



# بهبود کارایی راه آهن با استفاده از رویکرد تلفیقی شبیه سازی و تحلیل پوششی داده ها؛ مطالعه موردی: سیستم حمل بار در شبکه ریلی جمهوری اسلامی ایران

امیرسامان خیرخواه\* و حسن ذوالفقاری

## کلمات کلیدی

شبیه سازی گسسته پیشامد،  
بهینه سازی شبیه سازی،  
کارایی،  
تحلیل پوششی داده ها،  
راه آهن جمهوری اسلامی ایران

## چکیده:

در این مقاله سیستم حمل بار در شبکه حمل و نقل ریلی جمهوری اسلامی ایران به کمک روش شبیه سازی سیستم های گسسته پیشامد مدل سازی شده است. تحلیل مدل نشان می دهد که ظرفیت سیستم بیشتر به امکانات تخلیه و بارگیری در ایستگاه های شبکه وابستگی دارد تا تعداد واگن ها و لکوموتیوها. لذا، در این مقاله، حداقل سازی تعداد واگن ها و در نتیجه تعیین تعداد بهینه لکوموتیوها، به عنوان یکی از راه های بهبود کارایی سیستم در نظر گرفته شده است. بهینه سازی سیستم به وسیله روش بهینه سازی شبیه سازی، نشان می دهد که بیش از ۴٪ کل واگن های موجود در شبکه مازاد بر نیاز است. به منظور تحلیل میزان ارتقاء کارایی شبکه بعد از بهینه سازی؛ میزان کارایی نواحی مختلف با استفاده از روش تحلیل پوششی داده ها در قبل و پس از بهینه سازی ارزیابی و مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد سیستم حمل و نقل ریلی در بخش بار در حال حاضر حدود ۱۹٪ زیر ظرفیت اسمی فعالیت می کند که بعد از بهینه سازی بیش از ۵٪ افزایش کارایی خواهد داشت.

## ۱. مقدمه

راه آهن به عنوان وسیله ای کارا و با ظرفیت بالا در جابجایی کالا و مسافر نقش مهمی در اقتصاد هر کشور دارد. نقش راه آهن در ایران به دلیل پراکنده بودن مراکز جمعیتی و اقتصادی در کل کشور و مسافت نسبتاً زیاد بین آنها، از اهمیت بالایی برخوردار است. محدودیت منابع مالی و عدم سود آوری سریع پروژه های زیربنایی راه آهن از موانع اصلی گسترش شبکه راه آهن است و بنابراین استفاده بهینه از منابع و امکانات موجود از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است.

تاریخ وصول: ۹۰/۲/۱۲

تاریخ تصویب: ۹۰/۳/۲۵

\*نویسنده مسئول مقاله: دکتر امیرسامان خیرخواه، عضو هیئت علمی گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا،  
Kheirkhah@basu.ac.ir

حسن ذوالفقاری، کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه بوعلی سینا،  
HassanZolfaghari@gmail.com

ساخت راه آهن سراسری ایران در سال ۱۳۰۶ در محل فعلی ایستگاه تهران شروع شد و از همان وقت رسماً ساختمان راه آهن از سه نقطه جنوب- مرکز- شمال آغاز گردید [۱]. با توجه به توسعه راه آهن جمهوری اسلامی ایران و اتصال آن به راه آهن خاورمیانه و اروپا از طریق ایستگاه های رازی، سرخس، جلفا، جاوه و ترمینال هایی دریایی؛ نیازمند برنامه ریزی دقیق و بهره برداری صحیح از ناوگان است که به رشد و شکوفایی در جابجایی بار و مسافر و استفاده بهینه از پتانسیل بالقوه ترانزیتی ریلی و کاهش هزینه های بسیار بالای خرید و تولید ناوگان و افزایش کارایی منجر خواهد شد. در حال حاضر راه آهن از ۹۰۳۶ کیلومتر خطوط اصلی، ۲۴۵۷ کیلومتر خطوط فرعی، ۲۱۷۲۶ واگن باری، ۱۶۰۸ واگن مسافری، ۶۳۶ لکوموتیو، ۴۰۲ ایستگاه اصلی و ۱۴ ناحیه اصلی برخوردار است. در سال ۸۷، ۲۶۲۲۵ هزار نفر مسافر، ۱۵۳۱۲ میلیون نفر کیلومتر مسافر، ۳۳۰۴۴ هزار تن بار و ۲۰۵۴۰ میلیون تن کیلومتر بار توسط راه آهن جابجا شده است [۲].

[۱۱]. در سال ۲۰۰۶ دینا و همکاران [۱۲]، در مورد مساله تعیین تعداد وسیله نقلیه مورد نیاز برای ایجاد یک سرویس حمل و نقل پاسخگو، با یک کیفیت از پیش تعیین شده توسط کاربر، بر حسب زمان های انتظار در توقف ها و ماکزیموم انحراف مجاز؛ تحقیق کرده اند. در سال ۲۰۰۸ گادوین و همکاران [۱۳]، با استفاده از رویکرد مبنی بر شبیه سازی، تدبیری برای اندازه ناوگان لکوموتیوها پیشنهاد کرده اند.

