Archive of SID

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۰، شماره۴، سال ۱۳۹۷، صفحات ۶۸۵ تا ۶۹۶
DOI: 10.22060/ceej.2017.12657.5243

ارزیابی تأثیر سیاست‌های گروه‌بندی واگن‌ها و زمانبندی حرکت بار در شبکه‌ی ریلی ایران بر میزان تولید آلاینده‌های لوکوموتیوهای دیزلی با استفاده از شبیه‌سازی

امین معین الدینی، میقات حبیبیان*

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده: راه‌آهن نقش عمده‌ای در جابجایی بار نسبت به سایر شیوه‌های حمل‌ونقل دارد و از طرفی استفاده بهتر از منابع راه‌آهن می‌تواند موجب کاهش هزینه‌ها و عوارضی مانند انتشار آلاینده‌ها ناشی از حمل‌ونقل در شبکه راه‌آهن شود. گروه‌بندی مناسب بار به مفهوم تجمیع واگن‌های باری در ایستگاه‌های تشکیلاتی راه‌آهن و جابجایی آن‌ها در قطاری مشترک در شبکه راه‌آهن است. گروه‌بندی مناسب واگن‌های باری با طرح زمان‌بندی اعزام مناسب در شبکه راه‌آهن می‌تواند موجب استفاده بهتر از توان کششی لوکوموتیوهای دیزلی به منظور کاهش مصرف سوخت و کاهش آلاینده‌های آن‌ها شود. در این مقاله با تدوین یک برنامه نرم افزاری، شبکه راه‌آهن ایران برای ارزیابی گروه‌بندی و حرکت بار شبیه‌سازی شده است. به منظور دستیابی به نتایج دقیق اثر گروه بندی بار، مدل شبیه‌سازی این مطالعه با در نظرگیری هم‌زمان سه مسئله وابسته به هم زمان‌بندی، گروه‌بندی و تشکیل قطار ساخته شده است. در این مطالعه با توجه به تقاضای واقعی حمل کالا در کشور و سیاست‌های مختلف گروه‌بندی و زمانبندی حرکت قطار، هشت سناریو علاوه بر گزینه عدم انجام کار تعریف گردیده و انتشار آلاینده‌های PM، NO_x، CO، HC، SO_2 و CO_2 برای هریک از این سناریوها بدست آمده است. تحلیل شبیه‌سازی این سناریوها نشان می‌دهد انتخاب همزمان سیاست عدم گروه‌بندی غیرضروری و سیاست زمان‌بندی انعطاف‌پذیر منجر به کاهش بیشتر در هزینه‌های ناشی از آلاینده‌های مورد مطالعه می‌گردد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۲۲ اسفند ۱۳۹۵
بازنگری: ۵ شهریور ۱۳۹۶
پذیرش: ۲۵ مهر ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۱۰ آبان ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:
حمل کالا
شبیه‌سازی
گروه‌بندی واگن‌ها
قطار باری
آلاینده

۱- مقدمه

هرچند دستاوردهای حمل‌ونقل رو به توسعه بوده و نیازمندی بشر در عرصه دستیابی به کالاها و فعالیت‌های اجتماعی را برآورده می کنند، پسماندهای ناخواسته‌ای نیز تولید می‌کنند. مطالعات بسیاری بر روی سمی بودن این پسماندها انجام شده است. آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا (USEPA) شش آلاینده سمی اصلی را به عنوان شاخصی از آلودگی وسایل حمل‌ونقلی با سوخت فسیلی معرفی نموده و آن‌ها را به دو دسته اولیه و ثانویه تقسیم کرده است. آلاینده‌های اولیه موادی هستند که به طور مستقیم از منابع انتشار به محیط‌زیست وارد می‌شوند و شامل آلاینده منواکسید کربن (CO)، دی اکسید نیتروژن (NO_2)، دی‌اکسید گوگرد (SO_2)، ذرات معلق ($PM_{2.5}$، PM_{10}) و سرب (Pb) هستند. آلاینده‌های ثانویه به موادی گفته می‌شوند که بر اثر فعل و انفعالات موجود در اتمسفر زمین بوجود می‌آید (مانند ازن) [۱].

پژوهش‌های بسیاری به منظور محاسبه آلایندگی لوکوموتیوهای دیزلی انجام گرفته است. بیلی و همکاران[1] [۲] آلاینده‌های خروجی لوکوموتیوهای دیزلی را بررسی کردند. آزمایشات آن‌ها نشان می‌داد که دود دیزل دارای ۴۵۰ ترکیب شیمیایی است که ۴۰ مورد آن سمی گزارش شده‌اند. در مطالعه فوق، از اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، ذرات معلق ($PM_{2.5}$، PM_{10})، ترکیبات کربنی فرار (VOC_x) و ازن (O_3)، به عنوان مهمترین ترکیبات اثرگذار بر سلامتی انسان یاد شده است. کین و همکاران[2] [۳] مدلی برای تخمین میزان هر یک از آلاینده‌های لوکوموتیوها بر اساس سوخت مصرفی معرفی نمودند. جورجنسن و سورنسن[3] [۴] آلایندگی را برای لوکوموتیوهای دیزلی راه‌آهن تحت شرایط مختلف ترافیکی برای اروپا محاسبه کردند. آلی[4] [۵] با بررسی قطارهای درحال جابجایی درشبکه ریلی کشور مصر، عوامل موثر بر مصرف انرژی در راه‌آهن را تحلیل نموده و مدل‌هایی برای تخمین آلودگی ناشی از تردد در راه‌آهن را ارائه کرد. کاروالهایس و همکاران [۶] در بخشی از شبکه راه‌آهن کشور برزیل میزان آلایندگی جابجایی بار را در حالت‌های مختلف انتخاب نوع لوکوموتیوها به لحاظ سوخت مصرفی بررسی نمودند.

راه‌آهن نقش عمده‌ای در جابجایی بار در دنیا دارد. شبکه راه‌آهن مجموعه‌ای از ایستگاه‌ها است که با کمان‌ها (یا بلاک‌ها) به هم متصل

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Habibian@aut.ac.ir

1 Bailey et al

2 Kean et al
3 Jorgensen and Sorenson
4 Aly

www.SID.ir

Archive of SID

شده‌اند. برخی از این ایستگاه‌ها، ایستگاه‌های تشکیلاتی هستند. در ایستگاه‌های تشکیلاتی عمل گروه‌بندی واگن‌ها و تشکیل قطار انجام می‌گیرد. در گروه‌بندی واگن‌ها می‌توان قطارهایی تشکیل و در شبکه حرکت داد که واگن‌هایشان مبداء و مقصدهای مختلفی دارند ولی در بخشی از مسیر پیش رو، با هم مشترک هستند. از این رو، در هر زمان، هر قطار ممکن است شامل واگن‌هایی باشد که دارای مبداء- مقصدهای متفاوت هستند. پس می‌توان در یک شبکه ریلی چندین واگن با مبادی و مقاصد مختلف را در یک مسیر با یک عنوان قطار واحد حرکت داد. بنابراین، انجام عمل گروه‌بندی موجب کاهش ترافیک حرکت قطارها در شبکه و استفاده لوکوموتیو کمتر برای جابجایی کل بار خواهد شد. در حقیقت گروه‌بندی واگن‌ها به مفهوم ارائه برنامه دسته‌بندی واگن‌ها به منظور تشکیل قطارها است. بصورت واضح‌تر گروه‌بندی واگن‌ها به طرحی گفته می‌شود که مشخص می‌کند در هر ایستگاه تشکیلاتی چه گروه‌هایی از کدام واگن‌ها برای تشکیل کدام قطارها به کار روند [۷].

در جابجایی واگن‌ها در شبکه راه‌آهن محدودیت‌های زیادی وجود دارند. از جمله برخی از این محدودیت‌ها می‌توان به: محدودیت‌های تشکیل قطار (در اختیار بودن لوکوموتیو، توان کششی لوکوموتیو(ها)، حداقل شعاع قوس و حداکثر فراز غالب در مسیر)، محدودیت سبقت و تلاقی در شبکه راه‌آهن، ظرفیت بلاک، حق‌تقدم قطار مسافری در شبکه راه‌آهن، طرح زمان‌بندی و گروه‌بندی مورد نظر و مسیر حرکت قطار در شبکه راه‌آهن اشاره کرد.

