تحلیل پویای محدودیت نیروی کشش و سهم حمل‌ونقل ریلی بار در ایران: یک مدل پویایی‌شناسی سیستم

مقاله علمی –پژوهشی

زینب پیروزراهی، دانشجوی دکترا، دانشکده اقتصاد، دانشگاه علامه طباطبایی، تهران، ایران
علی نصیری اقدم، دانشیار، دانشکده اقتصاد، دانشگاه علامه طباطبایی، تهران، ایران
*__محسن پورسیدآقایی (نویسنده مسئول)__، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران
*__پست الکترونیکی نویسنده مسئول: maghaee@iust.ac.ir__

دریافت:۱۴۰۵/۰۳/۲– پذیرش:۱۴۰۵/۰۸/۰۵
صفحه ۵۳۴-۵۱۳

چکیده

حمل‌ونقل ریلی بار به دلیل ایمنی بالاتر و آثار زیست‌محیطی مطلوب‌تر نسبت به حمل جاده‌ای، جایگاه مهمی در سیاست‌های حمل‌ونقل پایدار دارد. با این حال، سهم حمل‌ونقل ریلی از جابه‌جایی بار در ایران طی سال‌های گذشته روندی کاهشی داشته و اهداف تعیین‌شده محقق نشده‌اند. شواهد موجود نشان می‌دهد محدودیت‌های سمت عرضه، به‌ویژه کاهش قابلیت دسترسی لکوموتیوها، خرابی، محدودیت‌های تعمیر و نگهداری، زمان انتظار و ساختار تخصیص نیروی کشش، نقش مهمی در محدود کردن ظرفیت عملی سیستم دارند. پژوهش حاضر با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم، تعامل میان تقاضای حمل، انتخاب شیوه، ظرفیت ریلی و زیرسیستم نیروی کشش را در یک چارچوب کمی و یکپارچه مدل‌سازی می‌کند. در مدل، سهم واقعی ریل حاصل تعامل میان تقاضای بالقوه حمل ریلی و ظرفیت عملی قابل ارائه است و قابلیت دسترسی لکوموتیو به‌صورت متغیری درونزا، متأثر از بهره‌برداری، فرسودگی، تعمیر و نگهداری و خرابی، بازنمایی می‌شود. انتخاب شیوه حمل نیز بر مبنای مدل لوجیت و متغیرهای هزینه نسبی، زمان نسبی و دسترسی نسبی ریل به جاده صورت‌بندی شده است. مدل از طریق آزمون‌های اعتبار ساختاری، سازگاری ابعادی، بازتولید رفتار تاریخی و شرایط حدی ارزیابی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد حذف توقف‌های ناشی از تعویض لکوموتیو در مرز نواحی، در صورت کنترل عدم‌توازن ناوگان و مسائل هماهنگی، می‌تواند زمان حمل را کاهش داده و ظرفیت و جذابیت ریل را افزایش دهد. افزایش ضریب تعدیل تعرفه لکوموتیو نیز از یک سو با افزایش منابع نگهداری، قابلیت دسترسی را تقویت می‌کند و از سوی دیگر در صورت انتقال به کرایه نهایی، هزینه نسبی حمل ریلی را افزایش داده و تقاضای بالقوه را در یک مسیر متضاد کاهش می‌دهد. در حالی که افزایش بازدیدهای دوره‌ای در صورت همراهی با منابع کافی نگهداری، اثر پایدارتری ایجاد می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهد بهبود پایدار سهم ریل نیازمند ترکیبی هماهنگ از اصلاحات و در صورت امکان سرکوب بخش جاده ای است.

واژه‌های کلیدی: حمل‌ونقل ریلی بار، لکوموتیو، قابلیت دسترسی، پویایی‌شناسی سیستم، سهم شیوه حمل

۱-مقدمه

حمل‌ونقل بار یکی از اجزای اساسی عملکرد اقتصاد است و هزینه، ظرفیت و کیفیت آن می‌تواند بر تولید، تجارت، توزیع کالا و رقابت‌پذیری اقتصادی اثرگذار باشد. در میان شیوه‌های مختلف حمل، حمل‌ونقل ریلی به دلیل ظرفیت بالا و آثار خارجی نسبتاً کمتر، به‌ویژه برای حمل‌های حجیم و بلندمسافت، جایگاه مهمی در سیاست‌های حمل‌ونقل پایدار دارد. در مقابل، وابستگی گسترده

به حمل جاده‌ای با پیامدهایی نظیر مصرف انرژی، انتشار آلاینده‌ها، تصادفات و ازدحام همراه است. (Tamannaei et al., 2021; Ghisolfi et al., 2022) از این رو، افزایش سهم شیوه‌های پایدارتر از جمله ریل در بسیاری از کشورها به‌عنوان یکی از ابزارهای بهبود عملکرد نظام حمل‌ونقل مورد توجه قرار گرفته است. (Björk et al., 2023)

با این حال، تغییر سهم شیوه حمل را نمی‌توان صرفاً نتیجه یک تصمیم سیاستی یا تغییر قیمت نسبی دانست. انتخاب شیوه حمل بار تابع مجموعه‌ای از عوامل شامل هزینه، زمان سفر، قابلیت اطمینان، دسترسی، فراوانی خدمت و ویژگی‌های محموله است و واکنش صاحبان کالا و شرکت‌های حمل‌ونقل به تغییر این عوامل ممکن است با تأخیر صورت گیرد. (de Jong, 2013; de Jong et al., 2010) افزون بر این، افزایش مطلوبیت یک شیوه جایگزین الزاماً به افزایش متناسب حجم واقعی حمل آن منجر نمی‌شود؛ زیرا ظرفیت عرضه آن شیوه نیز می‌تواند یک محدودیت جدی ایجاد کند. مرور مطالعات پویایی‌شناسی سیستم در حمل‌ونقل بار نشان می‌دهد که نادیده گرفتن تعامل میان تقاضا، ظرفیت، قیمت‌گذاری و تصمیم‌های عملیاتی می‌تواند موجب ارزیابی ناقص آثار سیاست‌ها شود.

پویایی‌شناسی سیستم به‌طور خاص برای بررسی مسائلی مناسب است که در آنها رفتار سیستم از تعامل روابط بازخوردی، تأخیرها و آثار غیرخطی اینگونه حاصل می‌شود. (Forrester, 1961; Sterman, 2000) استفاده از این رویکرد در مطالعات حمل‌ونقل نیز سابقه قابل‌توجهی دارد و پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که سیاست‌های حمل‌ونقل ممکن است از چند مسیر و در بازه‌های زمانی مختلف بر رفتار سیستم اثر بگذارند. (Abbas & Bell, 1994; Shepherd, 2014) این ویژگی در حمل‌ونقل بار اهمیت بیشتری دارد؛ زیرا تصمیم‌های دولت، شرکت‌های حمل، مالکان ناوگان و صاحبان کالا به یکدیگر وابسته‌اند و واکنش یک گروه می‌تواند بخشی از اثر اولیه یک سیاست را تقویت یا خنثی کند. (Nassar et al., 2023)

در ایران نیز با وجود اجرای اصلاحات مختلف، توسعه زیرساخت، خصوصی‌سازی بخشی از ناوگان و تأکید مکرر اسناد بالادستی بر افزایش سهم ریل، سهم حمل‌ونقل ریلی از جابه‌جایی بار زمینی در بلندمدت کاهش یافته است. داده‌های سالنامه‌های آماری حمل‌ونقل ریلی و جاده‌ای نشان می‌دهد سهم ریل که در دهه ۱۳۷۰ در حدود ۲۰ درصد قرار داشت، در سال‌های اخیر به کمتر از ۱۰ درصد رسیده است. در عین حال، شواهد موجود حاکی از آن است که در برخی سال‌ها تقاضای بالقوه برای حمل بار ریلی بیش از حجم واقعی بار جابه‌جا شده بوده و بنابراین بخشی از مسئله را باید در سمت عرضه جست‌وجو کرد. چه آنکه بخش ظرفیت و عرضه پیوندهای عمیقی با بخش تقاضا دارد.

در میان محدودیت‌های سمت عرضه، نیروی کشش جایگاهی کلیدی پر سیستم حمل و نقل ریلی ایران دارد. نبود لکوموتیو آماده‌به‌کار می‌تواند کل چرخه حمل را متوقف کند، حتی در شرایطی که ظرفیت خط، واگن و تقاضای کافی وجود داشته باشد. مسئله مهم‌تر آن است که داده‌های تاریخی ایران یک تناقض قابل‌توجه را نشان می‌دهد: افزایش تعداد لکوموتیوهای در گردش لزوماً با افزایش لکوموتیوهای آماده‌به‌کار همراه نبوده است. قابلیت دسترسی ناوگان از حدود ۰٫۸۷ در سال ۱۳۹۷ به حدود ۰٫۴۹ در سال ۱۴۰۲ کاهش یافته، در حالی که تعداد لکوموتیوهای در گردش طی همین دوره از حدود ۳۵۵ به ۵۶۵ دستگاه افزایش یافته است. این مشاهده نشان می‌دهد مسئله نیروی کشش را نمی‌توان صرفاً به کمبود فیزیکی لکوموتیو و نیاز به خرید ناوگان جدید تقلیل داد. ساختار بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری، تخصیص و قیمت‌گذاری می‌تواند تعیین کند چه سهمی از موجودی اسمی ناوگان عملاً قابلیت ارائه خدمت دارد.

بررسی از این بخش نشان داد که بخشی از ناوگان در مالکیت بخش خصوصی قرار دارد، اما شرکت راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران همچنان نقش اصلی را در تخصیص لکوموتیوها و تعیین تعرفه ایفا می‌کند. این ساختار ترکیبی می‌تواند به ایجاد فشار برای بیشینه‌سازی بهره‌برداری کوتاه‌مدت، محدودیت فرصت‌های نگهداری، افزایش فرسودگی و خرابی و تضعیف برخی انگیزه‌های سرمایه‌گذاری منجر شود. پژوهش حاضر با تکیه بر این شناخت نهادی، روابط یادشده را در قالب یک مدل کمی پویایی‌شناسی سیستم درونزا می‌کند. پرسش اصلی پژوهش آن است که سازوکارهای مرتبط با بهره‌برداری، نگهداری، خرابی، قابلیت دسترسی و تخصیص لکوموتیو چگونه بر ظرفیت عملی و سهم حمل‌ونقل ریلی بار اثر می‌گذارند و سیاست‌های مختلف در این ساختار چه پیامدهای کوتاه‌مدت و بلندمدتی ایجاد می‌کنند؟

ادامه مقاله به این ترتیب سازمان‌دهی شده است. ابتدا مبانی نظری و پیشینه پژوهش مرور و سپس روش پژوهش و بعد از آن ساختار نیروی کشش در ایران و فرضیه پویای پژوهش تشریح می‌شود. در ادامه، ساختار مدل و پس از آن نتایج اعتبارسنجی ارائه می‌شود. سپس آثار سناریوهای سیاستی مورد بررسی تحلیل شده و در بخش پایانی، یافته‌های اصلی، دلالت‌های سیاستی و نتیجه‌گیری پژوهش ارائه می‌شود.

۲-پیشینه تحقیق

رشد تقاضای حمل‌ونقل بار، در کنار پیامدهای اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی وابستگی گسترده به حمل جاده‌ای، موجب شده است توسعه حمل‌ونقل پایدار به یکی از محورهای مهم سیاست‌گذاری حمل‌ونقل تبدیل شود. حمل جاده‌ای به دلیل انعطاف‌پذیری، سرعت و دسترسی گسترده سهم بالایی از بازار حمل بار را در اختیار دارد، اما همزمان با پیامدهایی مانند مصرف بالای انرژی، انتشار آلاینده‌ها، تصادفات، ازدحام و آلودگی صوتی همراه است. (Tamannaei et al., 2021; Ghisolfi et al., 2022) این مسئله در کشورهای صادرکننده انرژی که سوخت حمل جاده‌ای با یارانه عرضه می‌شود، از منظر اقتصادی نیز اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، زیرا مصرف داخلی بالاتر سوخت می‌تواند هزینه فرصت قابل‌توجهی برای اقتصاد ایجاد کند. (Mohri & Thompson, 2022) در چنین شرایطی، تغییر ترکیب شیوه‌های حمل به نفع گزینه‌هایی با آثار خارجی کمتر، از جمله راه‌آهن، یکی از ابزارهای دستیابی به نظام حمل‌ونقل پایدارتر محسوب می‌شود. انتقال بخشی از حمل بار جاده‌ای به شیوه‌های پایدارتر می‌تواند در کاهش انتشار، تصادفات، ازدحام و سایر آثار خارجی مؤثر باشد.

