برنامه توقف قطارها در جهت حداکثر استفاده از ظرفیت شبکه ریلی موجود، مورد بررسی قرار گرفته است. در این مسئله هدف تعیین ترتیب اعزام قطارها از ایستگاه مبدأ و همچنین مکان توقف برنامه‌ای قطارها در راستای حداقل‌سازی طول افق زمان‌بندی می‌باشد. این مسئله در قالب حالت خاصی از مسئله جریان کارگاهی منعطف بررسی شده است. برای این مسئله، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح با در نظر گرفتن محدودیت‌های خطوط ریلی داخل ایستگاه و همچنین سایر محدودیت‌های مربوط به راه آهن ایران مانند توقف قطارها در بازه‌های افق شرعی، ارایه شده است. به‌دلیل پیچیدگی محاسباتی و دشواری یافتن جواب بهینه در این مسئله، از الگوریتم فرابتکاری جستجوی تصادفی تطابقیِ حریصانه برای یافتن جواب‌های نزدیک به بهینه، استفاده شده است. سه الگوریتم فرابتکاری بر پایه الگوریتم فرابتکاری جستجوی تصادفی تطابقیِ حریصانه ارایه شده و روی نمونه مسایل تصادفی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. نتایج به‌دست آمده مؤید کارایی بالای الگوریتم‌های ارایه شده برای حل این مسئله در ابعاد واقعی می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: توالی اعزام قطارها، برنامه توقف قطارها، مسیرهای دوخطه ریلی، الگوریتم جستجوی تصادفیِ تطابقیِ حریصانه

۱- مقدمه

مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها از دشوارترین مسایل زمان‌بندی در سیستم‌های حمل و نقل محسوب می‌شود. با افزایش تقاضای سفر و توسعه خطوط ریلی، اهمیت مسئله زمان‌بندی و توالی اعزام قطارها در شبکه‌های ریلی دو چندان شده است. در این راستا، یکی از تصمیمات مهم در حیطه برنامه‌ریزی سیستم‌های حمل و نقل ریلی تعیین حداکثر ظرفیت قابل بهره‌برداری از شبکه خطوط ریلی می‌باشد. در این تحقیق دو عامل مهم بر ظرفیت شبکه خطوط ریلی ایران، شامل توالی اعزام و برنامه توقف قطارها بررسی می‌شود. منظور از توالی اعزام و برنامه توقف قطارها به ترتیب، تعیین ترتیب خروج قطارها از از ایستگاه مبدأ و تعیین بهترین ایستگاه توقف هر قطار در بازه‌های افق شرعی می‌باشد. در شبکه راه آهن ایران، قطارهای مسافری، ملزم به

*نویسنده مسئول

Archive of SID
www.SID.ir

توقف در بازه‌های افق شرعی جهت اقامه نماز مسافران می‌باشند. به دلیل طولانی بودن زمان سفر قطارها، تعداد توقف قطارها برای اقامه نماز مسافران در طول یک بازه زمانی (مانند یک روز) قابل ملاحظه بوده و درصد قابل توجهی از زمان‌های توقف برنامه‌ای قطارها شامل زمان‌های توقف جهت اقامه نماز می‌باشد. به عنوان مثال در محور دوخطه تهران- مشهد، حدود ۵۰ درصد از زمان‌های توقف برنامه‌ای قطارها جهت اقامه نماز می‌باشد. همچنین با توجه به بازه مجاز توقف قطارها در اوقات شرعی، هر قطار امکان انتخاب از بین چندین ایستگاه برای توقف را دارد. از این رو تعیین برنامه توقف قطارها تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی ظرفیت شبکه حمل و نقل ریلی دارد. این مقاله هم در زمینه مدل‌سازی مسئله و هم ارایه روش‌های فراابتکاری دارای نوآوری می‌باشد. در این تحقیق مسئله ترتیب اعزام قطارها از ایستگاه مبدأ و همچنین محل توقف برنامه‌ای قطارها در راستای کمینه‌سازی طول افق زمان‌بندی مورد نظر است. برای این مسئله، در ادامه ابتدا تعریف مسئله و فرضیات در نظر گرفته شده بیان می‌شود. در بخش (۳)، مروری بر تحقیقات صورت گرفته روی مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها انجام می‌گردد. در بخش (٤)، از رویکرد زمان‌بندی جریان کارگاهی منعطف برای مدل‌سازی مسئله توالی اعزام قطارها استفاده می‌شود. مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای مسئله توالی اعزام قطارها در بخش (۵) ارایه شده است. در بخش (٦)، الگوریتم فراابتکاری جستجوی تصادفیِ تطابقیِ حریصانه تشریح می‌شود. در بخش (۷)، از الگوریتم جستجوی تصادفیِ تطابقیِ حریصانه برای تولید جواب‌های نزدیک به بهینه استفاده می‌شود. در بخش (۸)، الگوی تولید مسایل تصادفی و در بخش (۹)، نتایج آزمایش‌های مربوط به کارایی الگوریتم‌های فراابتکاری ارایه می‌شود. در بخش (۱۰) تحلیل حساسیت و در بخش آخر نیز جمع‌بندی و زمینه‌های تحقیقاتی آتی ارایه شده است.

۲- تعریف مسئله

ساختار شبکه ریلی مورد بررسی در این تحقیق در برگیرنده یک محور کاملاً دو خطه شامل خطوط ریلی و همچنین ایستگاه‌های بین راهی جهت توقف برنامه‌ای قطارها می‌باشد. در یک محور کاملاً دو خطه، قطارهای رفت و برگشت روی مسیرهای مجزایی حرکت می‌کنند. در نتیجه یک محور کاملاً دو خطه می‌تواند با در نظر گرفتن فرضیاتی به دو مسیر تک خطه و تک جهته تقسیم شود. در صورتی که تمام بلاک‌های مسیر در طول افق زمان‌بندی در دسترس بوده (عدم مسدودی بلاک‌ها) و همچنین محدودیت حداقل زمان توقف قطارها در مقصد وجود نداشته باشد، آنگاه می‌توان برنامه‌ریزی قطارهای رفت و برگشت را به‌طور مستقل از هم انجام داد. دلیل وابسته شدن زمان‌بندی قطارهای رفت و برگشت با فرض حداقل زمان توقف قطارها در مقصد، این است که هر قطار رفت، در روز بعد به قطار برگشت تبدیل شده و عملاً زمان توقف قطار رفت در مقصد روی زمان اعزام قطار برگشت، تأثیرگذار خواهد بود. با در نظر گرفتن این فرضیات در این تحقیق، مسئله توالی اعزام قطارها در یک مسیر تک خطه و تک جهته بررسی می‌شود. تمام قطارها از ایستگاه مبدأ در یک جهت به سمت ایستگاه مقصد مشترک، حرکت کرده و به دلایل متفاوتی مانند مسافرگیری، آبگیری، اقامه نماز مسافران و غیره در ایستگاه‌های بین راه توقف دارند. ایستگاه‌های بین راه شامل تعدادی خط قبول و اعزام قطارها جهت عبور یا توقف برنامه‌ای می‌باشند. ظرفیت یک ایستگاه تابعی از تعداد خطوط قبول و اعزام قطارها است.

خطوط ریلی بین هر دو ایستگاه متوالی که تحت عنوان بلاک‌های مسیر نامیده می‌شوند، قابلیت پذیرش تنها یک قطار را دارند. زمان سیر قطارها روی بلاک‌ها ثابت می‌باشد. زمان و ایستگاه توقف قطارها جهت مسافرگیری، بارگیری و سوختگیری، از قبل مشخص و ثابت بوده و به عنوان ورودی مسئله در نظر گرفته می‌شود. اما برنامه توقف قطارها جهت اقامه نماز، شامل مکان و زمان توقف قطارها در ایستگاه‌ها، متغیر تصمیم مسئله می‌باشند.

۳- مرور ادبیات

مسایل زمان‌بندی قطارها در مسیرهای دوخطه ریلی، به دلیل تلاقی نداشتن قطارهای غیر هم‌جهت در بلاک‌های مسیر، در رده ساده‌ترین مسایل زمان‌بندی قطارها قرار می‌گیرد. در بیشتر تحقیقات انجام گرفته روی این مسئله، زمان‌بندی قطارهای رفت و برگشت به‌طور مستقل در مسیرهای تک خطه و تک جهته در نظر گرفته شده است. در تحقیقی از کاپرارا و همکاران

Archive of SID

www.SID.ir

(Caprara et al., 2002)، از مدل شبکه زمان- مکان[1] و از روش آزاد سازی لاگرانژ برای حل مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها در مسیرهای تک خطه و تک جهته استفاده شده است. در تحقیقی از سحین و همکاران (Şahin et al., 2008)، مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط بر مبنای مدل شبکه زمان- مکان برای زمان‌بندی قطارهای باری ارایه شده است. ژو و ژانگ (Zhou and Zhong, 2005) ، مسئله زمان‌بندی قطارها در مسیرهای دوخطه را با تابع هدف چندگانه و در قالب مسایل زمان‌بندی پروژه با منابع محدود چندحالته[2] بررسی کرده‌اند. در این تحقیق، تابع هدف اول به‌صورت کمینه کردن متوسط زمان‌های انتظار برای قطارهای سریع‌السیر و تابع هدف دوم به‌صورت حداقل کردن کل زمان سفر قطارهای سریع و عادی در نظر گرفته شده است. در ادامه رویکردهای اصلی برای مدل‌سازی مسایل زمان‌بندی حرکت قطارها ارایه می‌شود.

۳-۱- رویکرد گراف شبکه زمان- مکان

در رویکرد گراف شبکه زمان- مکان با تقسیم محور زمان به واحدهای زمانی مثلاً یک دقیقه، حرکت قطارها روی بلاک‌ها و توقف قطارها در خطوط ایستگاه به کمک کمان‌هایی در گراف زمان- مکان نشان داده می‌شود. هر گره، نماینده یک مقطع زمانی در طول محور زمان است. در واقع زمان‌های ورود و خروج قطارها به بلاک‌ها و خطوط ایستگاه به کمک گره‌های گراف زمان – مکان مشخص می‌شوند. بین هر دو گره از گراف شبکه زمان- مکان، یک کمان ایجاد می‌شود. هدف انتخاب بهترین ترکیب کمان برای رسیدن هر قطار از گره مبدأ به گره مقصد با هدف کاهش انحراف از برنامه زمان‌بندی اولیه می‌باشد. این رویکرد توسط کاپرارا و همکاران (Caprara et al., 2002) و سحین و همکاران (Şahin et al., 2008) به‌کار گرفته شده است. از نقاط قوت این رویکرد، قابلیت مدل‌سازی فرضیات مختلف مسایل زمان‌بندی حرکت قطارها می‌باشد.

۳-۲- رویکرد مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود

جهت مدل‌سازی مسایل زمان‌بندی حرکت قطارها در قالب مسایل زمان‌بندی پروژه با منابع محدود، کافی است مجموعه‌ای از فعالیت‌ها شامل سیر قطارها روی بلاک‌ها و توقف روی خطوط ایستگاه، با زمان پردازش مربوطه (زمان‌های سیر بلاک‌ها و زمان‌های توقف برنامه‌ای روی خطوط ایستگاه) در نظر گرفته شود. منابع موجود برای انجام فعالیت‌های مختلف هر قطار، همان بلاک‌ها و ایستگاه‌های مسیر می‌باشند. از منابع نوع اول (بلاک‌ها) به میزان یک واحد و از منابع نوع دوم به تعداد خطوط ایستگاه در هر ایستگاه موجود است. منابع همگی تجدیدپذیر بوده و هر فعالیت هر قطار، تنها یک واحد از منبع مربوط را لازم دارد. روابط پیش نیازی بین فعالیت‌ها نیز شامل ترتیب عبور از بلاک‌ها و ایستگاه‌های مسیر می‌باشد. هدف این مسئله، تعیین زمان شروع پردازش تمام فعالیت‌ها (ورود قطارها به بلاک‌ها و خطوط ایستگاه) است؛ به‌طوری‌که محدودیت منابع و محدودیت‌های مسئله مانند روابط پیش نیازی برقرار باشد. این رویکرد توسط ژو و ژانگ (Zhou and Zhong, 2005)، برای زمان‌بندی قطارها در مسیرهای دوخطه با در نظر گرفتن دو تابع هدف و همچنین اولویت قطارها و همچنین توسط ژو و ژانگ (Zhou and Zhong, 2007) ، برای زمان‌بندی قطارها در مسیرهای تک خطه استفاده شده است. در تحقیقی از قصیری و همکاران (Ghoseiri et al., 2004)، رویکرد زمان‌بندی پروژه با منابع محدود چندحالته برای یک مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها در مسیرهای دوخطه با توابع هدف چندگانه شامل حداقل‌سازی مصرف سوخت و انحراف از برنامه زمان‌بندی اولیه، ارایه شده است. کاستیلو و همکاران (Castillo et al., 2009) نیز برای مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط بر مبنای مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود و با در نظر گرفتن سه تابع هدف، شامل طول افق زمان‌بندی، استواری و کارایی برنامه زمان‌بندی، ارایه کرده‌اند. از نقاط قوت رویکرد زمان‌بندی پروژه با منابع محدود می‌توان به ادبیات غنی روش‌های حل دقیق و ابتکاری موجود برای این مسئله اشاره نمود که از آن می‌توان در حل مسایل زمان‌بندی حرکت قطارها استفاده کرد.

۳-۳- رویکرد مسایل زمان‌بندی کارگاهی[3]

در رویکرد زمان‌بندی کارگاهی، مجموعه‌ای از n کار (قطار) و m ماشین (بلاک) برای زمان‌بندی در دسترس می‌باشند. هر کار شامل تعدادی فعالیت جهت پردازش می‌باشد. هر ماشین تنها یک

Archive of SID
www.SID.ir

فعالیت از هر کار را می‌تواند به‌طور همزمان پردازش کند. هدف این مسئله، تعیین زمان شروع پردازش عملیات روی ماشین‌ها می‌باشد. این رویکرد توسط بوردت و کوزان، (Burdett and Kozan, 2010) و همچنین لیو و کوزان (Liu and Kozan, 2010)، برای مدل‌سازی مسایل زمان‌بندی حرکت قطارها مورد استفاده قرار گرفته است. لیو و کوزان (Liu and Kozan, 2010)، مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها را با در نظر گرفتن اولویت برای هر قطار، در قالب مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی منعطف با فرض تأخیر نداشتن کارها و محدودیت ظرفیت بین ماشین‌ها، مدل‌سازی کرده‌اند. در مدل ارایه شده، قطارهای مسافری سریع‌السیر دارای اولویت بالاتری نسبت به سایر قطارها بوده و باید بدون هیچ‌گونه توقف غیربرنامه‌ای به مقصد برسند. اما سایر قطارها ممکن است به دلیل پر بودن بلاک‌های مسیر، منتظر آزاد شدن بلاک‌ها شوند. این فرضیات معادل این هستند که تعدادی از کارها در کارگاه باید بدون هیچ وقفه‌ای در پردازش، انجام شوند و تعدادی دیگر باید منتظر آزاد شدن ماشین برای پردازش شوند. آنها همچنین یک روش ابتکاری برای تولید برنامه‌های زمان‌بندی شدنی در حالت مشخص بودن توالی اعزام قطارها، با هدف حداقل کردن طول افق زمان‌بندی[4] ارایه کرده‌اند. در تحقیقی از بوردت و کوزان (Burdett and Kozan, 2010)، از رویکرد مسایل گردش کارگاهی ترکیبی[5] برای مدل‌سازی مسئله زمان‌بندی قطارها در شبکه ریلی به کمک نظریه گراف استفاده شده است. تحقیقاتی که مسئله تعیین حداکثر ظرفیت ریلی را مورد بحث قرار داده‌اند، در جدول ۱خلاصه شده‌اند.