با توجه به محدودیت‌های مساله، انتخاب برترین سیاست گروه‌بندی در پژوهش‌های پیشین از طریق رویکردهایی چون بهینه‌سازی تابع هدف و یا شبیه‌سازی با ارزیابی معیارهای کارایی مختلف بوده است. شاخص‌های کارایی مختلفی مانند: هزینه‌های عملیاتی، میزان مصرف سوخت، تأخیرات ناشی از گروه‌بندی بار، تأخیرات ناشی از ترافیک (تلاقی‌ها) قطارها در شبکه راه‌آهن برای انتخاب سیاست گروه‌بندی و زمان‌بندی حرکت بار مورد استفاده قرار گرفته است. مطالعات متعددی در زمینه گروه‌بندی اعزام قطارها انجام شده است. یکی از اولین فرمول‌بندی‌ها از مسئله گروه‌بندی و حرکت بار توسط اسد[1] [۸] انجام شد. تابع هدف مدل اسد کمینه کردن مجموع هزینه‌های مربوط به حمل‌ونقل بار در بلاک‌های حرکتی و هزینه‌ی ایستگاه‌های تشکیلاتی در مسیر بار بود. بودین[2] [۹] یک مدل برای مسئله گروه‌بندی در شبکه حمل‌ونقل ریلی ارائه داد. فرمول‌بندی بودین شامل سه محدودیت: تعداد واگن‌های قابل گروه‌بندی در هر ایستگاه تشکیلاتی، تعداد بلاک‌های حرکتی بار بین ایستگاه‌های تشکیلاتی و جریانِ واگن‌های قابل عبور از هر یک از بلاک‌های حرکتی بود. در دو پژوهش جداگانه دیگر کرینیک[3] [۱۰] و کیتون[4] [۱۱] با ارائه و حل مدل‌هایی با تابع هدف غیر خطی، مسئله گروه‌بندی را فرمول‌بندی کردند. تابع هدف این مدل‌ها کمینه کردن مجموع هزینه‌های عملیاتی مربوط به قطار، هزینه‌های گروه‌بندی مجدد در ایستگاه‌های تشکیلاتی و هزینه‌های ناشی تأخیر رساندن واگن‌های باری به مقصد بود. هانگ[5] [۱۲] با لحاظ نمودن حق تقدم عبور قطارها بر اساس تاخیر به مقصد رسیدن، مدلی تحلیلی از مسئله گروه‌بندی و حرکت بار برای یک شبکه راه‌آهن یک خطه که بخشی جزیی از آن دوخطه[6] بود، ارائه داد. در این مدل مسیرهای یک‌خطه شامل ایستگاه‌هایی برای عبور قطارها از مقابل هم در نظر گرفته می‌شد. محمدحسنی و همکاران [۱۳] با ارائه الگوریتم حلی برای مدلی تحلیلی با تابع هدف کمینه کردن زمان جابجایی بار، طرح مناسب گروه‌بندی را در شبکه‌ای فرضی محاسبه نمودند.

به دلیل هزینه بر بودن اجرای سیاست‌ها در زمینه حمل‌ونقل ریلی، شبیه‌سازی کامپیوتری انواع سیاست‌ها در شبکه راه‌آهن می‌تواند دریافتی از واقعیت اجرای آن‌ها را قبل از اجرا ارائه دهد. علاوه بر این شبیه‌سازی کامپیوتری می‌تواند بطور مستقیم برای مطالعه‌ی تلاقی و سبقت در شبکه خطوط و نیز ورود و خروج از ایستگاه به کار رود. قابل ذکر است که با شبیه‌سازی می‌توان ترافیک قطارها را در گره‌ها و کمان‌های یک شبکه راه آهن بدست آورد.

مطالعات بسیاری در زمینه شبیه‌سازی حرکت قطارها در شبکه راه‌آهن انجام شده است. به عنوان مثال پترسن و تیلور[7] [۱۴] شبکه راه‌آهن را بصورت یک سیستم واقعه‌گسسته[8] شبیه‌سازی کردند. در مدل این پژوهشگران فرض شده است که چند نوع قطار با سرعت‌ها و حق تقدم‌های مختلف به صورت قطارهای باری و مسافری در شبکه ریلی جریان دارد. دیسوکی و لیچمن[9] [۱۵] از شبیه‌سازی برای تحلیل ظرفیت و تأخیر در مسیرهای راه آهن استفاده کردند. آنان یک شبکه راه‌آهن نسبتا پیچیده را با مسیرهای یک خطه و دوخطه شبیه‌سازی کردند. فرضیات مدل دیسوکی و لیچمن عبارت بودند از: مشخص بودن حداکثر سرعت برای مسیرها، درنظر گرفتن سرفاصله ایمن بین دو قطار متوالی، مشخص بودن طول قطارها، و مشخص بودن نرخ شتاب‌گیری قطار. هالووِل و هارکر[10] [۱۶] با استفاده از شبیه‌سازی به بررسی زمانبندی‌های مختلف قطارهای مسافری پرداختند. آن‌ها با این روش سعی نمودند به این پرسش که "اگر یک خط جدید به شبکه اضافه شود، چه میزان تأخیر کاهش می‌یابد؟"، پاسخ دهند. آنان همچنین به تحلیل این مسئله پرداختند که اگر خط جدید به شبکه اضافه شود، تعدیل در زمان‌بندی چگونه باید صورت پذیرد. مطالعات پیشین بسیاری در مورد آلاینده‌های منابع متحرک و بطور خاص آلایندگی شبکه‌های راه آهن انجام شده است و در هیچکدام نقش سیاست گروه‌بندی بار در کاهش میزان آلاینده‌ها در شبکه راه‌آهن مورد بررسی قرار نگرفته است.

در مطالعات پیشین گروه‌بندی بار در شبکه راه‌آهن سیاست‌ها با توجه به

1 Assad
2 Bodin
3 Crainic
4 Keaton

5 Hong
6 Double-track
7 Petersen and Taylor
8 Event based
9 Dissouky and Leachman
10 Hallowell and Harker

www.SID.ir

Archive of SID

میزان هزینه‌های عملیاتی، هزینه تأخیرهای ناشی از گروه‌بندی مورد تحلیل واقع شده‌اند و در نظرگیری هزینه‌های آلودگی در انتخاب سیاست بهینه مغفول مانده است.

مروری بر مطالعات موجود در زمینه گروه‌بندی و حرکت بار در شبکه راهآهن نشان می‌دهد که اکثر مطالعات موجود با استفاده از روش تحلیلی سعی بر حل این مسئله نموده‌اند اما پیچیدگی مسائل مربوط به این موضوع و تعداد محدودیت‌های زیاد باعث شده که در مدل‌های تحلیلی ساده سازی‌های فراوانی انجام گیرد. به عنوان مثال، در اکثر این مدل‌ها حرکت قطار مسافری در شبکه راه‌آهن در نظر گرفته نشده است. از طرفی در این مطالعات اکثراً یک شبکه فرضی کوچک یا بخشی از مسیر راه‌آهن و نه کل شبکه برای مطالعه گروه‌بندی انتخاب شده‌اند، که طبیعتا نتایج آنها قابل بسط برای کل شبکه نیست. در بسیاری از مطالعات قبلی نقش ظرفیت خط و نقش حق تقدم قطارمسافری نسبت به قطارهای دیگر و تأثیر آنها بر ظرفیت خط درنظرگرفته نشده است. از این‌رو جواب‌های بدست آمده از این روش‌ها ممکن است در عمل قابل اجرا نبوده و محققان به استفاده از روش‌هایی چون شبیه‌سازی برای کنترل امکان‌پذیری و آزمایش جواب‌های تحلیلی در این مسئله روی آورند. با این وصف، جستجوها نشان می‌دهد که در مطالعات گذشته به شبیه‌سازی همزمان مسئله گروه‌بندی و حرکت بار در شبکه راه‌آهن پرداخته نشده است.

۲- روش‌شناسی

۲- ۱- گروه‌بندی واگن‌ها و زمانبندی قطارهای باری

سیاست‌های مختلفی به منظور انجام گروه‌بندی واگن‌ها در راه‌آهن وجود دارند:

۱) سیاست عدم گروه‌بندی (اعزام قطار باری مستقیم) بدین معناکه عمل گروه‌بندی بار در هیچ‌یک از ایستگاه‌های تشکیلاتی انجام نمی‌گردد و بار به صورت مستقیم از مبداء به مقصد فرستاده می‌شود. به عبارت دیگر واگن‌های باری در طی حرکتشان از مبداء به سمت مقصد در هیچ ایستگاه تشکیلاتی از قطار باز نمی‌شوند و عمل تجمیع یا گروه‌بندی بار بر روی آن‌ها در طول مسیرشان صورت نمی‌گیرد.

۲) سیاست عدم گروه‌بندی غیرضروری که برمبنای آن زمانی قطار باری در ایستگاه تشکیلاتی برای گروه‌بندی می‌ایستد که دوشرط برقرار باشد: شرط اول اینکه حداقل یک واگن باری برای روز آینده وجود داشته باشد و شرط دوم آن‌که توان کششی لوکوموتیوها در قطار باری با توجه به فراز غالب و حداقل شعاع قوس افقی در ادامه مسیر، حمل واگن اضافی را امکان پذیر سازد. دلیل شرط اول برای وجود یک واگن در روز آینده این است که بتوان تجمیع بار را با گروه‌بندی مجدد آن با واگن دیگری انجام داد و دلیل شرط دوم اینست که محدودیت توان کششی برای اضافه کردن واگن به قطار را با توجه به ظرفیت کششی موجود (بر اساس رابطه تشکیل قطار دیویس) وجود نداشته باشد.

