

## تأثیر بکارگیری الگوریتم جستجوی ممنوعه در سرعت دستیابی به پروفیل

### سرعت بهینه حرکت قطار (به منظور کاهش مصرف انرژی)

#### مقاله پژوهشی

محمدعلی صندیدزاده\*، دانشیار، دانشکده راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
مریم عسکریان، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
فرزاد سلیمانی، دانشجوی دکتری، دانشکده راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Sandidzadeh@iust.ac.ir

دریافت: ۹۹/۰۱/۲۹ - پذیرش: ۹۹/۰۷/۱۵

صفحه ۴۸-۳۱

#### چکیده

یکی از راه‌های صرفه‌جویی در مصرف انرژی، استفاده گسترده‌تر از حمل و نقل عمومی به خصوص راه آهن و مترو است. روند رو به رشد استقبال از شبکه ریلی و مترو توسط دولت‌ها از یک سو و مصرف قابل توجه انرژی یک قطار در طول سال از سوی دیگر ضرورت بررسی انرژی مورد استفاده در قطار را نشان می‌دهد. هر قطار در حال حرکت در هر لحظه، یکی از وضعیت‌های شتاب‌گیری، خلاص، سرعت ثابت و یا ترمزگیری را دارد. از این روش‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی با توجه به شیب و فراز مسیر و محدودیت‌های سرعت قطار، به دنبال نقاط بهینه شتاب‌گیری، خلاصی و سرعت ثابت یا به زبان دیگر پروفیل سرعتی هستند که حداقل مصرف انرژی را به دنبال داشته باشد. در این مقاله ابتدا مروری بر مدل‌های بهینه‌سازی انرژی قطار با خصوصیات مختلف و به دنبال آن الگوریتم‌های بکار گرفته شده جهت یافتن پروفیل بهینه سرعت و دقت روش‌ها انجام شده است و سپس الگوریتم جستجوی ممنوعه به عنوان روش جدیدی در بهینه‌سازی سرعت قطار جهت صرفه‌جویی در مصرف انرژی بررسی شده است. در این روش با تعیین نقاط مناسب شتاب‌گیری، خلاصی و ترمزگیری پروفیل سرعتی ارائه شده که قطار مسیر بین دو ایستگاه را با حداقل مصرف انرژی طی کند. این نقاط متغیرهای تغییر استراتژی حرکت قطار نامیده می‌شوند. در این مطالعه شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی و با الگوریتم ژنتیک مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم جستجوی ممنوعه، بهینه‌سازی، پروفیل سرعت، مصرف انرژی

#### ۱- مقدمه

بررسی انرژی مورد استفاده در قطار را نشان می‌دهد. امروزه در سیستم هدایت اتوماتیک قطار وظایف شتاب‌گیری، هدایت در طول مسیر و ترمزگیری تا توقف در ایستگاه بعد به عهده سیستم‌های هوشمند هدایت قطار است و وظیفه راهبر قطار به حداقل رسیده است. از مزایای استفاده از سیستم‌های هوشمند هدایت قطار می‌توان به کاهش نقش انسان و خطاهای ناشی از آن در هدایت قطار و برآورده کردن چند هدف به طور همزمان اشاره کرد. یکی از مسائل پر اهمیت و قابل توجه در حمل و

در دنیای امروز انرژی نقش بسیار تعیین کننده‌ای داشته و توجه به بهینه‌سازی مصرف انرژی امری اجتناب‌ناپذیر است. یکی از راه‌های صرفه‌جویی در مصرف انرژی، استفاده گسترده‌تر از حمل و نقل عمومی به خصوص راه آهن و مترو است. امروزه استفاده از حمل و نقل ریلی در زمینه حمل مسافر و بار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روند رو به رشد استقبال از شبکه ریلی و مترو توسط دولت‌ها از یک سو و مصرف قابل توجه انرژی یک قطار در طول سال از سوی دیگر ضرورت