٤- رویکرد زمان‌بندی جریان کارگاهی منعطف برای مسئله توالی اعزام قطارها

در این بخش، نحوه مدل‌سازی مسئله تعیین توالی اعزام و برنامه توقف قطارها در قالب مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی منعطف[6] تشریح می‌گردد. تاکنون مدل‌های زمان‌بندی جریان کارگاهی منعطف، به‌طور مستقیم برای فرموله کردن مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها مورد استفاده قرار نگرفته است. در تحقیقی از ساویک (Sawik, 2000)، مدل‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای مسایل زمان‌بندی جریان کارگاهی منعطف در حالت ماشین‌های موازی یکسان با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت بین ماشین‌آلات ارایه شده است. در بیشتر روش‌های فراابتکاری برای مسایل زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر، فضای جواب تنها به توالی یکسان کارها برای ماشین‌ها محدود شده است. فرض سبقت نگرفتن قطارها معادل چنین فرضی در مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر می‌باشد. این فرض اولین بار توسط راجندرن و چادری (Rajendran and Chaudhuri, 1992b)، در نظر گرفته شده است. آنها یک الگوریتم شاخه و حد برای حل مسئله زمان‌بندی کارگاهی انعطاف‌پذیر در حالت یکسان بودن توالی ورود کارها به تمام مراحل، ارایه کرده‌اند. در ادامه مدل زمان‌بندی جریان کارگاهی منعطف برای مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها در مسیرهای دوخطه، ارایه می‌شود. ترتیب عبور هر قطار از بلاک‌ها و ایستگاه‌های مسیر معادل ترتیب پردازش عملیات هر کار روی مراحل در مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی است. هر قطار بعد از ورود به ایستگاه، روی یکی از خطوط ریلی مشابهی که همواره در دسترس می‌باشند، توقف کرده و یا از آن عبور می‌کند. با توجه به قوانین ریلی در راه آهن ایران، بلاک بین دو ایستگاه می‌تواند مانند یک تک ماشین[7] در نظر گرفته شود. فرض می‌شود که تمامی قطارها از تمام ایستگاه‌ها و بلاک‌های مسیر عبور می‌کنند. اگر قطارها را معادل کارها و همچنین بلاک‌ها و خطوط ایستگاه‌ها را معادل تک ماشین در نظر بگیریم، آنگاه زمان‌های سیر قطارها روی بلاک‌ها و زمان‌های توقف برنامه‌ای قطارها روی خطوط ایستگاه نیز معادل زمان‌های پردازش کارها روی ماشین‌ها می‌باشند. زمان اشغال شدن بلاک‌ها نباید بیشتر از زمان سیر قطارها باشد. سبقت قطارها مجاز نمی‌باشد و در نتیجه توالی اعزام قطارها در تمامی ایستگاه‌ها یکسان است. اگر قطاری که زودتر به ایستگاهی وارد شده، دیرتر از قطار دیگری که دیرتر به ایستگاه وارد شده است، از ایستگاه اعزام شود، آنگاه سبقت رخ داده است. با سبقت گرفتن قطارها از هم، توالی ورود و اعزام قطارها در ایستگاه‌ها تغییر می‌کند. سبقت گرفتن قطارها برای قطارهایی که در یک جهت حرکت می‌کنند معنا داشته و تنها در ایستگاه‌های مسیر ممکن می‌باشد. همه قطارها در لحظه صفر در دسترس و آماده اعزام هستند. همچنین هیچ بافر میانی بین ایستگاه‌ها و بلاک‌های مسیر وجود ندارد. قطارها در طول مسیر

Archive of SID

www.SID.ir

در صورتی که در بازه‌های افق شرعی قرار گیرند ملزم بـه توقـف برای اقامه نماز هستند. مکان و زمان توقف قطارهـا در بـازه‌هـای افق شرعی نامشخص بوده و وابسته به زمان اعزام از مبـدأ، زمـان رسـیدن قطـار بـه مقصـد، افـق شـرعی ایسـتگاه‌هـا و همچنـین خصوصیات زیرساختی ایستگاه می‌باشد. در صورتی که زمان لازم (زمان فرجه) برای اقامه نماز مسـافران در ایسـتگاه‌هـای مبـدأ یـا مقصد وجود داشته باشد، برای این نماز توقـف در ایسـتگاه‌هـای بین راه انجام نمی‌شود.

به‌طور خلاصه اگر فاصله زمان اعزام قطاری از زمان ابتـدای بـازه افق شرعی، کمتر از زمان فرجه و همچنین فاصله انتهای بازه افـق شرعی از زمان رسیدن آن به ایستگاه مقصد، کمتر از زمـان فرجـه باشد، آنگاه قطار فوق ملزم به توقف در بازه افق شرعی می‌باشـد. در مسیرهای دوخطه به دلیل داشتن زیرگـذر یـا روگـذر، ممکـن است مسافران یک زمان اضافی (ε) علاوه بر زمان اقامه نماز، نیاز داشته باشند. این محدودیت به دلیل سمت قرارگیری نمازخانـه و سکو در ایستگاه‌های مسیرهای دوخطه است. در ایستگاه‌هایی که سمت سکوی ایستگاه در سمت نمازخانـه ایسـتگاه باشـد، زمـان توقف، همان زمان لازم برای اقامه نمـاز (۲۰ دقیقـه) اسـت و در غیر این‌صورت یک زمان اضافی (معمولاً ۵ دقیقه) به زمان توقف برای نماز اضافه می‌شود. با توجه بـه وابسـته بـودن مـدت زمـان توقف قطارها به سمت نمازخانه در هر ایستگاه، یافتن برنامه بهینه برای توقف قطارها در بازه‌های افق شـرعی، دشـوارتر مـی‌شـود. به‌طورکلی، ظرفیت نمازخانه جهت پـذیرش نمـازگزاران، باعـث عدم امکان توقف همزمان قطارها برای اقامه نماز می‌شود و روی افزایش زمان توقف قطارها برای اقامه نماز تأثیرگذار نمی‌باشد. در این تحقیق، به این محدودیت پرداخته نشده است. هـدف یـافتن توالی اعزام قطارها از مبدأ و تعیـین برنامـه توقـف هـر قطـار در بازه‌های افق شرعی جهت کمینه کردن طول افق زمان‌بندی است. مطابق تعاریف ارایه شده، مسئله توالی اعزام قطارها قابل تبدیل به یـک مسـئله زمـان‌بنـدی جریـان کارگـاهی منعطـف مـی‌باشـد. مطابق نمادگذاری مسایل تئوری توالی عملیات(Pinedo, 2008)، مسئله تعیین توالی اعزام قطارها در مسیرهای تـک خطـه و تـک جهتـه ریلـی مـی‌توانـد بـه‌صـورت $FF_c|Block,prmu|C_{max}$، خلاصه شود.

٤-١- روابط محاسبه برنامه زمان‌بندی حرکت قطارها

یک برنامه زمان‌بندی قطارها با مشخص شدن توالی اعزام قطارها از مبدأ، نحوه تخصیص قطارها به خطوط هـر ایسـتگاه و برنامـه توقف قطارها در بازه‌های افق شرعی، مشخص می‌شود. در روابط محاسبه زمان‌های اعزام قطارها از هر ایستگاه، از نمادهای جـدول ۲ و ۳ استفاده می‌شود.

جدول ۱. تقسیم‌بندی مقالات مرتبط با موضوع بهینه‌سازی ظرفیت خطوط ریلی

روش حل	تابع هدف	رویکرد مدل‌سازی	نویسندگان	نوع مسئله
الگوریتم بهبودیافته SBP[۸] و ترکیب الگوریتم TS[۹] و SA[۱۰]	طول افق زمان‌بندی	مسئله گردش کارگاهی[۱۱] با ماشین‌های موازی و محدودیت ظرفیت بین مراحل	(Liu and Kozan, 2009)	زمان‌بندی قطارها در شبکه ریلی
ترکیب الگوریتم‌های ابتکاری ایجادی و بهبود دهنده BIH[۱۲]	طول افق زمان‌بندی	مسئله گردش کارگاهی با ماشین‌های موازی و محدودیت ظرفیت بین مراحل	(Liu and Kozan, 2010)	زمان‌بندی قطارهای مسافری و باری با در نظر گرفتن اولویت در شبکه ریلی
روش‌های دقیق (B&B[۱۳])	طول افق زمان‌بندی	تئوری گراف	(Pena et al.,, 2010)	زمان‌بندی قطارها در شبکه ریلی پیچیده
ترکیب الگوریتم ابتکاری ایجادی و الگوریتم فرابتکاری SA[۱۴]	طول افق زمان‌بندی	مسئله گردش کارگاهی ترکیبی	(Burdett and Kozan, 2010)	زمان‌بندی قطارها در شبکه ریلی

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۲. پارامترهای به‌کار رفته در مسئله توالی اعزام قطارها

نماد	تعریف
n	تعداد قطارها
m	تعداد ایستگاه‌ها (تعداد بلاک‌ها برابر m-1 است)
j	اندیس قطارها
i	اندیس ایستگاه‌ها و بلاک‌ها
s	اندیس توالی اعزام قطارها
p	اندیس بازه‌های افق شرعی (p=1,2,…,H)
u	اندیس خطوط موجود در ایستگاه‌ها
p_{is}	زمان سیر قطار sام در توالی روی بلاک iام
pt_{is}	زمان توقف برنامه‌ای قطار sام در توالی در ایستگاه iام
u_i	تعداد خطوط قبول و اعزام موجود در ایستگاه iام
s_p	زمان توقف برای نماز نوع p در ایستگاه‌ها
t_p	فرجه زمانی لازم برای اقامه نماز در ایستگاه‌های مبدأ و مقصد برای افق شرعی pام
t_o	زمان اضافی (جهت عبور مسافران از روگذر یا زیرگذر) برای توقف جهت اقامه نماز
β_i	اگر ایستگاه iام دارای نمازخانه باشد برابر ۱ و در غیر این‌صورت برابر ۰ است.
L_{pi}	ابتدای بازه افق شرعی p ام در ایستگاه iام
U_{pi}	انتهای بازه افق شرعی p ام در ایستگاه iام
λ_i	اگر نمازخانه در مجاورت سکوی ایستگاه i نباشد برابر ۱ در غیر این‌صورت برابر ۰ است.

جدول ۳. متغیرهای به‌کار رفته در مسئله توالی اعزام قطارها

نماد	تعریف
w_{uis}	اگر قطار sام در توالی، به uامین خط از ایستگاه iام تخصیص داده شود، برابر ۱ و در غیر این‌صورت ۰ است.
w'_{isk}	اگر قطار sام و kام در توالی اعزام، هر دو به یک خط مشترک از ایستگاه iام تخصیص یابند، برابر ۱ و در غیر این‌صورت ۰ است.
x_{js}	اگر قطار jام به موقعیت sام از توالی اعزام تخصیص یابد برابر ۱ و در غیراین‌صورت برابر ۰ است.
d_{is}	زمان خروج قطار sام در توالی اعزام از ایستگاه iام
c_{is}	زمان رسیدن قطار sام در توالی اعزام به ایستگاه iام
g_{pis}	اگر قطار sام در توالی اعزام برای نماز نوع p در ایستگاه iام توقف کند برابر ۱ و در غیر این‌صورت برابر ۰ است.
ms_{is}	ماکزیمم زمان توقف برنامه‌ای قطار sام در توالی اعزام در ایستگاه iام

طبق قوانین راه آهن ایران، شرایط اعزام هر قطار از هر ایستگاه، شامل آزاد بودن بلاک مقابل و حداقل یکی از خطوط ایستگاه بعد می‌باشد.

برای محاسبه زمان اعزام قطار sام از ایستگاه iام کافی است زمان اعزام برنامه‌ای (زمان رسیدن قطار فوق به ایستگاه iام به‌علاوه زمان توقف برنامه‌ای)، زمان آزاد شدن بلاک بعدی (بلاک i+1) و زمان آزاد شدن یک خط از ایستگاه بعدی (ایستگاه i+1) که قطار sام به آن تخصیص یافته است را در نظر بگیریم. در نتیجه زودترین زمان اعزام قطار sام از ایستگاه iام برابر ماکزیمم زمان‌های اعزام برنامه‌ای، آزاد شدن بلاک بعدی و آزاد شدن خط

Archive of SID
www.SID.ir

تخصیص یافته از ایستگاه بعدی می‌باشد و از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$d_{is} = \max\{c_{is} + ms_{is}, c_{i+1,s-1}, \max_{1\le k\le s-1}\{d_{i+1,k} \times w'_{i+1,s,k}\}\}, \quad (۱)$$

$$1 \le i \le m-1, \quad 2 \le s$$

برای قطار اول در توالی، همواره بلاک مقابل و خطوط ایستگاه بعدی آزاد هستند. در نتیجه برای این قطار، رابطه زمان اعزام از ایستگاه‌ها به‌صورت رابطه (۲) خواهد بود. همچنین فرض می‌شود که زمان‌بندی همواره از لحظه صفر آغاز می‌شود.

$$d_{i1} = d_{i-1,1} + p_{i-1,1} + ms_{i1}, \quad (۲)$$
$$2 \le i \le m-1$$

در رابطه (۲)، محاسبه مقدار w'_{isk} نیز از روی نحوه تخصیص قطارهای sام و kام در توالی به ایستگاه iام به‌دست می‌آید. در واقع اگر خطی از ایستگاه iام وجود داشته باشد که هر دو قطار sام و kام در توالی، به آن تخصیص یافته‌اند، آنگاه مقدار w'_{isk} برابر یک خواهد شد. رابطه بین زمان رسیدن قطارها به هر ایستگاه و زمان اعزام از ایستگاه قبل نیز به‌صورت رابطه (۳) خواهد بود.

$$c_{i+1,s} = d_{is} + p_{is}, \qquad 1 \le i \le m-1, \quad \forall s \quad (۳)$$

با توجه به انجام موازی فعالیت‌های مختلف در یک ایستگاه مانند مسافرگیری و اقامه نماز، حداکثر زمان توقف برنامه‌ای یک قطار در یک ایستگاه از رابطه (٤) محاسبه می‌شود.

$$ms_{is} = \max\{pt_{is}, \sum_{p=1}^{H}(s_p + t_o.\lambda_i).g_{pis}\}, \forall s,i. \quad (٤)$$

محاسبه زمان‌های اعزام هر قطار از هر ایستگاه به ترتیب توالی اعزام قطارها انجام می‌شود. ابتدا قطار اول در توالی به‌طور کامل زمان‌بندی می‌شود و سپس قطارهای بعدی نیز به ترتیب اعزام، زمان‌بندی می‌شوند. در ادامه با توجه به فرض عدم سبقت قطارها، از قاعده تخصیص قطارها به زودترین خط آزاد شده در هر ایستگاه که در شرایط بهینگی صدق می‌کند، استفاده می‌شود. همان‌طور که در بخش مرور ادبیات اشاره شد، در تحقیقی از راجندرن و چادری (Rajendran and Chaudhuri,1992b)، برای مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با فرض یکسان بودن توالی ورود کارها به هر مرحله ($FF_c|prmu|C_{max}$)، یک الگوریتم شاخه و حد ارایه شده است. در این مسئله، هر کار در هر مرحله، طبق قاعده اولین ماشین در دسترس[۱۵]، برنامه‌ریزی می‌شود. برای این مسئله نشان داده شده است که این قاعده تخصیص کارها به ماشین‌های موازی، در شرایط بهینگی صدق می‌کند. در نتیجه قاعده تخصیص قطارها به زودترین خط آزاد شده در هر ایستگاه، نیز در مسئله مورد بررسی در این تحقیق، در شرایط بهینگی صدق می‌کند. به این ترتیب، تخصیص قطارها به خطوط ایستگاه‌ها، متغیر تصمیم مسئله نمی‌باشد. طبق قاعده تخصیص قطارها به زودترین خط آزاد شده در هر ایستگاه و در نظر گرفتن فرض عدم سبقت، کافی است، u_i قطار اول در توالی اعزام را به ترتیب به خطوط 1 تا u_i در ایستگاه iام تخصیص داد. به همین ترتیب قطارهای u_i+1 تا $2.u_i$ به ترتیب به خطوط ۱ تا u_i تخصیص داده می‌شوند و این فرآیند تا تخصیص کامل قطارها به خطوط ایستگاه، ادامه می‌یابد.

