

# ارائه رویکردی نوین جهت شناسایی و رفع گلوگاههای ظرفیتی در شبکه‌های ریلی (مطالعه موردی: شبکه راه‌آهن ایران)

محمود شفیعی پور، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران،

محمد تمنایی (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده حمل‌ونقل، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

سید مهدی ابطی، دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، اصفهان، ایران.

E-mail: tamannaei@cc.iut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۵/۰۸/۱۱ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۱۷

## چکیده

هدف از پژوهش حاضر، ارائه روشی نوین جهت شناسایی و رفع گلوگاه‌های ظرفیتی در شبکه‌های ریلی است. بر مبنای اطلاعات سیرگاه‌های شبکه ریلی و ماتریس تقاضای مبادی-مقاصد، فرآیند تخصیص بار در شبکه با استفاده از دو رویکرد متفاوت انجام می‌گردد: در رویکرد اول، الگوریتمی تحت عنوان «تخصیص جزئی بار با لحاظ ظرفیت شبکه» ارائه شده است. این الگوریتم باهدف شناسایی سیرگاه‌های بحرانی (گلوگاه‌های ظرفیتی) شبکه ریلی پیشنهاد می‌شود. رویکرد دوم، باهدف تعیین اهمیت نسبی گلوگاه‌های ظرفیتی و اولویت‌بندی رفع آن‌ها پیشنهاد شده است. در این رویکرد، از روش تخصیص همه‌یاهیج (بدون لحاظ ظرفیت سیرگاه‌ها) جهت تعیین جریان بار در محورهای مختلف شبکه ریلی استفاده می‌گردد. به‌منظور اولویت‌بندی گلوگاه‌های ظرفیتی، شاخصی تحت عنوان «شدت گلوگاهی» ارائه شده است. این شاخص نشانگر پتانسیل مسیره‌های دربرگیرنده سیرگاه‌ها، برای عبور تقاضای بار مبادی-مقاصد مختلف است. جهت ارزیابی روش پیشنهادی در پژوهش حاضر، شبکه ریلی ایران مورد بررسی قرار گرفت. کلیه اطلاعات تقاضا و ظرفیت شبکه جمع‌آوری شدند و با استفاده از روش پیشنهادی، گلوگاه‌های ظرفیتی شناسایی و اولویت‌بندی گردیدند. نتایج پژوهش حاکی از آن است که رفع ۱۰ گلوگاه اولویت‌دار شبکه ریلی کشور، می‌تواند منجر به افزایش تقاضای جذب‌شده به شبکه ریلی به میزان  $\frac{4}{7}$  میلیون تن گردد.

واژه‌های کلیدی: تخصیص جزئی بار، تخصیص همه‌یاهیج، تقاضای بالقوه ریلی، شبکه ریلی، گلوگاه ظرفیتی.

## ۱. مقدمه

تخصیص تعادل کاربر استفاده نموده‌اند. الگوریتم استفاده شده، تخصیص مبتنی بر مسیر در نظر گرفته شد و بر مبنای تقاضای بار در حمل و نقل ریلی و جاده‌ای بر اساس نرم‌افزار FAF<sup>۶</sup> انجام گردیده است [Uddin and Huynh, 2015]. مایا و کایتو از یک مدل بهینه‌سازی به منظور تخصیص بار در شبکه ریلی استفاده نموده‌اند. مدل بهینه‌سازی بر اساس حساسیت به پارامترهای هزینه و کاهش مصرف CO<sub>2</sub> در نظر گرفته شد. بهینه‌سازی مدل با در نظر گرفتن دو پارامتر هزینه و مصرف CO<sub>2</sub> در واگن‌های باری انجام گردید. مدل‌سازی به منظور بهینه‌سازی شبکه ریلی در دو سطح منطقه‌ای و ملی انجام گردید [Maia and Couto, 2013]. تخصیص جزئی بار یکی از روش‌های مورد استفاده در شبکه معابر شهری و ریلی است. در روش تخصیص جزئی بار، کل بار یک زوج مبدأ-مقصد به چند جزء بار تقسیم می‌شود. سپس تخصیص هر جزء بار بر اساس کوتاه‌ترین مسیر بین آن مبدأ و مقصد انجام می‌گردد. اولین تلاش‌های مهم جهت بهبود روش تخصیص جزئی ترافیک توسط مارتین و مانهیم انجام گردید. تکنیک‌های مورد استفاده تا آن زمان بیشتر بر اساس روش تخصیص همه‌یاهیچ پایه‌ریزی شده بود [Ferland, 1975].

در روش تخصیص جزئی بار، زمان سفر هر یک از لینک‌های شبکه تابعی از حجم ترافیک موجود در آن لینک است. به عبارت دیگر، این روش تخصیص با توجه به تأخیر، کوتاه‌ترین مسیر بین مبادی-مقاصد را در هر مرحله شناسایی می‌کند. [Landex, 2008]، [Kato et al, 2010]. در این روش از تابع تأخیر-حجم<sup>۷</sup> (VDF) استفاده می‌شود. از تابع VDF به منظور محاسبه زمان سفر لینک‌ها با توجه به حجم تخصیص داده شده استفاده می‌گردد. تابع پایه‌ی تأخیر-حجم مطابق رابطه (۱) تعریف می‌گردد.

$$t(v) = t_0 \times f\left(\frac{v}{C}\right) \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $t_0$  نرخ جریان آزاد،  $V$  حجم ترافیک،  $C$  ظرفیت و  $f$  تابعی وابسته به وضعیت موجود است. [Jastrzebski, 2000]. یکی از شناخته شده‌ترین توابع تأخیر-حجم BPR<sup>۸</sup> است. ، در رابطه (۲) تابع تأخیر-حجم BPR نشان داده شده است [Leong, 2016].

$$T_f = T_0 \times \left(1 + \alpha \left[\frac{v}{C}\right]^\beta\right) \quad (2)$$

صنعت حمل و نقل به عنوان زیربنای توسعه پایدار، از طریق جابه‌جایی بار، پیوند ناگسستنی بین عوامل مختلف رشد و توسعه را فراهم می‌کند. از این رو، بایستی برنامه‌های توسعه حمل و نقل بار و نیازهای حمل و نقل ریلی به صورت توأمان در نظر گرفته شوند تا ضمن تضمین منافع طرفین از هزینه‌های احتمالی ناشی از سیاست‌گذاری‌های یک‌جانبه تا حد امکان پرهیز شود. در این راستا تأمین ناوگان و خطوط ریلی مورد نیاز از جمله موارد بسترسازی در این باره بوده که در دو بخش قابل تفکیک است. در بخش اول تأمین منابع مالی و مشارکت در سرمایه‌گذاری و توسعه سخت‌افزاری زیرساخت‌های حمل و نقل ریلی (توسعه ناوگان و خطوط ریلی) و در بخش دوم مشارکت در توسعه نرم‌افزاری و بهبود بهره‌وری فرآیند حمل و نقل ریلی (رفع گلوگاه‌های ظرفیتی و کاهش زمان دوره گردش واگن‌ها) قرار دارد [Marinov and Viegas, 2011].

در حال حاضر سالانه میلیاردها تومان صرف رفع گلوگاه‌های ظرفیتی در شبکه ریلی می‌گردد. ولی متدولوژی دقیقی برای شناسایی و اولویت‌بندی جامع پروژه‌های مختلف در سطح شبکه ریلی وجود ندارد. [Shafiepour et al. 2017]. به منظور شناسایی گلوگاه‌های ظرفیتی شبکه ریلی در ابتدا لازم است فرآیند تخصیص بار در شبکه ریلی بررسی گردد و پس از آن با ارائه یک الگوریتم، گلوگاه‌های شبکه ریلی شناسایی گردند.

### ۱-۱ تخصیص بار ریلی

مسئله تخصیص ترافیک در مرحله چهارم مدل‌سازی پیش‌بینی سفر در برنامه‌ریزی حمل و نقل شهری شامل پیش‌بینی جریان ترافیک در شبکه حمل و نقل است مسئله تخصیص ترافیک در یک شبکه حمل و نقل به طور کلی عبارت است از تعیین چگونگی توزیع تقاضای زوج‌های مبدأ-مقصد بین مسیرهای موجود. روش‌های مختلفی در طی زمان جهت تخصیص ترافیک توسعه داده شده‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به تخصیص همه‌یاهیچ<sup>۱</sup>، تخصیص جزئی بار<sup>۲</sup>، تخصیص تعادل کاربر<sup>۳</sup> (UE)، تخصیص تعادلی احتمالی کاربر<sup>۴</sup> (SUE)، تخصیص بر پایه‌ی بهینه‌سازی سیستم<sup>۵</sup> (SO) اشاره نمود. یودین و هاینچ به منظور تخصیص بار در شبکه بزرگ‌مقیاس راه و راه‌آهن از روش

