



بررسی عوامل مؤثر بر ایجاد تأخیر در حمل و نقل ریلی شهری؛ مطالعه‌ی موردی خطوط متروی شهر تورنتو در کانادا

محمد رضایی منش^۱، رضا امین^۲، علی خدایی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش برنامه‌ریزی حمل و نقل، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران برنامه‌ریزی حمل و نقل دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- استاد تمام و عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر

فقط آدرس پست الکترونیک نویسنده رابط (M.rezaeimaneh911@gmail.com)

چکیده

امروزه حمل و نقل همگانی نقشی حیاتی در زندگی شهری ایفا می‌کند. یکی از روش‌های محبوب حمل و نقل همگانی، حمل و نقل ریلی یا به عبارت دیگر استفاده از مترو می‌باشد. با رشد جمعیت و هم‌چنین افزایش تقاضا برای جابه‌جایی، میزان شلوغی در ایستگاه‌های مترو و داخل قطار نیز افزایش یافته است. یکی از اثرات مستقیم شلوغی در مترو، ایجاد تأخیر در رسیدن و حرکت کردن قطارها می‌باشد که مستقیماً بر روی سرعت حمل و نقل ریلی اثرگذار است. اگر میزان تکرار تأخیرها و دقایق تأخیرها افزایش یابد، سطح رضایت مسافری و سطح خدمت سیستم حمل و نقل همگانی کاهش چشم‌گیری خواهد داشت. به همین منظور، شناسایی عوامل مؤثر بر افزایش تأخیر و کاهش سرعت حمل و نقل ریلی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق، مطالعه‌ای موردی بر روی تأخیرات ایجاد شده در خطوط متروی شهر تورنتو در کانادا مورد بررسی قرار گرفته است. طبق داده‌های جمع‌آوری شده، روزانه ۵۳ تأخیر به دلایل مختلف در خطوط متروی شهر تورنتو رخ می‌دهد. در مجموع ۷ سالی که داده‌های جمع‌آوری شده پوشش داده‌اند، قریب به ۱۴۰ هزار مورد تأخیر در ایستگاه‌های مختلف مترو مشاهده شده است. تعداد ساعات تلف شده در این ۷ سال برابر با ۴،۷۵۴ ساعت می‌باشد. برخی از عوامل ایجاد تأخیر از کنترل مسئولین و مجریان حمل و نقل همگانی خارج می‌باشد، اما تعداد زیادی از عوامل در کنترل مسئولین می‌باشد. بنابراین، شناسایی این عوامل به منظور کاهش تعداد و ساعات تأخیر ضروری می‌باشد. در این تحقیق، تعدادی از این عوامل شناسایی شده است.

کلمات کلیدی: حمل و نقل ریلی، عوامل تأخیر، مترو، تورنتو کانادا، حمل و نقل همگانی

۱- مقدمه

امروزه یکی از محبوب‌ترین شیوه‌های حمل و نقل عمومی، حمل و نقل ریلی است. طبق آمار منتشر شده تا سال ۲۰۱۸، تعداد ۲۱۲ شهر در جهان دارای سیستم حمل و نقل ریلی هستند (World Data Bank, ۲۰۲۳). از دلایل محبوبیت این شیوه حمل و نقل در مقایسه با دیگر شیوه‌های حمل و نقل عمومی می‌توان به افزایش ظرفیت با استفاده از زمین کمتر، کاهش تأثیرات مخرب بر محیط زیست، و هزینه کمتر اشاره کرد (Fouracre et al., 2023). یکی از راه‌های افزایش میزان استفاده از حمل و نقل ریلی و رضایتمندی مسافران، کاهش تأخیر قطارها می‌باشد. هم‌چنین، تأخیر در حمل و نقل ریلی به طور غیر



مستقیم بر ظرفیت تأثیرگذار است. (Dingler et al., 2009). بدین منظور، باید عوامل مؤثر بر تأخیر قطارها مورد بررسی قرار گرفته، و مهمترین عوامل تأخیر تعیین شوند.