با این حال، لازم به ذکر است که انتقال بار را نباید صرفاً یک هدف مستقل سیاستی دانست. تغییر سهم شیوه‌های حمل در نهایت ابزاری برای دستیابی به اهداف گسترده‌تری مانند کاهش آثار خارجی، بهبود بهره‌وری و افزایش پایداری سیستم حمل‌ونقل است. بیورک و همکاران (۲۰۲۳) توضیح می دهند که سیاست‌های مرتبط با توزیع شیوه حمل، شدت مصرف انرژی و شدت کربن سوخت‌ها بر یکدیگر اثر می‌گذارند و تحلیل جداگانه آنها ممکن است به برآورد نادرست اثر سیاست منجر شود. بنابراین، تغییر سهم شیوه حمل باید در چارچوبی وسیع‌تر از تعامل میان عرضه، تقاضا و سایر سیاست‌های حمل‌ونقل مورد بررسی قرار گیرد. به عبارتی، در ارزیابی سیاست‌های حمل بار، نادیده گرفتن توزیع شیوه حمل می‌تواند موجب شود اثر نهایی سیاست کمتر از مقدار مورد انتظار یا حتی در جهتی متفاوت ظاهر شود.

مبنای رفتار تقاضا در بحث انتقال بار، انتخاب شیوه حمل است. تقاضای حمل بار ماهیتی مشتق‌شده دارد و در نتیجه فعالیت‌های تولید، مصرف و مبادله کالا شکل می‌گیرد. پس از شکل‌گیری تقاضا، صاحبان کالا یا سایر تصمیم‌گیرندگان زنجیره حمل میان شیوه‌های مختلف جابه‌جایی انتخاب می‌کنند. در ادبیات اقتصاد حمل‌ونقل، این تصمیم معمولاً در چارچوب نظریه مطلوبیت تصادفی تحلیل می‌شود؛ به این معنا که هر شیوه مجموعه‌ای از ویژگی‌ها دارد و تصمیم‌گیرنده گزینه‌ای را انتخاب می‌کند که مطلوبیت بیشتری برای او ایجاد کند. (de Jong, 2013) مدل‌های انتخاب گسسته و به‌ویژه خانواده مدل‌های لوجیت نیز از رایج‌ترین ابزارهای تجربی برای برآورد این انتخاب هستند.

مطالعات تجربی نشان می‌دهند که انتخاب شیوه حمل بار تنها تابع نرخ کرایه نیست. زمان سفر، قابلیت اطمینان، دسترسی به شبکه، فراوانی خدمات، اندازه محموله، نوع و ارزش کالا و ویژگی‌های مبدأ و مقصد از جمله متغیرهایی هستند که می‌توانند بر این انتخاب اثر بگذارند. (de Jong, 2013; Holguín-Veras et al., 2021) مطالعات طرح جامع حمل‌ونقل کشور نیز برای گروه‌های مختلف کالایی، مدل‌های جداگانه‌ای برای انتخاب میان ریل و جاده برآورد کرده‌اند که در آنها علاوه بر هزینه و زمان، متغیرهایی مانند دسترسی، ویژگی کالا، بار انبوه و خصوصیات مبدأ و مقصد وارد شده‌اند. (وزارت راه و شهرسازی، ۱۳۹۸) از این رو، رقابت‌پذیری ریل در برابر جاده را نمی‌توان صرفاً با پایین نگه داشتن تعرفه توضیح داد؛ ریل باید همزمان از نظر زمان، قابلیت اطمینان و دسترسی نیز سطح خدمت قابل قبولی ارائه کند.

نکته مهم این است که بخش بزرگی از ادبیات انتخاب شیوه، تصمیم صاحب کالا را از سمت تقاضا توضیح می‌دهد، در حالی که تحقق این انتخاب به توان واقعی شیوه حمل برای عرضه خدمت نیز وابسته است. به عبارت دیگر، افزایش مطلوبیت ریل الزاماً به همان میزان به افزایش حمل واقعی ریلی منجر نمی‌شود. اگر ظرفیت کافی وجود نداشته باشد، بخشی از تقاضای بالقوه قابل پاسخ‌گویی نخواهد بود. این موضوع در مطالعات مقایسه‌ای نیز مشاهده شده

است؛ برای نمونه، دی ژانگ و همکاران (۲۰۱۰) نشان می‌دهند که حساسیت تقاضا نسبت به تغییر قیمت و امکان انتقال بار به شیوه‌های غیرجاده‌ای به میزان دسترسی واقعی به آن شیوه‌ها وابسته است. در مرور مطالعات پویایی‌شناسی سیستم نیز ظرفیت به‌عنوان یکی از اجزای کلیدی انتقال بار شناسایی شده و تأکید شده است که نادیده گرفتن محدودیت ظرفیت شیوه جایگزین می‌تواند میزان انتقال بار را بیش‌برآورد کند. علاوه بر آن، این ظرفیت است که قیمت نسبی و زمان نسبی حمل را -یه عنوان عوامل موثر بر تقاضای حمل ریلی- تعیین می کند و به عبارتی بر سهم ریل موثر است. ظرفیت حمل ریلی نیز صرفاً ظرفیت فیزیکی خط یا تعداد اسمی قطارها نیست. ظرفیت قابل ارائه نتیجه تعامل میان زیرساخت، واگن، لکوموتیو، ایستگاه‌ها، برنامه‌ریزی و نحوه بهره‌برداری از آنهاست. در برخی مدل‌های پیشین، ظرفیت راه‌آهن به‌صورت یک سقف فیزیکی بر تعداد قطار یا حجم حمل وارد شده است و حجم واقعی حمل از مقایسه تقاضای برنامه‌ریزی‌شده با حداکثر ظرفیت تعیین می‌شود. مرور مطالعات نشان می‌دهد اگرچه این رویکرد نسبت به نادیده گرفتن کامل محدودیت عرضه پیشرفت مهمی است، اما خود سازوکارهای شکل‌دهنده ظرفیت عملی در بسیاری از مدل‌ها همچنان با جزئیات کمی توضیح داده می‌شوند. همانطور که اشاره شد ظرفیت از طریق تغییر زمان و هزینه نسبی ریل در مقایسه با جاده نیز بر تقاضا اثر می‌گذارد. زمانی که ظرفیت نیروی کشش یا سایر اجزای عملیاتی محدود است، تقاضای موجود برای تعداد کمتری از منابع قابل استفاده رقابت می‌کند و زمان انتظار افزایش می‌یابد. در حمل ریلی این زمان می‌تواند شامل انتظار در مبدأ، توقف در ایستگاه‌ها، انتظار برای تخصیص لکوموتیو و توقف در مرز نواحی باشد. افزایش زمان انتظار، زمان کل چرخه حمل را طولانی کرده و در نتیجه ریل را از نظر زمانی در مقایسه با حمل جاده‌ای نامطلوب‌تر می‌کند.

این رابطه برای ایران اهمیت زیادی دارد. یافته‌های مطالعه کیفی مربوط به مدیریت نیروی کشش نشان می‌دهد که کمبود لکوموتیو آماده‌به‌کار و ساختار تخصیص متمرکز می‌تواند موجب توقف و انتظار قابل‌توجه واگن‌ها در طول مسیر شود. در این ساختار، لکوموتیوهای موجود بر مبنای تقاضای لحظه‌ای تخصیص می‌یابند و عبور از مرز برخی نواحی با تعویض یا تخصیص مجدد لکوموتیو همراه است. در صورت نبود لکوموتیو در ناحیه بعدی، واگن‌ها تا زمان تخصیص نیروی کشش متوقف می‌شوند. این مطالعه همچنین نشان می‌دهد که پایین بودن سرعت تجاری واگن و زمان‌های طولانی انتظار، میزان باری را که ناوگان موجود در طول سال قادر به حمل آن است محدود می‌کند.

به این ترتیب، ظرفیت و زمان یک رابطه دوطرفه دارند. محدودیت ظرفیت می‌تواند زمان انتظار را افزایش دهد، اما افزایش زمان نیز خود ظرفیت مؤثر را کاهش می‌دهد؛ زیرا هرچه یک چرخه حمل طولانی‌تر شود، یک لکوموتیو یا واگن در طول یک دوره زمانی دفعات کمتری قابل استفاده خواهد بود. بنابراین زمان در حمل ریلی هم یک متغیر کیفیت خدمت و هم یکی از عوامل تعیین‌کننده ظرفیت مؤثر است. این نکته سبب می‌شود سیاست‌هایی که زمان انتظار را کاهش می‌دهند، بالقوه از دو مسیر بر سهم ریل اثر بگذارند: از یک سو تعداد چرخه‌های قابل انجام و ظرفیت را افزایش می‌دهند و از سوی دیگر وضعیت زمانی ریل را در برابر جاده بهبود می‌بخشند. ظرفیت محدود می‌تواند بر هزینه نسبی ریل نیز اثرگذار باشد. این اثر لزوماً تنها از طریق تعرفه رسمی ظاهر نمی‌شود، بلکه ناکارایی عملیاتی ناشی از کمبود ظرفیت می‌تواند هزینه استفاده از دارایی‌ها را افزایش دهد. یافته‌های مطالعه ساختار نیروی کشش ایران نشان می‌دهد که تلاش برای حداکثرسازی استفاده از لکوموتیوهای محدود می‌تواند به استفاده از لکوموتیوهای پرهزینه‌تر و کم‌بازده‌تر، افزایش مسافت‌های انتقال غیردرآمدزا، فرسودگی بیشتر و افزایش هزینه تعمیر و نگهداری منجر شود. از سوی دیگر، کاهش سرعت تجاری و افزایش زمان چرخه نیز بهره‌وری لکوموتیو و واگن را کاهش می‌دهد و هزینه سرمایه‌ای و عملیاتی را بر واحد بار حمل‌شده افزایش می‌دهد. بنابراین محدودیت ظرفیت می‌تواند علاوه بر بدتر کردن زمان نسبی ریل، از مسیر کاهش بهره‌وری دارایی و افزایش هزینه‌های عملیاتی، موقعیت هزینه‌ای ریل را نیز در برابر جاده تضعیف کند.

این ارتباط میان ظرفیت، زمان، هزینه و انتخاب شیوه باعث می‌شود تحلیل صرفاً تقاضامحور برای توضیح سهم ریل کافی نباشد. برخی سیاست‌ها ممکن است مستقیماً بر ظرفیت اثر بگذارند اما اثر نهایی آنها از مسیر تغییر ویژگی‌های مورد توجه صاحب کالا ظاهر شود. به عبارتی ممکن است سرمایه‌گذاری یا بهبود عملکرد ریلی زمان سفر را کاهش و قابلیت اطمینان را افزایش دهد، ولی همزمان هزینه ارائه خدمت را نیز تغییر دهد؛ بنابراین اثر نهایی بر انتخاب شیوه به

برآیند این مسیرها بستگی دارد. همین منطق در مطالعات پویایی‌شناسی سیستم سبب شده است ظرفیت، قیمت‌گذاری، رفتار شرکت‌ها و انتخاب صاحبان کالا به‌عنوان زیرسیستم‌های وابسته به یکدیگر در نظر گرفته شوند.

در ادبیات پویایی‌شناسی سیستم، حمل‌ونقل بار نمونه‌ای از یک سیستم پیچیده با حلقه‌های بازخوردی متعدد است. عباس و بل (۱۹۹٤) از مطالعات اولیه‌ای هستند که قابلیت استفاده از این رویکرد برای تحلیل مسائل حمل‌ونقل را مطرح کردند و شفرد (۲۰۱٤) نشان می‌دهد پویایی‌شناسی سیستم به‌ویژه برای مسائلی مناسب است که واکنش سیستم به سیاست‌ها با تأخیر همراه بوده و از تعامل چند بخش ایجاد می‌شود. در حوزه حمل بار، مطالعات مختلف این رویکرد را برای بررسی مالیات سوخت، مالیات کربن، سرمایه‌گذاری زیرساخت، بهبود سطح خدمت، توسعه پایانه‌های بین‌وجهی و سیاست‌های انتقال بار به کار برده‌اند. ناصار و همکاران (۲۰۲۳) برای مثال، روابط میان فعالیت اقتصادی، سرمایه‌گذاری، ظرفیت وانتقال بار را در یک مدل پویایی‌شناسی سیستم بررسی کرده‌اند. با این حال، مرور نظام‌مند بر ۲٤ مطالعه مرتبط نشان می‌دهد که ادبیات موجود همچنان پراکنده است. بخش قابل‌توجهی از مطالعات بر انتشار آلاینده‌ها یا انرژی متمرکز بوده‌اند (Piruzrahi et al., 2025).

در مورد ایران، این خلأ با یک ویژگی نهادی دیگر نیز همراه است. مرور مطالعات نشان می‌دهد که مالکیت بخشی از لکوموتیوها خصوصی شده، اما تخصیص و قیمت‌گذاری نیروی کشش همچنان تا حد زیادی متمرکز است. این ساختار باعث می‌شود مالک دارایی، تخصیص‌دهنده و تصمیم‌گیرنده درباره استفاده از لکوموتیو لزوماً یک بازیگر واحد نباشند. نتایج آن مطالعه حاکی از آن است که فشار برای حداکثرسازی بهره‌برداری کوتاه‌مدت می‌تواند فرصت نگهداری را محدود کند و فرسودگی و خرابی را افزایش دهد، در حالی که ساختار تعرفه و پرداخت نیز بر منابع مالی تعمیر و نگهداری و انگیزه سرمایه‌گذاری اثر می‌گذارد .این سازوکارها اهمیت ظرفیت را از یک محدودیت صرفاً فیزیکی فراتر می‌برند و نشان می‌دهند که ظرفیت عملی می‌تواند خود محصول ساختار مدیریتی، وضعیت فنی ناوگان و سازوکارهای اقتصادی باشد.