۳) سیاست گروه‌بندی کامل، به معنی توقف قطارهای باری در تمامی ایستگاه‌های تشکیلاتی به منظور گروه‌بندی مجدد واگن‌ها است. بدین مفهوم که تمامی واگن‌ها در ایستگاه‌های تشکیلاتی در طی مسیرشان از مبداء به سمت مقصد از قطار باز می‌شوند و تجمیع بار در گروه‌بندی جدید بر روی آن انجام می‌گیرد.

از سوی دیگر، برای جابجایی بار در شبکه راه‌آهن سه سیاست زمان‌بندی مرسوم وجود دارد [۱۷].

۱) سیاست زمان‌بندی برنامه‌ای: بدین صورت که بار طبق یک برنامه از پیش مشخص شده باید ارسال گردد. به عنوان مثال، برای یک زوج مبداء- مقصد هر ۱۰ روز یک‌بار بصورت برنامه‌ای بار ارسال شود.

۲) سیاست زمان‌بندی انعطاف‌پذیر: در این سیاست هر زمان بار به حد نصاب برای جابجایی رسید، ارسال می‌گردد. به عنوان مثال هر موقع بار به اندازه‌ای رسید که کمترین توان‌کششی لوکوموتیو در دسترس بتواند آن را جابجا کند بطوری که واگن دیگری را نتوان به آن اضافه نمود، با گروه واگن‌ها یک قطار تشکیل شده و این قطار اعزام می‌شود.

۳) سیاست زمان‌بندی ترکیبی: در این سیاست بار طبق برنامه از پیش مشخص شده ارسال می‌گردد، اما اگر در این بین بار به حد نصاب برای جابجایی رسید، می‌تواند قبل از زمان برنامه‌ریزی‌شده ارسال شود. به عنوان مثال هر ۱۰ روز یکبار بین یک زوج مبداء- مقصد بصورت برنامهای واگن‌های باری اعزام می‌شوند ولی اگر در بین این ۱۰ روز واگن‌های بار به اندازه تشکیل یک قطار قابل حمل با لوکوموتیو دارای کمترین توان کششی در دسترس رسید، گروه واگن‌ها با این لوکوموتیو در قالب یک قطار اعزام می‌شوند.

۲- ۲- روش محاسبه آلاینده‌ها

روش اولیه‌ای برای محاسبه آلاینده‌های لوکوموتیوهای دیزلی در گزارشات EPA [۱۸] وجود دارد، طبق این روش لوکوموتیوها به سه دسته تقسیم می‌گردند.:دسته اول لوکوموتیوهایی هستند که در سالهای ۱۹۷۳ تا ۲۰۰۱ ساخته شده‌اند، دسته دوم ساخت سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۴ و دسته سوم ۲۰۰۵ به بعد می‌باشند. در این روش، برحسب کاربرد لوکوموتیو در جابجایی واگن‌ها که در مسیر (روی خط) یا برای تشکیل قطار در ایستگاه‌های تشکیلاتی باشد، ضرایب انتشار آلاینده‌ها، EF، طبق جدول ۱ پیشنهاد شده‌اند. بر این اساس، مدل تخمینی آلایندگی مطابق رابطه ۱ است:

$$E=N\times HP\times LF\times HRS\times EF \quad (1)$$

که در آن متغیرها عبارتند از:

E میزان ذرات خروجی آلاینده‌ها برحسب گرم

N تعداد لوکوموتیوها،

HP توان لوکوموتیو بر حسب اسب بخار

LF درصد استفاده از توان موتور

HRSمیانگین ساعتی استفاده از لوکوموتیو

www.SID.ir

Archive of SID

اولین مدل مقاومت قطار توسط اشمیت و تاتهیل[1] (۱۹۱۰-۱۹۴۰) مطرح شد که پس از آن توسط دیویس توسعه داده شد و به صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفت [۱۹] بر این اساس مقاومت مسیر قطار به صورت زیر قابل محاسبه است.

جدول ۱: ضرایب انتشار آلاینده‌ها برای لوکوموتیوهای مختلف

Table 1. Emission factors (EF) for different types of locomotives

سال ساخت	کاربرد لوکوموتیو	HC	CO	NO_x	PM
۱۹۷۳- ۲۰۰۱	روی خط	۲/۶۴	۷/۰۳	۴۷/۰۲	۱/۷۷
	تپه مانوری	۵/۵۵	۱۰/۰۶	۶۹/۲۱	۲/۴۳
۲۰۰۲- ۲۰۰۴	روی خط	۲/۵۹	۷/۰۳	۳۶/۷۲	۱/۷۷
	تپه مانوری	۵/۵۵	۱۰/۰۶	۵۳/۳۶	۲/۴۳
۲۰۰۵ به بعد	روی خط	۱/۴۳	۷/۰۳	۲۷/۲۱	۰/۹۵
	تپه مانوری	۲/۹۱	۱۰/۰۶	۴۰/۱۵	۱/۱۴

PM مجموع $PM_{2.5}$، PM_{10} است (۹۷/۵ درصد کل آن $PM_{2.5}$ است).

اگر فرض شود:

$K=\{k\}$ مجموعه قطارهای موجود در شبکه

$Q=\{q\}$ مجموعه بلاک‌های موجود در شبکه

$\overline{V}_{kq}$ حد بالایی سرعت قطار $k \in K$ در بلاک $q \in Q$

V_{kq} متوسط سرعت قطار $k \in K$ در بلاک $q \in Q$

L_q طول بلاک $q \in Q$،

M_k جرم قطار $k \in K$

R_{kq} نیروی مقاومت قطار $k \in K$ هنگامی که از بلاک $q \in Q$ عبور می‌کند

F_{kq} نیروی که لازم است تا سرعت قطار $k \in K$ در بلاک $q \in Q$ ثابت نگه داشته شود

P_{kq} توان لازم برای تولید F_{kq}

r_k نرخ مصرف گازوییل بر واحد نیروی خروجی قطار

G_k فراز غالب در بلاک $q \in Q$

D_k حداقل شعاع قوس در بلاک $q \in Q$

W_k وزن بار محوری قطار $k \in K$

l_q طول بلاک $q \in Q$

b ضریب ثابت تجربی

X_{kq} مساوی با ۱ اگر قطار k ام از بلاک q ام رد شود در غیر این صورت برابر با صفر

1 Schmit and Tothil

مقاومت نسبی برای قطار $k \in K$ با جرم M_k و سرعت V_{kq} از معادله پیشنهادی دیویس، بصورت رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$R_{kq} = M_k\left(1.3+\frac{29}{w_k}+bV_{kq}+20G_q+0.8D_q\right) \qquad (۲)$$

بنابراین کل مصرف سوخت برابر است با مجموع سوختی که هر قطار لازم دارد تا از یک بلاک q، با طول l_q عبور کند اگر نرخ مصرف سوخت برابر با r_k باشد. کل مصرف سوخت از رابطه ۳ بدست می‌آید:

$$FC=\sum_{k\in K}\sum_{(q\in Qk)} l_q.r_k.X_{kq}.R_{kq} \qquad (۳)$$

میزان آلاینده‌های CO_2 و SO_2 از مصرف سوخت قابل محاسبه است که بستگی به نوع احتراق سوخت در موتور دیزل دارند. محاسبه میزان آلاینده‌های CO_2 و SO_2 با استفاده از روش پیشنهادی EPA ۲۰۰۹ بصورت رابطه ۴ است:

$$M_i=A_i\times B_i\times CF_i\times D \qquad (۴)$$

M_i جرم آلاینده iام (CO_2 یا SO_2) بر حسب گرم بر گالن سوخت مصرفی

A_i وزن جرمی آلاینده iام (CO_2 یا SO_2) نسبت به عنصر آن (C یا S)

B_i میزان درصد عنصر آلاینده (C یا S) در سوخت برحسب

CF درصد تبدیل

D چگالی سوخت

مقادیر پیشنهادی EPA برای گازوییل مصرفی لوکوموتیوهای باری در شبکه ریلی آمریکا بصورت زیر هستند:

چگالی سوخت ۳۲۰۰ گرم بر گالن

فاکتور تبدیل ۹۷/۸ درصد. (میزان احتراق موثر در موتور دیزلی به منظور اینکه S تبدیل به SO_2 شود)

کربن ۸۷ درصد کل وزن سوخت

گوگرد ۰/۰۳ درصد کل وزن سوخت

براین اساس مقادیر آلاینده‌های CO_2 و SO_2 برحسب گرم بر گالن سوخت مصرفی بصورت زیر بدست آمده‌اند.