طبق تحقیقات ورومانس و همکاران، و کری و کویسینسکی، برخی از دلایل ایجاد تأخیر در حمل و نقل ریلی عبارت است از: مشکلات فنی قطار، مشکلات زیرساختی، شرایط آب و هوایی، طولانی شدن زمان پیاده و سوار شدن مسافران، تصادف در تقاطع‌های ریل با جاده، و... (Vromans et al., 2006; Carey & Kwiecinski, 1994). همچنین دینگر و همکاران نشان دادند که حجم و نوع ترافیک عبوری از ریل نیز بر روی میزان تأخیر قطارها تأثیرگذار است. (Dingler et al., 2009) گورمن در تحقیقات خود نشان داد که عبور قطارهای جهت مخالف در ریل‌های مجاور، سبقت گرفتن قطارهای یک ریل از یکدیگر، سرفاصله بین قطارها، و حق تقدم در تقاطع‌های ریل با ریل و ریل با جاده نیز از عوامل ایجاد تأخیر در قطارها می‌باشند. (Gorman, 2009)

دلایلی که تا به اینجا برای ایجاد تأخیر در قطارها ذکر شد، در دسته عوامل اولیه قرار می‌گیرند. به عواملی که مستقیماً از خود قطار نشأت می‌گیرد عوامل اولیه گفته می‌شود. کری در تحقیقات خود نشان داد که برخی از عوامل ایجاد تأخیر در حمل و نقل ریلی، عوامل ثانویه هستند. عوامل ثانویه به آن دسته از عوامل گفته می‌شود که از قطارهای دیگر نشأت می‌گیرد و باعث تأخیر در قطار می‌شود. به عنوان مثال، اگر یک قطار به هر دلیلی با تأخیر به ایستگاه برسد، ممکن است باعث ایجاد تأخیر در زمان رسیدن قطارهای بعدی شود. در سیستم‌هایی که از ظرفیت بالایی برخوردار هستند، اگر یک قطار با تأخیر به ایستگاه برسد، می‌تواند در تعداد زیادی قطار، در چندین ایستگاه و در یک دوره زمانی طولانی، باعث ایجاد تأخیر شود (Carey, 1999).

تأخیر حمل و نقل ریلی در کشورهای مختلف تعاریف متفاوتی دارد. به عنوان مثال ممکن است در یک کشور اگر قطاری با فاصله ۲ دقیقه به ایستگاه برسد، تأخیر محسوب نشود. در این مقاله، تأخیر به معنی دیر رسیدن قطار به ایستگاه نسبت به زمان اعلام شده در جداول زمان‌بندی می‌باشد، حتی اگر میزان این تأخیر ۱ دقیقه باشد. با توجه به اینکه جهت رفع تأخیر در یک سیستم حمل و نقل ریلی، تعیین عوامل تأخیر از اهمیت بالایی برخوردار است، در این مقاله به بررسی این عوامل پرداخته شده است.