نقل ریلی، صرفه‌جویی در مصرف انرژی و سوخت است که از طریق مساله بهینه‌سازی پروفیل سرعت قطار تامین می‌گردد. بهینه‌سازی در مصرف انرژی قطارها بسیار مهم و از لحاظ اقتصادی و زیست محیطی حیاتی خواهد بود و مستلزم سیستمی در دل سیستم اتوماتیک قطار است تا برای هر مرحله از مسیر چگونگی حرکت قطار را در حرکت تا ایستگاه بعد مشخص کند. این سیستم که در حقیقت تولید کننده پروفیل سرعت قطار است باید علاوه بر در نظر گرفتن معیارهای حفاظتی مورد نیاز برای سیستم‌های کنترل اتوماتیک قطار اهداف ذکر شده مورد نیاز در راه‌آهن را نیز برآورده کند. سیستم‌های پیشنهاد پروفیل سرعت برای حرکت قطار از الگوریتم‌ها و منطق‌های مختلفی برای پیشنهاد یک پروفیل بهینه بهره گرفته‌اند. الگوریتم‌های بهینه‌سازی پروفیل سرعت، نه تنها باعث کاهش مصرف انرژی در طی مسیر حرکت می‌شوند بلکه در رسیدن به اهداف جداول زمانی حرکت قطار نیز کمک می‌کنند. تحقیقات انجام شده روش‌های حل به صورت عددی با کمک کامپیوتر هستند که در بخش دوم به آنها اشاره خواهد شد. اما یکی از موفق‌ترین روش‌هایی که در حین آن سال‌ها و بعد از آن ارائه و مورد استقبال قرار گرفت روش‌های بهینه‌سازی هوشمند از قبیل منطق فازی، برنامه‌ریزی پویا<sup>۱</sup> و الگوریتم‌های تکاملی<sup>۲</sup> از قبیل الگوریتم ژنتیک است.

مسیر بین دو ایستگاه را با حداقل مصرف انرژی طی می‌کند. این نقاط را متغیرهای تغییر استراتژی حرکت قطار می‌نامیم. در این مطالعه شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی و با الگوریتم ژنتیک مقایسه شده است. در این مقاله، در بخش دوم مروری بر منابع پیشین در رابطه با روش‌های صرفه‌جویی در مصرف انرژی و روش‌های بهینه‌سازی به کار گرفته شده در تولید پروفیل سرعت قطار انجام شده است. در بخش سوم مدل سازی دینامیک حرکت قطار شرح داده می‌شود. در بخش چهارم الگوریتم جستجوی ممنوعه و پیاده‌سازی آن در مساله بهینه‌سازی سرعت قطار بطور مفصل تشریح می‌گردد. در بخش پنجم به ارایه نتایج شبیه‌سازی‌ها و تجزیه و تحلیل آن‌ها پرداخته شده است. در نهایت در بخش ششم، جمع‌بندی و پیشنهادات در خصوص بسترهای موجود برای مطالعات و تحقیقات آتی در زمینه این پروژه آورده شده است.

## ۲-پیشینه تحقیق

هر قطار در حال حرکت در هر لحظه، یکی از وضعیت‌های شتاب‌گیری، خلاص، سرعت ثابت و یا ترمزگیری را خواهد داشت. روش‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی با توجه به شیب و فراز مسیر و محدودیت‌های سرعت قطار، به دنبال نقاط بهینه شتاب‌گیری، خلاصی و سرعت ثابت یا به زبان دیگر پروفیل سرعتی هستند که حداقل مصرف انرژی را به دنبال داشته باشد. در این مطالعه پس از مروری بر منابع بهینه‌سازی انرژی قطار، الگوریتم جستجوی ممنوعه را به عنوان روش جدیدی در بهینه‌سازی پروفیل سرعت قطار جهت صرفه‌جویی در مصرف انرژی بررسی کرده‌ایم. اصول و مبانی جستجوی ممنوعه، به جستجوی محلی اجازه می‌دهد که در هر جایی که به بهینه محلی رسید، با استفاده از حافظه‌ها که لیست ممنوعه<sup>۳</sup> نام دارند از بهینه محلی خارج و همچنین از برگشت به آن‌ها جلوگیری شود. این لیست، فرآیندهای اخیر جستجو را در خود ذخیره می‌کند. در این روش با تعیین نقاط مناسب شتاب‌گیری، خلاصی و ترمزگیری پروفیل سرعتی را ارائه می‌کنیم که قطار

