بررسی جامع میزان تاب‌آوری در سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی و نقش آن در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل

مقاله علمی – پژوهشی

محمدرضا خاکباز، دانشجوی دکتری، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
عبدالرضا شیخ‌الاسلامی*، دانشیار، گروه برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم‌وصنعت ایران، تهران، ایران
ندا کامبوزیا، استادیار، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Sheikh@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰– پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱
صفحه ۲۲۴-۲۰۷

چکیده

شبکه‌های حمل‌ونقل ریلی، برای عملکرد یک جامعه و اقتصاد آن ضروری هستند. افزایش تقاضای حمل‌ونقل، ازدحام را در شبکه‌های راه‌آهن افزایش می‌دهد و در نتیجه آن‌ها به یکدیگر وابسته‌تر و عملیات پیچیده‌تر می‌شوند. همچنین، افزایش تعداد اختلالات ناشی از خرابی سیستم و تغییرات آب و هوایی در آینده قابل انتظار است. در نتیجه، بسیاری از قطارها لغو شده و بیش از حد با تأخیر مواجه می‌شوند. بنابراین، بسیاری از مسافران به مقصد خود نمی‌رسند که نیاز مشتریان برای جابجایی را به خطر می‌اندازد. در حال حاضر، نیاز فزاینده‌ای برای تعیین کمیت اثرات اختلالات و تکامل عملکرد سیستم وجود دارد. این مقاله به تنظیم یک تعریف میدانی از تاب‌آوری در حمل‌ونقل ریلی پرداخته و بررسی جامعی از تحقیقات به عمل آمده در حوزه تاب‌آوری راه‌آهن ارائه می‌دهد. معیارهای مبتنی بر سیستم، تمایل دارند تا اثرات بهتری بر خدمات و تقاضای حمل‌ونقل نشان دهند. همچنین بهینه‌سازی ریاضی، پتانسیل بالایی برای ارزیابی و بهبود تاب‌آوری سیستم‌های راه‌آهن نشان می‌دهد. روش‌های مبتنی بر داده نیز می‌تواند برای تجزیه و تحلیل دقیق پس از اختلالات استفاده شود. با واکاوی مطالعات مربوط به تاب‌آوری، امکان تشخیص و پیش‌بینی مشکلات و خطرات احتمالی در سیستم حمل‌ونقل ریلی افزایش می‌یابد و اقدامات مناسب جهت پیشگیری از وقوع آن‌ها انجام می‌شود. رویکرد نهایی این مقاله، نمایش روش‌های میزان تاب‌آوری در سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی و نقش آن در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل است. نتایج نشان می‌دهد که روش‌های بهینه‌سازی و مبتنی بر داده‌ها و رویکردهای ترکیبی، در جهت بهبود وضعیت تاب‌آوری سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی موثرتر از سایر روش‌ها است.

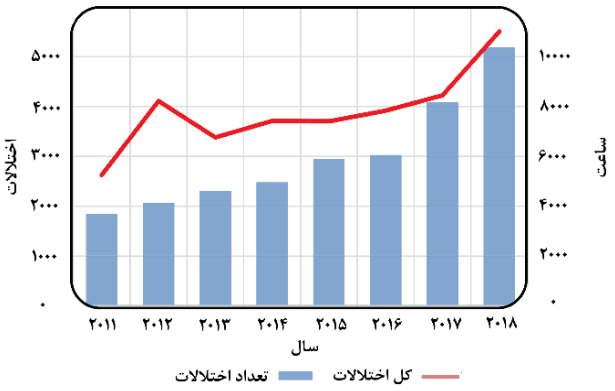
واژه‌های کلیدی: تاب‌آوری، راه‌آهن، مسافر، حمل‌ونقل، برنامه‌ریزی

۱- مقدمه

شبکه‌های زیرساختی حیاتی مانند شبکه‌های حمل‌ونقل، برای عملکرد یک جامعه و اقتصاد آن ضروری است و حمل میلیون‌ها مسافر در سراسر جهان در طول روز به عملکرد منظم این شبکه‌های زیرساختی مربوط می‌شوند. شبکه حمل‌ونقل، یکی از پویاترین صنایع جهان می‌باشد و نقش بسیار مهمی در توسعه جوامع ایفا می‌کند. در این صنعت، حمل‌ونقل ریلی به عنوان یکی از اصلی‌ترین ابزارهای حمل‌ونقل، نقش بسیار مهمی داشته و به عنوان یک عنصر مهم و حیاتی در شبکه حمل‌ونقل شناخته می‌شود. شبکه‌های حمل‌ونقل ریلی به دلیل کارآیی بالا، مصرف انرژی کمتر و مباحث توسعه پایدار، به عنوان یک گزینه پایدار و موثر برای حمل‌ونقل

کالا و مسافر شناخته می‌شوند. افزایش تقاضای حمل‌ونقل، ازدحام را در شبکه راه‌آهن افزایش می‌دهد و در نتیجه، آن‌ها به یکدیگر وابسته‌تر شده و عملیات پیچیده‌تر می‌شود. بنابراین، تحرک شهری در برابر تغییرات غیرمنتظره شبکه‌ها شکننده‌تر می‌شود. چنین رویدادهایی ممکن است از اختلالات (تغییرات روزانه در عملیات و یا به دلیل خرابی زیرساخت‌ها)، وسایل نقلیه، اقدامات مهندسی و شرایط نامساعد جوی (مانند باران، برف و باد) تا بلایای طبیعی (مانند زلزله، سیل و طوفان) متغیر باشد. اختلالات معمولاً منجر به تعطیلی موقت خطوط یا کل ایستگاه‌های راه‌آهن می‌شود. همچنین حوادثی مانند خودکشی، تظاهرات یا اعتصابات نیز ممکن است بر ارائه خدمات در خطوط ریلی تأثیرگذار باشد. علاوه بر این، محققان موقعیت‌های خارج از کنترل را تشخیص می‌دهند. این موقعیت‌ها می‌توانند ناشی از اختلالات بزرگ و یا ایجاد تاخیر در حرکت قطارها باشند. به عنوان مثال در سال ۲۰۱۸ در هلند، به طور متوسط ۱۴ اختلال در روز رخ می‌دهد که هر کدام حدود دو ساعت طول می‌کشد. از این آمار، خرابی وسایل نقلیه و زیرساخت‌ها، حدود ۷۰ درصد از کل علل این تاخیرات را شامل می‌گردد (Dekker et al., 2021; Kamboozia, & Khakbaz, 2023; Bešinović, 2020; Rahbar, Khakbaz & Sheykholeslami, 2025).

در نتیجه‌ی نکات ذکرشده، بسیاری از قطارهای لغو شده و با تأخیر بیش از حد مواجه می‌شوند و بسیاری از مسافران به مقصد خود نمی‌رسند که نیاز مشتریان برای جابجایی را به خطر می‌اندازد. در سال ۲۰۱۲، طوفان سندی چندین ایستگاه مترو و تونل در شهر نیویورک را زیر آب برد و باعث آسیب شدید به سیستم‌های ریلی شد. بسیاری از خدمات اصلی در این بخش، ظرف مدت دو هفته بهبود یافتند. چندین ماه طول کشید تا ایستگاه‌هایی که به طور جدی تحت تأثیر قرار گرفته بودند، دوباره بازیابی شوند (Zhu et al., 2016). هزینه‌های مستقیم اقتصادی طوفان چین در سال ۲۰۰۸، بالغ بر ۲۲,۳ میلیارد دلار بوده است (Chen & Wang, 2019). شکل ۱، تعداد و مدت زمان ایجاد اختلالات در سال‌های گذشته در هلند را نشان می‌دهد. ضمن این که می‌توان اثرات اختلالات فزاینده‌ای را در آینده به دلیل افزایش تقاضای حمل‌ونقل شاهد بود. رویدادهایی مانند حملات تروریستی لندن در سال ۲۰۰۵، تأثیرات گسترده و طولانی مدتی بر شبکه حمل‌ونقل ریلی دارد. چندین ماه پس از حمله تروریستی در مترو، تعداد مسافران در روزهای هفته بین ۵ تا ۱۵ درصد کاهش داشت (Van Aken, Bešinović & Goverde, 2017; Dawson, Shaw & Gehrels, 2016; Rodríguez-Núñez & García-Palomares, 2014).



شکل ۱. تعداد و مدت زمان کل اختلالات صورت‌گرفته در شبکه راه‌آهن هلند در طول سال‌های ۲۰۱۱ الی ۲۰۱۸ (Bešinović, 2020)

با وجود اینکه برنامه‌ریزی و مدیریت حمل‌ونقل نیاز به بهبود عملکرد سیستم در هنگام اختلالات و کاهش تلفات ناشی از اختلالات را تا حد ممکن دارد، شناسایی اقدامات اجرایی مناسب برای کاهش اختلالات، همچنان چالش‌برانگیز است. عواقب این امر به شدت به عدم درک کمی از تأثیر خرابی‌های زیرساختی منفرد و چندگانه و شرایط آب و هوایی نامطلوب و تکامل عملکرد سیستم حمل‌ونقل نسبت داده می‌شود. علاوه بر این، توزیع کنندگان و کنترل کننده‌های ترافیک، اغلب فاقد اطلاعات مناسبی در مورد تاب‌آوری طرح‌ها و قابلیت‌های بازیابی آن‌ها هستند (Steenhuisen, 2009). اخیراً توجه زیادی به بهبود حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی در اروپا از جمله شبکه‌های انرژی و حمل‌ونقل شده است. محققان به این نتیجه رسیده‌اند که اجرای یک سیستم راه‌آهن با تاب‌آوری بالا، فقط مربوط به ساخت آن نمی‌شود، بلکه به همان اندازه به شیوه‌های مدیریتی آن مربوط می‌شود. زیرا شکاف‌ها، کاستی‌ها و مشکلات در حین بهره‌برداری از خطوط راه‌آهن اغلب نتیجه برنامه‌ریزی و اقدامات عملیاتی نادرست است. تحقیقات عددی بیشتری در این زمینه مورد نیاز است که بایستی در تحقیقات آینده توجه بیشتری را به خود جلب کند. البته زیرساخت‌های راه‌آهن باید در برابر تغییرات آب و هوایی