ریلی در نظر گرفته شده، تأخیر ناشی از سبقت و تلاقی قطارها نیز در نظر گرفته شده است [Mahmassani et al., 2007]. در این پژوهش، از مدل انتخاب طریقه حمل بین سیستم ریلی و جاده‌ای استفاده شده است [Transportation Research Isfahan University of Technology, 2015]. به منظور انجام تخصیص بار در شبکه معابر، نرم‌افزارهای گوناگونی مورد استفاده قرار می‌گیرند که از آن جمله می‌توان به نرم‌افزارهای Emme، TransCAD، VISSIM اشاره نمود. به دلیل نحوه عملکرد قطارها در شبکه ریلی، ظرفیت سیرگاه‌ها، نقش ایستگاه‌ها و ... تخصیص در شبکه حمل و نقل ریلی تفاوت زیادی با تخصیص در شبکه معابر دارد. از جمله نرم‌افزارهای باقابلیت تخصیص بار در شبکه ریلی می‌توان به VISUM Cargo، FAF و TRANS-TOOLS اشاره نمود. نرم‌افزار VISUM Cargo به عنوان ابزاری مفید برای بهینه‌سازی حمل و نقل بار در شبکه ریلی کاربرد دارد [Friedrich et al., 2003]. نرم‌افزار FAF قابلیت مدل‌سازی جریان کالا در سیستم حمل و نقلی مانند جاده، راه‌آهن، دریا، هوایی و خطوط لوله را دارد [Center for Transportation Analysis, 2015]. نرم‌افزار TRANS\_TOOLS، امکان مدل‌سازی شبکه حمل و نقل بار ریلی و شبکه راه‌آهن مسافری و تخصیص بار و مسافر را به صورت مجزا فراهم می‌نماید. [Hansen, 2007]. پس از انجام فرآیند تخصیص بار در شبکه ریلی، بایستی گلوگاه‌های شبکه ریلی شناسایی گردند. گلوگاه شدن در شبکه ریلی زمانی اتفاق می‌افتد که تقاضای ریلی موجود از ظرفیت در دسترس زیرساخت‌های شبکه بیشتر باشد [Tamannaie et al., 2016]. زیرساخت ریلی می‌تواند تعداد واگن، لوکوموتیو، سیستم علائم ارتباطی، ظرفیت سیرگاه‌های شبکه باشد. به عبارت دیگر، محدودیت تعداد لوکوموتیو در یک ایستگاه می‌تواند مانع جابه‌جایی تقاضای موجود بین مبادی و مقاصد شبکه گردد [Drewello and Günther, 2012]. هالزهی، گلوگاه ظرفیتی را بر اساس محاسبه بیشترین تعداد قطار باری عبوری از یک محور در یک روز تعریف نمود [Holzhey, 2011]. بررسی‌های روتنگاتر در شبکه ریلی نشان داد که در نظر گرفتن ظرفیت تئوری به منظور شناسایی گلوگاه‌های ریلی مناسب نیست و استفاده از سطح سرویس از دقت بیشتری

بررسی تخصیص بار در شبکه معابر شهری نشان داد که پارامتر اصلی در تخصیص شبکه معابر شهری، زمان سفر در لینک‌های شبکه است. در روش تخصیص جزئی، با افزایش حجم ترافیک، زمان سفر لینک‌ها طی گام‌های مختلف تخصیص به طور تدریجی افزایش می‌یابد. با این حال، در شبکه راه‌آهن، ظرفیت لینک‌های شبکه (سیرگاه‌های شبکه) اهمیت ویژه‌ای پیدا خواهد نمود. در شبکه ریلی معمولاً زمان سفر عبور از مسیرها برای یک نوع قطار مشخص تقریباً ثابت است.

این مسئله، به دلیل وجود قوانین مربوط به قبول و اعزام قطارها است که مطابق آن حضور بیش از یک قطار در یک سیرگاه مجاز نیست [Islamic Republic of Iran Railway, 2013]. از این رو، در روش تخصیص جزئی مورد استفاده در پژوهش حاضر به جای تعیین زمان سفر با در نظر گرفتن توابع VDF، یک الگوریتم ابتکاری جهت فرآیند تخصیص بار با توجه به ظرفیت سیرگاه‌های شبکه پیشنهاد شده است. برای تخصیص در برنامه‌ریزی حمل و نقل، روش‌ها و الگوریتم‌های مختلفی توسعه داده شده‌اند. روش‌ها و الگوریتم‌های توسعه داده شده به منظور، شناسایی و رفع مشکلات شبکه‌های حمل و نقل توسعه داده شده‌اند. شبکه‌های حمل و نقل معمولاً به صورت گراف با تعداد متناهی از گره‌ها و کمان‌ها مدل‌سازی می‌شوند. گره‌های گراف، تسهیلات حمل و نقل و کمان‌ها ارتباط بین تسهیلات را مشخص می‌نمایند. در یک شبکه حمل و نقل مسیریابی و وسایل نقلیه با توجه به تقاضای موجود انجام می‌شود. رسیدن به مسیریابی بهینه برای هر یک از وسایل نقلیه با توجه به پارامترهایی از قبیل هزینه، کمترین زمان تلف شده، استفاده حداکثری از ظرفیت‌های موجود امکان‌پذیر است. وینبرک بر اساس مدل چندوجهی از گونه‌های حمل و نقل جاده‌ای، ریلی و دریایی به بررسی انرژی، مباحث زیست محیطی و اقتصادی در حمل و نقل بار پرداخت. در مدل پیشنهادی، تقاضای بین مبادی-مقاصد مختلف می‌تواند بر اساس پارامترهای زمان سفر، هزینه بهره‌برداری و آلاینده‌های زیست محیطی بین گونه‌های مختلف جابه‌جا گردد. [Winebrake et al., 2008]. مهمسانی به شبیه‌سازی تخصیص دینامیکی در یک شبکه حمل و نقل بار پرداخت. در مدل پیشنهادی، تقاضای حمل و نقل بار بر اساس مسیر با کمترین هزینه در بین گونه‌های مختلف حمل و نقل (کامیون، کشتی، قطار) در نظر گرفته شد. در محاسبه‌ی زمان سفر شبکه

مدل‌های انتخاب گسسته<sup>۱۱</sup> امکان شناسایی عوامل مؤثر بر افزایش تقاضای بار در حمل‌ونقل ریلی نسبت به جاده‌ای را فراهم می‌کنند. این مدل‌ها بیانگر ارتباط یک متغیر گسسته (تصمیم به انتخاب گونه حمل) با یک یا چند متغیر توصیفگر (تعرفه، زمان سفر، وزن و حجم بار، نوع کالا و ...) مؤثر بر آن متغیر گسسته است [Mahdavi, 2014]. ترجیح فردی صاحبان بار نسبت به هرگونه حمل بار، با معیار مطلوبیت<sup>۱۲</sup> بیان می‌شود. فرض اساسی مدل‌های انتخاب گسسته آن است که صاحب بار هنگامی که با مسئله انتخاب شیوه حمل بار از بین دو حالت ریلی و جاده‌ای مواجه می‌شود، گونه‌ای را انتخاب می‌نماید که بیشترین مطلوبیت را از آن دریافت کند. سهم هریک از گونه‌ها از طریق تابع احتمال لوجیت برآورد می‌گردد:

$$p_i = \frac{e^{v_i}}{e^{v_i} + e^{v_j}} = \frac{1}{1 + e^{v_i - v_j}} \quad (۳)$$

در رابطه (۳)  $p_i$ ، احتمال انتخاب گزینه  $i$  و  $v_i$  و  $v_j$  به ترتیب توابع مطلوبیت گونه‌های حمل‌ونقل  $i$  و  $j$  هستند. صاحبان بار گونه‌ای را انتخاب می‌نمایند که بیشترین مطلوبیت را از آن دریافت می‌کنند. هریک از گونه‌های حمل‌ونقل برای یک صاحب بار مشخص می‌تواند به صورت تابعی از ویژگی‌های متغیرهای توصیفگر مؤثر و مشخصات مورد انتظار صاحبان بار باشد [Ortuzar and Willumsen, 2011].

## ۲-۲ ظرفیت خطوط ریلی

ظرفیت، توانایی یک مسیر در عبور دادن تعداد مشخصی از وسیله حمل‌ونقلی در یک بازه زمانی مشخص است که در روش‌های مختلف حمل‌ونقلی به روش‌های متفاوتی محاسبه می‌شوند. با توجه به عوامل تأثیرگذار در ظرفیت، می‌توان گفت ظرفیت شبکه راه‌آهن به خصوصیات زیرساخت، ناوگان و برنامه زمان‌بندی حرکت قطارها بستگی دارد [Landex and Kaas, 2006].

محاسبه ظرفیت در زیرساخت‌های ریلی برای برنامه‌ریزی، مدیریت و بهره‌برداری از سیستم‌های ریلی ضروری است. پس از تجربه و تحلیل ظرفیت سیرگاه‌های شبکه می‌توان امکان‌پذیر بودن برنامه‌ریزی در عملیات اعزام قطارها بدون نیاز به اعمال راهکارهای افزایش ظرفیت در مسیرهای شبکه ریلی را بررسی نمود [Wendler, 2007]. روش‌های تجزیه و تحلیل ظرفیت خط در راه‌آهن به سه روش نموداری، تحلیلی و شبیه‌سازی

جهت شناسایی گلوگاه‌های ظرفیتی برخوردار است [Rothengatter, 1996].

در این پژوهش، به منظور شناسایی گلوگاه ظرفیتی، تخصیص همه‌پایه‌ای و تخصیص پیشنهادی پژوهش انجام گردید و گلوگاه‌های ظرفیتی با توجه به حجم بار عبوری و ظرفیت سیرگاه‌های شبکه شناسایی شده‌اند. تعیین اهمیت گلوگاه‌های ظرفیتی نسبت به یکدیگر بر اساس یک شاخص پیشنهادی در نظر گرفته شد و بر مبنای شاخص پیشنهادی اولویت‌بندی گلوگاه‌های ظرفیتی در شبکه ریلی مشخص گردیدند.

