

محاسبه بافرهای زمانی با رویکرد فازی جهت جذب اختلالات در یک سیستم راه آهن درون شهری به همراه یک مطالعه موردی

امین جمیلی (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تهران، تهران، ایران

سید فرید قنادپور، دکتری مهندسی صنایع، بخش حمل و نقل ریلی، شرکت گروه مینا، تهران، ایران

سید محمدرضا قرشی نژاد، کارشناس ارشد مهندسی صنایع، شرکت گروه مینا، تهران، ایران

E-mail: a_jamili@ut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۲/۰۲/۰۹ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۶/۲۳

چکیده:

مقاله حاضر در راستای مدیریت اختلالات قطارها در طی بلاکها و توقف در ایستگاه‌ها و دستیابی به قابلیت اطمینان مورد انتظار است. با توجه به اینکه در صورت عدم جذب مناسب اختلالات، این پدیده از یک قطار به قطار دیگر امکان افزایش دارد، بنابراین موضوع جذب آن از اهمیت بسیاری برخوردار است. در حال حاضر، در مطالعات برنامه ریزی بهره برداری خطوط راه آهن درون شهری، مقدار مورد نیاز بافرهای زمانی به صورت غیردقیق و تقریبی برابر ۵ ثانیه به ازای هر کیلومتر در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله، هدف تعریف و محاسبه دقیق بافرهای زمانی با مقدار و مکان تخصیص مناسب است. در این راستا یک مدل ریاضی جدید ارائه و با بکارگیری رویکرد فازی، میزان بافرهای زمانی محاسبه می‌شود. همچنین جهت محاسبه حدود پایین و بالای مجموعه‌های فازی، یک رابطه ریاضی و الگوریتم ابتکاری ارائه می‌شود. در نهایت جهت شفاف شدن عملکرد رویکرد پیشنهادی، چندین مثال تصادفی به همراه یک مطالعه موردی در یکی از خطوط راه آهن درون شهری در ایران بررسی و نتایج ارائه خواهد شد. نتایج نهایی بیانگر این موضوع هستند که بافرهای زمانی مورد نیاز با استفاده از روش پیشنهادی به صورت دقیق تری قابل محاسبه است و نتیجتاً محاسبات مربوط به تعداد قطار مورد نیاز و تعداد خطوط پارکینگ با دقت و اطمینان بالاتری قابل محاسبه خواهند بود.

واژه‌های کلیدی: اختلالات حرکت قطارها، بافرهای زمانی، برنامه بهره برداری، سیستم‌های راه آهن درون شهری، رویکرد فازی

۱. مقدمه

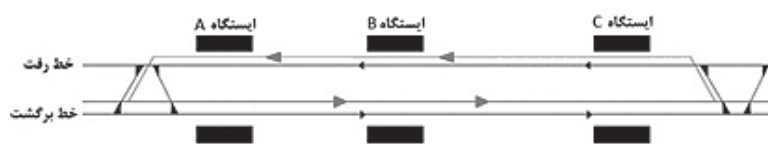
از مراحل تهیه برنامه بهره برداری است که خروجی آن محاسبه تعداد قطارهای مورد نیاز است. با توجه به اینکه حرکت قطارها در شرایط واقعی بهره برداری دچار اختلال خواهد بود، بنابراین صرفاً اکتفا کردن به محاسبه تئوری زمان طی بلاکها کفایت نمی‌کند و زمانهایی را می‌بایست به زمانهای بلاکهای محاسبه شده به صورت تئوریک، اضافه کرد. لازم به ذکر است در حرکت قطارها، در صورت بروز اختلالات و در صورت عدم جذب آنها با استفاده از زمانهای اضافی، نه تنها برنامه حرکت قطارهای در معرض اختلال دچار تغییر و انحراف خواهد شد، بلکه این انحرافات می‌تواند به سایر قطارها نیز گسترش پیدا کند. در این مقاله نحوه محاسبه این زمانهای اضافی با استفاده از رویکرد تئوری فازی مورد بررسی قرار گرفته است. شایان ذکر است افزایش این زمانهای اضافی منجر به افزایش قابلیت اطمینان سیستم خواهد شد، ولی از طرف دیگر برای دستیابی به هدوی مورد نیاز، به تعداد قطار بیشتری نیاز خواهد بود و از طرف دیگر این موضوع منجر به کاهش سرعت تجاری و متعاقباً کاهش رضایتمندی مسافران خواهد شد. بنابراین با توجه به پارامترهای فوق الذکر انتخاب مناسب زمانهای اضافی موضوعی است که می‌بایست با توجه به سایر اثرات جانبی آن به صورت یکپارچه مورد بررسی قرار گیرد. شکل (۲) جزئیات و اهمیت تعیین مقدار مناسب افزایش زمانهای اضافی جهت دستیابی به بالاترین سطح رضایتمندی مسافران را نشان می‌دهد.

۱-۱ بررسی ادبیات موضوع

تحقیقات و مطالعات زیادی در حوزه زمانبندی حرکت قطارها در راه آهن برون شهری در دو دهه اخیر صورت گرفته است. سپهری و پورسید آقایی [Sepehri and Pourseyed Aghaee, 1999] مسئله زمانبندی قطارها در یک مسیر تک خطه و دو خطه را مورد بررسی قرار داده اند. ایشان جهت دستیابی به جواب

در یک سیستم راه آهن درون شهری اعم از سیستمهای متروی سبک و سنگین، مونوریل و تراموا، اختلالات با اندازه های مختلف و دلایل متنوع، رخ می‌دهند. این اختلالات به دو دسته قابل طبقه بندی است. دسته (۱) شامل مواردی است که تأثیر بزرگی بر بهره‌برداری دارد و نتیجتاً به زمان زیادی جهت رفع مشکل نیاز دارد. مثالهایی از این نوع اختلالات شامل خرابی قطارها، خرابی خط و خرابی سیستم سیگنالینگ است. دسته (۲) شامل مواردی است که از نظر اندازه کوچک بوده، در حد چند ثانیه، و نتیجتاً تأثیر جزئی در برنامه زمان بندی ایجاد خواهد کرد. این دسته از اختلالات معمولاً به دفعات در طی یک روز بهره برداری از سیستم رخ می‌دهد و نتیجتاً می‌بایست در مرحله برنامه ریزی مدیریت گردند. مثالهایی از این نوع اختلالات شامل افزایش زمانهای طی بلاکها، افزایش زمان توقف قطارها در ایستگاه ها به علت عدم پیاده و سوار شدن مسافران مطابق الگوی پیش بینی شده و افزایش زمان مانور است. شکل (۱) یک سیستم راه آهن درون شهری ساده شامل سه ایستگاه را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، راه آهن درون شهری مورد مطالعه، به صورت دوخطه مورد بهره برداری قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است در سیستم راه آهن درون شهری بر خلاف اکثر راه آهن های برون شهری، تمامی قطارها دارای مشخصات یکسان هستند.

