محاسبه ظرفیت استفاده شده در راه آهن ایران بر اساس روش UIC406 (مطالعه موردی: مسیر تهران – مشهد)

مسعود یقینی*، استادیار، دانشکدهٔ مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
زهرا مفاخری، دانشجوی کارشناسی‌ارشد، دانشکدهٔ مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
نریمان نیکو، دانشجوی دکترا، دانشکدهٔ مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: yaghini@iust.ac.ir
دریافت: ۱۳۹۱/۰۶/۱۱ – پذیرش: ۱۳۹۱/۰۹/۲۰

چکیده

تکنیک‌های تجزیه و تحلیل ظرفیت خط، کمک بسزایی در استفاده هر چه بهتر از زیرساختارهای موجود و نیز جایابی مناسب و بهینه زیرساختارهای جدید می‌کنند. آنچه به عنوان ظرفیت استفاده شده شناخته می‌شود، نسبت زمان اشغال شده خط به زمان در دسترس در دوره زمانی مورد بررسی است. یکی از روش‌های رایج در راه‌آهن‌های جهان برای محاسبه ظرفیت استفاده شده، روش UIC406 است که توسط اتحادیه بین المللی راه‌آهن‌های جهان ارایه گردیده است. در این مقاله روش UIC406 برای محاسبه ظرفیت استفاده شده در راه آهن ایران به‌کار برده شده است. یکی از عوامل مهم در استفاده از روش UIC406، تعیین نقاط فشرده‌سازی برنامه حرکت قطارها است. در این مقاله نحوه تعیین نقاط فشرده‌سازی برنامه حرکت قطارها در راه آهن ایران، پیشنهاد شده است. به عنوان مطالعه موردی ظرفیت استفاده شده و بهینه در مسیر تهران – مشهد محاسبه و نتایج به‌دست آمده، ارایه شده است.

واژه‌های کلیدی: ظرفیت خطوط راه آهن، ظرفیت استفاده شده، UIC406

۱- مقدمه

در بهره‌برداری از خطوط و شبکه‌های موجود در راه آهن، گاهی نرخ بهره‌برداری از خطوط با توجه به سرمایه‌گذاری‌های کلان در بخش زیرساختار، بسیار اندک است و از طرف دیگر در برخی موارد با توجه به حجم بالای ترافیک، نیاز به توسعه بخش‌های زیرساختاری احساس می‌شود. از آن‌جا که هزینه احداث خطوط جدید بخش عظیمی از هزینه‌ها را در بر می‌گیرد، باید سعی شود هم از خطوط موجود بهره‌برداری لازم به عمل آید و نیز در صورت نیاز به زیرساختارهای جدید، این خطوط در مکان‌های مناسب احداث شوند. در این زمینه روش‌های محاسبه ظرفیت، کمک بسزایی در استفاده هر چه بهتر از زیرساختارهای موجود و نیز جایابی مناسب و بهتر زیرساختارهای جدید می‌نمایند. بررسی و مطالعه بر روی ظرفیت خطوط راه آهن برای اعتبارسنجی برنامه‌های زمان‌بندی و تعیین زیرساختارهای مورد نیاز آتی برای سطوح مختلف ترافیکی، انجام می‌گیرد (یقینی و لسان، ۱۳۸۹).

یک شبکه ریلی در اصطلاح UIC، شامل مجموعه‌ای گره[1] است که به‌وسیله مجموعه‌ای پیوند[2] به هم مرتبط شده‌اند که در فیش UIC406، خط[3] نامیده می‌شوند (International Union of Railways, 2004). گره‌های بین یک مبدأ و مقصد مشخص، خط[4] نامیده می‌شوند. در ساده‌ترین شکل، یک گره صرفاً یک نقطه اتصالی است که در آن قطار می‌تواند از یک خط به خطی دیگر برود. برخی از گره‌ها، ایستگاه‌ها[5] را تشکیل می‌دهند، که در آنها عملیات سبقت، تلاقی یا تغییر جهت قطارها انجام می‌گیرد.

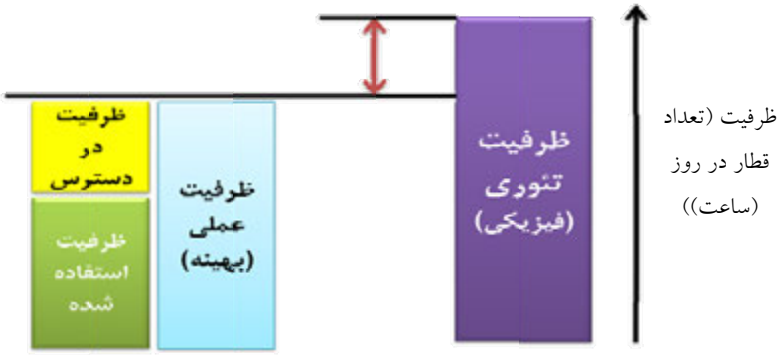
آنچه به عنوان ظرفیت[6] شناخته می‌شود، در اصل توانایی یک مسیر در عبور دادن تعداد مشخصی از وسیله حمل و نقل است

* نویسنده مسئول

Archive of SID
www.SID.ir

که در روش‌های مختلف حمل و نقلی به گونه های متفاوتی محاسبه می‌گردد. محاسبه ظرفیت راه‌آهن، پیچیده‌تر از محاسبه ظرفیت سایر شیوه‌های حمل و نقلی است. خصوصیات زیرساختاری مسیر، مشخصات ناوگان و محورهای مؤثر بر زمان‌بندی حرکت قطارها عواملی هستند که به زمان سیر قطارهایی که خود مؤثرترین عامل در تعیین ظرفیت مسیر است، تأثیر می‌گذارند. عوامل مؤثر بر ظرفیت شبکه ریلی به سه گروه، زیرساختار، ناوگان و برنامه زمان‌بندی حرکت قطارها تقسیم‌بندی می‌شود (Landex, Kaas and Hansen, 2006; Landex, 2008). ظرفیت راه آهن به شیوه های مختلفی تعریف شده است. ظرفیت زیرساختارهای ریلی به شیوه‌ای که مورد استفاده قرار می‌گیرد بستگی دارد (UIC Leaflet 406, 2004). ظرفیت می‌تواند به عنوان توانایی یک زیرساختار در به‌کارگیری یک یا چندین برنامه زمان‌بندی حرکت قطارها تعریف شود. ظرفیت یک زیرساختار عبارت است از توانایی خط در عبور دادن حداکثر تعداد قطار در یک زمان مشخص (Landex, 2008). تعریف دیگر ظرفیت خط عبارتست از حداکثر تعداد قطاری که بتواند در یک زمان مشخص از یک سیرگاه عبور کند (Arkinson and Tom, 1996). علت دشواری در تعریف ظرفیت راه آهن این است که در یک زیرساختار ارایه شده، ظرفیت بر چهار مؤلفه، تعداد قطارها و سرعت میانگین و ثبات و عدم تجانس، مبتنی است (Abril et al., 2008). بر اساس تعریف ارایه شده در فیش UIC406، ظرفیت، واژه‌ای مشخص و قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد و نیازمند محاسبات بر اساس شرایط ذکر شده است. دلیل دشواری تعریف ظرفیت، تعدد پارامترهایی است، که بر ظرفیت تأثیر گذارند و باید اندازه‌گیری شوند (Landex et al., 2006). برای بیان دقیق‌تر مفهوم ظرفیت نیاز به دسته‌بندی ظرفیت دارد، که در ادامه توضیحات مربوطه ارایه شده است.

حداکثر تعداد قطارهایی که در یک مدت زمان مشخص، بدون توجه به میزان تأخیرها، امکان بهره‌برداری از آنها وجود دارد به عنوان ظرفیت فیزیکی (تئوری) تعریف می‌شود. ظرفیت فیزیکی یا ظرفیت حداکثری به منظور مقایسه و بررسی سطح عملکرد سامانه با سامانه‌های مشابه قابل استفاده است (یقینی و لسان، ۱۳۸۹). این ظرفیت برای هیچ خطی قابل دست‌یابی نیست زیرا قطارها نمی‌توانند بدون هیچ‌گونه تأخیری از مسیر عبور کنند و فقط به منظور مقایسه و بررسی حداکثر سطع عملکرد سیستم با سایر سیستم‌های دیگر می‌توانند مفید باشد. بنابراین، به جای مفهوم حداکثر ظرفیت از ظرفیت بهینه استفاده می‌شود که به‌صورت ذیل تعریف می‌گردد. حداکثر تعداد قطارهایی که در یک مدت زمان مشخص و بر اساس میزان قابل قبول تأخیرها با کیفیت عملیاتی، امکان بهره‌برداری از آنها وجود دارد، به عنوان ظرفیت بهینه تعریف می‌شود (یقینی و لسان، ۱۳۸۹). تأخیرها می‌تواند به علت توقف‌های برنامه‌ای نظیر بازدید فنی، آبگیری، سوار یا پیاده شدن مسافر، تخلیه یا بارگیری کالا، نماز یا توقف‌های اجباری ناشی از انجام عملیات تلاقی در ایستگاه‌ها به‌خصوص در خطوط یک خطه به علت محدودیت وجود تنها یک قطار در یک سیرگاه به‌وجود آیند. ظرفیت استفاده شده[۷]، نشان‌دهنده میزان ترافیک واقعی و عملیات جاری در مسیر است. به طور معمول مقدار آن از مقدار ظرفیت بهینه کمتر است. میزان آن بر اساس ترافیک ورودی مشخص می‌گردد. تفاوت میان مقادیر ظرفیت استفاده شده و ظرفیت بهینه، ظرفیت در دسترس است، که نشان‌دهنده حجم ترافیکی است که می‌توان به ترافیک مسیر اضافه کرد (یقینی و لسان، ۱۳۸۹). در شکل ۱ تفاوت مفهوم هر یک از تعاریف مربوط به ظرفیت، نشان داده شده است.