$M_{SO2}=88.1$ (gr/gal)
$M_{CO2}=217.10$(gr/gal)

۲- ۳- مدل شبیه‌سازی کامپیوتری

فرم کلی صورت مساله شبیه‌سازی گروه‌بندی وحرکت بار در شبکه راه‌آهن به این صورت فرض می‌شود که:

شبکه راه‌آهن به عنوان یک سیستمِ شبکه صف از ایستگاه‌های سرویس‌دهی[2] با انواع سرویس‌دهنده‌های مختلف عمل می‌کند. از جمله‌ی

2 Servers

www.SID.ir

Archive of SID

این ایستگاه‌های سرویس‌دهی مهم در شبکه حمل بار ریلی بلاک‌ها، ایستگاه‌های مبداء، ایستگاه‌های مقصد و ایستگاه‌های تشکیلاتی است که هر کدام بصورت کلان به‌صورت زیر عمل می‌کنند:

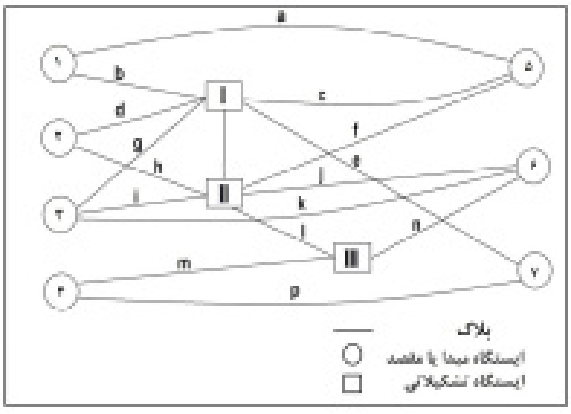
– هر بلاک به عنوان یک سرویس دهنده دارای اطلاعاتی مانند: تعداد خطوط، میانگین فاصله، میانگین زمان سیر، فراز غالب در جهت رفت هر خط، فراز غالب در جهت برگشت هر خط و حداقل شعاع قوس است (این مقادیر می‌توانند در چگونگی تشکیل قطارهایی که از بلاک‌ها می‌گذرند، اثر داشته باشند).

– هر ایستگاه مبداء به عنوان یک ایستگاه سرویس‌دهی در نظر گرفته می‌شود که در آن محموله‌ها با توجه به توزیع تصادفی تقاضای بار ورودی، سیاست زمان‌بندی و سایر عوامل موثر عمل تشکیل و اعزام قطارها را انجام می‌دهد.

– هر ایستگاه مقصد به عنوان یک ایستگاه سرویس‌دهی است که قطارها را از سیستم خارج می‌کند.

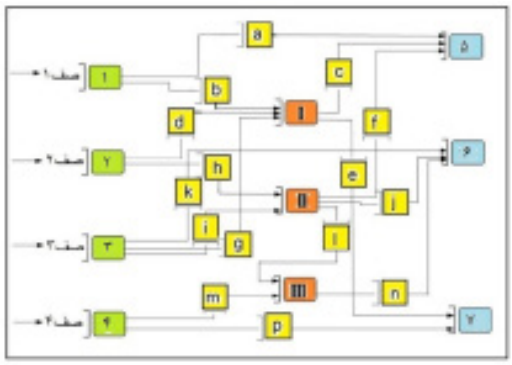
– در این مدل شبیه‌سازی هر ایستگاه تشکیلاتی یک ایستگاه سرویس‌دهی است که با توجه به سیاست زمانبندی وظیفه گروه‌بندی بار، تشکیل قطارهای جدید از بارهای ورودی و اعزام آن‌ها را به عهده دارد.

یک نمونه ساده از یک شبکه راه‌آهن برای حمل بار در شکل ۱ نشان داده شده است. این شکل نشان‌دهنده‌ی یک شبکه حمل بار راه‌آهن ساده شده است که دارای ایستگاه‌های مبداء ۱ تا ۴ ایستگاه‌های مقصد ۵ تا ۷ ایستگاه‌های تشکیلاتی I، II و III و بلاک‌های a تا p است. در این مثال، به منظور اختصار، ایستگاه‌ها فقط مبداء، مقصد یا تشکیلاتی فرض شده‌اند. با در نظر گرفتن بلاک‌ها، ایستگاه‌های مبداء، مقصد و ایستگاه‌های تشکیلاتی بصورت ایستگاه‌های سرویس‌دهی، شبکه یادشده مانند شکل ۲ می‌تواند شبیه‌سازی شود.



شکل ۱: اجزای یک نمونه ساده از شبکه راه‌آهن برای حمل بار

Fig. 1. Components of a simple example of a freight rail network



شکل۲: شبکه صف پیشنهادی برای شبیه‌سازی شبکه حمل بار مرتبط با شبکه شکل ۱

Fig. 2. Proposed queue network for simulation of network shown in Figure 1

فرضیات مربوط به تقاضای بار در شبکه راه‌آهن:

– تقاضای بار برای هر زوج مبداء– مقصد بصورت یک متغیر تصادفی با تابع توزیع مشخص و داده‌شده فرض می‌شود (در مطالعه موردی این تقاضا به‌صورت توزیع یکنواخت فرض شده است).

فرضیات در نظر گرفته‌شده به منظور گروه‌بندی بار:

– هر گروه‌بندی بار در هر مسیر حداقل با یک روز تأخیر همراه است. بدین معنی که اگر بار در هر یک از روزها در بازه شبیه‌سازی برای گروه‌بندی به ایستگاه برسد به تقاضای فردای آن روز اضافه می‌گردد.

فرضیات مربوط به تشکیل قطارهای باری:

– محدودیت تعداد لوکوموتیوهای از هرنوع برای هر زوج مبداء–مقصد در هر روز داده شده فرض می‌شود.

– در عمل تعداد لوکوموتیوهایی که می‌توانند در تشکیل یک قطار شرکت کنند بستگی به هماهنگی کششی لوکوموتیوها، مقاومت مکانیکی بست‌های اتصال واگن‌ها و لوکوموتیوها و فراز غالب مسیر دارد. با توجه به اطلاعات اداره کشش راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران، حداکثر تعداد لوکوموتیوها در یک قطار ۴ عدد در نظر گرفته شده است.

– برای محاسبه تشکیل قطارها از رابطه دیویس استفاده می‌شود رابطه ۲ بطوریکه با برابر قرار دادن مقاومت در سرعت مورد نظر با مجموع توان کششی لوکوموتیوهای بسته شده به قطار، وزن واگن‌های باری که می‌توان به هر قطار بست، بدست می‌آید.

فرضیات مربوط به حرکت قطارها:

– تلاقی قطارها در تمامی ایستگاه‌های تشکیلاتی و غیرتشکیلاتی در شبکه راه‌آهن امکان‌پذیر درنظر گرفته‌شده‌است.

– سبقت قطارهای مسافری از قطارهای باری در تمامی گره‌های شبکه راه‌آهن (ایستگاه‌های تشکیلاتی و غیر تشکیلاتی) می‌تواند انجام پذیرد.

– حق تقدم در تلاقی قطار باری با یک قطار باری دیگر بر اساس ترتیب زمان رسیدن به ابتدای بلاک مورد نظر فرض شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

– حق تقدم استفاده از بلاک در تمامی شبکه با قطار مسافری درنظر گرفته‌شده‌است

ورودی‌های مدل شبیه‌سازی گروه‌بندی و حرکت بار در شبکه راه‌آهن عبارتند از:

– اطلاعات تقاضای بار زوج مبداء–مقصدها برای اعزام بار (تناژ بار، تعداد واگن، نوع واگن، مبداء، مقصد، روز تقاضا، کالای خطرناک و سطح اهمیت بار)

– اطلاعات هندسه شبکه (نام تمامی ایستگاه‌ها و بلاک‌ها و شماره عددی مربوط به هر یک از ایستگاه‌ها و بلاک‌ها، تشکیلاتی و غیرتشکیلاتی بودن ایستگاه، تعداد خطوط در هر بلاک، زمان سیر رفت و زمان سیر برگشت در هر بلاک، فراز غالب رفت و فراز غالب برگشت در هر بلاک، حداقل شعاع قوس در هر بلاک و مسیرهای امکان‌پذیر شبکه)

– نوع سیاست زمان‌بندی و فاصله بین اعزام‌ها در زمان‌بندی (زمانبندی برنامه‌ای، انعطاف‌پذیر یا ترکیبی)

– نوع تاکتیک گروه‌بندی واگن‌های باری (عدم گروه‌بندی، عدم گروه‌بندی غیر ضروری یا گروه‌بندی کامل)،

– اطلاعات تعداد لوکوموتیوهای موجود در هر ایستگاه،

– اطلاعات عملکرد انواع لوکوموتیو (نوع لوکوموتیوهای در دسترس، توان کششی هر نوع لوکوموتیو، میزان مصرف سوخت هر نوع لوکوموتیو، وزن هر نوع لوکوموتیو)

اطلاعات زمان‌های استفاده از بلاک‌های شبکه توسط قطارهای مسافری (با توجه به گراف حرکتی برنامه‌ریزی شده‌ی آن‌ها).