مانند آب‌وهوای طوفانی، آتش‌سوزی‌های جنگلی یا افزایش سطح دریا انعطاف‌پذیر باشد تا از عملیات ایمن برخوردار شود و از افزایش هزینه‌ها جلوگیری شود. این موضوع نیز مستلزم مدیریت صحیح در بخش برنامه‌ریزی حمل‌ونقل ریلی است (Ferranti, Quinn & Jaroszweski, 2022). اگرچه رویکرد مبتنی بر مدیریت ریسک نقش مهمی در پرداختن به مسائل ایمنی ایفا کرده است، اما این رویکرد باید با اقدامات هدفمند برای افزایش تاب‌آوری شبکه حمل‌ونقل ریلی تکمیل شود. اصول مدیریت ریسک شامل شناسایی و ارزیابی ریسک‌ها از طریق ابزارها و کنترل‌های سازمانی است که به اولویت‌بندی اقدامات کاهشی کمک می‌کند. با این حال، پویایی‌های سیستم و ظهور خطرات جدید، توانایی سیستم حمل‌ونقل ریلی را در حفظ عملکرد پایدار به چالش می‌کشد و ممکن است منجر به اختلالات قابل‌توجهی شود (Sharma et al., 2021). تاب‌آوری در سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی، به عنوان یکی از موضوعات اساسی و حیاتی در سال‌های اخیر توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است. مطالعات انجام شده در این حوزه به شناسایی و ارائه راهکارهایی پرداخته‌اند که می‌توانند تاب‌آوری و پایداری این سیستم‌ها را بهبود بخشند. از جمله این راهکارها می‌توان به بهبود و تقویت زیرساخت‌ها، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی و اتخاذ روش‌های حفاظت از محیط‌زیست اشاره کرد. هدف اصلی این مطالعات، افزایش کارایی، کاهش هزینه‌های عملیاتی و تقویت توانایی سیستم در مقابله با چالش‌های گوناگون اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی است. تاب‌آوری سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی، نه تنها به ارتقای عملکرد این شبکه کمک می‌کند، بلکه در راستای اهداف توسعه پایدار نیز گام برمی‌دارد. می‌توان گفت که توجه به تاب‌آوری شبکه حمل‌ونقل ریلی، ضرورتی غیرقابل‌انکار است. این رویکرد نه تنها موجب بهبود کارایی و کاهش هزینه‌های اقتصادی می‌شود، بلکه نقش مهمی در حفاظت از محیط زیست و ارتقای توانایی مقابله با چالش‌های مختلف ایفا می‌کند. بنابراین، مطالعات و اقدامات در این حوزه نیازمند پشتیبانی همه‌جانبه و برنامه‌ریزی دقیق هستند تا دستیابی به نتایج مطلوب تضمین شود (Bešinović, 2020; Knoester et al., 2024; Hu, Yang & Zhen, 2024). تحقیقات متعددی مرتبط با تاب‌آوری سیستم‌های حمل‌ونقل وجود دارد (Hosseini, Barker, & Ramirez-Marquez, 2016; Mattsson & Jenelius, 2015; Mu et al., Yang, 2025; Zhou, Wang & Yang, 2019). با این حال، تحقیقات قبلی تنها تعداد محدودی از مطالعات در حوزه راه‌آهن را پوشش می‌دهد. در نهایت هدف از ارائه این مقاله، شناخت مبحث تاب‌آوری با رویکرد کاربردی با بررسی جامع و تنظیم یک تعریف دقیق از تاب‌آوری در حمل‌ونقل ریلی با تمرکز بر رویکردهای کمی است. نتایج این تحقیق در بهبود وضعیت بهره‌برداری از خطوط ریلی موثر خواهد بود.

۲- تاب‌آوری در سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی

حمل‌ونقل ریلی شهری، یکی از ارکان کلیدی توسعه پایدار حمل‌ونقل در شهرها محسوب می‌شود، اما وقوع اختلالات ناشی از بلایای طبیعی، عوامل انسانی و دیگر عوامل، می‌تواند عملکرد این شبکه‌ها را مختل کند. این بخش از مقاله، سعی دارد در ابتدا مفهوم تاب‌آوری در حمل‌ونقل ریلی را تبیین کند. در ادامه به بررسی تعاریف تاب‌آوری در سیستم‌های حمل‌ونقل و سپس تاب‌آوری در حمل‌ونقل ریلی پرداخته و تحقیقات موردنظر را دسته بندی نماید.

۲-۱- مفهوم تاب‌آوری در حمل‌ونقل ریلی

تعریف عمومی پذیرفته‌شده توسط سازمان ملل برای مفهوم تاب‌آوری، توانایی یک سیستم و یا جامعه در معرض خطر برای مقاومت، جذب، انطباق و بازیابی از اثرات یک خطر به موقع و کارآمد، از طریق حفظ و بازسازی ساختارها و عملکردهای اساسی اساسی آن است (Wannous & Velasquez, 2017). تاب‌آوری را می‌توان در حوزه‌های مختلف مهندسی، سازمانی، اقتصادی، اکولوژیکی و اجتماعی یافت (Hosseini, Barker & Ramirez-Marquez, 2016). موضوع تاب‌آوری، به ویژه در زمینه مهندسی و حمل‌ونقل، در سال‌های اخیر به طور قابل توجهی مورد مطالعه قرار گرفته است. مثال‌هایی در مورد تاب‌آوری را می‌توان در بخش‌های آب و هوا (Janić, 2015)، جاده‌ها و بزرگراه‌ها (Wang et al., 2016)، مباحث مربوط به زنجیره تامین (Ponomarov & Holcomb, 2009)، انتقال آب (Mansouri, Sauser & Boardman, 2009) و شبکه‌های راه‌آهن یافت (Khaled et al., 2015). در ادامه به بررسی مفهوم تاب‌آوری در حمل‌ونقل عمومی و تاب‌آوری در حمل‌ونقل ریلی پرداخته خواهد شد.

۲-۲- بررسی تعاریف تاب‌آوری در سیستم‌های حمل‌ونقل

بررسی تعاریف تاب‌آوری در تحقیقات نشان می‌دهد که هیچ بینش منحصر به فردی در مورد چگونگی تعریف تاب‌آوری وجود ندارد. با این حال، شباهت‌های خاصی را می‌توان در بین این تعاریف مشاهده نمود. نکات برجسته در جدول ۱ به صورت خلاصه ذکر شده است.

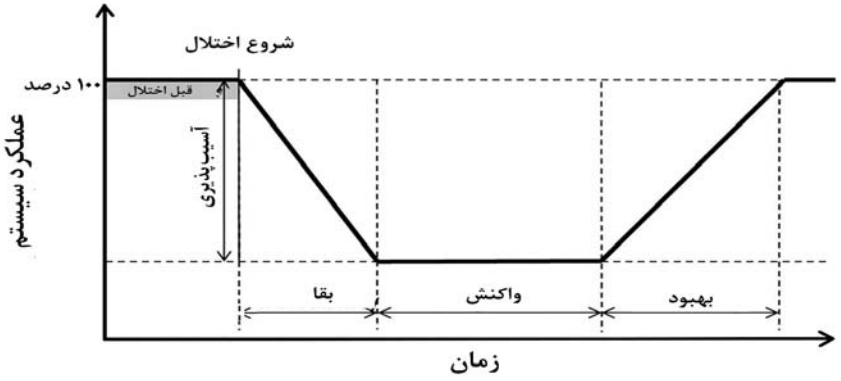
به طور کلی، تاب‌آوری شامل دو جنبه فعال و واکنشی است. اولی برنامه‌ریزی برای سیستم‌های ارتجاعی را پوشش می‌دهد و دومی محافظت در برابر اختلالات یا بلایای احتمالی را پوشش می‌دهد. بنابراین، هر دو جنبه به یک اندازه مهم هستند و باید به عنوان عناصر سازنده تاب‌آوری در سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی در نظر گرفته شوند. این تعاریف فعلی در نظر گرفته شده و با زمینه سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی تطبیق داده شده است.

۲-۳- تاب‌آوری در حمل‌ونقل ریلی

تاب‌آوری سیستم حمل‌ونقل ریلی به عنوان توانایی سیستم‌های ریلی برای ارائه خدمات مؤثر در شرایط عادی و همچنین مقاومت، جذب، تطبیق و بهبود سریع در زمان ایجاد اختلالات یا بلایای طبیعی تعریف می‌شود. این موضوع را می‌توان در شکل ۲، تصویرسازی نمود. ویژگی‌های پیشگیرانه اضافی برای کمک به تاب‌آوری سیستم و ایجاد آمادگی است.

جدول ۱. بررسی تعاریف موردنظر از تاب‌آوری در سیستم‌های حمل‌ونقل

ردیف	تعریف	منبع مورد مطالعه
۱	تاب‌آوری به معنای توانایی بهبود سریع پس از ایجاد یک اختلال است.	D'Lima & Medda, 2015 Chan & Schofer, 2016 Bababeik, Khademi & Chen, 2018 Lu, 2018
۲	تاب‌آوری به معنای باقی ماندن عملکرد مناسب سیستم در هنگام ایجاد یک اختلال است.	Khaled et al., 2015 Ferranti et al., 2016 Dawson, Shaw & Gehrels, 2016 Diab & Shalaby, 2020
۳	تاب‌آوری مبتنی بر چهار ویژگی استواری، اطمینان، کارآمدی و سرعت است.	Beiler et al., 2013 Bocchini et al., 2014
٤	تاب‌آوری تابعی از آسیب‌پذیری سیستم در برابر اختلالات بالقوه و ظرفیت تطبیقی آن در بازیابی سطح قابل‌قبولی از خدمات در یک بازه زمانی معقول پس از ایجاد اختلال است.	Mansouri, Sauser & Boardman, 2009 Saadat et al., 2018 Zhang et al., 2018



شکل۲. تاب‌آوری سیستم حمل‌ونقل ریلی شامل آسیب‌پذیری، بقاء، واکنش و بهبود (Bešinović, 2020)

آسیب‌پذیری به عنوان میزان عملکرد باقی مانده در طول یک اختلال تعریف می‌شود (Khaled, Clarke & Hoque, 2015). به طور مشابه، آسیب‌پذیری یک سیستم تحت عنوان استعداد در برابر اختلال‌ها که می‌تواند منجر به کاهش قابل‌توجه در سرویس‌دهی در شبکه شود، تعریف می‌گردد. تعریف مشابهی را می‌توان در تحقیقات ژو و همکاران یافت (Zhou, Wang & Yang, 2019). سایر اصطلاحات مرتبط با آسیب‌پذیری، مقاومت و تاب‌آوری سیستم حمل‌ونقل ریلی شامل آسیب‌پذیری، بقاء، واکنش و بهبود است. در سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی، مقاومت را می‌توان به عنوان همتای آسیب‌پذیری در نظر گرفت. با این حال، تمایزی بین این دو واژه وجود دارد. در زمینه راه‌آهن، مقاومت توانایی کاهش تاخیرهای مختلف روزمره ناشی از اختلالات تعریف می‌گردد. این تعریف برای حمل‌ونقل ریلی معمولی است و برای سایر روش‌های حمل‌ونقل متفاوت است (Berdica, 2002; Bešinović, 2020). همچنین بقاء (پایداری)، توانایی سیستم برای تبدیل عملکرد سیستم از حالت نرمال و یا برنامه‌ریزی شده (یعنی عملکرد ۱۰۰ درصد) به حالت مختل‌شده است. در عمل، زمانی که یک اختلال اتفاق می‌افتد، سیستم می‌تواند به طور متفاوتی تنزل پیدا کند. به عنوان مثال، سیستم می‌تواند یکباره به طور کامل از کار بیفتد یا عملکرد را به آرامی کاهش دهد تا در نهایت به حالت پایدار مختل برسد. اولی را می‌توان با قطع برق مشاهده کرد. در این صورت، تمام قطارها بلافاصله متوقف می‌شوند و عملکرد برابر با صفر درصد است. اما زمانی که یک لینک در شبکه از کار بیفتد، ممکن است زمان زیادی طول بکشد تا کل سیستم به حالت پایدار مختل تبدیل شود (Bešinović, 2020). همچنین واکنش، مجموعه اقداماتی است که مستقیماً و یا بلافاصله پس از یک اختلال به منظور ارائه بهترین سطح خدمات ممکن، تضمین امنیت عمومی، ارائه گزینه‌های سفر جایگزین برای رسیدن به مقاصد و برآورده کردن نیازهای اساسی معیشتی افراد آسیب‌دیده انجام می‌شود. این مرحله، نشان دهنده اختلال در وضعیت ثابت ترافیک راه‌آهن است که بسته به ماهیت اختلال، ممکن است از چند ساعت تا چند روز طول بکشد. پاسخ‌های برنامه‌ریزی در راه‌آهن، اغلب به عنوان برنامه‌ریزی اضطراری شناخته می‌شود (Bešinović, 2020).

