

## زمان‌بندی حرکت قطارها در مسیرهای دوخطه با رویکرد برنامه‌ریزی

### تصادفی

#### مقاله پژوهشی

امیر قیومی\*، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

علی پویانی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Amir.Ghayoumi@outlook.com

دریافت: ۹۹/۰۱/۱۷ - پذیرش: ۹۹/۰۶/۰۵

صفحه ۱۴-۱

#### چکیده

زمان‌بندی حرکت قطارها یکی از مهم‌ترین مسائل برنامه‌ریزی در حمل‌ونقل ریلی است. با نگاهی به ادبیات موضوع مورد بررسی می‌توان دریافت که حجم زیادی از مطالعات به مدلسازی و حل این مسئله اختصاص یافته است. در این میان در طی سال‌های اخیر و با پیچیده‌تر شدن سیستم‌های ریلی و لزوم استفاده از تکنیک‌های برنامه‌ریزی عدم قطعیت، پژوهشگران بیش از پیش بر روی مدل‌های عدم قطعیت متمرکز شده‌اند. در بین تکنیک‌های عدم قطعیت، برنامه‌ریزی تصادفی یکی از رویکردهای موجود در مدلسازی ریاضی است. مبنای استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی بدین منظور است که با در نظر گرفتن پارامترهای تصادفی موجود در مسائل دنیای واقعی، مدلسازی و نتایج حاصل از آن به واقعیت نزدیک‌تر شوند. در این پژوهش پس از مطالعه مدل‌های موجود در ادبیات موضوع، مدلی در حوزه زمان‌بندی حرکت قطارها با رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی و متناسب با مسیرهای دو خطه بهبود داده شده است. مدل مذکور در نظر دارد تا با استفاده از زمان‌های متغیر سیر بلاک‌ها و از طریق تخصیص بهینه زمان‌های مکمل به آن‌ها، تاخیرات حاصل از نوسانات زمان‌های سیر بلاک‌ها را بین برنامه زمان‌بندی و آن چه را که در عمل انجام می‌گیرد تا حد ممکن کاهش دهد. این مدل قادر است تا زمان‌بندی بهینه را از طریق تعیین زمان‌های مکمل و با توجه به دو معیار کاهش زمان‌های سفر و کاهش تاخیرات محاسبه کند. در پایان، مدل موردنظر بر روی یکی از خطوط شبکه ریلی موجود در راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران پیاده‌سازی شده است و نتایج حاصل از آن با شرایط فعلی زمان‌بندی در راه‌آهن ایران مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی تصادفی، حمل و نقل ریلی، زمان‌بندی، عدم قطعیت

#### ۱- مقدمه

ویژگی‌های خاص زیرساختی و سخت‌افزاری، نیازمند برنامه‌ریزی دقیق است به گونه‌ای که در صورت نبود آن‌ها و یا نداشتن کارایی کافی، سیستم حمل‌ونقل ریلی با مشکل جدی مواجه می‌شود. برنامه‌ریزی گروه‌بندی واگن‌ها، برنامه‌ریزی تشکیل قطارها، برنامه‌ریزی تخصیص لکوموتیوها، برنامه‌ریزی خدمه و زمان‌بندی حرکت قطارها بخشی از این نوع برنامه‌ها هستند. زمان‌بندی حرکت قطارها

اهمیت موضوع برنامه‌ریزی حمل‌ونقل بر کسی پوشیده نیست و شاید کمتر کشوری باشد که با مسئله حمل‌ونقل به عنوان یک چالش و مسئله مهم روبرو نباشد. در این میان حمل‌ونقل ریلی با داشتن ویژگی‌های خاص و ممتاز نسبت به سایر مدهای حمل‌ونقلی، همچون ایمنی، راحتی و پاک بودن مورد توجه دولت‌ها و اقبال مختلف مردم قرار گرفته است اما از سوی دیگر حمل‌ونقل ریلی به دلیل داشتن شرایط و

تاخیر در برنامه حرکت قطارها می‌شوند. یکی از نتایج مهم این مقاله آن است که وقتی زمان‌های بافر برنامه‌ریزی شده بین مسیرها در تقاطع‌ها کاهش می‌یابد، تاخیرات تصادفی تمام قطارهای عبوری به صورت نمایی افزایش می‌یابد. (Yuan and Hanson, 2007). در مقاله کرون و همکاران به مسئله زمان‌بندی حرکت قطارها تحت یک رویکرد مدل‌سازی تصادفی پرداخته شده است. در این مقاله یک مدل بهینه‌سازی تصادفی برای یافتن بهترین تخصیص برای زمان‌های مکمل یا جبراتی ارائه می‌شود. هدف این مدل کمینه کردن میانگین تاخیر قطارها در یک سری از سفرها است. (Kroon et al., 2007). کرون و همکاران (۲۰۰۸) در مقاله‌ای به بهبود مدل قبلی خود در زمینه زمان‌بندی حرکت قطارها پرداخته‌اند. در این مقاله یک مدل تصادفی ارائه شده است که میانگین وزنی تاخیر تمام قطارها را از طریق تخصیص زمان‌های بافر کمینه می‌کند. در واقع مدل ارائه شده در این مقاله ترکیبی از مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی است. این مقاله با پیاده‌سازی مدل تصادفی یاد شده و در نظر گرفتن مورد مطالعاتی به مقایسه جدول زمان‌بندی بدست آمده از حل مدل و جدول زمان‌بندی موجود می‌پردازد. (Kroon et al., 2008)

خان و ژو مقاله‌ای را با موضوع مدل بهینه‌سازی تصادفی به همراه الگوریتم حل برای مسئله استوار زمان‌بندی حرکت قطار در مسیرهای دو خطه ارائه کرده‌اند. مدل یاد شده یک مدل تصادفی دو مرحله‌ای است. ابتدا در مرحله اول جدول زمان‌بندی  $x$  با معیار حداقل کردن زمان‌های سفر بدست می‌آید سپس در مرحله دوم با تعیین زمان‌های سیر بلاک تحت سناریوهای متفاوت، زمان‌های سناریویی رسیدن به مقصد مشخص می‌شود. در واقع مدل در این مرحله، زمان‌های سناریویی رسیدن به مقصد را طوری تعیین می‌کند که فاصله بین این زمان‌ها و زمان‌های برنامه‌ریزی شده به حداقل برسد و در نتیجه میزان تاخیرات برنامه‌ای به حداقل برسد. این مقاله برای حل مدل نیز یک راه‌حل ابتکاری ارائه می‌دهد و در نهایت نیز روند حل به همراه نتایج عددی ارائه شده است. (Khan and Zhou, 2010)

در سال ۲۰۱۱ منگ و ژو یک مدل برای زمان‌بندی حرکت قطارها تحت شرایط پویا و تصادفی ارائه کرده‌اند. این مقاله سناریوهای مختلف تصادفی را تحت رویکرد برنامه‌ریزی غلطان برای رسیدن به دو هدف معرفی می‌کند.