در این بخش به مرور منابع در زمینه بهینه‌سازی انرژی قطار می‌پردازیم که تحقیقات در نوع نگرش به مدل‌سازی و روش‌های حلی چون برنامه‌ریزی پویا، برنامه‌ریزی خطی، الگوریتم ژنتیک و دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری، متفاوت هستند. ژاو و همکاران در سال ۲۰۱۵ یک منحنی پروفیل سرعت بهینه به دست آوردند که مشکل کاهش مصرف انرژی را در برابر افزایش زمان تاخیر حل نمودند. آن‌ها از سه روش جستجوی جواب جهت یافتن جواب بهینه استفاده نمودند. [Zhao, N., Roberts, C., Hillmansen, S., & Nicholson, G. 2015]. سو و همکاران در سال ۲۰۱۵ با بهره‌گیری از مفهوم استفاده از انرژی بازگشتی در صرفه‌جویی مصرف انرژی، یک مدل کنترل قطار جهت کاهش انرژی مصرفی ارائه نمودند. [Su, S., Tang, T., & Roberts, C., 2015]. در سال ۲۰۱۵ سو و همکاران الگوریتم عددی جهت حل مشکل کنترل انرژی قطار را در زمان سیر مشخص که به قسمت‌های مختلف تقسیم شده است، به کار بردند. [Su, S., Tang, T., Chen, L., & Liu, B, 2015]. یانگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ با در نظر گرفتن دو فاکتور انرژی مصرفی و زمان سفر یک روش بهینه‌سازی جهت زمان‌بندی حرکت قطار ارائه نمودند. آن‌ها از مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح

در سال ۲۰۱۷، گاورد و همکاران مروری بر ادبیات موضوع بهینه‌سازی انرژی قطار همزمان با برنامه زمان‌بندی انجام دادند. آنها استراتژی‌های مختلف حرکت را تحت شرایط و محدودیت‌های مختلف بررسی نمودند. (Goverde, et al, 2017). در سال ۲۰۱۷، وانگ و راخا مدل‌سازی انرژی مصرفی قطارهای برقی را با در نظر گرفتن موضوع انرژی بازگشتی آنها ارائه نمودند. آنها از ایالت‌های آمریکا جهت ارزیابی مدل خود استفاده نمودند و نتایج تحقیق آنها نشان داد که این مدل قابلیت اجرا در نرم افزارهای ترافیک و اپلیکیشن‌های موبایل را نیز دارا است. (Wang,

Rakha, 2017). در سال ۲۰۱۷، ژاو و همکاران مدل زمان‌بندی قطار را در جهت کاهش انرژی مصرفی آن ارائه نمودند که برنامه زمان‌بندی بهینه باعث افزایش قابلیت اطمینان شبکه ریلی برقی می‌گردد. (Zhao, et al, 2017)

در سال ۲۰۱۷، هانگ و همکاران یک مدل با دو تابع هدف برای شبکه مترو براساس مسئله زمان‌بندی قطار ارائه نمودند که فرایند سفر مسافر جهت ارزیابی کیفیت خدمات‌دهی را نیز در نظر گرفتند. آنها از یک نمونه واقعی جهت ارزیابی مدل خود استفاده نمودند. (Huang, et al, 2017)

در سال ۲۰۱۷، دالا و همکاران به مقایسه انرژی مصرفی در دو مد حمل و نقلی هوایی و ریلی پرداختند. آنها از زمان سفر و مسافت به عنوان فاکتورهای اصلی مقایسه استفاده نمودند و قطارهای مورد بررسی آنها قطارهای پرسرعت بود. (Dalla, et al, 2017). در سال ۲۰۱۷، آلن و چین در تحقیقی مصرف انرژی قطار را از طریق استراتژی خلاصی و انرژی بازگشتی به حداقل رساندند. مدل آنها مکان‌های شروع و پایان خلاصی و شروع انرژی بازگشتی را جهت کمینه‌کردن انرژی عملیات قطار به عنوان متغیرهای مدل مشخص می‌نمود. (Allen, Chien, 2017). در سال ۲۰۱۸، واتاناب به مطالعه در رابطه با بهینه‌سازی انرژی قطار با استفاده از انرژی برگشتی پرداخت. او از سری مشخصی از قطارها جهت بررسی انرژی مصرفی آنها در شرایط شتاب‌گیری مختلف استفاده نمود. (Watanabe, 2018)

با جدول زمان‌بندی و کنترل سرعت استفاده کردند. [Yang, X., Li, X., Ning, B., & Tang, T, 2015]