در نهایت، بهبود به توانایی سیستم برای بازگشت از حالت مختل به حالت اولیه گفته می‌شود. بسته به یک اختلال، بهبود ممکن است چند ساعت (مثلاً به دلیل خرابی وسیله نقلیه) تا چندین هفته (مثلاً به دلیل سیل شدید یا سونامی) طول بکشد (Bešinović, 2020). در طول انواع خاصی از اختلالات یا بلایا ممکن است برخی از حالت‌ها و بخش‌های تاب‌آوری که تعریف شد، حذف شوند. به عنوان مثال، پس از یک زلزله در مقیاس بزرگ، ترافیک راه‌آهن می‌تواند به طور کامل قطع شود و در نتیجه قابلیت بقاء رخ نمی‌دهد. یا اینکه پس از یک اختلال کوچکتر مثل قطع برق در زمانی کوتاه، یک سیستم بلافاصله شروع به بازیابی می‌کند، بدون اینکه نیاز به رسیدن به حالت پایدار مختل داشته باشد. همچنین در برخی موارد، پایداری را می‌توان به عنوان بخشی از پاسخ در نظر گرفت، در حالی که در برخی موارد دیگر، پاسخ بخشی از مرحله بهبود است. آمادگی، زمانی در نظر گرفته می‌شود که کاهش بسیار پرهزینه باشد و انتظار می‌رود اثرات اختلال خاصی رخ دهد. به عنوان مثال، برنامه‌ریزی اقدامات پاسخ از قبل می‌تواند به عنوان بخشی از استراتژی‌های آمادگی فرض شود (Bešinović, 2020).

۲-٤- طبقه‌بندی مقالات تاب‌آوری

روش‌های مطالعه تاب‌آوری را می‌توان به دو دسته کیفی و کمی طبقه‌بندی کرد. در ارزیابی کیفی، معمولاً توسعه چارچوب‌های مفهومی و تعیین بهترین شیوه‌ها بدون ارزیابی‌های کمی در نظر گرفته می‌شود (Armstrong, Preston & Hood, 2016; Siegel & Schraagen, 2017). تحقیقات کیفی در مورد تاثیرات تاب‌آوری بر جنبه‌های فردی انسانی مانند حجم کار، استرس و جنبه‌های سازمانی مانند تعامل تیمی و یادگیری از تجربه متمرکز است. تمرکز این مقاله بر روش‌های کمی تاب‌آوری شبکه‌های حمل‌ونقل ریلی است. در روش‌های کمی، می‌توان آن را بین دو دسته طبقه‌بندی بر اساس معیارها و رویکردهای مورد استفاده تمایز داد. جدول ۲، یک نمای کلی از تحقیقات موردنظر را ارائه می‌دهد که بر اساس معیارها و رویکرد طبقه‌بندی شده‌اند و نمونه‌هایی را بیان می‌کند. علاوه بر این، کاربرد ارزیابی تاب‌آوری را می‌توان بین شبکه گسترده و سناریو خاص متمایز کرد. مطالعات گسترده شبکه، ارزیابی سیستم را بر روی تمام سناریوهای اختلال یا مجموعه‌ای از مرتبط‌ترین سناریوها در نظر می‌گیرد.

رویکردهای سناریو خاص با ارزیابی تاب‌آوری در برابر یک سناریوی اختلال خاص سروکار دارند (Lo, Sehic & Meijer, 2017; Siegel & Schraagen, 2017).

جدول۲. دسته‌بندی تحقیقات در زمینه تاب‌آوری در سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی به همراه معیارها و رویکردهای آن

ردیف	معیار	رویکرد	مثال	منابع
۱	**ساختاری**	**ساختاری**	۱- ارزیابی گسترده شبکه از ۳۰ شبکه مترو در سراسر جهان ۲- بهبودی پس از یک اختلال کوتاه در متروی لندن ۳- ارزیابی تاب‌آوری شبکه متروی شانگهای	Derrible & Kennedy, 2010a Derrible & Kennedy, 2010b D'Lima & Medda, 2015 Wang et al., 2017 Saadat et al., 2018 Zhang et al., 2018 Candelieri et al., 2019
۲	**مبتنی بر سیستم**	**داده‌محور**	۱- اثرات طوفان سندی در متروی نیویورک ۲- اثرات زمین‌لرزه در راه‌آهن پرسرعت ژاپن ۳- اثرات افزایش سطح دریا بر زیرساخت‌های حمل‌ونقل ریلی انگلستان ٤- خرابی‌های مرتبط با گرما در شبکه راه‌آهن انگلستان ۵- اندازه‌گیری تاب‌آوری سیستم حمل‌ونقل ریلی نسبت به اختلالات آب و هوایی ٦- مدل‌سازی تاب‌آوری شبکه‌های حمل‌ونقل ریلی مسافری تحت تأثیر رویدادهای مخرب در مقیاس بزرگ	Dawson, Shaw & Gehrels, 2016 Ferranti et al., 2016 Zhu et al., 2016 Chan & Schofer, 2016 Janić et al., 2018 Mudigonda, Ozbay & Bartin, 2019 Chen & Wang, 2019 Diab & Shalaby, 2020 Zhang, Xu & Ouyang, 2024
۳	**مبتنی بر سیستم**	**ساختاری**	۱- ارزیابی خرابی‌ها در شبکه راه‌آهن سوئیس ۲- ارزیابی تاب‌آوری سیستم‌های حمل‌ونقل در صورت وقوع حوادث فاجعه بار در مقیاس بزرگ ۳- تعیین آسیب‌پذیری شبکه‌های حمل‌ونقل عمومی	Dorbritz, 2011 Rodríguez-Núñez, & García Palomares, 2014
٤	**مبتنی بر سیستم**	**شبیه‌سازی**	۱- برآورد هزینه‌های اختلال در مترو استکهلم ۲- اثرات سیل در راه‌آهن سریع‌السیر چین ۳- تجزیه و تحلیل آسیب‌پذیری پویای شبکه‌های حمل‌ونقل عمومی ٤- شبیه‌سازی و کمی‌سازی شاخص‌های تاب‌آوری در یک سیستم حمل‌ونقل عمومی	Cats & Jenelius, 2014 Hong et al., 2015 Zilko, Kurowicka & Goverde, 2016 Yap et al., 2018 Meesit, Andrews & Remenyte Prescott, 2019
۵	**مبتنی بر سیستم**	**بهینه‌سازی**	۱- تجزیه و تحلیل شبکه گسترده راه‌آهن باری ایالات متحده ۲- اختصاص قطارهای امدادی برای اختلالات شدید در شبکه ریلی ایران ۳- بازیابی مسافرمحور در شبکه راه‌آهن هلند و مترو شانگهای ٤- طراحی جدول زمانی جایگزین برای اختلالات برنامه ریزی شده ۵- برنامه‌ریزی خدمات تعویض اتوبوس برای خطوط راه‌آهن شهری در بوستون (ایالات متحده) و لیورپول (بریتانیا)	Peterson & Church, 2008 Chen & Miller-Hooks, 2012 Gedik et al., 2014 Khaled et al., 2015 Veelenturf et al., 2016 Bababeik et al., 2017 Bababeik, Khademi & Chen, 2018 Meesit & Andrews, 2019 Szymula & Bešinović, 2020

۳- اندازه‌گیری تاب‌آوری در سیستم حمل‌ونقل ریلی

در این بخش به بررسی معیارهایی برای ارزیابی تاب‌آوری سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی پرداخته خواهد شد. معیارهای تاب‌آوری به دو دسته کلی ساختاری و مبتنی بر سیستم تقسیم‌بندی می‌شوند. بطور کلی، معیارهای ساختاری از تئوری شبکه‌های پیچیده نشأت می‌گیرد. . روش رایج، بررسی ساختاری شبکه است که ویژگی‌های ساختاری آن را ارزیابی کرده و با فرض شکست یک جزء در شبکه مختل شده و در عین حال ویژگی‌های پویای سیستم را نادیده می‌گیرد. به طور معمول، معیارهای شناخته شده مبتنی بر شبکه برای تفسیر تاب‌آوری مورد استفاده قرار می‌گیرند (Mattsson & Jenelius, 2015; Zhou, Wang & Yang, 2019). در زمینه معیارهای ساختاری، عموما اندازه‌گیری‌ها مستقل از خدمات استفاده شده در شبکه می‌باشد. محققان از چندین معیار

استفاده کرده‌اند که بر مسیرهای جایگزین و همچنین طول مسیرها متمرکز است. در این زمینه، محققان تاب‌آوری یک گره در شبکه زیرساخت را به عنوان مجموع وزن‌دار تمام مسیرهای مستقل قابل‌اعتماد تمام گره‌ها در شبکه تعریف کردند. همچنین برخی دیگر از محققان، از گراف‌های متغیر زمانی برای یکپارچه‌سازی وابستگی زمانی سیستم استفاده کرده‌اند (Cats & Jenelius, 2014; Wang et al., 2017; Lam & Tai, 2012).

همچنین معیارهای مبتنی بر سیستم، توجه بیشتری را در تحقیقات به خود جلب کرده‌اند. زیرا این معیارها، بر محدودیت روش‌های ساختاری غلبه کرده و عرضه و تقاضای سیستم و همچنین پاسخ به اختلالات و بازیابی از آن را نشان می‌دهد. در سیستم‌های راه‌آهن باری، هزینه‌های عمومی کلی، اغلب استفاده شده و شامل هزینه‌های تغییر مسیر و تأخیر قطارها، ارسال مجدد کالاها به دلیل بروز اختلالات و به حداکثر رسانیدن ظرفیت و توان در یک شبکه حمل‌ونقل باری می‌شود. همچنین، ممکن است شامل هزینه حمل‌ونقل و تغییر مسیر واگن‌های راه‌آهن، هزینه مسیرهای استفاده شده در بخش‌های خدمات در حین ایجاد اختلال، سناریوهای تعمیر، هزینه ثابت ارائه خدمات قطارهای مختلف و هزینه تعمیر بخش‌های خدمات در حین ایجاد اختلال باشد (Khaled et al., 2015; Chen & Miller-Hooks, 2012; Azad, Hassini & Verma, 2016).

در شبکه‌های راه‌آهن مسافری، عملکرد بر اساس تطبیق خدمات قطار و یا ایجاد ناراحتی برای مسافران ارزیابی شده است و با تمرکز بر مطالعات ظرفیت باقی‌مانده حمل‌ونقل و خدمات جانبی و تأخیر طولانی اپراتورهای راه‌آهن مسافری اعمال شده است. همچنین میزان تاب‌آوری حمل‌ونقل ریلی در تعداد روزها و تغییر در زمان سفر اندازه‌گیری شده است. برخی مطالعات با مجموع مدت زمان اختلال سالانه بخش‌های مسیر راه‌آهن و به طور مشابه، با تعیین فراوانی و مدت زمان اختلالات در هر کیلومتر، فصل و نوع مسیر، تاب‌آوری را اندازه‌گیری کرده‌اند (Hirai et al., 2009; Janić, 2015; Zhu & Goverde, 2017; Yap et al., 2018; Mudigonda, Ozbay & Bartin, 2019; Diab & Shalaby, 2020).