۵- مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح

مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح برای مسئله توالی اعزام قطارها در روابط (۵) الی (۲۱) خلاصه شده است. تابع هدف به‌صورت حداقل کردن طول افق زمان‌بندی و یا به‌عبارتی زمان رسیدن آخرین قطار در توالی اعزام به ایستگاه مقصد می‌باشد (رابطه ۵). در ادامه محدودیت‌های مسئله تشریح می‌شود. مطابق با محدودیت (٦)، اولین قطار در توالی اعزام، همواره در زمان صفر از ایستگاه مبدأ اعزام می‌شود. در محدودیت (۷)، هر قطار تنها در یک موقعیت از توالی اعزام می‌تواند قرار بگیرد. همچنین هر موقعیت توالی اعزام تنها به یک قطار می‌تواند تخصیص یابد (محدودیت ۸). محدودیت (۹) بیان می‌کند که زمان رسیدن هر قطار در توالی اعزام به هر ایستگاه برابر زمان خروج از ایستگاه قبل به علاوه زمان سیر بلاک خواهد بود. برای اعزام یک قطار از هر ایستگاه باید بلاک مقابل آزاد شده باشد یا به‌عبارتی قطاری داخل بلاک نباشد. برای این منظور زمان اعزام قطار sام از ایستگاه iام باید بعد از زمان رسیدن قطار قبلی (قطار s-1ام) به ایستگاه بعدی (ایستگاه i+1ام) باشد (محدودیت ۱۰). با توجه به محدودیت ظرفیت ایستگاه، زمان اعزام یک قطار از یک ایستگاه

Archive of SID
www.SID.ir

وابسته به زمان اعزام قطارهای قبلی از ایستگاه بعدی می‌باشد. در واقع زمان اعزام یک قطار از یک ایستگاه باید بعد از زمان آزاد شدن خطی از ایستگاه بعدی باشد که به آن تخصیص یافته است. برای مدل‌سازی این محدودیت فرض می‌شود که قطار sام در توالی در ایستگاه i+1ام به خط uام تخصیص یافته باشد. در این حالت زمان اعزام این قطار از ایستگاه iام باید دیرتر از زمان آخرین قطاری باشد که به همان خط از ایستگاه i+1ام تخصیص یافته است (محدودیت ۱۱). محدودیت (۱۲) بیان می‌کند که زمان خروج یک قطار از یک ایستگاه حداقل برابر زمان رسیدن آن به ایستگاه به‌علاوه زمان توقف برنامه‌ای در ایستگاه است. فعالیت‌های مختلف در یک ایستگاه به‌طور موازی انجام می‌شود و بنابراین، بیشترین زمان به عنوان زمان توقف برنامه‌ای در ایستگاه در نظر گرفته می‌شود (محدودیت‌های ۱۳و۱٤). محدودیت (۱۵) بیان می‌کند که در صورت ملزم بودن قطار sام برای توقف در بازه افق شرعی pام، این قطار باید در یکی از ایستگاه‌های بین راه در بازه افق شرعی توقف داشته باشد.

$$\min C_{\max} = c_{mn} \qquad (۵)$$

$$d_{1,1} = 0, \qquad (٦)$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{js} = 1, \qquad \forall s \qquad (۷)$$

$$\sum_{s=1}^{n} x_{js} = 1, \qquad \forall j$$

$$c_{i+1,s} = d_{is} + \sum_{j=1}^{n} x_{js}.p_{ij}, \qquad \forall s,i \qquad (۸)$$

$$d_{is} \geq c_{i+1,s-1}, \qquad \forall i, s \geq 2 \qquad (۹)$$

$$d_{is} \geq d_{i+1,s-u_{i+1}}, \qquad \forall i, \qquad u_{i+1} \leq s \leq n \qquad (۱۰)$$

$$d_{is} \geq c_{is} + ms_{is}, \qquad \forall i,s \qquad (۱۱)$$

$$ms_{is} \geq \sum_{j=1}^{n} x_{js}.pt_{ij}, \qquad \forall s, \forall i \qquad (۱۲)$$

$$ms_{is} \geq \sum_{p=1}^{H} (s_p + t_o.\lambda_i).g_{pis}, \qquad \forall s, \forall i \qquad (۱۳)$$

$$AP_{ps} = \sum_{i=2}^{m-1} \beta_i.g_{pis}, \qquad \forall s,p \qquad (۱٤)$$

$$2AP_{ps} \leq \tau_{ps} + \phi_{ps}, \qquad \forall s,p \qquad (۱۵)$$

$$\tau_{ps} + \phi_{ps} \leq 1 + AP_{ps}, \qquad \forall s,p \qquad (۱٦)$$

$$M(\phi_{ps} - 1) \leq c_{ns} - U_{pm} + t_p < M.\phi_{ps} \qquad \forall s, \forall p \qquad (۱۷)$$

$$M(\tau_{ps} - 1) \leq L_{p1} + t_p - d_{1s} < M.\tau_{ps}, \qquad \forall s, \forall p \qquad (۱۸)$$

$$L_{pi} - M.(1 - \beta_i.g_{pis}) \leq c_{is} \leq U_{pi} + M.(1 - \beta_i.g_{pis}) - (s_p + t_o.\lambda_i), \qquad \forall s,p,i \qquad (۱۹)$$

$$x_{js}, g_{pij} AP_{ps}, \tau_{ps}, \phi_{ps} \in \{0,1\}, \qquad \forall j,s,p \qquad (۲۰)$$

(۲۱)

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ٤. متغیرهای کمکی برای مدل‌سازی محدودیت نماز

نماد	تعریف
AP_{ps}	اگر قطار sام ملزم به توقف در بازه افق شرعی pام باشد برابر ۱ و در غیر این‌صورت برابر ۰ است.
τ_{ps}	اگر زمان اعزام قطار sام از مبدأ بعد از ابتدای بازه افق شرعی pام به‌علاوه زمان فرجه باشد برابر ۱ و در غیر این‌صورت برابر ۰ است.
ϕ_{ps}	اگر زمان رسیدن قطار sام به مقصد بعد از انتهای بازه افق شرعی pام منهای زمان فرجه باشد برابر ۱ و در غیر این‌صورت برابر ۰ است.

برای مدل‌سازی شرایط الزام توقف قطارها برای اقامه نماز، از متغیرهای ارایه شده در جدول ٤ استفاده می‌شود. در صورتی که قطار sام در بازه افق شرعی pام ملزم به توقف باشد، باید در یکی از ایستگاه‌های بین راه، برای اقامه نماز توقف داشته باشد. محدودیت (١٦) بیان می‌کند که اگر یکی از شرایط توقف در بازه افق شرعی pام برای قطار sام برقرار نباشد، آنگاه قطار فوق ملزم به توقف در ایستگاه‌های بین راه نمی‌باشد. محدودیت (١٧) نیز بیان می‌کند که اگر هر دو شرط توقف در بازه افق شرعی pام برای قطار sام در توالی اعزام برقرار باشد، آنگاه این قطار باید در یکی از ایستگاه‌های بین راه توقف داشته باشد. دو شرط توقف قطارها در بازه‌های افق شرعی به کمک دسته محدودیت‌های (١٨) و (١٩) به متغیرهای کمکی وابسته می‌شود. محدودیت (٢٠) نیز بیان می‌کند که زمان رسیدن قطار به ایستگاه، باید بعد از زمان ابتدای بازه افق شرعی و همچنین زمان اتمام نماز، قبل از انتهای بازه افق شرعی باشد.

یقینی و محمدزاده (١٣٩٠)، مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها در مسیرهای دوخطه ریلی را با هدف کمینه کردن مجموع کل زمان تأخیر قطارها در نظر گرفته‌اند. در تحقیق یاد شده، شرط لزوم توقف در ایستگاه‌های بین راهی دارای نمازخانه، برای قطارهای مسافری برای ادای فریضه نماز و انتخاب بهترین ایستگاه برای توقف در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی بخش توقف قطارها برای اقامه نماز کافی است، متغیری برای ایستگاه توقف قطارها در بازه‌های افق شرعی تعریف شود. این متغیر تعیین می‌کند که یک قطار در هر ایستگاه برای اقامه نماز توقف می‌کند یا خیر. در صورتی که توقفی برای اقامه نماز انجام شود، باید کل زمان توقف قطار برای اقامه نماز در بازه افق شرعی قرار بگیرد. در صورتی که قطاری ملزم به توقف در بازه افق شرعی نباشد، باید این قطار در هیچ ایستگاهی برای اقامه نماز توقف نکند. یک قطار در صورتی ملزم به توقف است که دو شرط الف و ب را داشته باشد.

الف. زمان اعزام از مبدأ < ابتدای بازه افق شرعی + زمان فرجه

ب. زمان رسیدن به مقصد > انتهای بازه افق شرعی− زمان فرجه

برای هر یک از این دو شرط نیاز به تعریف یک متغیر دیگر داریم که بر اساس آن در صورتی که هر دو شرط برقرار شود، قطار ملزم به توقف و انتخاب یکی از ایستگاه‌های بین راهی برای اقامه نماز است. در تحقیق یقینی و محمدزاده (١٣٩٠)، برای تعیین وضعیت زمان رسیدن یک قطار به ایستگاه‌ها نسبت به زمان ابتدا و انتهای افق شرعی ایستگاه، از متغیرهای صفر و یک استفاده شده است، در صورتی که می‌توان بدون تعریف متغیرهای اضافی، به‌سادگی با ارایه یک محدودیت، زمان توقف قطارها در بازه افق شرعی کنترل شود. در واقع در مدل، اجازه انتخاب ایستگاه‌های مختلف برای اقامه نماز به یک قطار داده می‌شود و محدودیت گفته شده، موجه بودن برنامه توقف قطارها در بازه‌های افق شرعی را کنترل می‌کند. در نتیجه در این مقاله با تعداد متغیرهای تصمیم و محدودیت‌های کمتر و با به‌کارگیری متغیر تصمیم به‌صورت توالی، مدل‌سازی ساده‌تری نسبت به تحقیق یقینی و محمدزاده (١٣٩٠)، انجام شده است. همچنین در این مقاله، زمان‌های توقف قطارها در بازه‌های افق شرعی وابسته به خصوصیات ایستگاه و نوع نماز است. از این رو، مدل برنامه‌ریزی ریاضی ارایه شده در این تحقیق، در زمینه مدل‌سازی موضوع توقف قطارها در بازه‌های افق شرعی دارای نوآوری است.

٦-الگوریتم فراابتکاری جستجوی تصادفی تطابقی حریصانه

با توجه به NP-hard بودن مسئله توالی اعزام قطارها، حل مسایل واقعی که معمولاً ابعاد بزرگی دارند، با استفاده از مدل‌های دقیق مانند مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح ارایه شده در بخش (٥)، با دید حجم محاسبات، عملی نیست و از این‌رو، رویکرد روش‌های

Archive of SID
www.SID.ir

ابتکاری و فراابتکاری گزینه عملی است. در این مقاله، برای یافتن جواب‌های نزدیک به بهینه، از روش فراابتکاری جستجوی تصادفی تطابقی حریصانه (GRASP)[16] استفاده می‌شود. این الگوریتم توسط فئو و رزند (Feo and Resende, 1995)، برای حل مسائل بهینه سازی ترکیبی، ارایه شده است. سابقه این الگوریتم به روش جستجوی محلی تصادفی تکرار شونده[17] و الگوریتم های ابتکاری نیمه حریصانه[18] بر می‌گردد. به‌طور کلی کاربردهای روش جستجوی تصادفی تطابقی حریصانه در ادبیات موضوع در حوزه های زمان بندی، مسیریابی، مکانیابی، نظریه گراف و مسئله تخصیص دیده می‌شود.

روش جستجوی تصادفی تطابقی حریصانه در مسایل زمان‌بندی متفاوتی مانند زمان بندی پروازها (Feo and Bard, 1989)، زمان‌بندی ماشین‌های موازی (Laguna and Velarde, 1991)، زمان‌بندی مسایل تک ماشینه با زمان آماده‌سازی وابسته به توالی (Feo et al., 1996)، زمان بندی کار کارگاهی (Aiex et al., 2003) و زمان‌بندی جریان کارگاهی با هزینه‌های آماده‌سازی (Mercado and Bard, 1997) به‌کار گرفته شده است. پایه مهم الگوریتم جستجوی تصادفی تطابقی حریصانه، الگوریتم‌های حریصانه[19] می‌باشد. در الگوریتم‌های حریصانه، از یک جواب تهی شروع کرده و با تخصیص مقادیر به متغیرهای تصمیم در هر مرحله، سعی در به‌دست آوردن یک جواب کامل می‌شود. تخصیص مقدار برای هر متغیر در الگوریتم‌های حریصانه با تعریف یک مجموعه عناصر برای ایجاد جواب آغاز می‌شود. یک جواب از مسئله با انتخاب عناصر این مجموعه برای متغیرها به‌دست می‌آید. در هر گام از الگوریتم‌های حریصانه، یکی از عناصر با کمترین هزینه از بین مجموعه عناصر تخصیص داده نشده برای اضافه شدن به جواب جزیی[20]، انتخاب می‌شود. جستجوی حریصانه یا نزدیک‌بینانه، در هر مرحله بهترین انتخاب از عناصر جواب را بدون در نظر گرفتن این‌که این انتخاب در آینده چه تبعاتی دارد، انجام می‌دهند.