در سال ۲۰۱۶ محمدعلی صناییدزاده و همکاران یکی از الگوریتم‌های هوشمند و توانمند در حل مسائل بهینه‌سازی، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات را به کار گرفتند. برخلاف روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک که اغلب محاسبات پیچیده و زمان‌بری دارند، این الگوریتم هوشمند جهت بهینه‌سازی سوخت مصرفی در حمل و نقل ریلی استفاده شده است، که موجب تعیین سریع‌تر جواب بهینه در عمل برای راهبر می‌گردد. [صناییدزاده و همکاران، ۲۰۱۶]

در سال ۲۰۱۶، لیو و همکاران تحقیق دیگری در رابطه با موضوع بهینه‌سازی انرژی مصرفی قطار با در نظر گرفتن فاکتور انرژی بازگشتی انجام دادند. آنها استراتژی ذخیره‌سازی انرژی را برای دو قطار در نظر گرفتند و از الگوریتم هیوریستیک جهت بهینه‌سازی استفاده نمودند و نتایج نشان داد که تا ۱۹٪ انرژی مصرفی قطار از این روش کاهش یافت. (Liu, et al, 2016). در سال ۲۰۱۶، لی و همکاران یک مدل بهینه‌سازی زمان‌بندی چند هدفه ارائه نمودند که شامل کمینه‌سازی مصرف انرژی قطار و زمان انتظار مسافر بود. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که این دو تابع هدف در ساعات شلوغی و غیرشلوغی قابلیت کاهش دارد. (Xu, et al, 2016)

در سال ۲۰۱۷، کامپراوات و کوسکی با استفاده از سیستم زمان‌بندی قطارها و همچنین سیستم ذخیره‌سازی انرژی در جهت بهینه‌سازی انرژی بازگشتی قطار استفاده نمودند. (Kampeerawat, Koseki, 2017)

در سال ۲۰۱۷، کسکین و کارامیناگلو از الگوریتم‌های بر مبنای طبیعت در جهت بهینه‌سازی انرژی قطار استفاده کردند. آنها محدودیت‌های سرعت، خصوصیات مسیر و بیشینه سفر را نیز در این مدل‌سازی در نظر گرفتند. (Keskin, Karamancioglu, 2017)

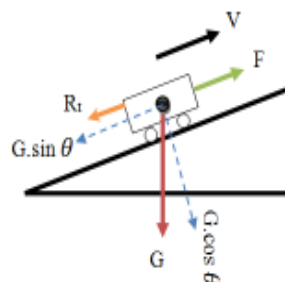
در سال ۲۰۱۷، بین و همکاران تحقیقی انجام دادند که دو مدل برنامه‌ریزی خطی برای مسئله زمان‌بندی مترو در نظر گرفتند. تابع هدف مدل اول انرژی شتاب‌گیری قطار و مدت زمان انتظار مسافر بود و تابع هدف مدل دوم انرژی برگشتی قطار بود که هر دو از نوع کمینه‌سازی بود. (Yin, et al, 2017)

### ۳- مدل‌سازی حرکت قطار

در این بخش به معرفی مدل حرکت قطار می‌پردازیم که در این مطالعه مدل قطار در یک MFIFE تعریف شده است که در هر بار اجرای این مدل، یک پروفیل سرعت تولید شود. طراحان خطوط راه‌آهن پس از قرار دادن خط پروژه، با شبیه‌سازی حرکت قطار، زمان سیر در بلاک مربوطه را تعیین می‌کنند. منظور از شبیه‌سازی حرکت قطار، بررسی نحوه حرکت قطار در شیب و فرازهای پی در پی، به دست آوردن نیروهای شتاب‌دهنده و ترمزگیری از طریق حل معادلات حرکت، محاسبه زمان سیر و در نهایت رسم پروفیل‌های سرعت-مکان، و نیروی کشش (یا ترمز)-مکان می‌باشد.

### ۳-۱- نیروهای وارد بر قطار

در این قسمت به بررسی رفتار حرکت قطار در شیب، محاسبه نیروهای شتاب‌دهنده و زمان سیر پرداخته می‌شود. نیروهای وارد بر قطار شامل نیروی کشنده، نیروی مقاوم و نیروی ترمزی است. شکل (۱) نیروهای وارد بر قطار را هنگام عبور آن از شیبی با مقدار  $\theta$  نشان می‌دهد. در این شکل  $F$  نیروی کشش،  $R_t$  نیروهای مقاوم همیشگی در سرعت  $v$  و  $G$  وزن قطار است که بر حسب مولفه‌های آن تجزیه شده است (Esveld, 2001).