پروژه های ساخت خطوط راه آهن درون شهری و برون شهری، پس از مرحله امکان سنجی شامل حداقل ۳ مرحله مهندسی، تامین و اجرا هستند. مرحله مهندسی شامل سه زیر مرحله (۱) مهندسی مفهومی، (۲) مهندسی پایه و (۳) مهندسی تفصیلی است. در مرحله مهندسی مفهومی یکی از مدارک فنی، گزارش برنامه بهره برداری است. یکی از خروجیهای گزارش برنامه بهره برداری زمانهای طی بلاک است. این خروجی به عنوان ورودی یکی دیگر



شکل ۱. یک نمونه سیستم راه آهن درون شهری



شکل ۲. اثرات افزایش زمانهای اضافی

که با بکارگیری ۳ روش منجر به کاهش فضای جواب می‌شوند، ارائه کردند. صفار زاده و همکاران [Safarzadeh, et al. 2013] دو موضوع کاربردی نماز و محدودیت ظرفیت ایستگاه‌ها را در راه آهن ایران ارائه کردند. موضوع اختلالات در حرکت قطارها و روشهای کاهش اثرات نامطلوب آنها در راه آهن برون شهری در سالهای اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. خان و ژو [Khan an Zhou, 2010] یک مدل احتمالی دو مرحله ای برای مسئله زمانبندی حرکت قطارها در خطوط دو خطه با افزودن زمانهای اضافی به زمانهای طی بلاکها و زمانهای توقف قطارها در ایستگاه‌ها ارائه کردند. شفیعا و همکاران [Shafia et al. 2012- a]، یک مدل زمانبندی حرکت قطارهای استوار در برابر اختلالات را بر اساس رویکرد برتسیماس و سیم [Bertsimas and Sim] ارائه کردند، آنها همچنین یک پیمانه جدید جهت دستیابی به استواری مورد نیاز و محاسبه بافرهای زمانی ارائه کردند. شفیعا و دیگران [Shafia et al. 2012- b] موضوع استوار و دوره ای بودن حرکت قطارها را با رویکرد فازی برای تابع دوهدفه مورد بررسی قرار داده اند و این موضوع را برای راه آهن ایران مطالعه کردند. لیبچن و همکاران [Liebchen et al. 2010] ساخت برنامه زمانبندی دوره ای مقاوم در برابر تأخیر را ارائه کرد. فیسچتی و موناچی [Fischetti and Monaci, 2009] یک روش ابتکاری جهت مدل کردن عدم قطعیت بر اساس ادغام روش بهینه‌سازی استوار و روش احتمالی دو مرحله ای ساده ارائه کردند. تحقیقات بسیاری در حوزه محاسبه میزان استواری جداول زمانی که عمدتاً از طریق منظور کردن بافرهای زمانی و زمانهای اضافی است، صورت گرفته است. به عنوان مثال، کری [Carey, 1999]

بهینه برای مسائل با مقیاس بزرگ به کمک روش شاخه و حد، روش جهت کاهش مدت زمان لازم برای حل را پیشنهاد کردند. قصبیری و مرشد سلوک [Ghoseiri and Morshed Solouk, 2005] مسئله زمانبندی قطارها را بر اساس مسئله فروشنده دوره گرد^۱ فرموله کرده‌اند، به طوری که هر قطار در مسئله زمانبندی حرکت قطارها معادل یک شهر در مسئله فروشنده دوره گرد، در نظر گرفته شده است. لیبچن [Liebchen, 2004] مفهوم جدیدی با عنوان تقارن^۲ در برنامه زمانبندی دوره ای را ارائه کرده است. به این ترتیب که قطارهای با خلاف جهت به صورت کاملاً متقارن بلاکها را طی می‌کنند و در ایستگاههای مشابه در یک زمان مشخص توقف می‌کنند. لیندندر و زیمرمن [Lindner and Zimmermann, 2005] مسئله زمانبندی دوره‌ای حرکت قطارها را مورد بررسی قرار دادند. هدف، بهینه کردن انواع قطارهای مورد استفاده و همچنین تعداد واگنهای هر یک از قطارها و در عین حال تولید یک زمانبندی دوره‌ای شدنی است. قصبیری و همکاران [Ghoseiri et al. 2004] مسئله زمانبندی قطارها در یک شبکه راه آهن را با دو هدف (۱) کمینه کردن مصرف سوخت و (۲) کمینه کردن تاخیر قطارها مورد بررسی قرار دادند. بوردت و کوزن، [Burdett and Kozan, 2010] جهت حل مسئله زمانبندی حرکت قطارها یک روش جدید هیبرید بر پایه زمانبندی کار کارگاهی ارائه کرده اند. کاجیانی و همکاران، [Cac-chiani et al. 2008] چند الگوریتم ابتکاری و دقیق جهت حل مساله زمانبندی حرکت قطارها با رویکرد آزادسازی برنامه ریزی خطی به همراه یک مدل ریاضی عدد صحیح ارائه کردند. ژو و ژونگ [Zhou and Zhong, 2007] یک الگوریتم شاخه و حد

پیچیدگیهای در نظرگیری تابع توزیع احتمال برای اختلالات، در این مقاله، از رویکرد فازی جهت ایجاد قابلیت اطمینان مناسب، متناسب با اختلالات حرکت قطارها در طی بلاکها، استفاده شده است. نوآوریهای مقاله حاضر به شرح زیر فهرست شده است:

۱- بکارگیری رویکرد فازی و ارائه یک مدل ریاضی جدید جهت ایجاد قابلیت اطمینان مناسب، متناسب با اختلالات حرکت قطارها در طی بلاکها

۲- ارائه روشهای جدید جهت تعیین حدود مجموعه های فازی پیشنهادی

۳- تحلیل حساسیت بین قابلیت اطمینان، کاهش زمان سیر قطارها و قطارهای مورد نیاز جهت دستیابی به هدوی مورد نیاز

۱-۳ ساختار مقاله

ساختار مقاله حاضر به این شرح است که در بخش دوم، رویکرد فازی به همراه مدل ریاضی پیشنهادی جهت دستیابی به قابلیت اطمینان مورد نظر ارائه می شود. همچنین روشهای جدیدی جهت تخمین مقادیر مناسب حدود پایین و بالای اعداد فازی ارائه می شود و اعتبار مدل از طریق حل چندین مثال تصادفی مورد ارزیابی قرار می گیرد. در بخش سوم، یکی از خطوط متروی ایران، به عنوان مطالعه موردی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج ارائه می شود. در نهایت در قسمت آخر، نوآوریهای ارائه شده در مقاله حاضر نتیجه گیری و جمع بندی می شود.