به عبارتی، در جستجوی حریصانه همیشه حرکتی که به جواب بهینه محلی که به کمترین مقدار افزایش در تابع ارزیابی جواب منجر می‌شود، انجام می‌گردد. تنها در مسایل خاصی می‌توان الگوریتم حریصانه ارایه کرد که همواره جواب بهینه تولید کند.

روش جستجوی تصادفی تطابقی حریصانه، یک ساختار کلی برای تولید جواب ارایه می‌کند و به‌دلیل ساختار منعطف آن، با سایر روش‌های فراابتکاری قابل ترکیب است. این روش تکرارشونده، شامل بخش ایجاد جواب و بخش جستجوی محلی جهت بهبود جواب می‌باشد. این روش برخلاف روش‌هایی نظیر الگوریتم ژنتیک و الگوریتم اجتماع مورچگان، از طبیعت الگو نگرفته است. این روش نسبت به سایر روش‌های فراابتکاری، از ساختار ساده‌تری برخوردار می‌باشد. در این روش برای فرار از به دام افتادن در جواب بهینه محلی، از نقاط شروع مختلفی برای گام جستجوی محلی استفاده می‌شود. در این روش، پارامترهای کمی (پارامتر تعیین لیست محدود شده، معیار توقف) نیاز به تعیین شدن دارند.

همچنین این الگوریتم می‌تواند به راحتی به‌صورت موازی روی چندین پردازنده اجرا شود. در عین حال در حالت پایه این روش، از ساختار حافظه در طول جستجوی استفاده نمی‌شود. هر گام از الگوریتم جستجوی تصادفی تطابقی حریصانه، شامل گام‌های ایجاد جواب و جستجوی محلی است. در صورتی که جواب به‌دست آمده یک جواب موجه نباشد، با تغییراتی تبدیل به یک جواب موجه می‌شود. سپس این جواب به‌دست آمده وارد فاز جستجوی محلی شده تا جواب بهینه محلی به‌دست آید. در صورتی که جواب به‌دست آمده از فاز جستجوی محلی، از بهترین جواب فعلی بهتر باشد، این جواب جایگزین بهترین جواب فعلی می‌شود. این مراحل تا برآورده شدن معیار توقف الگوریتم، ادامه می‌یابد. استراتژی الگوریتم جستجوی تصادفی تطابقی حریصانه، برای فرار از دام بهینه محلی، شروع کردن از جواب‌های اولیه مختلف در فاز جستجوی محلی است. در هر تکرار از این الگوریتم، مجموعه‌ای از عناصر کاندید جهت اضافه شدن به جواب، تشکیل می‌شود. اعضای این مجموعه، بر اساس مقدار یک تابع حریصانه، مرتب شده و تعدادی از بهترین عناصر، در مجموعه‌ای به‌نام لیست کاندید محدود شده (RCL)[21] قرار می‌گیرند. سپس یک عنصر به تصادف از بین عناصر این مجموعه انتخاب شده و به جواب اضافه می‌شود.

به‌طور کلی دو روش مقداری و تعدادی، برای تشکیل مجموعه عناصر کاندید محدود شده، وجود دارد. در روش تعدادی[22]،

Archive of SID

www.SID.ir

مجموعه عناصر کاندید محدود شده با انتخاب k عنصر از بین عناصر کاندید با کمترین مقدار هزینه، تشکیل می‌شود که k یک پارامتر است. در روش مقداری[۲۳]، درصدی از عناصر کاندید با کمترین هزینه، در مجموعه عناصر کاندید محدود شده، قرار می‌گیرند. در این مقاله، عناصری که مقدار هزینه آنها از یک حد مشخص کمتر باشد، در مجموعه عناصر کاندید محدود شده، قرار می‌گیرند (رابطه ۲۲).

$$RCL = \{i \in I \mid g_i \le g_{\min} + \alpha(g_{\max} - g_{\min})\} \qquad (۲۲)$$

در رابطه (۲۲)، مجموعه I شامل تمام عناصر کاندید تخصیص داده نشده، می‌باشد. مقدار g_i برابر مقدار هزینه ناشی از اضافه شدن عنصر iام به جواب است. همچنین کمترین و بیشترین هزینه عناصر کاندید به ترتیب برابر $g_{\min}$ و $g_{\max}$ در نظر گرفته می‌شود. مقدار پارامتر α، میزان تصادفی و حریصانه بودن الگوریتم جستجوی تصادفی تطابقی حریصانه را تعیین می‌کند. در حالتی که α برابر صفر باشد، الگوریتم مانند یک الگوریتم کاملاً حریصانه عمل می‌کند و در صورتی که α برابر یک باشد؛ آنگاه عناصر به‌صورت کاملاً تصادفی انتخاب می‌شوند.

۶-۱- شیوه نمایش یک برنامه توالی اعزام و توقف قطارها

برای نمایش جواب از یک ماتریس با ابعاد (H+1)*n استفاده می‌شود. مقدار H برابر تعداد بازه‌های افق شرعی در یک بازه زمانی ۲۴ ساعته می‌باشد. در سطر اول این ماتریس، ترتیب اعزام قطارها از ایستگاه مبدأ مشخص می‌شود. بخش دیگر ماتریس شامل ایستگاه‌های توقف هر قطار در توالی در بازه‌های افق شرعی می‌باشد (شکل ۱). برای هر بازه افق شرعی یک سطر از ماتریس در نظر گرفته شده است. برای این منظور از نماد Js و i(p,s) به ترتیب برای شماره قطار در توالی sام از ترتیب اعزام و شماره ایستگاه توقف sامین قطار در توالی در بازه افق شرعی pام استفاده می‌شود. مقدار i(p,s) برای قطارهایی که در بازه افق شرعی ملزم به توقف نمی‌باشند برابر با صفر خواهد بود. به عنوان مثال برنامه زمان‌بندی شکل ۲، به‌صورت ماتریس جواب در جدول ۵، نشان داده شده است. در این مثال، ۱۱ قطار در مسیری با ۶ ایستگاه و سه بازه افق شرعی، زمان‌بندی شده‌اند. توالی اعزام قطارها در این مثال به‌صورت (۳,۲,۶,۷,۱,۹,۵,۴,۸,۱۱,۱۰) می‌باشد. ایستگاه‌های توقف قطارها در بازه‌های افق شرعی نیز با نماد N نشان داده شده است.

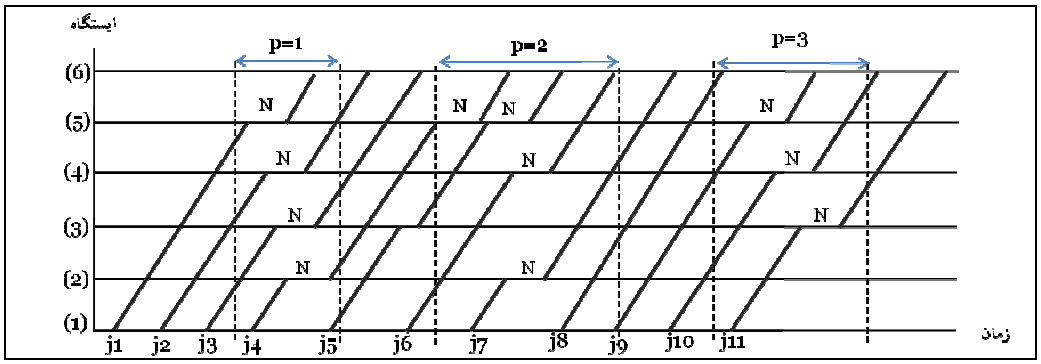
توالی اعزام ⟶	J1	J2	.	.	.	Jn
ایستگاه های توقف در بازه های افق شرعی	i(1,1)	i(1,2)	.	.	.	i(1,n)
	.	.				.
	.		i(p,s)			.
	.			.		.
	i(n,1)	i(n,2)	.	.	.	i(n,n)

شکل ۱. نمایش جواب در قالب ماتریس با ابعاد (H+1)*n

جدول ۵. نمایش جواب مربوط به برنامه زمان‌بندی در شکل ۲

۳	۲	۶	۷	۱	۹	۵	٤	۸	۱۱	۱۰
۵	٤	۳	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۵	۵	٤	۲	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵	٤	۳

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۲. نمودار ایستگاه- زمان برای مثال ارایه شده در جدول (منظور از نماد N زمان توقف برای نماز می‌باشد)

برای ایجاد جواب‌های شدنی لازم است هم توالی اعزام قطارها و هم ایستگاه‌های توقف قطارها در بازه های افق شرعی مشخص شود. به‌طورکلی تعداد توالی‌های ممکن برای اعزام قطارها برابر $n!$ می‌باشد. همچنین با توجه به این‌که هر قطار می‌تواند انتخاب‌های متفاوتی برای توقف در بازه‌های افق شرعی داشته باشد، هر توالی اعزام می‌تواند بیش از یک جواب شدنی داشته باشد. L را برابر تعداد ایستگاه‌های دارای نمازخانه در مسیر در نظر می‌گیریم. همچنین هر قطار در H بازه افق شرعی، دارای ایستگاه‌های کاندید برای توقف می‌باشد. حداکثر تعداد حالات توقف قطارها در بازه‌های افق شرعی برای یک توالی اعزام، برابر $L^{H.n}$ خواهد بود. با در نظر گرفتن توالی اعزام و برنامه توقف قطارها در بازه‌های افق شرعی، حداکثر تعداد برنامه‌های زمان‌بندی شدنی بر حسب پارامترهای مسئله برابر $n!.L^{H.n}$ می‌باشد. معمولاً تعداد بازه‌های افق شرعی برابر $H=3$ در نظر گرفته می‌شود. تعداد ایستگاه‌های نمازخانه دار (L) نیز حداقل برابر ۱ و حداکثر برابر n می‌باشد. پیچیدگی محاسباتی مسئله نیز با افزایش تعداد قطارها، به‌طور نمایی افزایش می‌یابد. با فرض $L=1$، مسئله به‌ازای $n>20$ و برای $L>1$ به‌ازای $n>10$ مسئله در شرایط NP-hard قرار دارد.

۷- گام‌های الگوریتم تصادفی تطابقی حریصانه برای مسئله توالی اعزام قطارها

با توجه به ساختار نمایش جواب، می‌توان دو راهبرد کلی برای ایجاد جواب در نظر گرفت. در راه‌کار اول، به‌طور همزمان برای هر قطار جدید اضافه شده به توالی، برنامه توقف در تمام بازه‌های افق شرعی تعیین می‌شود. در دومی ابتدا توالی اعزام قطارها به‌طور کامل تعیین شده و سپس برنامه توقف هر قطار در بازه‌های افق شرعی به ترتیب توالی اعزام، تعیین می‌گردد. در این تحقیق، از راه‌کار اول در گام تولید جواب در الگوریتم جستجوی تصادفی تطابقی حریصانه استفاده می‌شود.

۷-۱- تولید توالی اعزام قطارها

برای مشخص کردن یک ترتیب توالی اعزام قطارها از مبدأ به شرح زیر عمل می‌شود. فرض می‌شود که توالی s-1 قطار اول مشخص شده است و مجموعه قطارهای اعزام نشده برابر T نامیده می‌شود. برای تعیین sامین قطار در توالی، تابع حریصانه در الگوریتم GRASP را هزینه قرار دادن قطار jام (برای $j\in T$) در توالی sام تعریف کرده و با نماد $g(j,s)$ نشان داده می‌شود. برای تعیین اولین قطار در توالی $(s=1)$ مقدار $g(j,1)$ برابر زمان سفر خالص قطار jام (مجموع زمان‌های توقف برنامه‌ای و زمان‌های سیر بلاک قطار jام) می‌باشد. برای محاسبه هزینه اضافه کردن سایر قطارها $(s>1)$ به توالی اعزام، از تابع حریصانه تعریف شده در الگوریتم انطباق پروفیل (PF)[۲۴] استفاده می‌شود. الگوریتم انطباق پروفیل، یک الگوریتم ابتکاری حریصانه برای تولید یک توالی برای مسئله زمان‌بندی گردش کارگاهی بدون ظرفیت میانی بین ماشین‌آلات $(F_m|block|C_{max})$ می‌باشد که توسط مک کورمیک و همکاران (McCormick et al.,1989)، ارایه شده است. تابع حریصانه را برابر مجموع زمان‌های بیکاری بلاک‌ها و خطوط ایستگاه‌ها در نظر می‌گیریم. در حالت کلی اگر s-1 قطار برنامه‌ریزی شده باشند، آنگاه مجموع زمان‌های بیکاری روی بلاک iام (IB_i) از رابطه (۲۳) به‌دست می‌آید.

Archive of SID
www.SID.ir

$$IB_i = (d_{is} - d_{i1}) - \sum_{k=1}^{s-1} p_{ik} \qquad (۲۳)$$

در رابطه (۲۳)، d_{is} برابر زمان خروج از ایستگاه iام برای قطاری است که به عنوان قطار sام در توالی اعزام، انتخاب می‌شود. شکل ۳، زمان‌های بیکاری روی بلاک iام را با مستطیل‌های هاشور خورده نشان می‌دهد.