یکی از اساسی‌ترین و مهم‌ترین مسائل مطرح در راه‌آهن هر کشوری است. تاکنون در حوزه زمان‌بندی حرکت قطارها مطالعات بسیاری صورت گرفته است اما شاید بسیاری از آن‌ها در عمل کارایی لازم رانداشته باشند و این به دلیل وجود عدم قطعیت در اطلاعات مورد نیاز برای زمان‌بندی حرکت قطارها است که باعث می‌گردد میان آن چه که در عمل انجام می‌گیرد و آنچه که برنامه‌ریزی شده است تفاوت چشمگیری وجود داشته باشد. در سال‌های اخیر رویکردهای متفاوتی جهت مواجهه با این چالش به وجود آمده است. یکی از این رویکردها استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی است. به طور کلی رویکرد مذکور قصد دارد تا با در نظر گرفتن شرایط تصادفی و متغیر حاکم بر مسئله مورد بحث، خروجی حاصل از برنامه‌ریزی را به واقعیت نزدیک کند. هدف از ارائه این مقاله نیز آن است تا با ارائه یک مدل زمان‌بندی با رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی و پیاده‌سازی آن با استفاده از داده‌های واقعی گام تاثیرگذاری در نحوه زمان‌بندی در این حوزه بردارد. در بخش دوم، مروری بر ادبیات موضوع زمان‌بندی حرکت قطارها با رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی انجام شده است. در بخش سوم مدل برنامه‌ریزی تصادفی در دو مرحله اول و دوم به تفکیک ارائه شده است. در بخش چهارم به حل مدل پرداخته شده است و به منظور ارزیابی عملکرد مدل، مقایسه‌ای بین زمان‌بندی فعلی در راه‌آهن ایران و زمان‌بندی مدل تصادفی صورت گرفته است. در بخش پنجم نیز نتیجه‌گیری و پیشنهادت ارائه شده است.

## ۲- پیشینه تحقیق

با توجه به اهمیت موضوع زمان‌بندی حرکت قطارها، مطالعات زیادی در این زمینه صورت گرفته است اما حجم مقالاتی که به طور ویژه در زمینه موضوع زمان‌بندی حرکت قطار با رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی انتشار یافته‌اند بسیار کمتر است. در این بخش مقالاتی که در زمینه زمان‌بندی تصادفی قطارها منتشر شده‌اند، مرور خواهند شد.

یکی از مقالاتی که در زمینه تاخیر قطارها و در حوزه برنامه‌ریزی تصادفی منتشر شده است مقاله یوان و هانسن است. موضوع مورد مطالعه این مقاله بهینه‌سازی استفاده از ظرفیت ایستگاه‌ها از طریق تخمین تاخیرات تصادفی است. این مقاله یک مدل تصادفی را در ارتباط با توزیع تاخیرات در ایستگاه‌ها ارائه می‌دهد که این تاخیرات باعث به وجود آمدن

چین است که نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل نشان می‌دهد که حداکثر تا ۳,۱۲ درصد در زمان‌های سفر و ۱۱,۲۶ درصد در مصرف کل انرژی می‌توان کاهش داشت. (Yang et al., 2016)

حسن‌نایی و همکاران در مقاله‌ای به مطالعه زمان‌بندی حرکت قطارها در خطوط پر سرعت شهری با رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی استوار پرداخته‌اند. این تحقیق به ارائه مدل‌های چند هدفه با رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی استوار برای زمان‌بندی حرکت قطارها می‌پردازد. هدف این مدل‌ها کمینه‌سازی ارزش انتظاری زمان انتظار مسافری و واریانس این زمان‌ها به همراه کمینه‌سازی تابع هزینه‌هایی همچون بارگیری بیش از حد مسافری است. محققین اثربخشی این مدل را با به کارگیری آن بر روی خط ۵ مترو شهر تهران آزموده‌اند که نتایج حاصل از آن نشان می‌دهد که ارزش انتظاری زمان انتظار مسافری تا ۲۱,۲۷ درصد و واریانس این زمان‌ها تا ۵۹,۹۸ درصد کاهش یافته‌اند. (Hassannayebi et al., 2017)

یا توجه به مرور ادبیات صورت گرفته می‌توان دریافت که تاکنون مدلی در حوزه زمان‌بندی تصادفی حرکت قطارها با مطالعه موردی در راه آهن ایران ارائه نشده است. مهم‌ترین نوآوری‌های این مقاله عبارتند از:

- بهبود یک مدل زمان‌بندی تصادفی برای مسیرهای دو خطه در ایران
- ارزیابی اثربخشی مدل با استفاده از به کارگیری داده‌های خط تهران- مشهد و مقایسه نتایج آن با زمان‌بندی فعلی در راه‌آهن و زمان‌بندی مدل قطعی
- در برخی از مدل‌های مطالعه شده در ادبیات موضوع به مانند مدل خان و ژو زمان‌های مکمل مجاز فقط برای هر قطار تعریف گردیده است، این موضوع باعث می‌شود که هنگام حل مدل، زمان‌های کمبود تنها به ایستگاه آخر تخصیص یابند که منجر به غیر طبیعی شدن زمان‌بندی می‌شود. در این مقاله با در نظر گرفتن زمان‌های کمبود مجاز برای هر بلاک و یا هر ایستگاه این امکان به وجود آمده است که با توجه به شرایط هر بلاک و یا هر ایستگاه زمان‌های مکمل مجاز تعیین شوند.

۱. شناسایی عدم اطمینان در داده‌های ورودی در ارتباط با زمان‌های کاری و بیکاری پیش‌بینی شده قطارها ۲. شناسایی امکان مجدد زمان‌بندی بعد از دریافت اطلاعات به روز شده، این مقاله به ارائه مدلی می‌پردازد که به صورت دوره‌ای، زمان‌بندی‌ها را برای یک دوره بلند زمانی بهینه می‌کند.

(Meng and Zhou, 2011)

مقاله دیگری که در زمینه زمان‌بندی تصادفی حرکت قطارها ارائه شده است، مقاله نیو و منگ است. این مقاله نیز یک مدل زمان‌بندی دو مرحله‌ای را ارائه می‌کند. مدل ریاضی ارائه شده بدین صورت است که در مرحله اول به دنبال کمینه کردن زمان‌های مکمل و در مرحله دوم به دنبال کمینه کردن تاخیرات روی داده حاصل از زمان‌بندی در مرحله اول است که این تاخیرات برابر با اختلاف زمان‌های ورود برنامه‌ای و سناریویی است. روش حل انتخابی مولفان این مقاله برای مدل ارائه شده نیز استفاده از الگوریتم ژنتیک بوده است. (New and Meng, 2014)

یانگ و همکاران یک مدل بهینه‌سازی جامع پروفیل سرعت و زمان‌بندی حرکت متروها ارائه کردند. هدف این مدل کمینه‌سازی مصرف انرژی است. محققین در این مقاله ابتدا یک مدل دو مرحله‌ای تصادفی برای تعیین جدول زمان‌بندی حرکت متروها و پروفیل سرعت ارائه می‌کنند سپس به ارائه یک روش حل با استفاده از الگوریتم ژنتیک می‌پردازند. مورد مطالعاتی مورد استفاده در این مقاله خط ایژوانگ شهر بیجینگ چین بوده است که نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن سه مقطع زمانی ساعات شلوغ، ساعات غیر شلوغ و ساعات شب، مصرف کل انرژی در مقایسه با جدول زمان‌بندی فعلی به ترتیب ۱۰,۶۶، ۹,۹۴ و ۹,۱۳ درصد و پروفیل سرعت به ترتیب ۳,۳۵، ۳,۱۲، ۳,۰۴ درصد در مقایسه با مدل قطعی کاهش یافته‌اند. (Yang et al., 2016)

یانگ و همکاران یک مدل دو هدفه به منظور بهینه‌سازی جدول زمان‌بندی سیستم حمل و نقل مترو با یک عملیات دوره‌ای ارائه کردند. هدف این مدل کمینه‌سازی مصرف خالص انرژی و کل زمان‌های سفر با در نظر گرفتن زمان‌های توقف تصادفی است. محققین در این مقاله ابتدا به ارائه مدل می‌پردازند سپس از الگوریتم ژنتیک برای حل مدل استفاده می‌کنند. مورد مطالعاتی این مقاله خط ایژوانگ شهر بیجینگ