۲. رویکرد فازی جهت دستیابی به قابلیت اطمینان

۲-۱ منطق فازی

تئوری مجموعه های فازی را اولین بار پروفیسور لطفی زاده مطرح کرد. این تئوری در شرایط ابهام و عدم اطمینان کاربرد دارد. این نظریه قادر است بسیاری از مفاهیم و عبارات نادقیق را به زبان ریاضی بیان کند و زمینه را برای استدلال، استنتاج، کنترل و تصمیم گیری در شرایط عدم اطمینان فراهم آورد [Za-deh, 1965]. تحقیقات متنوعی در حوزه عدم قطعیت با رویکرد فازی در مسائل مرتبط با حوزه حمل و نقل نظیر توکلی مقدم و

تعدادی شاخص جهت اندازه گیری پایداری جداول زمانی حرکت قطارها در دو حالت (۱) با در نظرگیری احتمالات و (۲) بدون در نظرگیری احتمالات ارائه کرده است. سالیو و همکاران [Salido et al. 2008] دو شاخص جهت اندازه گیری میزان استواری جداول زمانی ارائه کرده اند. ایشان جهت ارزیابی رویکردهای استواری، تعدادی جداول زمانی واقعی از راه آهن اسپانیا را مورد بررسی و تحلیل قرار داده اند. رومن و همکاران [Vroman et al. 2003] نشان دادند که یک روش موثر جهت افزایش قابلیت اطمینان جداول زمانی، کاهش گسترش تأخیرات تولید شده بین قطارها و ناهمگونی بین قطارها است. هوگمیسترا و تونیز [Hoogheimstra and Teunisse, 1998] و هوفمن و مادسن [Hofman and Madsen, 2005] از روشهای مبتنی بر شبیه سازی جهت محاسبه میزان استواری جداول زمانی استفاده کردند. شفیع و جمیلی [Shafia and Jamili, 2009] دو روش جدید جهت محاسبه میزان استواری جداول زمانی از طریق تعیین میزان تاثیر موقعیت بافرهای زمانی ارائه کردند.

در راه آهن درون شهری، جمیلی و قنادپور [Jamili and Ghan-nadpour, 2013] محاسبه میزان بافرهای زمانی و زمانهای اضافی را برای مسیرهای دوخطه بر اساس رویکرد ارائه شده در مقاله شفیع و همکاران [Shafia et al. 2012-a] مورد بررسی قرار دادند.

۱-۲ نوآوریها

در مطالعات برنامه ریزی بهره برداری خطوط راه آهن درون شهری، مقدار مورد نیاز بافرهای زمانی به صورت کاملاً حدودی برابر ۵ ثانیه به ازای هر کیلومتر در نظر گرفته می شود. در نظر گرفتن تابع توزیع برای اختلالات قطارها نیازمند داده های وسیع در مورد انواع مختلف اختلالات و نیز جدا کردن تأخیرات اولیه از ثانویه است و جمع آوری چنین اطلاعاتی به سادگی امکان پذیر نیست و از طرف دیگر محاسبه جمع اختلالات در شرایط پیروی آنها از تابع توزیع احتمالی از نظر محاسباتی بسیار پیچیده است. با توجه به اهمیت محاسبه دقیق مقادیر بافرهای زمانی مناسب و

استفاده از روش پیشنهادی زیرمن [Zimmermann, 1996] قابل محاسبه خواهند بود. با داشتن توابع عضویت محدودیت‌های فازی فوق‌الذکر، مجموعه فازی "تصمیم" به شرح زیر به دست خواهد آمد.

$$\mu_{\bar{D}}(x) = \min_i \{\mu_i(x)\}, i=1 \text{ and } 2 \quad (1)$$

در صورتی که مدیر تصمیم‌گیرنده به دنبال مجموعه فازی مورد اشاره در معادله (۱) نباشد، یک جواب بهینه قطعی، غیر فازی، به شرح معادله (۲) خواهد بود:

$$\max_x \min_i \{\mu_i(x)\} = \max_x \mu_{\bar{D}}(x), i=1 \text{ and } 2 \quad (2)$$

تابع هدف، دست یافتن به حداکثر تابع عضویت است که به عنوان درجه رضایت محدودیت‌های فازی تفسیر می‌شود. در نهایت با تعریف متغیر جدید λ متناسب با معادله (۲) مدل ریاضی موضوع فوق، به شرح زیر قابل تعریف است.

۲-۲ معرفی مدل ریاضی

نوئاسیونهای مربوط به این مدل به شرح جدول (۱) است. جهت شفاف‌تر شدن موضوع، بافرهای زمانی q_{ij} ، d_{ij} و هدوی، H ، در یک نمونه از گراف حرکت قطارها در شکل (۴) نشان داده شده است. تأخیر یک قطار مشخص در هر نقطه از مسیر به سه دلیل عمده زیر به وجود می‌آید:

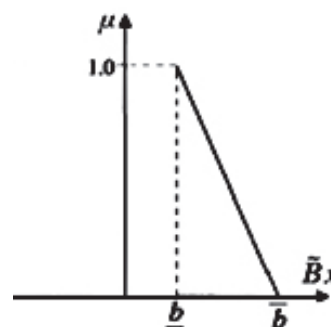
۱- اختلال در حرکت قطار در همان نقطه که به تأخیر اولیه^۳ معروف است.

۲- اختلال در حرکت قطار ناشی از تأخیر قطار قبلی که از این نقطه عبور کرده است.

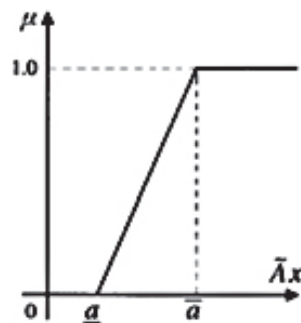
۳- اختلال در حرکت قطار ناشی از تأخیر همان قطار در بلاک پیشین هر دو مورد اخیر، در ادبیات موضوع با عنوان تأخیر ثانویه^۴ مشهور هستند.