شکل ۱. نیروهای وارد بر قطار در حال حرکت

### ۳-۱-۱- نیروی کشنده

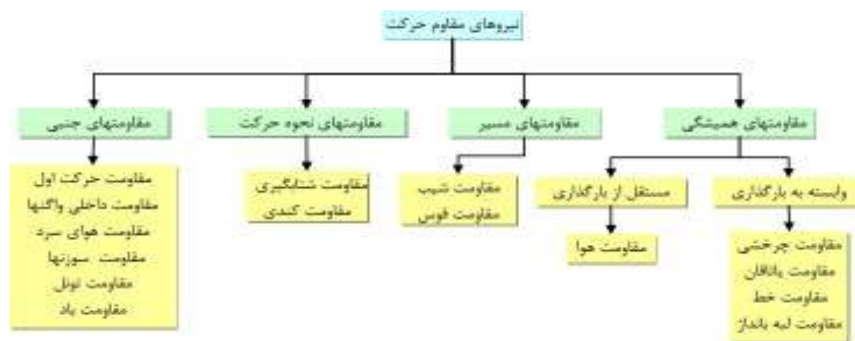
نیروی کشش لکوموتیو به عوامل مختلفی وابسته است که یکی از آنها وزن قطار است که میزان نیروی چسبندگی میان چرخ‌های قطار و خط را برای برقراری یک سرعت مطمئن قبل از ایجاد یک وضعیت سرش تعیین می‌کند. عامل مهم دیگر در تعیین نیروی کشش، سرعت حرکت است. هنگامی که سرعت افزایش می‌یابد جریان در موتور لکوموتیو کاهش یافته و در نتیجه نیروی کشنده کمتر می‌شود. کارخانه‌های سازنده لکوموتیو برای نشان دادن میزان قدرت لکوموتیوهایشان، نیروی کشش قطار با توجه به سرعت آن وجود دارد که به صورت رابطه (۱) نشان داده می‌شود.

$$F_t = \frac{270N}{V} n_1 n \quad (1)$$

که در آن  $F_t (kgf)$  نیروی کشنده،  $N (hp)$  حداکثر توان لکوموتیو،  $v (km/h)$  سرعت قطار،  $n_1$  تعداد لکوموتیو و  $n$  ضریب راندمان لکوموتیو (فرسودگی لکوموتیو) می‌باشد. با توجه به این رابطه با افزایش سرعت، نیروی کششی کمتر می‌شود.

### ۳-۱-۲- نیروهای مقاوم

هر جسمی که بر روی جسم دیگر حرکت می‌کند دارای سطح تماسی با آن جسم می‌باشد که این مساله باعث ایجاد سایش و اصطکاک بین آن دو جسم می‌شود. با حرکت قطار بر روی ریل نیز نیروهای مقاوم حرکت پدیدار شده و باعث کند شدن حرکت آن می‌گردد. تعداد و چگونگی این مقاومت‌ها گسترده بوده و می‌توان آنها را بطور خلاصه در شکل (۲) دسته‌بندی نمود. بدیهی است که همه این مقاومت‌ها بطور همزمان برای یک قطار در حال حرکت پدیدار نمی‌گردد و البته یک کشنده باید آنقدر نیرو تولید کند تا بتواند بر این مقاومت‌ها غلبه کند (Rochard, 2000).



شکل ۲. انواع مقاومت‌های حرکت قطار

بوژی‌ها تعیین گردد. اندازه مقاومت شیب بستگی به وزن قطار و زاویه شیب دارد. نیروی مقاوم شیب با توجه به شکل به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$R_g = G \sin \theta = G \theta \quad (3)$$

$R_g$  (ton) نیروی کل مقاوم شیب،  $G$  (ton) وزن قطار و  $\theta$  (radian) زاویه شیب می‌باشد. اگر قطار در فراز قرار گرفته باشد، مقاومت شیب به مقاومت‌های همیشگی افزوده و اگر نشیب باشد، از آن کم می‌شود.