خروجی‌های مدل شبیه‌سازی گروه‌بندی و حرکت بار در راه‌آهن عبارتند از:

– اطلاعات زمان‌بندی اعزام قطارها شامل: نام قطار و شماره قطار متقاضی حرکت در شبکه، مبداء و مقصد قطار، زمان حرکت قطار، مسیر حرکت قطار، فراز غالب در طی مسیر حرکت قطار، حداقل شعاع قوس در حرکت قطار، تعداد واگن متصل به قطار، تناژ بار ناخالص قطار، میانگین وزن هر واگن متصل به قطار، نوع لوکوموتیوهای بسته شده به قطار، گراف قطار باری و ایستگاه‌های تشکیلاتی در مسیر قطار باری است.

– تعداد قطار و تعداد قطار–ساعت مورد نیاز به‌منظور پاسخ‌گویی به تقاضای بار،

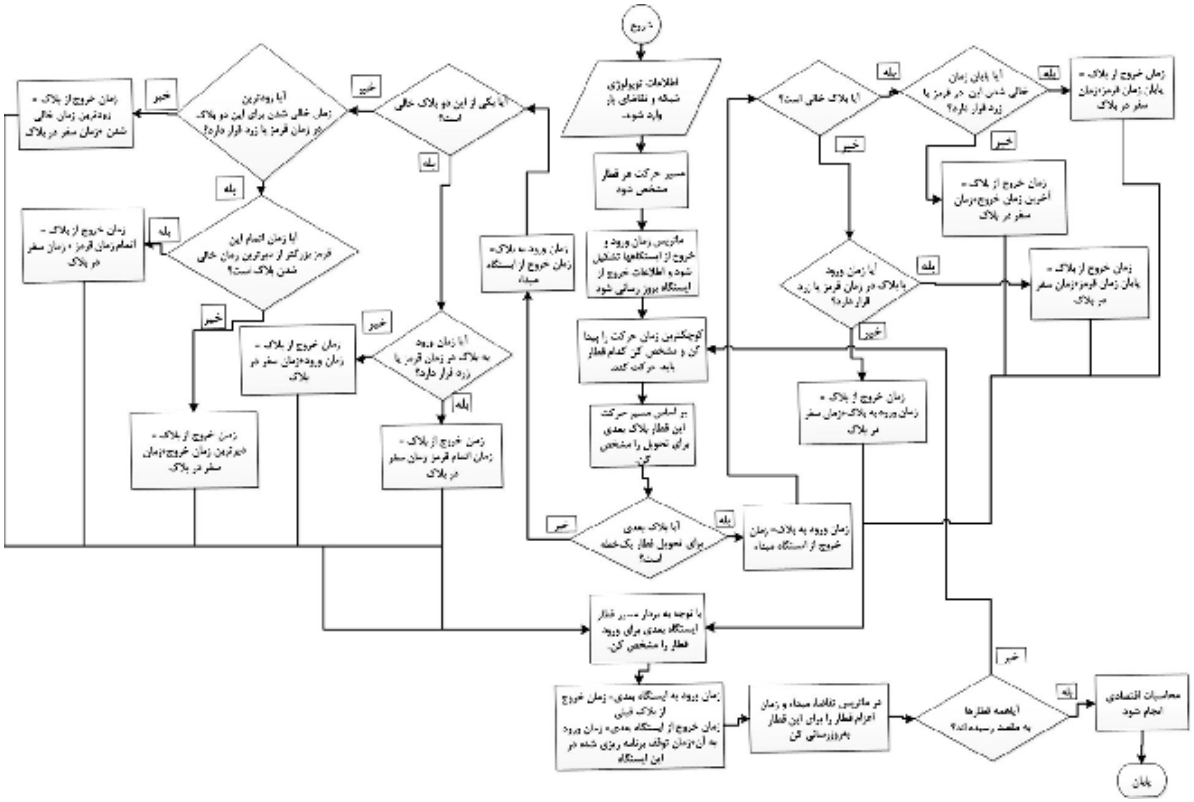
– تعداد لوکوموتیو و تعداد لوکوموتیو–ساعت مورد نیاز به منظور پاسخگویی به تقاضای بار،

– زمان معطلی ناشی از تلاقی و سبقت برای قطارها در شبکه راه‌آهن،

– میزان مصرف سوخت،

– توان کششی کل به کار رفته در جابجایی بار،

شکل ۳ فلوچارت شبیه‌سازی حرکت قطارها در شبکه را نشان می‌دهد و شکل ۴ نشان دهنده کل فرایند انجام شبیه‌سازی است.

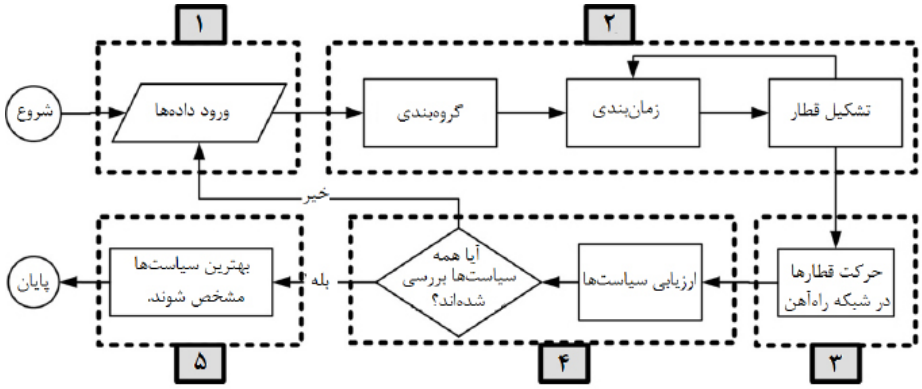


شکل۳: فلوچارت شبیه‌سازی حرکت قطارهای باری و مسافری در شبکه راه‌آهن

Fig. 3. Flowchart used for simulating the movement of freight and passenger trains in the rail network

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۴: شمای کلی فرایند شبیه‌سازی

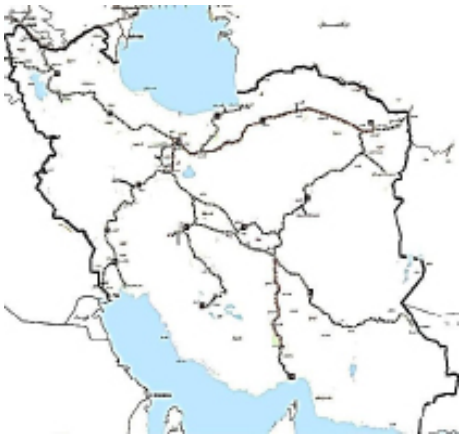
Fig. 4. General simulation process flowchart

۳- مطالعه موردی

حمل بار در شبکه راه‌آهن ایران، به‌عنوان مطالعه موردی در این پژوهش انتخاب‌شده است. شبکه راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران بطور مشترک برای حمل بار و مسافر مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شبکه راه‌آهن دارای ۳۶۸ بلاک، ۹۹۹۲ کیلومتر راه‌آهن (با احتساب خط دوم در مسیرهای دوخطه) و ۳۶۴ ایستگاه است که ۴۴ ایستگاه از این ایستگاه‌ها تشکیلاتی هستند. شکل ۵ شمایی از شبکه راه‌آهن در ایران را نشان می‌دهد.

اطلاعات تقاضای بار مبداء– مقصد استفاده شده در این مطالعه بر اساس اطلاعات چهار ساله (از ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۱) اداره سیر و حرکت راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران تهیه شده است [۲۰]. با توجه به اطلاعات در دسترس برای هر زوج مبدا–مقصد، تقاضای روزانه برحسب تعداد واگن بصورت تصادفی با توزیع یکنواخت بدست می‌آید. بنابراین، با توجه به در نظرگیری تصادفی تقاضای بار، نرم‌افزار در هر اجرا جدول جدیدی از قطارها را در شبکه حرکت می‌دهد. جدول ۲ نشان‌دهنده لوکوموتیوهای باری موجود در شبکه راه‌آهن ایران به همراه توان هریک است.