هدف از بکارگیری بافرهای زمانی در جداول زمانی، جذب اختلالات اولیه و جلوگیری از ازدیاد تأخیرات ثانویه در بلاکها است. به همین علت، جهت پوشش اختلالات فوق‌الذکر، دو نوع بافر زمانی q_{ij} و d_{ij} به ترتیب منطبق با موارد دوم و سوم در این مقاله پیشنهاد شده است.

همکاران، و شفیعا و همکاران [Tavakoli Moghaddam et al. 2013; Shafia et al. 2012- b] صورت پذیرفته است. در ادامه نحوه بکارگیری رویکرد فازی جهت دستیابی به قابلیت اطمینان مورد نظر به تفصیل توضیح داده می‌شود. با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش پیشین، دو هدف اصلی شامل (۱) بیشینه کردن بافرهای موردنیاز جهت افزایش قابلیت اطمینان طرح و (۲) کمینه کردن زمان طی بلاکها و توقف در ایستگاه‌ها جهت کاهش تعداد قطار مورد نیاز و افزایش سرعت تجاری طرح است. بنابراین پارامترهایی که به صورت فازی در نظر گرفته می‌شود شامل: (۱) تابع هدف و (۲) بافرهای زمانی است که هر کدام با یک محدودیت فازی قابل ارائه خواهد بود. شکل (۳) نحوه نمایش فازی دو مورد فوق‌الذکر را نشان می‌دهد. شایان ذکر است بافرهای زمانی مورد بررسی، شامل بافرهای زمانی بین دو قطار متوالی در طی بلاکها و بافرهای زمانی بین طی دو بلاک مجاور توسط قطارها است.



(الف) مورد اول



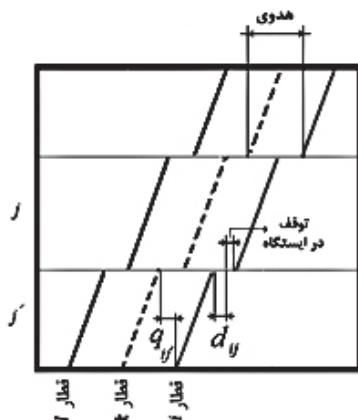
(ب) مورد دوم

شکل ۳. نمایش فازی موارد ۱ و ۲

در ادامه توابع عضویت هر یک از محدودیتها و توابع هدف با

جدول ۱. نوتاسیونهای مربوط به مدل ریاضی پیشنهادی

نماد	توضیح
A	مجموعه بلاکها
T	مجموعه قطارها
A_i	مجموعه بلاکهایی که توسط قطار i طی می شود.
t_{ij}	زمان تئوریک طی بلاک j توسط قطار i
\bar{q}_{ij}	حد بالایی بافر فازی بین قطار i و قطار ماقبل آن، i' در طی بلاک j
\underline{q}_{ij}	حد پایینی بافر فازی بین قطار i و قطار ماقبل آن، i' در طی بلاک j
\bar{d}_{ij}	حد بالایی بافر فازی بین قطار i در بلاک j و همین قطار در بلاک ماقبل، j'
\underline{d}_{ij}	حد پایینی بافر فازی بین قطار i در بلاک j و همین قطار در بلاک ماقبل، j'
\bar{p}_i	حد بالایی حداکثر فاصله زمانی فازی قابل دستیافت طی یک مسیر کامل برای قطار i
\underline{p}_i	حد پایینی حداقل فاصله زمانی فازی قابل دستیافت طی یک مسیر کامل برای قطار i
e_i	آخرین بلاک مربوط به قطار i
λ	درجه رضایتمندی
x_{ij}	زمان نهایی طی یک مسیر کامل برای قطار i در انتهای بلاک j
H	هدوی
Nt	تعداد ناوگان مورد نیاز جهت دستیابی به هدوی مورد نیاز



شکل ۴. یک نمونه گراف حرکت قطارها با مشخصات مشابه در یک مسیر تک جهت

همان طور که در شکل (۴) نمایش داده شده است، مقدار بافر زمانی d_{ij} ، بین زمان شروع توقف برنامه ای قطار i در ایستگاه ابتدای بلاک j و زمان رسیدن قطار i به انتهای بلاک ماقبل، j' ، تعریف شده است. همچنین مقدار بافر زمانی q_{ij} ، بین زمان عزیمت قطار i از ابتدای بلاک j' و زمان رسیدن قطار k به انتهای بلاک j' است. جهت محاسبه مقادیر مناسب بافرهای زمانی با در نظرگیری مقدار

پس از محاسبه حداقل مقدار مورد نیاز بافر زمانی d_{ij} ، این مقادیر به زمانهای طی بلاک و توقف در ایستگاه ها اضافه می شود. نکته مهم این است که با توجه به ثابت بودن هدوی بین قطارها، در صورتی که با در نظرگیری اختلالات موجود در حرکت قطارها و مقدار قابلیت اطمینان مورد انتظار و همچنین میزان حداکثر انحراف زمانی مجاز از زمان کل طی یک حلقه کامل تئوریک، مقادیر مورد نیاز محاسبه شده بافرهای زمانی q_{ij} از مقادیر موجود در برنامه زمانبندی بزرگ تر بود، دو راه حل به شرح زیر جهت دستیابی به قابلیت اطمینان مورد نظر، وجود خواهد داشت:

۱- افزایش مقدار هدوی به گونه ای که مقادیر مورد نیاز محاسبه شده q_{ij} پوشش داده شود.

۲- تقسیم بلاکهای بحرانی، منظور بلاکهایی که در شرط فوق صدق نکردند، به دو بلاک مجزا از طریق سیستم سیگنالیست است. شایان ذکر است راهکار اول، یعنی افزایش مقدار هدوی صرفاً از طریق افزایش ظرفیت قطار و به عبارت دیگر حداکثر تعداد مسافر ایستاده در یک متر مربع از مساحت قطار، امکان پذیر است.

۳-۲-۱ نحوه محاسبه حدود فاصله زمانی فازی قابل دستیافت

طی یک مسیر کامل برای قطار i

حد پایین پارامتر "فاصله زمانی فازی قابل دستیافت طی یک مسیر کامل برای قطار i ", \underline{p}_i ، معادل حاصل جمع زمانهای تئوریک طی بلاکها و زمانهای تئوریک توقف در ایستگاه ها پیشنهاد شده است.