### ۳- مدل برنامه‌ریزی تصادفی

از پرکاربردترین مدل‌های برنامه‌ریزی تصادفی، مدل‌های دارای محدودیت‌های تصادفی، مدل‌های دو مرحله‌ای و یا چند مرحله‌ای هستند. این مدل‌ها گاهی در برنامه‌ریزی تصادفی با هم ترکیب می‌شوند. در مقاله حاضر یک مدل دومرحله‌ای با اقتباس از ادبیات موضوع بهبود بخشیده شده است. ساختار ریاضی و کلی این مدل در زیر مشخص شده است.

$$\text{Min } Z = C(x) + E_{\omega}q(x, \omega) \quad (1)$$

$$\text{S. t. } x \in \Omega.$$

$$q(x, \omega) = \text{Min } g(y_{\omega}, x) \quad (2)$$

$$\text{S. t. } y_{\omega} \in \Phi_{\omega}.$$

در رابطه (۱)،  $C(x)$  کل زمان سفر قطارها است،  $\Omega$  نیز مجموعه جواب‌های شدنی برای ساخت جدول زمان‌بندی است. در این مرحله فرض می‌شود که یک برنامه زمان‌بندی با نام  $x$  و با هدف کاهش زمان‌های سیر ساخته می‌شود. در این زمان اطلاعات راجع به زمان‌های اعزام از ایستگاه مبدا، زمان‌های سیر مسیر، زمان‌های توقف در هر ایستگاه و حداقل سرفاصله در هر بلاک مشخص است. علاوه بر این‌ها این چنین در نظر گرفته می‌شود که اطلاعات در مورد زمان‌های واقعی سیر مسیر و همچنین زمان‌های اعزام واقعی مسیر، مشخص یا حداقل قابل تخمین است. در رابطه (۱)،  $q(x, \omega)$  تاخیر مورد انتظار نسبت به جدول زمان‌بندی  $x$  است که تحت سناریوهای متفاوت و با ارزش انتظاری  $(E_{\omega})$  تحت هر سناریو روی می‌دهند. رابطه (۲) نیز تابع هدف مرحله دوم را نشان می‌دهد که در حقیقت تاخیرات رویداده نسبت به زمان‌بندی  $x$  تحت سناریوهای متفاوت را کمینه می‌کند،  $\Phi_{\omega}$  نیز مجموعه‌ای شدنی از جداول زمان‌بندی تحت سناریوهای متفاوت برای جدول زمان‌بندی  $x$  است. در ادامه پارامترها و متغیرهای به کار رفته در مدل شرح داده می‌شود.

$$I: \text{ مجموعه قطارها، } |I| = n$$

$$J: \text{ مجموعه بلاک‌ها، } |J| = m$$

$$i: \text{ اندیس قطار}$$

$$j: \text{ اندیس بلاک}$$

$$\omega: \text{ اندیس رویداد سناریوی تصادفی}$$

$$d_{i,j}: \text{ مدت زمان توقف قطار } i \text{ در ایستگاه آغازین بلاک } j$$

$$h_j: \text{ فاصله زمانی ایمنی بین اتمام و اعزام دو قطار متوالی از بلاک } j$$

$$r_i: \text{ زمان اعزام قطار } i \text{ از ایستگاه مبدا}$$

$$r_{i,\omega}: \text{ زمان اعزام قطار } i \text{ از ایستگاه مبدا تحت سناریوی } \omega$$

$$f_{i,j}: \text{ مدت زمان سیر قطار } i \text{ در بلاک } j$$

$$f_{i,j,\omega}: \text{ مدت زمان سیر قطار } i \text{ در بلاک } j \text{ تحت سناریوی } \omega$$

$$TP_i: \text{ جریمه برای کل زمان سفر قطار } i$$

$$DP_i: \text{ جریمه برای تاخیر از برنامه زمان‌بندی شده توسط قطار } i$$

$$\Delta_{i,j}: \text{ کل زمان مکمل مجاز قابل تخصیص برای قطار } i \text{ در بلاک } j$$

$$\Delta'_{i,j}: \text{ کل زمان مکمل مجاز قابل تخصیص به قطار } i \text{ در ایستگاه آغازین بلاک } j$$

$$E^{\omega}: \text{ ارزش انتظاری سناریوی } \omega$$

$$b_{i,j}: \text{ زمان اعزام قطار } i \text{ به بلاک } j$$

$$e_{i,j}: \text{ زمان اتمام سفر توسط قطار } i \text{ در بلاک } j$$

$$s_{i,j}: \text{ میزان زمان مکمل تخصیص‌یافته به قطار } i \text{ در بلاک } j$$

$$s'_{i,j}: \text{ میزان زمان مکمل تخصیص‌یافته به قطار } i \text{ در ایستگاه آغازین بلاک } j$$

متغیر باینری است که مقدار ۱ می‌گیرد اگر قطار  $i$

$$B_{i,j,k}: \text{ زودتر از قطار } k \text{ وارد بلاک } j \text{ شود در غیر}$$

این صورت این متغیر مقدار صفر به خود می‌گیرد.

متغیر باینری است که مقدار ۱ می‌گیرد اگر قطار  $i$

$$B_{i,j,k}: \text{ تحت سناریوی } \omega \text{ زودتر از قطار } k \text{ وارد بلاک } j$$

شود، در غیر این صورت این متغیر مقدار صفر به

خود می‌گیرد.

زمان مکمل قطار  $i$  در بلاک  $j$  و زمان سیر قطار  $i$  در بلاک  $j$  باید با زمان اتمام بلاک  $j$  توسط قطار  $i$  برابر باشد. رابطه (۶) بیان می‌کند که مجموع زمان اتمام بلاک  $j$  توسط قطار  $i$ ، زمان مکمل قطار  $i$  در ایستگاه آغازین بلاک  $j$  و زمان توقف قطار  $i$  در ایستگاه آغازین بلاک  $j$  باید برابر با زمان شروع حرکت قطار  $i$  از بلاک  $j$  باشد. روابط (۷) و (۸) بیان می‌کنند که در هر بلاک تنها یک قطار می‌تواند حضور داشته باشد بنابراین اگر قطار  $i$  زودتر از قطار  $k$  به بلاک  $j$  وارد شود، قطار  $k$  لزوماً باید به اندازه  $h_j$  پس از اینکه قطار  $i$  مسیر بلاک  $j$  را طی کرد وارد بلاک  $j$  شود. عکس این موضوع نیز صادق است. رابطه (۹) بیان می‌کند که زمان‌های مکمل تخصیص یافته به هر قطار در هر بلاک باید کوچکتر از میزان مجاز در نظر گرفته شده برای هر قطار در هر بلاک باشد. رابطه (۱۰) بیان می‌کند که زمان‌های مکمل تخصیص یافته به هر قطار در هر ایستگاه باید کوچکتر از میزان مجاز در نظر گرفته شده برای هر قطار در هر ایستگاه باشد.