در مجموع، ادبیات نشان می‌دهد سهم حمل‌ونقل ریلی را نمی‌توان صرفاً از سمت تقاضا و بر اساس ترجیحات صاحبان کالا توضیح داد و در عین حال، بررسی ظرفیت نیز نباید تنها به موجودی فیزیکی زیرساخت و ناوگان محدود شود. سهم واقعی ریل حاصل تعامل میان مطلوبیت نسبی آن در مقایسه با جاده و ظرفیت عملی قابل ارائه است. ظرفیت محدود از طریق افزایش زمان انتظار، کاهش سرعت تجاری، کاهش بهره‌وری دارایی‌ها و افزایش برخی هزینه‌های عملیاتی می‌تواند زمان و هزینه نسبی ریل را بدتر کند و از همین مسیر، تقاضای بالقوه آن را نیز کاهش دهد. در مقابل، بهبود قابلیت دسترسی، نگهداری و تخصیص می‌تواند هم ظرفیت را افزایش دهد و هم ویژگی‌های خدمت مورد توجه صاحب کالا را بهبود بخشد. همین رابطه دوطرفه میان عرضه و تقاضا، مبنای اصلی استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم در پژوهش حاضر است. تحقیق حاضر نیز بر همین اساس نتیجه می‌گیرد که مسئله سهم حمل ریلی را نمی‌توان صرفاً از منظر تقاضا یا ظرفیت تحلیل کرد، بلکه قیمت و کیفیت خدمت، ظرفیت قابل ارائه و ساختار نهادی تولید خدمت همزمان در شکل‌گیری سهم ریل نقش دارند.

۳- روش پژوهش

پژوهش حاضر برای تحلیل پویایی‌های مؤثر بر حمل‌ونقل ریلی بار، به‌ویژه نقش نیروی کشش، از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم استفاده می‌کند. این رویکرد برای مطالعه مسائلی مناسب است که رفتار آنها در طول زمان حاصل تعامل میان متغیرهای متعدد، حلقه‌های بازخوردی، انباشت‌ها و جریان‌ها و تأخیرهای زمانی است. در پویایی‌شناسی سیستم، هدف اصلی پیش‌بینی مقادیر دقیق آینده نیست، بلکه شناسایی ساختاری است که رفتار مشاهده‌شده سیستم را ایجاد می‌کند و سپس بررسی می‌شود که تغییر در این ساختار یا پارامترهای آن چه پیامدهایی برای رفتار سیستم خواهد داشت. (Sterman, 2000) در مدل‌های کمی این رویکرد، روابط علّی شناسایی‌شده در مرحله مفهوم‌سازی به ساختارهای انباشت و جریان تبدیل می‌شوند و رفتار متغیرهای اصلی سیستم در طول زمان شبیه‌سازی می‌شود. انتخاب این رویکرد با ماهیت مسئله مورد بررسی نیز سازگار است. عملکرد حمل‌ونقل ریلی بار تنها نتیجه یک رابطه مستقیم میان عرضه و تقاضا نیست، بلکه از تعامل میان تقاضای حمل، انتخاب شیوه، ظرفیت قابل ارائه، بهره‌برداری از ناوگان، خرابی، تعمیر و نگهداری، قابلیت دسترسی، زمان حمل و

سازوکارهای اقتصادی شکل می‌گیرد. تغییر در هر یک از این اجزا می‌تواند از طریق چند مسیر بر سایر اجزا اثر گذاشته و حتی در طول زمان اثر اولیه یک سیاست را تقویت یا تضعیف کند. از این رو، مدل پژوهش به‌جای در نظر گرفتن ظرفیت ریلی یا قابلیت دسترسی لکوموتیو به‌عنوان قیودی ثابت و برونزا، تلاش می‌کند بخشی از این متغیرها و روابط را به‌صورت درونزا و در قالب یک ساختار بازخوردی بازنمایی کند. این منطق با هدف پویایی‌شناسی سیستم برای تجزیه یک سیستم پیچیده به سازوکارهای بنیادی و سپس ترکیب آنها در قالب یک کل یکپارچه سازگار است.

فرایند توسعه مدل بر اساس مراحل متعارف پویایی‌شناسی سیستم انجام شده است. این فرایند با تعریف مسئله و شناسایی رفتار مرجع آغاز می‌شود، سپس فرضیه پویا برای توضیح سازوکارهای ایجادکننده رفتار تدوین می‌شود، روابط مفهومی به مدل کمی انباشت و جریان تبدیل می‌شوند، مدل از نظر ساختاری و رفتاری مورد آزمون قرار می‌گیرد و در نهایت برای طراحی و ارزیابی سیاست‌ها به کار می‌رود. (Sterman, 2000)

مبنای تجربی مدل از چند منبع مکمل شکل گرفته است. نخست، داده‌ها و گزارش‌های تاریخی حمل‌ونقل بار برای شناسایی رفتار مسئله و تعیین الگوهای مرجع مورد استفاده قرار گرفتند. دوم، ادبیات حمل‌ونقل بار، به‌ویژه مطالعات انتخاب شیوه، ظرفیت و پویایی‌شناسی سیستم، مبنای شناسایی روابط عمومی میان تقاضا، هزینه، زمان، دسترسی و ظرفیت قرار گرفت. سوم، برای بازنمایی ویژگی‌های خاص نیروی کشش در ایران، اسناد و گزارش‌های داخلی با مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با خبرگان این حوزه ترکیب شد. در مرحله کمی نیز پارامترها با استفاده از داده‌های تاریخی، مطالعات تجربی و منابع فنی تعیین و در موارد لازم کالیبره شدند. بنابراین ساختار مدل نه صرفاً بر یک مجموعه داده آماری، بلکه بر تلفیق ادبیات نظری و تجربی، داده‌های تاریخی، شواهد نهادی و دانش خبرگان استوار است.

جزئیات مراحل توسعه مدل، روش مورد استفاده در هر مرحله، منابع اطلاعاتی و خروجی حاصل در جدول زیر ارائه شده است. این جدول مسیر پژوهش را از تعریف مسئله و توسعه ساختار علّی تا فرمول‌بندی مدل، اعتبارسنجی و ارزیابی سیاست‌ها به‌طور خلاصه نشان می‌دهد.

جدول ۱. مسیر پژوهش

مرحله	روش	نتایج مورد انتظار	منابع
تعریف مسئله	مرور گزارشات و داده‌های عمومی	شناسایی رفتار مسئله در طول زمان و تعیین متغیرهای کلیدی؛ به‌ویژه روند سهم ریل، شکاف میان تقاضا و حمل واقعی و تناقض میان افزایش تعداد لکوموتیو و کاهش قابلیت دسترسی	گزارشات و داده‌های عمومی بخش حمل و نقل بار (ریلی) در ایران
توسعه ساختار علی و معلولی کلی	مرور ادبیات	شناسایی روابط عمومی میان تولید بار، انتخاب شیوه حمل، هزینه، زمان، دسترسی، ظرفیت و سرمایه‌گذاری و توسعه چارچوب اولیه عرضه–تقاضای حمل با	مقالات علمی، مدل‌های پیشین پویایی‌شناسی سیستم، مطالعات انتخاب شیوه حمل و گزارش‌های سازمان‌های داخلی و بین‌المللی
توسعه ساختار علی و معلولی بخش نیروی کشش	مرور ادبیات، مصاحبه نیمه ساختاریافته	شناسایی سازوکارهای خاص تداوم کمبود لکوموتیوهای قابل بهره‌برداری و روابط میان تخصیص، شدت بهره‌برداری، نگهداری، خرابی، قابلیت دسترسی، زمان انتظار، قیمت‌گذاری و سرمایه‌گذاری	گزارشات و داده‌های عمومی در حوزه بحش نیروی کشش در ایران– مصاحبه با ٦ نفر از مطلعین حوزه نیروی کشش
فرمولاسیون مدل شبیه سازی شده	مرور ادبیات– نرم افزار	یک مدل رسمی و کاملاً مشخص که شامل معادلات، پارامترها باشد	ادبیات موضوع، مطالعات تجربی انجام شده، خروجی‌های نرم‌افزار

مرحله	روش	نتایج مورد انتظار	منابع
اعتبارسنجی	بررسی اعتبار ساختاری، سازگاری ابعادی، آزمون بازتولید رفتار تاریخی و آزمون شرایط حدی؛ مقایسه خروجی‌های شبیه‌سازی با داده‌های مشاهده‌شده	بررسی اینکه ساختار و رفتار مدل برای هدف پژوهش قابل اتکا است و مدل قادر به بازتولید الگوهای اصلی متغیرهایی مانند خرابی، قابلیت دسترسی، حجم حمل و سهم ریل است	ساختار و معادلات مدل، داده‌های تاریخی مشاهده‌شده و مقادیر مرجع مستقل یا برآوردشده
ارزیابی سیاستی	اجرای سناریوهای سیاستی در محیط ونسیم و مقایسه رفتار آنها با سناریوی پایه؛ بررسی مسیرهای مستقیم، غیرمستقیم و تأخیردار سیاستی اثرگذاری	ارزیابی نحوه تغییر سهم ریل و متغیرهای واسط در پاسخ به اصلاحات پارامتریک و ساختاری و شناسایی آثار مکمل یا متضاد سیاست‌ها.	مدل اعتبارسنجی‌شده و مفروضات سناریوهای سیاستی

٤- ساختار نیروی کشش در ایران و فرضیه پویای پژوهش

بخش نیروی کشش در ایران دارای ساختاری ترکیبی است که در آن مالکیت دارایی، کنترل عملیاتی، تخصیص لکوموتیو و قیمت‌گذاری الزاماً در اختیار یک بازیگر واحد قرار ندارند. پیش از اصلاحات ساختاری، تقریباً تمامی اجزای سیستم راه‌آهن، از جمله لکوموتیوها، تحت مالکیت و کنترل شرکت راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران قرار داشت. با اجرای اصلاحات و ورود بخش خصوصی، بخشی از فعالیت‌ها و دارایی‌ها به شرکت‌های غیردولتی واگذار شد؛ با این حال، شرکت راه‌آهن همچنان بازیگر مسلط شبکه باقی مانده و کنترل بخش عمده عملیات روی شبکه و نیروی کشش را در اختیار دارد. در بخش حمل بار، شرکت‌های خصوصی عمدتاً مالک واگن هستند و از سال ۱۳۸۹ نیز تعداد محدودی لکوموتیو وارد مالکیت آنها شده است، در حالی که فعالیت‌هایی مانند تشکیل قطار و اتصال لکوموتیو همچنان توسط شرکت راه‌آهن مدیریت می‌شود. (Roland Berger, 2018) در حال حاضر، سهم لکوموتیوهای خصوصی کمتر از ۳۰ درصد است. لکوموتیوهای خصوصی تقریباً به‌طور کامل در بخش حمل بار فعالیت می‌کنند، در حالی که راه‌آهن از ناوگان خود در حمل بار، مسافر و عملیات مانوری استفاده می‌کند.

ویژگی مهم این ساختار آن است که مالکیت خصوصی لکوموتیو به معنای کنترل خصوصی بر نحوه بهره‌برداری از آن نیست. شرکت راه‌آهن تمامی لکوموتیوهای در سرویس، اعم از دولتی و خصوصی، را در یک سازوکار متمرکز تخصیص می‌دهد. در این نظام، لکوموتیوهای خصوصی توسط راه‌آهن اجاره و همراه با لکوموتیوهای متعلق به خود راه‌آهن به قطارهای باری شرکت‌های مختلف اختصاص داده می‌شوند. توجیه اصلی این ساختار، محدود بودن تعداد لکوموتیوهای آماده‌به‌کار و ضرورت استفاده حداکثری از دارایی‌های موجود و حفظ دسترسی شرکت‌های مختلف به نیروی کشش است.

مدیریت عملیاتی نیروی کشش نیز ماهیتی منطقه‌ای دارد. شبکه راه‌آهن کشور به ۲۱ ناحیه عملیاتی تقسیم شده است و دفاتر منطقه‌ای، بر اساس دستورالعمل‌های ستاد مرکزی، مسئول اجرای بخشی از عملیات شبکه و تخصیص لکوموتیوها هستند. راه‌آهن لکوموتیوها را با توجه به الگوی تقاضای بار میان نواحی توزیع می‌کند و هر ناحیه مسئول تخصیص ناوگان در محدوده خود است. یکی از ویژگی‌های مهم این ساختار آن است که در هنگام عبور قطار باری از مرز یک ناحیه به ناحیه دیگر، لکوموتیو ناحیه اول از قطار جدا می‌شود و ادامه مسیر منوط به در دسترس قرار گرفتن و اتصال لکوموتیو متعلق به ناحیه بعدی است.