حد بالای این پارامتر، \bar{p}_i ، متناسب با حداکثر تعداد ناوگان و هدوی مورد نظر و بر اساس معادله (۸) تعریف می شود.

$$\bar{p}_i = H \times Nt \quad (۸)$$

۳-۲-۲ نحوه محاسبه حدود مقادیر بافرهای زمانی

جهت تعیین حدود پایین و بالای پارامترهای d_{ij} و q_{ij} الگوریتم زیر پیشنهاد می شود:

الگوریتم (۱): تعیین حدود پایین و بالای d_{ij} و q_{ij} بر مبنای بازه اطمینان δ

مرحله (۱) میزان اختلالات برای هر یک از قطارها در هر یک از بلاکها در زمان بهره برداری با حداقل هدوی در یک دوره زمانی مشخص ثبت شود.

نکته: در این خصوص می بایست دقت کرد که اختلالات اولیه از اختلالات ثانویه تفکیک شود، چرا که اختلالات ثانویه صرفاً به جهت عدم توانایی بافرهای زمانی جهت جذب اختلالات اولیه نشات می گیرد و نبایستی در محاسبات منظور شود.

نکته: هر چقدر مقدار دوره زمانی بررسی اختلالات بزرگتر باشد، نتایج دقیق تری حاصل می شود.

مرحله (۲) بازه اختلالات مورد بررسی شامل حدود پایین و بالای اختلالات حادث شده در بازه زمانی مورد بررسی در بازه اطمینان δ محاسبه شود.

نکته: میزان $0 \leq \delta \leq 1$ متناسب با میزان قابلیت اطمینان مورد نیاز و احتمال وقوع اختلال غیر قابل جذب تعریف می شود. شایان ذکر است هر چقدر مقدار δ بزرگتر انتخاب شود، مقادیر حدود بالای اختلالات بزرگتر خواهد بود و متعاقباً مقادیر بافرهای زمانی نیز بزرگتر و زمان طی یک مسیر کامل بیشتر خواهد شد.

اثر آنها بروی افزایش زمان طی یک حلقه کامل، مدل ریاضی با بکارگیری منطق فازی مورد اشاره در بخش ۲-۱ به شرح زیر پیشنهاد شده است.

$$\max \lambda \quad (۳)$$

S.t.

$$x_{ik} - x_{ik'} \geq t_{ik}, \quad \forall i \in T \quad \forall k, k' \in A_i \quad (۴)$$

$$\lambda(\bar{P}_i - \underline{P}_i) + x_{ie_p} \leq \bar{P}_i, \quad \forall i \in T \quad (۵)$$

$$-\lambda(\bar{q}_{ik} - \underline{q}_{ik}) + (x_{ik} - x_{ik'} - t_{ik}) \geq \underline{q}_{ik} \quad (۶)$$

$$\forall i, i' \in T \quad \forall k \in A_i \cap A_{i'} \\ -\lambda(\bar{d}_{ij} - \underline{d}_{ij}) + (x_{ij} - x_{ij'} - t_{ij}) \geq \underline{d}_{ij} \quad (۷)$$

$$\forall i \in T \quad \forall j, j' \in A_i$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad \forall i \in T \quad \forall j \in A_i$$

$$\lambda \in [0, 1]$$

تابع هدف (۳) به دنبال بیشینه کردن درجه رضایتمندی است. محدودیت (۴) بیانگر ترتیب طی بلاکها توسط قطارها است. جایی که k' بلاک ماقبل بلاک k است. محدودیت (۵) بیانگر فرم خطی تابع هدف فازی است. محدودیت (۶) بیانگر این موضوع است که یک بافر فازی می بایست بین قطار i و قطار ماقبل آن i' بهنگام طی بلاک j منظور شود. محدودیت (۷) بیانگر این موضوع است که یک بافر فازی می بایست بین قطار i در بلاک j و بلاک ماقبل آن، j' منظور شود.

مدل ریاضی فوق در نرم افزار لینگو کد شده است. خروجیها بیانگر این است که برای حل مسائل واقعی در مدت زمان معقول، جواب بهینه حاصل می شود.

۳-۲-۳ نحوه محاسبه حدود مجموعه های فازی

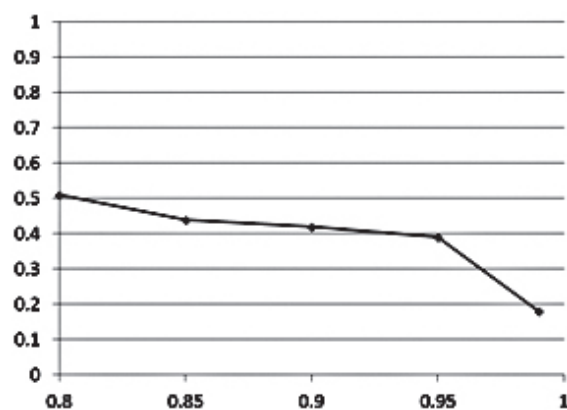
یکی از مهم ترین عوامل موثر در موفقیت مدل ریاضی پیشنهادی فوق و دستیابی به جوابهای مناسب، تعیین دقیق حدود پایین و بالای پارامترهای فازی مدل است. در این بخش، هدف ارائه روشهای مناسب و دقیق جهت دستیابی به مقادیر مناسب این حدود است.

محاسبه شد.

۱- بر مبنای الگوریتم (۱) که در بخش ۲-۲ معرفی شد، و با فرض $\delta = 0.95$ ، مقادیر حدود فازی بافرهای زمانی، محاسبه شد.

با توجه به اطلاعات فوق، مقادیر درجه رضایتمندی، λ ، به شرح جدول (۲) نمایش داده شده است.

در ادامه مساله شماره ۵، به ازای مقادیر مختلف λ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به شرح شکل (۵) نمایش داده شده است.



شکل ۵. مقادیر مختلف λ

۳. مطالعه موردی

خط متروی مورد بررسی شامل ۱۳/۴ کیلومتر و ۱۴ ایستگاه است. جایگاه این خط در بین سایر خطوط مترو به شرح شکل (۶) است. در این شکل، خط متروی مورد بررسی به رنگ آبی نشان داده شده است. هدوی مورد نظر کارفرما برابر ۲/۵ دقیقه است و زمانهای طی بلاک و زمانهای توقف قطار در ایستگاه جهت سوار و پیاده کردن مسافری در جدول (۳) نشان داده شده است.

مطابق اطلاعات ارائه شده در جدول (۳)، حاصل جمع زمانهای طی بلاکها و زمانهای توقف قطارها در ایستگاهها به همراه زمان

مرحله ۳) میزان طول بازه که معادل اندازه بزرگترین اختلال قابل وقوع در بازه اطمینان δ است به عنوان حد بالایی پارامترهای d_{ij} و q_{ij} تعریف می شود. حد پایین این پارامترها برابر صفر منظور می شود.