برای محاسبه زمان‌های بیکاری خطوط ایستگاه‌ها نیز کافی است زمان‌های ورود و خروج قطارهای تخصیص یافته به خطوط ایستگاه مشخص گردند. زمان بیکاری خط kام از ایستگاه iام را با نماد IS_{ki} نشان می‌دهیم. با استفاده از قاعده تخصیص قطارها به خطوط ایستگاه‌ها، می‌توان زمان بیکاری خط kام از ایستگاه iام را از رابطه (۲٤) محاسبه نمود.

$$IS_{ki} = \sum_{r=1}^{\left[\frac{n-k}{u_i}\right]} (c_{i,k+r.u_i} - d_{i,k+(r-1).u_i}), \qquad (۲٤)$$
$$1 \le k \le u_i, \quad \forall i.$$

مجموع زمان‌های بیکاری تمام بلاک‌ها و ایستگاه‌های مسیر برای قطار jام، معیاری برای انتخاب sامین قطار جهت اضافه شدن به توالی اعزام می‌باشد. به این ترتیب، هزینه قرار دادن قطار jام در موقعیت sام در توالی اعزام، معادل مجموع زمان‌های بیکاری بلاک‌ها و ایستگاه‌های مسیر بعد از قرار گرفتن قطار jام در موقعیت sام در توالی اعزام بوده و از رابطه (۲۵) به‌دست می‌آید.

$$g(j,s) = \sum_{i=1}^{m-1} IB_i + \sum_{i=2}^{m-1} \sum_{k=1}^{u_i} IS_{ki}, \forall j \in T, \quad s \ge 2. \qquad (۲۵)$$

حال به کمک تابع حریصانه $g(j,s)$، لیست قطارهای کاندید محدود شده برای قرار گرفتن در توالی اعزام، تشکیل می‌شود. مجموعه RCL شامل قطارهایی است که هزینه قرار گرفتن آنها در موقعیت sام در توالی اعزام در رابطه (۲٦) صدق کند. در این رابطه، $g_{\min}$ و $g_{\min}$ به ترتیب برابر کمترین و بیشترین مقدار تابع حریصانه برای قطارهای مجموعه T می‌باشند. همچنین پارامتر $0 \le \alpha_1 \le 1$ جهت تعیین محدوده پذیرش عناصر کاندید جهت قرار گرفتن در مجموعه RCL، تعریف شده است. پس از مشخص شدن مجموعه RCL، یکی از عناصر آن به تصادف انتخاب شده و آن قطاری خواهد بود که در اولویت sام قرار داده می‌شود.

$$RCL = \{j \in T | g(j,s) \le g_{\min} + \alpha_1.(g_{\max} - g_{\min})\} \qquad (۲٦)$$

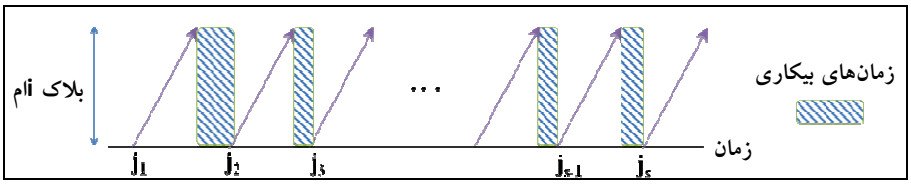
۷-۲- تعیین برنامه توقف هر قطار در بازه افق شرعی

بعد از اضافه کردن هر قطار به مجموعه توالی اعزام می‌بایست وضعیت توقف این قطار برای توقف در بازه‌های افق شرعی بررسی شده و در صورت الزام برای توقف، یکی از ایستگاه‌های کاندید برای توقف انتخاب شده و در برنامه زمان‌بندی وارد می‌شود. مجموعه ایستگاه‌های کاندید محدود شده برای قطار sام در توالی در بازه افق شرعی pام را با نماد RCL(s,p) نشان می‌دهیم. هزینه انتخاب ایستگاه iام به عنوان ایستگاه توقف قطار sام در بازه افق شرعی pام نیز با نماد h(i,p,s) مشخص می‌شود. این هزینه معادل مقدار افزایش تابع هدف مسئله به ازای انتخاب این ایستگاه برای توقف در بازه افق شرعی می‌باشد. مجموعه ایستگاه‌های کاندید محدود شده برای قطار sام در توالی در بازه افق شرعی pام از طریق رابطه (۲۷) به‌دست می‌آید.

$$RCL(s,p) = \{i \in I | h(i,p,s) \le h_{\min} + \alpha_2.(h_{\max} - h_{\min})\} \qquad (۲۷)$$

در رابطه (۲۷)، مقادیر $h_{\min}$ و $h_{\max}$ به ترتیب برابر کمترین و بیشترین هزینه انتخاب ایستگاه توقف قطار sام در توالی اعزام در بازه افق شرعی pام می‌باشند. پارامتر $0 \le \alpha_2 \le 1$ جهت تعیین محدوده پذیرش عناصر کاندید جهت قرار گرفتن در لیست RCL(s,p)، تعریف شده است. بعد از تعیین یک ایستگاه برای توقف در بازه افق شرعی برای یک قطار، لیست ایستگاه‌های کاندید و همچنین مقادیر هزینه انتخاب آنها، بروز رسانی می‌شود. تعیین ایستگاه‌های توقف هر قطار به ترتیب بازه‌های افق شرعی، انجام می‌شود. ایستگاه‌های توقف در بازه‌های افق شرعی، به‌صورت کاملاً تصادفی از بین ایستگاه‌های موجود در مجموعه کاندید محدود شده انتخاب می‌شوند. در نهایت گام‌های الگوریتم GRASP برای تولید برنامه زمان‌بندی موجه، در جدول ٦، خلاصه شده است. از نماد π برای نمایش زمان‌بندی فعلی استفاده می‌شود.

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۳. زمان‌های بیکاری و بلوکه شدن روی بلاک i

جدول ٦. گام‌های الگوریتم جستجوی تصادفی تطابقی حریصانه

الگوریتم جستجوی تصادفیِ تطابقیِ حریصانه GRASP (α_1, α_2)
۱. قرار دهید $\pi:=\emptyset$ ، $s=1$ ، $p=1$.
۲. مجموعه T را برابر مجموعه تمام قطارهای زمان‌بندی نشده قرار دهید.
۳. هزینه قرار گرفتن قطار jام در موقعیت sام از توالی برای تمام قطارهای موجود در مجموعه T را محاسبه کنید.
٤. در صورتی که $\|T\| \neq \emptyset$ می باشد به گام (٥) رفته و در غیراین‌صورت به گام (١٤) بروید.
٥. مجموعه قطارهای کاندید برای قرار گرفتن در لیست RCL جهت تولید توالی اعزام را بر اساس رابطه (٢٦) تشکیل دهید.
٦. یکی از قطارهای مجموعه RCL را به تصادف انتخاب کرده و به برنامه زمان‌بندی فعلی (π) اضافه کنید.
۷. در صورتی که قطار اضافه شده به توالی در بازه افق شرعی pام ملزم به توقف می‌باشد، مجموعه RCL(s,p) را بر اساس رابطه (۲۷) تشکیل دهید.
۸. اگر $RCL(s,p) \neq \emptyset$ باشد، به گام (۹) بروید و در غیر این‌صورت به گام (۱۰) بروید.
۹. یکی از ایستگاه‌های کاندید (مانند i*) از مجموعه RCL(s,p) را جهت توقف قطارsام در بازه افق شرعی pام به‌طور تصادفی انتخاب کنید و برنامه زمان‌بندی را از ایستگاه i*-1ام و برای قطار sام به کمک روابط (۱) الی (٤) بروز رسانی کنید و به گام (۱۱) بروید.
۱۰.برنامه زمان‌بندی غیرموجه را تبدیل به یک برنامه زمان‌بندی موجه کنید. در صورتی‌که کماکان برنامه توقف قطارsام غیرموجه باشد، جواب غیرموجه است.
۱۱.در صورتی که تمام بازه‌های افق شرعی بررسی شده باشند (p=H) به گام (۱۲) بروید و در غیراین‌صورت قرار دهید p:=p+1 و به گام (۷) برگردید.
۱۲.مجموعه تمام قطارهای زمان‌بندی نشده (T) را بروز رسانی کنید و قرار دهید s:=s+1.
۱۳.هزینه g(j,s) را برای قطارهای مجموعه T بروزرسانی کنید و به گام (٤) بروید.
۱٤. برنامه زمان‌بندی π به عنوان خروجی الگوریتم در نظر گرفته شود.

۷-۳- تعیین پارامترهای الگوریتم GRASP

با توجه به انواع روش‌های تعیین پارامتر الگوریتم GRASP، سه الگوریتم فراابتکاری برای تولید جواب ارایه می‌شود. در الگوریتم اول GRASP (I)، پارامترهای α_1 و α_2 با توزیع یکنواخت در بازه $[0,1]$ تولید می‌شوند. در الگوریتم فراابتکاری دوم GRASP (II)، هر یک از پارامترهای الگوریتم به‌تدریج از مقدار یک به سمت صفر تغییر می‌کنند. این مکانیزم کاهشی، موجب می‌شود که الگوریتم در تکرارهای اولیه، جستجوی پراکنده‌ای در فضای جواب انجام داده و سپس با کاهش مقدار α، تمایل الگوریتم به جستجوی در بین جواب‌های با کیفیت بالاتر پیش می‌رود. مقدار هر یک از پارامترها که در تکرار iام از الگوریتم برای تولید جواب استفاده می‌شود از رابطه (۲۸) به‌دست می‌آید. در این رابطه، مقدار پارامتر maxiter برابر حداکثر تعداد گام‌های اجرای الگوریتم GRASP می‌باشد.

$$\alpha_i = 1 - \frac{i}{\max iter}, \qquad (۲۸)$$

در الگوریتم سوم، انتخاب پارامترهای الگوریتم از مجموعه $A = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, ..., \alpha_m\}$ صورت می‌گیرد. در تکرار اول، تمام مقادیر α_i دارای احتمال انتخاب یکسانی برابر $P_i=1/m$ هستند. بعد از چندین تکرار متوالی، احتمال انتخاب مقدار α_i برای پارامتر α بروز رسانی می‌شود. این بروز رسانی بر اساس میانگین مقدار تابع هدف جواب‌هایی است که در تکرارهای قبلی، با انتخاب مقدار α_i حاصل شده است. به این روش، تنظیم خودکار و به آن الگوریتم جستجوی تصادفی تطابقی حریصانه واکنشی[۲۵] (RGRASP) گفته می‌شود. از روش توسط پریس و

Archive of SID
www.SID.ir

ریبرو (Prais and Ribeiro, 2000) در حل مسئله تجزیه ماتریس استفاده شده است. بعد از updateIter تکرار متوالی از الگوریتم GRASP، احتمال انتخاب هر مقدار α_i برای پارامتر α به کمک روابط (۲۹) و (۳۰) مجدداً به‌دست می‌آید.

$$p_i = \frac{q_i}{\sum_{j=1}^{m} q_j}, \qquad (۲۹)$$

$$q_i = \frac{\hat{z}}{A_i}, \quad i = 1,...,m. \qquad (۳۰)$$

در رابطه (۳۰)، مقدار $\hat{z}$ معادل مقدار تابع هدف بهترین جواب فعلی و A_i برابر میانگین مقدار تابع هدف به ازای تمام جواب‌هایی است که با انتخاب مقدار α_i برای پارامتر α به‌دست آمده است. در این تحقیق، مقادیر قابل قبول برای پارامترهای α_1 و α_2 در مجموعه $A=\{0,0.1,0.2,...,1\}$ و تعداد تکرارهای الگوریتم برای بروزرسانی پارامترهای الگوریتم به‌صورت updateIter=10 تعریف می‌شود. دو معیار اصلی متنوع‌سازی[۲۶] و پرقدرت‌سازی[۲۷]، نقش مهمی در طراحی یک الگوریتم فراابتکاری دارند (Talbi, 2009). در الگوریتم فراابتکاری GRASP(I)، تمرکز روی معیار متنوع‌سازی می‌باشد. در الگوریتم GRASP(II)، تعادل نسبی بین میارهای متنوع‌سازی و پرقدرت‌سازی برقرار شده است. در الگوریتم فراابتکاری سوم نیز تمرکز بیشتر روی معیار پرقدرت‌سازی و کیفیت جواب می‌باشد. مقایسه عملکرد این الگوریتم‌های فراابتکاری در بخش بعدی روی نمونه مسایل تصادفی انجام می‌شود.

۸- آزمایش کارایی الگوریتم‌های فراابتکاری

با توجه به نبود نمونه مسایل استاندارد در مسئله توالی اعزام قطارها با توجه فرضیات بکاررفته در این تحقیق، در ادامه الگویی جهت تولید نمونه مسایل تصادفی ارایه می‌شود. این الگو از شرایط واقعی در راه آهن ایران استنتاج شده است و جهت ارزیابی و آزمایش کارایی الگوریتم‌های فراابتکاری، مورد استفاده قرار خواهد گرفت. ابتدا از فرض کلاس‌بندی سرعت قطارها استفاده می‌شود. به‌طورکلی سرعت حرکت قطارها روی بلاک‌ها تابعی از ویژگی‌های بلاک و قطار است. قطارها می‌توانند از نظر حداکثر سرعت حرکت به کلاس‌های مختلفی مانند عادی، فوق‌العاده، سریع‌السیر، توربو و غیره تقسیم شوند. زمان سیر قطارهای با کلاس سرعت بالاتر، روی هر بلاک، نسبت به قطارهای با کلاس پایین‌تر، کمتر یا مساوی می‌باشد. همچنین زمان توقف برنامه‌ای قطارهای با کلاس سرعت بالاتر در هر ایستگاه، نسبت به زمان توقف قطارهای با کلاس پایین‌تر، کمتر می‌باشد. تعداد کلاس‌های سرعت را با نماد Q ($1 \le Q \le n$) نشان می‌دهیم. قطارهایی که دارای کلاس سرعت qام هستند را در مجموعه J_q قرار می‌دهیم. اگر دو قطار دارای یک کلاس سرعت باشند، زمان‌های سیر و توقف برنامه‌ای این دو قطار در هر بلاک و ایستگاه، یکسان است. با توجه به اطلاعات راه آهن ایران، تعداد کلاس‌های سرعت را برابر Q=5 در نظر می‌گیریم.

تعداد قطارهای موجود در هر کلاس سرعت نیز با توجه به ابعاد مسئله (جدول ۷) تعیین می‌شود. زمان سیر پایه برای بلاک iام ($a_i, i \in K$) از توزیع یکنواخت گسسته [6,15] دقیقه، تولید می‌شود. از این زمان سیر پایه برای تولید زمان‌های سیر قطارها در کلاس‌های سرعت تعریف شده، استفاده می‌شود. برای این منظور، در هر بلاک، زمان‌های سیر هر کلاس سرعت، به‌طور بازگشتی از زمان سیر کلاس قبلی محاسبه می‌شود (رابطه ۳۱). ابتدا زمان‌های سیر قطارهای با بالاترین کلاس سرعت، تولید می‌شود. این زمان سیر، همان زمان سیر پایه بوده (رابطه ۳۲) و از توزیع یکنواخت گسسته بین [6,15] دقیقه، تولید می‌شود. برای تولید زمان سیر برای قطارهای موجود در کلاس پایین‌تر، از زمان سیر پایه کلاس قبلی استفاده شده و به کمک یک پارامتر تصادفی کندی (تقلیل) سرعت (c)، محاسبه می‌شود. به‌عبارتی زمان سیر قطارهای کلاس پایین‌تر، از جمع زمان سیر کلاس قبلی و پارامتر کندی سیر، محاسبه می‌شود. پارامتر تصادفی کندی سیر، از توزیع یکنواخت گسسته در بازه [0,3] دقیقه، تولید می‌شود.

(۳۱) q>1، پارامتر کندی سیر + زمان سیر کلاس q-1ام= زمان سیر کلاس qام

(۳۲) q=1، زمان سیر پایه = زمان سیر کلاس اول

زمان توقف برنامه‌ای پایه قطارها در ایستگاه iام ($b_i, i \in I$) نیز طبق توزیع یکنواخت گسسته [0,2] دقیقه، تولید می‌شود. زمان‌های توقف برنامه‌ای نیز مشابه زمان‌های سیر، به‌طور بازگشتی محاسبه می‌شود (روابط ۳۳ و ۳٤). برای محاسبه زمان توقف برنامه‌ای قطارهای با کلاس پایین‌تر، از پارامتر کندی توقف (d) استفاده می‌شود.