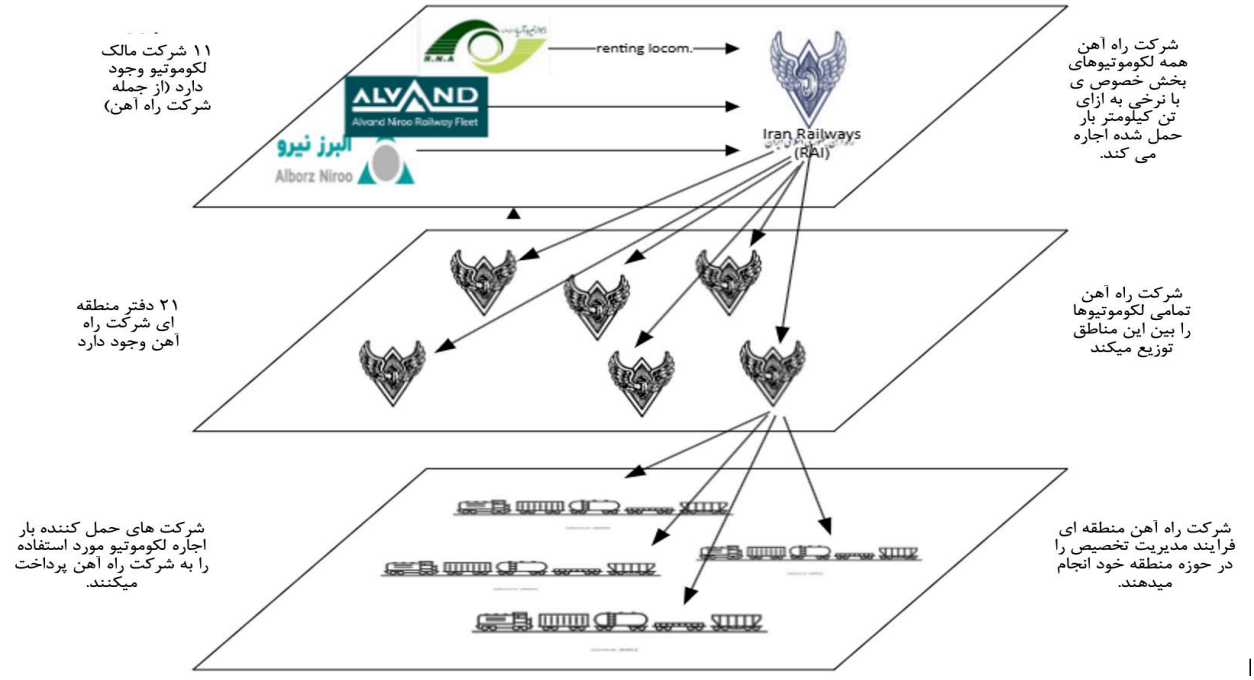
چرخه حمل باری نیز در همین چارچوب عمل می‌کند. پس از صدور بارنامه و بارگیری واگن‌ها، واگن‌ها تا زمان تشکیل رام مناسب در ایستگاه مبدأ باقی می‌مانند. پس از تأمین لکوموتیو و انجام بازرسی‌های ایمنی، قطار حرکت می‌کند. در صورت عبور از مرز نواحی، توقف برای تعویض لکوموتیو ممکن است رخ دهد و

پس از رسیدن به مقصد نیز واگن‌های تخلیه‌شده تا تأمین نیروی کشش مناسب برای بازگشت در انتظار باقی می‌مانند. بنابراین بخش قابل‌توجهی از زمان یک چرخه حمل، علاوه بر زمان حرکت، می‌تواند به انتظار برای تشکیل قطار و به‌ویژه انتظار برای دریافت لکوموتیو اختصاص یابد. این زمان‌ها مستقیماً بر سرعت تجاری، بهره‌وری ناوگان و ظرفیت واقعی شبکه اثر می‌گذارند.

درون هر ناحیه، فرایند تخصیص با جمع‌آوری روزانه اطلاعات مربوط به بارهای آماده حمل و لکوموتیوهای در سرویس انجام می‌شود. لکوموتیوها بر اساس اولویت بارها تخصیص می‌یابند و در صورت کمبود، امکان تأمین لکوموتیو از نواحی مجاور یا حتی کارگاه‌های تعمیر و نگهداری بررسی می‌شود. شواهد حاصل از مصاحبه‌های عملیاتی نشان می‌دهد یکی از اصول اجرایی مهم در تخصیص، استفاده از نزدیک‌ترین لکوموتیو موجود برای قطار آماده حرکت در همان ناحیه است؛ به‌گونه‌ای که مالکیت لکوموتیو یا مقصد نهایی واگن‌ها الزاماً معیار اصلی تصمیم نیست. این ساختار نشان می‌دهد در بخش باری، مالکیت و کنترل عملیاتی لکوموتیو تا حد زیادی از یکدیگر جدا هستند.

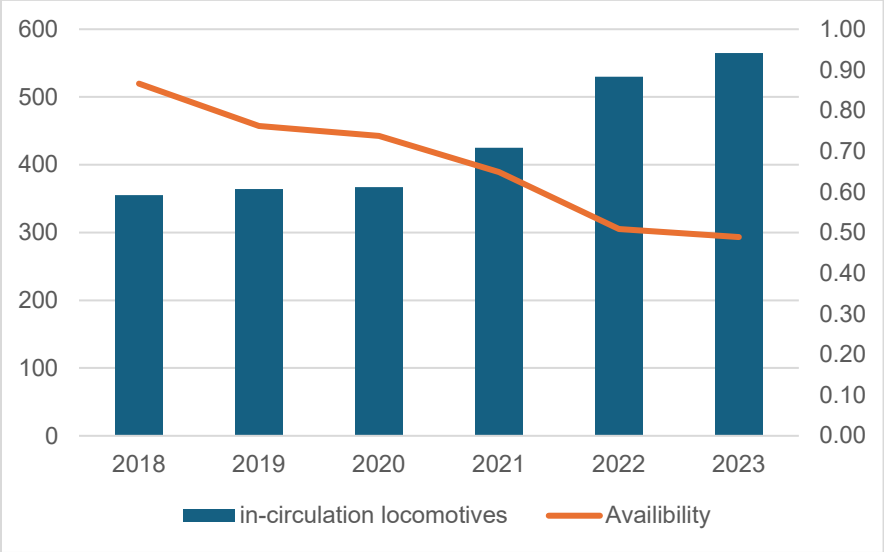
بعد دیگر این ساختار به قیمت‌گذاری نیروی کشش مربوط می‌شود. شرکت راه‌آهن علاوه بر مدیریت تخصیص، نرخ اجاره لکوموتیو و حق دسترسی به شبکه را نیز تعیین می‌کند. این هزینه‌ها به‌صورت یکجا تحت عنوان «تعرفه بهره‌برداری» از شرکت‌های حمل‌ونقل دریافت می‌شوند و شامل سه جزء اصلی حق دسترسی به شبکه، هزینه خدمات فنی و اجاره لکوموتیو هستند. راه‌آهن درآمد مربوط به حق دسترسی را دریافت می‌کند و درآمد اجاره لکوموتیو نیز بر اساس سهم تن‌کیلومتر حمل‌شده توسط لکوموتیوهای دولتی و خصوصی میان راه‌آهن و مالکان خصوصی توزیع می‌شود. بنابراین، ساختار نیروی کشش در ایران را می‌توان ساختاری دانست که در آن مالکیت لکوموتیو تا حدی خصوصی شده، اما تخصیص، بخش مهمی از بهره‌برداری و قیمت‌گذاری همچنان به‌صورت متمرکز مدیریت می‌شود. همچنین عملیات تخصیص در بستر یک نظام منطقه‌ای انجام می‌شود که مرزهای ناحیه‌ای و سازوکار تعویض لکوموتیو بخشی از فرایند عادی حمل بار را تشکیل می‌دهد.

این ویژگی‌ها سبب می‌شوند عملکرد نیروی کشش تنها تابع تعداد یا مشخصات فنی لکوموتیوها نباشد، بلکه نحوه تعامل میان مالکیت، تخصیص، ساختار منطقه‌ای عملیات و سازوکار قیمت‌گذاری نیز بر ظرفیت قابل ارائه اثرگذار باشد.



شکل۱. ساختار نیروی کشش در ایران

همانطور که اشاره شد، علی رغم افزایش موجودی لکوموتیو و تعداد لکوموتیوهای گردش همچنان این بخش یکی از گلوگاه‌های اصلی سیستم است و حتی قابلیت دسترسی لکوموتیو نیز روند کاهشی در سال‌های اخیر داشته است. یافته‌های مطالعه حاضر نشان می دهد در این بخش پنج دسته سازوکار در این وضعیت دحیل است: فشار برای بیشینه‌سازی بهره‌برداری، ساختار قیمت‌گذاری و پرداخت، تخصیص مبتنی بر تجمیع منطقه‌ای، اولویت حمل‌ونقل مسافری و مقاومت در برابر اصلاحات.



نمودار ۱. تغییر تعداد لکوموتیوهای در گردش و شاخص قابلیت دسترسی

یکی از روابط محوری، حلقه میان کمبود لکوموتیو آماده‌به‌کار و شدت بهره‌برداری است. کاهش تعداد لکوموتیوهای در سرویس می‌تواند فشار برای استفاده بیشتر از ناوگان باقی‌مانده را افزایش دهد. افزایش ساعات کارکرد و فشار عملیاتی، فرسودگی را تشدید کرده و در صورت محدودیت تعمیر و نگهداری، نرخ خرابی افزایش می‌یابد. خرابی بیشتر نیز مجدداً قابلیت دسترسی را کاهش داده و کمبود لکوموتیو را تشدید می‌کند. بنابراین سازوکاری خودتقویت‌شونده می‌تواند شکل گیرد که در آن کمبود قابلیت دسترسی، خود یکی از عوامل تشدید کاهش قابلیت دسترسی آینده می‌شود. سازوکار دوم به تخصیص و زمان انتظار مربوط است. شبکه ریلی ایران به نواحی عملیاتی مختلف تقسیم شده و در ساختار مورد بررسی، عبور قطارهای باری از برخی مرزهای نواحی مستلزم جداسازی و تخصیص مجدد لکوموتیو است. در صورتی که لکوموتیو مناسب در ناحیه بعدی در دسترس نباشد، واگن‌ها با زمان انتظار مواجه می‌شوند. علاوه بر آن افزایش تعداد خرابی و کاهش تعداد لکوموتیوهای در سرویس نیز معادل افزایش زمان انتظار برای تخصیص لکوموتیو است. افزایش زمان انتظار، زمان متوسط چرخه حمل را بالا برده و هم ظرفیت را کاهش می‌دهد و هم زمان نسبی ریل در مقایسه با جاده را نامطلوب‌تر می‌کند. در مدل، این رابطه به صورت یک حلقه تعدیل‌کننده میان تقاضای ریلی، فشار تخصیص، انتظار، زمان بارنامه و سهم بالقوه ریل وارد شده است. سازوکار سوم به قیمت‌گذاری مربوط است. پایین بودن تعرفه اجاره لکوموتیو ممکن است در کوتاه‌مدت به کاهش هزینه حمل کمک کند، اما می‌تواند درآمد مالکان و منابع قابل تخصیص به نگهداری را محدود سازد. در مقابل، افزایش تعرفه منابع نگهداری را تقویت می‌کند ولی در صورت انتقال به کرایه نهایی، مطلوبیت ریل را از منظر صاحب کالا کاهش می‌دهد. بنابراین اثر سیاست تعرفه‌ای از ابتدا دوگانه است و تنها با تحلیل همزمان کانال عرضه و تقاضا می‌توان درباره اثر نهایی آن قضاوت کرد. بر این اساس، فرضیه اصلی پژوهش آن است که کاهش سهم حمل ریلی بار نتیجه یک عامل منفرد نیست، بلکه از تعامل میان قابلیت

دسترسی ناوگان، بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری، فرسودگی، خرابی، زمان انتظار، ظرفیت و رفتار تقاضا شکل می‌گیرد.

۵- طراحی و اجرای مدل

مدل با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم و نرم‌افزار ونسیم توسعه یافته است. فرایند مدل‌سازی شامل تعریف مسئله، صورت‌بندی فرضیه پویا، طراحی ساختارهای علّی، تبدیل روابط به مدل انباشت و جریان، پارامتردهی، کالیبراسیون، اعتبارسنجی و سپس ارزیابی سیاست‌ها بوده است. این مراحل با چارچوب متداول توسعه مدل‌های پویایی‌شناسی سیستم سازگار است. (Sterman, 2000) مرز مدل عمداً به‌گونه‌ای تعیین شده که بتواند تعامل میان سمت تقاضا و عرضه حمل بار ریلی را با تمرکز بر گلوگاه نیروی کشش توضیح دهد. هدف بازسازی تمامی جزئیات شبکه ریلی کشور نیست؛ بلکه شناسایی سازوکارهایی است که برای توضیح مسئله کاهش سهم ریل و محدودیت لکوموتیو اهمیت دارند. این انتخاب با اصل مسئله‌محور بودن مدل‌های پویایی‌شناسی سیستم سازگار است. (Sterman, 2000)

۵-۱-طراحی و فرمولاسیون زیرسیستم‌های مدل

پس از تعیین تقاضای بالقوه حمل بار ریلی در زیرسیستم تفکیک مدال، میزان باری که در عمل می‌تواند توسط شبکه ریلی جابه‌جا شود به ظرفیت عرضه خدمات ریلی وابسته است. در مدل حاضر، با توجه به تمرکز پژوهش بر مسئله نیروی کشش، ظرفیت سمت عرضه به‌صورت ظرفیت قابل ایجاد توسط ناوگان لکوموتیو صورت‌بندی شده است. در سطح عملیاتی، ظرفیت حمل توسط نیروی کشش تابع تعداد لکوموتیوهای واقعاً قابل بهره‌برداری، تعداد لکوموتیو مورد نیاز برای تشکیل هر قطار، ظرفیت متوسط هر قطار، زمان در دسترس سالانه برای عملیات، متوسط طول سفر و مدت زمان لازم برای تکمیل هر چرخه حمل است. این منطق با ساختار فیزیکی عملیات ریلی سازگار است: هرچه تعداد لکوموتیوهای در سرویس بیشتر باشد، قطارهای بیشتری می‌توان تشکیل داد؛ هرچه زمان چرخه حمل طولانی‌تر باشد، تعداد چرخه‌هایی که هر لکوموتیو در یک سال قادر به انجام آن است کاهش می‌یابد.

