Archive of SID

نشـــریه بین المللـــی مهنـــدسی صنـــایع و مدیـــــریت تولیـــد

شمـــــاره ۳، جلـــد ۲۲، پاییـــــــز ۱۳۹۰
صفحـــــه ۲۵۴-۲۶۱

نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید دانشگاه علم و صنعت ایران

ISSN: 2008-4870

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

# بهبود کارایی راه‌آهن با استفاده از رویکرد تلفیقی شبیه‌سازی و تحلیل پوششی داده‌ها؛ مطالعه موردی: سیستم حمل بار در شبکه ریلی جمهوری اسلامی ایران

امیرسامان خیرخواه* و حسن ذوالفقاری

**کلمات کلیدی**

شبیه‌سازی گسسته پیشامد،
بهینه‌سازی شبیه‌سازی،
کارایی،
تحلیل پوششی داده‌ها،
راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران

**چکیده:**

در این مقاله سیستم حمل بار در شبکه حمل‌ونقل ریلی جمهوری اسلامی ایران به کمک روش شبیه‌سازی سیستم‌های گسسته پیشامد مدلسازی شده است. تحلیل مدل نشان می‌دهد که ظرفیت سیستم بیشتر به امکانات تخلیه و بارگیری در ایستگاه‌های شبکه وابستگی دارد تا تعداد واگن‌ها و لکوموتیوها. لذا، در این مقاله، حداقل‌سازی تعداد واگن‌ها و در نتیجه تعیین تعداد بهینه لکوموتیوها، به عنوان یکی از راههای بهبود کارایی سیستم در نظر گرفته شده است. بهینه سازی سیستم به وسیله روش بهینه‌سازی شبیه‌سازی، نشان می‌دهد که بیش از ۴٪ کل واگن‌های موجود در شبکه مازاد بر نیاز است. به منظور تحلیل میزان ارتقاء کارایی شبکه بعد از بهینه‌سازی؛ میزان کارایی نواحی مختلف با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها در قبل و پس از بهینه‌سازی ارزیابی و مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد سیستم حمل‌ونقل ریلی در بخش بار در حال حاضر حدود ۱۹٪ زیر ظرفیت اسمی فعالیت می‌کند که بعد از بهینه‌سازی بیش از ۵٪ افزایش کارایی خواهد داشت.

## ۱. مقدمه

راه‌آهن به عنوان وسیله‌ای 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 پروژه‌های زیربنایی راه‌آهن از موانع اصلی گسترش شبکه راه‌آهن است و بنابراین استفاده بهینه از منابع و امکانات موجود از اهمیت فوق-العاده‌ای برخوردار است.

ساخت راه‌آهن 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 راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران و اتصال آن به راه آهن خاورمیانه و اروپا از طریق ایستگاه‌های رازی، سرخس، جلفا، جاوه و ترمینال‌هایی دریایی؛ نیازمند برنامه‌ریزی 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 هزینه‌های بسیار بالای خرید و تولید ناوگان و افزایش کارایی منجر خواهد شد. در حال حاضر راه‌آهن 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 راه‌آهن جابجا شده است [۲].

**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

www.SID.ir

Archive of SID



در این مقاله عوامل موثر بر ظرفیت شبکه حمل‌ونقل ریلی در بخش حمل بار با استفاده از شبیه‌سازی سیستم تحلیل شده است، نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که ظرفیت شبکه، نسبت به امکانات ثابت در ایستگاه‌های بارگیری و تخلیه حساس‌تر بوده، لذا افزایش برنامه‌ریزی نشده واگن‌ها و لکوموتیوها می‌تواند منجر به کاهش کارایی سیستم گردد.