۲- روش تحقیق

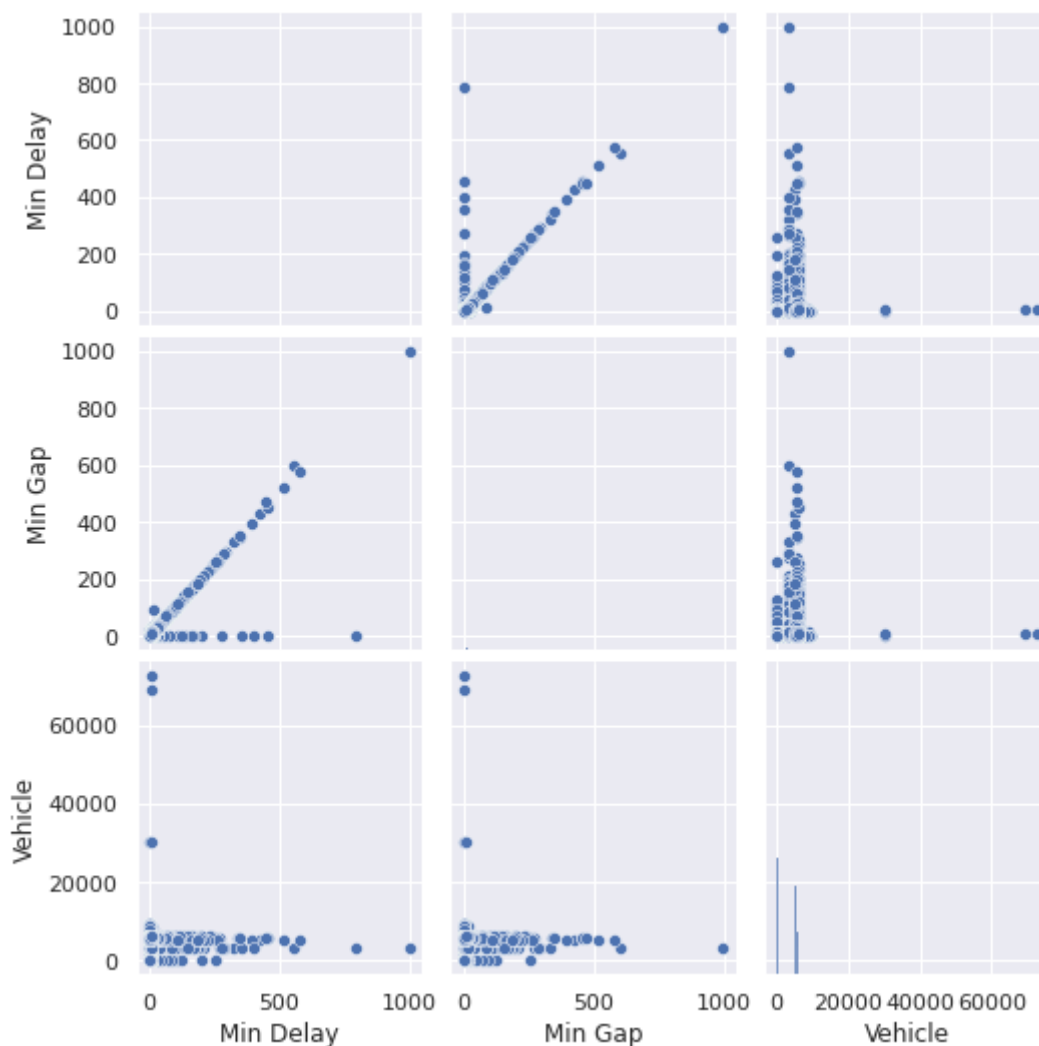
داده‌های مورد استفاده در این تحقیق مربوط به خطوط متروی شهر تورنتو در کانادا می‌باشد. این داده‌ها شامل بیش از ۱۳۰ هزار ردیف و ۸ ستون می‌شوند. ستون‌های این پایگاه داده شامل تاریخ، ساعت، روز هفته، ایستگاه مترو، دلیل تأخیر، مقدار تأخیر به دقیقه، فاصله بین قطارها به دقیقه و نام خط مترو می‌شود. در این تحقیق به تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده پرداخته خواهد شد. تنها دو ستون مربوط به مقدار تأخیر و فاصله بین قطارها از نوع کمی هستند و مابقی ستون‌ها از نوع کیفی با شکل‌ها و فرمت‌های مختلف می‌باشند.

تاریخ داده‌ها سال ۲۰۱۴ الی ۲۰۲۱ جمع‌آوری شده‌اند، و مربوط به دو نوع متروی عادی و سبک می‌باشند. داده‌ها به صورت ۲۴ ساعته جمع‌آوری شده‌اند، و زمان به صورت یک ستون جدا از داده ارائه شده است. همچنین، به منظور بررسی تأثیر روزهای هفته بر روی تأخیر قطارها، روزی که تأخیر در آن رخ داده است مشخص شده است. ایستگاه محل تأخیر نیز یکی دیگر از ستون‌های داده است، که با بررسی دقیق‌تر می‌توان مشخص کرد که کدام یک از ایستگاه‌ها بیشتر در معرض تأخیر قرار دارند. مهم‌ترین ستون داده مربوط به نوع تأخیر می‌باشد. در داده‌های مورد بررسی ۱۳۰ دلیل برای تأخیر در ایستگاه‌ها معرفی شده است.