کانتوس [۱۴] به ارزیابی کارایی راه آهن های اروپا بدون تفکیک بخش باری و مسافری، با استفاده از تحلیل پوششی داده ها پرداخته است. در این مطالعه که در کشور اسپانیا انجام گرفته با در نظر گرفتن ۱۶ کشور اروپایی به ارزیابی کارایی آنها پرداخته، که با توجه به نتایج حاصل از این مطالعه راه آهن کشورهای سوئد، سوئیس، فنلاند و هلند از بالاترین کارایی و راه آهن کشورهای نروژ، دانمارک، ایرلند و یونان از پایین ترین کارایی برخوردار می باشند. در سال ۲۰۰۸ یو و لین [۱۵] با استفاده از مدل تحلیل پوششی داده ها شبکه ای چندهدفه، بطور همزمان برای تخمین کارایی فنی، اثر بخشی خدمات و اثر بخشی فنی در بخش بار و مسافر برای ۲۰ راه آهن انتخابی بکار گرفته اند. طبق جستجوها و یافته های محققین، تاکنون تنها در استرالیا از مدل VRS جهت مقایسه برخی از راه آهن های دنیا استفاده شده است. این پژوهش توسط کمیسیون بهره وری [۱۶] در سال ۱۹۹۹ میلادی صورت گرفته است. در این تحقیق راه آهن های استرالیا با راه آهن های ۲۲ کشور و با استفاده از ۱۰ پارامتر (۴ پارامتر ورودی و ۶ پارامتر خروجی) مقایسه شده اند.

در سال ۲۰۰۹ یالکینکایا و بیهان [۱۷]، به مدلسازی و حل مبتنی بر شبیه سازی گسسته پیشامد و روش سطح جواب در رابطه با مساله بهینه سازی میانگین زمان سیر مسافران در فرآیند برنامه ریزی مترو پرداخته اند. در سال ۲۰۰۸ آزاده و همکاران [۱۸] با یکپارچه سازی DEA و AHP با شبیه سازی کامپیوتری برای بهبود و بهینه سازی سیستم راه آهن استفاده کرده اند. پل و همکاران با استفاده از الگوریتم های ژنتیک مدل شبیه سازی را بهینه سازی کرده اند [۱۹].

### ۳. روش پیشنهادی

• **شبیه سازی سیستم حمل بار در شبکه ریلی با رویکرد شبیه سازی سیستم های گسسته پیشامد:** شبیه سازی تقلیدی از یک سیستم یا فرآیند واقعی با گذشت زمان بوده و شبیه سازی گسسته پیشامد عبارت است از مدل سازی سیستم هایی که متغیر حالت در آنها در مجموعه ای گسسته از زمان، تغییر می کند [۲۰]. به منظور شبیه سازی هر سیستمی، ابتدا اجزای سیستم و اهداف شبیه سازی تعیین شده و مدل مفهومی و مشخص ترسیم می شوند. گام بعدی

در این مقاله عوامل موثر بر ظرفیت شبکه حمل و نقل ریلی در بخش حمل بار با استفاده از شبیه سازی سیستم تحلیل شده است، نتایج شبیه سازی حاکی از آن است که ظرفیت شبکه، نسبت به امکانات ثابت در ایستگاه های بارگیری و تخلیه حساس تر بوده، لذا افزایش برنامه ریزی نشده واگن ها و لکوموتیوها می تواند منجر به کاهش کارایی سیستم گردد.

در این مقاله بهینه سازی تعداد واگن ها با حفظ ظرفیت موجود، به عنوان یک راه حل موثر در افزایش بهره وری در نظر گرفته شده است. از آنجا که مدل اصلی مبتنی بر شبیه سازی سیستم های گسسته پیشامد است، روش های بهینه سازی شبیه سازی در حل مساله مورد استفاده قرار گرفته است و میزان بهبود کارایی پس از بهینه سازی با استفاده از تحلیل پوششی داده ها ارزیابی شده است.

در ادامه ابتدا ادبیات موجود مرتبط با موضوع مقاله مرور می شود، سپس چارچوب کلی روش پیشنهادی (روش تحقیق) شرح داده می شود. در بخش ۴ چگونگی بکارگیری روش پیشنهادی در مورد شبکه حمل و نقل ریلی جمهوری اسلامی شرح داده شده و نتایج حاصل ارائه می گردد. بخش ۵ به بحث و توضیح نتایج بدست آمده اختصاص دارد. جمع بندی و نتیجه گیری مطالب بخش پایانی مقاله می باشد.

### ۲. مروری بر ادبیات موضوع

تحقیقات نشان می دهد که در عمل، مدل های بهینه سازی ریاضی برای حمل و نقل ریلی بطور جامعی قابل استفاده نیستند و در عوض مدل های شبیه سازی غالباً مورد استفاده قرار می گیرند. در حقیقت بهبود مدل های بهینه سازی در دراز مدت به دلیل حجم زیاد مشکلات، با موانع زیادی مواجه است [۳].

مطالعات برونر [۴] نشان می دهد کاربرد شبیه سازی در حمل و نقل از یک روند صعودی برخوردار بوده است. در راه آهن مدل های شبیه سازی، بطور گسترده ای برای ارزیابی و مقایسه سناریوهای مختلف بکار می رود. از عوامل مهم گسترش هرچه بیشتر مدل های شبیه سازی پیشرفت های بوجود آمده در تکنولوژی کامپیوتر بوده که موجب افزایش سرعت کامپیوترها و روش های بهتر برای مدیریت داده ها شده است [۵]. اسد [۶] مدل های مختلف شبیه سازی در راه آهن را بررسی کرده است.