شکل ۱. مفاهیم ظرفیت در راه آهن

Archive of SID
www.SID.ir

UIC406، متدولوژی را برای محاسبه ظرفیت استفاده شده بر مبنای فشرده‌سازی گراف حرکت قطارها[8] ارایه نموده است. این رابطه، با استفاده از روش تجربی، میزان ظرفیت استفاده شده را با استفاده از مجموع زمان اشغالی زیرساختار، زمان حایل و زمان‌های اضافی محاسبه می‌نماید. اختلاف بین زمان سرفاصله زمانی واقعی و کمترین سرفاصله زمانی قابل قبول زمان حایل نامیده می‌شود. سرفاصله‌های زمانی برنامه‌ریزی شده برای دو قطار، باید شامل حداقل سرفاصله زمانی خط، به اضافه زمان‌های حایل برای جبران تأخیرهای کوچک باشد. این زمان‌های حائل کوچک‌ترین شکاف بین زمان پلکانی اشغال سیرگاه‌های دو قطار متوالی هستند. زمان حائل از انتقال تأخیرهای کوتاه به قطارهای دیگر جلوگیری می‌نماید (یقینی و انجمن علمی دانشکده مهندسی راه آهن، ۱۳۸۹). این روش اندازه‌گیری ظرفیت، براساس فشرده‌سازی مسیر حرکت قطارها در داخل یک محدوده مشخص بوده تا بتوان میزان اشغال (سهم) ظرفیت هر قطار در آن بخش از مسیر را به‌دست آورد. در این حالت باید حداقل سرفاصله زمانی را در نظر گرفت که وابسته به سیستم سیگنالینگ و ویژگی‌های قطار است. سرفاصله زمانی[9] به حداقل فاصله زمانی اعزام یا قبول قطارها از یک سیرگاه یا به یک سیرگاه گفته می‌شود. آنچه در رابطه UIC406 از اهمیت قابل توجهی برخوردار است، تعیین نقاط فشرده‌سازی است. در این مقاله نحوه تعیین نقاط فشرده‌سازی برنامه حرکت قطارها برای محاسبه ظرفیت استفاده شده بر مبنای روش تحلیلی UIC406 برای راه آهن ایران ارایه شده است.

در بخش ۲ مروری بر مطالعات انجام شده مرتبط با موضوع، شامل مدل‌های تحلیلی، پارامتریک، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی انجام شده است. در بخش ۳ متدولوژی محاسبه ظرفیت استفاده شده در راه آهن تشریح گردیده است. در بخش ٤ مقاله، نتایج محاسبه برای مسیر تهران– مشهد ارایه شده است. در انتها در بخش ۵ خلاصه‌ای از نتایج به‌دست آمده، آورده شده است.

۲- مروری بر ادبیات موضوع

در این بخش، روش‌های موجود تحلیل ظرفیت شبکه حمل ونقل ریلی و ویژگی و کاربردهای هر یک ارایه شده است. پاچل و وایت روش‌های تحلیل ظرفیت خطوط راه آهن را به دو دسته تحلیلی و شبیه‌سازی تقسیم می کنند (Jorn and Thomas, 2004). طبق (Sameni, Landex and Preston, 2011) سه روش اصلی برای تحلیل ظرفیت وجود دارد. یقینی و لسان سه روش تحلیلی، پارامتریک و شبیه‌سازی را برای محاسبه ظرفیت ارایه کرده است (یقینی و لسان، ۱۳۸۹). ابریل روش‌های محاسبه ظرفیت را به سه دسته تحلیلی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی تقسیم نموده است (Abril et al., 2008). بر این اساس، می‌توان روش‌های محاسبه ظرفیت در شبکه راه آهن را به چهار روش تحلیلی[10]، شبیه‌سازی[11]، پارامتریک[12] و بهینه‌سازی[13] تقسیم کرد، که در ادامه به شرح هر یک از این روش‌ها پرداخته شده است.

۲-۱- روش‌های تجزیه و تحلیل ظرفیت

۲-۱-۱- روش‌های تحلیلی

در روش تحلیلی بر اساس روابط محاسباتی و با استفاده از داده‌های خط و برنامه حرکت قطارها به محاسبه ظرفیت پرداخته می‌شود. روش UIC405، با محاسبه مقدار میانگین سرفاصله زمانی با در نظر گرفتن احتمال روی دادن چهار نوع سرفاصله زمانی و نیز در نظرگرفتن مقادیر زمان حائل و زمان اضافی، به برآورد ظرفیت پرداخته است (یقینی و لسان، ۱۳۸۹). بر اساس روش ارایه شده در فیش UIC405، با استفاده از زمان سیر، همگون‌سازی دقیق‌تری با توجه به سرعت سیر در سیرگاه[14] بحرانی ارایه می‌گردد. این روش برای شبکه‌هایی با تنوع قطارها با سرعت‌های متفاوت، نتایج بهتری را ارایه می‌کند. کرت و همکاران با توجه به حجم تقاضای نامعلومی که در آینده وجود دارد، با استفاده از مجموعه‌ای که با دو عملگر + و max تعریف می‌شود، مسئله تخصیص ظرفیت برای یک بخش از زیرساختار را به یک مدل تبدیل کرده‌اند (Kort, Heidergott and Ayhan, 2003). روش مطرح دیگر برای تحلیل ظرفیت، به‌کارگیری تئوری صف است (Kukec and Mlinari, 2003). در کشور هلند برای ارزیابی ظرفیت ایستگاه‌ها از این روش استفاده شده است. از دیگر روش‌های تحلیلی، روش UIC406 است. این روش برای محاسبه ظرفیت خطوط ارایه شده است. در این روش، پارامترهای مختلفی مورد نیاز می‌باشد که ابتدا باید با انجام

Archive of SID

www.SID.ir

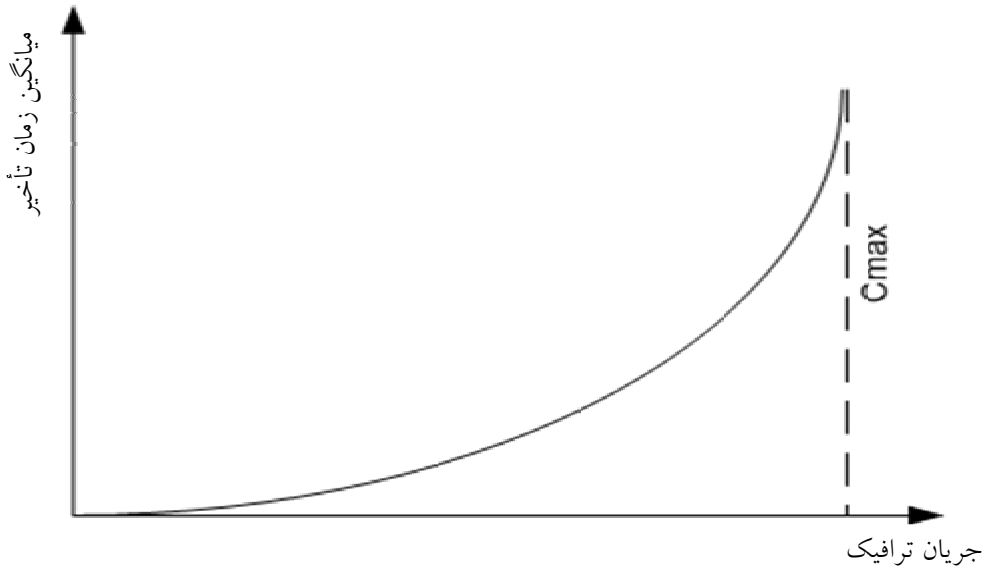
مطالعاتی این پارامترها با توجه به شرایط راه آهن کشور تعیین و صحت استفاده از آن مشخص گردد. به طور مثال، اداره راه آهن ملی سوئد در سال ۲۰۰۵ تحقیقاتی را در این زمینه انجام داده، و با تحلیل ظرفیت بخشی از شبکه راه آهن سوئد با روش UIC و شبیه‌سازی این نتایج را با یکدیگر مقایسه و روش UIC را برای استفاده در کشور سوئد بررسی کرده است. کشور اتریش نیز برای تحلیل شبکه حمل ونقل ریلی خود از روش UIC406 استفاده می‌کند. محاسبه و تحلیل ظرفیت بر مبنای سیستم مدیریت ترافیک راه آهن اروپا (ERTMS) برای مسیرهای علائمی و دارای سیستم‌های علائم و ارتباطات کاربرد دارد (Abril et al., 2008).

۲-۱-۲- روش‌های پارامتریک

همان‌طوری که در شکل ۲ نشان داده شده است، ظرفیت یک خط را می‌توان در قالب یک نمودار زمان تأخیرات بیان کرد. این نمودار میانگین تأخیرات هر قطار را به صورت تابعی از تعداد قطارها نشان می‌دهد (قطارها در واحد زمان).

در این روش یک نمودار کنترلی اصلی تهیه می‌گردد. بر روی این نمودار ابتدا چگونگی سیر قطارهای مسافری رسم می‌شود و به‌عبارت دیگر کارشناسان مربوطه با توجه به دانش و تجربه‌شان نسبت به شرایط حاکم و با توجه به محدودیت عبور قطارها (فقط در ایستگاه‌ها) تلاقی‌های موجود در مسیر حرکت قطارها را بررسی و رفع می‌کنند و پس از آن در زمان‌های باقی‌مانده تا حد امکان قطارهای باری بدون تأخیر رسم می‌گردد. پس از خاتمه رسم نمودار، ظرفیت خط از مجموع قطارهای مسافری و قطارهای باری مسیر استخراج می‌شود که در شکل ۲ با Cmax نشان داده شده است.