۲-۴ اعتبارسنجی مدل ریاضی

در این بخش جهت اعتبارسنجی مدل ریاضی، در ابتدا تعداد ۱۰ مساله با مشخصات زیر به صورت تصادفی تولید شدند.

۱- حداکثر تعداد مسافر در هر ساعت اوج ترافیک در هر جهت^۵ برابر ۴۰۰۰۰ نفر منظور شد.

۲- تعداد بلاکهای مسیر در هر جهت برابر ۱۵ و تعداد ایستگاهها برابر ۱۶ منظور شد.

۳- زمان توقف قطارها در ایستگاهها برابر ۳۰ ثانیه منظور شد.

۴- زمان مانور در هر دو انتهای مسیر برابر ۱۸۰ ثانیه منظور شد.

۵- زمان طی بلاکها به صورت تصادفی در بازه زمانی [۹۰، ۱۱۰] تولید شدند.

۶- مقادیر اختلالات به صورت تصادفی بر مبنای توزیع نرمال $N(0.1 \times t_{ij}, 9)$ به دست آمده است.

۷- ظرفیت مسافرگیری هر قطار برابر ۱۲۰۰ نفر منظور شد.

۸- هدوی از طریق فرمول زیر به دست آمد:

$$H = \frac{\left\lfloor \frac{120 \times \text{Capacity of each train (in person)}}{PPHPD} \right\rfloor}{2}$$

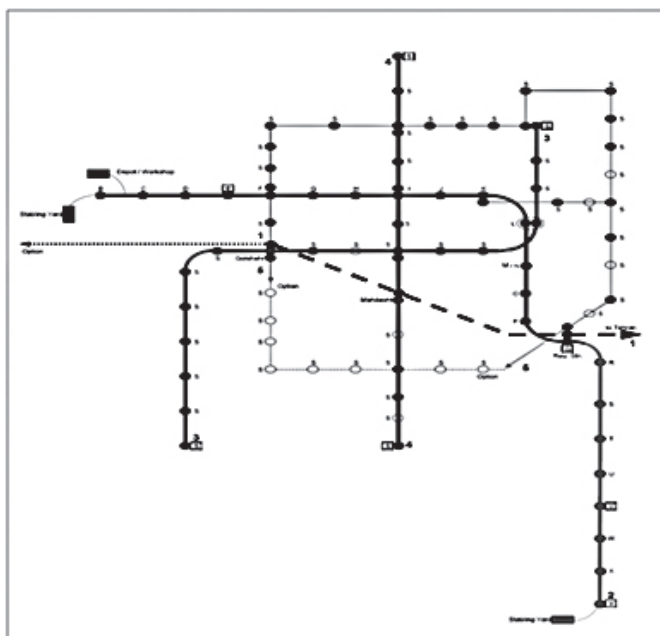
۹- تعداد قطارهای در گردش از طریق فرمول زیر محاسبه شد:

$$Nt = \left\lceil \frac{\text{Duration of a complete loop}}{H} \right\rceil$$

۱۰- بر مبنای روش پیشنهادی در بخش ۲-۳، حدود فازی مربوطه به فاصله زمانی قابل دستیافت طی یک مسیر کامل برای قطار i

جدول ۲. مقادیر درجه رضایتمندی برای مسائل مختلف

شماره مساله	(۱)	(۲)	(۳)	(۴)	(۵)	(۶)	(۷)	(۸)	(۹)	(۱۰)
$H (s)$	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	۹۰
Nt	۴۸	۴۸	۴۶	۵۱	۴۸	۴۸	۴۷	۴۸	۴۹	۴۸
λ	۰،۴۱	۰،۴۹	۰،۲۴	۰،۵۶	۰،۳۹	۰،۳۸	۰،۴۲	۰،۶۲	۰،۵۶	۰،۴۴



شکل ۶. موقعیت خط متروی مورد بررسی

جدول ۳. زمان های تنوریک طی بلاکها و توقف قطارها در بلاکها در خط متروی مورد بررسی

ایستگاه	ایستگاه	زمان توقف قطارها در ایستگاه ها (s)	زمان طی بلاک (s)
B	C		۱۰۶
C	D	۳۰	۷۳
D	E	۳۰	۶۹
E	F	۳۰	۶۹
F	G	۳۰	۶۶
G	H	۳۰	۶۶
H	I	۳۰	۶۳
I	J	۳۰	۸۲
J	K	۳۰	۷۲
K	M	۳۰	۸۴
M	O	۳۰	۸۴
O	P	۳۰	۹۹
P	Q		۶۸
جمع		۳۳۰	۱۰۰۱
زمان مانور			۱۷۰

مانور در یک حلقه کامل برابر 3002 ثانیه $= 2 \times (170 + 330 + 1001)$ است که برابر حد پایینی حداقل فاصله زمانی فازی قابل دستیافت طی یک مسیر کامل برای قطار i ، \bar{P}_i است. همچنین با توجه به هدوی $2/5$ دقیقه و نیز حداکثر تعداد قطار در حال بهره برداری معادل 23 رام قطار، حد بالایی حداکثر فاصله زمانی قابل دستیافت طی یک مسیر کامل برای قطار i ، \bar{P}_i برابر 3450 ثانیه محاسبه می شود.