در این مطالعه از نرم‌افزار شبیه‌سازی گروه‌بندی و زمان‌بندی حرکت بار در شبکه راه‌آهن که در سال ۱۳۹۲ تهیه شده است [۷]، استفاده گردیده است. ۹ سناریو (سیاست ترکیبی) گروه‌بندی و زمان‌بندی حرکت بار برای راه‌آهن ایران آزمایش شد. ترکیب این سیاست‌ها در سناریوهای مختلف در جدول ۳ قابل مشاهده هستند. در آزمایش هر سناریو، سیاست‌های گروه‌بندی و زمان‌بندی حرکت بار در شبکه راه‌آهن ایران به مدت ۳۱ روز شبیه‌سازی شد که پس از حذف اطلاعات روز اول، متوسط مقدار آلاینده‌های منتشر شده برای ۳۰ روز بدست آمد. شبیه‌سازی گروه‌بندی و زمانبندی حرکت بار در شبکه راه‌آهن ایران با رایانه‌ای با مشخصات Ghz Dual47/3 CPU و حافظه موقت ۴ گیگابایت انجام شد. میانگین زمان محاسبات برای ۳۱ روز شبیه‌سازی گروه‌بندی و حرکت بار در شبکه راه‌آهن ۳ ساعت و ۴۸ دقیقه بطول انجامید که این زمان تحت تأثیر سیاست های گروه‌بندی و زمان‌بندی قرار دارد (توضیحات بیشتر در مورد نرم‌افزار در ضمیمه آورده شده است).



شکل۵: شبکه راه‌آهن ایران

Fig. 5. Iran rail network

جدول۲: انواع لوکوموتیو باری در حال سرویس در شبکه راه‌آهن ایران ۱۳۹۱

Table 2. Running locomotives in Iran

نوع لوکوموتیو	تعداد	توان (HP)
G12	۱۱۸	۱۲۵۰
G22	۳۸	۱۵۲۰
GT-26 (۱۵دنده)	۱۰۲	۳۸۰۰
GT-26 (۱۷دنده)	۹۲	۳۴۳۰
GT-26 (۱۸دنده)	۴۵	۳۱۸۰
AD43C-1	۶۴	۵۰۰۰
AD43C-2	۲۳	۵۹۳۰
U30-C	۸	۲۷۰۰
C30-7	۶۱	۴۸۳۰

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳: سناریوهای زمان‌بندی و گروهبندی

Table 3. List of the studied scenarios

شماره	سناریو
۰	زمان‌بندی برنامه‌ای- عدم گروه‌بندی (عدم انجام کار)
۱	زمان‌بندی برنامه‌ای- عدم گروه‌بندی غیرضروری
۲	زمان‌بندی برنامه‌ای- گروه‌بندی کامل
۳	زمان‌بندی انعطاف‌پذیر- عدم گروه‌بندی
۴	زمان‌بندی انعطاف‌پذیر- عدم گروه‌بندی غیرضروری
۵	زمان‌بندی انعطاف‌پذیر- گروه‌بندی کامل
۶	زمان‌بندی ترکیبی- عدم گروه‌بندی
۷	زمان‌بندی ترکیبی- عدم گروه‌بندی غیرضروری
۸	زمان‌بندی ترکیبی- گروه‌بندی کامل

۴- نتایج

خروجی نرم‌افزار شبیه‌سازی گروه‌بندی و زمانبندی حرکت قطار در شبکه راه‌آهن گراف‌های قطارهای باری به همراه اطلاعات دیگری مانند نوع لوکوموتیوهای بسته شده به قطار، تعداد واگن‌های قطار و تناژ بار ناخالص قطار است که برای سناریوهای مختلف گروه‌بندی و زمانبندی واگن‌های باری محاسبه شده‌اند. بنابراین با توجه به مشخص بودن گراف حرکت قطارهای تشکیل شده و نوع لوکوموتیوهای کشنده‌ی آن‌ها می‌توان میزان مصرف سوخت و میزان انتشار آلاینده‌ها را در سناریوهای مختلف گروه‌بندی و زمان‌بندی مشخص کرد.

بر اساس روش‌شناسی ارائه شده در بخش ۲-۲ در این پژوهش میزان آلاینده‌های PM، NO_x، CO، HC بدست آمده‌اند. آلاینده‌های SO_2 و CO_2 پس از محاسبه میزان مصرف سوخت نیز از روش ارائه شده در بخش ۲-۲ محاسبه شده‌اند. این مقادیر در جدول ۵ قابل مشاهده هستند.

جدول ۵ مقادیر میانگین تناژ مقادیر آلاینده‌های لوکوموتیوهای باری را برای ۳۰ روز شبیه‌سازی حرکت قطار در شبکه راه‌آهن ایران نشان می‌دهد. همانطورکه در جدول ۵ مشاهده می‌شود سناریوهای ۱، ۲، ۴، ۵، ۷ و ۸ میانگین آلاینده‌های کمتری را نسبت به سناریوی عدم انجام کار تولید می‌کند. با توجه به اینکه در سناریوی عدم انجام کار گروه‌بندی واگن‌ها انجا به نظر می‌رسد انجام عمل گروه‌بندی واگن‌ها از آنجا که موجب کم شدن تعداد قطارها در شبکه راه‌آهن می‌شود، از میزان آلاینده‌ها می‌کاهد.

از آنجا که میزان اثر آلاینده‌های مختلف بر سلامت انسان متفاوت است، در این مطالعه هزینه بر اساس میزان خطر آلاینده‌ها محاسبه گردیده است. در این راستا، برای انجام مقایسه بین نتایج دو سناریوی شبیه‌سازی شده آلاینده‌ها به هزینه تبدیل شده‌اند و مجموع هزینه‌های آلاینده‌ها ملاک برتری سناریو در نظر گرفته شده است. این تبدیل هزینه با توجه به جدول ۴ صورت گرفته است.

جدول۴: هزینه آلاینده‌های مختلف ۲۱

Table 4: Cost of emissions

آلاینده	هزینه (یورو بر تن)
CO_2	۱۳/۳۳
SO_2	۲۲۰/۶۹
PM	۹۷۷۸/۸۴
NO_x	۱۹۰
CO	۱۰/۴۳
HC	۳۰/۳

در این پژوهش از آنجا که توزیع تقاضای بار و نیز وجود لوکوموتیو در ایستگاه‌های مبدا و تشکیلاتی در هر تکرار شبیه‌سازی تصادفی است، نرم‌افزار شبیه‌ساز در هر بار شبیه‌سازی خروجی متفاوتی از قطارهای تشکیل و حرکت داده‌شده ارایه می‌کند. برای اعتبارسنجی نتایج، هر سناریو سه بار شبیه‌سازی شده است و با توجه به میانگین و واریانس نتایج حاصل از این سه بار شبیه‌سازی، میانگین اختلاف میزان انتشار آلاینده‌های مختلف در هر زوج سناریو، در سطح معناداری ۵ درصد باهم مقایسه شده است. نتایج این مقایسه در جدول ۶ قابل مشاهده است.

مقایسه انجام شده در جدول ۶ بر اساس مقایسه اختلاف میانگین هزینه کل آلاینده‌ها برای هر دو زوج سناریوی موجود با صفر (درسطح اهمیت ۵ درصد) می‌باشد. رابطه ۵ برای هر زوج سناریو دو مقدار متمایز را بدست می دهد که اگر هر دوی آن‌ها مثبت باشد Y_1 با معناداری درسطح اهمیت ۵ درصد از Y_2 بیشتر است. اگر هر دوی این مقادیر منفی باشند، Y_1 با معناداری ۵ درصد از Y_2 کمتر است و اگر یکی مثبت و دیگری منفی باشد نمی‌توان با سطح معناداری یادشده در مورد برتری جواب صحبت کرد.

$$(\overline{Y_1}-\overline{Y_2})\pm t_{1-\frac{\alpha}{2},\nu}\,S.E.(\overline{Y_1}-\overline{Y_2}) \quad (۵)$$

$$S.E.(\overline{Y_1}-\overline{Y_2})=\sqrt{\frac{S_1^2}{R_1}+\frac{S_2^2}{R_2}} \quad (۶)$$

$$\nu=\frac{(\frac{S_1^2}{R_1}+\frac{S_2^2}{R_2})^2}{\frac{(\frac{S_1^2}{R_1})^2}{R_1-1}+\frac{(\frac{S_2^2}{R_2})^2}{R_2-1}} \quad (۷)$$

در رابطه‌های ۵، ۶ و ۷ $S.E.(\overline{Y_1}-\overline{Y_2})$ خطای استاندارد است که از رابطه‌ی ۶ بدست می‌آید، R_1 و R_2 تعداد تکرار شبیه‌سازی هر دو زوج سناریوی مقایسه‌ای هستند. S_1 و S_2 واریانس هزینه‌ها برای هر سناریو هستند و υ که از رابطه ۷ بدست می‌آید درجه آزادی است.