در مطالعه‌ای که در سال ۱۹۹۹ انجام شد، به توسعه و کاربرد یک مدل پارامتریک در راه آهن ملی کانادا برای برنامه‌ریزی ظرفیت پرداخته شد. این مدل پارامتریک ظرفیت، به مقایسه ظرفیت سیرگاه در کریدور می‌پردازد و مناطقی را به عنوان گلوگاه که نیاز به زیر ساختارهای جدید برای عبوردادن ترافیک در حال افزایش دارد معین می‌کند. (Buri and Daniel, 2009). لی (Lai and Barkan, 2009) به ارایه بسته‌ای برای ارزیابی ظرفیت پرداخته است و با ارایه شاخص‌هایی برای نمایش خصوصیات زیرساختار، بهره‌برداری و ناوگان شبکه مورد بررسی، به ارایه نمودار تأخیرات- ظرفیت بر اساس تعداد قطار در روز پرداخته است. این مدل برای راه آهن کانادا ارایه گردیده است. در (Srimanta, 2004) نیز مدلی برای محاسبه ظرفیت با روش پارامتریک با در نظر گرفتن تعداد نماهای علائم موجود در شبکه ارایه شده است.



شکل ۲. نمودار ظرفیت و زمان‌های تأخیر (یقینی و لسان، ۱۳۸۹)

www.SID.ir

۲-۱-۳- روش‌های شبیه‌سازی

با استفاده از تکنیک شبیه‌سازی فرآیند اعزام و قبول قطارها و احتمال تأخیرات در مدل وارد می‌شود و حداکثر تعداد قطار ممکنه محاسبه می‌شود (یقینی و همکاران، ۱۳۸۹). در روش‌های شبیه‌سازی برای ارزیابی ظرفیت با استفاده از مدل‌های کامپیوتری، به شبیه‌سازی حرکت قطارها پرداخته و داده‌هایی نظیر تأخیر قطارها را محاسبه می‌نماید (Abril et al., 2008). در سال‌های اخیر مدل‌های شبیه‌سازی، بسیار مطرح گردیدند و در بسیاری از زمینه‌های تحقیقات ظرفیت، جایگزین مدل‌های تحلیلی گردیده‌اند (Jorn, Pachl and White, 2004). در این روش، با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی، شبکه ریلی مورد نظر شامل تعداد خطوط، ایستگاه‌ها و سیرگاه‌ها مدل‌سازی شده و با توجه به پارامترهایی نظیر سرعت حرکت قطارها، مدت زمان توقف در ایستگاه و سرفاصله زمانی حرکت قطارهای شبکه یاد شده شبیه‌سازی شده و اطلاعات مورد نیاز در مورد شبکه، مانند تعداد زوج قطارهای روزانه و گلوگاه‌ها مشخص می‌شوند. از این روش برای زمان‌بندی حرکت قطارها در کشور هلند، اتریش و انگلستان و همچنین در برنامه زمان‌بندی حرکت قطارها در بنادر تاکوما و ونکوور استفاده شده است. لیندلف به تحلیل ظرفیت با استفاده از تکنیک شبیه‌سازی برای خطوط دوخطه و تک خطه پرداخته است (Lindfeldt, 2010). نرم‌افزارهای متعددی برای تحلیل ظرفیت در زمینه شبیه‌سازی وجود دارد که مهم‌ترین آنها در (Abril et al., 2008) بررسی شده است.

۲-۱-٤- روش‌های بهینه‌سازی

هدف مدل‌های بهینه‌سازی به‌دست آوردن جدول زمان‌بندی حرکت قطارهای بهینه است که با استفاده از مدل‌های ریاضی، به محاسبه حداکثر تعداد قطارها می‌پردازند. در این قسمت به مطالعاتی پرداخت شده است که با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی به ارزیابی ظرفیت پرداخته‌اند. لیباردو و همکاران به مدل‌سازی و محاسبه ظرفیت در چندراهی‌ها و تقاطعات راه آهن پرداخته‌اند. جانمایی چندراهی و برنامه زمان‌بندی از پیش تعریف شده، به عنوان محدودیت‌های مدل بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. این مدل بر اساس تعریف UIC406 میزان استفاده از ظرفیت را محاسبه کرده است (Libardo et al., 2011). مرل و همکاران به محاسبه ظرفیت در مهم‌ترین چندراهی راه آهن فرانسه پرداخته‌اند. در این مقاله مدل خطی جدیدی برای این مسئله ارایه شده است و از الگوریتمی ابتکاری برای حل این مدل استفاده شده است (Merel et al., 2009). مدل بهینه‌سازی خطی ارایه شده در این مقاله با استفاده از مدل بهینه‌سازی جریان چند کالایی به مدل‌سازی شبکه ریلی پرداخته و تأثیر فاصله سیرگاه و درصد قطارها را بر روی ظرفیت بررسی می‌کند. محدودیت مدل شبکه و خطوط پهلوگیری ایستگاه‌ها نیز در مدل در نظر گرفته شده است. تابع هدف مدل، حداکثر کردن مطلوبیت است که با توجه به میزان تأخیرات و تعداد قطارها محاسبه می‌گردد (Harrod,2009, 2007).

۲-۲- مقایسه روش‌های تجزیه و تحلیل ظرفیت

روش‌های تحلیلی روشی معمول برای تحقیقات مربوط به ظرفیت است. در این روش با استفاده از محاسبه حداقل سرفاصله زمانی قطارها با استفاده ازخصوصیات زیرساختار و برنامه زمان‌بندی حرکت قطارها برای تعیین و تشریح ظرفیت خط می‌پردازد. روابط تحلیلی ارایه شده امکان در نظر گرفتن گروه‌های مختلف قطارها را در نظر می‌گیرند و اختلافشان در چگونگی در نظر گرفتن مقدار زمان سرفاصله زمانی قطارها است. مدل‌های تحلیلی در مدت زمان اندکی به محاسبه ظرفیت می‌پردازند اما اطلاعات کمی را برای تحلیل ظرفیت ارایه می‌دهند (Sameni, Preston and Armstrong, 2010). با توجه به سادگی روابط مورد استفاده و تقریبی بودن پارامترهای مربوط به آن، این روش از دقت کمتری برخوردار می‌باشد (Jorn, Pachl and White, 2004). مدل‌های شبیه سازی بسیار دقیق‌تر هستند اما نیازمند داده‌های و محاسبات کامپیوتری زیادی هستند. از آنجا که کارایی هر مدل وابسته به وضعیت داده‌های ورودی آن است، در صورت عدم دسترسی به اطلاعات لازم، روش شبیه‌سازی از کارایی بالایی برخوردار نخواهد بود (نیکو، ۱۳۹۰). مدل‌های پارامتریک بین این دو روش قرار دارند (Sameni, Preston and Armstrong, 2010). روش‌های بهینه‌سازی به منظور طراحی جدول زمان‌بندی حرکت قطارها کاربرد داشته و از سطح دقت متوسطی برخوردار است. در جدول زیر نقاط ضعف و قوت هر یک از روش‌ها بر اساس معیارهای داده‌های ورودی، دقت، کاربرد، هزینه و مدل‌سازی ارایه شده است.

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۱. مقایسه روش‌های محاسبه ظرفیت در راه آهن

معیار	روش تحلیلی	روش پارامتریک	روش بهینه‌سازی	روش شبیه‌سازی
داده‌های ورودی	کم	کم - متوسط	متوسط	زیاد
دقت	متوسط	متوسط	متوسط	بالا
کاربرد	تحلیل استراتژیک	تحلیل استراتژیک	طراحی جدول زمان‌بندی	اعتبارسنجی جدول زمان‌بندی
هزینه	کم	متوسط- بالا	متوسط	بالا
مدل‌سازی	آسان	متوسط	نسبتاً سخت	سخت

روش UIC406، روش ساده، کارآمد و سریعی را برای ارزیابی میزان استفاده از ظرفیت خطوط راه آهن ارایه داده است. روش ارایه شده در فیش UIC406 می‌تواند برای خطوط دو خطه و تک خطه به‌کار گرفته شود. نقطه ابهام در رابطه ارایه شده فیش UIC406، تعیین نقاط فشرده‌سازی برنامه حرکت قطارهاست، که در (Landex and Kaas, 2006)، (Landx, 2008)، (Sameni, 2010 Preston and Armstrong,)، (Gasparik, 2007) و (Landex et al., 2006) به آن اشاره شده است.

۳- متدولوژی محاسبه ظرفیت استفاده شده بر مبنای UIC406

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، مراحل محاسبه ظرفیت استفاده شده برای راه آهن ایران در سه گام ارایه شده است. بر اساس زمان سیر قطارهای عبوری، گروه‌بندی قطارها انجام شده و سپس فشرده‌سازی گراف حرکت قطارها انجام شده و در نهایت ظرفیت استفاده شده در راه آهن مورد محاسبه قرار می‌گیرد.

ورودی‌های متدولوژی ارایه شده شامل، زمان سیر قطارهای عبوری و تعداد قطارها در هر سیرگاه و در هر جهت، و پارامترهای زمانی که شامل زمان آزادسازی سیرگاه و زمان اخذ مجوز ورود به سیرگاه برای قطاری که می‌خواهد از حالت توقف وارد سیرگاه گردد، است.

مرحله ۱: گروه‌بندی قطارها بر اساس زمان سیر: برای تحلیل ظرفیت در صورتی که بیش از یک نوع قطار وجود داشته باشد نیاز به در نظر گرفتن چند ترکیب مختلف از قطارها است. در این مرحله بر اساس زمان سیر قطارهای عبوری و جهت سیرشان، گروه‌بندی قطارها انجام می‌شود و در تعیین سرفاصله زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مرحله ۲: فشرده‌سازی گراف حرکت قطارها: در این مرحله به منظور فشرده‌سازی گراف حرکت قطارها، با توجه به این‌که خط مورد بررسی یک خطه یا دوخطه، یک طرفه یا دو طرفه است، حالت‌های مختلف بین گروه قطارها را در نظر گرفته و سرفاصله زمانی قطارها را برای حالت‌های مختلف محاسبه کرده، سپس بر اساس تعداد قطارهای هر گروه قطار، متوسط سرفاصله زمانی محاسبه می‌گردد.