## ۱-۲ نوآوری های پژوهش

نوآوری‌های این پژوهش در موارد زیر خلاصه می‌گردند:

الف) ارائه روند تخصیص تحت عنوان «تخصیص جزئی بار شبکه ریلی با لحاظ ظرفیت».

ب) ارائه شاخص «شدت گلوگاهی» جهت ارزیابی و مقایسه میزان تقاضای بالقوه ریلی در گلوگاه‌های ظرفیتی

ج) اولویت‌بندی گلوگاه‌های ظرفیتی جهت انجام اعمال راهکارهای افزایش ظرفیت بر اساس مفهوم «گلوگاه بنیادی».

در بخش دوم، مبانی نظری پژوهش در سه زیر بخش مجزا موردبررسی قرار گرفته است. در بخش سوم متدولوژی پیشنهادی پژوهش حاضر جهت ارائه رویکرد جامع در اولویت‌بندی رفع گلوگاه‌های ظرفیتی شبکه‌های ریلی ارائه گردیده است. در بخش چهارم به عنوان مطالعه موردی پژوهش، شبکه راه‌آهن ایران موردبررسی قرار گرفته است و نتایج اولویت‌بندی راهکارهای افزایش ظرفیت گلوگاه‌های ریلی کشور آورده شده است. در بخش پنجم، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری انجام شده است.

## ۲. مبانی نظری پژوهش

در بخش مبانی نظری پژوهش، مدل‌سازی انتخاب طریقه حمل بین سیستم ریلی و جاده‌ای موردبررسی قرار می‌گیرد. پس‌از آن روش محاسبه ظرفیت و راهکارهای افزایش ظرفیت مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. در بخش آخر، روش‌های تخصیص استفاده‌شده در پژوهش موردبررسی قرار می‌گیرند.

## ۱-۲ برآورد تقاضا در سیستم حمل‌ونقل ریلی

راهکارهای مختلفی برای افزایش ظرفیت در سیستم ریلی وجود دارد. با اعمال راهکار افزایش ظرفیت، سرفاصله اعزام قطارها کاهش یافته و در نتیجه ظرفیت سیرگاه‌های شبکه افزایش می‌یابد. برخی از راهکارهای افزایش ظرفیت عبارت‌اند از: دوخطه سازی، تراک‌بندی، برقی سازی، بازگشایی ایستگاه بسته، افزایش بارمحوری و اعزام قطار طولی [Khadem-Sameni et al. 2010].

### ۲-۳ تخصیص تناژ بار شبکه ریلی

در هنگام محاسبه ظرفیت راه آهن و تأخیر تجزیه و تحلیل اغلب محدود به یک خط راه آهن تک و یا بخش از شبکه است. باین حال، یک تغییر در هریک از قسمت‌های شبکه می‌تواند بخش‌های دیگر شبکه را تحت تأثیر قرار دهد. این تأثیر حتی می‌تواند در بخش‌هایی دور از تغییرات اعمال شده، روی می‌دهد. این اثرات به دلیل مسیرهای حرکت قطارها روی دهد. مسیر حرکت قطارها معمولاً طولانی بوده و حرکت قطارها به نوع و اولویت قطارهای موجود در شبکه و وجود امکان عملیات سبقت و تلاقی وابستگی دارد [Landex, 2007]. به منظور آنالیز دقیق وضعیت موجود و محاسبه تغییرات پس از اجرای راهکارهای مختلف افزایش ظرفیت، لازم است عملیات تخصیص بار صورت گیرد. در پژوهش حاضر، تخصیص به دو صورت انجام می‌پذیرد: تخصیص همه‌یاهیچ و تخصیص جزئی بار با لحاظ ظرفیت. در روش تخصیص همه‌یاهیچ (AON)، عملیات تخصیص، صرفاً بر اساس یافتن کوتاه‌ترین مسیر برای یک زوج مبدأ-مقصد و بدون در نظر گرفتن ظرفیت سیرگاه‌ها صورت می‌گیرد تا بتوان وضعیت شبکه ریلی را در حالت عدم وجود گلوگاه‌های ظرفیتی شبکه مشاهده و تناژ بار قابل حمل هریک از سیرگاه‌های مسیر را شناسایی نمود. در این روش، در حالتی که حجم عبوری از یک سیرگاه از ظرفیت سیرگاه فراتر می‌رود، روش تخصیص همه‌یاهیچ سیرگاه مذکور را مسدود نمی‌کند [Yan-Bing et al. 2014], [Kato et al. 2010]. روش تخصیص جزئی بر اساس یافتن کوتاه‌ترین مسیر برای یک زوج مبدأ-مقصد و با در نظر گرفتن ظرفیت سیرگاه‌ها صورت می‌گیرد. در این روش در حالتی که حجم عبوری از یک سیرگاه از ظرفیت سیرگاه فراتر می‌رود، سیرگاه مذکور مسدود می‌گردد و تناژ بار به صورت جذب نشده باقی خواهد ماند.

استفاده می‌گردند. در روش نموداری از گراف حرکت قطار استفاده می‌گردد. روش تحلیلی بر پایه‌ی محاسبه داده‌های حاصل از ویژگی‌های زیرساخت شبکه و جدول زمان‌بندی استوار است. همچنین، روش‌های تحلیلی متفاوتی مانند روش اسکات<sup>۱۳</sup>، روش آمریکایی، روش اشتاین بک، روش UIC و ... جهت محاسبه ظرفیت وجود دارند. مدل‌های شبیه‌سازی بسیار دقیقی‌اند؛ باین حال، استفاده از آن‌ها نیازمند داده‌ها و محاسبات کامپیوتری فراوان می‌باشند [Pal, 2000].

[Yaghini, 2011]

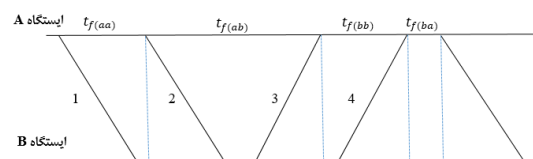
اتحادیه بین‌المللی راه آهن‌ها (UIC) روشی را برای محاسبه ظرفیت ارائه می‌کند که با تکیه بر زمان سیر، زمان لازم برای اخذ مجوز و زمان آزادسازی بلاک اقدام به استخراج چهار نوع سرفاصله (هدوی) کرده است [Abril et al. 2007]. محاسبه سرفاصله به چهار حالت رفت-رفت (aa)، برگشت-برگشت (bb)، رفت-برگشت (ab) و برگشت-رفت (ba)، امکان‌پذیر است. در شکل ۱، وضعیت چهار حالت جهت محاسبه سرفاصله بین هر دو قطار نشان داده شده است.

محاسبه سرفاصله در حالت وجود یا عدم وجود برنامه زمان‌بندی متفاوت خواهد بود. میانگین سرفاصله قطارها در حالت وجود برنامه زمان‌بندی از حالت زیر به دست می‌آید [UIC Code 405, 1996].

$$t_{fm} = \frac{\sum(n_{ij} \times t_{fij})}{\sum n_{ij}} \quad (4)$$

در رابطه ۴ با در نظر گرفتن  $i$  و  $j$  به عنوان نماینده گروهی از قطارها با سرعت سیر تقریباً یکسان،  $n_{ij}$  تعداد سرفاصله قطارها،  $t_{fij}$  زمان سرفاصله بین دو گروه از قطارها  $t_{fm}$ ، به عنوان میانگین سرفاصله محاسبه می‌گردد به کمک  $t_r$  و  $t_{fm}$  به عنوان زمان حائل (اختلاف هدوی واقعی و کمترین هدوی قابل قبول)، ظرفیت ( $C$ ) در یک بازه زمانی مشخص<sup>۱۴</sup> ( $T$ ) از رابطه زیر به دست می‌آید [UIC Code 405, 1996].

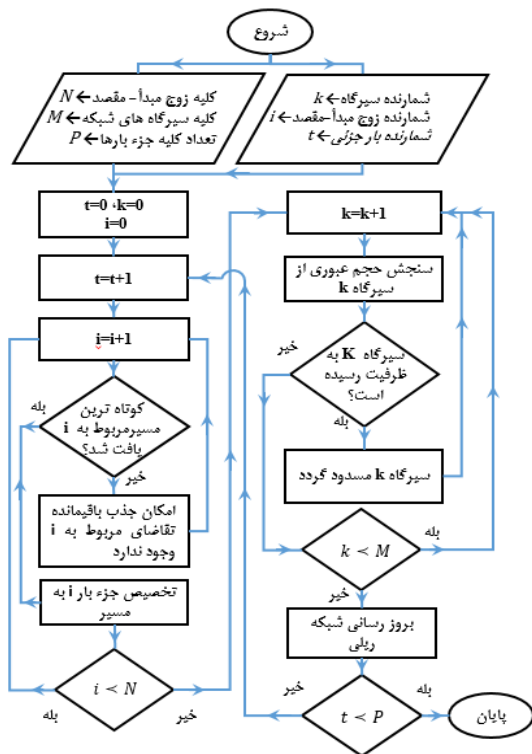
$$C = \frac{T}{t_{fm} + t_r} \quad (5)$$



شکل ۱. محاسبه ۴ حالت سرفاصله دو قطار

### ۳. متدولوژی پیشنهادی پژوهش

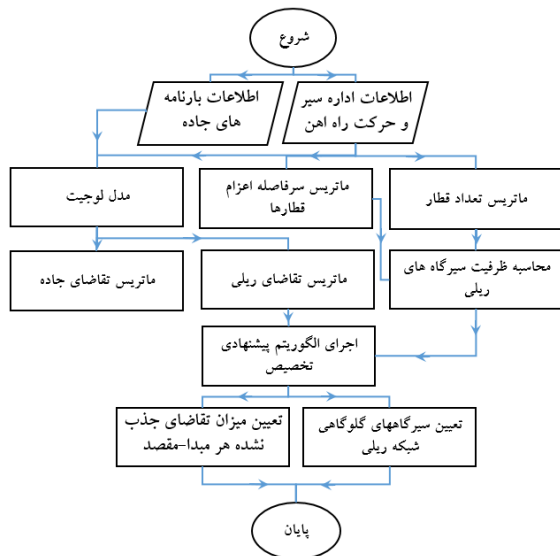
روند متدولوژی پژوهش شامل ارائه الگوریتم مورداستفاده در فرایند تخصیص جزئی بار شبکه ریلی است. پس از آن، فرضیات مورداستفاده در شناسایی گلوگاه‌های ریلی بررسی می‌گردند و در ادامه الگوریتم پیشنهادی جهت یافتن راهکار بهینه افزایش ظرفیت آورده شده است.