### ۳-۲- مرحله دوم مدل تصادفی

همانطور که گفته شد ساختار مدل به این ترتیب است که در مرحله دوم و پس از مشخص شدن زمان‌های سیر بلاک‌ها، زمان‌های اعزام و ورود نیز مشخص می‌شود. در این مرحله مدل با هدف کاهش اختلاف بین زمان‌بندی انجام گرفته در مرحله اول و زمان‌های مشخص شده در مرحله دوم به دنبال یک جدول زمان‌بندی بهینه نزدیک به واقعیت است.

$$\text{Min } C_2 = \sum_{i=1}^n DP_i(e_{i,m,\omega} - e_{i,m}). \quad (11)$$

Subject to:

$$b_{i,0,1} = r_{i,\omega}, \quad \forall i \in I. \quad (12)$$

$$e_{i,j,\omega} \geq b_{i,j,\omega} + f_{i,j,\omega}, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (13)$$

$$b_{i,j,\omega} = e_{i,j-1,\omega} + d_{i,j}, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (14)$$

$$e_{i,j,\omega} + h_j \leq b_{k,j,\omega} + M \times (1 - B_{i,k,j,\omega}) \quad (15)$$

$$\forall i, k \in I, i \neq k, j \in J$$

$$b_{i,j,\omega}: \text{ زمان اعزام قطار } i \text{ در بلاک } j \text{ تحت سناریوی } \omega$$

$$e_{i,j,\omega}: \text{ زمان اتمام سفر توسط قطار } i \text{ در بلاک } j \text{ تحت سناریوی } \omega$$

در ادامه، مدل ریاضی دو مرحله‌ای ارائه می‌شود که به ترتیب تابع هدف و محدودیت‌های مدل مذکور بررسی می‌شوند.

### ۳-۲- مرحله اول مدل تصادفی

همانگونه که پیش از این اشاره شد مدل حاضر یک مدل تصادفی دو مرحله‌ای است. در این قسمت به بررسی ساختار ریاضی مدل تصادفی در مرحله اول می‌پردازیم.

$$\text{Min } C_1 = \sum_{i=1}^n TP_i(e_{i,m} - r_i). \quad (3)$$

Subject to:

$$b_{i,1} = r_i, \quad \forall i \in I. \quad (4)$$

$$e_{i,j} = b_{i,j} + f_{i,j} + s_{i,j}, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (5)$$

$$b_{i,j} = e_{i,j-1} + d_{i,j} + s'_{i,j} \quad (6)$$

$$\forall i \in I, j \in J$$

$$e_{i,j} + h_j \leq b_{k,j} + M \times (1 - B_{i,k,j}) \quad (7)$$

$$\forall i, k \in I, i \neq k, j \in J$$

$$e_{k,j} + h_j \leq b_{i,j} + M \times B_{i,k,j} \quad (8)$$

$$\forall i, k \in I, i \neq k, j \in J$$

$$s_{i,j} \leq \Delta_{i,j}, \quad \forall i \in I, j \in J. \quad (9)$$

$$s'_{i,j} \leq \Delta'_{i,j}, \quad \forall i \in I, j \in J. \quad (10)$$

رابطه (۳) تابع هدف مرحله اول مدل را نشان می‌دهد که مجموع زمان سیر سفر قطارها را با توجه به ضریب جریمه زمان سفر هر قطار می‌نیمم می‌کند. بدیهی است به دلیل آن‌که مدل از جنس مینیم‌سازی است هر قطاری که دارای ضریب جریمه بالاتری باشد، مدل به سمتی حرکت می‌کند که آن قطار مدت زمان سفر کمتری را داشته باشد. رابطه (۴) بیان می‌کند که زمان اعزام قطار  $i$  از بلاک مبدا باید با متغیر زمان شروع حرکت از ایستگاه مبدا برابر باشد. رابطه (۵) بیان می‌کند که مجموع زمان شروع حرکت هر قطار  $i$  از بلاک  $j$

مختلف، سناریوهای مختلفی تعریف شوند. پارامترهایی که در این مدل به صورت سناریویی در نظر گرفته شده‌اند پارامتر زمان سیر مسیر توسط هر قطار در هر ایستگاه و زمان حرکت از مبدا هر قطار است. نحوه تعریف این سناریوها بدین گونه است که در هر بلاک و برای هر قطار ۳ حالت مختلف خوش‌بینانه، متوسط و بدبینانه در نظر گرفته شده است. پس از تقسیم داده‌ها به سه گروه، میانگین هر گروه محاسبه می‌شود و به عنوان زمان سیر بلاک و قطار مورد نظر تحت سه حالت مذکور مشخص می‌گردد. حال اگر فرض شود که تعداد  $m$  بلاک در طول مسیر موجود باشد، آن‌گاه تعداد حالاتی را که یک قطار می‌تواند این مسیر را ببیماید،  $3^m$  است. حال اگر فرض شود که  $n$  قطار موجود باشد، تعداد کل حالاتی که می‌تواند رخ می‌دهد،  $3^{(m*n)}$  است. این میزان، میزان کل سناریوهای موجودی است که می‌تواند رخ دهد، بدیهی است تعیین تمام این سناریوها و استفاده از آن‌ها در مدل امکان‌پذیر نیست و یا شاید حتی مورد نیاز نباشد. بنابراین با توجه به تعداد سناریوها می‌بایست تعدادی سناریو از داده‌ها تولید شود و سپس وارد مدل شود. نحوه تولید این سناریوها به این صورت است که ابتدا و پس از حذف داده‌های پرت، احتمال رویداد هر یک از حالات خوش‌بینانه، متوسط و بدبینانه در هر بلاک و برای هر قطار محاسبه می‌گردد. به عنوان نمونه پس از حذف داده‌های پرت اختلاف بیشترین زمان سیر و کمترین زمان سیر مشخص می‌شود سپس با تقسیم این عدد بر ۳ می‌توان کلیه زمان‌های سیر برای یک بلاک را در یکی از سه حالات خوش‌بینانه، متوسط و بدبینانه جای داد. میانگین اعداد مختص به هر گروه می‌تواند زمان سیر تحت هر سناریو را نشان دهد. لازم به ذکر است برای تولید زمان‌های حرکت از مبدا نیز روش مشابهی در نظر گرفته شده است.

#### ۴- حل مدل (مطالعه موردی: مسیر ریلی

##### تهران- مشهد)

در راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران مسیر تهران-مشهد به عنوان یکی از پر ترددترین و مهم‌ترین مسیرهای کشور شناخته می‌شود. تهران به عنوان پایتخت ایران و اصلی‌ترین هاب راه‌آهن کشور و مشهد به دلیل داشتن جنبه گردشگری و مذهبی برجسته، مسیر تهران-مشهد را به مهم‌ترین مسیر

$$e_{k,j,\omega} + h_j \leq b_{i,j,\omega} + M \times B_{i,k,j,\omega} \quad (16)$$