(۳۳) q>1، پارامتر کندی توقف + زمان توقف کلاس q-1ام= زمان توقف کلاس qام

(۳٤) q=1، زمان توقف پایه = زمان توقف کلاس اول

Archive of SID

www.SID.ir

نمونه مسایل تصادفی در سه دسته مسایل با ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ مطابق جدول ۷، تولید می‌شوند. در هر دسته، ۳۰ نمونه مسئله، حل خواهد شد. تعداد قطارهای موجود در هر کلاس سرعت ($n_1,\ldots,n_5$)، در هر دسته از مسایل تصادفی، مشخص شده است. تعداد بازه‌های افق شرعی (H) را برابر سه (بازه افق نماز صبح، ظهر – عصر و مغرب – عشاء) در نظر می‌گیریم. از نماد δ جهت تعیین الگوی تغییر اوقات شرعی به دلیل مسافت بین ایستگاه‌ها استفاده می‌شود. سه الگوی تغییر اوقات شرعی، شامل الگوی ثابت، افزایشی و کاهشی در نظر گرفته می‌شود. در الگوی ثابت، تمام ایستگاه‌ها دارای یک بازه افق شرعی مشترک هستند. در الگوی افزایشی (کاهشی)، زمان ابتدای افق شرعی به تدریج برحسب مسافت بین دو ایستگاه (یک دقیقه) افزایش (کاهش) می‌یابد. اوقات شرعی برای نمازهای صبح، ظهر– عصر و مغرب– عشاء به ترتیب به‌صورت [40+δ.i, 100+δ.i]، [400+δ.i, 520+δ.i] و [800+δ.i, 920+δ.i] تعریف می‌شود. تغییرات الگوی اوقات شرعی (δ) نیز از توزیع یکنواخت U[-1,1] پیروی می‌کند. تعداد خطوط در ایستگاه‌ها، طبق توزیع یکنواخت گسسته U[2,4] می‌باشد. هر ایستگاه با احتمال ۹۰ درصد دارای نمازخانه می‌باشد. زمان توقف برای اقامه نماز و زمان فرجه برابر ۲۰ دقیقه و زمان ε برابر ۵ دقیقه در نظر گرفته می‌شود.

۹- نتایج خروجی الگوریتم‌های فراابتکاری

برای حل مسایل برنامه‌ریزی ریاضی، از رایانه‌ای با سیستم عامل ویندوز ۷، حافظه ٤ گیگابایت، پردازشگر۳/۳ گیگاهرتز و به کمک نرم‌افزار بهینه‌سازی CPLEX12.1 استفاده شد.

برای حل مسایل برنامه‌ریزی عددصحیح توسط این نرم‌افزار، ابتدا مسئله در محیط نرم‌افزار Lingo ۱۱ مدل‌سازی شد. سپس این مدل به یک فایل متنی با فرمت MPS تبدیل شد تا از ماژول حل مسایل بهینه‌سازی عددصحیح مختلط در نرم‌افزار CPLEX برای حل آن استفاده شود. برای برنامه‌نویسی الگوریتم‌های فراابتکاری نیز از زبان برنامه‌نویسی Visual Basic ۸ استفاده شده است. شاخص سنجش کارایی الگوریتم‌های فراابتکاری را میانگین و واریانس درصد انحراف از جواب بهینه تعریف می‌کنیم. این درصد انحراف از رابطه $\%(UB-Z^*)/Z^*$ به‌دست می‌آید که در آن Z^* مقدار تابع هدف جواب بهینه و کران بالا (UB) مقدار تابع هدف بهترین جواب به‌دست آمده از الگوریتم می‌باشد. در مسایل با ابعاد بزرگ که جواب بهینه مشخص نباشد، به‌جای Z^* از کران پایین تابع هدف (LB) استفاده می‌شود. حداکثر زمان اجرای الگوریتم‌های فراابتکاری برای مسایل با اندازه کوچک، متوسط و بزرگ به ترتیب برابر دو، پنج و ده دقیقه می‌باشد. با توجه به نتایج مسایل با ابعاد کوچک (جدول ۷)، الگوریتم GRASP(II) عملکرد بهتری از نظر میانگین و واریانس درصد انحراف از جواب بهینه، نسبت به دو الگوریتم فراابتکاری دیگر داشته است. در این الگوریتم، با کاهش مقادیر پارامترهای الگوریتم از مقدار یک به سمت صفر، جستجوی تصادفی به سمت جستجوی حریصانه متمایل می‌شود و بنابراین، در صورت محدود بودن فضای جواب، جستجوی مناسبی در فضای جواب صورت می‌گیرد. الگوریتم GRASP (II) در ۱۹ مسئله از ۳۰ مسئله تصادفی با ابعاد کوچک، نسبت به سایر الگوریتم‌های ایجادی، دارای کمترین درصد انحراف می‌باشد. همچنین در ۸ مسئله از ۱۱ مسئله باقی‌مانده، الگوریتم GRASP (I) بهترین کران بالا را به‌دست آورده است.

جدول ۷. اندازه نمونه مسایل تصادفی برای آزمایش کارایی الگوریتم‌های فراابتکاری

ابعاد مسئله	n×m	تعداد نمونه مسئله	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5
کوچک	۱۰× ۵	۱۰	۲	۲	۲	۲	۲
	۱۰×۱۰	۱۰					
	۱۰×۱۵	۱۰					
متوسط	۲۰×۱۵	۱۰	۲	٤	٤	۵	۵
	۲۰×۲۰	۱۰					
	۲۰×۲۵	۱۰					
بزرگ	۳۰×۳۰	۱۰	٤	۵	۵	۸	۸
	۳۰×۳۵	۱۰					
	۳۰×٤۰	۱۰					

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۸. نتایج حل نمونه مسایل تصادفی با ابعاد کوچک

شماره مسئله	CPLEX	CPLEX	GRASP (I)		GRASP (II)		RGRASP	
	مقدار بهینه تابع هدف	زمان حل (s)	کران بالا	درصد انحراف	کران بالا	درصد انحراف	کران بالا	درصد انحراف
۱	۲۰۶	۰/۴۱	۲۱۶	٪ ۴/۸۵	۲۰۸	٪ ۰/۹۷	۲۱۱۶	٪ ۴/۸۵
۲	۲۳۰	۰/۷۲	۲۳۲	٪ ۰/۸۷	۲۳۱	٪ ۰/۴۳	۲۳۲	٪ ۰/۸۷
۳	۲۰۱	۰/۰۹	۲۰۱	٪ ۰/۰۰	۲۰۷	٪ ۲/۹۹	۲۰۲	٪ ۰/۵۰
۴	۲۱۲	۰/۳۸	۲۲۲	٪ ۴/۷۲	۲۱۳	٪ ۰/۴۷	۲۱۶	٪ ۱/۸۹
۵	۲۶۹	۰/۴۴	۲۶۹	٪ ۰/۰۰	۲۷۰	٪ ۰/۳۷	۲۶۹	٪ ۰/۰۰
۶	۲۱۰	۰/۰۹	۲۴۳	٪ ۱۵/۷۱	۲۱۰	٪ ۰/۰۰	۲۱۲	٪ ۰/۹۵
۷	۲۱۸	۰/۱۱	۲۳۱	٪ ۵/۹۶	۲۱۸	٪ ۰/۰۰	۲۳۱	٪ ۵/۹۶
۸	۲۰۵	۰/۳۹	۲۰۷	٪ ۰/۹۸	۲۰۸	٪ ۱/۴۶	۲۰۷	٪ ۰/۹۸
۹	۲۴۸	۰/۳۹	۲۴۸	٪ ۰/۰۰	۲۴۹	٪ ۰/۴۰	۲۴۸	٪ ۰/۰۰
۱۰	۲۲۶	۰/۱۴	۲۴۳	٪ ۷/۵۲	۲۲۸	٪ ۰/۸۸	۲۳۰	٪ ۱/۷۷
۱۱	۳۱۹	۱/۳۴	۳۲۰	٪ ۰/۳۱	۳۲۱	٪ ۰/۶۳	۳۲۰	٪ ۰/۳۱
۱۲	۲۹۹	۲/۱۴	۳۰۵	٪ ۲/۰۱	۳۰۰	٪ ۰/۳۳	۳۰۵	٪ ۲/۰۱
۱۳	۳۷۸	۰/۳۶	۳۸۶	٪ ۱/۱۲	۳۸۲	٪ ۱/۰۶	۳۸۶	٪ ۲/۱۲
۱۴	۳۰۳	۱/۲۵	۳۱۷	٪ ۴/۶۲	۳۰۹	٪ ۱/۹۸	۳۰۹	٪ ۱/۹۸
۱۵	۳۴۰	۰/۱۹	۳۴۰	٪ ۰/۰۰	۳۴۲	٪ ۰/۵۹	۳۴۰	٪ ۰/۰۰
۱۶	۳۱۷	۰/۲۳	۳۱۸	٪ ۰/۳۲	۳۲۴	٪ ۲/۲۱	۳۱۸	٪ ۰/۳۲
۱۷	۳۶۵	۱/۱۲	۳۷۰	٪ ۱/۳۷	۳۶۸	٪ ۰/۸۲	۳۷۰	٪ ۱/۳۷
۱۸	۳۳۵	۰/۶۷	۳۶۲	٪ ۸/۰۶	۳۳۷	٪ ۰/۶۰	۳۴۶	٪ ۳/۲۸
۱۹	۳۱۳	۰/۲۸	۳۲۲	٪ ۲/۸۸	۳۱۷	٪ ۱/۲۸	۳۲۲	٪ ۲/۸۸
۲۰	۳۰۹	۰/۹۸	۳۱۷	٪ ۲/۵۹	۳۱۳	٪ ۱/۲۹	۳۱۷	٪ ۲/۵۹
۲۱	۴۳۵	۱/۷۵	۴۴۲	٪ ۱/۶۱	۴۳۷	٪ ۰/۴۶	۴۴۲	٪ ۱/۶۱
۲۲	۴۳۶	۰/۳۷	۴۵۵	٪ ۴/۳۶	۴۴۵	٪ ۲/۰۶	۴۵۱	٪ ۳/۴۴
۲۳	۴۳۱	۱/۷۲	۴۴۳	٪ ۲/۷۸	۴۳۵	٪ ۰/۹۳	۴۳۵	٪ ۰/۹۳
۲۴	۴۲۷	۱/۳۴	۴۴۶	٪ ۴/۴۵	۴۲۹	٪ ۰/۴۷	۴۳۴	٪ ۱/۶۴
۲۵	۴۰۷	۰/۳۷	۴۲۸	٪ ۵/۱۶	۴۱۳	٪ ۱/۴۷	۴۲۸	٪ ۵/۱۶
۲۶	۴۴۹	۱/۷۲	۴۵۴	٪ ۱/۱۱	۴۵۹	٪ ۲/۲۳	۴۵۴	٪ ۱/۱۱
۲۷	۴۲۷	۱/۲۶	۴۵۵	٪ ۶/۵۶	۴۳۴	٪ ۱/۶۴	۴۵۵	٪ ۶/۵۶
۲۸	۴۶۵	۰/۳۸	۴۹۱	٪ ۵/۵۹	۴۶۸	٪ ۰/۶۵	۴۷۴	٪ ۱/۹۴
۲۹	۴۴۸	۱/۶۲	۴۵۵	٪ ۱/۵۶	۴۵۳	٪ ۱/۱۲	۴۵۷	٪ ۲/۰۱
۳۰	۴۴۲	۲/۰۴	۴۵۲	٪ ۲/۲۶	۴۴۷	٪ ۱/۱۳	۴۵۲	٪ ۲/۲۶
میانگین		۰/۸۱		٪ ۳/۳۴		٪ ۱/۰۳		٪ ۲/۰۴
انحراف استاندارد		۰/۶۵		٪ ۳/۳۳		٪ ۰/۷۲		٪ ۱/۷۲

www.SID.ir

جدول ۹. نتایج حل نمونه مسایل تصادفی با ابعاد متوسط

شماره مسئله	CPLEX	CPLEX	GRASP (I)		GRASP (II)		RGRASP	
	مقدار بهینه تابع هدف	زمان حل (s)	کران بالا	درصد انحراف	کران بالا	درصد انحراف	کران بالا	درصد انحراف
۱	٦٢٦	١٦/٨٩	٦٨٧	٪ ٩/٧٤	٦٥٤	٪ ٤/٤٧	٦٥٩	٪ ٥/٢٧
۲	٦٠٧	٣٥٤/٥٤	٦٣٣	٪ ٤/٢٨	٦٣١	٪ ٣/٩٥	٦٣٣	٪ ٤/٢٨
۳	٥٢٩	٢/٣٩	٥٤٤	٪ ٢/٨٤	٥٦٥	٪ ٦/٨١	٥٤٤	٪ ٢/٨٤
٤	٥٨٢	٩٧/٤٤	٦٢٢	٪ ٦/٨٧	٦١٠	٪ ٤/٨١	٦٢٤	٪ ٧/٢٢
٥	٦٠٧	١٤٩/٢٥	٦١٨	٪ ١/٨١	٦٣١	٪ ٣/٩٥	٦١٨	٪ ١/٨١
٦	٥٣٠	٥/١٠	٥٦٨	٪ ٧/١٧	٥٥٩	٪ ٥/٤٧	٥٦٥	٪ ٦/٦٠
۷	٦٣٦	٦٩/٢٢	٦٧٦	٪ ٦/٢٩	٦٧٤	٪ ٥/٩٧	٦٧٦	٪ ٦/٢٩
۸	٦٤٩	٨/٢٨	٦٨٢	٪ ٥/٠٨	٦٦٨	٪ ٢/٩٣	٦٨٧	٪ ٥/٨٦
۹	٦٠٠	١٩/١٤	٦١٢	٪ ٢/٠٠	٦٢٧	٪ ٤/٥٠	٦١٣	٪ ٢/١٧
۱۰	٦٦٢	٧/١٤	٦٧٠	٪ ١/٢١	٦٨٤	٪ ٣/٣٢	٦٧٠	٪ ١/٢١
۱۱	٧٨٢	٨٤٥/٤٥	٨٠٤	٪ ٢/٨١	٨٠٥	٪ ٢/٩٤	٨٠٤	٪ ٢/٨١
۱۲	٧٤٠	١٧٥/٧٨	٧٥٩	٪ ٢/٥٧	٧٥٤	٪ ١/٨٩	٧٥٩	٪ ٢/٥٧
۱۳	٧٨٣	٥١٣/٣٥	٨٠١	٪ ٢/٣٠	٨٠٤	٪ ٢/٦٨	٨٠١	٪ ٢/٣٠
۱٤	٧١٨	١٩٣/٠٧	٧٢٧	٪ ١/٢٥	٧٣٠	٪ ١/٦٧	٧٢٧	٪ ١/٢٥
۱٥	٧١٨	١٥٦/٣٨	٧٥٥	٪ ٥/١٥	٧٤٩	٪ ٤/٣٢	٧٥٥	٪ ٥/١٥
۱٦	٧٤٩	٣٥٢/٦٣	٧٥٩	٪ ١/٣٤	٧٧٣	٪ ٣/٢٠	٧٥٩	٪ ١/٣٤
۱۷	٧٥٣	٤٢/٧٨	٧٧٥	٪ ٢/٩٢	٧٦٩	٪ ٢/١٢	٧٧٥	٪ ٢/٩٢
۱۸	٦٨٦	٤٢٧/٤٩	٧١٨	٪ ٤/٦٦	٧١٥	٪ ٤/٢٣	٧١٦	٪ ٤/٣٧
۱۹	٧٦٣	٩٤/٩١	٧٦٥	٪ ٠/٢٦	٧٨٢	٪ ٢/٤٩	٧٦٧	٪ ٠/٥٢
۲۰	٧١٩	٥٨٧/٨٩	٧٢٩	٪ ١/٣٩	٧٣٥	٪ ٢/٢٣	٧٢٩	٪ ١/٣٩
۲۱	٧٨٦	٣١٠/٠٧	٧٨٦	٪ ٠/٠٠	٨١٧	٪ ٣/٩٤	٧٨٦	٪ ٠/٠٠
۲۲	٨٦٧	٢٥٥/٨٧	٨٨٦	٪ ٢/١٩	٨٩٠	٪ ٢/٦٥	٨٨٦	٪ ٢/١٩
۲۳	٨٦٥	٥٣١/١٤	٩٢٠	٪ ٦/٣٦	٨٨٥	٪ ٢/٣١	٩٢٠	٪ ٦/٣٦
۲٤	٨٤٨	١٥٧/٥٨	٩١٩	٪ ٨/٣٧	٨٦٧	٪ ٣/٣٠	٨٨٣	٪ ٤/١٣
۲٥	٨٣٧	٣٥١/٩٥	٨٦٣	٪ ٣/١١	٨٦٤	٪ ٣/٢٣	٨٦٣	٪ ٣/١١
۲٦	٩١٧	٤٩٣٠/٠٦	٩٤٤	٪ ٢/٩٤	٩٤٠	٪ ٢/٥١	٩٤٤	٪ ٢/٩٤
۲۷	٨٥٩	٥٢١/٦٨	٩٢٩	٪ ٨/١٥	٨٨٥	٪ ٣/٠٣	٨٨٨	٪ ٣/٣٨
۲۸	٨٣٥	٥٦٥/١١	٨٤٦	٪ ١/٣٢	٨٥٦	٪ ٢/٥١	٨٤٩	٪ ١/٦٨
۲۹	٨٥٥	٥٦٠/٨٧	٨٨٧	٪ ٣/٧٤	٨٨٥	٪ ٣/٥١	٨٨٥	٪ ٣/٥١
۳۰	٨٦٥	٦١٧/٣٥	٩٢٣	٪ ٦/٧١	٨٩٥	٪ ٣/٤٧	٩٠٠	٪ ٤/٠٥
میانگین		٤٣٠/٦٩		٪ ٣/٨٣		٪ ٣/٤٨		٪ ٣/٣٢
انحراف استاندارد		٨٨١/١٨		٪ ٢/٦١		٪ ١/٢١		٪ ١/٩١