در مقاله مارتین [۷] شبیه سازی حرکت قطارها برای سه منظور متفاوت انجام می شود، شبیه سازی برای محاسبه عملکرد قطار، شبیه سازی جهت زمان بندی حرکت قطارها، شبیه سازی به منظور تجزیه و تحلیل ظرفیت. گلاورنا [۸] مدل شبیه سازی برای تحلیل ظرفیت خط ارائه کرده است. پترسون و تیلور [۹-۱۰] یک مدل ساخت یافته برای شبیه سازی حرکت قطارها ارائه دادند. یکی از ابزارهای رایج برای زمان بندی حرکت قطارها شبیه سازی است

رجوع شود. در این مقاله هر ناحیه راه آهن ج.ا.ا (بجز ناحیه زاهدان) به عنوان یک واحد تصمیم‌گیرنده (Decision Making Unit) در نظر گرفته شده است که با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها کارایی نسبی آنها ارزیابی می‌گردد.

#### ۴. اجرای روش پیشنهادی

##### ۴-۱. شبیه‌سازی شبکه ریلی ج.ا.ا

در راه آهن ج.ا.ا، اداره کل سیر و حرکت وظیفه بهره‌برداری از امکانات و ارائه خدمات حمل‌ونقل ریلی را بر عهده دارد. رویه حمل بار در شبکه حمل‌ونقل ریلی ج.ا.ا به این صورت است که، ایستگاه‌ها هر روز صبح موجودی واگن‌های باردار و خالی خود را به کنترل ناحیه خودشان اعلام کرده و کنترل ناحیه نیز این آمار را به کنترل مرکزی اداره سیر و حرکت فکس می‌نماید. کنترل مرکزی نیز با توجه به سیاست‌های راه آهن؛ اولویت‌های تأمین تقاضاهای مشتریان را مشخص نموده و دستور اعزام برخی از واگن‌های خالی به ایستگاه‌های مورد نیاز، داده می‌شود. معمولاً واگن‌های خالی با همان قطاری که واگن‌های باردار را حمل می‌کند، جابجا می‌شوند.

الگوریتم پیشنهادی برای ساخت مدل شبیه‌سازی به این صورت است که ابتدا یک تقاضا برای حمل بار از یک ایستگاه مبدأ به یک ایستگاه مقصد مشخص درخواست می‌شود، سپس تعداد واگن‌های مورد نیاز با تعداد واگن‌های موجود در ایستگاه مبدأ مقایسه شده و اگر تعداد واگن‌های موجود در ایستگاه مبدأ بزرگتر یا مساوی تعداد درخواستی باشد در آن صورت به تعداد درخواست شده، واگن باری تخصیص داده می‌شود.

سپس بررسی می‌شود که آیا لکوموتیوی برای حمل این بار در ایستگاه مبدأ در دسترس است یا خیر، حال اگر لکوموتیو در دسترس باشد در آن صورت ابتدا بارها بارگیری شده و سپس قطار باری به سمت ایستگاه مقصد اعزام می‌شود. پس از اینکه قطار به ایستگاه مقصد رسید ابتدا واگن‌های آن جدا شده و بار آن تخلیه می‌شود سپس لکوموتیو آن آزاد می‌گردد.

نکته مهم این است که مطابق رویه موجود کشور، واگن‌های جدا شده از قطار در ایستگاه مقصد باقی می‌مانند و به ایستگاه مقصد واگذار می‌شوند تا اگر یک تقاضا برای حمل بار از این ایستگاه به یک ایستگاه دیگر وجود داشت به تعداد مورد درخواست، از این واگن‌ها به آن تقاضا تخصیص داده شوند.

برای شبیه‌سازی سیستم حمل بار در شبکه ریلی ج.ا.ا، تقاضا و واگن‌ها به عنوان نهاد، مبدأ و مقصد و تعداد واگن‌های مورد نیاز هر تقاضا به عنوان خصوصیت، عمل تخلیه و بارگیری و حمل بار به مقصد به عنوان فعالیت، دریافت و ارسال سفارش و ورود و خروج قطار از ایستگاه به عنوان پیشامد و میانگین زمان انتظار تقاضا به عنوان متغیر حالت در نظر گرفته شده است.

تحلیل داده‌های ورودی و ساخت مدل کامپیوتری است. بازبینی و تعیین صحت و اعتبار مدل مراحل بعدی هستند و مرحله پایانی، اجرای مدل و تحلیل خروجی‌هاست.

#### • تحلیل عوامل موثر بر ظرفیت شبکه با استفاده از طراحی

**آزمایشات:** روش طراحی آزمایشات یکی از روش‌های مفیدی است که به وسیله آن می‌توان متغیرهای کلیدی را که بر مشخصه کیفی مورد نظر فرآیند اثر می‌گذارد شناسایی نمود. در یک شبکه ریلی عوامل زیادی از قبیل: تعداد واگن‌ها، تعداد لکوموتیوها، مدت زمان تخلیه و بارگیری، سرعت قطار، شیب و فراز غالب، مدت زمان مسدودی بلاک و مدت زمان سیر در بلاک بحرانی بر ظرفیت شبکه تأثیرگذارند که در این مقاله برای تحلیل شبکه حمل‌ونقل ریلی ایران، ۴ پارامتر اول که از موثرترین عوامل می‌باشند، در نظر گرفته شده است.