$$\forall i, k \in I, i \neq k, j \in J$$

$$b_{i,j,\omega} \geq b_{i,j} , \quad \forall i \in I, j \in J. \quad (17)$$

$$e_{i,j,\omega} \geq e_{i,j} , \quad \forall i \in I, j \in J. \quad (18)$$

رابطه (۱۱) تابع هدف مرحله دوم مدل را نشان می‌دهد که اختلاف بین زمان اتمام سفر توسط قطار  $i$  در بلاک آخر تحت سناریوی  $\omega$  و زمان اتمام سفر توسط قطار  $i$  در بلاک آخر را مینیمم می‌کند. به عبارت دیگر رابطه فوق اختلاف مورد انتظار بین زمان‌های اتمام سفر سناریویی و زمان‌های سفر برنامه‌ای را نشان می‌دهد. رابطه (۱۲) بیان می‌کند که زمان شروع حرکت قطار  $i$  از بلاک مبدا تحت سناریوی  $\omega$  باید برابر با زمان اعزام قطار  $i$  از ایستگاه مبدا باشد. رابطه (۱۳) بیان می‌کند که مجموع زمان شروع حرکت قطار  $i$  از بلاک  $j$  تحت سناریوی  $\omega$  با زمان سیر قطار  $i$  در بلاک  $j$  تحت سناریوی  $\omega$  باید کوچکتر از زمان اتمام بلاک  $j$  توسط قطار  $i$  تحت سناریوی  $\omega$  باشد. رابطه (۱۴) بیان می‌کند که مجموع زمان اتمام بلاک  $i$  از  $j$  توسط قطار  $i$  تحت سناریوی  $\omega$  با زمان توقف قطار  $i$  در ایستگاه آغازین بلاک  $j$  باید کوچکتر از زمان شروع حرکت قطار  $i$  از بلاک  $j$  تحت سناریوی  $\omega$  باشد. روابط (۱۵) و (۱۶) نیز به مانند روابط (۷) و (۸) بیان می‌کنند که در هر بلاک تنها یک قطار می‌تواند حضور داشته باشد بنابراین اگر قطار  $i$  زودتر از قطار  $k$  تحت سناریوی  $\omega$  به بلاک  $j$  وارد شود، قطار  $k$  لزوماً باید به اندازه  $h_j$  پس از اینکه قطار  $i$  مسیر بلاک  $j$  را طی کرد وارد بلاک  $j$  شود. عکس این موضوع نیز صادق است. روابط (۱۷) و (۱۸) نیز به ترتیب بیان می‌کنند که زمان شروع حرکت قطار  $i$  از بلاک  $j$  تحت سناریوی  $\omega$  و زمان اتمام حرکت قطار  $i$  در بلاک  $j$  تحت سناریوی  $\omega$  باید بزرگتر و یا مساوی از زمان شروع حرکت قطار  $i$  از بلاک  $j$  و زمان اتمام حرکت قطار  $i$  در بلاک  $j$  باشند. به عبارت دیگر همانند اکثر مطالعات انجام شده در زمینه توزیع تاخیرات، در این مدل نیز محدودیتی اعمال می‌شود که به قطارها اجازه نمی‌دهد زودتر از زمان بندی برنامه‌ای به ایستگاه بعد برسند.

#### ۳-۳- تعریف سناریوها

از آن‌جا که مدل حاضر یک مدل بر مبنای سناریوها است، می‌بایست برای در نظر گرفتن شرایط و احتمالات

راه‌آهنی کشور مبدل کرده‌اند. این مسیر سالانه پذیرای خیل عظیمی از مسافرینی است که قصد عزیمت به این دو شهر را دارند. از این رو و با توجه به مدل مورد نظر که یک مدل مطابق با مسیرهای دوخطه است و اهمیت مسیر یاد شده، این مسیر به عنوان مورد مطالعاتی برای پیاده‌سازی مدل یاد شده انتخاب گشته است. با توجه به آمار اخذ شده در هنگام نگارش این مقاله، در این مسیر روزانه به طور تقریبی حدود ۲۲ قطار از تهران با عبور از ۵۰ ایستگاه به مقصد مشهد حرکت می‌کنند. از بین این ۲۲ قطار، ۳ قطار ترنسست با حداکثر سرعت مجاز ۱۶۰ کیلومتر در ساعت و سایر قطارها نیز از یک نوع و با حداکثر سرعت ۱۲۰ کیلومتر در ساعت اعزام می‌گردند. برای حل این مدل نیز از موتورحل Cplex استفاده گردیده است.

#### ۱-۴- نتایج

برای آن‌که بتوانیم مدل تصادفی را با زمان‌بندی فعلی راه آهن مقایسه کنیم نیاز است تا مقادیر مرحله اول یعنی زمان‌های سفر برنامه‌ای و مقادیر مرحله دوم یعنی میزان تاخیر حاصل از نوسانات زمان‌های سفر را برای زمان‌بندی راه‌آهن اندازه‌گیری کنیم. از آن‌جا که زمان‌های اعزام و زمان‌های ورود به مقصد برنامه‌ای در زمان‌بندی راه‌آهن مشخص است بنابراین مقادیر زمان‌های سفر برنامه‌ای که همان هزینه مرحله اول است، مشخص است و در این صورت تنها نیاز است تا هزینه مرحله دوم یعنی هزینه تاخیر را با زمان‌بندی انجام شده (زمان‌بندی موجود) در مرحله اول بدست آوریم، که این کار از طریق شبیه‌سازی مرحله دوم امکان پذیر است. چراکه با وجود داشتن اطلاعات زمان‌های سیر واقعی این امکان وجود دارد که زمان‌های اعزام و ورود واقعی را از طریق مدلی شبیه به مدل مرحله دوم بدست بیاوریم. در این صورت می‌توان هزینه تاخیرات زمان‌بندی فعلی را با زمان‌بندی تصادفی مقایسه کرد. مدل ارائه شده به ازای ضرایب جریمه زمان سفر و تاخیر، نتایج متفاوتی را نشان می‌دهد. جدول ۱ مربوط به مقایسه نتایج مدل تصادفی و زمان‌بندی فعلی راه‌آهن است، این مقایسه در حالتی انجام گرفته است که ضریب جریمه تاخیر و ضریب جریمه زمان سفر هر دو ۱ در نظر گرفته شده است. با توجه به مقادیر جدول ۱ مشاهده می‌شود که جمع کل زمان‌های سفر برای ۲۲ قطار در این حالت حدوداً به ۱۱۲۹۲ دقیقه می‌رسد که به

طور میانگین زمان سفر هر قطار حدوداً برابر با ۸ ساعت و ۴۵ دقیقه می‌شود. همچنین در این حالت، تاخیری که به سیستم به دلیل وجود زمان‌های سیر متغیر اعمال می‌شود در حدود ۳۴۳۸ دقیقه خواهد بود که به طور میانگین به ازای هر قطار حدوداً برابر با ۲ ساعت و ۳۰ دقیقه است. در این حالت جمع کل تابع هدف نسبت به زمان‌بندی راه‌آهن کاهش پیدا کرده است اما از آن‌جا که ضرایب جریمه تاخیرات قطارها با ضرایب جریمه زمان سفر قطارها یکی دیده شده است و مقدار آن یک در نظر گرفته شده است بنابراین مدل تصادفی با توجه به این که هر دو جز تابع هدف ارزش یکسان دارند به گونه‌ای عمل می‌کند که در مجموع تابع هدف کاهش یابد و این باعث می‌شود تاخیرات حاصل از نوسانات زمان‌های سیر زیاد شود. این نکته نشان می‌دهد که اگر بخواهیم مدل را به سمتی سوق دهیم که تاخیرات را کاهش دهد، نیازمند آن هستیم تا ضریب جریمه تاخیر را نسبت به ضریب جریمه زمان سفر برنامه‌ای افزایش دهیم چرا که مشخص است که برنامه‌ای که دارای زمان‌های سفر برنامه‌ای کم اما دارای تاخیرات زیاد باشد سودمند نخواهد بود. به طور کلی بدیهی است که هر چه زمان‌های سفر افزایش یابد، تاخیرات حاصل از نوسانات زمان‌های سیر کاهش می‌یابد و بالعکس زیرا مدل برای آن‌که تاخیرات را کاهش دهد نیازمند آن است که با تخصیص زمان‌های مکمل از به وجود آمدن آن‌ها جلوگیری کند که این خود باعث افزایش زمان‌های سیر برنامه‌ای قطار است و نتایج حاصل از مدل تصادفی حاضر نیز این مهم را تایید می‌کند.