در این مقاله بهینه‌سازی تعداد واگن‌ها با حفظ ظرفیت موجود، به عنوان یک راه حل موثر در افزایش بهره‌وری در نظر گرفته شده است. از آنجا که مدل اصلی مبتنی بر شبیه‌سازی سیستم‌های گسسته پیشامد است، روش‌های بهینه‌سازی شبیه سازی در حل مساله مورد استفاده قرار گرفته است و میزان بهبود کارایی پس از بهینه‌سازی با استفاده از تحلیل پوششی داده ها ارزیابی شده است.

در ادامه ابتدا ادبیات موجود مرتبط با موضوع مقاله مرور می‌شود، سپس چارچوب کلی روش پیشنهادی (روش تحقیق) شرح داده می‌شود. در بخش ۴ چگونگی بکارگیری روش پیشنهادی در مورد شبکه حمل‌ونقل ریلی جمهوری اسلامی شرح داده شده و نتایج حاصل ارائه می‌گردد. بخش ۵ به بحث و توضیح نتایج بدست آمده اختصاص دارد. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری مطالب بخش پایانی مقاله می‌باشد.

## ۲. مروری بر ادبیات موضوع

تحقیقات نشان می‌دهد که در عمل، مدل‌های بهینه‌سازی ریاضی برای حمل‌ونقل ریلی بطور جامعی قابل استفاده نیستند و در عوض مدل‌های شبیه‌سازی غالباً مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حقیقت بهبود مدل‌های بهینه‌سازی در دراز مدت به دلیل حجم زیاد مشکلات، با موانع زیادی مواجه است [۳].

مطالعات برونر [۴] نشان می‌دهد کاربرد شبیه‌سازی در حمل‌ونقل از یک روند صعودی برخوردار بوده است. در راه‌آهن مدل‌های شبیه‌سازی، بطور گسترده‌ای برای ارزیابی و مقایسه سناریوهای مختلف بکار می‌رود. از عوامل مهم گسترش هرچه بیشتر مدل‌های شبیه‌سازی پیشرفت‌های بوجود آمده در تکنولوژی کامپیوتر بوده که موجب افزایش سرعت کامپیوترها و روش‌های بهتر برای مدیریت داده‌ها شده است [۵]. اسد [۶] مدل‌های مختلف شبیه سازی در راه‌آهن را بررسی کرده است.

در مقاله مارتین [۷] شبیه‌سازی حرکت قطارها برای سه منظور متفاوت انجام می‌شود، شبیه‌سازی برای محاسبه عملکرد قطار، شبیه‌سازی جهت زمانبندی حرکت قطارها، شبیه‌سازی به منظور تجزیه و تحلیل ظرفیت. گالاورنا [۸] مدل شبیه‌سازی برای تحلیل ظرفیت خط ارائه کرده است. پترسون و تیلور [۹-۱۰] یک مدل ساخت یافته برای شبیه‌سازی حرکت قطارها ارائه دادند. یکی از ابزارهای رایج برای زمانبندی حرکت قطارها شبیه‌سازی است [۱۱]. در سال ۲۰۰۶ دیانا و همکاران [۱۲]، در مورد مساله تعیین تعداد وسیله نقلیه مورد نیاز برای ایجاد یک سرویس حمل‌ونقل پاسخگو، با یک کیفیت از پیش تعیین شده توسط کاربر، بر حسب زمان‌های انتظار در توقف‌ها و ماکزیموم انحراف مجاز؛ تحقیق کرده‌اند. در سال ۲۰۰۸ گادوین و همکاران [۱۳]، با استفاده از رویکرد مبنی بر شبیه‌سازی، تدبیری برای اندازه ناوگان لکوموتیوها پیشنهاد کرده‌اند.