#### • توسعه مدل بهینه‌سازی تعداد واگن‌ها: در فرآیند بهینه‌سازی

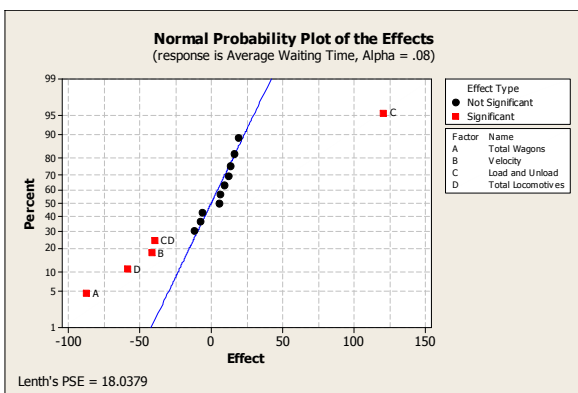
سیستم‌هایی با ماهیت پیچیده، از روش بهینه‌سازی شبیه‌سازی استفاده می‌شود که انعطاف‌پذیری فراوانی را به منظور حل مسائل دارا می‌باشند. بنابراین به منظور بهینه‌سازی سیستم حمل بار در شبکه ریلی ج.ا.ا، از تکنیک بهینه‌سازی شبیه‌سازی استفاده شده است.

#### • ارزیابی کارایی با استفاده از روش‌های تحلیل پوششی

**داده‌ها:** تحلیل پوششی داده‌ها یک ابزار کمی، استاندارد و با کاربرد گسترده در مطالعات اندازه‌گیری کارایی و تحلیل عملکرد می‌باشد. مهمترین علت موفقیت آن به عنوان یک ابزار کمی، ناپارامتری بودن روش آن است [۲۱]. DEA برای اولین بار توسط چارنز، کوپر و رودز در سال ۱۹۷۸ ارائه شد [۲۲-۲۳]. DEA دارای چهار مدل اصلی می‌باشد. همچنین دارای مدل کمکی ترکیبی است. این مدل توسط چارنز در سال ۱۹۸۵ ارائه شد و توسط ترال (۱۹۹۶)، کوپر (۱۹۹۸)، و تن (۱۹۹۸) بسط و تعمیم یافت [۲۲]. مدل بازده به مقیاس ثابت (CCR) اولین مدل اصلی DEA است که توسط چارنز، کوپر و رودز در سال ۱۹۷۸ ارائه شد. این مدل دارای مرکز کارایی با شیب ثابت است [۲۲-۲۳]. مدل بازده به مقیاس افزایشی (IRS) و مدل بازده به مقیاس کاهش (DRS) دو مدل دیگر DEA می‌باشند که توسط چارنز و کوپر در سال ۱۹۸۴ و سیفورد و ترال در سال ۱۹۹۰ ارائه شده‌اند [۲۲ و ۲۴-۲۵]. مدل بازده به مقیاس متغیر (BCC) آخرین مدل اصلی DEA است. این مدل ترکیبی از دو مدل بازده به مقیاس افزایشی و مدل بازده به مقیاس کاهش است. به منظور مطالعه بیشتر در مورد پیشینه مطالعات صورت گرفته در زمینه DEA به مرجع [۲۶]

۲-۴. تحلیل عوامل موثر بر ظرفیت شبکه

در این مقاله برای تحلیل نحوه تأثیرگذاری عوامل مؤثری همچون تعداد واگن های باری، تعداد لکوموتیوهای باری، مدت زمان تخلیه و بارگیری و سرعت قطار بر روی میانگین زمان انتظار تقاضا، از روش طراحی آزمایشات استفاده شده است. این بررسی نشان داد که اولاً: عوامل تعداد لکوموتیوها و مدت زمان تخلیه و بارگیری، از بیشترین تعامل و اثر متقابل برخوردار هستند. ثانیاً: اگر تعداد واگن ها، سرعت قطار و تعداد لکوموتیوها افزایش یابند در آن صورت میانگین زمان انتظار تقاضا کاهش می یابد و اگر مدت زمان تخلیه و بارگیری کالا کاهش یابد در آن صورت میانگین زمان انتظار تقاضا، با شدت بیشتری کاهش می یابد. برای تحلیل بیشتر در این رابطه از نمودار Effects Plot در حالت نرمال، برای میانگین زمان انتظار تقاضا استفاده شده که مطابق شکل (۲) است.



شکل ۲. نمودار Effects Plot برای میانگین زمان انتظار تقاضا در کل شبکه حمل و نقل ریلی ج.ا.ا.

با توجه نمودار (۲)؛ عوامل تعداد واگن های باری، تعداد لکوموتیوهای باری، مدت زمان تخلیه و بارگیری، سرعت قطار و (تعداد لکوموتیوهای باری × مدت زمان تخلیه و بارگیری)، اثر معناداری بر مدل می گذارند و با توجه به اینکه ضریب متغیر مدت زمان تخلیه و بارگیری از سایر متغیرها بیشتر بوده است، می توان نتیجه گرفت این متغیر بیشترین تأثیر را در شبکه می گذارد. بنابراین ظرفیت شبکه، نسبت به امکانات ثابت در ایستگاه های تخلیه و بارگیری حساس تر است و افزایش برنامه ریزی نشده واگن ها و لکوموتیوها می تواند منجر به کاهش کارایی سیستم گردد.