همانطور که جدول ۲ نشان می‌دهد با افزایش ضریب جریمه تاخیر، تاخیر محاسبه شده به طور چشمگیری کاهش پیدا می‌کند و از مقدار ۳۴۳۸ دقیقه به ۱۳۴ دقیقه می‌رسد، همچنین این کاهش مسلماً با افزایش زمان‌های سفر برنامه‌ای همراه است که در اینجا این مقدار از ۱۱۲۹۲ به ۱۴۶۳۳ دقیقه می‌رسد که در این صورت از زمان‌های سفر برنامه‌ای محاسبه شده در زمان‌بندی راه‌آهن به میزان ۵۴۸ دقیقه بیش‌تر است. همچنین تاخیر محاسبه شده در این حالت به طور میانگین حدوداً ۶ دقیقه است، که در همین حالت ۲۵ دقیقه به ازای هر قطار نسبت به زمان‌بندی راه‌آهن، تاخیر کاهش یافته است. همانطور که ملاحظه می‌شود، مجموع کل تابع هدف همچنان کوچکتر از مجموع کل تابع هدف در راه‌آهن است. در حقیقت مدل تصادفی در این حالت پیشنهاد می‌کند که

می‌توان با اضافه نمودن حدود ۵۵۰ دقیقه به زمان‌های سفر، همین مقدار از تاخیرات را کاهش و با تخصیص بهینه زمان‌های مکمل، باعث عملی‌تر شدن زمان‌بندی شد. به طور کلی می‌توان گفت که در این حالت تاخیرات زمان‌بندی حاصل از مدل تصادفی نسبت به زمان‌بندی راه‌آهن حدود ۸۰ درصد کاهش یافته است.

جدول ۱. مقایسه نتایج مدل تصادفی و زمان‌بندی موجود در راه‌آهن (ضریب جریمه تاخیر ۱)

میزان اختلاف	مدل تصادفی (دقیقه)	زمان‌بندی فعلی (دقیقه)
تابع هدف مرحله اول (زمان سفر برنامه‌ای)	۱۱۲۹۲	۱۴۰۸۵
تابع هدف مرحله دوم (تأخیر برنامه‌ای)	۳۴۳۸	۶۸۳
جمع کل	۱۴۷۳۰	۱۴۷۶۸

جدول ۲. مقایسه نتایج مدل تصادفی و زمان‌بندی موجود در راه‌آهن (ضریب جریمه تاخیر ۲)

میزان اختلاف	مدل تصادفی (دقیقه)	زمان‌بندی فعلی (دقیقه)
تابع هدف مرحله اول (زمان سفر برنامه‌ای)	۱۴۶۳۳	۱۴۰۸۵
تابع هدف مرحله دوم (تأخیر برنامه‌ای)	۱۳۴	۶۸۳
جمع کل	۱۴۷۶۷	۱۴۷۶۸

## ۲-۴- مقایسه گراف زمان‌بندی مدل تصادفی و زمان‌بندی فعلی

می‌گیرد. به طور مثال برای سه قطار اول که از نوع قطارهای ترنست هستند، به وضوح مشخص است که مدل تصادفی با تخصیص زمان‌های مکمل در مجموع زمان سفر قطارها را افزایش داده است.

در ادامه بخشی از گراف زمان‌بندی راه‌آهن و گراف زمان‌بندی با مدل تصادفی و مقایسه این دو نشان داده شده است. گراف به دست آمده با زمان‌بندی تصادفی با مقادیر ضریب جریمه تاخیر ۲ و ضریب جریمه زمان سفر ۱ محاسبه گردیده است. همانطور که مشاهده می‌شود در گراف زمان‌بندی مدل تصادفی نسبت به زمان‌بندی فعلی تفاوت‌هایی دیده می‌شود، این تفاوت‌ها از آنجا حاصل می‌شود که مدل تصادفی برای آن‌که بتواند تاخیرات را کاهش دهد در برخی مسیرها زمان‌های مکمل بیشتر و در برخی زمان‌های مکمل کمتری نسبت به زمان‌بندی راه‌آهن در نظر

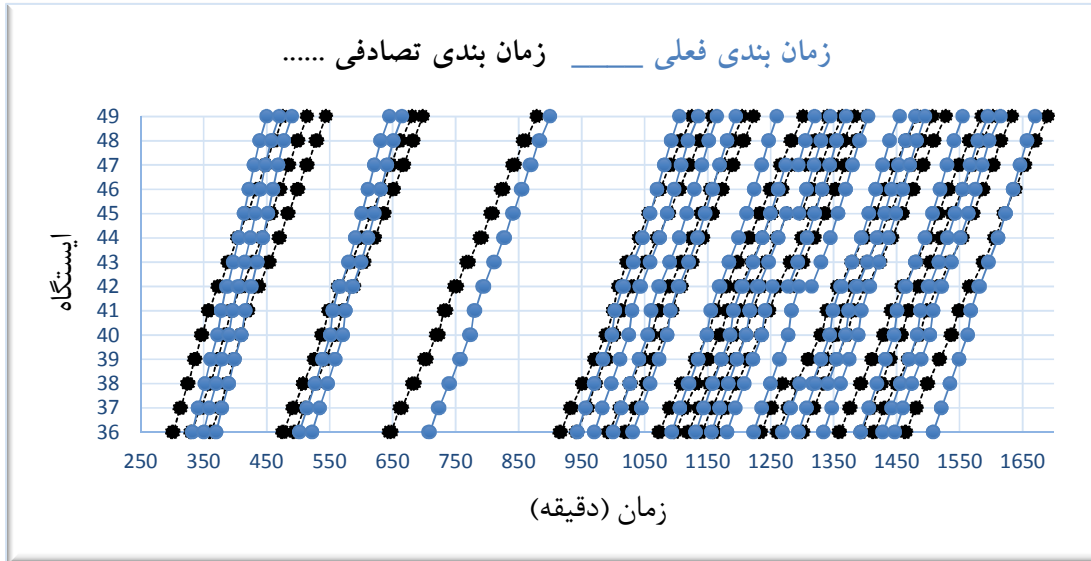
## ۳-۴- تحلیل حساسیت

نمودار ۲ رابطه بین افزایش ضریب جریمه تاخیر و میزان زمان‌های مکمل اختصاص یافته به قطارها را نشان می‌دهد.



همان‌گونه که در این نمودار مشخص است با افزایش ضریب جریمه تاخیر برای تمام قطارها مجموع زمان مکمل اختصاص یافته برای تمام قطارها نیز افزایش می‌یابد. هنگامی که مقدار ضریب جریمه تاخیر ۱ است مقدار زمان مکمل

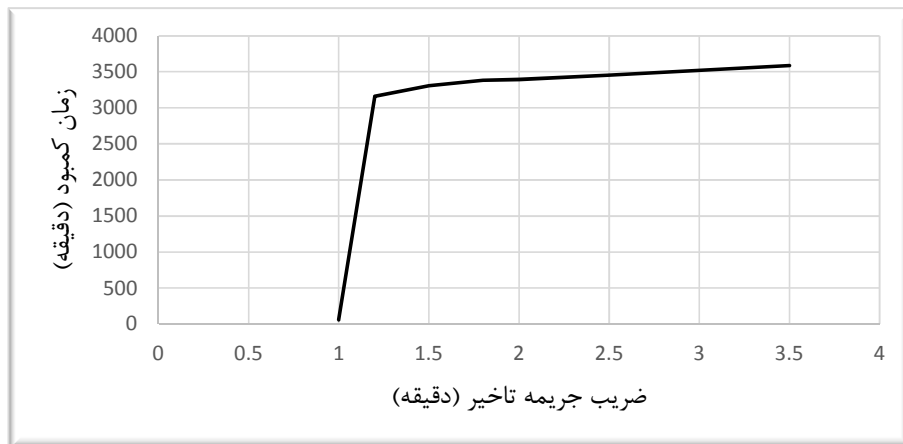
تخصیص یافته عددی در حدود ۶۰ دقیقه است که این مقدار به طور متوسط برابر با ۳ دقیقه برای هر قطار است.