تحقیقاتی با تمرکز بر فرصت‌های از دست رفته برای خدمت‌رسانی به مشتریان در خلال اختلالات، با رویکرد اقتصادی بر اساس توانایی جابه‌جایی افراد در مسافت (که بستگی به وسایل حمل‌ونقل موجود، مسیرها، پرسنل و انرژی دارد)، صورت گرفته است. ورود و خروج مسافران از ایستگاه‌های مترو از طریق دروازه‌های انتقال مسافر، یکی از عوامل اساسی در تعیین تعداد مسافران است. اما رخداد مشکلات در ورود و خروج به این دروازه‌ها می‌تواند باعث کاهش تعداد مسافران و در نتیجه کاهش تردد مسافران می‌گردد که نهایتا کاهش تولید ناخالص داخلی را به دنبال دارد. بنابراین، وقوع مشکلات فنی یا ناکارآمدی در دروازه‌ها می‌تواند باعث ایجاد مشکلات برای مسافران و کاهش تعداد سفرهای آنان شود. بنابراین، حفظ دسترسی به دروازه‌های انتقال مسافر برای تضمین تردد مسافران و حفظ تولید ناخالص داخلی بسیار حیاتی است (Chan & Schofer, 2016; Zhu et al., 2016; Zhu & Goverde, 2017; Janić, 2015).

٤- رویکردهای کمی‌سازی تاب‌آوری در سیستم حمل‌ونقل ریلی

در این بخش، به بررسی روش‌های تخمین تاب‌آوری سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی پرداخته خواهد شد. بر اساس دسته‌بندی صورت‌گرفته در جدول ۲، رویکردهای بررسی تاب‌آوری در سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی به چهار دسته ساختاری، داده‌محور، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی تقسیم‌بندی می‌گردد. در این بخش تمامی این رویکردها در مطالعات مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

٤-۱- رویکرد داده‌محور

روش‌های مبتنی بر داده، به‌جای مدل‌سازی مکانیسم‌های ذاتی سیستم، مستقیماً به داده‌های تاریخی ثبت‌شده نگاه کرده که می‌تواند منعکس‌کننده تغییر عملکرد سیستم در سناریوهای مختلف برای ارزیابی ویژگی‌های سیستم باشد. علاوه بر این، روش‌های آماری (مانند آمار توصیفی و مدل‌های آماری) ممکن است قبل از استفاده به عنوان شاخص عملکرد برای پردازش داده‌ها استفاده شده باشد. با پیشرفت جمع‌آوری و ذخیره‌سازی داده‌ها، روش‌های مبتنی بر داده در حوزه‌های مختلف رایج شده‌اند و معمولاً برای ارزیابی اثرات پس از اختلالات استفاده می‌شوند. متداول‌ترین داده‌های مورد استفاده، داده‌های تاریخی تحقق ترافیک، داده‌های مسافران سواری و داده‌های مربوط به آب و هوا هستند. تاکنون، محققان

بیشتر بر روی مطالعات با سناریوهای خاص تمرکز کرده‌اند و به اختلالات و بلایای مرتبط با آب و هوا در شبکه‌های راه‌آهن مانند زلزله، طوفان، برف و بارندگی و رویدادهای تغییرات آب و هوایی مانند افزایش سطح دریا و افزایش گرما متمرکز بوده‌اند. مطالعات صورت‌گرفته، اغلب توزیع زمانی و مکانی اختلالات و همچنین تغییرات مکانی-زمانی رفتار بازیابی سیستم را تخمین می‌زنند (Janić et al., 2018; Chan & Schofer, 2016; Mudigonda, Ozbay & Bartin, 2019; Zhu et al., 2016; Zhu & Goverde, 2017; Diab & Shalaby, 2020; Dawson, Shaw & Gehrels, 2016; Ferranti et al., 2016). محققان مدل‌هایی را برای ارزیابی تاب‌آوری یک شبکه ریلی، قبل، در طول و بعد از رویدادهای مخرب و برآورد شاخص‌های عملکرد خاص به عنوان ارقام شایستگی برای ارزیابی انعطاف‌پذیری شبکه پیشنهاد کردند. برخی دیگر از محققان، از میلیون‌ها سوابق فردی سفرهای مترو در هرماه برای تجزیه و تحلیل تاب‌آوری سفرهای مترو در برابر طوفان‌های سندی و آیرین و تخمین منحنی‌های تاب‌آوری برای هر دسته منطقه تخلیه برای مدلسازی الگوهای بازیابی وابسته به زمان سیستم‌های جاده‌ای و مترویی مورد استفاده قرار دادند. همچنین برخی دیگر از محققان، اثر بخشی بخش‌های مسیرهای باز در سیستم مترو و شرایط آب و هوا بر تعداد اختلالات خدمات و مقدار تأخیرهای ناشی از آنها را مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند که مستقل از فصول سال، بخش‌های باز تا چهار برابر آسیب‌پذیرتر در معرض اختلال هستند. همچنین تحقیقاتی در مورد اثرات افزایش سطح آب دریا در عملکرد بخشی از راه‌آهن لندن به پنزانس صورت گرفته است. در این مورد محققان رابطه‌ای بین تغییر سطح آب دریا و اختلالات ریلی شناسایی کردند و سپس از پیش‌بینی‌های مبتنی بر مدل برای تخمین این رابطه در آینده استفاده کردند. همچنین محققان در این خصوص دریافتند که تا سال ۲۱۰۰ میلادی (در صورتی که میزان افزایش سطح آب دریا بالا باشد)، این خط ممکن است با محدودیت‌هایی به میزان ۸٤ الی ۱۲۰ روز در سال (تا ۱۱۷۰ درصد) افزایش یابد. همچنین تحقیقات تاب‌آوری در بخش شکست زیرساخت‌های ریلی (ریل و پابند و ادوات مربوطه) صورت گرفت و نشان داده شد که در صورت دریافت اطلاعات شکست و جایگزینی تجهیزات شکست‌خورده، سیستم زیرساخت ریلی در آن منطقه خاص برای باقیمانده سال در آن دما مقاوم می‌شود (Janić et al., 2018; Zhu et al., 2016; Zhu & Goverde, 2017; Diab & Shalaby, 2020; Dawson, Shaw & Gehrels, 2016; Ferranti et al., 2016).

٤-۲- رویکرد ساختاری

رویکردهای ساختاری از معیارهای توسعه‌یافته در نظریه شبکه پیچیده استفاده کرده‌اند که بر اساس ویژگی‌های ساختاری و اغلب ارزیابی‌های شبکه را انجام می‌دهند. سپس این معیارها بر روی نمایش‌های گرافی مختلف اعمال می‌شوند و عمدتا زیرساخت یا شبکه خدمات را مدلسازی می‌کنند. به طور معمول، رویکردهای ساختاری برای ارزیابی تاب‌آوری شبکه‌های راه‌آهن، مراحلی را دنبال می‌کنند. برای یک شبکه حمل‌ونقل داده شده، پیوندها به طور تصادفی یا به دنبال یک استراتژی خاص حذف می‌شوند. در حین انجام این کار، تکامل معیارها رصد می‌شود و تاب‌آوری تجزیه و تحلیل می‌شود. این موضوع، نشان‌دهنده رویکرد تکمیلی است و در نتیجه منجر به تعیین عناصر بحرانی در شبکه می‌شود. اکثر مطالعات یک پیوند را در هر زمان در نظر گرفته‌اند. همچنین، رویکردهای ساختاری بیشتر بر روی شبکه‌های مترو اعمال شده‌اند. تحقیقاتی در مورد اندازه‌گیری تاب‌آوری سی شبکه مترو در سراسر جهان انجام شده است (Mattsson & Jenelius, 2015; Dorbritz, 2011; Wang et al., 2017).

رویکردهای ساختاری، بیشتر برای برآورد جنبه‌های تاب‌آوری شبکه‌ها در سیستم حمل‌ونقل ریلی استفاده شده است. شبکه‌های حمل‌ونقل ریلی دارای ویژگی‌های ساختاری بدون مقیاس هستند. این موضوع بدان معنی است که این شبکه‌ها در برابر شکست و حذف عناصر شبکه که به طور تصادفی انتخاب شده‌اند، قوی هستند. به طور همزمان، آن‌ها نسبت به خرابی‌های طراحی شده‌ی عناصر خاص شبکه، بسیار حساس هستند. در این خصوص، محققان پیشنهاد کرده‌اند که تاب‌آوری سیستم‌های مترو با تعداد مسیرهای چرخه‌ای موجود در شبکه مطابقت دارد که نشان‌دهنده امکان استفاده از مسیرهای جایگزین تحت اختلال است. همچنین برخی دیگر از محققین، مسیرهای جایگزین ایجاد کرده‌اند و چندین معیار مانند میزان کیلومترهای اضافه مسیر استفاده شده یا تعداد وسایل نقلیه مورد نیاز برای اجرای همه خطوط را ارزیابی کردند (Derrible & Kennedy, 2010a, Derrible & Kennedy, 2010b; Dorbritz, 2011).

تحقیقاتی در جهت یکپارچه‌سازی ویژگی‌های پویای سیستم حمل‌ونقل ریلی صورت گرفته که گراف‌های متغیر زمانی برای یکپارچه‌سازی وابستگی‌های زمانی در معیارهای تاب‌آوری استفاده شدند و تأثیر مدت اختلال مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در این مطالعه، معیارهای استاتیک و پویا مورد مقایسه قرار گرفته شده و در نتیجه در شرایط عادی ترافیک در شبکه، عملکردهای حاصل تقریباً یکسان مشاهده شدند. اما هنگامی که یک اختلال رخ می‌دهد، تعاملات متقابل و جریان مسافر در شبکه باعث کاهش کارایی شاخص استاتیک می‌شود و نیاز است که استراتژی‌های بازیابی با تاکید بر بعد زمانی در نظر گرفته شود. علاوه بر این، هنگامی که جنبه‌های عملیاتی در نظر گرفته می‌شود، ممکن است اهمیت برخی از گره‌ها به گونه‌ای تغییر کند که برخی از ایستگاه‌ها برای عملیاتی که لزوماً برای شبکه زیرساختی مهم نیستند، اهمیت پیدا کند (Lu, 2018; Dorbritz, 2011). همچنین کاربردهای جایگزینی مانند استفاده از یک مدل تصادفی متوازن جهت اندازه‌گیری پاسخ سیستم به شوک‌های اختلال‌آور و استفاده از مدل تخصیص سفر با تمرکز بر افزایش زمان سفر مسافر و تقاضای مسافر ناراضی استفاده گردید. در مواردی که چندین عنصر در شبکه مختل می‌شود، بهترین استراتژی‌های بازیابی با حداقل هزینه می‌تواند تعیین شود (D'Lima & Medda, 2015; Zhang et al., 2018; Saadat et al., 2018).

٤-۳- رویکرد شبیه‌سازی

رویکردها و مدل‌های شبیه‌سازی معمولا مشابه رویکردهای ساختاری هستند، اما همزمان از شاخص‌های سیستم و عملکرد (مانند تأخیر و بار مسافر) برای ارزیابی عملکرد شبکه در محیط تصادفی استفاده می‌کنند. به طور معمول، شبیه‌سازی ارزیابی تاب‌آوری را بر اساس توزیع‌های اختلالات نظری و واقعی مورد استفاده قرار داده و واکنش‌های شبکه را مدل‌سازی می‌کند. در این خصوص، شناسایی تاب‌آوری ارتباطات از منظر مسافران، ارزیابی عملکرد شبکه با استفاده از یک شبیه‌سازی رویداد گسسته و ارزیابی تعاملات عرضه-تقاضا در یک محیط تصادفی پویا با فرض سناریوهای خاص اختلال از جمله تحقیقاتی است که می‌توان به آن اشاره کرد. نتایج یک تحقیق نشان می‌دهد که بخش‌های تقاطعات و شلوغ شبکه مترو به دلیل قرار گرفتن در معرض اختلالات نسبتاً زیاد و جریان زیاد مسافر بسیار آسیب‌پذیر هستند.