۳-۴. توسعه مدل بهینه سازی تعداد واگن ها

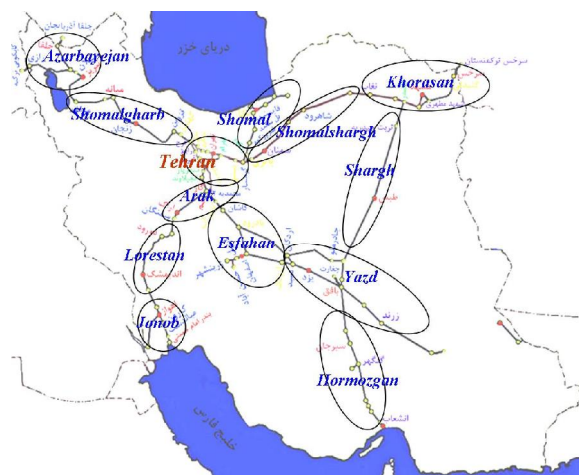
برای بهینه سازی شبیه سازی از نرم افزار OptQuest استفاده شده است. این نرم افزار از روش های فرا ابتکاری معروفی به نام جستجوی ممنوع و جستجوی پراکنده استفاده می نماید که جواب به دست آمده توسط این روش ها یا بهینه است یا مقداری نزدیک به بهینه است [۲۸].

داده های مورد نیاز برای شبیه سازی؛ تاریخ و زمان تشکیل قطار، تعداد واگن های پر و خالی قطار و مدت زمان تخلیه و بارگیری کالا است.

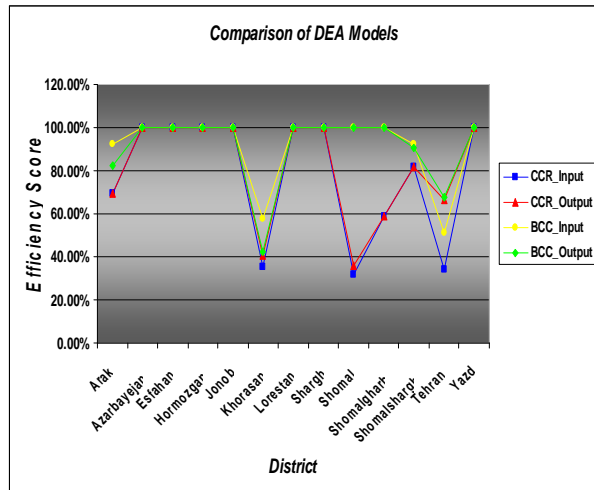
داده های ورودی مربوط به سیر قطارهای باری در مدت یکسال (سال ۸۵) در کل شبکه ریلی ج.ا.ا می باشد. در تحلیل ثبات داده ها مشخص شد که داده های مربوط به ماه های تیر، مهر، آبان، آذر، بهمن هم توزیع هستند ولی نمودار روند نشان داد که این داده ها مستقل نبوده و به شدت الگوی روند نزولی دارند که به منظور رفع این خودهمبستگی و وابستگی از مدل سازی ARIMA با ترکیب بهینه AR(2,0,0) استفاده شده است.

در این مقاله ۷۸ مسیر رفت و برگشت، ۶۹ ایستگاه اصلی، ۳ ایستگاه مرزی خارجی و ۱۳ ناحیه در مدل شبیه سازی در نظر گرفته شده است. همچنین از ۲۶ ایستگاه مجازی برای توزیع اولیه واگن های باری به سراسر شبکه استفاده شده است که این کار از طریق ۲۶ متغیری که در مدل تعریف شده انجام می گیرد. همچنین از نرم افزار Arena که یک نرم افزار تخصصی شبیه سازی فرآیند است و قابلیت ردیابی نیز دارد [۲۷]، برای شبیه سازی استفاده شده است.

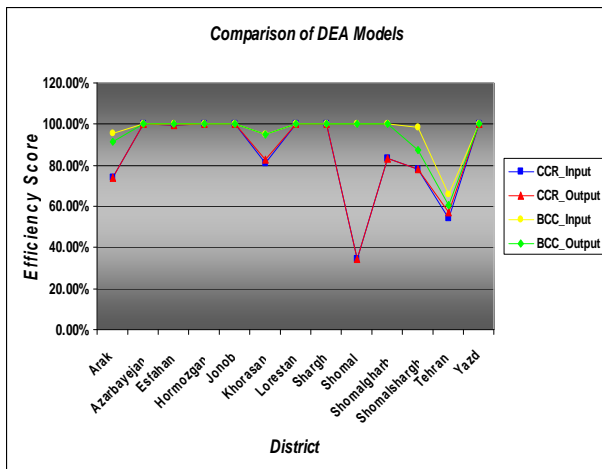
شکل (۱)، نواحی سیزده گانه راه آهن، ایستگاه های اصلی و ایستگاه های مرزی مورد مطالعه در این مقاله را نشان می دهد. پس از ساخت مدل؛ با استفاده از روش مرور خطاها، مدل بازبینی شده و بدون خطا اجرا می شود که نشان از صحت مدل دارد. همچنین برای بررسی اعتبار مدل، خروجی مدل با مقادیر آن در واقعیت مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفت که میانگین درصد تغییرات بسیار ناچیز بوده (حدوداً ۰،۰۰۷) و می توان نتیجه گرفت مدل شبیه سازی شده از اعتبار بالایی برخوردار است. پس از این مرحله، مدل اجرا شده و میانگین زمان انتظار تقاضا در هر یک از نواحی راه آهن بدست آمده است.