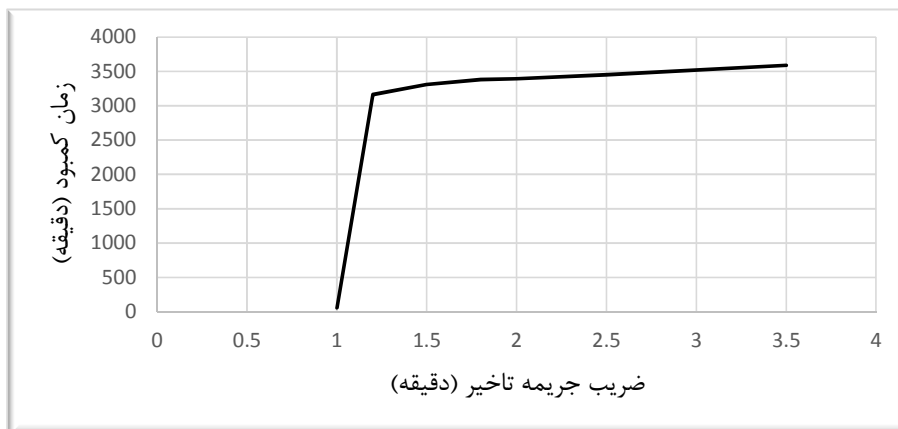
نمودار ۱. مقایسه بخشی از گراف زمان بندی موجود با گراف حاصل از پیاده‌سازی مدل تصادفی

به عبارت دیگر، ایستگاه‌هایی که قطارها از آن عبور می‌کنند تنها ۳ دقیقه زمان مکمل برای آن‌ها در نظر گرفته شود. لازم به ذکر است که زمان مکمل زمانی است که برای جلوگیری از تاخیرات حاصل از نوسانات زمان‌های سیر بلاک‌ها در نظر گرفته می‌شود بنابراین در حالت مذکور به دلیل آن‌که زمان مکمل در نظر گرفته شده بسیار اندک است در نتیجه انتظار تاخیرات زیادی را می‌توان در این حالت داشت اما با افزایش ضریب جریمه تاخیر، میزان زمان‌های مکمل به طور چشمگیری افزایش می‌یابد به گونه‌ای که با رساندن ضریب جریمه تاخیر از ۱ به ۱/۲، زمان اختصاص یافته به عنوان زمان‌های مکمل، عددی برابر با ۳۱۶۰ می‌شود. این مقدار به طور متوسط برابر با ۱۴۳ دقیقه برای هر قطار است. یعنی به ازای افزایش ۰/۲ ضریب جریمه تاخیر، زمان‌های مکمل اختصاص یافته از ۳ دقیقه به ۱۴۳ دقیقه رسیده است که باعث کاهش چشمگیر تاخیرات می‌شود. عدد به دست آمده را از جنبه دیگری نیز می‌توان بررسی نمود و آن میزان زمان مکمل اختصاص یافته به ازای هر بلاک است. این میزان برای هر بلاک چیزی در حدود ۲ دقیقه و ۴۰ ثانیه است. این بدان

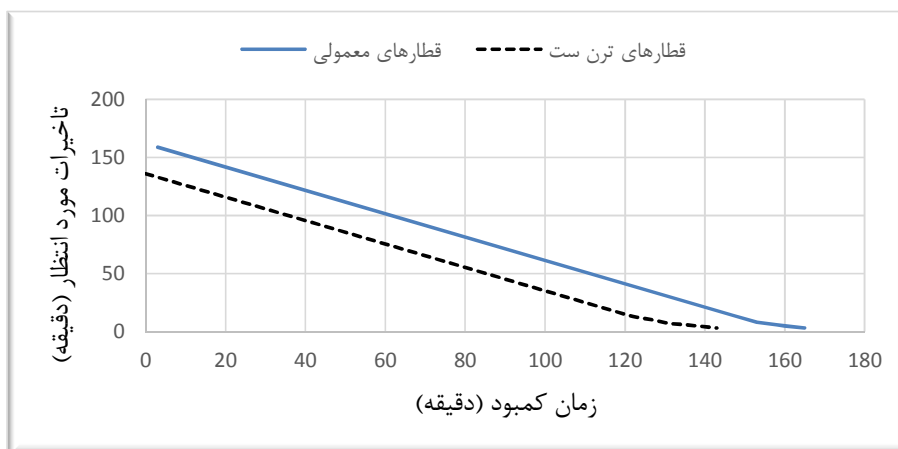
معناست که اگر بنا باشد که میزان تاخیرات حاصل از نوسانات زمان‌های سیر به نسبت قابل توجهی کاهش داده شود، باید به طور میانگین برای هر بلاک ۲ دقیقه و ۴۰ ثانیه زمان مکمل به حداقل زمان‌های سیر اضافه شود. نمودار ۳ رابطه بین میزان ضریب جریمه تاخیر و میزان تاخیرات را نشان می‌دهد. همانطور که در این نمودار دیده می‌شود با افزایش ضرایب جریمه تاخیر، مقادیر تاخیرات حاصل از نوسانات زمان‌های سیر کاهش می‌یابد. هنگامی که ضریب جریمه تاخیر عدد ۱ است، مقدار تاخیر عددی معادل ۳۴۳۸ دقیقه است اما با افزایش ضریب جریمه تاخیر و رساندن آن به مقدار ۱/۲، میزان تاخیرات به عدد ۲۹۸ دقیقه برای تمام قطارها کاهش می‌یابد این مقدار معادل ۱۴۳ دقیقه زمان مکمل برای تمام قطارهاست. به عبارت دیگر با افزایش ۰/۲ ضریب جریمه تاخیر، میزان تاخیرات برای هر قطار به طور میانگین به ۱۳ دقیقه کاهش می‌یابد. در صورتی که مقدار افزایش ضریب جریمه تاخیر به عددی بیش از ۳/۵ برسد، آن‌گاه میزان تاخیرات به ازای هر قطار به عددی کمتر از ۳ دقیقه می‌رسد.



نمودار ۲. رابطه بین افزایش خزیه تأخیر و میزان زمان‌های مکمل اختصاص یافته به قطارها



نمودار ۳. رابطه بین میزان خزیه تأخیر و میزان تاخیرات مورد انتظار



نمودار ۴. مقایسه‌ی رابطه بین زمان‌های مکمل و تاخیرات مورد انتظار برای قطارهای ترن ست و قطارهای معمولی

نمودار ۴ رابطه بین زمان‌های مکمل و میزان تاخیرات را نشان می‌دهد. با مشخص شدن این نمودار می‌توان تعیین نمود که با در نظر گرفتن چه میزان از زمان‌های مکمل، می‌توان چه میزان از تاخیرات را کاهش داد. این نمودار برای دو نوع قطار ترن‌ست و معمولی در یک نمودار رسم شده است و تاخیرات مورد انتظار نیز به ازای هر قطار در نظر گرفته شده است. همانطور که این نمودار نشان می‌دهد می‌توان مشاهده نمود که به ازای در نظر گرفتن ۳ دقیقه زمان مکمل برای هر قطار معمولی به طور متوسط با تاخیر ۱۶۰ دقیقه‌ای روبرو خواهیم بود اما با افزایش زمان‌های مکمل و رساندن آن‌ها به مقدار تقریباً ۱۶۵ دقیقه، میزان تاخیرات به طور چشمگیری کاهش پیدا خواهد کرد و این مقدار تقریباً به کمتر از ۳ دقیقه خواهد رسید. در مورد قطارهای ترن‌ست نیز روند مشابهی وجود دارد با این تفاوت که به دلیل آن‌که میزان نوسانات سیر بلاک‌ها در این قطارها کم‌تر است بنابراین به طور کلی میزان تاخیرات نیز کم‌تر است و همانطور که مشخص است نمودار مربوط به قطارهای ترن‌ست در زیر نمودار قطارهای معمولی قرار گرفته است. این خود می‌تواند اهمیت بیش‌تر قطارهای ترن‌ست را نسبت به قطار معمولی نشان دهد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک مدل زمان‌بندی قطارها با رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی ارائه شد. همچنین نتایج حاصل از آن با زمان‌بندی فعلی راه‌آهن ایران مقایسه گردید. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که برای به حداقل رساندن تاخیرات می‌توان دو رویکرد را دنبال کرد. رویکرد اول آن است که میزان زمان‌های مکمل در نظر گرفته شده در زمان‌بندی راه‌آهن را تا حد ممکن بیش‌تر کرد که این امکان وجود داشته باشد که نوسانات حاصل از زمان‌های سیر بلاک‌ها خنثی شوند. رویکرد دوم نیز آن است که با بهبود امکانات سخت افزاری و کم نمودن نوسانات زمان‌های سیر بلاک‌ها، تاخیرات به حداقل برسد و به زمان‌های برنامه‌ای نزدیک‌تر شوند. بدون شک راه‌حل دوم مشکل‌تر است اما در صورت محقق شدن، رضایتمندی مشتری را بیش‌تر به همراه خواهد داشت. چراکه راه‌حل اول با اینکه زمان‌های تاخیر برنامه‌ای را به حداقل می‌رساند اما باعث افزایش زمان‌های سفر شده و این خلاف خواست مشتریان است. نکته‌ی دیگر آن‌که مدل یاد شده با هدف کاهش زمان‌های سفر و تاخیرات ارائه شده است. این