www.SID.ir

جدول ۱۰. نتایج حل نمونه مسایل تصادفی با ابعاد بزرگ

شماره مسئله	CPLEX	CPLEX	GRASP (I)		GRASP (II)		RGRASP	
	کران بالا	کران پایین	درصد انحراف	کران بالا	درصد انحراف	کران بالا	درصد انحراف	کران بالا
۱	۱۱٤۰	۱۱۲۵	٪ ۳/۷۳	۱۱٦۷	٪ ٤/۸۹	۱۱۸۰	٪ ۳/٤۷	۱۱٦٤
۲	۱۰۸۰	۱۰٦٤	٪ ۲/۹۱	۱۰۹۵	٪ ۵/٦٤	۱۱۲٤	٪ ۲/۸۲	۱۰۹٤
۳	۱۱۸٦	۱۱٤۲	٪ ۵/٦۰	۱۲۰٦	٪ ۷/۸۸	۱۲۳۲	٪ ٦/۰٤	۱۲۱۱
٤	۱۰۸۱	۱۰٦٤	٪ ۱۲/۳۱	۱۱۹۵	٪ ۹/٤۰	۱۱٦٤	٪ ۱۲/۱۲	۱۱۹۳
۵	۱۱٦۷	۱۱۵۸	٪ ۲/٤۲	۱۱۸٦	٪ ۳/۷۱	۱۲۰۱	٪ ۲/۵۹	۱۱۸۸
٦	۱۲۰۲	۱۱۷٤	٪ ۲/۹۸	۱۲۰۹	٪ ۵/۲۸	۱۲۳٦	٪ ۲/۹۸	۱۲۰۹
۷	۱۱٦۸	۱۱۵٦	٪ ۲/۸۵	۱۱۸۹	٪ ٤/۳۳	۱۲۰٦	٪ ۲/۹٤	۱۱۹۰
۸	۱۰۸۸	۱۰۵٤	٪ ٤/۹۳	۱۱۰٦	٪ ۸/۰٦	۱۱۳۹	٪ ٤/۹۳	۱۱۰٦
۹	۱۱۵۲	۱۱۳۹	٪ ٤/۹۲	۱۱۹۵	٪ ۵/۷۱	۱۲۰٤	٪ ۵/۱۸	۱۱۹۸
۱۰	۱۱۹۵	۱۱۸۳	٪ ٤/۹۹	۱۲٤۲	٪ ٤/۵٦	۱۲۳۷	٪ ۳/۸۹	۱۲۲۹
۱۱	۱۲۵۷	۱۲۳٦	٪ ۳/۳۲	۱۲۷۷	٪ ۵/۵۸	۱۳۰۵	٪ ۲/۸۳	۱۲۷۱
۱۲	۱۲۲٤	۱۲۰۸	٪ ٤/۳۰	۱۲٦۰	٪ ۵/۲۲	۱۲۷۱	٪ ٤/۱٤	۱۲۵۸
۱۳	۱۱٦۰	۱۱۲۸	٪ ٤/۵۲	۱۱۷۹	٪ ۸/٦۰	۱۲۲۵	٪ ۵/۰۵	۱۱۸۵
۱٤	۱۱۸۹	۱۱۷۱	٪ ٤/۸۷	۱۲۲۸	٪ ۷/۰۹	۱۲۵٤	٪ ٤/۵۳	۱۲۲٤
۱۵	۱۲۲٦	۱۱۹٤	٪ ٤/۰۲	۱۲٤۲	٪ ۵/۲۸	۱۲۵۷	٪ ٤/۰۲	۱۲٤۲
۱٦	۱۱۸۲	۱۱٦٤	٪ ۳/۷۸	۱۲۰۸	٪ ۷/۱۳	۱۲٤۷	٪ ٤/۰٤	۱۲۱۱
۱۷	۱۱۸۳	۱۱٦٤	٪ ۳/٤٤	۱۲۰٤	٪ ٦/۳٦	۱۲۳۸	٪ ۳/٤٤	۱۲۰٤
۱۸	۱۲۲۱	۱۲۰۳	٪ ۷/۰۷	۱۲۸۸	٪ ۷/۱۵	۱۲۸۹	٪ ۷/۰۷	۱۲۸۸
۱۹	۱۲۷۹	۱۲۳۵	٪ ۷/۲۹	۱۳۲۵	٪ ۸/۵۰	۱۳٤۰	٪ ۷/۲۹	۱۳۲۵
۲۰	۱۲۷٤	۱۲٤۰	٪ ۳/۹۵	۱۲۸۹	٪ ۵/۵٦	۱۳۰۹	٪ ۳/۹۵	۱۲۸۹
۲۱	۱۳۲۷	۱۳۰٤	٪ ٤/۹۱	۱۳٦۸	٪ ۵/۰٦	۱۳۷۰	٪ ٤/۹۸	۱۳٦۹
۲۲	۱۳۸٦	۱۳۵٦	٪ ٤/۲۸	۱٤۱٤	٪ ۵/٦۰	۱٤۳۲	٪ ٤/۷۲	۱٤۲۰
۲۳	۱۳۵٦	۱۳۲۱	٪ ۳/٦۳	۱۳٦۸	٪ ٦/٤۳	۱٤۰٦	٪ ۳/۷۹	۱۳۷۱
۲٤	۱۳٤۷	۱۳۰۵	٪ ٤/٦۰	۱۳٦۵	٪ ۸/۳۵	۱٤۱٤	٪ ٤/۷۵	۱۳٦۷
۲۵	۱۳۱۳	۱۲۸۰	٪ ۵/۰۰	۱۳٤٤	٪ ۷/۷۳	۱۳۷۹	٪ ٤/٦۱	۱۳۳۹
۲٦	۱۳٤۱	۱۳۲۰	٪ ٦/۷٤	۱٤۰۹	٪ ۵/٤۵	۱۳۸۲	٪ ٦/٦۷	۱٤۰۸
۲۷	۱۳۷۳	۱۳٤٤	٪ ٤/۹۱	۱٤۱۰	٪ ۵/۲۱	۱٤۱٤	٪ ٤/۹۹	۱٤۱۱
۲۸	۱۳٦۵	۱۳۲٦	٪ ٤/۵۲	۱۳۸٦	٪ ۵/۸۸	۱٤۰٤	٪ ٤/۳۷	۱۳۸٤
۲۹	۱۲۵٤	۱۲۱۲	٪ ۹/٦۵	۱۳۲۹	٪ ٦/٦۰	۱۲۹۲	٪ ۹/۸۲	۱۳۳۱
۳۰	۱۳۵۰	۱۳۳۱	٪ ۳/۲۳	۱۳۷٤	٪ ٦/۰۱	۱٤۱۱	٪ ۳/۲۳	۱۳۷٤
میانگین			٪ ٤/۸٦		٪ ٦/۲۸		٪ ٤/۸٤	
انحراف استاندارد			٪ ۲/۰۷		٪ ۱/٤۲		٪ ۲/۰۸	

با توجه به نتایج مسایل با ابعاد متوسط (جدول ۹)، الگوریتم RGRASP عملکرد بهتری از نظر میانگین درصد انحراف، نسبت به دو الگوریتم فراابتکاری دیگر داشته است. الگوریتم GRASP (II) در ۱٦ مسئله از ۳۰ مسئله تصادفی با ابعاد متوسط، نسبت به سایر الگوریتم‌های ایجادی، دارای کمترین درصد انحراف می‌باشد. همچنین در ۱٤ مسئله باقی‌مانده نیز

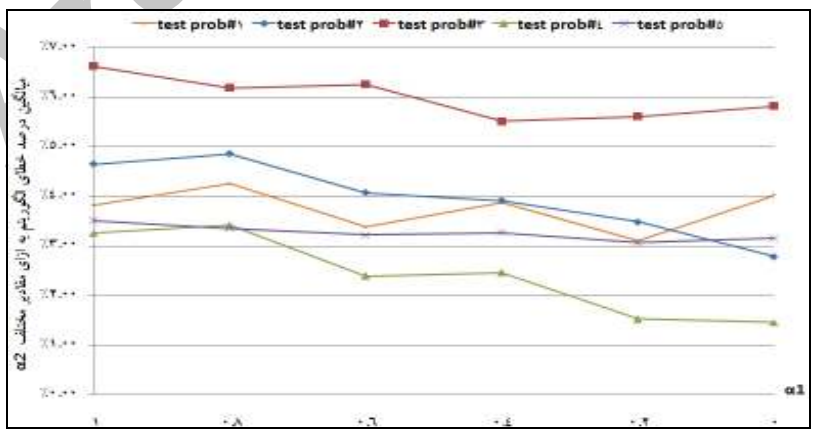
www.SID.ir

الگوریتم GRASP (I) بهترین کران بالا را به‌دست آورده است. بنابراین، در مجموع، الگوریتم‌های GRASP (I) و GRASP (II) مکمل‌های خوبی برای حل مسایل با ابعاد کوچک و متوسط هستند. نتایج حل بهینه نرم‌افزار CPLEX و برتری آن بر الگوریتم‌های فراابتکاری از نظر زمان حل و دقت جواب‌ها، نشان می‌دهد که در مسایل با ابعاد کوچک و متوسط نیازی به به‌کارگیری الگوریتم‌های فراابتکاری نمی‌باشد.

برای مسایل با ابعاد بزرگ، نرم‌افزار CPLEX قادر به یافتن جواب بهینه در زمان معقول نمی‌باشد و تنها کران بالا و پایین تابع هدف مسئله بعد از گذشت حدود ۲٤ ساعت برای هر مسئله به‌دست آمده است. این کران پایین برای مقدار تابع هدف جواب بهینه، توسط روش‌های شاخه و حد[۲۸] و شاخه و برش[۲۹] در نرم‌افزار CPLEX به‌دست آمده است. با توجه به نتایج مسایل با ابعاد بزرگ (جدول ۱۰)، الگوریتم RGRASP عملکرد بهتری از نظر میانگین درصد انحراف، نسبت به دو الگوریتم فراابتکاری دیگر داشته است. الگوریتم GRASP (II) در ۱۹ مسئله از ۳۰ مسئله تصادفی با ابعاد بزرگ، نسبت به سایر الگوریتم‌های ایجادی، دارای کمترین درصد انحراف می‌باشد. از جمله نقاط ضعف روش GRASP (II) در تولید نکردن جواب به ازای ترکیبات مختلف پارامترهای α_1 و α_2 است. به‌عبارتی با توجه به این‌که مقادیر α_1 و α_2 همزمان از مقدار یک به سمت صفر کاهش می‌یابند، بنابراین، جستجو به ازای مقادیر بزرگ α_1 و مقادیر کوچک α_2 (و بالعکس) انجام نمی‌شود. همچنین کاهش تدریجی پارامترهای α_1 و α_2 بهتر است بر اساس کیفیت جواب‌های قبلی به‌دست آمده از انتخاب مقادیر این پارامترها کنترل شود.