www.SID.ir

Archive of SID

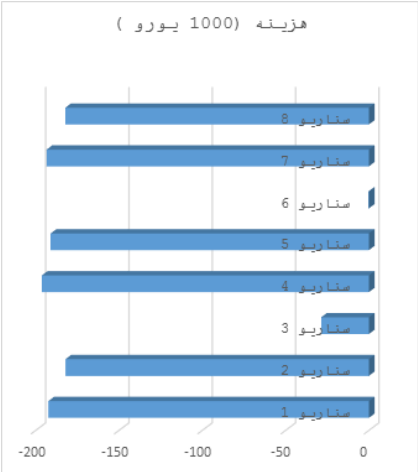
جدول ۵: میانگین آلاینده‌ها و انحراف معیارشان در هر سناریو برحسب تن (برای ۳ بار تکرار شبیه‌سازی)

Table 5. Table 5: Average and standard deviation of emissions for each scenario in tone (3 iterations)

سناریو	آماره	HC	CO	NO_x	PM	SO_2	CO_2
۰	میانگین	۳/۹۵	۱۰/۵۲	۷۰/۳۸	۲/۶۵	۵۵۹/۷۹	۳۲۳۱/۲۷
	انحراف معیار	۱/۴۳	۳/۸۰	۲۵/۴۵	۰/۹۶	۱۱۵/۱۶	۶۶۴/۷۲
۱	میانگین	۰/۷۹	۲/۰۹	۱۴	۰/۵۳	۱۹/۵۶	۱۱۲/۹۲
	انحراف معیار	۰/۱۵	۰/۴۰	۲/۶۷	۰/۱۰	۲/۴۹	۱۴/۳۸
۲	میانگین	۱/۲۹	۳/۴۴	۲۳/۰۱	۰/۸۷	۳۷/۳۲	۲۱۵/۴۲
	انحراف معیار	۰/۰۶	۰/۱۵	۱/۰۳	۰/۰۴	۱/۶۵	۹/۵۳
۳	میانگین	۳/۵۷	۹/۵۲	۶۳/۶۶	۲/۴	۴۷۶/۳	۲۷۴۹/۳۶
	انحراف معیار	۰/۲۲	۰/۵۸	۳/۹	۰/۱۵	۶۴/۰۳	۳۶۹/۵۹
۴	میانگین	۰/۵۹	۱/۵۸	۱۰/۵۹	۰/۴	۱۳/۰۴	۷۵/۲۶
	انحراف معیار	۰/۱۱	۰/۳۱	۲/۰۵	۰/۰۸	۱/۶۱	۹/۳
۵	میانگین	۰/۸۲	۲/۱۷	۱۴/۵۵	۰/۵۵	۲۳/۰۷	۱۳۳/۱۴
	انحراف معیار	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۳۳	۰/۰۱	۲/۲۸	۱۳/۱۶
۶	میانگین	۳/۹۵	۱۰/۵	۷۰/۲۸	۲/۶۵	۵۵۸/۵۷	۳۲۲۴/۲۴
	انحراف معیار	۰/۰۹	۰/۲۳	۱/۵۲	۰/۰۶	۷۵/۰۵	۴۳۳/۲۲
۷	میانگین	۰/۷۹	۲/۰۹	۱۴/۳۵	۰/۵۳	۱۶/۰۷	۹۲/۷۴
	انحراف معیار	۰/۰۵	۰/۱۴	۰/۹۵	۰/۰۴	۱/۱	۶/۳۳
۸	میانگین	۱/۲۹	۳/۴۵	۲۳/۰۴	۰/۸۷	۳۶/۸۳	۲۱۲/۵۹
	انحراف معیار	۰/۳۷	۰/۸۵	۶/۶۶	۰/۲۵	۸/۵۹	۴۹/۵۸

شکل ۶ نشان دهنده اختلاف هزینه‌های آلاینده‌ها در هر سناریو نسبت به سناریوی عدم انجام کار است. همان طور که در این شکل قابل مشاهده است. سناریوهای ۳ و ۶ اختلاف کمتری با سناریو عدم انجام کار دارند. به نظر می‌رسد عدم انجام گروه‌بندی در این سناریوها موجب افزایش میزان آلاینده‌ها شده است.

در جدول ۶، هر گزینه در هر ردیف که دارای آلایندگی کمتری از گزینه ستون (در سطح معناداری ۵ درصد) باشد، گزینه بهتری شناخته می‌شود. همانطور که در جدول ۶ قابل مشاهده‌است میانگین آلاینده‌ها در سناریوی عدم انجام کار درسطح اهمیت مورد مطالعه از تمام گزینه‌ها غیر از سناریوی ۶ (که این تفاوت معنادار نیست) بدتر است. به بیان دیگر اجرای هر سناریو غیر از سناریوی ۶ منجر به کاهش آلودگی هوا می‌گردد. انتخاب سیاست گروه‌بندی کامل در سناریوهای ۲، ۵ و ۸ نسبت به سناریوهای ۱، ۴ و ۷ که در آن‌ها عدم گروه‌بندی غیرضروری صورت گرفته است میزان میانگین آلاینده‌ها را (درسطح اهمیت ۵ درصد) کاهش می‌دهد.



شکل ۶: کاهش میانگین کل هزینه آلاینده‌ها در هر سناریو نسبت به عدم‌انجام‌کار

Fig. 6. Differences between emissions cost of each scenario and the do nothing

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۶: مقایسه اختلاف میانگین کل آلاینده‌ها برای زوج سناریوهای مختلف با صفر (درسطح اهمیت ۵ درصد)

Table 6: Comparing total emission cost by scenarios (95 % confidence interval)

	عدم انجام کار	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴	سناریو ۵	سناریو ۶	سناریو ۷	سناریو ۸
عدم انجام کار	--	×	×	×	×	×	#	×	×
سناریو ۱	✓	--	✓	✓	×	✓	✓	×	✓
سناریو ۲	✓	×	--	✓	×	×	✓	×	#
سناریو ۳	✓	×	×	--	×	×	✓	×	×
سناریو ۴	✓	✓	✓	✓	--	✓	✓	✓	✓
سناریو ۵	✓	×	✓	✓	×	--	✓	×	✓
سناریو ۶	#	×	×	×	×	×	--	×	×
سناریو ۷	✓	✓	✓	✓	×	✓	✓	--	✓
سناریو ۸	✓	×	#	✓	×	×	✓	×	--

"✓" نشان‌دهنده بهتر بودن سناریوی‌ردیف(کمتر بودن میانگین آلاینده‌ها) با ۹۵ ٪ اطمینان
"×" نشان‌دهنده بدتر بودن سناریوی‌ردیف(بیشتر بودن میانگین آلاینده‌ها) با ۹۵ ٪ اطمینان
"#" نشان‌دهنده رد نشدن فرض H_0

با توجه به جدول ۶ در مقایسه سناریوهای ۳، ۴ و ۵ به ترتیب نسبت به سناریوهای عدم انجام کار، ۱ و۲ می‌توان گفت: انتخاب سیاست زمان‌بندی انعطاف‌پذیر منجر به ایجاد هزینه آلاینده‌های کمتری نسبت به زمان‌بندی برنامه‌ای درسطح اهمیت ۵ درصد می‌شود. این نتیجه قابل انتظار است چراکه در حالت زمان‌بندی انعطاف‌پذیر، کم بودن میزان تقاضا در بسیاری از زوج‌های مبداء–مقصد باعث می‌شود کالاهای این زوج‌های مبداء–مقصد به حد نصاب برای تشکیل قطار و حرکت بار نرسد.

در جدول ۶ قابل مشاهده است که سیاست زمان‌بندی ترکیبی در سناریوهای ۶، ۷ و ۸ موجب کاهش هزینه آلاینده‌ها نسبت به حالت زمان‌بندی انعطاف‌پذیر می‌گردد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که سناریوی ۴ (درسطح اهمیت ۵ درصد) نسبت به سایر گزینه‌ها هزینه کمتری ایجاد می‌کند.

۵- جمع‌بندی

در این پژوهش با استفاده از روش شبیه‌سازی کامپیوتری برای اولین بار تخمینی از آلاینده‌های SO_2، PM، NO_x، CO، HC و CO_2 لوکوموتیوهای دیزلی باری در شبکه راه‌آهن ایران در شرایط مختلف گروه‌بندی و حرکت بار بدست آورده شد. گروه‌بندی و زمان‌بندی واگن‌های باری هرکدام در سه سطح تحت ۹ سناریو با استفاده از شبیه‌سازی آزمایش شد هزینه کل آلاینده‌ها بر سلامت انسان (با استفاده از جداول ۴ و ۵) محاسبه شد. سنجش این سناریوها در انجام عملی آن‌ها در واقعیت هزینه‌بر و نیازمند صرف وقت بسیار است. شبیه‌سازی به عنوان راهی کم هزینه و با صرف زمان کم می‌تواند برای امتحان سناریوها بکار رود.

وجود محدودیت‌های بسیار که در امر جابجایی بار در شبکه راه‌آهن دخالت دارند و ابعاد بزرگ مسئله، مطالعات تحلیلی موجود را وادار به در نظر گرفتن فرضیات و ساده‌سازی‌های زیادی کرده است که ممکن است به نتایج غیرقابل اجرا در عمل منجر شود. آزمایش گزینه‌های پیشنهادی با مدل شبیه‌سازی ارائه شده در مطالعات جاری می‌تواند این اطمینان را بوجود آورد که جواب‌ها در عمل قابل اجرا هستند.