بر این اساس، ظرفیت ناخالص حمل در نسخه نهایی مدل به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$Maximum\ Freight\ Capacity = \left(\frac{L_t^{service}}{n_L}\right) \times Q \times \left(\frac{H \times D_t}{T_t}\right)$$

که در آن:

- $L_t^{service}$:تعداد لکوموتیوهای در سرویس
- n_L :متوسط تعداد لکوموتیو مورد استفاده در هر قطار
- Q :متوسط وزن (ناخالص) قابل حمل توسط هر قطار
- H :افق زمانی عملیاتی سالانه
- D_t :متوسط طول حمل بار ریلی
- T_t :متوسط زمان هر بارنامه

حمل‌شده تقسیم بر تعداد رفت‌وبرگشت قطارهای باری است و به همین دلیل بیانگر وزن کل تحت کشش، شامل بار و واگن‌ها، است نه صرفاً بار خالص. افق زمانی عملیاتی نیز برابر با کل ساعات یک سال یعنی ۸۷۶۰ در نظر گرفته شده است. متوسط طول حمل بار ریلی در دوره تاریخی بر اساس داده‌های موجود به‌صورت

در این مدل، متوسط تعداد لکوموتیو در هر قطار (n_L) برابر با ۱٫۵ لکوموتیو تقریب شد. این پارامتر نشان می‌دهد که به‌طور متوسط برای هر قطار باری بیش از یک لکوموتیو مورد استفاده قرار می‌گیرد. متوسط وزن ناخالص هر قطار نیز برابر با ۲۰۰۰ تن در نظر گرفته شده است. این مقدار تقریبا برابر با تناژ ناخالص

لکوموتیو بیش از آنکه تابع تصمیمات هزینه-منعت داخلی شرکت های مالک باشد تابع اراده شرکت راه آهن و دولت است. نکته آن است که تمامی لکوموتیوهای در گردش در هر لحظه قابلیت استفاده عملیاتی ندارند. برای تبدیل موجودی اسمی ناوگان به موجودی واقعاً قابل استفاده (در سرویس)، در مدل از شاخص قابلیت دسترسی استفاده می‌شود. تعداد لکوموتیوهای در سرویس از حاصلضرب کل لکوموتیوها در شاخص قابلیت دسترسی تعیین می‌شود. این رابطه از نظر مفهومی بسیار مهم است، زیرا نشان می‌دهد افزایش تعداد اسمی لکوموتیوهای ناوگان الزاماً به افزایش متناظر ظرفیت منجر نمی‌شود. برای مثال، اگر موجودی ناوگان افزایش یابد اما قابلیت دسترسی کاهش پیدا کند، تعداد لکوموتیوهایی که عملاً می‌توان در عملیات به کار گرفت ممکن است ثابت بماند یا حتی کاهش یابد. در مهندسی قابلیت اطمینان، قابلیت دسترسی عبارت است از احتمال اینکه یک سیستم در زمان نیاز، عملیاتی (آماده‌به‌کار) باشد. به عبارت دیگر:

$$A = \frac{Mean\ Uptime}{Mean\ Uptime + Mean\ Downtime}$$

به عبارتی، قابلیت دسترسی برابر نسبت متوسط زمان کارکرد بدون خرابی به کل زمان است. همانطور که اشاره شد برای یک لکوموتیو، زمان توقف ناشی از دو عامل تعمیر و نگهداری اصلاحی (خرابی‌ها) و تعمیر و نگهداری پیشگیرانه (توقف‌های برنامه‌ریزی‌شده) است. بدین ترتیب، در مدل حاضر، رابطه قابلیت دسترسی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$A_t = 1 - [B_t D_t + M_t S]$$

که در آن:

B_t : تعداد مورد انتظار خرابی به ازای هر لکوموتیو

D_t: متوسط زمان توقف ناشی از هر خرابی

M_t:تعداد بازدیدهای برنامه‌ریزی‌شده در سال

S : متوسط زمان هر بازدید برنامه‌ریزی‌شده

بنابراین افزایش تعداد یا مدت خرابی‌ها موجب کاهش قابلیت دسترسی می‌شود؛ همچنین بازدیدهای برنامه‌ریزی‌شده، اگرچه برای حفظ وضعیت فنی ناوگان ضروری هستند، در زمان انجام بازدید لکوموتیو را موقتاً از سرویس خارج می‌کنند. این ساختار باعث می‌شود مدل هم هزینه عملیاتی خرابی و هم هزینه زمانی نگهداری برنامه‌ریزی‌شده را در آماده‌به‌کاری ناوگان لحاظ کند.

سالانه وارد مدل شده است. متغیر T_t یعنی متوسط زمان به ازای هر بارنامه و تعداد لکوموتیو در سرویس از مهم‌ترین اجزای درون‌زای تابع ظرفیت و سیستم هستند که در ادامه به آنها اشاره می‌شود. تعداد کل لکوموتیوهای باری (در گردش) به‌عنوان یک متغیر انباره در نظر گرفته شده است که در هر مقطع زمانی حاصل انباشت تغییرات خالص سال‌های قبل است. تغییر این متغیر از طریق یک نرخ رشد خالص صورت می‌گیرد که روند مشاهده‌شده تعداد لکوموتیوهای در گردش را بازتولید کند. انتخاب این ساختار ساده به‌جای یک ساختار درونزای تفصیلی که قاعدتا باید تابعی از تصمیم سرمایه‌گذاری، وابسته به سودآوری شرکت های مالک باشد، به این دلیل صورت گرفت که به نظر می رسد مسیر موجودی ناوگان عمدتا از این قاعده پیروی نمی کند. از انجایی که عمده ناوگان در اختیار شرکت راه آهن است و مابقی نیز وابسته به قدرت تسهیلات دهی دولت است، از این رو انگیزه افزایش تعداد

نرخ خرابی لکوموتیو بیانگر شدت یا فراوانی وقوع خرابی در طول زمان بهره‌برداری است و در تحلیل قابلیت اطمینان، به‌صورت احتمال وقوع خرابی در یک بازه بسیار کوچک زمانی، مشروط بر سالم ماندن تجهیز تا آن لحظه، تفسیر می‌شود. در تجهیزات مکانیکی سنگین مانند لکوموتیو، فرض ثابت بودن نرخ خرابی در طول زمان معمولاً واقع‌بینانه نیست، زیرا با افزایش سن و کارکرد،

فرسودگی اجزا افزایش یافته و احتمال خرابی نیز تغییر می‌کند. به همین دلیل، در مدل حاضر به‌جای یک نرخ خرابی ثابت، از تابع خطر وابسته به زمان توزیع ویبول استفاده شده است. توزیع ویبول به دلیل انعطاف‌پذیری در نمایش نرخ‌های خرابی کاهشی، ثابت یا افزایشی، برای مدل‌سازی رفتار فرسودگی تجهیزات مکانیکی مناسب است. در این توزیع، قابلیت اطمینان و نرخ خرابی به‌ترتیب به‌صورت زیر بیان می‌شوند.

$$\boldsymbol{R(t)} = \exp[\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}]$$

و

$$\boldsymbol{\lambda(t)} = \frac{\beta}{\alpha}(\frac{t}{\alpha})^{\beta-1}$$

که در آن t نشان‌دهنده سن یا میزان کارکرد مؤثر لکوموتیو، α پارامتر مقیاس و β پارامتر شکل توزیع است. پارامتر β رفتار نرخ خرابی را تعیین می‌کند؛ به‌گونه‌ای که برای β□۱ نرخ خرابی با زمان کاهش می‌یابد، برای β≈۱ تقریباً ثابت است و برای β□۱ با افزایش سن و کارکرد رشد می‌کند و تجهیز وارد ناحیه فرسودگی می‌شود. این ویژگی برای لکوموتیوهای قدیمی و مکانیکی اهمیت زیادی دارد، زیرا احتمال خرابی آن‌ها با تجمع کارکرد و فرسایش افزایش می‌یابد. در مدل حاضر، رفتار خرابی بر مبنای تابع ویبول صورت‌بندی شده است. تعداد مورد انتظار خرابی در هر دوره از تغییر تابع شدت تجمعی ویبول بین سن مجازی جاری و دوره قبل محاسبه می‌شود. بنابراین، با افزایش سن مجازی، تعداد مورد انتظار خرابی‌ها نیز بر اساس پارامترهای برآوردشده تابع ویبول تغییر می‌کند. در مدل پویایی سیستم حاضر، t ساعت کارکرد یا سن مجازی جایگزین شده است. اقدامات تعمیر و نگهداری می‌توانند بخشی از فرسودگی انباشته‌شده را جبران کنند، بدون آن‌که لزوماً تجهیز را به وضعیت «نو» بازگردانند. بنابراین خرابی به‌صورت تابعی از سن مجازی نوشته می‌شود. این ساختار با رویکرد تعمیر ناقص سازگار است؛ به این معنا که تعمیرات دوره‌ای می‌توانند سن مؤثر تجهیز را کاهش دهند، اما معمولاً آن را به صفر بازنمی‌گردانند. در نتیجه، افزایش بهره‌برداری باعث افزایش سن مجازی و در پی آن افزایش نرخ خرابی می‌شود، در حالی‌که تعمیر و نگهداری مؤثر از طریق کاهش سن مجازی، نرخ خرابی را کاهش می‌دهد. برای پارامتردهی تابع ویبول، از نتایج مطالعه پژوهشی سحر جلالیان (۱۴۰۰) استفاده شده است. در آن مطالعه، داده‌های خرابی لکوموتیوهای خانواده GT26 شامل مدل‌های GT26cw، GT26cw-2 و GT26cw-2A تحلیل شده و قابلیت اطمینان و نرخ خرابی آن‌ها با استفاده از توزیع ویبول محاسبه شده است. جلالیان پارامترهای تابع ویبول را برای هر یک از این گروه‌های لکوموتیو برآورد کرده و سپس نرخ خرابی، MTBF، قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی را محاسبه کرده است. در مدل حاضر، این نتایج به‌عنوان مبنای تجربی برای تعیین پارامترهای تابع خرابی ناوگان نماینده استفاده شده و سپس در چارچوب پویایی سیستم، تابع ویبول به سن مجازی و اثر تعمیر و نگهداری متصل شده است (α پارامتر مقیاس و β پارامتر شکل توزیع به ترتیب ۶۰.۱۶۹۹ و ۱.۳۰۹). به این ترتیب، نرخ خرابی در مدل نه یک مقدار ثابت برون‌زا، بلکه متغیری درون‌زا و تابعی از وضعیت فرسودگی و سابقه بهره‌برداری و نگهداری لکوموتیوهاست و به‌صورت اختلاف تابع تجمعی ویبول بین سن مجازی فعلی و دوره قبل محاسبه شده است.

$$Expected\ Breakdown_t = \left(\frac{VA_t}{60.1699}\right)^{1.309} - (\frac{VA_{t-1}}{601699})^{1.309}$$