۴- تحلیل داده‌ها

با بررسی داده‌های جمع‌آوری شده، همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است، مقدار تأخیر با فاصله‌ی بین قطارها همبستگی مثبت بالایی دارد. یکی از دلایل بالا بودن این همبستگی آن است که هرچه میزان تأخیر بیشتر شود، شلوغی ایستگاه‌های قبلی محل تأخیر بیشتر خواهد شد. به همین دلیل، مقدار زمان پهلوگیری و سفر قطارهای بعدی نیز افزایش خواهد داشت، و فاصله‌ی زمانی بین قطارها نیز بیشتر می‌شود.



شکل ۱- همبستگی سه متغیر مقدار تأخیر، فاصله‌ی بین قطارها و نوع قطار.

همچنین، تأخیر هیچ ارتباطی با روز هفته ندارد و تعداد تأخیرها در روزهای مختلف هفته به صورت تقریباً یکنواخت پراکنده شده‌اند. همان‌طور که قابل پیش‌بینی می‌باشد، تعداد تأخیرها در روزهای شنبه و یکشنبه، که روزهای تعطیل در کانادا می‌باشد، کمتر از دیگر روزهای هفته است. به طور میانگین در هر هفته ۵۱ تأخیر در قطارهای خطوط مختلف رخ داده است.



تعداد تأخیرهای ایجاد شده در روزهای مختلف هفته در طول هفت سال داده‌برداری در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول، روزهای هفته به ترتیب از بیشترین تعداد تأخیر تا کمترین تعداد تأخیر مرتب شده‌اند.

جدول ۱- تعداد تأخیرها به تفکیک روزهای هفته

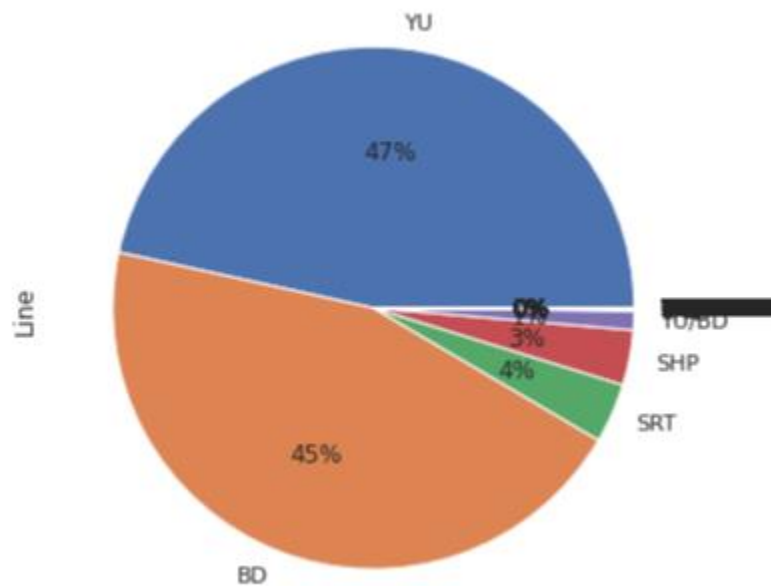
روز هفته	تعداد کل تأخیرها	سهم از کل تأخیرها (درصد)	میانگین تعداد تأخیر در روز
پنجشنبه	۲۱،۹۹۸	۱۵،۸۷	۸
چهارشنبه	۲۱،۷۴۴	۱۵،۶۹	۸
جمعه	۲۱،۶۱۳	۱۵،۵۹	۸
سه‌شنبه	۲۱،۶۰۵	۱۵،۵۹	۸
دوشنبه	۲۱،۳۵۲	۱۵،۴۱	۸
شنبه	۱۶،۲۹۰	۱۱،۷۵	۶
یکشنبه	۱۴،۰۰۷	۱۰،۱۰	۵
مجموع	۱۳۸،۶۰۹	۱۰۰	۵۱