### ۳-۱-۳- نیروی ترمزی

یکی دیگر از نیروهای مقاوم حرکت، نیروی ترمز می‌باشد که به دو عامل چسبندگی میان ریل و چرخ‌هایی که در اثر ترمز متوقف شده‌اند و مولفه نرمال (عمودی) عکس‌العمل وزن چرخ بر ریل بستگی دارد.

نیروی ترمز مقدار ثابتی بوده که مستقل از سرعت قطار می‌باشد. توان ترمزگیری قطار که بر حسب واحد وزن قطار بیان می‌شود بر اساس تناژ قطار بهره‌برداری و عوامل ایمنی انتخاب می‌شود.

$$R_b = r_b \times G \quad (4)$$

$R_b$  (kg.f) کل نیروی ترمزگیری،  $r_b$  ( $\frac{kg.f}{ton}$ ) توان ترمزگیری قطار به ازای واحد وزن آن می‌باشد.

### ۳-۲- دینامیک حرکت قطار

با توجه به مطالب بالا، نیروهایی که به یک قطار در حال حرکت وارد می‌شود در جدول (۱) نشان داده شده است: با نوشتن معادله حرکت از قانون دوم نیوتن داریم:

$$ma = \sum (Forces) \quad (5)$$

$$F_a = F_t - (R_t + R_g + R_b) = ma \quad (6)$$

$F_a$  نیروی شتاب‌دهنده،  $R_t$ ،  $R_g$  و  $R_b$  به ترتیب نیروهای مقاوم همیشگی، شیب و ترمز،  $F_t$  نیروی کشش،  $m$  جرم قطار و  $a$  شتاب حرکت قطار می‌باشد. نیروی شتاب‌دهنده با توجه به جدول (۱) در سه وضعیت می‌تواند باشد:

• همراه با نیروی کشش لکوموتیو ( $F_a = F_t - \sum R$ )

در این وضعیت چنانچه  $F_a$  مثبت باشد ادامه حرکت با افزایش سرعت همراه است در غیر اینصورت سرعت قطار در

نیروهای مقاوم همیشگی آن دسته از مقاومت‌هایی (مانند مقاومت اصطکاک در محور چرخ‌ها، مقاومت لبه بانداژ، مقاومت هوا و ...) است که همواره در هنگام حرکت قطار پدیدار می‌شوند، اندازه مقاومت‌های همیشگی بستگی به ساختار بوژی، فرم هندسی واگن و لکوموتیوها، میزان سایش کلاهک ریل و لبه بانداژ، تعداد آسه، سرعت قطار و روسازی خط دارد. مقاومت‌های همیشگی بر حسب تجربه و توسط افراد مختلفی بصورت نیروی مورد نیاز برای حرکت قطار با یک سرعت پایدار محاسبه شده‌اند. اغلب روابط ارائه شده، چند جمله‌ای‌های درجه دو هستند که بر حسب سرعت قطار بیان شده‌اند که از بارزترین آنها رابطه دیویس و نیز روش اشمیت و توتھیل می‌باشد. روش اشمیت و توتھیل بر پایه آزمایشاتی است که در سال ۱۹۴۰ در دانشگاه ایلینویز صورت پذیرفته است. در این آزمایش‌ها مقدار حرکت قطار برای حالت‌های مختلف مسیر، نیروی کشش و بوژی بر اساس افزایش وزن قطار در گام‌های پنج تنی و افزایش سرعت به میزان شانزده کیلومتر بر ساعت در هر گام توسط هر قطار اندازه‌گیری گردید.

محاسبه فرمول دیویس برای یک قطار توسط شرکت سازنده قطار انجام می‌گیرد. آنها در آزمایشات خود با یک نیروی رانش مشخص سرعت قطار را در یک سرعت معلوم ثابت نگه می‌دارند. در این حالت چون سرعت قطار ثابت است شتاب آن برابر صفر خواهد بود و بر اساس قانون دوم نیوتن برآیند نیروهای وارد بر قطار نیز صفر خواهد شد. در این حالت برآیند نیروهای مقاوم برابر با نیروی رانش خواهد بود. با کم کردن تاثیر شیب (در صورت سربالایی بودن) و با توجه به مشخص بودن نیروی رانش مقدار نیروهای مقاوم بجز شیب به دست خواهد آمد که این مقدار را مقدار دیویس می‌نامند. با تکرار آزمایش در سرعت‌های دیگر می‌توان نموداری از مقدار دیویس بر اساس سرعت را رسم نمود. شکل رابطه دیویس بصورت رابطه ۲ است.

$$R_t = q_1 + q_2v + q_3v^2 \quad (2)$$

که در آن  $R_t$  نیروی دیویس،  $v$  سرعت قطار و  $q_1$  و  $q_2$  و  $q_3$  ضرایب آئرو دینامیکی می‌باشند.