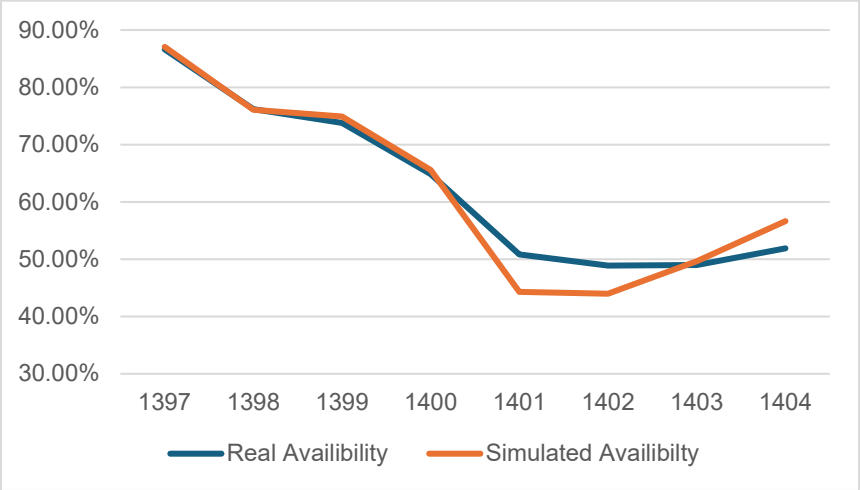
ساعت کارکرد (سن مجازی) شاخصی از وضعیت تجمعی فرسودگی تجهیز است و الزاماً با سن تقویمی یا ساعت کارکرد خام برابر نیست. این متغیر نشان می‌دهد لکوموتیو از نظر احتمال خرابی در چه نقطه‌ای از مسیر فرسودگی قرار دارد. در مدل حاضر، سن مجازی یک متغیر انباره است که از برآیند دو جریان اصلی تغییر می‌کند: از یک سو، بهره‌برداری و کارکرد لکوموتیو باعث افزایش فرسودگی و در نتیجه افزایش سن مجازی می‌شود؛ از سوی دیگر، فعالیت‌های تعمیر و نگهداری می‌توانند بخشی از فرسودگی انباشته‌شده را جبران کرده و سن مجازی را کاهش دهند. اما فرض شده است که فقط بخشی از سن مؤثر آن را کاهش می‌دهد. اگر نرخ فرسودگی ناشی از کارکرد از نرخ بازگردانی ناشی از نگهداری بیشتر باشد، سن مجازی افزایش می‌یابد؛ و اگر اثر تعمیر و نگهداری قوی‌تر باشد، سن مجازی کاهش پیدا می‌کند یا دست‌کم سرعت افزایش آن کمتر می‌شود. نکته مهم این است که در مدل حاضر فرض ساده کننده ای اتحاذ شده است که بر أساس آن تعمیر اصلاحی پس از خرابی الزاماً سن مجازی را صفر یا حتی کاهش نمی‌دهد؛ فرض شده است لکوموتیو پس از رفع خرابی به چرخه بازمی‌گردد، اما سن مؤثر آن حفظ می‌شود، در حالی که تعمیر و نگهداری برنامه‌ریزی‌شده می‌تواند سن مجازی را کاهش دهد. میزان کاش سن مجازی نیز رابطه مستقیمی با درآمد قابل تصرف مالک لکوموتیو دارد. به عبارتی از این مسیر، تاثیر محدودیت‌های درآمدی بر کیفیت تعمیر و نگهداری که همواره به عنوان چالش مالکان لکوموتیو مطرح می‌شود، وارد مدل شده است.

متوسط زمان هر بارنامه در مدل حاضر بیانگر متوسط مدت‌زمان مورد نیاز برای تکمیل یک چرخه حمل بار ریلی مرتبط با یک بارنامه است. این متغیر صرفاً زمان حرکت قطار بین مبدأ و مقصد نیست، بلکه علاوه بر زمان سیر، توقف‌های ناشی از انتظار برای تخصیص یا تعویض لکوموتیو و نیز تأخیرهای ناشی از خرابی لکوموتیو را دربر می‌گیرد. این تعریف با ماهیت عملیات ریلی سازگار است؛ زیرا زمان واقعی حمل بار در شبکه صرفاً تابع فاصله و سرعت حرکت نیست و بخش قابل‌توجهی از آن می‌تواند ناشی از توقف در ایستگاه‌ها، انتظار برای نیروی کشش و اختلالات عملیاتی باشد. شواهد تجربی مورد استفاده در پژوهش نیز نشان می‌دهد که زمان توقف و انتظار در شبکه ریلی ایران سهم بالایی از کل چرخه حمل را تشکیل می‌دهد. در فرمولاسیون مدل، متوسط زمان هر بارنامه از سه جزء اصلی تشکیل شده است. جزء نخست، زمان حرکت قطار در مسیر است (به غیر از مان خرابی، مانور، بارگیری و انتظار برای تخصیص لکوموتیو) و تابعی از متوسط طول حمل بار و سرعت عملیاتی قطار است. جزء دوم، زمان توقف ناشی از انتظار برای تخصیص یا تعویض لکوموتیو در نقاط مختلف شبکه است. در ساختار نهادی موجود علاوه بر مبدا سفر و خرابی احتمالی در مسیر (و حتی در صورت تخصیص لکوموتیو به قطار مسافری)، در مرزهای ناحیه‌ای قطار برای تحویل و جایگزینی لکوموتیو متوقف می‌شود. به همین دلیل، زمان انتظار به تعداد گره‌های ساختاری و نیز فشار تخصیص لکوموتیو وابسته است. افزایش تقاضا نسبت به تعداد لکوموتیوهای در سرویس، فشار تخصیص را افزایش داده و در نتیجه زمان انتظار را بیشتر می‌کند. یافته‌های کیفی پژوهش نیز تأخیر در مرزهای ناحیه‌ای، کمبود هم‌زمان لکوموتیو در یک ناحیه و مازاد آن در ناحیه دیگر، و انتظار طولانی برای تخصیص لکوموتیو را از مسائل مهم بهره‌برداری شناسایی کرده‌اند. جزء سوم، تأخیر ناشی از خرابی لکوموتیو در جریان عملیات است. این جزء به تعداد مورد انتظار خرابی‌ها و متوسط مدت توقف ناشی از هر خرابی وابسته است و به‌صورت مفهومی می‌توان آن را حاصلضرب تعداد متوسط خرابی در زمان توقف به ازای هر خرابی نوشت. بنابراین، افزایش فرسودگی و خرابی نه‌تنها قابلیت دسترسی ناوگان را کاهش می‌دهد، بلکه مستقیماً زمان چرخه حمل را نیز افزایش می‌دهد. در مقابل، تعمیر و نگهداری مؤثر می‌تواند از طریق کاهش خرابی و کاهش تأخیر ناشی از آن، متوسط زمان هر بارنامه را بهبود دهد.

۵-۲- اعتبارسنجی مدل

هر چند با توجه به هدف مدل، اعتبار آن نباید صرفاً بر مبنای توان پیش‌بینی دقیق یک عدد در آینده تفسیر شود. در پویایی‌شناسی سیستم، هدف اصلی بازنمایی ساختار مولد رفتار و بررسی تغییر مسیر سیستم تحت سیاست‌های مختلف است. از این رو، اعتبارسنجی مدل در چهار سطح انجام شده است: اعتبار ساختاری، سازگاری ابعادی، بازتولید رفتار تاریخی و آزمون شرایط حدی. این رویکرد با تأکید پویایی‌شناسی سیستم بر ارزیابی ساختار و رفتار مدل سازگار است. (Sterman, 2000)

در ارزیابی ساختاری، روابط اصلی مدل با ادبیات، داده‌ها و شناخت حاصل از مطالعات نهادی و مصاحبه‌های پیشین مقایسه شد. سازگاری واحدهای متغیرهایی مانند تن‌کیلومتر، تعداد لکوموتیو، ساعت کارکرد، خرابی، زمان تعمیر و قابلیت دسترسی نیز مورد بررسی قرار گرفت. برای آزمون بازتولید رفتار تاریخی، دوره اصلی ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۴ مورد استفاده قرار گرفت. متغیرهای اصلی شامل قابلیت دسترسی، خرابی به ازای هر لکوموتیو، حجم حمل بار ریلی و سهم ریل بودند. یکی از مهم‌ترین رفتارهای مرجع، کاهش قابلیت دسترسی همزمان با افزایش لکوموتیوهای در گردش است. قابلیت دسترسی از حدود ۸۷ درصد در سال ۱۳۹۷ به حدود ۴۹ درصد در سال ۱۴۰۲ کاهش یافته، در حالی که تعداد لکوموتیوهای در گردش از حدود ۳۵۵ دستگاه به حدود ۵۶۵ دستگاه افزایش یافته است. این رفتار نشان می‌دهد افزایش موجودی اسمی ناوگان نتوانسته اثر افت قابلیت دسترسی را جبران کند. مدل توانست الگوی کلی این رفتار را بازتولید کند. روند خرابی نیز به‌عنوان یک رفتار مرجع مورد استفاده قرار گرفت. تعداد خرابی‌های تخمینی به ازای هر لکوموتیو از حدود ۱۵ مورد در سال ۱۳۹۷ به حدود ۱۰۰ مورد در سال ۱۴۰۴ افزایش یافته و مسیر شبیه‌سازی‌شده مدل نیز جهت کلی این افزایش را بازتولید کرده است.



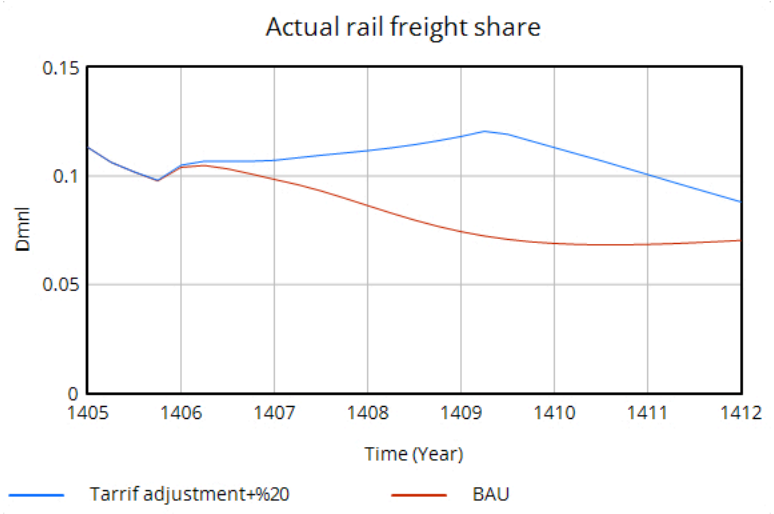
نمودار ۲. مقایسه آمار مشاهده شده و شبیه‌سازی شده از قابلیت دسترسی (درصد)

۵-۳-ارزیابی سیاست‌ها و نتایج شبیه‌سازی

پس از اعتبارسنجی مدل، از آن برای ارزیابی مجموعه‌ای از سیاست‌های منتخب در حوزه نیروی کشش استفاده شد. انتخاب این سیاست‌ها بر مبنای دو معیار اصلی انجام گرفت: نخست، ارتباط مستقیم آنها با سازوکارهای علّی شناسایی‌شده در ساختار مدل؛ و دوم، قابلیت مداخله سیاستی در شرایط واقعی بخش ریلی ایران. بر این اساس، سه سیاست افزایش ضریب تعدیل تعرفه لکوموتیو، حذف توقف و تعویض لکوموتیو در مرز نواحی، و افزایش تعداد بازدیدهای مقرره بررسی شدند. این سه سیاست هر یک یکی از ابعاد اصلی مسئله را هدف قرار می‌دهند: سیاست تعرفه‌ای بر منابع مالی و کیفیت نگهداری، حذف مرز ناحیه‌ای بر تخصیص، زمان انتظار و بهره‌وری ناوگان، و افزایش بازدیدهای مقرره بر نگهداری پیشگیرانه، خرابی و قابلیت دسترسی اثر می‌گذارد. از آنجا که این مداخلات از مسیرهای متفاوت و در برخی موارد متضاد بر ظرفیت، زمان حمل، هزینه و در نهایت سهم ریل اثر می‌گذارند، شبیه‌سازی آنها امکان مقایسه آثار مستقیم و غیرمستقیم هر سیاست و بررسی پایداری نتایج در طول زمان را فراهم می‌کند.

۵-۳-۱- افزایش ضریب تعدیل تعرفه لکوموتیو

سیاست نخست، افزایش ضریب تعدیل تعرفه لکوموتیو است. این سیاست دو کانال اثرگذاری متضاد دارد. در کانال نخست افزایش کرایه لکوموتیو درآمد مالکان و منابع قابل تخصیص به تعمیر و نگهداری را افزایش می‌دهد. بهبود نگهداری سن مجازی و خرابی را کاهش داده و قابلیت دسترسی و ظرفیت را افزایش می‌دهد. اما در کانال دوم بخشی از افزایش کرایه لکوموتیو به کرایه نهایی صاحب بار منتقل می‌شود و جذابیت ریل کاهش می‌یابد. نتایج سناریوی افزایش ۲۰ درصدی ضریب تعدیل تعرفه نشان می‌دهد در بخش ابتدایی و میانی افق، کانال مثبت نگهداری غالب است. افزایش درآمد و تقویت منابع نگهداری موجب بهبود قابلیت اطمینان، دسترسی و زمان حمل شده و مانع افت شدید سهم ریل نسبت به وضعیت پایه می‌شود. اما در سال‌های پایانی، افزایش تجمعی کرایه و رشد هزینه نسبی ریل بخشی از این مزیت را خنثی می‌کند و سهم ریل دوباره وارد مسیر نزولی می‌شود. با این حال، سهم ریل در سال ۱۴۱۲ همچنان به‌طور محسوسی بالاتر از سناریوی پایه باقی می‌ماند.