کانتوس [۱۴] به ارزیابی کارایی راه‌آهن‌های اروپا بدون تفکیک بخش باری و مسافری، با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها 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 راه‌آهن کشورهای سوئد، سوئیس، فنلاند و هلند از بالاترین کارایی و راه‌آهن کشورهای نروژ، دانمارک، ایرلند و یونان از پایین ترین کارایی برخوردار می‌باشند. در سال ۲۰۰۸ یو و لین [۱۵] با استفاده از مدل تحلیل پوششی داده‌ها شبکه ای چندهدفه، بطور همزمان برای تخمین کارایی فنی، اثر بخشی خدمات و اثر بخشی فنی در بخش بار و مسافر برای ۲۰ راه‌آهن انتخابی بکار گرفته‌اند. طبق جستجوها و یافته‌های محققین، تاکنون تنها در استرالیا از مدل VRS جهت مقایسه برخی از راه‌آهن‌های دنیا استفاده شده است. این پژوهش توسط کمیسیون بهره‌وری [۱۶] در سال ۱۹۹۹ میلادی صورت گرفته است. در این تحقیق راه‌آهن‌های استرالیا با راه‌آهن‌های ۲۲ کشور و با استفاده از ۱۰ پارامتر (۴ پارامتر ورودی و ۶ پارامتر خروجی) مقایسه شده‌اند.

در سال ۲۰۰۹ یالکینکایا و بیهان [۱۷]، به مدلسازی و حل مبتنی بر شبیه‌سازی گسسته پیشامد و روش سطح جواب در رابطه با مساله بهینه‌سازی میانگین زمان سیر مسافران در فرآیند برنامه‌ریزی مترو پرداخته‌اند. در سال ۲۰۰۸ آزاده و همکاران [۱۸] با یکپارچه‌سازی DEA و AHP با شبیه‌سازی کامپیوتری برای بهبود و بهینه‌سازی سیستم راه‌آهن استفاده کرده‌اند. پُل و همکاران با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک مدل شبیه‌سازی را بهینه‌سازی کرده اند [۱۹].

## ۳. روش پیشنهادی

- **شبیه‌سازی سیستم حمل بار در شبکه ریلی با رویکرد شبیه‌سازی سیستم‌های گسسته پیشامد:** شبیه سازی تقلیدی از یک سیستم یا فرآیند واقعی با گذشت زمان بوده و شبیه‌سازی گسسته پیشامد عبارت است از مدل سازی سیستم‌هایی که متغیر حالت در آنها در مجموعه‌ای گسسته از زمان، تغییر می‌کند [۲۰]. به منظور شبیه‌سازی هر سیستمی، ابتدا اجزای سیستم و اهداف شبیه‌سازی تعیین شده و مدل مفهومی و مشخص ترسیم می‌شوند. گام بعدی



www.SID.ir

Archive of SID



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 روش های 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 بهینه-سازی سیستم‌هایی با ماهیت پیچیده، از روش بهینه سازی 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 مرزکارایی با شیب ثابت است [۲۲-۲۳]. مدل بازده به مقیاس افزایشی (IRS) و مدل بازده به مقیاس کاهشی (DRS) دو مدل دیگر DEA می‌باشند که توسط چارنز و کوپر در سال ۱۹۸۴ و سیفورد و ترال در سال ۱۹۹۰ ارائه شده‌اند [۲۲و۲۴-۲۵]. 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 کاهشی است. به منظور مطالعه بیشتر در مورد پیشینه مطالعات صورت گرفته در زمینه DEA به مرجع [۲۶] 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 راه‌آهن 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 می نماید. کنترل مرکزی نیز با توجه به سیاست‌های راه‌آهن؛ 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 آنصورت 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 می شود 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.



www.SID.ir

Archive of SID



داده‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی؛ تاریخ و زمان تشکیل قطار، تعداد واگن‌های پر و خالی قطار و مدت زمان تخلیه و بارگیری کالا است.