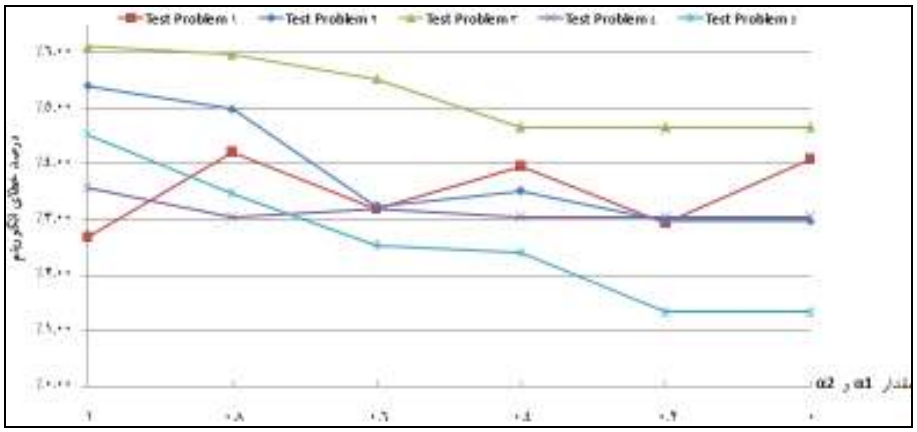
۱۰- تحلیل حساسیت

در این بخش، حساسیت کیفیت جواب‌ها به انتخاب پارامترهای α_1 و α_2 بررسی می‌شود. تغییرات درصد خطای الگوریتم GRASP به ازای مقادیر مختلف پارامتر α_1 در ۵ نمونه مسئله تصادفی با ابعاد n=m=20 در شکل ۳ رسم شده است. در این نمودار به ازای مقادیر مختلف $\alpha_1 \in \{0,0.2,0.4,\ldots1\}$، میانگین درصد خطای الگوریتم به ازای مقادیر پارامتر $\alpha_2 \in \{0,0.2,0.4,\ldots1\}$ به‌دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که نخست با کاهش مقادیر α_1 میانگین درصد خطای الگوریتم کاهش یافته و همچنین انتخاب α_1=۰/۲ میانگین خطای کمتری را در مقایسه با سایر مقادیر α_1 حاصل می‌کند. این موضوع قابل پیش بینی بود چراکه با کاهش مقدار α_1 جستجوی تصادفی به سمت جستجوی حریصانه متمایل می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که انتخاب تصادفی مقدار α_1 در بازه [0,0.4] برای الگوریتم GRASP I منجر به جواب‌های بهتری خواهد شد. برای ارزیابی عملکرد الگوریتم GRASP (II) به ازای مقادیر مختلف $\alpha_2 = \alpha_1$ از ۵ مسئله تصادفی که از بین ۱۰ نمونه مسئله با ابعاد n=m=۲۰ انتخاب شده‌اند، استفاده می‌شود. به‌ازای هر یک از مقادیر $\alpha_2=\alpha_1$، ۱۰ تکرار از الگوریتم GRASP انجام شده و درصد انحراف بهترین جواب به‌دست آمده از مقدار بهینه تابع هدف مسئله در نمونه مسایل مختلف در شکل ۵ رسم شده است. در این آزمایش که مقادیر پارامترهای α_1 و α_2 به‌صورت هماهنگ با فواصل ۰/۲ از مقدار ۱ به سمت صفر کاهش می‌یابند، به‌ازای $\alpha_1=\alpha_2$=۰/۲ کمترین میانگین خطا مشاهده شده است. همچنین به ازای $\alpha_1=\alpha_2$=۰/٤ کمترین واریانس درصد انحراف الگوریتم نسبت به جواب بهینه حاصل شده است.



شکل ۳. تغییرات درصد خطای الگوریتم GRASP به ازای مقادیر مختلف پارامتر α_1

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ٤. تغییرات خطای الگوریتم GRASP II به ازای مقادیر مختلف پارامترهای α_1 و α_2

۱۱- نتیجه‌گیری

در این تحقیق دو عامل مؤثر بر حداکثر ظرفیت خطوط دو خطه ریلی، شامل توالی اعزام قطارها از ایستگاه مبدأ و همچنین برنامه توقف قطارها مورد بررسی قرار گرفت. مدل توالی اعزام قطارها در قالب یک مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی منعطف تعریف شد و به همراه فرضیات مربوط به راه آهن ایران، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح ارایه شد. برای یافتن جواب‌های نزدیک به بهینه از الگوریتم فراابتکاری جستجوی تصادفی تطابقیِ حریصانه برای تعیین توالی اعزام و برنامه توقف قطارها در بازه‌های افق شرعی، جهت حداقل کردن طول افق زمان‌بندی استفاده شد. در این تحقیق، علاوه بر ارایه الگویی برای تولید نمونه مسایل تصادفی (مطابق شرایط راه آهن ایران)، کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی برای این مسئله بررسی شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، در نمونه مسایل تصادفی با ابعاد کوچک و متوسط، نرم‌افزار CPLEX قادر به یافتن جواب بهینه در زمان پذیرفتنی است. اما در مسایل با ابعاد بزرگ، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری ارایه شده، خصوصاً الگوریتم RGRASP پیشنهاد می‌شود. در نتیجه الگوریتم‌های فراابتکاری تنها در مسایل با ابعاد بزرگ کارایی داشته‌اند و در مسایل با ابعاد کوچک و متوسط، نرم‌افزار CPLEX بر روش‌های فراابتکاری برتری دارد. این موضوع با توجه به افزایش درجه پیچیدگی محاسباتی مسایل با ابعاد $n>۲۰$ کاملاً پیش‌بینی می‌شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، الگوریتم RGRASP در مسایل با ابعاد بزرگ کارا بوده و قادر است در زمانی پذیرفتی، جواب‌های نزدیک به بهینه تولید کند.

دستاوردهای و نوآوری این تحقیق در مدل‌سازی مسئله با جزئیات مورد نیاز و ارایه روش فراابتکاری کارا برای حل مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها است. در این تحقیق همچنین، تأثیر توالی اعزام و برنامه توقف قطارها روی بهره‌برداری بهینه از ظرفیت خطوط ریلی موجود مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مدل‌سازی مسئله نیز از مدل زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر استفاده شده است که تاکنون این رویکرد به‌طور مستقیم برای مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها مورد استفاده قرار نگرفته است. با توجه به دشواری‌های تولید جواب موجه نیز، یک الگوریتم ایجادی جدید بر پایه روش جستجوی تصادفی تطابقی حریصانه برای حل مسئله توسعه داده شده است. روش فراابتکاری ارایه شده برای حل مسئله نیز دارای ساختار منعطفی در تولید برنامه زمان‌بندی است. به‌طوری‌که می‌توان با توسعه شیوه نمایش جواب در آن، مواردی نظیر فاصله بین اعزام قطارهای متوالی و نحوه تخصیص قطارها به خطوط ایستگاه‌ها در حالت وجود محدودیت سکو، در آن لحاظ شود. همچنین به‌کارگیری شاخص‌های استواری و قابلیت اطمینان نیز در مدل ارایه شده مسیر می‌باشد. این شاخص‌ها بیان می‌کنند که چه درصدی از ظرفیت شبکه باید با اضافه کردن زمان‌های بافر بین اعزام قطارهای متوالی از ایستگاه‌ها، جهت افزایش میزان استواری برنامه زمان‌بندی هزینه شود. به‌طور کلی افزایش میزان استواری یک برنامه زمان‌بندی نسبت به تغییرات تصادفی، با کاهش میزان بهره‌برداری از ظرفیت همراه است و در این حالت نیازمند مدلی هستیم که بتواند نقطه تعادلی بین میزان بهره‌برداری از ظرفیت شبکه و میزان استواری برنامه زمان‌بندی، ایجاد کند. مدل

Archive of SID
www.SID.ir

برنامه‌ریزی عدد صحیح مسئله توالی اعزام قطارها که در این تحقیق ارایه شده است، قابل تعمیم و توسعه به حالت شبکه ریلی است و از آن می‌توان در تعیین حداکثر ظرفیت تئوری و عملی در یک شبکه ریلی استفاده کرد. همچنین در نظر گرفتن تابع هدف مجموع زمان‌های توقف غیربرنامه‌ای قطارها می‌تواند مبنایی برای سنجش سطح خدمت ارایه شده به مسافران در تهیه یک برنامه زمان‌بندی عملیاتی مد نظر قرار بگیرد. از زمینه‌های تحقیقاتی آتی می‌توان به بررسی رویکردهای مختلف برای مدل‌سازی ریاضی مسایل زمان‌بندی حرکت قطارها و مقایسه آنها از دیدگاه سهولت مدل‌سازی، امکان توسعه فرضیات، پیچیدگی‌های محاسباتی حل و ... اشاره کرد. مدل‌سازی یکپارچه قطارهای رفت و برگشت در مسیرهای دوخطه در مدل برنامه‌ریزی ریاضی با در نظر گرفتن فرضیاتی کامل‌تر از آنچه در این تحقیق در نظر گرفته شده است، از دیگر زمینه‌های تحقیقاتی آتی می‌باشد. این فرضیات می‌تواند شامل حداقل فواصل زمانی اعزام قطارها، بازه زمانی مجاز اعزام هر قطار از مبدأ، محدودیت سکو در ایستگاه‌ها، مسیرهای متفاوت برای هر قطار، محدودیت حداقل توقف قطارها در مقصد، امکان سبقت قطارها، در نظر گرفتن زمان‌های مسدودی بلاک‌ها و محدودیت حداکثر زمان سفر هر قطار باشد. در حال حاضر، تهیه برنامه زمان‌بندی حرکت قطارها به‌شکل ماهانه–فصلی انجام می‌شود. اما با توجه به این‌که تغییرات افق شرعی در طول زمان محسوس می‌باشد، بنابراین، معمولاً یک بازه مشترک در طول یک ماه برای بازه‌های افق شرعی در نظر گرفته می‌شود. عیب عمده این روش در کوتاه شده بازه‌های مجاز توقف قطارها برای اقامه نماز و حذف بخشی از فضای جواب مسئله است. از طرفی در برنامه‌ریزی روزانه و عملیاتی، کنترل توقف قطارها در بازه‌های افق شرعی با توجه به اطلاعات همان روز انجام می‌شود و ممکن است برنامه اولیه توقف قطارها برای اقامه نماز تغییر کند. برای استفاده از مدل ارایه شده باید برای هر روز از اطلاعات اوقات شرعی همان روز و یا از بازه مشترک در طول یک ماه به عنوان ورودی مسئله استفاده شود. باید توجه کرد که ارایه برنامه روزانه حرکت قطارها در عمل با دشواری و هزینه زیادی روبه‌رو است. از این رو در مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها با فرض تغییرات اوقات شرعی در طی زمان، هنوز تحقیقی انجام نگرفته است و می‌توان در تحقیقات آتی به آن پرداخت.

۱۲- پی‌نوشت‌ها

1. Time-Space Network Representation
2. Multi-Mode Resource Constrained Project Scheduling Problem
3. Shop Scheduling
4. Makespan
5. Hybrid Job Shop
6. Flexible Flow Shop
7. Single Machine
8. Shifting Bottleneck Procedure
9. Tabu Search
10. Simulated Annealing
11. Job Shop
12. Best Insertion Heuristic
13. Branch and Bound
14. Simulated Annealing
15. First Available Machine Rule
16. Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
17. Random Multi Start Local Search
18. Semi-Greedy Heuristics
19. Greedy Algorithms
20. Partial Solution
21. Restricted Candidate List
22. Cardinality Based
23. Value Based
24. Profile Fitting
25. Reactive GRASP
26. Diversification
27. Intensification
28. Branch and Bound
29. Branch and Cut

۱۳- مراجع

- یقینی، م. و محمدزاده، ع. (۱۳۹۰) "یک مدل زمان‌بندی حرکت قطارها با درنظر گرفتن زمان‌های توقف جهت نماز"، نشریه تخصصی مهندسی صنایع دانشگاه تهران ، دوره ٤٥ شماره ۱ صفحه ۱۰۳ تا ۱۱٦– فروردین ۹۰.

- Aiex, R. M., Binato, S. and Resende, M. G. C. (2003) "Parallel GRASP with path-re linking for job shop scheduling", Parallel Computing, Vol. 29, pp. 393–430.

- Burdett, R. L. and Kozan, E. (2010) "A disjunctive graph model and framework for constructing new train schedules", European Journal of Operation Research, Vol. 200, No. 1, pp. 85-98.

- Burdett, R. L. and Kozan, E., (2009) "Techniques for inserting additional trains into existing

Archive of SID
www.SID.ir

- Pena, M., Ramos, A., Fernandez, A. and Cucala, A. P. (2010) "Train timetabling problem for complex railway system", Institute for research in Technology, Comillas Pontifical University.
- Prais, M. and Ribeiro, C. C. (2000) "Reactive GRASP: An Application to Matrix Decomposition. Problem in TDMA Traffic Assignment", Informs Journal On Computing, Vol. 12, pp. 164-176.
- Pinedo, M. (2008) "Scheduling, Theory, Algorithms, and Systems", 3th. Eidtion, Prentice Hall.
- Rajendran, C. and Chaudhuri, D. (1992b) "Scheduling in n-job, mstage flowshop with parallel processors to minimize makespan", International Journal of Production Economics, Vol. 27, pp. 137–143.
- Rios-Mercado, R. Z. and Bard, J. F., (1997) "An enhanced TSP-based heuristic for makespan minimization in a flow shop with setup costs", Technical report, Department of Industrial Engineering, Texas A&M University, College Station, TX 77843-3131 USA.
- Şahin, G., Ahuja, R. K. and Cunha, C. B. (2008) "Integer Programming Based Solution Approaches for the Train Dispatching Problem", Journal of Industrial Management and Optimization.
- Sawik, T. (2000) "Mixed integer programming for scheduling flexible flow lines with limited intermediate buffers", Mathematical and Computer Modeling, Vol. 31, pp. 39-52.
- Talbi, E. (2009) "Meta-heuristics: from design to implementation", John Wiley and Sons.
- Zhou, X. and Zhong, M. (2005) "Bi-criteria train scheduling for high-speed passenger railroad planning applications", European Journal of Operation Research, Vol. 167, pp. 752–771.
- Zhou, X. and Zhong, M. (2007) "Single-track train timetabling with guaranteed optimality: Branch-and-bound algorithms with enhanced lower bounds", Transportation Research Part B, Vol. 41, pp. 320–341.

timetables", Transportation Research, Part B, Vol. 43, pp. 821-836.

- Burdett, R. L. and Kozan, E. (2009) "Techniques for restricting multiple overtaking conflicts and performing compound moves when constructing new train schedules", Mathematical Computer Modeling, Vol. 50, pp. 314–328.
- Burdett, R. L. and Kozan, E., (2010) "A sequencing approach for creating new train timetables", OR Spectrum, Vol. 32, pp. 163–193.
- Caprara, A., Fischetti, M. and Toth, P. (2002) "Modeling and solving the timetabling problem", Operations Research, Vol. 50, No. 5. pp. 851-861.
- Feo, T. A. and Bard, J. F. (1989) "Flight scheduling and maintenance base planning", Management Science, Vol. 35, pp.1415-1432.
- Feo, T. A. and Resende, M. G. C. (1995) "Greedy randomized adaptive search procedures", Journal Of Global Optimization, Vol. 6, pp. 109-133.
- Feo, T. A., Sarathy, K. and McGahan, J. (1996) "A GRASP for single machine scheduling with sequence dependent setup costs and linear delay penalties", Computers and Operations Research, Vol. 23, pp. 881-895.
- Ghoseiri, K., Szidarovszky, F., and Asgharpour, M. J. (2004) "A Multi-objective train scheduling: model and solution", Transportation Science, Part B, Vol. 38, pp. 927-952.
- Laguna, M. and Gonz´alez-Velarde, J. L. (1991) "A search heuristic for just-in-time scheduling in parallel machines", Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 2, pp. 253-260.
- Liu, S. Q., Kozan, E. (2009) "Scheduling trains as a blocking parallel-machine job shop scheduling problem", Computers and Operations Research, Vol. 36, pp. 2840-2852.
- Liu, S. Q., Kozan, E. (2010) "Scheduling Trains with Priorities: A No-Wait Blocking Parallel-Machine Job-Shop Scheduling Model", INFORMS, pp. 1–24.
- McCormick, S. T., Pinedo, M. L., Shenker, S. and B. Wolf (1989) "Sequencing in an assembly line with blocking to minimize cycle time", Operations Research, Vol. 37، pp. 925–936.

Archive of SID

www.SID.ir