علاوه بر این، برخی محققان میزان ارزشمندی ارائه اطلاعات در زمان واقعی (از طریق نمایشگر در تمامی ایستگاه‌ها) برای کاهش تأثیرات اختلالات را تخمین زده‌اند (Yap et al., 2018; Meesit, Andrews & Remenyte Prescott, 2019; Cats & Jenelius, 2014). مطالعات موردی نیز در رویکردهای شبیه‌سازی صورت گرفته است. اقتصاد چین و نیازهای سفر شهروندانش به طور قابل‌توجهی به خدمات پیوسته و قابل اعتماد ارائه شده توسط سیستم راه‌آهن آن وابسته است. با این حال، این سیستم به خطرات طبیعی فراوانی همچون سیل، زلزله و لغزش خاک و سنگ روبرو است. از این رو، یک مکانیزم برای ارزیابی تاب‌آوری سیستم راه‌آهن تحت این خطرات و طراحی استراتژی‌های موثر برای کاهش آسیب‌پذیری و بهبود عملکرد قابل اعتماد سیستم راه‌آهن ضروری است. در یک مطالعه، یک روش جامعی برای ارزیابی کمی آسیب‌پذیری سیستم راه‌آهن با ایجاد اختلالاتی همچون سیل با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده و فناوری سیستم اطلاعات جغرافیایی پیشنهاد می‌دهد. روش پیشنهادی شامل نمایش شبکه از سیستم راه‌آهن، ایجاد سناریوهای رویداد سیل، روشی برای تخمین آسیب‌پذیری راه‌آهن و یک رویکرد محاسبه مقدار آسیب‌پذیری کمی است. آسیب‌پذیری سیستم راه‌آهن از نظر قطع خدمات آن، مربوط به تعداد قطارهای متوقف شده و مدت زمان قطع خدمات ارزیابی می‌شود. در این مطالعه، یک استراتژی نگهداری برای کاهش آسیب‌پذیری در سیستم راه‌آهن پیشنهاد شده است (Hong et al., 2015).

٤-٤- رویکرد بهینه‌سازی

برای ارزیابی تاب‌آوری شبکه حمل‌ونقل ریلی، از مدل‌های بهینه‌سازی ریاضی نیز در تحقیقات استفاده شده است. علاوه بر این، تعداد زیادی از تحقیقات با استفاده از هر دو رویکرد شبکه گسترده و سناریو خاص انجام شده است. در رویکردهای بهینه‌سازی شبکه‌ای، تمرکز تحقیقات بر روی اندازه‌گیری یا بهبود تاب‌آوری شبکه قرار گرفته است. مطالعات مربوط به اندازه‌گیری تاب‌آوری، عمدتاً بر تعیین مهم‌ترین عناصر شبکه تمرکز داشته است. همچنین بیشتر مقالات، به یک جنبه از تاب‌آوری، یعنی آسیب‌پذیری پرداخته‌اند.

این در حالی است که تعداد کمی از تحقیقات بر مبحث بازیابی تأکید دارند (Chen & Miller-Hooks, 2012; Gedik et al., 2014; Khaled et al., 2015; Peterson & Church, 2008; Szymula & Bešinović, 2020; Whitman et al., 2017; Chen & Miller-Hooks, 2012).

مدل‌های مختلفی را می‌توان برای مدل‌سازی شبکه راه‌آهن و خدمات و اختلالات آن یافت. در یک تحقیق، از یک مدل جریان چند کالایی[۲] برای ارزیابی شبکه راه‌آهن باری قبل و بعد از حذف پیوندهای منفرد برای ارزیابی تاب‌آوری و آسیب‌پذیری شبکه در مورد ظرفیت‌های پیوند استفاده کرد. محققان، یک مدلی را معرفی کردند و از فرمول شبکه پویا با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت و تراکم استفاده کردند. همچنین محققان، مدلی را پیشنهاد کردند که فرمولاسیون مبتنی بر قوس و مسیر را برای تعیین پیوندهایی که بیشترین پیامدهای نامطلوب را برای مسافران و قطارها ایجاد می‌کنند، ترکیب می‌کند. برخی دیگر از محققان، یک برنامه عدد صحیح مختلط تصادفی را برای کمی‌سازی تاب‌آوری شبکه ریلی و شناسایی اقدامات بهینه پس از رویداد را پیشنهاد کرده‌اند (Peterson & Church, 2008; Whitman et al., 2017; Gedik et al., 2014; Szymula & Bešinović, 2020; Miller-Hooks, 2012).

همچنین محققان یک چارچوب دفاعی و تهاجمی اپراتور سه سطحی را توسعه داده‌اند تا حملات متقابل بر روی چندین شبکه و واکنش‌های دفاعی از یک حمله‌کننده و دفاع‌کننده در شبکه را مدل‌سازی کند. به طور خاص، محققان از یک مدل خاص تغییریافته برای تخصیص منابع امنیتی و یک رویکرد مسئله طراحی شبکه[۳] برای مدل‌سازی تغییرات در شبکه استفاده کرد. تعداد دیگری از محققان، بهینه‌سازی و نظریه بازی را ترکیب کردند تا یک مسئله تخصیص منابع دفاعی محدود به پیوندهای زیرساختی شبکه سریع را معرفی کنند. در یک تحقیق، مکان و تخصیص بهینه قطارهای امدادی[٤] را برای افزایش سطح تاب‌آوری شبکه ریلی را مورد بررسی قرار داده است. برخلاف رویکردهای احتمالی، اولویت تقاضا با معیار قرار گرفتن در معرض پیوند که ویژگی‌های عملیاتی پیوندها و دسترسی به سیستم جاده را در نظر می‌گیرد، انجام می‌شود. مدل پیشنهادی با استفاده از یک برنامه‌نویسی دوهدفه فرموله شده و با استفاده از یک روش محدودیت الکترونیکی تقویت‌شده[٥] همراه با یک رویکرد منطق فازی حل می‌گردد. چارچوب پیشنهادی برای یک مطالعه موردی در دنیای واقعی استفاده می‌شود و نتایج تحلیل، برتری مدل پیشنهادی را در ارائه یک طرح اقتصادی و موثر در مقایسه با مدل پوشش حداکثر معمولی نشان می‌دهد (Babick, 2019; Fiondella et al., 2015; Bababeik, Khademi & Chen, 2018).

در مدل‌های بهینه‌سازی شبکه وسیع، اغلب یکی از نتایج اضافی آن، تعیین یک سرویس قطار جایگزین در هنگام اختلالات می‌باشد. به عبارت دیگر، یک جدول زمانی جایگزین که شامل زمان‌بندی مجدد قطارها، مسافران، ارسال مجدد کالاها از گره‌های مبدأ و استفاده از خدمات قطارهای شخص ثالث می‌شود. همچنین برخی از محققان، در نظر گرفتن لغو قطارها در شبکه‌های پر مسافر را پیشنهاد کرده‌اند؛ این درحالی است که برخی دیگر از محققان، تعمیر قطعات ریلی مختل شده را چاره کار دانسته‌اند (Chen & Miller-Hooks, 2012; Khaled et al., 2015; Szymula & Bešinović, 2020; Azad, Hassini & Verma, 2016).

مدل‌های بهینه‌سازی شبکه‌ای به عنوان یکی از موضوعات مهم در زمینه تحقیقات علوم کامپیوتر و مهندسی شناخته می‌شوند. این مدل‌ها به منظور بهبود کارایی و کاهش هزینه‌ها به تحلیل و بهینه‌سازی عملکرد شبکه‌ها می‌پردازند. یکی از جنبه‌های مهمی که در این مدل‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد، آسیب‌پذیری و بازیابی شبکه است. تحقیقات در این حوزه به بررسی موضوعات مختلفی از جمله بازیابی، آمادگی، کاهش و بازیابی توجه دارند. علاوه بر این، بررسی عملکرد شبکه‌ها در مواجهه با قطعی پیوند یا گره نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تحقیقات اخیر نشان داده است که مدل‌های بهینه‌سازی شبکه‌ای بر روی قطع‌شدگی‌های همزمان چندگانه نیز تمرکز دارند. علاوه بر این، شبکه‌های راه‌آهن باری و مسافری نیز از جمله حوزه‌های مورد توجه در این تحقیقات هستند. برای حل مدل‌های بهینه‌سازی، محققان از رویکردهای ترکیبی استفاده می‌کنند که شامل محدودیت الکترونیکی تقویت شده، منطق فازی، تولید ستون و تولید ردیف با برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط و رویکردهای فراابتکاری مانند الگوریتم‌های ژنتیک می‌باشد. با توجه به اینکه بیشتر تحقیقات انجام شده در این حوزه در آمریکا صورت گرفته است و حمل‌ونقل بار در این کشور به مقدار بیشتری نسبت به حمل‌ونقل مسافری اهمیت دارد، تحقیقات بیشتری بر روی انعطاف‌پذیری راه‌آهن باری صورت

گرفته است. به طور کلی، مدل‌های بهینه‌سازی شبکه‌ای نقش مهمی در بهبود عملکرد و کارایی شبکه‌ها دارند و تحقیقات در این حوزه همچنان ادامه دارد تا روش‌های بهتر و کاراتری برای بهینه‌سازی شبکه‌ها ارائه شود (Babick, 2019; Azad, Hassini & Verma, 2016; Gedik et al., 2014; Fiondella et al., 2015). رویکردهای بهینه‌سازی وابسته به سناریو معمولاً بر اقدامات بهینه‌سازی ترافیک و برنامه‌ریزی مجدد برای یک سناریوی اختلال خاص تمرکز دارند که شامل یک یا چند اختلال به منظور کاهش تأثیر بر قطارها و یا مسافران از نظر تأخیر و یا لغو آن‌ها است. این مطالعات وابسته به سناریو نیز در ادبیات فنی به نام مدیریت اختلال شناخته می‌شوند. اقدامات معمول برنامه‌ریزی مجدد در زمان اختلالات ریلی شامل تغییر زمان‌بندی، تغییر ترتیب، تغییر مسیر و لغو و همچنین عدم توقف و اضافه کردن ایستگاه می‌توان یافت (Bešinović, 2020).