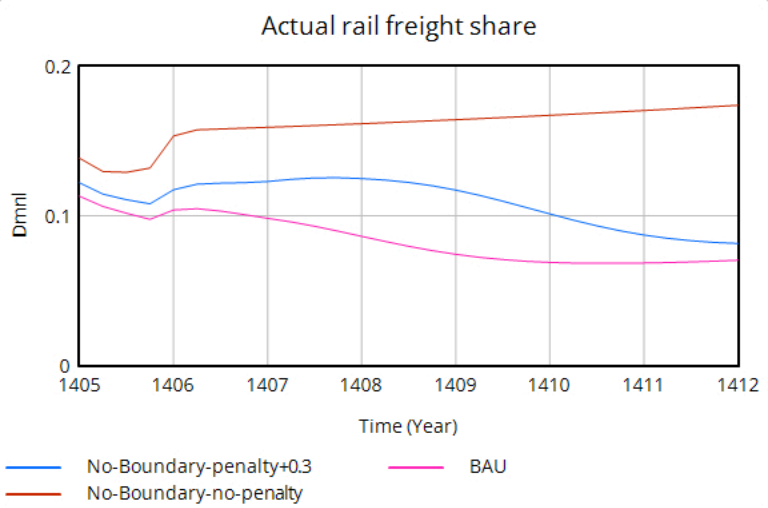
نمودار ۳. شبیه‌سازی سهم حمل و نقل ریلی بار تحت دو سناریوی پایه و افزایش ۲۰ درصدی ضریب تعدیل تعرفه

این نتیجه نشان می‌دهد ارزیابی تعرفه صرفاً بر اساس جهت تغییر آن کافی نیست. ضریب انتقال افزایش کرایه لکوموتیو به کرایه نهایی اهمیت زیادی دارد. تحلیل حساسیت مدل نشان می‌دهد با کاهش این ضریب، اثر منفی هزینه بر تقاضا دیرتر ظاهر شده و مزیت ناشی از بهبود نگهداری برای مدت بیشتری باقی می‌ماند.

۵-۳-۲- حذف توقف در مرز ناحیه

سیاست دوم، حذف توقف‌های ناشی از تعویض و تخصیص مجدد لکوموتیو در مرز نواحی است. منطق این سیاست نیز دو کانال دارد: کانال نخست از سمت عرضه و ظرفیت عملیاتی است. در ساختار منطقه‌ای موجود، عبور قطار از مرز برخی نواحی با توقف، جداسازی لکوموتیو و انتظار برای تخصیص لکوموتیو ناحیه بعدی همراه است. حذف این توقف‌ها، زمان انتظار را کاهش داده و در نتیجه زمان متوسط چرخه حمل یا زمان هر بارنامه کوتاه‌تر می‌شود. کوتاه‌تر شدن چرخه به این معناست که هر لکوموتیو در طول یک دوره زمانی می‌تواند دفعات بیشتری مورد استفاده قرار گیرد؛ بنابراین بهره‌وری ناوگان و ظرفیت مؤثر حمل افزایش می‌یابد. کانال دوم از سمت تقاضا و انتخاب شیوه حمل عمل می‌کند. کاهش

زمان انتظار و کوتاه‌تر شدن زمان کل حمل، وضعیت زمانی ریل را در مقایسه با جاده بهبود می‌دهد. از آنجا که زمان نسبی ریل یکی از عوامل مؤثر بر مطلوبیت و انتخاب شیوه حمل است، بهبود این شاخص می‌تواند جذابیت ریل را برای صاحبان کالا افزایش داده و سهم بالقوه حمل ریلی را بیشتر کند. بنابراین حذف مرز ناحیه‌ای نه‌تنها از طریق افزایش ظرفیت، بلکه از طریق بهبود کیفیت زمانی خدمت نیز بر سهم ریل اثر می‌گذارد.



نمودار ٤. شبیه‌سازی سهم حمل و نقل ریلی بار تحت دو سناریوی پایه وحذف توقف مرز ناحیه

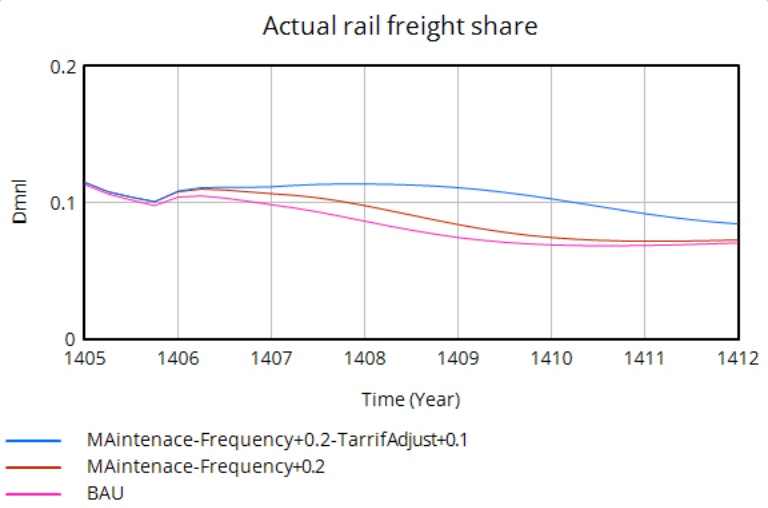
بنابراین یک اصلاح عملیاتی می‌تواند هم عرضه و هم تقاضا را همزمان بهبود دهد. در سناریویی که مزیت حذف مرز ناحیه‌ای بدون ایجاد عدم‌توازن جدید یا هزینه هماهنگی تحقق یابد، اثر بسیار قابل‌توجه است. سهم واقعی ریل از حدود ۱۱ درصد در ابتدای افق به حدود ۱۵ درصد در حوالی ۱٤۰٦ می‌رسد و سپس تا حدود ۱۷ درصد در سال ۱٤۱۲ افزایش می‌یابد. ظرفیت خالص حمل لکوموتیو نیز در انتهای دوره به حدود ۷۰ میلیارد تن‌کیلومتر می‌رسد. با این حال، حذف مرز سازمانی الزاماً به معنای حذف کامل مشکلات تخصیص نیست. در سناریوی دوم، جریمه‌ای معادل ۰٫۳ برای بازنمایی عدم‌توازن تعداد لکوموتیو و مشکلات هماهنگی پس از کنارگذاشتن مدیریت منطقه‌ای در نظر گرفته شد. در این شرایط، سهم ریل پس از افزایش اولیه به حدود ۱۲ درصد در حوالی سال ۱٤۰۸، وارد روند نزولی می‌شود و در سال ۱٤۱۲ به حدود ۸ درصد می‌رسد. ظرفیت خالص نیز پس از رسیدن به حدود ٤۵ میلیارد تن‌کیلومتر، تا حدود ۳۲ میلیارد تن‌کیلومتر کاهش می‌یابد. این تفاوت بزرگ میان دو سناریو نشان می‌دهد اثر سیاست بیش از آنکه به حذف رسمی مرزها وابسته باشد، به کیفیت سازوکار جایگزین برای هماهنگی و تخصیص ناوگان وابسته است.

افزایش تعداد بازدیدهای دوره‌ای

سیاست سوم افزایش تعداد بازدیدهای مقرره است. این سیاست نیز دارای دو اثر متضاد است. افزایش بازدید، احتمال تشخیص زودهنگام نقص و مداخله پیشگیرانه را افزایش می‌دهد و از این طریق می‌تواند فرسودگی مؤثر و خرابی را کاهش دهد. در مقابل، هر بازدید مستلزم خروج برنامه‌ریزی‌شده لکوموتیو از سرویس است. نتایج سناریوی افزایش ۲۰ درصدی تعداد بازدیدها نشان می‌دهد این سیاست در بخش ابتدایی و میانی افق موجب بهبود سهم ریل نسبت به سناریوی پایه می‌شود و این فاصله تا حدود سال‌های ۱٤۰۸ تا ۱٤۰۹ باقی می‌ماند. پس از آن، تفاوت کاهش یافته و مسیر سهم ریل مجدداً به حالت پایه نزدیک می‌شود.

این رفتار نشان می‌دهد افزایش فراوانی نگهداری به‌تنهایی برای ایجاد بهبود بلندمدت کافی نیست؛ زیرا سایر محدودیت‌های

سیستم همچنان فعال هستند. از این رو یک سناریوی ترکیبی نیز بررسی شد که در آن افزایش ۲۰ درصدی بازدیدهای دوره‌ای با افزایش ۱۰ درصدی ضریب تعدیل تعرفه لکوموتیو همراه است. نتیجه نشان می‌دهد اثر مثبت این سناریو از سیاست افزایش بازدید به‌تنهایی قوی‌تر و پایدارتر است. افزایش درآمد، منابع بیشتری برای اجرای مؤثر تعمیر و نگهداری فراهم کرده و در نتیجه فراوانی بیشتر بازدید و کیفیت نگهداری یکدیگر را تقویت می‌کنند.



نمودار ۵. سهم حمل ریلی بار تخت سه سناریوی پایه، افزایش ۲۰ درصدی تعداد بازدیدهای مقرره و سناریوی ترکیبی افزایش تعداد بازدید و رشدکرایه لکوموتیو

بحث و دلالت‌های سیاستی

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد مسئله ظرفیت حمل ریلی بار در ایران را نمی‌توان صرفاً به کمبود تعداد لکوموتیو نسبت داد. رفتار تاریخی سیستم نیز این موضوع را تأیید می‌کند؛ به‌طوری‌که افزایش تعداد لکوموتیوهای در گردش همزمان با کاهش قابلیت دسترسی رخ داده است. این وضعیت نشان می‌دهد آنچه ظرفیت واقعی را تعیین می‌کند، نه فقط موجودی فیزیکی ناوگان، بلکه سهم لکوموتیوهای آماده‌به‌کار، نحوه بهره‌برداری، کیفیت نگهداری، میزان خرابی و زمان توقف است. از این رو، تمرکز صرف بر خرید یا افزایش تعداد لکوموتیو بدون اصلاح سازوکارهای بهره‌برداری و نگهداری، لزوماً به افزایش متناسب ظرفیت منجر نمی‌شود. یکی از نتایج مهم مدل، نقش دوگانه زمان حمل در عملکرد سیستم است. زمان انتظار برای لکوموتیو و توقف‌های عملیاتی از یک سو زمان چرخه حمل را افزایش داده و تعداد دفعات استفاده از یک لکوموتیو یا واگن را کاهش می‌دهد و در نتیجه ظرفیت مؤثر را محدود می‌کند. از سوی دیگر، افزایش زمان حمل، وضعیت زمانی ریل را در مقایسه با جاده تضعیف کرده و از طریق انتخاب شیوه، تقاضای بالقوه برای حمل ریلی را کاهش می‌دهد. بنابراین سیاست‌هایی که زمان انتظار را کاهش می‌دهند می‌توانند همزمان از سمت عرضه و تقاضا بر سهم ریل اثر بگذارند. این موضوع در نتایج مربوط به حذف توقف در مرز نواحی به‌خوبی مشاهده می‌شود. حذف این توقف‌ها در شرایطی که سازوکار مناسبی برای هماهنگی و توزیع لکوموتیو وجود داشته باشد، از طریق کاهش زمان انتظار، کوتاه شدن چرخه حمل و افزایش بهره‌وری ناوگان، ظرفیت قابل ارائه را افزایش می‌دهد. همزمان، کاهش زمان حمل، رقابت‌پذیری زمانی ریل را نسبت به جاده بهبود می‌بخشد و می‌تواند سهم بالقوه ریل را افزایش دهد. با این حال، زمانی که عدم‌توازن ناوگان و مشکلات

هماهنگی میان نواحی در نظر گرفته می‌شود، بخش مهمی از این مزیت از بین می‌رود. بنابراین دلالت سیاستی این نتیجه آن است که حذف مرزهای عملیاتی به‌تنهایی کافی نیست و باید با سازوکارهای جدید برای تخصیص و هماهنگی بین‌ناحیه‌ای همراه باشد. نتایج سیاست تعرفه نیز نشان می‌دهد آثار مداخلات اقتصادی در این سیستم می‌توانند همزمان مثبت و منفی باشند. افزایش ضریب تعدیل تعرفه لکوموتیو از یک سو منابع مالی بیشتری برای نگهداری فراهم می‌کند و می‌تواند از طریق کاهش فرسودگی و خرابی، قابلیت دسترسی و ظرفیت را افزایش دهد. از سوی دیگر، در صورتی که افزایش هزینه نیروی کشش به کرایه نهایی حمل منتقل شود، هزینه نسبی ریل در برابر جاده افزایش یافته و بخشی از تقاضای بالقوه کاهش می‌یابد. بنابراین، ارزیابی سیاست تعرفه‌ای تنها بر مبنای اثر آن بر قیمت نهایی یا درآمد مالک لکوموتیو کافی نیست و لازم است هر دو کانال عرضه و تقاضا همزمان در نظر گرفته شوند. این نتیجه همچنین نشان می‌دهد نحوه انتقال تغییرات نرخ اجاره لکوموتیو به تعرفه نهایی حمل یکی از عوامل مهم در طراحی سیاست است. سیاست افزایش بازدیدهای دوره‌ای نیز بر ضرورت توجه همزمان به بهره‌برداری کوتاه‌مدت و قابلیت دسترسی بلندمدت تأکید دارد. افزایش فراوانی بازدیدها می‌تواند احتمال خرابی‌های آینده را کاهش دهد، اما همزمان مستلزم خروج برنامه‌ریزی‌شده لکوموتیو از سرویس است. نتایج مدل نشان می‌دهد اثر این سیاست در کوتاه‌مدت و میان‌مدت مثبت است، اما برای ماندگاری اثر آن، فراهم بودن منابع مالی و کیفیت کافی نگهداری اهمیت دارد. به همین دلیل، سناریوی ترکیبی افزایش بازدید و بهبود منابع مالی، اثر پایدارتر و قوی‌تری نسبت به تغییر تنها یکی از این عوامل ایجاد می‌کند.