مرحله ۳: محاسبه ظرفیت استفاده شده: بر اساس متوسط سرفاصله زمانی قطارها و کل تعداد قطارهای عبوری در هر سیرگاه، درصد ظرفیت استفاده شده از راه آهن در آن سیرگاه مشخص می‌گردد. درصد استفاده از شبکه بر اساس زمان مرجع که می‌تواند دوره‌های زمانی نظیر روز، هفته یا فصل باشد، متفاوت خواهد بود. در متدولوژی ارایه شده، شبکه راه آهن در هر یک از سیرگاه‌ها شکسته شده است و ظرفیت در هر سیرگاه به صورت روزانه محاسبه می‌گردد. پس از این‌که درصد ظرفیت استفاده شده در هر سیرگاه مشخص گردید، بیشترین میزان استفاده از ظرفیت در سیرگاه، مشخص‌کننده میزان استفاده از ظرفیت خط است. در ادامه به تشریح ورودی‌ها، نحوه محاسبه سرفاصله زمانی در حالت‌های مختلف و محاسبه ظرفیت استفاده شده هر یک از این مراحل پرداخته شده است.

۳-۱- گروه‌بندی قطارها بر اساس زمان سیر

از جمله اطلاعات ورودی مورد نیاز، جدول زمانی سیر قطارها می‌باشد، که شامل زمان سیر قطارها و تعداد قطارهای هر یک از

Archive of SID
www.SID.ir

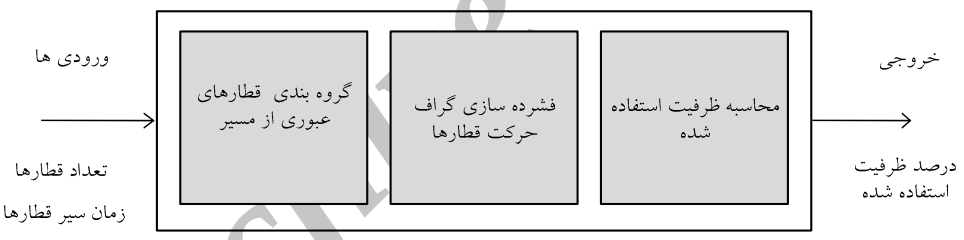
گروه‌ها است. بر اساس داده‌های آماری و گراف حرکت قطارها در خطوط، تعداد قطارهای هر گروه قطار در هر سیرگاه بر اساس زمان سیر، مشخص شده و در محاسبات بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

تعداد قطارهای هر گروه با n_j و n_i نشان داده شده است. پارامترهای زمانی برای خطوط مختلف به صورت جداگانه برآورد می‌گردد. t_b نشان‌دهنده زمان آزادسازی سیرگاه و t_a، نشان‌دهنده زمان اخذ مجوز ورود به سیرگاه برای قطاری است که می‌خواهد از حالت توقف وارد سیرگاه گردد. $t_{l1(\overline{AB})}$ نشان‌دهنده زمان سیر قطارها در جهت رفت و $t_{l2(\overline{BA})}$ نشان‌دهنده زمان سیر قطارها در جهت برگشت است. بنابراین، محاسبه ظرفیت برای خطوط مختلف با توجه به مقادیر پیش فرض متفاوت انجام می‌گیرد.

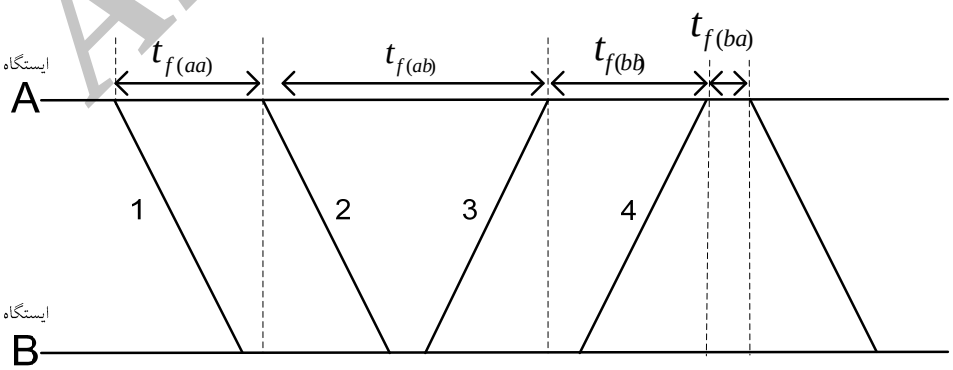
بر اساس فیش UIC405، گروه‌بندی قطارها به نحوی صورت می‌گیرد، که حداکثر چهار گروه داشته باشد. گروه‌بندی بر اساس زمان سیر قطارها و تعداد قطارها انجام گرفته است (International Union of Railways, 1979). برای هر یک از گروه‌ها مقدار متوسط سیری در نظر گرفته می‌شود. برای ساده‌تر کردن محاسبات، قطارهایی که کم و بیش دارای مدت زمان سیر یکسانی هستند، در یک گروه دسته‌بندی می‌شوند. لازم به ذکر است منظور از گروه قطارها، قطارهایی با زمان سیر مشابه و هم جهت است.

۳-۲- فشرده‌سازی گراف حرکت قطارها

به منظور محاسبه ظرفیت استفاده شده از مسیر، زمان اشغالی مسیر در حالت گراف فشرده محاسبه می‌گردد. ظرفیت مسیر استفاده شده توسط جدول‌های زمانی تهیه شده را می‌توان با نزدیک کردن پلکان زمان بلاکینگ تا حد امکان و به صورت مجازی نمایش داد. البته این کار بدون در نظر گرفتن زمان‌های حائل و بدون تغییر دادن ترتیب قطارها صورت می‌گیرد. این روش، فشرده‌سازی نامیده می‌شود. بنابراین، برای فشرده‌سازی گراف حرکت قطارها نیازمند محاسبه حداقل سرفاصله زمانی بین حرکت قطارها هستیم. برای محاسبه سرفاصله زمانی، ٤ حالت مختلف می‌تواند رخ دهد که در شکل ٤ نشان داده شده است.



شکل ۳. متدولوژی محاسبه ظرفیت استفاده شده



شکل ٤. حالات مختلف قطارهای قبلی و بعدی در نمودار مکان – زمان (یقینی و لسان، ۱۳۸۹)

Archive of SID
www.SID.ir

در هریک از این حالت‌ها، محاسبه سرفاصله زمانی قطارها متفاوت بوده و بر اساس حالت ورود قطار دوم به سیرگاه، به صورت جدول ۲ محاسبه می‌گردد. در جدول زیر tf نشان‌دهنده زمان سرفاصله زمانی برای حالات مختلف است. a، نشان‌دهنده مسیر رفت از A به B و b نشان‌دهنده مسیر برگشت از B به A است. در جدول زیر نحوه محاسبه سرفاصله زمانی در هر حالت نشان داده شده است.

در نهایت میانگین سرفاصله زمانی قطارها بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$t_{fm} = \frac{\sum(n_i \times n_j \times t_{fij})}{\sum(n_i \times n_j)} \qquad (۱)$$

که در آن: i نشان‌دهنده قطار قبلی، j نشان دهنده قطار بعدی، n_j و n_i نشان‌دهنده تعداد قطارهای هر گروه از قطارها و t_{fij} سرفاصله زمانی بین گروه قطارها را نشان می‌دهد. t_{fm} نشان‌دهنده میانگین سرفاصله زمانی قطارها است.

همان‌طور که گفته شد، آنچه در رابطه UIC406 نامشخص است، این است که منظور از قطعه خط برای محاسبه ظرفیت مشخص نیست. رویکردی که در این مطالعه ارایه شده، فشرده‌سازی گراف در ایستگاه‌ها است. در واقع تعداد قطعات با تعداد سیرگاه‌ها در مسیر برابر می‌شود. مسیر ریلی، به قطعات کوچک‌تر و مسیرهای کوچک‌تر تقسیم می‌گردند و ظرفیت هر یک از مسیرها بر اساس سیرگاه و قطعات بحرانی محاسبه می‌گردد و ظرفیت برای قطعات، مسیر، نواحی و شبکه قابل ارایه خواهد بود. پایه محاسبه فشرده‌سازی یک روز نماینده در طول دوره پیک با حداقل ۲ ساعت طول زمانی است (یقینی و انجمن علمی دانشکدهٔ مهندسی راه آهن، ۱۳۸۹).

با محاسبه سرفاصله زمانی متوسط قطارها و بر اساس کل تعداد قطارهای عبوری از سیرگاه، زمان اشغالی بر مبنای گراف فشرده از رابطه شماره ۲ محاسبه می‌گردد، که در آن N نشان‌دهنده کل تعداد قطارهای عبوری در هر سیرگاه است.

$$Occupation\ Time = N \times t_{fm} \qquad (۲)$$

۳-۳- محاسبه ظرفیت استفاده شده

در روش استفاده شده، اندازه‌گیری ظرفیت براساس فشرده‌سازی مسیر حرکت قطارها در یک محدوده مشخص بوده تا بتوان میزان اشغال (سهم) ظرفیت هر قطار در آن بخش از مسیر را به‌دست آورد. اختلاف بین سرفاصله زمانی واقعی و کمترین سرفاصله زمانی قابل قبول، زمان حایل نامیده می‌شود. هر اندازه زمان حایل بزرگ‌تر در نظر گرفته شود، ظرفیت محاسبه شده کوچک‌تر شده و زمان‌های تأخیرات کاهش می‌یابد.