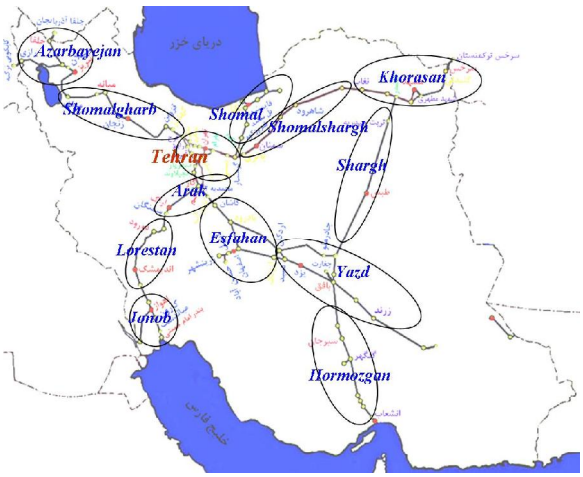
داده‌های ورودی مربوط به سیر قطارهای باری در مدت یکسال (سال۸۵) در کل شبکه ریلی ج.ا.ا می‌باشد. در تحلیل ثبات داده‌ها مشخص شد که داده‌های مربوط به ماه‌های تیر، مهر، آبان، آذر، بهمن هم توزیع هستند ولی نمودار روند نشان داد که این داده‌ها مستقل نبوده و به شدت الگوی روند نزولی دارند که به منظور رفع این خودهمبستگی و وابستگی از مدل‌سازی 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 شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. همچنین از ۲۶ ایستگاه مجازی برای توزیع اولیه واگن‌های باری به سراسر شبکه استفاده شده است که این کار از طریق ۲۶ متغیری که در مدل تعریف شده انجام می‌گیرد. همچنین از نرم‌افزار Arena که یک نرم‌افزار تخصصی شبیه‌سازی فرآیند است و قابلیت ردیابی نیز دارد [۲۷]، برای شبیه‌سازی استفاده شده است.

شکل (۱)، نواحی سیزده‌گانه راه‌آهن، ایستگاه‌های اصلی و ایستگاه‌های مرزی مورد مطالعه در این مقاله را نشان می‌دهد.

پس از ساخت مدل؛ با استفاده از روش مرور خطاها، مدل بازبینی شده و بدون خطا اجرا می‌شود 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 می‌توان نتیجه گرفت مدل شبیه‌سازی شده از اعتبار بالایی برخوردار است.

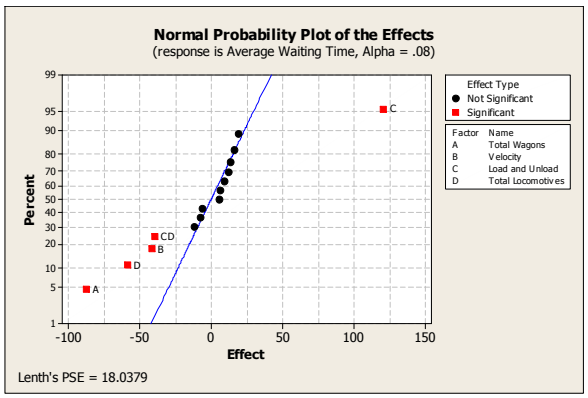
پس از این مرحله، مدل اجرا شده و میانگین زمان انتظار تقاضا در هر یک از نواحی راه‌آهن بدست آمده است.




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

### ۴-۲. تحلیل عوامل موثر بر ظرفیت شبکه

در این مقاله برای تحلیل نحوه تأثیرگذاری عوامل مؤثری همچون تعداد واگن‌های 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 واگن‌ها، سرعت قطار و تعداد لکوموتیوها افزایش یابند در آنصورت میانگین زمان انتظار تقاضا کاهش می‌یابد و اگر مدت زمان تخلیه و بارگیری کالا کاهش یابد در آنصورت میانگین زمان انتظار تقاضا، با شدت بیشتری کاهش می یابد. برای تحلیل بیشتر در این رابطه از نمودار Effects Plot درحالت 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 حمل‌ونقل ریلی ج.ا.ا**