شکل ۱. مدل مفهومی سیستم حمل بار در شبکه ریلی جمهوری اسلامی ایران



شکل ۴. کارایی نواحی مختلف قبل از بهینه‌سازی، در دو مدل CCR و BCC در دو جهت ورودی و خروجی محور



شکل ۵. کارایی نواحی مختلف پس از بهینه‌سازی، در دو مدل CCR و BCC در دو جهت ورودی و خروجی محور

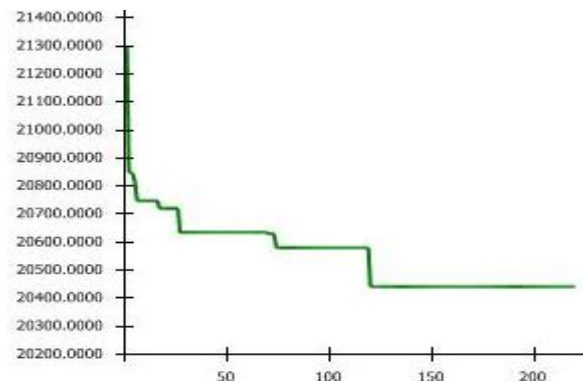
از آنجا که یکی از اهداف روش تحلیلی پوششی داده‌ها، ارائه الگوی مرجع برای نواحی ناکارا می‌باشد، لذا در صورت استخراج نتایجی مبنی بر این که یک مجموعه از واحدها می‌توانند به عنوان الگو مطرح باشند، می‌بایست با استفاده از روش‌هایی اقدام به انتخاب یک واحد برای معرفی واحد مرجع نمود.

در این مقاله نواحی کارا با استفاده از سه روش، مدل اندرسون-پترسون، روش تعداد دفعات مرجعیت (همتا بودن) و روش مجموع ترکیبات وزنی مرجعیت، رتبه‌بندی شده‌اند و در نهایت از روش کپلند [۲۹] برای اولویت‌بندی و رتبه‌بندی نهایی واحدهای کارا، استفاده شده است. نتایج حاصل از این رتبه‌بندی مطابق جداول ۱ و ۲ می‌باشد.

به منظور مدل‌سازی در این نرم‌افزار، واگن‌های باری هر ناحیه به عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شده‌اند و تابع هدف، حداقل کردن تعداد کل واگن‌های باری در شبکه است. محدودیت‌های مدل، کمتر بودن تعداد واگن‌های هر ناحیه (متغیرهای تصمیم) از تعداد واگن‌های موجود هر ناحیه است. همچنین محدودیت کمتر بودن میانگین زمان انتظار تقاضا در حالت بهینه از مقدار آن در وضعیت موجود، یک الزام خروجی است که باید در بهینه‌سازی سیستم لحاظ گردد.

در واقع در این مدل‌سازی ۲۶ متغیر تصمیم و ۲۷ محدودیت در نظر گرفته شده است. پس از وارد کردن مدل در نرم‌افزار OptQuest، مدل حدوداً ۳ روز (۷۲ ساعت) اجرا گردید، که بیش از ۲۰۰ سناریوی متفاوت را بررسی نمود که نتایج آن مطابق نمودار (۳) می‌باشد.

پس از بهینه‌سازی شبیه‌سازی؛ تعداد واگن‌های باری، تعداد لکوموتیوهای باری، میزان مصرف انرژی، تن کیلومتر خالص بار حمل شده و میانگین زمان انتظار تقاضا برای هر یک از نواحی، در وضعیت بهینه بدست می‌آید.



شکل ۳. نمودار بهینه‌سازی شبیه‌سازی سیستم تخصیص واگن‌های باری خالی توسط نرم‌افزار OptQuest

#### ۴-۴. ارزیابی کارایی با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها

به منظور تحلیل میزان ارتقاء کارایی شبکه بعد از بهینه‌سازی؛ میزان کارایی نواحی مختلف با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها در قبل و بعد از بهینه‌سازی ارزیابی و مقایسه شده است. در ارزیابی کارایی؛ تن کیلومتر خالص بار حمل شده در سال به عنوان خروجی و طول خطوط اصلی، تعداد واگن‌های باری، تعداد لکوموتیوهای باری، میزان مصرف انرژی و میانگین زمان انتظار تقاضا به عنوان ورودی در نظر گرفته شده است.

برای محاسبه کارایی نواحی شبکه ریلی ج.ا.ا از نرم‌افزار Frontier Analyst استفاده شده که نتایج حاصله را می‌توان بصورت نمودارهای زیر نشان داد:

جدول ۱. رتبه بندی نواحی کارای قبل و پس از بهینه سازی با سه روش اندرسون-پترسون، دفعات مرجعیت و مجموع وزنی

مرجعیت												نواحی کارای راه آهن	وضعیت
CCR ورودی محور	CCR خروجی محور	BCC ورودی محور	BCC خروجی محور	CCR ورودی محور	CCR خروجی محور	BCC ورودی محور	BCC خروجی محور	CCR ورودی محور	CCR خروجی محور	BCC ورودی محور	BCC خروجی محور		
AP	AP	AP	AP	References	References	References	References	Sum of Weigh	Sum of Weigh	Sum of Weigh	Sum of Weigh		
۱	۱	۱	۱	۴	۴	۵	۲	۴	۴	۵	۴	آذربایجان	وضعیت موجود (قبل از بهینه سازی)
۲	۲	۱	۲	۱	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱	اصفهان	
۶	۷	۱	۵	۴	۴	۵	۲	۴	۴	۵	۶	هرمزگان	
۴	۴	۲	۱	۲	۴	۲	۲	۲	۴	۴	۷	جنوب	
۲	۲	۲	۱	۲	۲	۱	۲	۲	۲	۲	۳	لرستان	
۵	۶	۴	۳	۴	۴	۴	۲	۴	۴	۲	۲	شرق	وضعیت بهینه (توسط روش بهینه سازی شبیه سازی)
۱	۵	۱	۴	۴	۳	۵	۲	۴	۲	۵	۵	یزد	
۱	۱	۱	۱	۵	۴	۲	۱	۵	۵	۳	۴	آذربایجان	
۴	۵	۵	۳	۲	۲	۳	۲	۲	۲	۵	۶	هرمزگان	
۵	۶	۴	۱	۵	۴	۱	۱	۵	۵	۴	۵	جنوب	
۲	۲	۲	۱	۴	۳	۳	۲	۳	۴	۲	۳	لرستان	وضعیت بهینه (توسط روش بهینه سازی شبیه سازی)
۳	۴	۳	۱	۱	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱	شرق	
۱	۲	۱	۲	۳	۲	۲	۱	۴	۳	۶	۲	یزد	