پس از محاسبه زمان اشغالی سیرگاه، درصد ظرفیت استفاده شده در هر یک از خطوط سیرگاه‌ها (f) با استفاده از رابطه شماره ۳ محاسبه می‌گردد. اگر ظرفیت را بخواهیم برای یک دوره یک روزه محاسبه نماییم، مقدار پنجره زمانی ۱۵ را برابر با ۱۴۴۰ دقیقه در نظر می‌گیریم. اگر بخواهیم ظرفیت را بر اساس ساعت اوج ترافیک محاسبه نماییم، مقدار پنجره زمانی را برابر با ۶۰ دقیقه در نظر می‌گیریم. اگر در بعضی از ساعات، مسیر برای عملیات تعمیر و نگهداری مسدود باشد، زمان عملیات تعمیر و نگهداری از ۱۴۴۰ دقیقه کم می‌گردد.

$$cc^f = \frac{Occupation\ Time}{Time\ Window} * 100 \qquad (۳)$$

پس از مشخص شدن ظرفیت در هر یک از خطوط سیرگاه‌ها که می‌تواند تک جهته یا دو جهته باشد، ظرفیت در آن سیرگاه برابر با حداکثر میزان استفاده از ظرفیت در هریک از خطوط است. بنابراین درصد ظرفیت استفاده شده در سیرگاه i با استفاده از رابطه (٤) محاسبه می‌گردد، که در آن f نشان‌دهنده خط مورد بررسی در هر سیرگاه است.

$$cc^i_{LineSection} = Max\,(cc^1, cc^2, ..., cc^f) \qquad (٤)$$

زمانی که تمامی قطعات خطوط مورد ارزیابی قرار گرفتند، میزان استفاده از ظرفیت برابر با حداکثر میزان استفاده از ظرفیت قطعات سیرگاه خواهد بود، که دلیل آن این است که اکثر قطارها در بیشتر از یک سیرگاه تردد می‌نمایند و قطعه خطی که برای زمان بیشتری اشغال باشد، برای بهره‌برداری از قطارها بیشتر عامل محدود کننده خواهد بود. برای خطوط راه آهن با بیش از یک خط و یک جهت بهره‌برداری، ظرفیت کل برای هر دو جهت برابر با خطی با

Archive of SID
www.SID.ir

حداکثر میزان استفاده از ظرفیت خواهد بود. قطارها معمولاً در هر دو جهت تردد می‌نمایند، و معمولاً ترافیک عبوری از هر دو جهت یکسان می‌باشد، بنابراین، خط با ظرفیت پایین‌تر عامل محدود کننده و تعیین کننده خواهد بود.

بر این اساس درصد ظرفیت استفاده شده در هر یک از سیرگاه‌های خطوط با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد، که در آن a نشان‌دهنده کل تعداد سیرگاه‌ها در هر مسیر است.

(۵)

$$cc_{Route} = Max\,(cc^{1}_{LineSection}, cc^{2}_{LineSection}, ..., cc^{a}_{LineSection})$$

زمانی که میزان استفاده از ظرفیت برای تمامی قطعات خطوط محاسبه گردید، به صورت مجزا، ظرفیت کل مسیر راه آهن قابل محاسبه است. پس از این مرحله به منظور ارزیابی میزان استفاده از ظرفیت و شناسایی گلوگاه‌های مسیر، بر اساس توصیه فیش UIC406 که در جدول ۳ نشان داده شده است عمل می‌نماییم. جدول ۳ مقادیر بحرانی ظرفیت استفاده شده را بر اساس نوع ترافیک عبوری از مسیر، که می‌تواند ترافیک مسافری اختصاصی حومه شهری، خطوط پرسرعت اختصاصی و خطوط با ترافیک باری و مسافری باشد و دوره زمانی مورد مطالعه که می‌تواند ساعت اوج یا روزانه باشد، را نشان می‌دهد. با هدف حفظ کیفیت بهره‌برداری، ظرفیت استفاده شده از مسیر ریلی نباید از مقادیر ارایه شده در جدول (۳) بیشتر شود. بدین معنی که، میانگین زمان حایل بین دو قطار نباید از حداقل میانگین سرفاصله زمانی خط کمتر باشد. البته امکان استفاده از نسبت بزرگتر اشغال ظرفیت در مسیرهای راه آهن تک خطه با فاصله زیاد بین ایستگاه‌ها و در مسیرهای دو خطه با تفاوت سرعت اندک قطارها (مانند خطوط مسافری سریع حومه شهری)، وجود دارد (یقینی و انجمن علمی دانشکدهٔ مهندسی راه آهن، ۱۳۸۹).

در صورتی که مقدار ظرفیت استفاده شده مسیر یا سیرگاه برابر یا بزرگ‌تر از مقادیر ارایه شده در جدول باشد، آن سیرگاه و مسیر به عنوان گلوگاه مسیر ریلی شناخته می‌شود و باید راه‌کاری برای افزایش ظرفیت اندیشید.

جدول ۲. محاسبه حالت‌های مختلف سرفاصله زمانی

حالت قطار قبلی	حالت قطار بعدی	سرفاصله زمانی
رفت	رفت	$t_{f(aa)} = t_{l1(\overline{AB})} + t_b + t_a$
برگشت	رفت	$t_{f(ba)} = t_b + t_a$
رفت	برگشت	$t_{f(ab)} = t_{l1(\overline{AB})} + t_b + t_a + t_{l2(\overline{BA})}$
برگشت	برگشت	$t_{f(bb)} = t_b + t_a + t_{l2(\overline{BA})}$

جدول ۳. محدودیت‌های پیشنهادی ظرفیت استفاده شده (یقینی و انجمن علمی دانشکدهٔ مهندسی راه آهن، ۱۳۸۹)

نوع ترافیک	ساعت اوج	دوره روزانه
ترافیک مسافری اختصاصی حومه شهری	٪۸۵	٪۷۰
خطوط پرسرعت اختصاصی	٪۷۵	٪۶۰
خطوط با ترافیک باری و مسافری	٪۷۵	٪۶۰

Archive of SID
www.SID.ir

ظرفیت بهینه در هر یک از سیرگاه‌ها با حفظ نسبت نوع قطارهای عبوری از مسیر، در نظر گرفتن رابطه (۳) و جدول ۳ قابل محاسبه است. بدین صورت که بر اساس نوع ترافیک و دوره زمانی مورد مطالعه، محدودیت ظرفیت استفاده شده cc^f مشخص گردیده و بر اساس مقدار میانگین سرفاصله زمانی متوسط محاسبه شده، حداکثر تعداد قطارهای عبوری با حفظ شرایط بهره‌برداری مطلوب بر اساس رابطه ٦ قابل محاسبه است.

$$N = \frac{cc^f \times TimeWindow}{t_{fm} \times 100} \qquad (٦)$$

٤- مطالعه موردی

در این بخش به محاسبه درصد ظرفیت استفاده شده در مسیر دو خطه تهران- مشهد پرداخته شده است. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، این مسیر شامل ٤٩ ایستگاه و به طول ۹۲۵/٦ کیلومتر است.

اطلاعاتی از قبیل زمان سیر قطار در سیرگاه، انواع قطارها، طول سیرگاه به کمک کارشناسان اداره کل سیر و حرکت راه آهن جمهوری اسلامی ایران جمع‌آوری شده و مورد استفاده قرار گرفته است. جدول ٤ تعداد قطارها در مسیر تهران - مشهد را بر اساس سیرگاه عبوری و تعداد قطارها نشان داده است.

مفروضات مسئله به صورت زیر در نظر گرفته شده است. پایه محاسبه فشرده‌سازی یک روز نماینده در طول دوره ترافیک اوج است.

- برای مسیر ٤ ساعت، زمان مسدودی در نظر گرفته شده است.
- در محاسبات علاوه بر قطارهای مسیر تهران- مشهد، قطارهایی که از محورهای دیگر وارد این مسیر می‌شوند در نظر گرفته شده است، که در مجموع هفت نوع قطار در هر جهت از این مسیر عبور می‌نمایند.
- در مورد برخی قطارها که سفرهای منظم و همه‌روزه نداشتند، سعی بر آن بوده که تعداد قطارها به صورت میانگین هفته‌ای در نظر گرفته شود. این امر هم در مورد قطارهای باری و هم در مورد قطارهای مسافری صدق می‌کند.

طبق متدولوژی ارایه شده، محاسبات برای هر سیرگاه به تفکیک انجام شده است. ابتدا بر اساس داده‌های ورودی، قطارها مطابق جدول ۵، بر اساس زمان سیر به چهار گروه تقسیم می‌شوند. در این مطالعه زمان‌های سیر در سیرگاه‌ها بین ۵ تا ۳۳ دقیقه متغیر بوده است که این بازه به ٤ زیر بازه تقسیم گردیده است. در تعیین این زیر بازه‌ها فراوانی قطارهای عبوری در نظر گرفته شده است. این ٤ بازه، طوری در نظر گرفته شده است که تعداد قطارهای مربوط به هر یک از ٤ گروه تقریباً با هم برابر باشند. برای تعیین زمان سیر هر گروه، میانگین زمان سیرهای آن گروه، به عنوان نماینده گروه قطارها در محاسبات در نظر گرفته شده است. قطارهایی با زمان سیر ۹ و کمتر از ۹ دقیقه در هر سیرگاه، در گروه قطارهایی با زمان سیر ۷ دقیقه، قطارهایی با زمان سیر بین ۹/۵ تا ١٤ در گروه قطارهایی با زمان سیر ۱۲ دقیقه، قطارهایی با زمان سیر بین ١٤/۵ تا ۱۹ در گروه قطارهایی با زمان سیر ۱۷ دقیقه، قطارهایی با زمان سیر بین ١٤/۵ و بیشتر در گروه قطارهایی با زمان سیر ۲٦ دقیقه، در نظر گرفته شده است.