بطور کلی مطالعات خاص، چندین جنبه از تاب‌آوری از جمله بقاء، پاسخ و بازیابی را پوشش داده‌اند. به این معنی که اقدامات تغییر زمان‌بندی از زمان شروع اختلال تا بازگشت به وضعیت اولیه را در نظر گرفتند. به عنوان یک الگوی دیگر، برخی از تحقیقات به طور انحصاری بر روی بازیابی (بررسی بهترین استراتژی‌های ورود مجدد خدمات لغو شده به شبکه پس از اتمام یک اختلال) تمرکز داشته‌اند. اکثر تحقیقات، تنظیمات در خطوط راه‌آهن و شبکه را مورد بررسی قرار دادند، در حالی که قائمی و همکارانش به تنظیم مجدد و تغییر مسیر قطارها پرداخته‌اند. به منظور تضمین ارائه زمان‌بندی قابل اجرا، مدل‌های بهینه‌سازی ممکن است نیازمند در نظر گرفتن چرخه قطارها باشد (van Lieshout Bouman & Huisman, 2018; Zhu & Goverde, 2019; Veelenturf et al., 2016; Bešinović, 2020). بطور کلی اختلالات بزرگ در شبکه راه‌آهن، وضعیتی نزدیک به عدم کنترل را ناشی می‌گردد؛ به طوری که به دلیل کمبود اطلاعات دقیق موجود برای ارسال قطارها، هیچ قطاری قادر به حرکت نیست. در یک مطالعه، استراتژی‌های مدیریت اختلال برای مقابله با این وضعیت‌ها توسعه و آزمایش شده‌اند. ابتدا، الگوریتمی پیشنهاد شد که یک طرح خط جایگزین را پیدا می‌کند و می‌تواند در بخش تحت تأثیر شبکه راه‌آهن عملیاتی شود. زیرا طرح خط باید قابل انجام باشد و از نظر محدودیت‌های زیرساختی و منابع، این جنبه‌ها به شیوه‌ای خاص در الگوریتم یکپارچه قرار داده می‌شود. برای عملکرد سیستم راه‌آهن در منطقه مختل شده، چندین استراتژی ارسال قطار محلی پیشنهاد می‌گردد که نیازمند تاب‌آوری و هماهنگی متفاوتی هستند. آزمایش‌های محاسباتی بر اساس اختلالات در شبکه راه‌آهن هلند نشان می‌دهد که چنین الگوریتمی، عملکرد خوبی را از خود نشان می‌دهد و طرح‌های خط قابل کار و متمرکز بر مسافر را در چند دقیقه پیدا می‌کند (van Lieshout Bouman & Huisman, 2018). درک تأثیر تصمیمات تغییر زمان‌بندی به ویژه در شبکه‌های مسافری ریلی کشورهای سوئیس و هلند و همچنین خطوط متروی پرجمعیت مانند پکن، لندن، نیویورک و توکیو از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این راستا در یک مطالعه، مدل‌سازی تخصیص مسافر برای برآورد تقاضای وابسته به زمان انجام شده است. علاوه بر این برای پیشگیری از تراکم مسافران در خطوط مترو، مدیریت اختلال یکپارچه برای کنترل همزمان خدمات قطارها و جریان مسافران و به عبارت دیگر جلوگیری از انباشت مسافران در ایستگاه‌ها با کنترل و محدود کردن ورود مسافران در دروازه‌های ایستگاه مدنظر قرار گرفته است. در این راستا، یک مطالعه موردی برای صدها سناریوی اختلال در یک زیرشبکه از راه‌آهن هلند انجام شده است. در این مطالعه مشخص شده است که استفاده ترکیبی از توقف‌های انعطاف‌پذیر و نقطه‌های نهایی انعطاف‌پذیر، منجر به کاهش تاخیرات در حمل مسافران می‌شود. همچنین کوتاه کردن مدت بازیابی، پیامدهای پس از اختلال را با انتشار تاخیر کمتر کاهش می‌دهد، اما هزینه‌های توقف بیشتری از خدمات قطار در طول اختلال را به همراه دارد. همچنین راه‌حل بهینه زمان‌بندی مجدد نسبت به مدت‌زمان اختلال حساس است، اما برخی رفتارهای ثابت زمانی مشاهده می‌شود که مدت زمان اختلال با زمان چرخه جدول زمانی افزایش می‌یابد (Zhu & Goverde, 2019; Bešinović et al., 2019). در زمان نگهداری برنامه‌ریزی شده، به عنوان مثال کارهای ساخت و نگهداری خطوط ریلی، زیرساخت‌ها از دسترس خارج می‌شود و بنابراین برنامه‌های زمانبندی شده نمی‌توانند بدون وقفه اجرا شوند. برای پاسخگویی بهینه به این اختلالات برنامه‌ریزی شده، خدمات راه‌آهن مسافری باید تنظیم و تعدیل شوند تا با کمینه کردن تأخیرها، لغوها و تغییرات مسیرهای کوتاه، از آن‌ها به بهترین نحو استفاده شود. علاوه بر این، تنظیم همزمان زمانبندی شبکه و مسیردهی قطار در

ایستگاه‌ها می‌تواند راه‌حل‌های عملی را ایجاد کند. این خدمات جایگزین به عنوان طرح‌های تدابیر اضطراری شناخته می‌گردد که می‌تواند به عنوان یک استراتژی پاسخ به هنگام ایجاد یک اختلال خاص اعمال شود. همچنین، به منظور کمینه کردن تأثیرات یک اختلال، چندین مطالعه پیشنهاد داده‌اند که ادغام خدمات اتوبوس به عنوان جایگزین‌های خدمات راه‌آهن در طول اختلالات برنامه‌ریزی شده و همچنین اختلالات غیربرنامه‌ریزی می‌تواند بسیار موثر باشد (Van, Bešinović & Goverde, 2017; Bešinović et al., 2019; Gu et al., 2017; Jin et al., 2014; Van et al., 2016; Meesit & Andrews, 2019).

به طور معمول، رویکردهای بهینه‌سازی مرتبط با سناریو بر اساس شبکه‌های رویداد–فعالیت مدل‌سازی شده‌اند که در آن رویدادها نشان‌دهنده ورود و خروج مسافران هستند و فعالیت‌ها نشان‌دهنده زمان‌های حرکت، توقف، برگشت و انتقال می‌باشند (Meesit & Andrews, 2019; Veelenturf et al., 2016; Zhu & Goverde, 2019).

در حال حاضر، بسیاری از مدل‌های بهینه‌سازی برای مدیریت اختلالات زمانی از اطلاعات دقیق و مشخص استفاده می‌کنند. اما یکی از چالش‌های اساسی در این زمینه، عدم قطعیت مدت اختلال است که می‌تواند باعث افزایش پیچیدگی و دشواری در پیش‌بینی و مدیریت این اختلالات شود. برای حل این چالش، محققان به دنبال روش‌هایی برای پیش‌بینی مدت اختلالات نامشخص هستند. یکی از روش‌های پیشنهادی برای این منظور، استفاده از شبکه بیزین کوپولا[6] است که به محققان این امکان را می‌دهد تا با ترکیب داده‌های مشاهداتی و اطلاعات احتمالی، مدت اختلال را به صورت دقیق‌تر پیش‌بینی کنند. استفاده از این روش‌های پیشرفته در مدیریت اختلالات زمانی، می‌تواند به بهبود عملکرد اختلالات در خطوط راه‌آهن کمک کند. در حوزه راه‌آهن، این پیش‌بینی‌ها می‌توانند به بهبود برنامه‌ریزی مسیر قطارها و کاهش تأخیر مسافران کمک شایانی کند. به طور کلی، تحقیقات در زمینه پیش‌بینی مدت اختلالات با استفاده از روش‌های پیشرفته، می‌تواند به بهبود کارایی و بهره‌وری سیستم‌ها کمک کند و نقطه عطفی مهم در توسعه فناوری‌های مدیریت اختلالات زمانی باشد (Meng & Zhou, 2011; Zilko, Kurowicka & Goverde, 2016; Ghaemi et al., 2018).

پیشنهادات جهت تحقیقات آتی

با توجه به بررسی ادبیات فنی ارائه شده در این مقاله، چند پیشنهاد برای تحقیقات آینده با توجه به خلاهای موجود در زمینه تاب‌آوری سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی شناسایی شده است که در ادامه به آن پرداخته می‌گردد. بیشتر تحقیقات فعلی، زمان‌های شناخته‌شده از اختلالات را پذیرفته‌اند. ارزش سرمایه‌گذاری در بهبود ساختاردهی، مستندسازی و ذخیره داده‌های مربوط به اختلالات و همچنین تحلیل آن با استفاده از برنامه‌های هوش مصنوعی برای استخراج اطلاعات از گزارش‌های فعلی اختلالات است. این کار به محققان این امکان را می‌دهد که طبیعت و احتمال وقوع را بررسی کند و اختلالات آینده را نیز پیش‌بینی کند (Zilko, Kurowicka & Goverde, 2016; Chen & Wang, 2019).

تعامل بین سیستم‌های حیاتی مانند آب، ارتباطات و حمل‌ونقل بایستی توسط رویکردهای چند رشته‌ای برای ارزیابی تاب‌آوری تعاملی بیشتر صورت گیرد. به این منظور، می‌توان انتظار داشت که منابع داده‌ها (مانند ترافیک، مسافر، آب و هوا و زلزله) و مدل‌های ریاضی (برای شبیه‌سازی ترافیک، زلزله، سیلاب و کولاک) را ترکیب شوند. این کار منجر به توسعه روش‌های ارزیابی چند رشته‌ای و سیستم‌های هشدار زود هنگام برای پیش‌بینی قطعیت‌ها و بروز فاجعه خواهد شد. همچنین در عمل، معمولاً اتصالات چندگانه در شبکه ریلی به طور همزمان به دلیل شکست عنصرهای داخلی یا پیامدهای آب و هوایی مخرب مانند سیل و طوفان قطع می‌شود. بنابراین، بایستی برای چنین مواردی تاب‌آوری ایجاد نمود و استراتژی‌هایی برای بازیابی قطعی‌های چندگانه و همچنین مقاومت و آماده‌سازی و پاسخ به قطعی‌های چندگانه شبکه ریلی تعیین کرد. بدین منظور، مدل‌های بهینه‌سازی به دلیل پیچیدگی ترکیبی و ترکیب عناصر حیاتی و استراتژی‌های عملیاتی جایگزین، به ویژه در شبکه‌های راه‌آهن با تراکم بالای جمعیت ضروری می‌شود. بیشتر تحقیقات مورد بررسی، بر روی بازیابی اختلالات و ارزیابی تاب‌آوری سیستم‌های راه‌آهن موجود تمرکز داشته‌اند. اما بایستی اهمیت بیشتری برای بهبود برنامه‌ریزی راه‌آهن برای توسعه خدماتی که در مقابل اختلالات آینده مقاوم و انعطاف‌پذیرتر باشند، داده شود. علاوه بر این، نیاز به مدل‌های جامع‌تری برای تاب‌آوری

در سراسر شبکه وجود دارد و قابلیت بقاء، هنوز به اندازه کافی مورد توجه قرار نگرفته است و بایستی توجه ویژه‌ای به آن‌ها داشت. همچنین با گسترش تاثیرات تغییرات آب و هوایی، انتظار می‌رود که مشکلات مربوط به آب و هوا افزایش یابد و پیامدهای آن ممکن است از چند روز تا چند هفته به طول بیانجامد. بنابراین، تحقیقات مربوط به آب و هوا بایستی در آینده بیشتر مورد توجه قرار گیرد. در این راستا، باید تطبیقات و بهبودهای زیرساختی را بررسی مورد مطالعه قرار داده و همچنین تیم‌های نجات و استراتژی‌های تخلیه و جایگزین را تخصیص داد. در انجام این کار، معیارهای تاب‌آوری بایستی مناسب باشند تا تاثیرات کلی بر تقاضای حمل‌ونقل را اندازه‌گیری کند.

در نهایت، تحقیقات در زمینه تاب‌آوری، بیشتر بر ارزیابی و بهینه‌سازی استفاده از منابع تمرکز داشته و تحقیقات محدودتری به مرکز تقاضا اختصاص یافته است. همچنین رفتار تقاضا، معمولا یکنواخت در نظر گرفته شده و انتظار می‌رود همه به یک شکل رفتار کنند. علاوه بر این، در هنگام رخداد اختلالات و فاجعه‌ها، افراد ممکن است به راهبردهای تاب‌آوری مورد نظر به طرز مختلفی واکنش نشان دهند. در این خصوص، بایستی تحقیقات بیشتری بر روی مرکز تقاضا و تاب‌آوری جامعه در آینده در نظر گرفته شود.