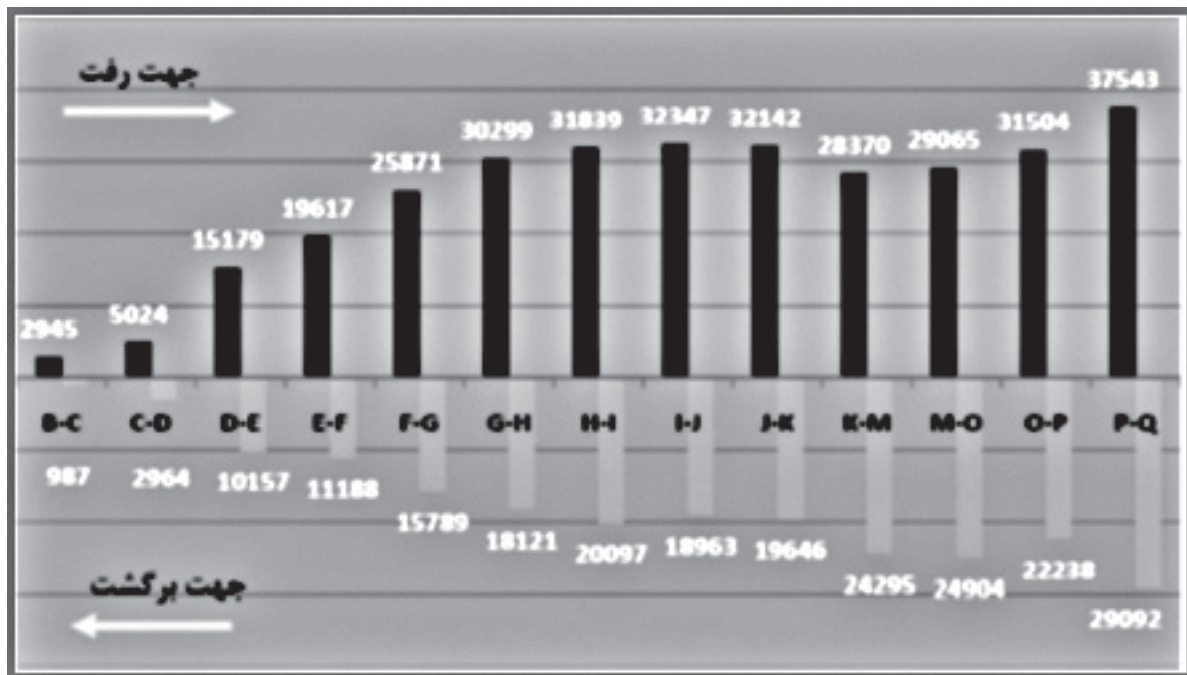
از طرف دیگر جهت تعیین حدود پایین و بالای سایر مجموعه های فازی تعریف شده، مطابق الگوریتم ۱، میزان بازه اختلالات با در نظرگیری λ اطمینان، برای هر یک از بلاکها و توقف قطارها در ایستگاهها محاسبه می شود. با توجه به عدم دسترسی به اطلاعات لازم جهت محاسبه اختلالات، در راه آهن درون شهری مورد بررسی، دو عامل اصلی تأثیر گذار بر میزان اختلالات شامل (۱) زمان طی بلاک تنوری که خود تابعی از مشخصات مسیر و قطارها است و (۲) حجم مسافر در حال سفر در هر جهت در ساعت اوج ترافیک در طی بلاکهای مختلف، شکل (۷)، مورد استفاده قرار گرفته است. در این مقاله جهت محاسبه حد بالایی عدد فازی، حداکثر میزان بافر قابل قبول معادل $0/001$

جدول ۴. زمان های بافر محاسبه شده در فاز ۱ از خط ۲ متروی کرج

ایستگاه	ایستگاه	فاصله (m)	PPHPD	زمان توقف قطارها در ایستگاه ها (s)	زمان طی بلاک (s)	بافر (s)
B	C	۱۷۰۲	۳۹۳۲		۱۰۶	۹/۹۵
C	D	۹۵۰	۷۹۸۸	۳۰	۷۳	۷/۱۵
D	E	۸۸۸	۲۵۳۳۶	۳۰	۶۹	۷/۷۵
E	F	۸۶۵	۳۰۸۰۵	۳۰	۶۹	۸/۱۰
F	G	۷۸۷	۴۱۶۶۰	۳۰	۶۶	۸/۴۰
G	H	۸۰۱	۴۸۴۲۰	۳۰	۶۶	۸/۸۰
H	I	۷۳۷	۵۱۹۳۶	۳۰	۶۳	۸/۷۵
I	J	۱۱۳۷	۵۱۳۱۰	۳۰	۸۲	۱۰/۴۵
J	K	۹۱۶	۵۱۷۸۸	۳۰	۷۲	۹/۵۵
K	M	۱۱۹۷	۵۲۶۶۵	۳۰	۸۴	۱۰/۷۰
M	O	۱۲۰۱	۵۳۹۶۹	۳۰	۸۴	۱۰/۷۵
O	P	۱۴۶۱	۵۳۷۴۲	۳۰	۹۹	۱۲/۱۵
P	P	۸۵۳	۶۶۶۳۵		۶۸	۱۰/۰۰
جمع		۱۳۴۹۵	۵۴۰۱۸۶	۳۳۰	۱۰۰۱	۱۲۲/۵

میزان مسافر جابجا شده در شلوغ ترین ساعت روز در افق طرح در هر بلاک، تعریف شده است. این مقدار بر مبنای نظر کارشناسان خیره بهره برداری خطوط راه آهن درون شهری تخمین زده شده است. بر این اساس با بکارگیری مدل ریاضی پیشنهادی، مقدار بهینه تابع هدف معادل ۰/۴۵۳ و مجموع بافرهای زمانی معادل ۱۲۲/۵ ثانیه محاسبه شده است. شایان ذکر است، فواصل زمانی هدوی با زمانهای طی بلاک، از مقدار ۱۲۲/۵ ثانیه بیشتر بوده، بنابراین نیازی به افزایش این مقادیر وجود ندارد. نحوه تخصیص بافرهای زمانی d_{ij} به هر یک از بلاکها به شرح جدول (۴) و با ضریب ۷۵٪ و ۲۵٪ به ترتیب برای عوامل ۱ و ۲ فوق الذکر است.

همانطور که در جدول (۴) نمایش داده شده است، مقدار بافر زمانی معادل ۱۲۲.۵ ثانیه بین تمامی بلاکها تقسیم شده است. با در نظرگیری این بافرهای زمانی، ضمن تاثیر ناچیز بر میزان زمان طی یک حلقه کامل توسط قطارها، بخش عمده ای از اختلالات در حرکت قطارها و سوار و پیاده شدن مسافران جذب می شود، تا با کاهش ازدیاد تأخیرات ناشی از عدم جذب اختلالات، منجر به حداقل تأخیرهای ثانویه شود.