شکل ۵. مسیر دو خطه تهران- مشهد

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ٤. ترافیک فعلی روزانه قطارها

سیرگاه	ترافیک فعلی (تعداد قطار در روز) تهران به مشهد	ترافیک فعلی (تعداد قطار در روز) مشهد به تهران	سیرگاه	ترافیک فعلی (تعداد قطار در روز) تهران به مشهد	ترافیک فعلی (تعداد قطار در روز) مشهد به تهران
ری – تهران	۳۷	۳۶	بسطام – شاهرود	۳۲	۳۲
بهرام – ری	۳۷	۳۶	شیرین چشمه – بسطام	۳۲	۳۲
ورامین – بهرام	۳۹	۳۶	گیلان – شیرین چشمه	۳۲	۳۲
پیشوا – ورامین	۳۹	۳۶	بکران – گیلان	۳۲	۳۲
ابردژ– پیشوا	۳۵	۳۶	جهان آباد– بکران	۳۲	۳۲
کویر – ابردژ	۳۵	۳۲	ابریشم– جهان آباد	۳۲	۳۲
گرمسار – کویر	۳۵	۳۲	جاجرم – ابریشم	۳۲	۳۲
یاتری – گرمسار	۳۲	۳۳	آزادور – جاجرم	۳۲	۳۲
ده نمک– یاتری	۳۲	۳۳	سنخواست– آزادور	۳۲	۳۲
سرخدشت – ده نمک	۳۲	۳۳	جوین– سنخواست	۳۲	۳۲
لاهور– سرخدشت	۳۲	۳۳	نقاب – جوین	۳۲	۳۲
لاهور – بیابانک	۳۲	۳۳	اسفراین – نقاب	۳۳	۳۲
سمنان – بیابانک	۳۲	۳۳	بیهق – اسفراین	۳۳	۳۲
میاندره – سمنان	۳۲	۳۲	سبزوار – بیهق	۳۳	۳۲
آبگرم – میاندره	۳۲	۳۲	فردوس – سبزدار	۳۳	۳۲
گرداب – آبگرم	۳۲	۳۲	عطار – فردوس	۳۳	۳۲
هفتخوان – گرداب	۳۲	۳۲	نیشابور – عطار	۳۳	۳۲
لارستان–هفتخوان	۳۲	۳۲	خیام – نیشابور	۳۲	۳۵
امروان – لارستان	۳۲	۳۲	کاشمر – خیام	۳۲	۳۵
سرخده – امروان	۳۲	۳۲	ابومسلم – کاشمر	۳۶	۳۵
دامغان – سرخده	۳۲	۳۲	تربت – ابومسلم	۳۶	۳۹
زرین – دامغان	۳۲	۳۲	فریمان – تربت	۳۶	۳۹
کلاتخوان – زرین	۳۲	۳۲	سلام – فریمان	۳۶	۳۷
شاهرود–کلاتخوان	۳۲	۳۲	مشهد – سلام	۳۶	۳۷

جدول ۵. گروه‌بندی قطارهای عبوری

گروه‌ها (دقیقه)	زمان سیر گروه (دقیقه)
۹/۰ و کمتر	۷
۱٤/۰ – ۹/۵	۱۲
۱۹/۰ – ۱٤/۵	۱۷
۱۹/۵ و بیشتر	۲٦

Archive of SID
www.SID.ir

سپس سرفاصله زمانی برای هر یک از سیرگاه‌های مسیر در جهت رفت و برگشت بر اساس ترافیک عبوری محاسبه گردیده است. بر اساس مقادیر سرفاصله زمانی، میانگین سرفاصله زمانی و زمان اشغالی سیرگاه محاسبه شده است. به طور مثال در سیرگاه تهران – ری به طرف مشهد، ۳۳ قطار با زمان سیر متوسط ۱۲ دقیقه و ٤ قطار با زمان سیر متوسط ۱۷ دقیقه از سیرگاه عبور نموده‌اند. سرفاصله زمانی متوسط بر اساس رابطه (۱) محاسبه گردیده و برابر با ۱۳/٥٤ دقیقه بوده و سیرگاه بر اساس رابطه (۲)، ۵۰۰/۹۸ دقیقه در طول روز اشغال بوده است. در نهایت درصد ظرفیت استفاده شده بر اساس رابطه (۳) محاسبه و برابر با ٤۲ درصد گردیده که در جدول ٦ به صورت خط دار نشان داده شده است. محاسبات سایر سیرگاه‌ها به‌طور مشابه انجام شده است. در جدول ٦ ظرفیت استفاده شده برای همه سیرگاه‌های مسیر نشان داده شده است.

جدول ٦. ظرفیت استفاده شده در هر یک از سیرگاه‌های مسیر

سیرگاه	تهران به مشهد (٪) CC^1	مشهد به تهران (٪) CC^2	هر دو جهت (٪) $CC^i_{LineSection}$	سیرگاه	تهران به مشهد (٪) CC^1	مشهد به تهران (٪) CC^2	هر دو جهت (٪) $CC^i_{LineSection}$
ری– تهران	٤۲	٥۳	٥۳	بسطام – شاهرود	۳۸	۳۸	۳۸
بهرام – ری	٤٤	٥۳	٥۳	شیرین چشمه – بسطام	۳٦	۳۷	۳۷
ورامین – بهرام	٤٦	٥٤	٥٤	گیلان – شیرین چشمه	۳۷	۳۷	۳۷
پیشوا – ورامین	۲۸	۳٦	۳٦	بکران – گیلان	٤٦	٤۳	٤٦
ابردژ– پیشوا	۲۸	٤۲	٤۲	جهان آباد – بکران	۳٦	٤۷	٤۷
کویر – ابردژ	۳۰	٥۱	٥۱	ابریشم – جهان آباد	۳۷	٥۲	٥۲
گرمسار – کویر	٥۰	٥۱	٥۱	جاجرم – ابریشم	۳۷	٥۱	٥۱
یاتری – گرمسار	۳٥	۳٦	۳٦	آزادور – جاجرم	۳۷	۳۷	۳۷
ده نمک– یاتری	۳٦	۳۷	۳۷	سنخواست – آزادور	۳۷	۳۷	۳۷
سرخدشت – ده نمک	۳٥	۳٦	۳٦	جوین – سنخواست	۳۷	۳۷	۳۷
لاهور – سرخدشت	۳۷	۳۷	۳۷	نقاب – جوین	۳۸	٥۱	٥۱
لاهور – بیابانک	۳۷	۳۷	۳۷	اسفراین – نقاب	۳۸	٥۲	٥۲
سمنان – بیابانک	۳٦	۳۹	۳۹	بیهق – اسفراین	۳۸	٤۸	٤۸
میاندره – سمنان	۳۸	۳۷	۳۹	سبزوار – بیهق	٤٦	٥۲	٥۲
آبگرم – میاندره	۳۷	۳٦	۳۷	فردوس – سبزدار	٤٦	٤٦	٤٦
گرداب – آبگرم	۳۷	۳۹	۳۹	عطار – فردوس	٤۷	٥۲	٥۲
هفتخوان – گرداب	٥۰	٤۹	٥۰	نیشابور – عطار	۷۳	۷۳	۷۳
لارستان – هفتخوان	۳۲	۳۷	۳۷	خیام – نیشابور	٥۰	٤۰	٥۰
امروان – لارستان	۳۷	۷۰	۷۰	کاشمر – خیام	٥۰	٤۰	٥۰
سرخده – امروان	۳٦	۳٦	۳٦	ابومسلم – کاشمر	٤۰	٤٤	٤٤
دامغان – سرخده	۳٦	۳۹	۳۹	تربت – ابومسلم	٤۱	٤٤	٤٤
زرین – دامغان	۳٦	۳۷	۳۷	فریمان – تربت	٤۱	٤٤	٤٤
کلاتخوان – زرین	۳۷	۳۷	۳۷	سلام – فریمان	٤۰	٤۱	٤۱
شاهرود – کلاتخوان	۳۸	۳۸	۳۸	مشهد – سلام	٥٦	٤٤	٥٦

Archive of SID
www.SID.ir

بر اساس نتایج حاصل از محاسبات و محدودیت‌های پیشنهادی، ظرفیت استفاده شده ارایه شده در جدول ۳، مسیر دو خطه تهران- مشهد دارای سیرگاه بحرانی عطار- نیشابور در هر دو جهت و سیرگاه امروان- لارستان در جهت برگشت گلوگاه می‌باشد. زیرا در این دو سیرگاه میزان استفاده از ظرفیت استفاده شده بیشتر از ٦٠ درصد است. ظرفیت استفاده شده کل خط برابر با بیشترین مقداری است که به‌دست می‌آید و سیرگاه مربوطه، سیرگاه بحرانی محسوب می‌گردد. بنابراین، ظرفیت استفاده شده از مسیر(CC_{Route}) برابر با ٧٣ درصد است. در شکل ٦ روند تغییرات ظرفیت استفاده شده در این مسیر نشان داده شده است.

کمترین مقدار ظرفیت استفاده شده مربوط به سیرگاه پیشوا – ورامین و مقدار آن برابر با ٣٦ درصد است.

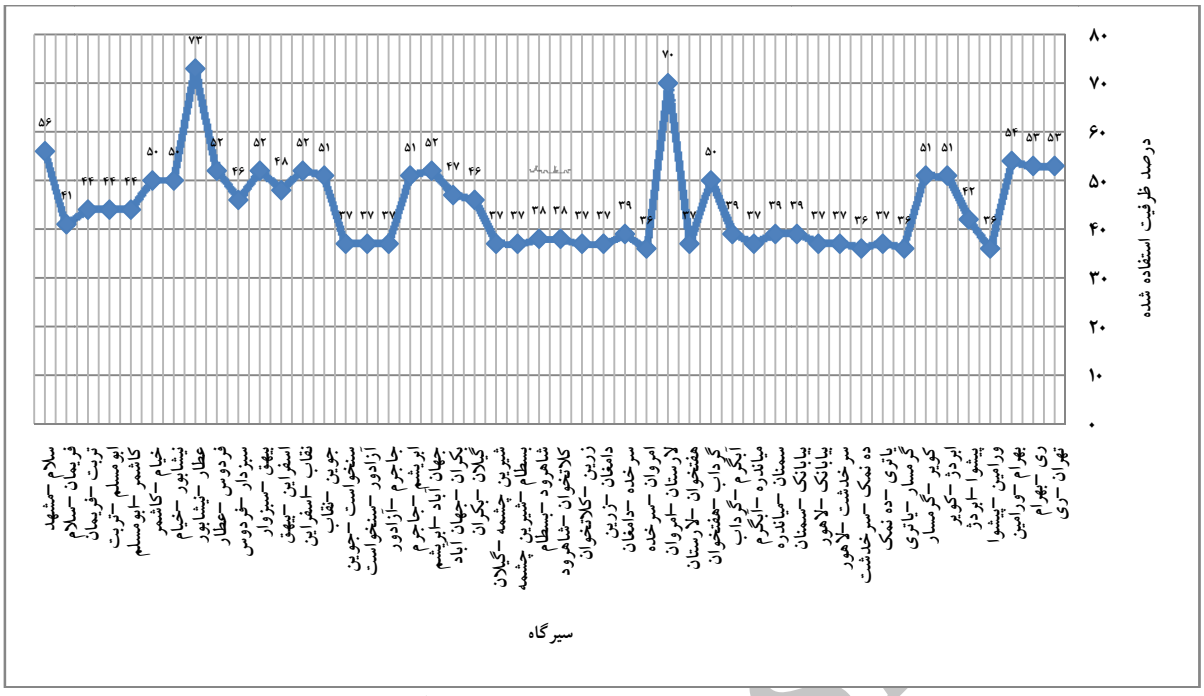
در ادامه به محاسبه ظرفیت بهینه در مسیر تهران- مشهد پرداخته شده است. به طور مثال در سیرگاه تهران – ری به طرف مشهد، ظرفیت بهینه برای سیرگاه برابر با ٥٣ قطار در طول روز است که بر اساس رابطه (٦) و در نظر گرفتن ٦٠ درصد محدودیت ظرفیت استفاده شده بر اساس جدول ٣، محاسبه گردیده است و در جدول ٧ به صورت خط دار نشان داده شده است. محاسبات سایر سیرگاه‌ها به طور مشابه انجام شده است. در جدول ٧ ظرفیت بهینه برای همه سیرگاه‌های مسیر نشان داده شده است.