شکل ۲. نمودار الگوریتم پیشنهادی فرآیند تخصیص در پژوهش

#### حاضر

بر مبنای شاخص‌های حجم به ظرفیت  $(V/C)$ ، در دو فرآیند تخصیص گلوگاه‌های ظرفیتی شبکه ریلی شناسایی گردید. در شکل ۳، متدولوژی پیشنهادی جهت شناسایی گلوگاه‌های ظرفیتی شبکه ریلی ارائه شده است.



شکل ۳. متدولوژی پیشنهادی شناسایی گلوگاه‌های ظرفیتی شبکه

#### ریلی

### ۳-۱ الگوریتم پیشنهادی تخصیص در پژوهش حاضر

در پژوهش حاضر، یک الگوریتم ابتکاری جهت فرآیند تخصیص بار پیشنهاد شده است. در این الگوریتم، فرآیند تخصیص جزئی بار با لحاظ ظرفیت سیرگاه‌های شبکه ریلی صورت می‌پذیرد. این روش تحت عنوان «تخصیص جزئی بار با لحاظ ظرفیت»<sup>۱۵</sup> (CIA) نام‌گذاری می‌گردد. در هر تکرار از این روش، برای هر زوج مبدأ-مقصد، کوتاه‌ترین مسیر شناسایی می‌گردد و واحد جزء بار، به مسیر یافت شده تخصیص می‌یابد. پس از تخصیص بار جزئی کلیه مبادی-مقاصد، مجموع حجم بار عبوری از هر یک از سیرگاه‌های شبکه ریلی با ظرفیت آن‌ها مقایسه می‌شود و در صورت رسیدن بار عبوری به ظرفیت، سیرگاه موردنظر مسدود می‌گردد. سپس در تکرار بعدی، برای هر زوج مبدأ-مقصد، کوتاه‌ترین مسیر به‌روزرسانی می‌شود و واحدهای جزء بار از شبکه عبور داده می‌شوند. این فرآیند برای هر زوج مبدأ-مقصد تا اتمام کامل تقاضای آن یا انسداد کلیه مسیرهای مربوط به آن ادامه می‌یابد. الگوریتم پیشنهادی فرآیند تخصیص CIA در شکل ۲ آورده شده است.

در ادامه، بر اساس تخصیص CIA و تخصیص همه‌یاهیج، وضعیت سیرگاه‌های شبکه ریلی در ۴ دسته کلی تقسیم‌بندی گردید و گلوگاه‌های ظرفیتی شبکه ریلی بر این اساس اولویت‌بندی شده‌اند.

### ۳-۲ شناسایی گلوگاه‌های شبکه ریلی با استفاده از

#### تخصیص پیشنهادی CIA و تخصیص همه‌یاهیج

به‌منظور شناسایی گلوگاه‌های ریلی جزئی بار با لحاظ ظرفیت (CIA) و تخصیص همه‌یاهیج بر روی شبکه فعلی راه‌آهن اعمال گردید.

هریک از گلوگاه‌های ظرفیتی شبکه ریلی در یکی از دسته‌بندی‌های حالت الف، ب و ج قرار می‌گیرند.

### ۳-۳ اولویت بندی گلوگاه های ریلی: مفاهیم «شدت گلوگاهی» و «گلوگاه بنیادی»

گلوگاه‌های ظرفیتی شبکه ریلی بر اساس تخصیص جزئی بار با لحاظ ظرفیت (CIA) شناسایی می‌گردند. باین حال، امکان اولویت‌بندی گلوگاه‌ها از طریق نتایج تخصیص CIA وجود ندارد؛ زیرا در این روش تخصیص، با رسیدن حجم بار عبوری به ظرفیت، سیرگاه موردنظر مسدود می‌گردد. به عبارت دیگر، نمی‌توان ادعا نمود که اگر دو سیرگاه شبکه ریلی در تخصیص CIA دارای نسبت  $v/c$  برابر با یک باشند، لزوماً از اهمیت و اولویت یکسانی نیز برخوردار هستند؛ زیرا میزان تقاضای ریلی بالقوه جهت عبور از مسیرهای دربرگیرنده این دو سیرگاه، ممکن است تفاوت زیادی با یکدیگر داشته باشند. میزان تقاضای ریلی بالقوه در هر یک از سیرگاه‌های شبکه بر اساس نتایج حاصل از تخصیص همه‌یاهیج تعیین می‌گردد. با توجه به نکته مذکور، شاخصی تحت عنوان «شدت گلوگاهی»<sup>۱۶</sup> (BI) باهدف تعیین اهمیت و اولویت گلوگاه‌های ظرفیتی شبکه‌های ریلی ارائه می‌گردد. شدت گلوگاهی در دو سیرگاه بحرانی (با  $v/c$  برابر با یک) می‌تواند با یکدیگر متفاوت باشد. این شاخص برای هر یک از سیرگاه‌های شبکه ریلی، به موقعیت آن سیرگاه، تعدد مسیرهای دربرگیرنده آن سیرگاه و میزان تقاضای زوج مبدأ-مقصد‌های گذرنده از آن سیرگاه وابسته است و نشانگر پتانسیل مسیرهای دربرگیرنده آن سیرگاه برای عبور تقاضاهای مبادی-مقاصد مختلف است. شدت گلوگاهی هر سیرگاه، بر اساس رابطه ۴ محاسبه می‌گردد:

$$\begin{cases} (v/c)_{AON} \leq 1 \rightarrow BI_i = 0 \\ (v/c)_{AON} > 1 \rightarrow BI_i = (v/c)_{AON} - 1 \end{cases} \quad (4)$$

که در آن، شدت گلوگاهی سیرگاه  $i$  ام و  $(v/c)_{AON}$  نسبت حجم به ظرفیت در حالت تخصیص همه‌یاهیج است. با توجه به رابطه (۳) شاخص شدت گلوگاهی در یک سیرگاه با نسبت  $(v/c)_{AON}$  کمتر از ۱ برابر با صفر است و در سایر سیرگاه‌ها، برابر با مابه‌التفاوت نسبت مذکور با یک است

به منظور اولویت‌بندی راهکارهای افزایش ظرفیت بایستی وضعیت سیرگاه‌ها در تخصیص جزئی با لحاظ ظرفیت (CIA) و همه‌یاهیج مشخص گردد. از این رو، وضعیت سیرگاه‌های شبکه با توجه به دو نوع فرآیند تخصیص در یکی از ۴ حالت زیر قابل دسته‌بندی است.

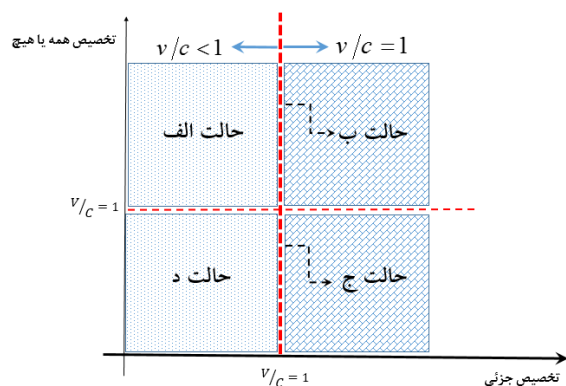
الف) نسبت حجم به ظرفیت در حالت تخصیص همه‌یاهیج، بیش از ۱ شود ولی در حالت تخصیص CIA با لحاظ ظرفیت، کمتر از ۱ شود که در این حالت، وجود گلوگاه‌های ظرفیتی غیر از سیرگاه موردنظر باعث کاهش بار عبوری از سیرگاه شده است.

ب) نسبت حجم به ظرفیت در حالت تخصیص همه‌یاهیج، بیشتر از ۱ شود و در حالت تخصیص CIA با لحاظ ظرفیت، برابر با ۱ شود: در این حالت، سیرگاه به‌عنوان گلوگاه شناسایی می‌گردد.

ج) نسبت حجم به ظرفیت در حالت تخصیص همه‌یاهیج، کمتر از ۱ شود ولی در حالت تخصیص CIA با لحاظ ظرفیت، برابر با ۱ شود. در این حالت، وجود سیرگاه‌هایی با شدت گلوگاهی بالا، سبب انسداد سریع مسیرهای موازی در شبکه شده‌اند که منجر به افزایش مطلوبیت استفاده از سیرگاه موردنظر شده است.