موضوع لازم به ذکر است که اگر در برنامه بی‌توجهی به ظرفیت زمان‌های سفر کاهش یابد، تاخیرات برنامه‌ای افزایش می‌یابد و این باعث کاهش کارایی و ناراضی مشتری می‌گردد. در عوض هر چه تاخیرات برنامه‌ای کاهش یابد زمان سفر افزایش می‌یابد این بدان معناست که اگر چه این موضوع به لحاظ کاهش تاخیرات مثبت تلقی می‌شود اما چون از تمام ظرفیت و امکانات استفاده نگردیده است و زمان‌های سفر زیاد است مجدداً موجب کاهش رضایتمندی مشتریان می‌گردد. بنابراین، پیدا کردن یک نقطه‌ی تعادل مابین تاخیرات برنامه‌ای و زمان‌های سفر یکی از اهداف ارایه این مدل یاد شده بود. یکی دیگر از نتایج بدست آمده در این پژوهش از مقایسه بین زمان‌های تاخیرات در قطارهای ترن‌ست و قطارهای معمولی حاصل می‌شود. از مقایسه نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل مشخص شد که میزان تاخیرات در قطارهای ترن‌ست تا حدودی کمتر از قطارهای معمولی است اما با توجه به اینکه این قطارها از نوع قطارهای پر سرعت هستند انتظار می‌رود تاخیرات کمتری داشته باشند. موضوع مورد مطالعه در این پژوهش یکی از جدیدترین مطالعاتی بود که تاکنون به خصوص در کشور ایران ارائه شده است از این رو بدیهی است امکان بررسی تمام جنبه‌های موضوع مورد مطالعه در پروژه حاضر وجود نداشته باشد و از این جهت باب تحقیق و بررسی در حوزه موضوع مورد مطالعه باز است. مدلی که در این پژوهش ارائه شد، یک مدل تصادفی در حوزه زمان‌بندی حرکت قطارها است. این امکان وجود دارد تا با در نظر گرفتن مفروضات و شرایط جدید، مدل را به شرایط واقعی نزدیک‌تر نمود. یکی از این موارد در نظر گرفتن زمان‌های توقف در ایستگاه‌ها تحت سناریوهای مختلف است همانگونه که در بخش‌های قبل مطرح شد، مدل ارائه شده زمان‌های توقف در ایستگاه‌ها را ثابت فرض نموده و تنها زمان‌های سیر بلاک‌ها و زمان‌های شروع از مبدأ به عنوان پارامترهای تصادفی مدل در نظر گرفته شده‌اند، از این رو مدل ارائه شده تنها تاخیرات حاصل از نوسانات سیر بلاک‌ها را محاسبه و کمینه می‌کند. در صورتی که در عمل برخی از تاخیرات به دلیل وجود زمان‌های توقف متفاوت به وجود می‌آید. اضافه شدن این فرض به مدل نتایج را به نتایج واقعی نزدیک‌تر کرده و مدل را کاربردی‌تر می‌کند. همچنین مدل ارائه شده یک مدل متناسب با مسیرهای دوخطه بود، این امکان وجود دارد تا با متناسب سازی مدل مورد نظر در

-Meng, L. and Zhou, X., (2011), "Robust single-track train dispatching model under a dynamic and stochastic environment: a scenario-based rolling horizon solution approach", *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(7), pp.1080-1102.

-Niu, Y.T. and Meng, L.Y., (2014), "Optimizing Slack Time Allocation in Train Timetable: A Two-Stage Stochastic Recourse Model. In Proceedings of the 2013 International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation (EITRT2013)-Volume I. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 245-252.

-Yang, X., Chen, A., Ning, B. and Tang, T., (2016), "A stochastic model for the integrated optimization on metro timetable and speed profile with uncertain train mass", *Transportation Research Part B: Methodological*, 91, pp.424-445.

-Yuan, J. and Hansen, I.A., (2007), "Optimizing capacity utilization of stations by estimating knock-on train delays. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(2), pp.202-217.

-Kroon, L.G., Dekker, R. and Vromans, M.J., (2007), "Cyclic railway timetabling: a stochastic optimization approach. In *Algorithmic Methods for Railway Optimization*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 41-66.

مسیرهای تک خطه و پیاده سازی آن، کارایی مدل مذکور در این مسیرها نیز بررسی شود.

## ۶- مراجع

-Gao, Y., Yang, L. and Li, S., (2016), "Uncertain models on railway transportation planning problem" *Applied Mathematical Modelling*, 40(7-8), pp.4921-4934.

-Hassannayebi, E., Zegordi, S.H., Amin-Naseri, M.R. and Yaghini, M., (2017), "Train timetabling at rapid rail transit lines: a robust multi-objective stochastic programming approach. *Operational Research*, 17(2), pp.435-477.

-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*, 11(1), pp.81-89.

-Kroon, L., Maróti, G., Helmrich, M.R., Vromans, M. and Dekker, R., (2008), "Stochastic improvement of cyclic railway timetables", *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(6), pp.553-570.

# Train Timetabling Model for Double-Tracks; Stochastic Programming Approach

*Amir Ghayoumi, M.Sc., Grad., Railway Transportation Engineering, Railway Department, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*Ali Poyani, M.Sc., Grad., Railway Transportation Engineering, Railway Department, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*E-mail: amir.ghayoumi@outlook.com*

Received: March 2020-Accepted: September 2020

## ABSTRACT

Railway systems just like any other systems require optimized and exact planning to use maximum system capacity. Train timetabling is one the most important programs in railway systems that has a great deal of impact on other operations and programs. In years, there have been a lot of researchers who have been studying about this subject. Meanwhile, over recent years and because of the railway systems getting more complicated, using of uncertainty models are more focused by researchers. Stochastic programming is one the oldest current approaches for considering the uncertainty between all other techniques. In fact stochastic programming intends to realize models and results by considering stochastic parameters in real world. After studying the current models in the literature, we presented a two stage stochastic program according to Iranian railways conditions and constraints. The model intends to minimize trip times of trains at the first stage and minimize delays which occur over segment running time fluctuations at the second stage. The model has been implemented on one of the double tracks in Iranian railways, and the result has been compared with the current time table at the end. The results show that it still is necessary to add slack times in current time tables to minimize delays over segment running time fluctuations.

**Keywords:** Railway Transportation, Stochastic Programming, Train Timetabling, Uncertainty Models