جدول ٧. ظرفیت بهینه در هر یک از سیرگاه‌ها

سیرگاه	تهران به مشهد (تعداد قطار در روز)	مشهد به تهران (تعداد قطار در روز)	سیرگاه	تهران به مشهد (تعداد قطار در روز)	مشهد به تهران (تعداد قطار در روز)
ری – تهران	٥٣	٤٢	بسطام – شاهرود	٥٢	٥٢
بهرام – ری	٥١	٤٣	شیرین چشمه – بسطام	٥٣	٥٣
ورامین – بهرام	٥١	٤٤	گیلان – شیرین چشمه	٥٢	٥٣
پیشوا – ورامین	٨٥	٦٥	بکران – گیلان	٤٢	٤٥
ابردژ– پیشوا	٧٨	٥١	جهان آباد–بکران	٥٣	٤١
کویر – ابردژ	٧١	٤٢	ابریشم– جهان آباد	٥٢	٣٨
گرمسار – کویر	٤٣	٤٢	جاجرم – ابریشم	٥٢	٣٨
یاتری – گرمسار	٥٥	٥٤	آزادور – جاجرم	٥٢	٥٢
ده نمک– یاتری	٥٤	٥٢	سنخواست–آزادور	٥٣	٥٣
سرخدشت – ده نمک	٥٥	٥٤	جوین–سنخواست	٥٢	٥٢
لاهور– سرخدشت	٥٢	٥٣	نقاب – جوین	٥٢	٣٩
لاهور – بیابانک	٥٢	٥٢	اسفراین – نقاب	٥٢	٣٩
سمنان – بیابانک	٥٤	٥٠	بیهق – اسفراین	٥٣	٤٢
میاندره – سمنان	٥٢	٥٢	سبزوار – بیهق	٤٤	٣٩
آبگرم – میاندره	٥٣	٥٤	فردوس – سبزدار	٤٤	٤٤
گرداب – آبگرم	٥٣	٥٠	عطار – فردوس	٤٣	٣٩
هفتخوان – گرداب	٣٩	٤٠	نیشابور – عطار	٢٧	٢٧
لارستان- هفتخوان	٦٠	٥٣	خیام – نیشابور	٣٩	٤٨
امروان – لارستان	٥٣	٢٨	کاشمر – خیام	٣٩	٤٩
سرخده – امروان	٥٥	٥٥	ابومسلم – کاشمر	٥٤	٤٩
دامغان – سرخده	٥٥	٥٠	تربت – ابومسلم	٥٤	٤٩
زرین – دامغان	٥٤	٥٣	فریمان – تربت	٥٤	٤٩
کلاتخوان – زرین	٥٢	٥٢	سلام – فریمان	٥٤	٥٣
شاهرود–کلاتخوان	٥٢	٥٢	مشهد – سلام	٣٩	٥٠

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ٦. ظرفیت استفاده شده در هر یک از سیرگاه‌ها

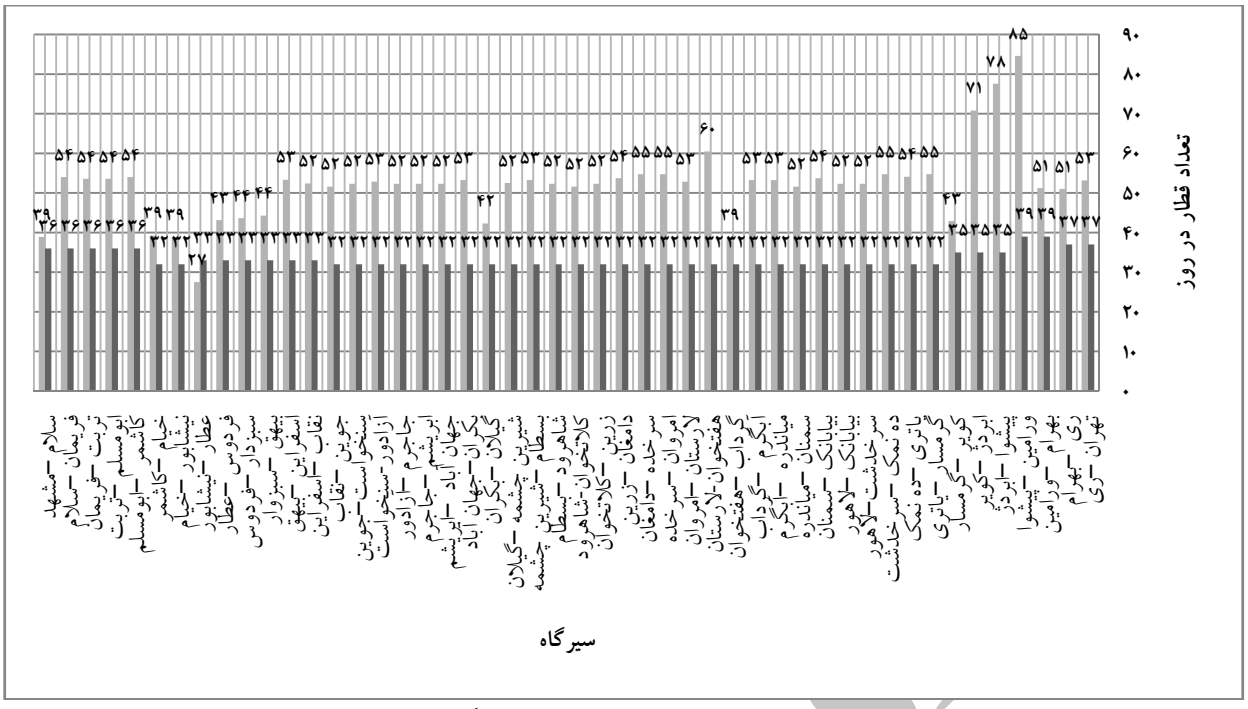
ظرفیت بهینه، میزان افزایش ظرفیت را با ثابت در نظر گرفتن نسبت انواع قطارها به صورت روزانه نشان می‌دهد. مقایسه ظرفیت بهینه با رنگ روشن و ترافیک فعلی با رنگ تیره در هریک از سیرگاه‌ها از تهران به مشهد و مشهد به تهران در شکل‌های ۷ و ۸ نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل‌ها نشان داده شده است، تنها در گلوگاه‌های مسیر، یعنی سیرگاه‌های بحرانی عطار- نیشابور و امروان- لارستان، ترافیک فعلی روزانه قطارها از ظرفیت بهینه بیشتر است. در این مقاله بر اساس توصیه UIC، ظرفیت استفاده شده ٦٠ درصد به عنوان حد قابل قبول تاخیرات در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن این حد قابل قبول ظرفیت، ظرفیت بهینه در این سیرگاه در هر جهت برابر با ۲۷ قطار در روز گردیده است. کمتر بودن این مقدار به دلیل زمان سیر بالای عبور از سیرگاه است که منجر به افزایش حداقل سرفاصله زمانی قطارها گردیده است (رابطه ٦) و به معنای این نیست که قطار بیشتری را نمی‌توان عبور داد. عبور دادن تعداد قطارهای بیشتر از ظرفیت بهینه در مسیر منجر به کاهش مطلوبیت بهره‌برداری و افزایش تأخیرات می‌گردد، چنان‌چه ظرفیت استفاده شده محاسبه شده در همین سیرگاه در شرایط فعلی با عبور حدود ۳۳ قطار در روز، برابر با ۷۳ درصد گردیده است که تأیید کننده کارایی روش ارایه شده است.

برای افزایش ترافیک فعلی بر اساس نتایج به‌دست آمده، در مسیر تهران به مشهد باید راه‌کارهایی برای افزایش ظرفیت سیرگاه نیشابور به عطار و در مسیر مشهد به تهران باید راه‌کارهایی برای افزایش ظرفیت سیرگاه‌های بحرانی عطار- نیشابور و امروان- لارستان برگزید.