د) هر دو کمتر از ۱: سیرگاه فاقد هرگونه اولویت جهت افزایش ظرفیت است.

در شکل ۴، وضعیت سیرگاه‌های مسیر ارائه گردیده است. گلوگاه‌های ظرفیتی شبکه ریلی پس از انجام فرآیند تخصیص همه‌یاهیج و تخصیص CIA، شناسایی می‌گردند.



شکل ۴. تقسیم‌بندی سیرگاه‌های شبکه ریلی بر اساس نسبت حجم به ظرفیت

## ارائه رویکردی نوین جهت شناسایی و رفع گلوگاه‌های ظرفیتی....

در این شبکه فرضیات زیر در نظر گرفته شده است: کل تقاضای ریلی شبکه: ۵۰۰۰ واحد

تقاضای بالقوه قابل عبور از مسیر شماره ۱ (ABCDEF): ۱۰۰۰ واحد (۲۰٪ کل تقاضا)

تقاضای بالقوه قابل عبور از مسیر شماره ۲ (ABGHEF): ۴۰۰۰ واحد، (۸۰٪ کل تقاضا)

با توجه به نتایج تخصیص همه‌یاهیج می‌توان گفت که برای ۸۰٪ کل تقاضا، مطلوبیت حمل بار از مسیر شماره ۲ بیشتر از مطلوبیت حمل بار از مسیر شماره ۱ بوده است. این مطلوبیت به این معناست که در صورت رفع هر دو گلوگاه ظرفیتی (GH و CD)، تمایل جذب بار به مسیر شماره ۲ بیشتر خواهد بود. مطلوبیت حمل بار از یک مسیر، تابع متغیرهایی مانند زمان سیر، تعرفه دسترسی و ... است و رابطه مستقیم با هزینه استفاده از مسیر دارد. از طرفی، نتایج تخصیص همه‌یاهیج بر اساس یافتن کم‌هزینه‌ترین مسیر حمل بار (کوتاه‌ترین مسیر ممکن) بین هریک از زوج مبدأ- مقصدهای شبکه ریلی است. از این رو، می‌توان نتایج تخصیص همه‌یاهیج (مقدار بار بالقوه قابل عبور از یک مسیر) را معرف مطلوبیت حمل بار در هریک از مسیرهای شبکه دانست. مطلوبیت عبور یک واحد بار از سیرگاه‌های CD و GH، به ترتیب  $U_{CD}$  و  $U_{GH}$  نام‌گذاری می‌شوند. با توجه به توضیحات فوق، می‌توان گفت که مطلوبیت عبور یک واحد بار GH از بیشتر از CD است ( $U_{CD} < U_{GH}$ ). کل مطلوبیت عبور بار از دو گلوگاه مذکور، در حالت پایه (شکل ۵) برابر است با:

$$U_{Total} = 500U_{CD} + 500U_{GH} \quad (۵)$$

افزایش ظرفیت گلوگاه‌های شبکه فرضی مذکور، بایستی به نحوی انجام شود که کل مطلوبیت عبور بار ( $U_{Total}$ ) بیشینه گردد. به عبارت دیگر، سناریوهای جهت افزایش ظرفیت، بایستی اولویت داشته که افزایش بیشتری در  $U_{Total}$  ایجاد نمایند. در ادامه، دو سناریو جهت افزایش ظرفیت شبکه فرضی شکل ۶، ارائه شده‌اند:

سناریوی ۱: افزایش ظرفیت CD به میزان ۵۰۰ واحد و افزایش ظرفیت GH به میزان ۵۰۰ واحد.

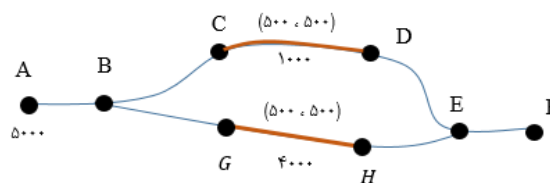
سناریوی ۲: عدم افزایش ظرفیت CD و افزایش ظرفیت GH به میزان ۱۰۰۰ واحد.

با تعریف شاخص شدت گلوگاهی، امکان سنجش پتانسیل جذب بار و تعیین اولویت افزایش ظرفیت در سیرگاه‌های شبکه ریلی فراهم می‌گردد. به منظور مقایسه و ارزیابی شدت گلوگاهی سیرگاه‌های بحرانی شبکه ریلی، مفهومی تحت عنوان «گلوگاه‌های بنیادی»<sup>۱۷</sup> در پژوهش حاضر ارائه می‌گردد. گلوگاه بنیادی، به گلوگاه‌های ظرفیتی شبکه اطلاق می‌شود که از شدت گلوگاهی قابل توجهی برخوردار هستند و افزایش ظرفیت در آن‌ها، نسبت به سایر سیرگاه‌ها اولویت بالاتری دارد. ویژگی خاص گلوگاه‌های بنیادی آن است که بدون افزایش ظرفیت در آن‌ها، امکان افزایش قابل توجه تقاضای جذب شده (حتی در صورت اعمال راهکارهای افزایش ظرفیت در سایر سیرگاه‌های بحرانی) وجود ندارد. به عبارت دیگر، گلوگاه‌های بنیادی، سیرگاه‌هایی از شبکه ریلی هستند که به‌طور همزمان، واجد دو ویژگی هستند:

الف) نسبت حجم به ظرفیت آن‌ها در تخصیص CIA برابر با ۱ است.

ب) شاخص شدت گلوگاهی (BI) آن‌ها مقدار بزرگی است (پتانسیل بالایی برای عبور تقاضاهای مبادی-مقاصد مختلف دارند).

برای تبیین بهتر مفهوم گلوگاه بنیادی، یک مثال با ابعاد کوچک ذکر می‌گردد. شکل ۵، شبکه‌ای فرضی متشکل از هشت سیرگاه را نشان می‌دهد. در این شبکه، پس از انجام تخصیص CIA، نسبت حجم به ظرفیت در هر دو سیرگاه CD و GH برابر ۱ شده است. در بالای هر سیرگاه، دو عدد در داخل پرانتز ذکر شده‌اند که مربوط به تخصیص CIA می‌باشند. اعداد سمت چپ و راست، به ترتیب بیانگر حجم بار عبوری و ظرفیت سیرگاه هستند. عدد مرقوم در پایین هر سیرگاه، میزان بار عبوری در فرآیند تخصیص همه‌یاهیج (بار بالقوه قابل عبور از سیرگاه، با فرض ظرفیت نامحدود) را نشان می‌دهد.



شکل ۵. شبکه فرضی جهت تبیین گلوگاه بنیادی



#### ۴. مطالعه موردی: شبکه راه آهن جمهوری

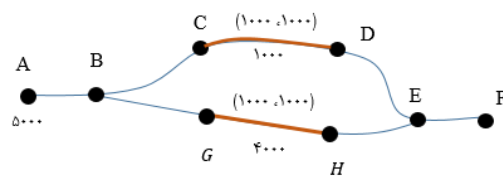
##### اسلامی ایران

در پژوهش حاضر، ارائه رویکردی نوین جهت شناسایی و رفع گلوگاه‌های ظرفیتی در شبکه‌های ریلی ایران مورد بررسی قرار گرفته است. جهت دستیابی به ماتریس تقاضای شبکه ریلی و جاده‌ای، اطلاعات بارنامه‌های جاده‌ای و اطلاعات اداره سیر و حرکت راه آهن اخذ گردید. بر اساس این اطلاعات، نحوه جابجایی انواع مختلف کالاها در سیستم جاده‌ای و ریلی کشور شناسایی شد. مدل‌سازی تقاضای بار ریلی بر اساس اطلاعات اخذ شده از بارنامه‌های ریلی و جاده‌ای و سایر متغیرهای شناسایی شده در انتخاب وسیله بین ریل و جاده در قالب مدل لجوجیت دوگانه وزن دار، مدل‌سازی گردید. ماتریس‌های تشکیل شده شامل ماتریس تقاضای بار ریلی، ماتریس تقاضای بار جاده‌ای و ماتریس تقاضای مجموع بار جاده‌ای و ریلی برای سال ۱۳۹۳ هستند.