جدول ۲. رتبه بندی نهایی نواحی کارای قبل و پس از بهینه سازی با استفاده از روش کپلند

رتبه بندی نهایی	$\sum C - \sum R$	نواحی کارای راه آهن	وضعیت
۱	۶	اصفهان	وضعیت موجود (قبل از بهینه سازی)
۲	۴	لرستان	
۳	۱	آذربایجان	
۳	۱	جنوب	
۴	-۲	یزد	
۵	-۴	شرق	وضعیت بهینه (توسط روش بهینه سازی شبیه سازی)
۶	-۶	هرمزگان	
۱	۵	شرق	
۲	۳	یزد	
۳	۱	لرستان	
۴	-۱	آذربایجان	
۵	-۳	هرمزگان	
۶	-۵	جنوب	

۵. بحث

شرایط) می باشد، بنابراین می بایست ترتیبی اتخاذ گردد که از این منابع بطور بهینه استفاده گردد. همچنین میانگین کارایی فنی کل، ۸۱.۰۱٪ است. این بدان معنی است که، از ۱۰۰۰۰ واحد ظرفیت نواحی تنها از ۸۱۰۱ واحد استفاده می گردد و ۱۸۹۹

با توجه به نمودار (۴)، در وضعیت موجود؛ میانگین کارایی مدیریت، ۹۱.۷۹٪ است. این بدین معنی است که نواحی راه آهن به لحاظ مدیریت، دارای فضای خالی (با ثابت فرض کردن سایر

## مراجع

- [۱] دفتر آمار و خدمات ماشینی، سالنامه آماری ۱۳۸۷ راه آهن ج.ا.ا، تهران، راه آهن جمهوری اسلامی ایران.
- [۲] مؤمنی، منصور، مباحث نوین تحقیق در عملیات، چاپ دوم، انتشارات دانشکده مدیریت دانشگاه تهران، پاییز، ۱۳۸۷.
- [3] Toth, P., Vigo, D., "A Survey of Optimization Models for Train Routing & Scheduling", Transportation Science, Vol. 32, No. 4, November, 1998.
- [4] Brunner, D.T., Cross, G., McGhee, C., Levis, J., Whitney, D.E., "Toward Increased Use of Simulation in Transportation", In Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference, 1998, pp.1169 -1176.
- [5] Krueger, H., Vaillancourt, E., Drummie, A.M., Vucko, S.J., Bekavac, J., "Simulation Within the Railroad Environment", In Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2000, pp. 1191 – 1200.
- [6] Assad, A.A., "Models for Rail Transportation", Transportation Research, 14A, 980b, pp. 205- 220.
- [7] Martin, "Train Performance & Simulation", In Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, 1999, pp.1287-1294.
- [8] Galaverna, M., Savio, S., Sciuotto, G., "A Railway Operation Simulator for Line Traffic Capacity Evaluation", Computers in Railway, III-Volume 1: Management, Proceeding of COMPRAIL 92, 1992.
- [9] Petersen, E.R., & Taylor, A.J., "A Structured Model for Rail Line Simulation and Optimization", Transportation Science, 16, 1982, pp. 192-205.
- [10] Petersen, E.R., Taylor, A.J., "Line Block Prevention in Rail Line Dispatch and Simulation Models", INFOR, 21, 1983, pp. 46-51.
- [11] Pacht, J., *Railway Operation and Control*, VTD Rail Publishing, [Hardcopy & scanned in E-Books], 2002.
- [12] Diana, M., Dessouky, M.M., Xia, N., "A Model for the Fleet Sizing of Demand Responsive Transportation Services With Time Windows", Transportation Research Part B 40, 2006, pp. 651-666.
- [13] Godwin, T., Gopalan, R., Narendran, T.T., "Tactical Locomotive Fleet Sizing for Freight Train Operations", Transportation Research Part E 44, 2008, pp. 440-454.
- [14] Cantos, P., "Productivity, Efficiency, and Technical Change in The European Railway: A Non-Parametric Approach", International Journal of Transport Economic, 25 (1): 2000, pp. 55-27.
- [15] Yu, M.M., Lin, T.J.E., "Efficiency and Effectiveness in Railway Performance Using a Multi-Activity Network DEA Model", The International Journal of Management Science, Omega, 2008.

واحد دیگر آن عملاً بدون استفاده می ماند که به عنوان ظرفیت قابل توسعه قلمداد می شود و راه آهن ج.ا.ا بدون افزایش ظرفیت خود و با همین امکانات موجود می تواند خروجی خود را ۱۹٪ افزایش دهد. بدین ترتیب می توان بر اساس یک فرآیند علمی، ادعا نمود که سیستم حمل و نقل ریلی در بخش بار، تنها ۱۹٪ زیر ظرفیت فعالیت می نماید. با توجه به نمودار (۵)، در وضعیت بهینه؛ میانگین کارایی مدیریت ۹۶،۵۷٪ است. این بدین معنی است که نواحی راه آهن حتی پس از بهینه سازی شبیه سازی، به لحاظ مدیریت، دارای فضای خالی خواهند بود. همچنین میانگین کارایی فنی کل، ۸۵،۳۱٪ است. این بدان معنی است که، از ۱۰۰۰۰ واحد ظرفیت نواحی تنها از ۸۵۳۱ واحد استفاده می گردد و ۱۴۶۹ واحد دیگر آن عملاً بدون استفاده می ماند.