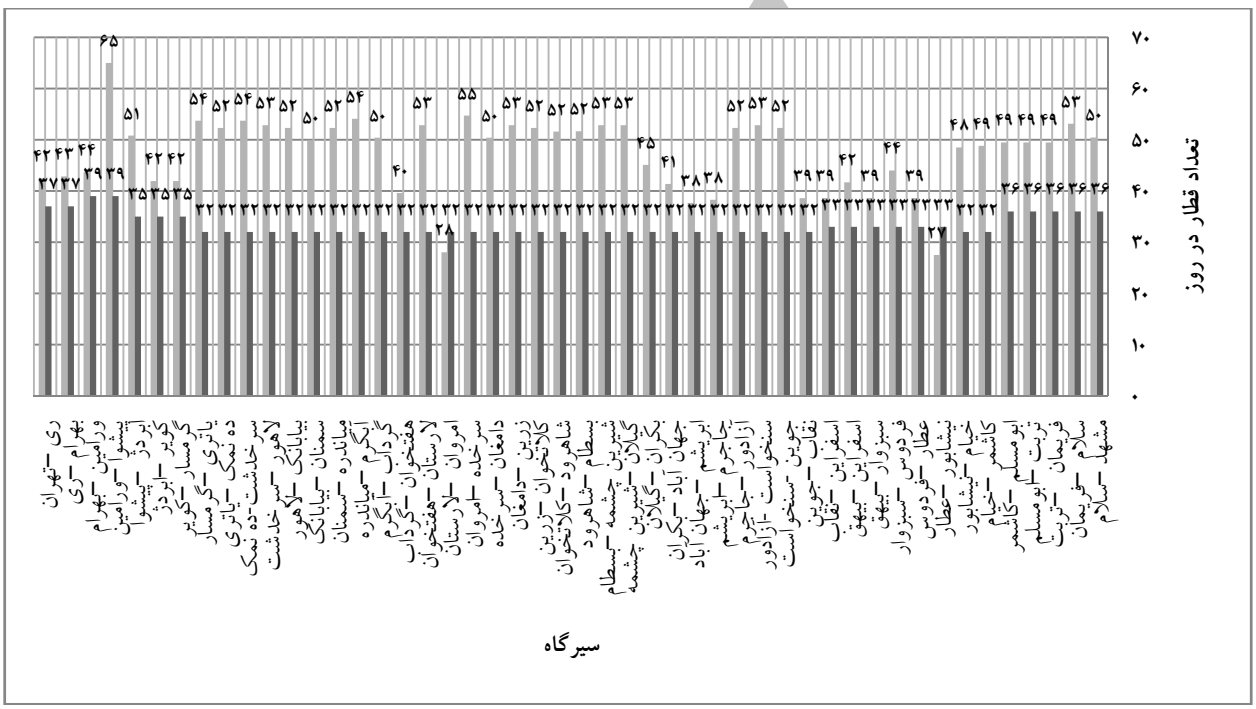
پنج روش اصلی عملیات عمرانی و اجرایی جدید، ارتقای ویژگی‌ها و بهبود فنی خطوط، بهبود کیفیت بهره‌برداری، بهبود فنی و ارتقای سامانه‌های علائم و ارتباطات و بهبود فنی و ارتقای نیروی کشش برای افزایش ظرفیت مسیر ریلی امکان‌پذیر است. برای افزایش ظرفیت، عملی‌ترین و اقتصادی‌ترین اقداماتی که می‌توان انجام داد، ارتقای روش‌های بهره‌برداری از خط است. روش‌های عمرانی، پرهزینه‌ترین راه برای افزایش ظرفیت خطوط ریلی هستند و عموماً زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند که استفاده از دیگر روش‌ها، جواب‌گوی تقاضای پیش‌بینی شده نباشد (یقینی و لسان، ۱۳۸۹).

از جمله راه‌کارهای بهره‌برداری، کاهش سرفاصله زمانی حرکت قطارها است. برای دست‌یابی به این هدف، راه‌کارهایی از قبیل همگون‌سازی ترافیک عبوری قطارهای پرسرعت، گروه‌بندی قطارها بر اساس سرعت در مسیرهای یک طرفه و دوطرفه، بلاک‌بندی و بهبود سیگنالینگ مسیر و بهینه‌سازی زمان‌بندی سیر قطارها امکان‌پذیر است.

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۷. ظرفیت بهینه و ترافیک فعلی در هر یک از سیرگاه‌ها به سمت مشهد



شکل ۸. ظرفیت بهینه و ترافیک فعلی در هر یک از سیرگاه‌ها به سمت تهران

www.SID.ir

۵- نتیجه‌گیری

رابطه UIC406، نرخ بهره‌برداری از مسیر را محاسبه کرده و برای محاسبه ظرفیت از پارامتر اشغالی خطوط استفاده می‌نماید. آنچه در رابطه UIC406 باید برای هر راه آهن مشخص گردد، نقطه فشرده‌سازی گراف است. در این مقاله در متدولوژی ارایه شده، نقاط فشرده‌سازی برنامه حرکت قطارها برای محاسبه ظرفیت استفاده شده در راه آهن ایران ارایه شده است. در این متدولوژی، ظرفیت براساس فشرده‌سازی مسیر حرکت قطارها در داخل یک محدوده مشخص بوده تا بتوان میزان اشغال (سهم) ظرفیت هر قطار در آن بخش از مسیر را به‌دست آورد. مزیت درصد اشغالی نسبت به تعداد قطارهای عبوری از خط، ارایه شناخت بهتر از وضعیت خط است، زیرا در ترافیک‌های ناهمگون، ظرفیت بر اساس نوع و نسبت قطارهای عبوری متفاوت خواهد بود. در انتها، ظرفیت استفاده شده و بهینه مسیر تهران – مشهد محاسبه گردیده است. مسیر تهران- مشهد، دارای دو سیرگاه بحرانی عطار- نیشابور و امروان- لارستان است. ظرفیت استفاده شده از مسیر برابر با ۷۳ درصد است.

٦- پی‌نوشت‌ها

1. Node
2. Link
3. Line
4. Route
5. Station
6. Capacity
7. Capacity consumption
8. Compressing timetable
9. Headway
10. Analytical
11. Simulation
12. Parametric
13. Optimization
14. Block
15. Time Window

۷- مراجع

- نیکو، ن. (۱۳۹۰) "ارایه مدل بهینه‌سازی برای محاسبه و ارزیابی ظرفیت در شبکه راه آهن"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
- یقینی، م. و انجمن علمی دانشکدهٔ مهندسی راه آهن (ترجمه) (۱۳۸۹) "زمان‌بندی و سیر و حرکت در راه آهن"، انتشارات پیشرو فناوری قائد.
- یقینی، م. و لسان، ج. (۱۳۸۹) "برنامه‌ریزی عملیات حمل و نقل ریلی"، ایران: انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.
- Abril, M., Barber, F., Ingolotti, L., Salido, M., Tormos, P. and Lova, A. (2008) "An assessment of railway capacity", Transportation Research Part E 44, pp. 774–806.
- Arkinson, T. (1996) "Rail Transit capacity", Transportation Research Board , National Research Council, Transport Consulting Limited Vancouver B.C. Canada, with Ian Fisher, University of British Columbia, Washington, D.C.
- Buri, Jean-Daniel, Tzieropoulos, Panos. (2009) "Increasing line capacity with constant infrastructure", Swiss Transport Research Conference STRC.
- De Kort, A. F., Heidergott, B. and Ayhan, H. (2003) "A probabilistic (max, +) approach for determining railway infrastructure capacity". European Journal of Operational Research 148, pp. 644–661.
- Gasparik, J. (2007) "Estimation of the track line capacity", Railway Transport and Logestic, 2, pp. 7-12.
- Harrod, S. (2007) "Optimal scheduling of mixed speed trains on a single track line". Tranportation Science, pp. 1-17.
- Harrod, S. (2007) "Railway capacity management and planning", Ph.D. Thesis, University of Cincinnati.
- Harrod, S. (2009) "Capacity factors of a mixed speed railway network", Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review 45(5), pp. 830-841.
- International Union of Railways (2004) "UIC Leaflet406 Capacity".

Archive of SID
www.SID.ir

- Landex, A., Kaas, A. H., Schittenhelm, B. and Schneider-Tilli, J. (2006a) "Evaluation of railway capacity", Proceedings of Annual Transport Conference, Aalborg, Denmark, pp. 232.
- Libardo, A., Pellegrini, P. and Salerno, G. (2011) "Capacity in Railway junctions and optimal route management", RAILROME.
- Lindfeldt O. (2010) "Railway operation analysis: evaluation of quality, infrastructure and timetable on single and double-track lines with analytical models and simulation", PHD Thesis.
- Merel, X., Gandibleux, S. and Demassey, R. Lusby (2009) "An improved upper bound for the railway infrastructure capacity problem on the Pierrefitte-Gonesse junction", ROADEF.
- Pachl. J. and White, T. (2004) "Analytical capacity management with blocking times", Transportation Research Board: 83rd Annual Meeting on January 11-15.
- Srimanta, R. (2004) "Study on capacity of railroad network and airport terminals for Upper Midwest Freight Corridor", M.s.c. Thesis.
- Tobias L. and Jörn P. (2009) "Recommendations for enhancing UIC code 406 method to evaluate railroad infrastructure capacity", Braunschweig : Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung IfEV, Elektronisch
- Xavier, D., Joaquin, R. and Xavier G. (2001) "Heuristics for railway infrastructure saturation", In ATMOS 2001 Proceedings.
- International Union of Railways (1979) "Method to be used for the determination of capacity lines", Leaflet 405-1, 1st Edition.
- Kukec, T. J. and Mlinari, M. (2003) "Calculating railway line capacity using the queuing theory", Conference Paper, ICERS.
- Khadem Sameni, M, Landex, A. and Preston, J. (2011) "Developing the UIC 406 method for capacity analysis", RAILROME.
- Khadem-Sameni, M., Preston, J. and Armstrong, J. (2010) "Railway capacity challenge: measuring and managing in Britain", Proceedings of the 2010 Joint Rail Conference, JRC, Urbana, IL, USA, JRC-36280.
- Krueger, H. (1999) "Parametric modeling in rail capacity planning", Proceedings of the Winter Simulation Conference, pp. 1194-1200.
- Lai, Yung-Cheng and Barkan, C. (2009) "Enhanced parametric railway capacity evaluation tool". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2117, pp. 33-40
- Landex, A. (2008) "Methods to estimate railway capacity and passenger delays", In: Department of Transport, Technical university of Denmark: Kgs. Lyngby.
- Landex, A., Kaas, A. H. and Hansen, S. (2006) "Railway operation", Centre for Traffic and Transport, Technical University of Denmark.

Archive of SID

www.SID.ir