با توجه به نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی سناریوهای مختلف گروه‌بندی و زمان‌بندی در جدول ۶ می‌توان (درسطح اهمیت ۵ درصد) گفت تمام سناریوها از گزینه عدم انجام کار بهتر هستند. دلیل این امر عدم انجام گروه‌بندی واگن‌ها در سناریوی عدم انجام کار است.

با توجه به نتایج بدست آمده از جدول ۶ می‌توان گفت انتخاب همزمان سیاست عدم گروه‌بندی غیرضروری واگن‌ها و سیاست زمان‌بندی انعطاف‌پذیر می‌تواند (درسطح اهمیت ۵ درصد) هزینه آلاینده‌ها را نسبت به سایر ترکیب سیاست‌ها گروه‌بندی و زمان‌بندی کاهش دهد. از نتایج جدول ۶ پیداست که انتخاب سیاست عدم گروه‌بندی بار (اعزام مستقیم واگن‌های باری از مبدأ به سمت مقصدشان) موجب افزایش آلاینده‌ها می‌شود.

هزینه‌های مختلفی در انتخاب سیاست گروه‌بندی و زمان‌بندی اعزام

www.SID.ir

Archive of SID

بار نقش دارد از آن جمله می‌توان به هزینه‌های عملیاتی گروه‌بندی مجدد واگن‌های باری، هزینه‌های ناشی از تأخیر و ماندگاری انواع بار نام برد. در پژوهش انجام شده از آنجا که دسترسی به داده‌های این هزینه‌ها میسر نگردید، لذا این هزینه‌ها در تحلیل سناریوها در نظر گرفته نشده است. در نظرگیری هزینه‌های عملیاتی راه‌آهن، هزینه تأخیرها در کنار هزینه آلودگی برای مطالعات آتی در تحلیل گروه‌بندی و حرکت بار پیشنهاد می‌گردد.

مراجع

[1] Air Quality Control Company, Tehran air quality report, M92/03/03/(U)/01, (2013) (In Persian).

[2] D. Bailey, G. Solomon, Pollution prevention at ports: clearing the air, Environmental Impact Assessment Review, 24(7-8) (2004) 749-774.

[3]

[4] A.J. Kean, R.F. Sawyer, R.A. Harley, A fuel-based assessment of off-road diesel engine emissions, Journal of the Air & Waste Management Association, 50(11) (2000) 1929-1939.

[5] M.W. Jorgensen, S.C. Sorenson, Estimating emissions from railway traffic, International journal of vehicle design, 20(1-4) (1998) 210-218.

[6] M. Aly, Models to estimate emissions from railway transport systems, Alexandria Engineering Journal, 41(1) (2002) 143-152.

[7] B.B. Carvalhaes, R. de Alvarenga Rosa, D.A. Márcio de Almeida, G.M. Ribeiro, A method to measure the eco-efficiency of diesel locomotive, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 51 (2017) 29-42.

[8] A. Moeinaddini, Simulation of freight grouping and moving in railroad networks for evaluating freight transportation strategies, M.Sc. Thesis, Sharif University of Technology,, (2013) (In Persian).

[9] A.A. Assad, Models for rail transportation, Transportation Research Part A: General, 14(3) (1980) 205-220.

[10] L.D. Bodin, B.L. Golden, A.D. Schuster, W. Romig, A model for the blocking of trains, Transportation Research Part B: Methodological, 14(1-2) (1980) 115-120.

[11] T. Crainic, J.-A. Ferland, J.-M. Rousseau, A tactical planning model for rail freight transportation, Transportation science, 18(2) (1984) 165-184.

[12] M.H. Keaton, Designing optimal railroad operating plans: Lagrangian relaxation and heuristic approaches, Transportation Research Part B: Methodological, 23(6) (1989) 415-431.

[13] H. Jin, Designing robust railroad blocking plans, Massachusetts Institute of Technology, 1998.

[14] R.M. Hasany, Y. Shafahi, Ant colony optimisation for finding the optimal railroad path, in: Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport, Thomas Telford Ltd, 2016, pp. 218-230.

[15] E. Petersen, A. Taylor, A structured model for rail line simulation and optimization, Transportation Science, 16(2) (1982) 192-206.

[16] M.M. Dessouky, R.C. Leachman, A simulation modeling methodology for analyzing large complex rail networks, Simulation, 65(2) (1995) 131-142.

[17] S.F. Hallowell, P.T. Harker, Predicting on-time performance in scheduled railroad operations: methodology and application to train scheduling, Transportation Research Part A: Policy and Practice, 32(4) (1998) 279-295.

[18] O.K. Kwon, Managing heterogeneous traffic on rail freight networks incorporating the logistics needs of market segments, Massachusetts Institute of Technology, 1994.

[19] EPA, User's guide for the final NON-ROAD 2005 model., Office of Transportation and Air Quality, EPA 420-R-05-013 (2005).

[20] W.W. Hay, Railroad engineering, John Wiley & Sons, 1982.

[21] Railways Research Center of Iran, Statistical yearbook of the railway administration of the Islamic Republic of Iran, Tehran, Iran, (2014) (In Persian).

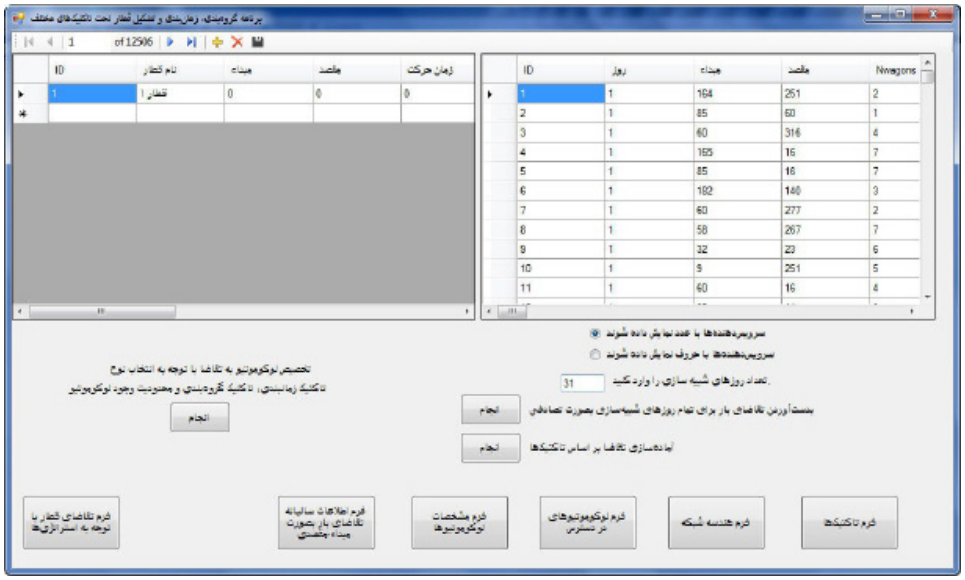
[22] P. Romilly, Substitution of bus for car travel in urban Britain: an economic evaluation of bus and car exhaust emission and other costs, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 4(2) (1999) 109-125.

ضمائم

پنجره‌ی اصلی نرم‌افزار شبیه‌سازی گروه‌بندی و حرکت قطار در شبکه راه‌آهن ایران مانند شکل ۷ است. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است. نرم‌افزار دارای پنجره‌های دیگری برای ورود اطلاعات هندسه شبکه، تاکتیک‌های گروه‌بندی و زمان‌بندی، لوکوموتیوهای در دسترس در ایستگاه‌های مبداء و تشکیلاتی، مشخصات هریک از انواع لوکوموتیوهای در دسترس به لحاظ توان کششی، ماتریس تقاضای بار بصورت واگن و تناژ است. که بعد از تشکیل قطارها با توجه به سیاست گروهبندی و زمانبندی در هر سناریو حرکت ترافیک قطارها را در شبکه شبیه‌سازی می‌کند. خروجی این نرم‌افزار گراف قطارهای باری و ماتریس عملکرد ایستگاه‌ها و بلاک‌ها است. محاسبات مصرف سوخت و میزان آلاینده‌ها انتشار یافته با استفاده از گراف حرکت قطارها در شبکه راه‌آهن ایران محاسبه شده است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۷: پنجره اصلی برنامه گروه‌بندی بار

Fig. 7. The main window of the simulation software

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

A. Moeinaddini, M. Habibian, Simulating freight-wagon grouping and train scheduling policies for Iran rail network: A study on exhausted emissions of diesel locomotives, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(4) (2018) 685-696.

DOI: 10.22060/ceej.2017.12657.5243

www.SID.ir