۵-نتیجه‌گیری

شبکه‌های زیرساختی حیاتی، مانند شبکه‌های حمل‌ونقل، برای عملکرد یک جامعه و اقتصاد ضروری هستند. افزایش تقاضای حمل‌ونقل، ازدحام را در شبکه‌های راه‌آهن افزایش داده و در نتیجه آن‌ها به یکدیگر وابسته‌تر و عملیات پیچیده‌تر می‌شوند. همچنین، افزایش تعداد اختلالات ناشی از خرابی سیستم حمل‌ونقل ریلی و همچنین تغییرات آب و هوایی در آینده قابل‌انتظار است. در نتیجه، بسیاری از قطارها لغو شده و بیش از حد با تأخیر مواجه می‌شوند. بنابراین، بسیاری از مسافران به مقصد خود نمی‌رسند که نیاز مشتریان برای جابجایی را به خطر می‌اندازد. در حال حاضر، نیاز فزاینده‌ای برای تعیین کمیت اثرات اختلالات و تکامل عملکرد سیستم وجود دارد. در این مقاله، یک تعریف ویژه میدانی از تاب‌آوری در حمل‌ونقل ریلی تنظیم شد و بررسی جامعی از تحقیقات در حوزه تاب‌آوری راه‌آهن ارائه گردید. معیارهای مبتنی بر سیستم، تمایل دارند تا اثرات بهتری بر خدمات و تقاضای حمل‌ونقل نشان دهند. همچنین بهینه‌سازی ریاضی، پتانسیل بالایی برای ارزیابی و بهبود تاب‌آوری سیستم‌های راه‌آهن نشان می‌دهد. روش‌های مبتنی بر داده نیز می‌توانند به طور بالقوه برای تجزیه و تحلیل دقیق پس از اختلالات گذشته استفاده شوند. در نهایت، چندین موضوع علمی در حال افزایش در آینده شناسایی شد که از الگوگیری داده‌ها و در نظر گرفتن سیستم‌های حیاتی وابسته به هم و تاب‌آوری جامعه تشکیل می‌گردد. این موضوعات می‌توانند بهبود عملکرد و تاب‌آوری شبکه‌های حمل‌ونقل ریلی را تضمین کند و به توسعه اقتصاد کشورها کمک شایانی کند. به طور کلی، این مقاله به اهمیت تاب‌آوری در حمل‌ونقل ریلی پرداخته و رویکردهای مختلفی را برای بهبود و توسعه این حوزه مطرح کرده است (Veelenturf et al., 2016). در این مقاله، طبقه‌بندی و رویکردهای تاب‌آوری در شبکه حمل‌ونقل ریلی ارائه شده است. در ابتدا تعریف جامعی از تاب‌آوری ارائه شد که جنبه‌های آسیب‌پذیری، بقاء، پاسخ، بهبود، کاهش و آمادگی را دربر می‌گیرد. معیارهای تاب‌آوری به صورت ساختاری و مبتنی بر سیستم طبقه‌بندی شده‌اند. رویکردهای تاب‌آوری نیز به عنوان داده‌محور، ساختاری، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی طبقه‌بندی شده‌اند. این مقاله در جهت تحقیقات بیشتر در سیستم‌های ریلی و همچنین سیستم‌های مشابه مانند حمل‌ونقل عمومی و هوایی نیز مناسب است.

تاکنون تحقیقات محدودی در زمینه تاب‌آوری شبکه‌های ریلی صورت گرفته است. بنابراین هر جنبه‌ای از تاب‌آوری شبکه ریلی نیاز به بررسی بیشتر دارد. ابتدا، بایستی تمرکز بر تغییرات عملیاتی باشد که می‌توان در مدت کوتاه و با هزینه‌های محدود مانند بررسی تنظیمات ترافیک برای پاسخ و بازیابی سریع و موثر از اختلالات تکی و چندگانه انجام داد. در دومین مرحله، تحقیقات بایستی به سمت بحث‌های تاب‌آوری برای اختلالات آینده هدایت شود. در سومین مرحله، با انتظار افزایش تأثیرات تغییرات اقلیمی در دهه‌های آینده، باید به سراغ سرمایه‌گذاری‌های بلندمدت رفت و بنابراین، بایستی به روش‌های بهبود شبکه‌های زیرساخت راه‌آهن توجه نمود. در چهارمین مرحله، مدل‌های پیش‌بینی چند رشته‌ای (مدت اختلال، انتظار باران و برف، سیلاب و غیره) باید همزمان با

سایر تحقیقات مورد توجه قرار گیرند؛ زیرا پیش‌بینی‌های بهتر به بهبود دقت کلیه مطالعات آینده مرتبط با تاب‌آوری کمک خواهد نمود. به طور خلاصه، تاب‌آوری با افزایش نیازهای حمل‌ونقل و پیشرفت‌های آینده و همچنین تغییرات اقلیمی، بیشتر اهمیت پیدا می‌کند. رویکردهای ارزیابی و برنامه‌ریزی برای تاب‌آوری در شبکه راه‌آهن به نسبت، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. انتظار می‌رود روش‌های جدیدی، به ویژه روش‌های بهینه‌سازی و مبتنی بر داده‌ها و همچنین رویکردهای ترکیبی در جهت بهبود وضعیت تاب‌آوری سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی مورد توجه بیشتر قرار گیرد.

٦- پی‌نوشت‌ها

1- Resilience

2- Multi Commodity Flow (Mcf)

3- Network Design Problem (Ndp)

4- Relief Trains (Rt)

5- Augmented E-Constraint Method (Augmecon)

6- Bayesian Network Method

۷- مراجع

- Chen, Z., & Wang, Y. (2019). Impacts of severe weather events on high-speed rail and aviation delays. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 69, 168-183.

- Gedik, R., Medal, H., Rainwater, C., Pohl, E. A., & Mason, S. J. (2014). Vulnerability assessment and re-routing of freight trains under disruptions: A coal supply chain network application. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 71, 45-57.

- Hosseini, S., Barker, K., & Ramirez-Marquez, J. E. (2016). A review of definitions and measures of system resilience. *Reliability Engineering & System Safety*, 145, 47-61.

-Armstrong, J., Preston, J., & Hood, I. (2016). Adapting railways to provide resilience and sustainability. *In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability,* 170, 225-234.

-Azad, N., Hassini, E., & Verma, M. (2016). Disruption risk management in railroad networks: An optimization-based methodology and a case study. *Transportation Research Part B: Methodological*, 85, 70-88.

-Bababeik, M., Khademi, N., & Chen, A. (2018). Increasing the resilience level of a vulnerable rail network: The strategy of location and allocation of emergency relief trains. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,* 119, 110-128.

-Bababeik, M., Khademi, N., Chen, A., & Nasiri, M. M. (2017). Vulnerability analysis of railway networks in case of multi-link blockage. *Transportation Research Procedia,* 22, 275-284.

-Babick, J. P. (2009). Tri-level optimization of critical infrastructure resilience (Doctoral dissertation, Monterey, California. *Naval Postgraduate School.*

-Beiler, M. O., McNeil, S., Ames, D., & Gayley, R. (2013). Identifying resiliency performance measures for megaregional planning: Case study of the transportation corridor between Boston, Massachusetts, and Washington, DC. *Transportation Research Record*, 2397(1), 153-160.

-Berdica, K. (2002). An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done. *Transport Policy*, 9(2), 117-127.

-Bešinović, N. (2020). Resilience in railway transport systems: a literature review and research agenda. *Transport Reviews,* 40(4), 457-478.

-Bešinović, N., Wang, Y., Zhu, S., Quaglietta, E., Tang, T., & Goverde, R. M. (2019, October). Integrated train and passenger disruption management for urban railway lines. *In 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC),* 3182-3187.

-Ferranti, E. J., Quinn, A. D., & Jaroszweski, D. J. (2022). Rail resilience to climate change: Embedding climate adaptation within railway operations. In Rail Infrastructure Resilience (pp. 37-64). *Woodhead Publishing.*

-Ferranti, E., Chapman, L., Lowe, C., McCulloch, S., Jaroszweski, D., & Quinn, A. (2016). Heat-related failures on southeast England's railway network: Insights and implications for heat risk management. *Weather, Climate, and Society,* 8(2), 177-191.

-Fiondella, L., Rahman, A., Lownes, N., & Basavaraj, V. V. (2015). Defense of high-speed rail with an evolutionary algorithm guided by game theory. *IEEE Transactions on Reliability*, 65(2), 674-686.

-Ghaemi, N., Zilko, A. A., Yan, F., Cats, O., Kurowicka, D., & Goverde, R. M. (2018). Impact of railway disruption predictions and rescheduling on passenger delays. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 8(2), 103-122.

-Gu, W., Yu, J., Ji, Y., van der Gun, J. P., Pel, A. J., Zhang, H. M., & van Arem, B. (2017). Optimizing tailored bus bridging paths. *In TRB Annual Meeting Online,* Vol. 2018.

-Hirai, C., Kunimatsu, T., Tomii, N., Kondou, S., & Takaba, M. (2009). A train stop deployment planning algorithm using a petri-net-based modelling approach. *Quarterly Report of RTRI,* 50(1), 8-13.

-Hong, L., Ouyang, M., Peeta, S., He, X., & Yan, Y. (2015). Vulnerability assessment and mitigation for the Chinese railway system under floods. *Reliability Engineering & System Safety*, 137, 58-68.

-Hosseini, S., Barker, K., & Ramirez-Marquez, J. E. (2016). A review of definitions and measures of system resilience. *Reliability Engineering & System Safety,* 145, 47-61.

-Hu, J., Yang, M., & Zhen, Y. (2024). A review of resilience assessment and recovery strategies of urban rail transit networks. *Sustainability*, 16(15), 6390.

-Janić, M. (2015). Reprint of Modelling the resilience, friability and costs of an air transport network affected by a large-scale disruptive event. *Transportation Research Part A: Policy and Practice,* 81, 77-92.

-Janić, M. (2018). Modelling the resilience of rail passenger transport networks affected by large-scale disruptive events: the case of HSR (high speed rail). *Transportation*, 45, 1101-1137.

-Jin, J. G., Tang, L. C., Sun, L., & Lee, D. H. (2014). Enhancing metro network resilience via localized integration with bus services. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,* 63, 17-30.

-Kamboozia, N., & Khakbaz, M. (2023). Application of asphalt concrete as sub-ballast in railway lines with a sustainable development approach. *Road,* 31(116), 1-12.

-Bocchini, P., Frangopol, D. M., Ummenhofer, T., & Zinke, T. (2014). Resilience and sustainability of civil infrastructure: Toward a unified approach. *Journal of Infrastructure Systems,* 20(2), 04014004.

-Candelieri, A., Galuzzi, B. G., Giordani, I., & Archetti, F. (2019). Vulnerability of public transportation networks against directed attacks and cascading failures. *Public Transport*, 11, 27-49.

-Cats, O., & Jenelius, E. (2014). Dynamic vulnerability analysis of public transport networks: mitigation effects of real-time information. *Networks and Spatial Economics*, 14, 435-463.

-Chan, R., & Schofer, J. L. (2016). Measuring transportation system resilience: Response of rail transit to weather disruptions. *Natural Hazards Review,* 17(1), 05015004.

-Chen, L., & Miller-Hooks, E. (2012). Resilience: an indicator of recovery capability in intermodal freight transport. *Transportation Science*, 46(1), 109-123.

-Chen, Z., & Wang, Y. (2019). Impacts of severe weather events on high-speed rail and aviation delays. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 69, 168-183.

-D'Lima, M., & Medda, F. (2015). A new measure of resilience: An application to the London Underground. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 81, 35-46.