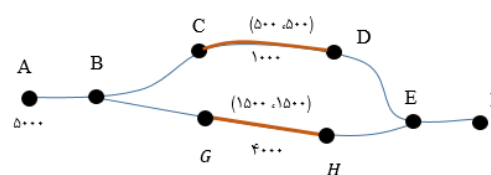
به منظور ارتباط بین ظرفیت محورها و تقاضای بار، محورهای عبوری قطارها بین مبادی و مقاصد مشخص شده‌اند. با توجه به برنامه‌های توسعه آتی صنایع، معادن، کشاورزی و ... و با لحاظ چشمه‌های جدید انواع بار، ماتریس تقاضای بار ریلی برای سال ۱۳۹۸ محاسبه گردیدند. [Transportation Research Center of Isfahan University of Technology, 2015]

بر اساس تقسیم‌بندی انجام شده در مطالعات اداره سیر و حرکت راه آهن ج.ا.ا، شبکه راه آهن ایران به ۶۳ محور تقسیم شده است. در پژوهش حاضر، با توجه به این تقسیم‌بندی و نیز با لحاظ ماتریس تقاضای ریلی سال ۱۳۹۸، مبادی-مقاصد مهم و انشعاب خطوط، شبکه ریلی ایران به ۸۳ محور تقسیم گردیده است. هریک از این محورها از یک یا چند سیرگاه تشکیل شده‌اند. برای محاسبه ظرفیت سیرگاه‌های شبکه، ابتدا معایب و مزایای هریک از روش‌های محاسبه ظرفیت طی مصاحبه با کارشناسان احصا شد و در نهایت، از روش UIC405، جهت محاسبه ظرفیت سیرگاه‌های شبکه استفاده گردید [Transportation Research Center of Isfahan University of Technology, 2016]. برای محاسبه ظرفیت در سال ۱۳۹۸ رشد سالیانه مسافر در هر سال

سناریوی ۱



سناریوی ۲



شکل ۶. سناریوهای افزایش ظرفیت گلوگاه‌های ریلی در شبکه فرضی جهت تبیین گلوگاه بنیادی

همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است به دلیل وجود تقاضای بالقوه بار در هریک از دو مسیر ریلی شبکه فرضی، با افزایش ظرفیت در هر دو سناریوی ۱ و ۲ بخشی از تقاضای بالقوه امکان عبور پیدا می‌کند و در نتیجه، در سیرگاه‌های CD و GH مجدداً نسبت  $v/C$  برابر ۱ می‌گردد. با این حال، با توجه به شکل ۶ و میزان مطلوبیت عبور یک واحد بار از سیرگاه‌های CD و GH مشخص می‌گردد که میزان کل مطلوبیت در سناریوی دوم افزایش ظرفیت بیشتر از سناریوی اول است:

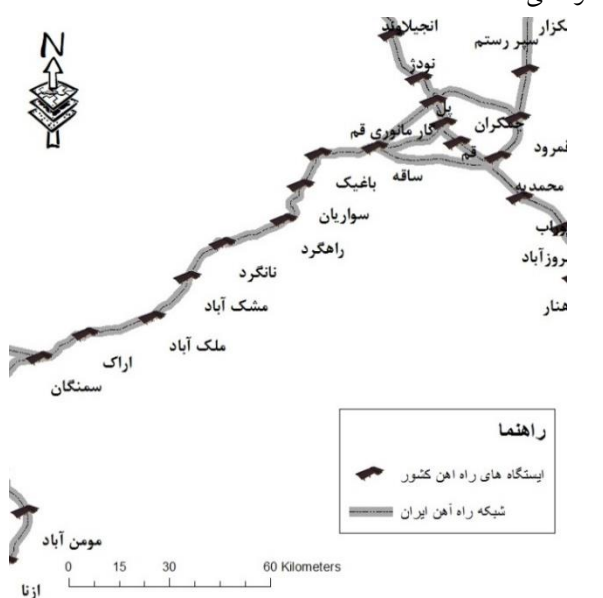
$$\begin{cases} U_{Total}^1 = 1000U_{CD} + 1000U_{GH} \\ U_{Total}^2 = 500U_{CD} + 1500U_{GH} \\ U_{CD} < U_{GH} \rightarrow U_{Total}^1 < U_{Total}^2 \end{cases} \quad (5)$$

مطلوبیت حمل بار در هریک از سیرگاه‌های بحرانی شبکه ریلی، نمایانگر میزان تقاضای بالقوه موجود در آن مسیر است که با رفع گلوگاه ظرفیتی امکان عبور تقاضای بالقوه ریلی فراهم می‌گردد. تقاضای بالقوه ریلی در هریک از سیرگاه‌های بحرانی شبکه، ارتباط مستقیمی با شاخص شدت گلوگاهی در آن سیرگاه دارد. از این رو، در ادامه پژوهش حاضر اولویت‌بندی گلوگاه‌های شبکه ریلی بر اساس شاخص شدت گلوگاهی انجام می‌گیرد.

## ارائه رویکردی نوین جهت شناسایی و رفع گلوگاه‌های ظرفیتی....

سپس سیرگاه‌هایی از شبکه ریلی که دارای عملکرد گلوگاهی هستند بر اساس نتایج حاصل از دو حالت تخصیص شناسایی گردید. بررسی وضعیت سیرگاه‌های ریلی ایران مشخص کرد که ۴۴ سیرگاه بحرانی (گلوگاه ظرفیتی) در شبکه ریلی ایران وجود دارد. در ادامه، به منظور بررسی اهمیت گلوگاه‌های ظرفیتی، یکی از محورهای شبکه ریلی انتخاب شده و نتایج اعمال راهکارهای افزایش ظرفیت بر روی گلوگاه‌های ظرفیتی آن، در شکل ۸ ارائه می‌گردند.

در محور محمدیه-اراک، ۴ سیرگاه با ایجاد گلوگاه ظرفیتی، امکان عبور حمل و نقل بار را با مشکل ایجاد می‌کنند. سیرگاه‌های (ساقه-باغیک)، سیرگاه (راهگرد-نانگرد)، سیرگاه (نانگرد-مشک آباد) و سیرگاه (محمدیه-ساقه) دارای عملکرد گلوگاهی هستند.



شکل ۸. موقعیت محور محمدیه-اراک در شبکه راه‌آهن ایران



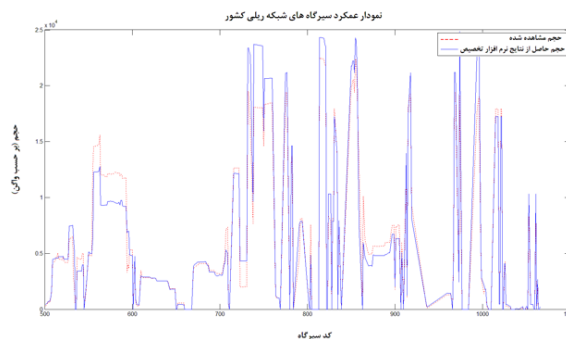
شکل ۹. وضعیت مسیر محمدیه تا سمنگان پس از اعمال راهکارها در سیرگاه ۵۵۹ (راهگرد-نانگرد)

در نظر گرفته شد و ظرفیت حمل بار سیرگاه‌های شبکه بروز رسانی گردید.

بدین منظور، اطلاعات ترافیک قطارهای باری و نیز اطلاعات رشد قطارهای مسافری تا سال ۱۳۹۸، مورد استفاده قرار گرفتند. سپس عملیات شناسایی گلوگاه‌ها برای کلیه سیرگاه‌های شبکه ریلی ایران (شامل ۴۰۴ سیرگاه) انجام گردید. به منظور شناسایی گلوگاه‌های ظرفیتی در شبکه ریلی ماتریس تقاضای سال ۱۳۹۸ و شبکه راه‌آهن ایران در سال ۱۳۹۸ به عنوان ورودی مسئله در نظر گرفته شد. وضعیت خطوط شبکه راه‌آهن بدون در نظر گرفتن سناریوهای احداث خطوط ریلی جدید تا سال ۱۳۹۸ فرض گردید. سپس با توجه به ماتریس تقاضای ریلی، تخصیص جزئی بار با لحاظ ظرفیت (CIA) و تخصیص همه‌یاهنج (AON) انجام پذیرفت.

در این پژوهش، جهت تخصیص بار در شبکه ریلی از نرم‌افزار تخصیص ریلی بار FARS استفاده گردید. در این نرم‌افزار، از روش‌هایی تحت عنوان «تخصیص جزئی بار با لحاظ ظرفیت» (CIA) و «تخصیص همه‌یاهنج» (AON) استفاده شده است. به منظور اعتبارسنجی نرم‌افزار تخصیص بار، نتایج حجم مشاهده شده از اطلاعات اداره سیر و حرکت راه‌آهن و حجم حاصل از نرم‌افزار تخصیص بار به ازای سیرگاه‌های شبکه ریلی در شکل ۷ نشان داده شده است [Transportation Research Center, Isfahan University of Technology, 2016].

بر اساس نتایج دو حالت تخصیص، کلیه سیرگاه‌های شبکه در یکی از حالت‌های الف، ب، ج و د (مربوط به شکل ۴) افزایش ظرفیت را دریافتند.



شکل ۷. نمودار حجم مشاهده شده نسبت به حجم حاصل از تخصیص سیرگاه‌های خطوط ریلی



شکل ۱۱. گلوگاه‌های ظرفیتی و گلوگاه‌های بنیادی شبکه ریلی

ایران در سال ۱۳۹۸

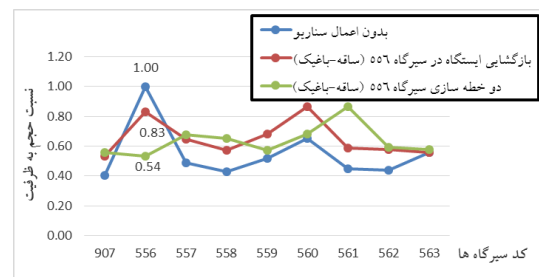
بررسی این شاخص مشخص کرد که از بین ۴۴ گلوگاه ظرفیتی در شبکه ریلی ایران، ۱۰ گلوگاه بنیادی وجود دارد؛ که جذب تقاضای بار در شبکه ریلی منوط به رفع مشکلات ظرفیتی در آن‌هاست. در شکل ۱۱، پراکندگی گلوگاه‌های ظرفیتی و گلوگاه‌های بنیادی شبکه ریلی نشان داده شده است. پراکندگی گلوگاه‌های بنیادی شبکه ریلی در شکل ۱۱، نشان داده شد. گلوگاه‌های بنیادی، شبکه ریلی از درجه‌ی اهمیت یکسانی برخوردار نیستند. در جدول ۱، وضعیت گلوگاه‌های بنیادی بر اساس شاخص شدت گلوگاهی ارائه گردیده است.