با توجه نمودار (۲)؛ عوامل تعداد واگن‌های باری، تعداد لکوموتیوهای باری، مدت زمان تخلیه و بارگیری، سرعت قطار و (تعداد لکوموتیوهای باری × مدت زمان تخلیه و بارگیری)، اثر معناداری بر مدل می‌گذارند و با توجه به اینکه ضریب متغیر مدت زمان تخلیه و بارگیری از سایر متغیرها بیشتر بوده است، می‌توان نتیجه گرفت این متغیر بیشترین تاثیر را در شبکه می گذارد. بنابراین ظرفیت شبکه، نسبت به امکانات ثابت در ایستگاه‌های تخلیه و بارگیری حساس‌تر است و افزایش برنامه‌ریزی نشده واگن‌ها و لکوموتیوها می‌تواند منجر به کاهش کارایی سیستم گردد.

### ۴-۳. توسعه مدل بهینه‌سازی تعداد واگن‌ها

برای بهینه‌سازی شبیه‌سازی از نرم‌افزار OptQuest استفاده شده است. این نرم‌افزار از روش‌های فرا ابتکاری معروفی به نام جستجوی ممنوع و جستجوی پراکنده استفاده می‌نماید که جواب به دست آمده توسط این روش‌ها یا بهینه است یا مقداری نزدیک به بهینه است [۲۸].



www.SID.ir

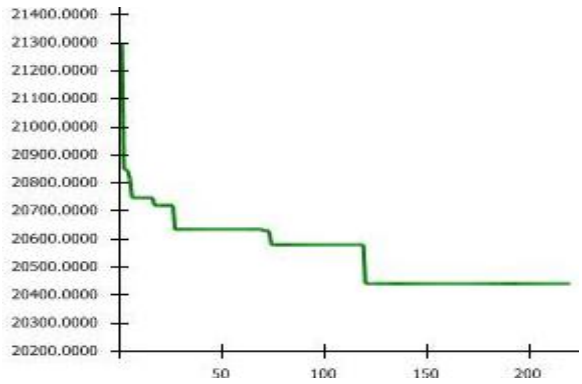
Archive of SID



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.

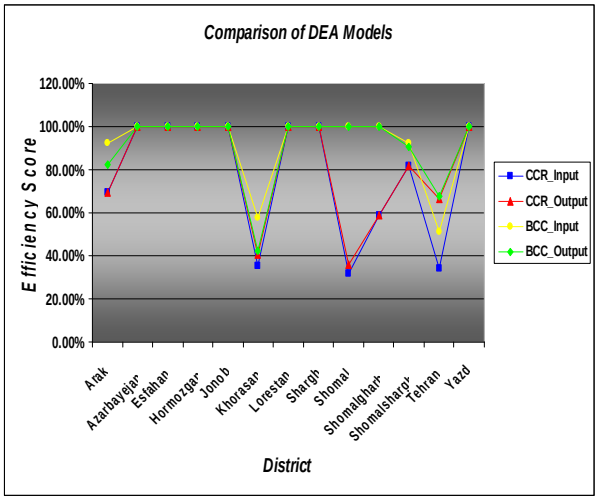



**شکل ۳. نمودار بهینه‌سازی شبیه‌سازی سیستم تخصیص واگن‌های باری خالی توسط نرم‌افزار OptQuest**

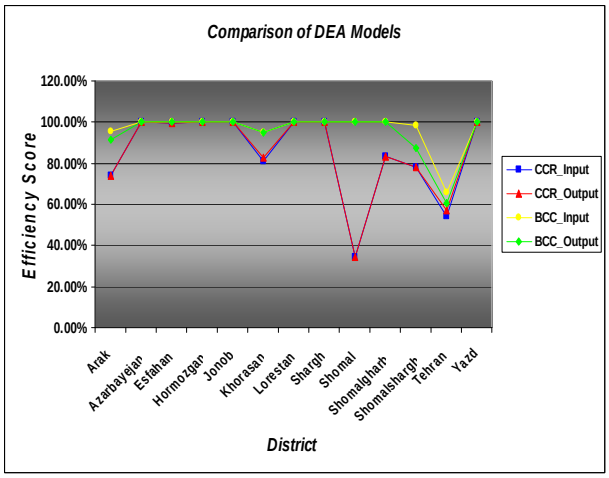
### ۴-۴. ارزیابی کارایی با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها

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:




**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 رتبه بندی مطابق جداول ۱ و ۲ می‌باشد.



www.SID.ir

Archive of SID



**جدول ۱. رتبه‌بندی نواحی کارای قبل و پس از بهینه‌سازی با سه روش اندرسون-پترسون، دفعات مرجعیت و مجموع وزنی مرجعیت**

| وضعیت | نواحی کارای راه‌آهن | BCC خروجی محور | BCC ورودی محور | CCR خروجی محور | CCR ورودی محور | BCC خروجی محور | BCC ورودی محور | CCR خروجی محور | CCR ورودی محور | BCC خروجی محور | BCC ورودی محور | CCR خروجی محور | CCR ورودی محور |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Sum of Weigh | Sum of Weigh | Sum of Weigh | Sum of Weigh | References | References | References | References | AP | AP | AP | AP |
| وضعیت موجود (قبل از بهینه‌سازی) | آذربایجان | ۴ | ۵ | ۴ | ۴ | ۲ | ۵ | ۴ | ۴ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |
| | اصفهان | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۲ | ۱ | ۱ | ۲ | ۲ | ۱ | ۲ |
| | هرمزگان | ۶ | ۵ | ۴ | ۴ | ۳ | ۵ | ۴ | ۴ | ۵ | ۷ | ۱ | ۵ |
| | جنوب | ۷ | ۴ | ۴ | ۳ | ۲ | ۳ | ۴ | ۳ | ۱ | ۴ | ۳ | ۴ |
| | لرستان | ۳ | ۳ | ۲ | ۲ | ۲ | ۱ | ۲ | ۲ | ۱ | ۳ | ۲ | ۳ |
| | شرق | ۲ | ۲ | ۴ | ۴ | ۳ | ۴ | ۴ | ۴ | ۳ | ۶ | ۴ | ۵ |
| | یزد | ۵ | ۵ | ۳ | ۴ | ۳ | ۵ | ۳ | ۴ | ۴ | ۵ | ۱ | ۱ |
| وضعیت بهینه (توسط روش بهینه‌سازی شبیه‌سازی) | آذربایجان | ۴ | ۳ | ۵ | ۵ | ۱ | ۲ | ۴ | ۵ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |
| | هرمزگان | ۶ | ۵ | ۲ | ۲ | ۲ | ۳ | ۲ | ۲ | ۳ | ۵ | ۵ | ۴ |
| | جنوب | ۵ | ۴ | ۵ | ۵ | ۱ | ۱ | ۴ | ۵ | ۱ | ۶ | ۴ | ۵ |
| | لرستان | ۳ | ۲ | ۴ | ۳ | ۲ | ۳ | ۳ | ۴ | ۱ | ۳ | ۲ | ۲ |
| | شرق | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۲ | ۱ | ۱ | ۱ | ۴ | ۳ | ۳ |
| | یزد | ۲ | ۶ | ۳ | ۴ | ۱ | ۲ | ۲ | ۳ | ۲ | ۲ | ۱ | ۱ |

**جدول ۲. رتبه‌بندی نهایی نواحی کارای قبل و پس از بهینه‌سازی با استفاده از روش کپ‌لند**

| وضعیت | نواحی کارای راه‌آهن | $\sum C - \sum R$ | رتبه‌بندی نهایی |
|---|---|---|---|
| وضعیت موجود (قبل از بهینه‌سازی) | اصفهان | ۶ | ۱ |
| | لرستان | ۴ | ۲ |
| | آذربایجان | ۱ | ۳ |
| | جنوب | ۱ | ۳ |
| | یزد | -۲ | ۴ |
| | شرق | -۴ | ۵ |
| | هرمزگان | -۶ | ۶ |
| وضعیت بهینه (توسط روش بهینه‌سازی شبیه‌سازی) | شرق | ۵ | ۱ |
| | یزد | ۳ | ۲ |
| | لرستان | ۱ | ۳ |
| | آذربایجان | -۱ | ۴ |
| | هرمزگان | -۳ | ۵ |
| | جنوب | -۵ | ۶ |