تغییرات تعداد تأخیرها در طول سال، تا پیش از همه‌گیری بیماری کرونا به صورت یکنواخت بود، اما از سال ۲۰۱۹ با شیوع ویروس کرونا، تعداد تأخیرها کاهش پیدا کرده است. این مسئله می‌تواند به دلیل استفاده‌ی کمتر از حمل‌ونقل همگانی رخ داده باشد. به عبارت دیگر، هرچه میزان استفاده از مترو کاهش یابد، احتمال بروز تأخیر نیز کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که در سال ۲۰۲۱ تنها در شش ماه اول سال داده‌برداری انجام شده است. در جدول ۲، تعداد تأخیرها به تفکیک سال‌های مختلف داده‌برداری نمایش داده شده است.

جدول ۲- تعداد تأخیرها به تفکیک سال.

سال	تعداد تأخیر	میانگین تأخیر در روز
۲۰۱۴	۱۹،۶۲۲	۵۴
۲۰۱۵	۲۰،۶۴۸	۵۶
۲۰۱۶	۲۰،۵۴۲	۵۶
۲۰۱۷	۱۸،۱۱۳	۵۰
۲۰۱۸	۲۰،۰۲۰	۵۵
۲۰۱۹	۱۸،۵۲۳	۵۱
۲۰۲۰	۱۴،۱۳۸	۳۹
۲۰۲۱	۷،۰۰۴	۳۹

۹۲ درصد از تأخیرها تنها در دو خط پراستفاده‌ی مترو رخ داده است. دلیل این اختلاف زیاد، شلوغی این دو خط نسبت به سایر خطوط می‌باشد. در شکل ۲ نمودار مربوط به سهم هر خط مترو از کل تأخیرها نمایش داده شده است.



شکل ۲- نمودار سهم خطوط مختلف مترو از کل تأخیرها.

همچنین، با بررسی توزیع تعداد تأخیر به تفکیک جهت حرکت قطار مشخص شد که اکثر تأخیرها در جهت حرکت به جنوب رخ می‌دهد. مهم‌ترین عامل تأخیر در مترو، غیربهداشتی بودن قطار می‌باشد. پس از مشکل غیربهداشتی بودن، عوامل مربوط به عدم دسترسی فوری به اوپراتور و وجود مسافر بیمار یا آسیب‌دیده در ایستگاه مترو دارای بیشترین تکرار بودند. اطلاعات مربوط به دلایل تأخیر در جدول ۳ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که اکثر دلایل تأخیر کمتر از یک درصد از کل تأخیرها را تشکیل می‌دهند. به همین دلیل، تنها عواملی که یک درصد یا بیشتر از کل تأخیرها را به خود اختصاص داده‌اند در این جدول ارائه شده است. در مجموع ۱۵ عامل بالای یک درصد از تعداد کل تأخیرها را به خود اختصاص دادند. همچنین، این ۱۵ عامل ۶۰،۸۸ درصد از کل تأخیرها را شامل می‌شوند. با استفاده از این اطلاعات، جهت بهبود شرایط تأخیرها در ایستگاه‌های مترو می‌توان تصمیم‌های تأثیرگذارتر و آگاهانه‌تری اتخاذ کرد.