در جدول ۲، گلوگاه‌های بنیادی شبکه ریلی بر اساس شاخص شدت گلوگاهی اولویت‌بندی گردیدند. افزایش تقاضای جذب‌شده در شبکه ریلی با توجه به گلوگاه‌های بنیادی شبکه ریلی امکان‌پذیر است. از این رو، در هر یک از ۱۰ گلوگاه‌های بنیادی یک راهکار افزایش ظرفیت اعمال گردید نتایج حاصل از تخصیص CIA، نشان داد که افزایش ظرفیت اعمال‌شده در ۱۰ گلوگاه بنیادی شبکه ریلی ایران توانسته است میزان تقاضای جذب‌شده ریلی را به میزان ۴/۷ میلیون تن افزایش دهد. نتایج حاصل از تخصیص جزئی بار در شبکه ریلی قبل و بعد از اعمال راهکارهای افزایش ظرفیت در جدول ۲، ارائه گردیده است.

با این حال، نتایج اعمال راهکارهای افزایش ظرفیت بر روی هر یک از گلوگاه‌های ظرفیتی محور محمدیه-اراک نشان داد که در سه گلوگاه ظرفیتی، اعمال راهکارهای افزایش ظرفیت بازگشایی ایستگاه و دوخطه‌سازی سه گلوگاه ظرفیتی نتوانسته است تقاضای جذب‌شده ریلی را افزایش دهد و تنها نتوانسته است وضعیت سیرگاه موردنظر را بهبود دهد. در شکل ۹ نتایج اعمال راهکارهای افزایش ظرفیت در سیرگاه (راهگرد-نانگرد) نشان داده شده است.

در سیرگاه ۵۵۹ (راهگرد-نانگرد) راهکار افزایش ظرفیت اعمال گردیده است. با این حال، تقاضای ریلی جذب نشده است. این در حالی است که نتایج تخصیص همه‌یابچ در سیرگاه راهگرد-نانگرد نشان‌دهنده وجود تقاضای بالقوه ریلی در این سیرگاه است که به دلیل مشکلات ظرفیتی در دیگر سیرگاه‌های شبکه ریلی نتوانسته است تقاضای جذب‌شده ریلی را افزایش دهد. با اعمال راهکار افزایش ظرفیت در سیرگاه ۵۵۶ (ساقه-باغیک) تقاضای جذب‌شده ریلی افزایش یافته است. در شکل ۱۰، نتایج اعمال راهکارهای افزایش ظرفیت در سیرگاه ۵۵۶ (ساقه-باغیک) نشان داده شده است.

اعمال راهکار افزایش ظرفیت در سیرگاه ۵۵۶ (ساقه-باغیک) علاوه بر رفع مشکل ظرفیتی سیرگاه موردنظر، توانسته است بخشی از تقاضای بار ریلی را جذب نماید و حجم بار عبوری در سیرگاه‌های محور محمدیه-اراک را افزایش دهد. از این رو، یکسان نبودن درجه اهمیت گلوگاه‌های ظرفیتی منجر به استفاده از شاخص شدت گلوگاهی به منظور اولویت‌بندی گلوگاه‌های ظرفیتی در سیرگاه‌های شبکه گردید.



شکل ۱۰. وضعیت مسیر محمدیه تا سمنگان پس از اعمال

راهکارها در سیرگاه ۵۵۶ (ساقه-باغیک)

## ارائه رویکردی نوین جهت شناسایی و رفع گلوگاه‌های ظرفیتی....

داده شده است. برطرف نشدن کمبود ظرفیت در دیگر گلوگاه‌های ظرفیتی شبکه ریلی مانع از افزایش تقاضای جذب شده‌ی ریلی به بیش از ۴/۷ میلیون تن گردیده است. از این رو، به منظور افزایش تقاضای جذب شده ریلی بایستی راهکارهای افزایش ظرفیت به ترتیب اولویت در دیگر گلوگاه‌های ظرفیتی شبکه اعمال گردد.

### ۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

سیستم حمل‌ونقل ریلی به دلایل مختلف از جمله: قابلیت حمل بار انبوه در مسیرهای طولانی، صرفه‌جویی در مصرف انرژی، استهلاک کمتر نسبت به حمل‌ونقل جاده‌ای، سرعت بالا در تخلیه و بارگیری و کاهش آلودگی محیط‌زیست از اهمیت خاصی در بین گونه‌های حمل‌ونقل برخوردار است. مزایای حمل‌ونقل لزوم توجه به توسعه متوازن شبکه ریلی کشور در کنار رشد صنایع، معادن و ... را یادآور می‌گردد.

توسعه صنعت حمل‌ونقل ریلی از طریق توسعه ناوگان، احداث خطوط ریلی جدید و بهبود بهره‌وری خطوط امکان‌پذیر است. رفع گلوگاه‌های ظرفیتی و کاهش زمان دوره گردش واگن‌ها از جمله راهکارهای افزایش مطلوبیت حمل ریلی بار به حساب می‌آیند. هدف پژوهش حاضر، ارائه رویکردی نوین جهت شناسایی گلوگاه‌های ظرفیتی شبکه ریلی و اولویت‌بندی رفع آن‌هاست. تا حد امکان از ظرفیت سیرگاه‌های موجود به نحو تأثیرگذارتری استفاده گردد. از این رو، ماتریس تقاضای بار ریلی برای سال ۱۳۹۸ و شبکه راه‌آهن ایران بدون در نظر گرفتن پروژه‌های احداث زیرساخت ریلی تا سال ۱۳۹۸ به‌عنوان ورودی مسئله در نظر گرفته شدند. برای محاسبه ظرفیت سیرگاه‌های شبکه، پس از بررسی مزایا و معایب هریک از روش‌های محاسبه ظرفیت، از روش UIC405، جهت محاسبه ظرفیت سیرگاه‌های شبکه استفاده گردید.

عملیات شناسایی گلوگاه‌های ریلی برای کلیه سیرگاه‌های شبکه ریلی ایران (شامل ۴۰۴ سیرگاه) بر اساس نتایج حاصل از دو حالت تخصیص انجام گردید. در هریک از محورهای شبکه ریلی، گلوگاه‌های ظرفیتی شناسایی گردید و براساس شاخص شدت گلوگاهی و نسبت حجم به ظرفیت در تخصیص همه یا هیچ و تخصیص جزئی با لحاظ ظرفیت، گلوگاه‌های بنیادی در هریک از محورهای ریلی شناسایی شد. بررسی این شاخص

جدول ۱. اولویت‌بندی گلوگاه‌های بنیادی شبکه ریلی ایران در

سال ۱۳۹۸

نام سیرگاه گلوگاهی	نام محور مربوطه	$\left(\frac{V}{C}\right)_{CIA}$	$\left(\frac{V}{C}\right)_{ANA}$	شدت گلوگاهی (BI)
دهنار - کاشان	محمدیه - کاشان	۱	۲/۳۸	۱/۳۸
شوراب - دهنار	محمدیه - کاشان	۱	۲/۲۹	۱/۲۹
یزد - نظرآباد	میبد - بافق	۱	۲/۲۶	۱/۲۶
باغیک - ساقه	محمدیه - اراک	۱	۲/۱۱	۱/۱۱
بادرود - مازو	مازو - اندیمشک	۱	۱/۹۸	۰/۹۸
رباط پشت بادام - شهید منتظر	رباط پشت بادام - کال زرد	۱	۱/۸۲	۰/۸۲
مانی - اضطراری ۲۶	بافق - سی زیر	۱	۱/۵۸	۰/۵۸
فیروزه - اصفهان	آب نیل - سیستان	۱	۱/۵	۰/۵
خوشوم - نی باد	اردکان - چادرملو	۱	۱/۲۱	۰/۲۱
تزرچ - چاه تر	انشعاب - گل گهر	۱	۱/۲	۰/۲

جدول ۲. اعمال راهکار افزایش ظرفیت در گلوگاه‌های بنیادی

شبکه ریلی ایران

نتایج تخصیص CIA	قبل از اعمال راهکار افزایش ظرفیت	بعد از اعمال راهکار
تقاضای ریلی کل (میلیون تن)	۵۵/۲۸۶	۵۵/۲۸۶
تقاضای جذب شده ریلی (میلیون تن)	۴۰/۸۲	۴۵/۵
نسبت تقاضای ریلی جذب شده به تقاضای کل	۰/۷۳۸	۰/۸۲۳

در جدول ۲، میزان تقاضای جذب شده‌ی ریلی پس از اعمال راهکارهای افزایش ظرفیت در گلوگاه‌های بنیادی نشان

- پژوهشکده حمل و نقل. دانشگاه صنعتی اصفهان (۱۳۹۵) "تحلیل تقاضای حمل و نقل بار و ظرفیت محورهای اصلی شبکه راه آهن کشور گزارش مرکز تحقیقات راه آهن"، گزارش پروژه، مرحله پنجم، ص. ۱۱ - ۱۲.

- تمنایی، محمد، نیکو، نریمان و یقینی، مسعود (۱۳۹۱) "برنامه ریزی عملیات حمل و نقل ریلی"، ایران، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران. نوبت چاپ دوم، صفحه ۶۲-۸۵.

- شرکت راه آهن جمهوری اسلامی ایران (۱۳۹۲) "مقررات عمومی سیر و حرکت راه آهن"، ایران، تهران، اداره کل روابط عمومی راه آهن جمهوری اسلامی ایران، کمیسیون عالی سوانح راه آهن.