## ۶. نتیجه گیری و جمع بندی

در شبکه ریلی اگر ناوگان باری خیلی بزرگ باشد می تواند باعث تحمیل هزینه های سنگین سرمایه گذاری، نگهداری و انبارداری بر سیستم شود و اگر اندازه ناوگان کوچک باشد باعث کاهش خدمات به مشتریان (به خاطر کمبود واگن) خواهد شد. تحلیل مدل نشان می دهد که کارایی سیستم بیشتر به امکانات تخلیه و بارگیری در ایستگاه های شبکه وابستگی دارد تا تعداد واگن ها و لکوموتیوها. همچنین بهینه سازی سیستم به وسیله روش بهینه سازی شبیه سازی نشان می دهد که به دلیل برنامه ریزی نادرست تخصیص واگن ها و کمبود امکانات تخلیه و بارگیری کالاها، بیش از ۴٪ از کل واگن هایی که در شبکه ریلی ایران هستند مازاد بر نیاز این شبکه است. براساس یک فرآیند علمی می توان ادعا نمود که در حال حاضر، سیستم حمل و نقل ریلی در بخش بار، تنها ۱۹٪ زیر ظرفیت اسمی فعالیت می کند که بعد از بهینه سازی بیش از ۵٪ افزایش کارایی خواهد داشت. که با برنامه ریزی دقیق و بهره برداری صحیح از ناوگان باری می توان این افزایش بهره وری را در نواحی سیزده گانه شبکه حمل و نقل ریلی ج.ا.ا شاهد بود. ارزیابی کارایی نواحی مختلف با استفاده از روش تحلیل پوششی داده ها نشان داد که در حالت قبل از بهینه سازی؛ نواحی اصفهان، لرستان، آذربایجان، جنوب، یزد، شرق و هرمزگان در هر چهار مدل کارا بوده و در حالت پس از بهینه سازی شبیه سازی؛ نواحی شرق، یزد، لرستان، آذربایجان، هرمزگان و جنوب در هر چهار مدل کارا خواهند شد. پس از رتبه بندی نهایی با استفاده از روش کپلند، با توجه به الگو بودن ناحیه اصفهان قبل از بهینه سازی و ناحیه شرق پس از بهینه سازی؛ نواحی ناکارا باید به منظور افزایش کارایی خود، این نواحی را الگوی خود قرار دهند.

- [16] Productivity Commission, *An Assessment of the Performance of Australian Railways, 1990 to 1998*, Supplement to Inquiry Report Progress in Rail Reform, Aus Info, Canberra, November 1999.
- [17] Yalcinkaya, O., & Bayhan, G.M., "Modelling and Optimization of Average Travel Time for A Metro Line by Simulation and Response Surface Methodology", *European Journal of Operational Research*, Volume 196, Issue 1, 1 July 2009, pp. 225-233.
- [18] Azadeh, A., Ghaderi, S.F., Izadbakhsh, H., "Integration of DEA and AHP with Computer Simulation for Railway System Improvement and Optimization", *Applied Mathematics and Computation*, Volume 195, Issue 2, 1 February 2008, pp. 775-785.
- [19] Paul, R.J., Chanev, T.S., "Simulation Optimisation Using a Genetic Algorithm", *Simulation Practice and Theory*, Volume 6, Issue 6, 15 September 1998, pp. 601-611.
- [20] Kelton, W.D., Sadowski, R.P., Sturrock, D.T., *Simulation With Arena*, Third Edition, 2004.
- [21] Panos M.P., Resende, M.G.C., *Handbook of Applied Optimization*, Oxford University Press, 2002.
- [22] Charnes, A., Cooper, W.W., Rhodes, L., "Measuring the Efficiency of Decision Making Units", *European Journal of Operational Research*, Vol. 2, 1978, pp.429-444.
- [23] Cooper, W.W., Seiford, L.M., & Tone, K., "Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software", Springer Science, 2007.
- [24] Kabnurkar, A., *Mathematical Modeling for Data Envelopment Analysis with Fuzzy Restrictions on Weights*, Doctoral Dissertation, Dep. of Industrial and Systems Engineering, Unive. Polytechnic Institute and State, Virginia, 2001.
- [25] Allen, R., Athanassopoulos, A., Dyson, R.G., Thanassoulis, E., "Weights Restriction and Value Judgments in Data Envelopment Analysis: Evaluation Development and Future Direction", *Annals of Operation Research*, Vol. 73, 1997, pp. 13-34.
- [26] Emrouznejad, A., Parker B.R., Tavares, G., "Evaluation of Research in Efficiency and Productivity: A Survey and Analysis of the First 30 Years Scholarly Literature in DEA", *Socio-Economic Planning Sciences*, Vol. 42, 2008, pp. 151-157.
- [27] Pegden, C.D., Shannon, R.E., Sadowski, R.P., *Introduction to Simulation using SIMAN*, Second Edition, McGraw- Hill Inc., New York, 1995.
- [28] www.RAI.ir.
- [29] www.Opttek.com