شکل ۷. حجم مسافر در هر جهت در حال سفر در هر جهت در هر بلاکهای مختلف

۴. جمع‌بندی

در این مقاله برنامه بهره برداری حرکت قطارها در سیستمهای حمل و نقل درون شهری و موضوع جذب اختلالات حرکت قطارها مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا با توجه به اهمیت جذب اختلالات جهت جلوگیری از ازدیاد آنها و تأثیر آن بر میزان طی یک مسیر کامل و همچنین در محاسبه تعیین تعداد قطار مورد نیاز، جهت دستیابی به قابلیت اطمینان مناسب، یک مدل ریاضی با رویکرد تئوری فازی پیشنهاد شد. در این راستا تعدادی روابط ریاضی و یک الگوریتم، جهت محاسبه حدود مجموعه های فازی پیشنهاد شد. در ادامه مدل ریاضی ارائه شده با تولید چندین مثال تصادفی و تحلیل پاسخهای حاصل اعتبار سنجی شد. در نهایت یکی از خطوط متروی درون شهری ایران به عنوان مطالعه موردی، بررسی و بافرهای زمانی لازم جهت دستیابی به قابلیت اطمینان مورد نیاز تعیین شده است. با بکارگیری و تخصیص این بافرهای زمانی به زمانهای طی بلاکها، هرچند در ابتدا منجر به افزایش زمان طی یک مسیر کامل می‌شود، ولی با توجه به ایجاد قابلیت جذب تأخیرهای ثانویه، از ازدیاد تأخیرات بین قطارها جلوگیری بعمل آمده و نهایتاً زمان طی یک مسیر کامل در عمل کاهش خواهد یافت. این موضوع منجر به کاهش تعداد قطار مورد نیاز در مرحله بهره برداری و متعاقباً کاهش هزینه های بهره برداری و نگهداری می‌شود. با بکارگیری روش کلاسیک مدت زمان بافر مورد نیاز به صورت تقریب معادل ۱۳۰ ثانیه منظور شده است، در حالی که با بکارگیری روش پیشنهادی ارائه شده، این مقدار معادل ۱۲۲/۵ ثانیه محاسبه شد. به عنوان مطالعات تکمیلی ارائه روشهایی جهت محاسبه دقیق اختلالات در حین طی بلاکها توسط قطارها و نیز بکارگیری سایر رویکردهای مواجهه با عدم قطعیت جهت تعیین بافرهای زمانی مورد نیاز پیشنهاد می‌شود.

۵. پی نوشتها

- 1- Travelling Salesman Problem (TSP)
- 2- Symmetry
- 3- Primary Delay
- 4- Secondary Delay
- 5- Passenger Per Hour Per Direction (PPHPD)

۵. مراجع

- توکلی مقدم، رضا، محمود سلطانی، فرزاد و محمود آبادی، عباس (۱۳۹۲) "توسعه مدل ریاضی مساله مسیر یابی حمل و نقل مواد سوختی تحت شرایط فازی - مطالعه موردی"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، جلد ۴، شماره ۳، ص. ۲۲۰-۲۰۹.

- سپهری، محمد مهدی و پورسیدآقایی، محسن (۱۳۷۸) "برنامه ریزی حرکت قطارها در خطوط یک خطه"، نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۳، شماره ۲، ص ۸۷ - ۹۷.

- صفارزاده، محمود، یقینی، مسعود و تمنایی، محمد (۱۳۹۱) "ارایه مدل برنامه ریزی زمانبندی حرکت قطارها با در نظر گرفتن محدودیت های ویژه مسیرهای تک خطه در شبکه ریلی ایران"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، جلد ۴، شماره ۲، ص ۱۵۱-۱۶۶.

- قصیری، کیوان و مرشد سلوک، فهیمه (۱۳۸۴) "ارائه یک مدل ابتکاری مبتنی بر سیستم اجتماع مورچه ها برای حل مسئله زمانبندی حرکت قطارها"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال دوم، شماره ۴، ص ۲۵۷ - ۲۷۰.

- Bertsimas, D. and Sim, M. (2004) "The price of robustness", *Operations Research*, Vol. 52, pp. 35-53.

- Burdett, R. L. and Kozan, E. (2010) "A sequencing approach for creating new train timetables", *OR Spectrum*, Vol. 32, pp. 163-193.

- Cacchiani, V., Caprara, A. and Toth, P. (2008) "A column generation approach to train timetabling on a corridor", *4OR*, Vol. 6, pp. 125-142.

- Carey, M. (1999) "Ex ante heuristic measures of schedule reliability", *Transportation Research Part B*, Vol. 33, pp. 473-494.

- Fischetti, M. and Monaci, M. (2009) "Light robustness", *Robust and Online Large-Scale Optimization*, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 5868, pp. 61-84.

(ICRARE-2009), Iran university of science and Technology – Tehran – I.R. Iran.

- Shafia, M. A., Pourseyed Aghaee, M., Sadjadi, S. J. and Jamili, A. (2012) "Robust train timetabling problem: mathematical model and branch and bound algorithm," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 13, No. 1, pp. 307-317.

- Shafia, M. A., Sadjadi, S. J., Jamili, A., Tavakkoli-Moghaddam, R. and Pourseyed Aghaee, M. (2012) "The periodicity and robustness in a single-track train scheduling problem", Applied Soft Computing Journal, Vol. 12, pp. 440-452.

- Vroman, M., Dekker, R. and Kroon, L. (2003) "Reliability and heterogeneity of railway services", ERIM Research Report ERS-2003-090-LIS, Erasmus University Rotterdam.

- Zadeh, L. (1965) "Fuzzy sets", Information and Control, Vol. 8, pp. 38-53.

- 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.

- Zimmermann, H. J. (1996) "Fuzzy set theory and its applications", 3rd ed., Kluwer Academic Publishers.

- Ghoseiri, K. Szidarovszky, F. and Asgharpour, M. J. (2004) "A multi-objective train scheduling model and solution", Transportation Research Part B, Vol. 38, pp. 927-952.

- Hofman, M. A. and Madsen, L. F. (2005) "Robustness in train scheduling", Master thesis, IMM, DTU.

- Hoogheimestra J.S. and Teunisse M.J.G. (1998) "The use of simulation in the planning of the Dutch railway services", In Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference.

- Jamili, A. and Ghannadpour, S. F. (2013) "Computing the supplementary times and the number of required trains in operation plan studies under stochastic perturbations", 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, The Netherlands.

- Khan, M. B. and Zhou, X. (2010) "Stochastic Optimization Model and Solution Algorithm for Robust Double-Track Train Timetabling Problem", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 11, No. 1, pp. 81- 89.

- Liebchen, C. (2004) "Symmetry for periodic railway timetables", Electronic Notes in Theoretical Computer Science, Vol. 92, pp. 34-51.

- Liebchen, C. Chachtebeck, M. Schoebel, A. Stiller, S. and Prigge, A. (2010) "Computing delay resistant railway timetables", Computers and Operations Research, Vol.37 , No.5 pp. 857-868.

- Lindner, T. and Zimmermann, U. T. (2005) "Cost optimal periodic train scheduling", Mathematical Methods of Operations Research, Vol. 62, pp. 281-295.

- Salido, M. A., Barber, F. and Ingolotti, L. (2008) "Robustness in railway transportation scheduling", Intelligent Control and Automation, WCICA 2008. 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, 25-27 June 2008, pp. 2880-2885.

- Shafia, M. A. and Jamili, A. (2009) " Measuring the train timetables robustness", 2nd International Conference on Recent Advances in Railway Engineering