در مجموع، نتایج پژوهش نشان می‌دهد سیاست‌های نیروی کشش نباید به‌صورت منفرد طراحی شوند. افزایش تعداد لکوموتیو، تغییر تعرفه، افزایش دفعات نگهداری یا اصلاح تخصیص، هر یک در صورت اجرای مستقل ممکن است با محدودیت‌هایی مواجه شوند یا آثار آنها در طول زمان تضعیف شود. آنچه برای افزایش پایدار سهم ریل اهمیت دارد، ترکیبی هماهنگ از سیاست‌های تخصیصی، عملیاتی، نگهداری و اقتصادی است. از این منظر، هدف سیاست‌گذاری باید از «افزایش تعداد لکوموتیو» به «افزایش تعداد لکوموتیو قابل بهره‌برداری و کاهش زمان چرخه حمل» تغییر کند. بر این اساس، چند جهت‌گیری سیاستی از نتایج قابل استخراج است: تمرکز بر شاخص قابلیت دسترسی به‌جای موجودی اسمی ناوگان، کاهش زمان انتظار و اصلاح فرآیندهای تخصیص، تأمین مالی کافی برای نگهداری پیشگیرانه، و طراحی نظام تعرفه‌ای که هم پایداری مالی ناوگان و هم رقابت‌پذیری ریل را در نظر بگیرد. به بیان دیگر، بهبود حکمرانی و بهره‌برداری از دارایی‌های موجود می‌تواند به اندازه توسعه فیزیکی ناوگان، و در برخی شرایط حتی بیش از آن، در افزایش ظرفیت و سهم حمل‌ونقل ریلی بار مؤثر باشد.

٦- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف تبیین نقش محدودیت‌های نیروی کشش در عملکرد حمل‌ونقل ریلی بار ایران، یک مدل پویایی‌شناسی سیستم توسعه داد که در آن سهم واقعی ریل حاصل تعامل میان تقاضای بالقوه و ظرفیت قابل ارائه است. برخلاف رویکردهایی که ظرفیت را به‌صورت یک قید ثابت در نظر می‌گیرند، در این پژوهش بخشی از ظرفیت به‌صورت درونزا و تحت تأثیر بهره‌برداری، نگهداری، خرابی، قابلیت دسترسی، زمان انتظار و سازوکارهای تخصیص و قیمت‌گذاری شکل می‌گیرد. این ساختار امکان بررسی همزمان سمت عرضه و تقاضا و مسیرهای مستقیم و غیرمستقیم اثر سیاست‌ها را فراهم می‌کند. نتایج نشان می‌دهد افزایش تعداد لکوموتیو به‌تنهایی تضمین‌کننده افزایش ظرفیت عملی نیست و قابلیت دسترسی ناوگان، کیفیت نگهداری و زمان چرخه حمل نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد واقعی سیستم دارند. همچنین، سیاست‌های مورد بررسی آثار چندمسیره دارند. حذف توقف در مرز نواحی در صورت وجود سازوکار مناسب برای هماهنگی و تخصیص ناوگان می‌تواند از طریق کاهش زمان انتظار، هم ظرفیت مؤثر و هم جذابیت زمانی ریل را افزایش دهد. تعدیل تعرفه لکوموتیو نیز از یک سو با تقویت منابع نگهداری می‌تواند قابلیت دسترسی را بهبود دهد و از سوی دیگر، در صورت انتقال به کرایه نهایی، هزینه نسبی ریل را افزایش دهد. افزایش بازدیدهای دوره‌ای

نیز زمانی اثر پایدارتر دارد که با منابع مالی کافی برای نگهداری همراه باشد. در مجموع، نتایج بر ضرورت استفاده از بسته‌ای هماهنگ از سیاست‌های عملیاتی، نگهداری، تخصیصی و اقتصادی تأکید دارد، ضمن آنکه نباید از سیاست های سرکوب کننده بخش جاده ای غافل شد. در تفسیر نتایج باید به برخی محدودیت‌های پژوهش توجه شود. مدل در سطح ملی و به‌صورت تجمیعی توسعه یافته و تفاوت میان انواع لکوموتیو، گروه‌های کالایی، مسیرها و نواحی شبکه را به‌طور تفصیلی بازنمایی نمی‌کند. همچنین، به دلیل محدودیت دسترسی به داده‌های پیوسته و تفصیلی درباره ساعات کارکرد، خرابی، زمان تعمیر، هزینه‌های نگهداری و تخصیص عملیاتی، برخی روابط و پارامترها با استفاده از ترکیبی از داده‌های تاریخی، مطالعات تجربی، اسناد و نظر خبرگان تعیین شده‌اند. از این رو، نتایج مدل باید بیشتر به‌عنوان ابزاری برای تحلیل رفتار سیستم و مقایسه جهت و سازوکار اثر سیاست‌ها تفسیر شوند، نه به‌عنوان پیش‌بینی نقطه‌ای از آینده. پژوهش‌های آینده می‌توانند مدل را در چند جهت توسعه دهند. تفکیک ناوگان بر اساس نوع، سن و ویژگی‌های فنی لکوموتیوها، تفکیک تقاضا بر حسب گروه کالا و مبدأ–مقصد، و اتصال مدل به ساختار فضایی شبکه می‌تواند دقت تحلیل ظرفیت و تخصیص را افزایش دهد. همچنین، برآورد اقتصادسنجی برخی پارامترهای کلیدی، از جمله میزان انتقال تغییرات کرایه لکوموتیو به تعرفه نهایی حمل، می‌تواند عدم‌قطعیت مدل را کاهش دهد. در کنار این موارد، ترکیب پویایی‌شناسی سیستم با مدل‌های شبکه یا تخصیص می‌تواند امکان ارزیابی دقیق‌تر سیاست‌هایی مانند حذف مدیریت منطقه‌ای، قطار کامل و بازطراحی نظام تخصیص لکوموتیو را فراهم کند. در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که بهبود پایدار سهم حمل‌ونقل ریلی بار در ایران نیازمند فراتر رفتن از سیاست‌های صرفاً توسعه ناوگان است. ظرفیت واقعی سیستم نتیجه تعامل میان وضعیت فنی دارایی‌ها، نحوه بهره‌برداری، سازوکار تخصیص، نگهداری و قیمت‌گذاری است و اصلاح این روابط می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش قابلیت رقابت ریل با حمل جاده‌ای داشته باشد.

۷–پی‌نوشت‌ها

۱–در اینجا زمان توقف ناشی از خرابی یا تعمیر و نگهداری مجدداً از ۸۷۶۰ ساعت کسر نمی‌شود، زیرا اثر این توقف‌ها پیش‌تر از طریق متغیر قابلیت دسترسی در تعداد لکوموتیوهای در سرویس اعمال شده است. کسر دوباره این زمان‌ها موجب دوباره‌شماری اثر خرابی و نگهداری خواهد شد.

۲–محدودیت بودجه‌ای دیگر در خصوص بازرسی‌های دوره‌ای یا عملکردی جریمه خروج از سرویس است که گفته می‌شود شرکت راه آهن برای مالکان لکوموتیو محاسبه می‌کند. تابعیت تعمیر و نگهداری تا اندازه ای این مخدودیت را منتقل می‌کند، هر چند وارد کردن صریح تابع جریمه گزینه بهینه است.

۸– مراجع

–جلالیان، سحر (۱۴۰۰). محاسبه قابلیت اطمینان و بررسی و تحلیل سطح آماده‌به‌کاری لکوموتیوهای GM *سری ۷۱*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعت نفت، تهران، ایران.

–شرکت راه آهن جمهوری اسلامی ایران (۱۴۰۵). سالنامه آماری شرکت راه آهن (۱۳۹۷–۱۴۰۴). تهران، ایران.

–وزارت راه و شهرسازی. (۱۳۹۸). مطالعات طرح جامع حمل‌ونقل کشور، فصل هفتم: مدل تفکیک بار. وزارت راه و شهرسازی.

-Abbas, K. A., & Bell, M. G. H. (1994). System dynamics applicability to transportation modeling. *Transportation Research Part A: Policy and Practice, 28*(5), 373–390.

-Björk, L., Vierth, I., & Cullinane, K. (2023). Freight modal shift: A means or an objective in achieving lower emission targets? The case of Sweden. *Transport Policy, 142*, 125–136.

-de Jong, G. (2013). Mode choice models. In L. Tavasszy & G. de Jong (Eds.), *Modelling freight transport* Elsevier.117–141. **doi.org/10.1016/B978-0-12-410400-6.00006-9**

-De Jong, G., Gunn, H. F., & Walker, W. (2004). National and international freight transport models: An overview and ideas for future development. *Transport Reviews, 24*(1), 103–124. **doi.org/10.1080/0144164032000080494**

-Pirouzrahi, Z., Vanelslander, T., & Nassiri Aghdam, A. (2025). Applying system dynamics modelling to modal shift: A systematic review. *Sustainable Futures, 9*, 100526.
doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100526
-Railway of the Islamic Republic of Iran. (2024). *Statistical yearbook of railway transportation (1991–2023)*. RAI.
-Roland Berger. (2018). New strategy and structure development for railway industry in Islamic Republic of Iran. *Islamic Republic of Iran Railways*.
-Shepherd, S. P. (2014). A review of system dynamics models applied in transportation. *Transportmetrica B: Transport Dynamics, 2*(2), 83–105.
-Sterman, J. D. (2000). Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world. *McGraw-Hill*.
-Tamannaei, M., Zarei, H., & Rasti-Barzoki, M. (2021). A game theoretic approach to sustainable freight transportation: Competition between road and intermodal road–rail systems with government intervention. *Transportation Research Part B: Methodological, 153*, 272–295.
-de Jong, G., Schroten, A., Van Essen, H., Otten, M., & Bucci, P. (2010). The price sensitivity of road freight transport: A review of elasticities. In *Applied Transport Economics: A Management and Policy Perspective*. De Boeck.
-Forrester, J. W. (1961). *Industrial dynamics*. MIT Press.
-Ghisolfi, V., Tavasszy, L. A., Correia, G. H. D., Chaves, G. D. L., & Ribeiro, G. M. (2022). Freight transport decarbonization: A systematic literature review of system dynamics models. *Sustainability, 14*(6), 3625.
-Holguín-Veras, J., Kalahasthi, L., Campbell, S., González-Calderón, C. A., & Wang, X. (2021). Freight mode choice: Results from a nationwide qualitative and quantitative research effort. *Transportation Research Part A: Policy and Practice, 143*, 78–120.
-Nassar, R. F., Ghisolfi, V., Annema, J. A., van Binsbergen, A., & Tavasszy, L. A. (2023). A system dynamics model for analyzing modal shift policies towards decarbonization in freight transportation. *Research in Transportation Business & Management, 48*, 100966.

Dynamic Analysis of Traction Constraints and Rail Freight Modal Share in Iran: A System Dynamics Model

Zeynab Piroozrahi, Ph.D., Student, Department of Economic Development, Faculty of Economics, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran.
Ali Nassiri Aghdam, Associate Professor, Department of Economic Development and Planning, Faculty of Economics, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran.
***Mohsen Pourseyed Aghaee,** Assistant Professor, Faculty of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

E-mail: maghaee@iust.ac.ir

Received: May 2026- Accepted: September 2026

ABSTRACT
Rail freight transport plays an important role in sustainable transport policy because of its higher safety and lower environmental impacts compared with road freight. However, the share of rail in freight transport in Iran has declined in recent years, and the targets set for increasing rail's modal share have not been achieved. Evidence suggests that supply-side constraints—particularly declining locomotive availability, breakdowns, maintenance limitations, waiting times, and the structure of traction allocation—play an important role in limiting effective capacity. This study applies a system dynamics approach to model the interactions among freight demand, mode choice, rail capacity, and the traction subsystem within an integrated quantitative framework. In the model, realized rail freight share results from the interaction between potential rail freight demand and effective available capacity, while locomotive availability is represented as an endogenous variable determined by utilization, wear, maintenance, and breakdowns. Mode choice is formulated using a logit model based on the relative cost, relative time, and relative accessibility of rail compared with road transport. The model was evaluated through structural validity, dimensional consistency, historical behavior reproduction, and extreme-condition tests. Simulation results indicate that removing stops associated with locomotive changes at regional boundaries can reduce transport time and increase both rail capacity and attractiveness, provided that fleet imbalances and coordination problems are effectively managed. Increasing the locomotive tariff adjustment factor strengthens maintenance resources and improves locomotive availability but, if passed through to final freight rates, also increases the relative cost of rail and reduces potential demand. Increasing the frequency of periodic inspections produces more persistent improvements when supported by adequate maintenance resources. Overall, the findings suggest that a sustained increase in rail freight modal share requires a coordinated package of allocation, maintenance, operational, and pricing reforms, potentially complemented by policies that reduce the relative attractiveness of road freight.

Keywords: Rail Freight Transport, Locomotive, Availability, System Dynamics, Modal Share