جدول ۳- تعداد تأخیرهای ایجاد شده توسط عوامل مختلف

درصد از کل تأخیرها	تعداد کل تأخیرهای ایجاد شده	دلیل تأخیر
۱۴,۲۸	۱۹,۷۹۵	قطار غیربهداشتی
۱۰,۴۲	۱۴,۴۴۳	عدم دسترسی فوری به اوپراتور
۷,۱۳	۹,۸۸۶	بیماری یا آسیب دیدگی مسافر در ایستگاه
۶,۸۴	۹,۴۸۵	مشکل حسگر تشخیص باز یا بسته بودن درب قطار
۵,۴۰	۷,۴۹۱	تعمیرات و کار کردن روی ریلها
۳,۱۴	۴,۳۵۱	بیماری یا آسیب دیدگی مسافر در قطار
۲,۴۷	۳,۴۲۸	مشکل سامانه‌ی سیگنالینگ
۱,۷۷	۲,۴۵۵	تهدید بمب گذاری
۱,۵۵	۲,۱۴۴	مشکل در کنترل سرعت
۱,۵۴	۲,۱۲۷	تأخیر مربوط به آموزش دستیار راهبر
۱,۴۸	۲,۰۴۸	نقص درب قطار
۱,۴۸	۲,۰۴۲	بحث و مجادله بین کارکنان ایستگاه
۱,۲۳	۱,۷۰۰	نقص ترمز قطار
۱,۱۰	۱,۵۱۹	نقص سوزن ریل
۱,۰۶	۱,۴۶۵	سایر مشکلات مربوط به مسافران
۶۰,۸۸	۸۴,۳۷۹	مجموع

علاوه بر تعداد تأخیر، مجموع مدت زمان تأخیر نیز یکی دیگر از معیارهای مربوط به دلیل تأخیر است که می‌تواند در اتخاذ تصمیمات راهبردی تأثیرگذار باشد. به عبارت دیگر، ممکن است تعداد تکرار یکی از دلایل تأخیر بسیار بالا باشد، اما مجموع زمان‌های تأخیر برای این دلیل کمتر از عاملی باشد که تعداد تکرار کمتری دارد. بنابراین، این دو معیار باید به صورت همزمان در نظر گرفته شوند. اطلاعات مربوط به معیار زمان تأخیر در جدول ۴ نمایش داده شده است.

جدول ۴- دقایق تأخیر ایجاد شده توسط عوامل مختلف.

مجموع تأخیر به ساعت	مجموع دقایق تأخیر	دلیل تأخیر
۴۱۱	۲۴,۶۴۱	بی‌نظمی مسافران
۳۵۹	۲۱,۵۷۳	بیماری یا آسیب دیدگی مسافر در قطار (جابه‌جا شده)
۲۹۶	۱۷,۷۵۱	تماس قطار با یک فرد
۲۶۷	۱۶,۰۵۳	آتش‌سوزی یا وجود دود
۲۵۹	۱۵,۵۶۶	بیماری یا آسیب دیدگی مسافر در قطار (عدم رضایت مسافر برای مراقبت پزشکی)
۱۵۵	۹,۳۲۲	نقص درب قطار



۱۳۲	۷،۹۲۴	سایر مشکلات مربوط به مسافران
۱۲۲	۷،۳۵۳	آزیر درخواست کمک از طرف مسافر - مشکلی یافت نشد
۱۲۲	۷،۳۲۰	عدم دسترسی فوری به اوپراتور
۹۲	۵،۵۰۷	درگیری فیزیکی مسافران
۸۰	۴،۸۲۷	نقص سامانه‌ی سیگنالینگ
۷۳	۴،۳۷۱	عدم حضور اوپراتور در موقعیت خود
۷۱	۴،۲۶۵	مشکل ترمز قطار
۲،۴۴۱	۱۴۶،۴۷۳	مجموع