## ۵. بحث

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 شرایط) می‌باشد، بنابراین می‌بایست 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 می‌گردد و ۱۸۹۹



www.SID.ir

Archive of SID



واحد دیگر آن عملاً بدون استفاده می‌ماند که به عنوان ظرفیت قابل توسعه قلمداد می‌شود و راه‌آهن ج.ا.ا بدون افزایش ظرفیت خود و با همین امکانات موجود می‌تواند خروجی خود را ۱۹٪ افزایش دهد. بدین ترتیب می‌توان بر اساس یک فرآیند علمی، ادعا نمود که سیستم حمل‌ونقل ریلی در بخش بار، تنها ۱۹٪ زیر ظرفیت فعالیت می‌نماید. با توجه به نمودار (۵)، در وضعیت بهینه؛ میانگین کارایی مدیریت ۹۶،۵۷٪ است. این بدین معنی است که نواحی راه‌آهن حتی پس از بهینه‌سازی شبیه‌سازی، 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 می‌گردد و ۱۴۶۹ واحد دیگر آن عملاً بدون استفاده می‌ماند.

## ۶. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در شبکه ریلی اگر ناوگان باری خیلی بزرگ باشد می‌تواند باعث تحمیل هزینه‌های سنگین سرمایه‌گذاری، 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 می‌دهد که کارایی سیستم بیشتر به امکانات تخلیه و بارگیری در ایستگاه‌های شبکه وابستگی دارد تا تعداد واگن‌ها و لکوموتیوها.

همچنین بهینه‌سازی سیستم به وسیله روش بهینه‌سازی شبیه‌سازی نشان می‌دهد که به دلیل برنامه‌ریزی نادرست تخصیص واگن‌ها و کمبود امکانات تخلیه و بارگیری کالاها، بیش از ۴٪ از کل واگن‌هایی که در شبکه ریلی ایران هستند مازاد بر نیاز این شبکه است.

براساس یک فرآیند علمی می‌توان ادعا نمود که در حال حاضر، سیستم حمل‌ونقل ریلی در بخش بار، تنها ۱۹٪ زیر ظرفیت اسمی فعالیت می‌کند که بعد از بهینه‌سازی بیش از ۵٪ افزایش کارایی خواهد داشت. که با برنامه‌ریزی دقیق و بهره برداری صحیح از ناوگان باری می‌توان این افزایش بهره‌وری را در نواحی سیزده‌گانه شبکه حمل‌ونقل ریلی ج.ا.ا شاهد بود.

ارزیابی کارایی نواحی مختلف با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها نشان داد که در حالت قبل از بهینه‌سازی؛ نواحی اصفهان، لرستان، آذربایجان، جنوب، یزد، شرق و هرمزگان در هر چهار مدل کارا بوده و در حالت پس از بهینه‌سازی شبیه سازی؛ نواحی شرق، یزد، لرستان، آذربایجان، هرمزگان و جنوب در هر چهار مدل کارا خواهند شد.

پس از رتبه‌بندی نهایی با استفاده از روش کپ‌لند، با توجه به الگو بودن ناحیه اصفهان قبل از بهینه‌سازی و ناحیه شرق پس از بهینه‌سازی؛ نواحی ناکارا باید به منظور افزایش کارایی خود، این نواحی را الگوی خود قرار دهند.

## مراجع


[۱] دفتر آمار و خدمات ماشینی، سالنامه آماری ۱۳۸۷راه‌آهن ج.ا.ا ، تهران، راه‌آهن 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., Sciutto, 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] Pachl, 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.




www.SID.ir

Archive of SID



[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 Industerial 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



www.SID.ir