- لسان، جواد و یقینی، مسعود (۱۳۹۰) "ارائه روشی جهت بررسی راهکارهای افزایش ظرفیت مسیرهای ریلی با استفاده از روش بهینه سازی همراه با مطالعه موردی مسیر بادرود- اردکان"، ایران، فصل نامه مهندسی حمل و نقل، سال ۳، شماره ۲، صفحه ۱۵۹-۱۷۳.

- مهدوی، علی (۱۳۹۳) "بررسی عوامل مؤثر بر افزایش تقاضای بار در حمل و نقل ریلی نسبت به جاده ای با برآورد مدل انتخاب طریقه"، پایان نامه کارشناسی ارشد رشته ی مهندسی عمران گرایش برنامه ریزی حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، دانشکده حمل و نقل، صفحه ۲۹-۳۱.

-Abril, M., Barber, F., Ingolotti, L., Lova, A., Salido, M. A and Tormos, P. (2007) "An assessment of railway capacity", Transportation Research Part E. Vol. 44, No. 2008, pp. 774-806.

-Achim, C., Ferland, J. A and Florian, M. (1975) "On incremental methods for traffic assignment", Transportation Research, Vol. 9, No.4, pp. 237-239.

-Arcot, V., Lu, C. C., Mahmassani, H., Miller-Hooks, E., Zhang, K and Dong, J. (2007) "Dynamic network simulation-assignment platform for multiproduct intermodal freight transportation analysis", Transportation

مشخص کرد که در شبکه ریلی ایران، ۱۰ گلوگاه بنیادی وجود دارد. بر اساس اولویت بندی گلوگاه های بنیادی در هریک از ۱۰ گلوگاه های بنیادی یک راهکار افزایش ظرفیت اعمال گردید. نتایج حاصل از تخصیص CIA، نشان داد که افزایش ظرفیت اعمال شده در ۱۰ گلوگاه بنیادی شبکه ریلی ایران توانسته است میزان تقاضای جذب شده ریلی را به میزان ۴/۷ میلیون تن افزایش دهد. جهت مطالعات آتی پیشنهاد می شود پس از مشخص شدن سیرگاه های بحرانی شبکه ریلی، نوع راهکارهای افزایش ظرفیت (دوخطه سازی، تراک بندی، برقی سازی، بازگشایی ایستگاه و ...) مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر اعمال راهکارهای افزایش ظرفیت به صورت منفرد و در ترکیب با یکدیگر بر روی شبکه ریلی بررسی گردد.

## ۶. پی نوشتها

1. All or nothing (AON)
2. Incremental assignment
3. User equilibrium assignment
4. Stochastic user equilibrium assignment
5. System optimum assignment
6. Freight Analysis Framework
7. Volume Delay Function
8. Bureau of Public Roads
9. Freight Assignment in Railway System
10. Dijkstra
11. Discrete choice model
12. Utility
13. Scott method
14. Time Window
15. Capacity-based Incremental (CIA)
16. Bottleneck Intensity
17. Fundamental Bottleneck

## ۷. مراجع

- پژوهشکده حمل و نقل. دانشگاه صنعتی اصفهان (۱۳۹۴) "تحلیل تقاضای حمل و نقل بار و ظرفیت محورهای اصلی شبکه راه آهن کشور، گزارش مشاوره ای برای مرکز تحقیقات راه آهن"، گزارش پروژه مرحله سوم، ص. ۱۰۲-۱۲۰، ۱۷۰-۱۷۲ و مرحله چهارم، ص. ۲۳-۳۰.

- Huynh, N. and Uddin, M. M. (2015) "Freight traffic assignment methodology for large-scale road-rail intermodal networks", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2477, pp. 50-57.
- Inoue, M., Kaneko, Y and Kato, H. (2010) "Comparative analysis of transit assignment: evidence from urban railway system in the Tokyo", Metropolitan Area, Springer Science Business Media. Transportation Vol. 37, No. pp. 775-799.
- International Union of Railways (1996) "Links between railway infrastructure capacity and the quality of operations", UIC Code 405.
- Jastrzebski, W. (2000) "Volume delay functions", In 15th International EMME/2 Users Group Conference.
- Juan de Dios Ortúzar and Luis G. Willumsen (2011) "Modelling Transport", Fourth Edition, Ltd. Published 2011 by John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-76039-0
- Landex, A. (2008) "Methods to estimate railway capacity and passenger delays", In Department of Transport, Technical university of Denmark: Kgs. Lyngby, PhD. Thesis
- Landex, A. (2007) "Network effect in railway system", Technical University of Denmark, Centre for Traffic and Transport.
- Leong, L. V. (2016) "Effects of Volume-Delay Function on Time, Speed and Assigned Volume in Transportation Planning Process", International Journal of Applied Engineering Research, Vol.1, No 13, pp. 8010-8018.
- Marinov, M and Viegas, J. (2011) "A mesoscopic simulation modelling methodology for analyzing and evaluating freight train operations in a rail network", Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 19, No.1, pp. 516-539.
- Pal, V. (2000) "Indian railways transportation management", Bahri Brothers Publication, Delhi.
- Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2032, pp.9-16.
- Armstrong, J., Khadem-Sameni, M and Preston, J. (2010) "Railway capacity challenge: measuring and managing in Britain", Proceedings of the 2010 JointRail Conference, JRC, Urbana, IL, USA, JRC-36280, pp. 571-578.
- Center for Transportation Analysis and Oak Ridge National Laboratory (2015) "Freight analysis framework version 4, User's Guide for Release 4.0", pp. 2, 12.
- Corbett, J. J., Falzarano, A., Hawker, J. S., Ketha, S., Korfmacher, K., Winebrake, J. J and Zilora, S. (2008) "Assessing energy, environmental, and economic tradeoffs in intermodal freight transportation", Journal of the Air & Waste Management Association, Vol.58, No.8, pp.1004-1013.
- Couto, A. F and Maia, L. (2013) "A rail network optimization model designed to model freight network at a macro level", In World Conference on Transport Research, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Drewello, D and Günther, F. (2012) "Bottlenecks in railway infrastructure-do they really exist? The corridor Rotterdam-Genoa", In European Transport Conference.
- Friedrich, M., Haupt, T and Nökel, K. (2003) "Freight modelling: data issues, survey methods, demand and network models", In 10th International Conference on Travel Behavior Research, Lucerne, Switzerland, August.
- Hansen, S. (2007) "The assignment model", Center for Traffic and Transport, Trans-Tools User Course, Thursday 29<sup>th</sup> of November.
- Hansen, S., Kaas, A. H and Landex, A. (2006) "Railway operation", Centre for Traffic and Transport, Technical University of Denmark.
- Holzhey, W. (2011) "Rail network 2025/2030. Expansion concept for an efficient rail freight service in Germany, Summary", Dessau-Rosslau, pp. 4-6.

-Qiao-Yan Wen, Q., Qin, S. J., Yan-Bing, Li and Zhuo Guo, F. (2014) "Practical quantum all-or-nothing oblivious transfer protocol", Quantum Information Processing, Vol.13, No. 1, pp.131-139.

-Rothengatter, W. (1996) "Bottlenecks in European transport infrastructure", In Pan-european transport issues. Proceedings of seminar a help at the 24<sup>th</sup> European transport forum, Brunel University, England, 2-6 September 1996. Volume p 401.

-Shafiepour, M., Tamannaei M. and Abtahi S. M. (2017) "A methodology to prioritize the

construction projects of new railway infrastructures for privatization in railway networks (Case Study: Iran)", International Journal of Transportation Engineering(Under publication)

-Tamannaei, M., Shafiepour, M., Haghshenas H. and Tahmasebi, B. (2016) "Two comprehensive strategies, to prioritize the capacity improvement solutions in railway networks (Case Study: Iran)", International Journal of Railway Research, Vol. 3, No. 1, pp. 9-18.

## ارائه رویکردی نوین جهت شناسایی و رفع گلوگاه‌های ظرفیتی....

محمود شفیع پور، درجه کارشناسی در رشته مهندسی راه‌آهن-خطوط را در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه اصفهان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران- راه و ترابری را در سال ۱۳۹۵ از دانشگاه صنعتی اصفهان اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان، تحلیل شبکه‌های حمل‌ونقل ریلی با رویکرد طراحی و بهره‌برداری است.



محمد تمنایی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران-سازه را در سال ۱۳۸۷ از دانشگاه صنعتی اصفهان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی راه و ترابری را در سال ۱۳۸۹ از دانشگاه صنعتی اصفهان اخذ نمود. در سال ۱۳۹۳ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی راه و ترابری از دانشگاه تربیت مدرس گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان، طراحی شبکه‌های حمل‌ونقل، برنامه‌ریزی حمل‌ونقل ریلی، بهینه‌سازی و کاربرد نظریه بازی در حمل‌ونقل بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیاری در دانشگاه صنعتی اصفهان است.



سید مهدی ابطحی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی راه و ساختمان را در سال ۱۳۶۷ از دانشگاه شیراز و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی راه و ترابری را در سال ۱۳۷۰ از دانشگاه علم و صنعت اخذ نمود. در سال ۱۳۸۰ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی راه و ترابری از دانشگاه علم و صنعت گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان، اصلاح رفتار قیر، روسازی آسفالتی و سیستم‌های ریلی سریع بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه دانشیاری در دانشگاه صنعتی اصفهان است.