-Dawson, D., Shaw, J., & Gehrels, W. R. (2016). Sea-level rise impacts on transport infrastructure: The notorious case of the coastal railway line at Dawlish, England. *Journal of Transport Geography,* 51, 97-109.

-Dekker, M. M., van Lieshout, R. N., Ball, R. C., Bouman, P. C., Dekker, S. C., Dijkstra, H. A., & van den Akker, M. (2021). A next step in disruption management: Combining operations research and complexity science. *Public Transport,* 1-22.

-Derrible, S., & Kennedy, C. (2010a). Characterizing metro networks: state, form, and structure. *Transportation*, 37, 275-297.

-Derrible, S., & Kennedy, C. (2010b). The complexity and robustness of metro networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications,* 389(17), 3678-3691.

-Diab, E., & Shalaby, A. (2020). Metro transit system resilience: Understanding the impacts of outdoor tracks and weather conditions on metro system interruptions. *International Journal of Sustainable Transportation*, 14(9), 657-670.

-Dorbritz, R. (2011). Assessing the resilience of transportation systems in case of large-scale disastrous events. In Environmental Engineering. Proceedings of the International Conference on Environmental Engineering. Vilnius Gediminas Technical University, Department of Construction Economics & Property. *ICEE,* Vol. 8, 1070.

-Peterson, S. K., & Church, R. L. (2008). A framework for modeling rail transport vulnerability. *Growth and Change,* 39(4), 617-641.

-Ponomarov, S. Y., & Holcomb, M. C. (2009). Understanding the concept of supply chain resilience. *The international Journal of Logistics Management*, 20(1), 124-143.

-Rodríguez-Núñez, E., & García-Palomares, J. C. (2014). Measuring the vulnerability of public transport networks. *Journal of Transport Geography,* 35, 50-63.

-Rodríguez-Núñez, E., & García-Palomares, J. C. (2014). Measuring the vulnerability of public transport networks. *Journal of Transport Geography,* 35, 50-63.

-Saadat, Y., Zhang, Y., Zhang, D., Ayyub, B. M., & Huang, H. (2018, November). Post-failure recovery strategies for metrorail transit networks with Washington DC As a case study. In ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Vol. 52187, V013T05A060). *American Society of Mechanical Engineers.*

-Sharma, S. K., Poddar, S., Dwivedy, G. K., Panja, S. C., & Patra, S. N. (2021). Risk reduction and resilience buildup in railroad transport. In Disaster Resilience and Sustainability, 509-562). *Elsevier.*

- Rahbar, P., Khakbaz, M., & Sheykholeslami, A. (2025). Identifying and Investigating the Factors Affecting the Mode Choice of Freight Transportation in Supply Chain Logistics. Road, 33(122), 67-88.

-Siegel, A. W., & Schraagen, J. M. C. (2017). Beyond procedures: Team reflection in a rail control centre to enhance resilience. *Safety Science,* 91, 181-191.

-Siegel, A. W., & Schraagen, J. M. C. (2017). Beyond procedures: Team reflection in a rail control centre to enhance resilience. *Safety Science,* 91, 181-191.

-Steenhuisen, B. (2009). Competing public values: Coping strategies in heavily regulated utility industries.

-Szymula, C., & Bešinović, N. (2020). Passenger-centered vulnerability assessment of railway networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 136, 30-61.

-Van Aken, S., Bešinović, N., & Goverde, R. M. (2017). Designing alternative railway timetables under infrastructure maintenance possessions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 98, 224-238.

-Van der Hurk, E., Koutsopoulos, H. N., Wilson, N., Kroon, L. G., & Maróti, G. (2016). Shuttle planning for link closures in urban public transport networks. *Transportation Science*, 50(3), 947-965.

-Van Lieshout, R., Bouman, P., & Huisman, D. (2018). Determining and evaluating alternative line plans in (near) out-of-control situations, No. EI2018-20.

-Khaled, A. A., Jin, M., Clarke, D. B., & Hoque, M. A. (2015). Train design and routing optimization for evaluating criticality of freight railroad infrastructures. *Transportation Research Part B: Methodological,* 71, 71-84.

-Knoester, M. J., Bešinović, N., Afghari, A. P., Goverde, R. M., & van Egmond, J. (2024). A data-driven approach for quantifying the resilience of railway networks. *Transportation Research Part A: Policy and Practice,* 179, 103913.

-Lam, C. Y., & Tai, K. (2012, December). Evaluating the reliability of infrastructure networks by resilience analysis. *In 2012 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management,* 1165-1169.

-Lo, J. C., Sehic, E., & Meijer, S. A. (2017). Measuring mental workload with low-cost and wearable sensors: Insights into the accuracy, obtrusiveness, and research usability of three instruments. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 11(4), 323-336.

-Lu, Q. C. (2018). Modeling network resilience of rail transit under operational incidents. *Transportation Research Part A: Policy and Practice,* 117, 227-237.

-Mansouri, M., Sauser, B., & Boardman, J. (2009, March). Applications of systems thinking for resilience study in maritime transportation system of systems. *In 2009 3rd Annual IEEE Systems Conference,* 211-217.

-Mattsson, L. G., & Jenelius, E. (2015). Vulnerability and resilience of transport systems–A discussion of recent research. *Transportation Research Part A: Policy and Practice,* 81, 16-34.

-Meesit, R., & Andrews, J. (2019). Optimising rail-replacement bus services during infrastructure possessions. *Infrastructure Asset Management,* 7(3), 221-238.

-Meesit, R., Andrews, J., & Remenyte-Prescott, R. (2019, May). Recoverability analysis model for railway networks. *In Critical Service continuity, Resilience and Security: Proceedings of the 56th ESReDA Seminar*, 56.

-Meng, L., & Zhou, X. (2011). Robust single-track train dispatching model under a dynamic and stochastic environment: A scenario-based rolling horizon solution approach. *Transportation Research Part B: Methodological,* 45(7), 1080-1102.

-Mu, D., Zuo, Z., Mao, C., & Yang, G. (2025). Assessment of Urban Rail Transit System Resilience Based on a Cloud Matter-Element Model. *Journal of Transportation Engineering,* Part A: Systems, 151(2), 04024110.

-Mudigonda, S., Ozbay, K., & Bartin, B. (2019). Evaluating the resilience and recovery of public transit system using big data: Case study from New Jersey. *Journal of Transportation Safety & Security,* 11(5), 491-519.

-Veelenturf, L. P., Kidd, M. P., Cacchiani, V., Kroon, L. G., & Toth, P. (2016). A railway timetable rescheduling approach for handling large-scale disruptions. *Transportation Science*, 50(3), 841-862.

-Wan, C., Yang, Z., Zhang, D., Yan, X., & Fan, S. (2018). Resilience in transportation systems: a systematic review and future directions. *Transport Reviews,* 38(4), 479-498.

-Wang, D. Z., Liu, H., Szeto, W. Y., & Chow, A. H. (2016). Identification of critical combination of vulnerable links in transportation networks, a global optimisation approach. *Transportmetrica A: Transport Science, 12*(4), 346-365.

-Wang, X., Koç, Y., Derrible, S., Ahmad, S. N., Pino, W. J., & Kooij, R. E. (2017). Multi-criteria robustness analysis of metro networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 474, 19-31.

-Wang, X., Koç, Y., Derrible, S., Ahmad, S. N., Pino, W. J., & Kooij, R. E. (2017). Multi-criteria robustness analysis of metro networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 474, 19-31.

-Wannous, C., & Velasquez, G. (2017). United nations office for disaster risk reduction (unisdr)—unisdr's contribution to science and technology for disaster risk reduction and the role of the international consortium on landslides (icl). In Advancing Culture of Living with Landslides: Vol. 1 ISDR-ICL Sendai Partnerships 2015-2025, *Springer International Publishing.*

-Whitman, M. G., Barker, K., Johansson, J., & Darayi, M. (2017). Component importance for multi-commodity networks: Application in the Swedish railway. *Computers & Industrial Engineering,* 112, 274-288.

-Yap, M. D., van Oort, N., van Nes, R., & van Arem, B. (2018). Identification and quantification of link vulnerability in multi-level public transport networks: a passenger perspective. *Transportation,* 45, 1161-1180.

-Zhang, D. M., Du, F., Huang, H., Zhang, F., Ayyub, B. M., & Beer, M. (2018). Resiliency assessment of urban rail transit networks: Shanghai metro as an example. *Safety Science,* 106, 230-243.

-Zhang, D. M., Du, F., Huang, H., Zhang, F., Ayyub, B. M., & Beer, M. (2018). Resiliency assessment of urban rail transit networks: Shanghai metro as an example. *Safety Science*, 106, 230-243.

-Zhang, H., Xu, M., & Ouyang, M. (2024). A multi-perspective functionality loss assessment of coupled railway and airline systems under extreme events. *Reliability Engineering & System Safety*, 243, 109831.

-Zhou, Y., Wang, J., & Yang, H. (2019). Resilience of transportation systems: concepts and comprehensive review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(12), 4262-4276.

-Zhou, Y., Wang, J., & Yang, H. (2019). Resilience of transportation systems: concepts and comprehensive review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,* 20(12), 4262-4276.

-Zhou, Y., Wang, J., & Yang, H. (2019). Resilience of transportation systems: concepts and comprehensive review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(12), 4262-4276.

-Zhu, Y., & Goverde, R. M. (2017). System-based vulnerability measures for railway systems. *In Proceedings of the 7th international conference on Railway Operations Modelling and Analysis (IAROR): RailLille,* Lile, France.

-Zhu, Y., & Goverde, R. M. (2019). Railway timetable rescheduling with flexible stopping and flexible short-turning during disruptions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 123, 149-181.

-Zhu, Y., Özbay, K., Xie, K., & Yang, H. (2016). Using big data to study resilience of taxi and subway trips for hurricanes Sandy and Irene. Transportation research record, 2599(1), 70-80.

-Zilko, A. A., Kurowicka, D., & Goverde, R. M. (2016). Modeling railway disruption lengths with Copula Bayesian Networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 68, 350-368.

A Comprehensive Analysis of Resilience in Rail Transportation Systems and Its Role in Transportation Planning

Mohammad Reza Khakbaz, Ph.D., Student, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

Abdolreza Sheikholeslami, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

Neda Kambozia, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

E-mail: Sheikh@iust.ac.ir

Received: May 2025- Accepted: August 2025

ABSTRACT

Rail transportation networks are essential for the functioning of a society and its economy. Increasing transportation demand has intensified congestion in railway networks, making them more interdependent and their operations more complex. Additionally, a rise in the number of disruptions caused by system failures and climate change is anticipated in the future. Consequently, many trains are canceled or excessively delayed, leaving numerous passengers unable to reach their destinations and jeopardizing the satisfaction of customers' mobility needs. Currently, there is a growing need to quantify the impacts of disruptions and analyze the evolution of system performance. This paper establishes a field-specific definition of resilience in rail transportation and provides a comprehensive review of studies conducted on railway resilience. System-based metrics tend to better reflect the impacts on services and transportation demand. Moreover, mathematical optimization demonstrates significant potential for assessing and enhancing the resilience of railway systems, while data-driven methods can be employed for detailed post-disruption analysis. By exploring resilience studies, the ability to identify and predict potential issues and risks in rail transportation systems is improved, enabling the implementation of appropriate preventive measures. The ultimate objective of this paper is to present methodologies for measuring resilience in rail transportation systems and its role in transportation planning. The findings indicate that optimization-based methods, data-driven approaches, and hybrid techniques are more effective than other methods in improving the resilience of rail transportation systems.

Keywords: Resilience, Railway, Passenger, Transportation, Planning