۵- نتیجه گیری

با توجه به جداول و اشکال بخش گذشته، می‌توان نتیجه گرفت روزهای کاری هفته تعداد تأخیرهای بیشتری را نسبت به روزهای تعطیل به خود اختصاص می‌دهند. هم‌چنین مشاهده شد که در طول سال، توزیع تعداد تأخیرها یکنواخت می‌باشد، و تنها در اثر شیوع بیماری کرونا تعداد تأخیرها کاهش یافت. یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار بر روی تعداد تأخیرها، میزان شلوغی خطوط مترو و میزان استفاده و تقاضای مسافران در این خطوط می‌باشد. به طوری که در شهر تورنتو، دو خط مترویی که بیش از خطوط دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند، در مجموع دارای سهمی بیش از ۹۰ درصد از تعداد کل تأخیرها می‌باشند. بنابراین، با هدایت کردن افراد به سمت استفاده از خطوط خلوت‌تر، یا توسعه‌ی خطوط دیگر به طوری که باعث کاهش تقاضای دیگر خطوط شود، می‌توان تعداد تأخیرها را به اندازه‌ی قابل توجهی کاهش داد.

در نهایت، یکی از مهم‌ترین داده‌های موجود مربوط به عوامل مختلف ایجاد تأخیر و میزان تأخیر ایجاد شده توسط هر یک از این عوامل می‌باشد. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده شد، عامل ---- باعث ایجاد بیشترین میزان دقیق تأخیر در متروی شهر تورنتو شده است. هم‌چنین، با توجه به جدول ۳ می‌توان مشاهده کرد که بیشترین تکرار در بین عوامل ایجاد تأخیر متعلق به عامل شرایط غیربهداشتی داخل قطار می‌باشد. در رتبه‌ی بعدی عامل عدم دسترسی فوری به اوپراتور در صورت بروز مشکل برای اوپراتور فعلی می‌باشد. به همین شکل، عوامل نقص حسگر باز و بسته شدن درب قطار، نواقص و تعمیرات ریل و وجود نقص در سامانه‌ی سیگنالینگ از جمله عواملی هستند که تحت کنترل مجریان حمل‌ونقل ریلی هستند. عوامل دیگری مانند بیماری یا آسیب دیدگی مسافران از حیثه‌ی کنترل مجریان و مسئولان حمل‌ونقل خارج می‌باشد. با توجه به این موضوع، می‌توان درصد زیادی از تعداد و تکرار تأخیرها را با نظافت، نگهداری و تعمیرات بهینه‌تر کاهش داد.

بنابراین، نتایج این تحقیق موجب شناسایی بهتر عوامل ایجاد تأخیر در حمل‌ونقل ریلی می‌شود. تأخیرات ایجاد شده در سیستم حمل‌ونقل تأثیری مستقیم بر میزان کیفیت خدمت راحتی مسافران، تجربه و حس مسافران از سفر خود و همین‌طور سرعت سفر می‌گذارد. شناسایی این عوامل می‌تواند در نهایت موجب رضایت مسافران، کاهش هزینه‌ی سیستم حمل‌ونقل و کاهش هزینه‌های ناشی از اتلاف وقت شود. به عنوان مثال با به کار گرفتن افرادی برای نظافت قطار در ایستگاه‌ها، میزان تکرار و دقایق تأخیر را به شکل قابل توجهی کاهش داد.



مراجع

1. data.worldbank.org. World Bank.
2. Fouracre, P., Dunkerley, C., & Gardner, G. (2003). Mass rapid transit systems for cities in the developing world. *Transport Reviews*, 23(3), 299-310.
3. Dinger, M. H., Lai, Y. C., & Barkan, C. P. (2009). Impact of train type heterogeneity on single-track railway capacity. *Transportation Research Record*, 2117(1), 41-49.
4. Carey, M., & Kwieciński, A. (1994). Stochastic approximation to the effects of headways on knock-on delays of trains. *Transportation Research Part B: Methodological*, 28(4), 251-267.
5. Vromans, M. J., Dekker, R., & Kroon, L. G. (2006). Reliability and heterogeneity of railway services. *European Journal of Operational Research*, 172(2), 647-665.
6. Gorman, M. F. (2009). Statistical estimation of railroad congestion delay. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(3), 446-456.
7. Carey, M. (1999). Ex ante heuristic measures of schedule reliability. *Transportation Research Part B: Methodological*, 33(7), 473-494.