آنچه در کلیه روابط فوق مسلم است، افزایش مقاومت‌های همیشگی با افزایش سرعت می‌باشند. با این حال می‌بایست رابطه مناسب با توجه به وضعیت مسیر و نو و یا کهنه بودن

بیماید. در این فصل به بررسی حرکت قطار در مسیر پرداخته شده و معادلات لازم جهت شبیه‌سازی حرکت قطار با توجه به فرم هندسی مسیر قائم و مشخصات قطار بهره‌برداری، سرعت قطار و نیروهای شتاب‌دهنده ارائه گردید که از این طریق می‌توان پروفیل‌های سرعت-زمان، نیروی کشش-مکان و محل ترمزگیری را با اعمال محدودیت‌هایی نظیر حداکثر سرعت مجاز و ... محاسبه و ترسیم نمود.

#### ۴- روش تحقیق

با مروری بر منابع پیشین موضوع بهینه‌سازی پروفیل سرعت قطار مشاهده نمودیم که در زمینه روش‌های حل این مسئله، دو نوع دسته بندی وجود دارد:

- الگوریتم‌های عددی که محاسبات پیچیده‌ای دارند.
- الگوریتم‌های هوشمند و فراابتکاری چون الگوریتم ژنتیک که در زمان کوتاه جواب خوبی تولید می‌کنند. (جوابی نزدیک به جواب دقیق)

با مرور و مطالعه منابع مشاهده می‌شود که از بین الگوریتم‌های هوشمند از الگوریتم جستجوی ممنوعه در مدل مورد نظر تاکنون استفاده نشده است و این الگوریتم به علت هوشمندی بالا در جستجو می‌تواند جواب‌های خوبی تولید کند. در این مقاله از الگوریتم جستجوی ممنوعه در بهینه‌سازی مصرف انرژی قطار استفاده شده است که در این بخش به بررسی ساختار این الگوریتم و در نهایت نحوه پیاده‌سازی آن روی مدل پروفیل سرعت قطار می‌پردازیم.

#### ۴-۱- علت انتخاب روش

تحقیقات دیگر در زمینه الگوریتم‌هایی چون تبرید شبیه‌سازی شده، ژنتیک و کلونی مورچگان بوده است، در این مقاله سعی شده است که اثر الگوریتم جستجوی ممنوعه در بهینه‌سازی پروفیل سرعت قطار بررسی شود.

دو ویژگی الگوریتم جستجوی ممنوعه که باعث شده این الگوریتم را انتخاب نماییم حافظه‌ی انطباقی<sup>۴</sup> و اکتشاف واکنشی<sup>۵</sup> است. حافظه‌ی انطباقی در جستجوی ممنوعه (TS)، جستجوی فضای جواب را اثر بخش می‌کند. حافظه انطباقی از بازگشت به جواب‌های بازدید شده و قرار گرفتن در بهینه محلی جلوگیری می‌کند. این حافظه در طول الگوریتم جهت جلوگیری از تکرار جواب‌های چک شده استفاده می‌شود و این خصلت با روش‌های بدون حافظه که مبتنی بر فرآیندهای

جهت نزدیک شدن آن به سرعت پایدار کاهش می‌یابد (مقاومت کندی).

• بدون اعمال نیروی کشش ( $F_a = -\sum R$ ) در این وضعیت قطار جهت جلوگیری از افزایش سرعت، خلاص حرکت می‌کند ( $F_t = 0$ ).

• با نیروی ترمز و بدون نیروی کشش ( $F_a = R_b - \sum R$ ) در این شرایط نیروی شتاب‌دهنده منفی است و سرعت قطار کاهش می‌یابد.

یکی از نکات مهم در هنگام حرکت قطار بر روی شیب، رسیدن آن به سرعت پایدار است. با شروع حرکت قطار بر روی شیب، بر مقدار سرعت افزوده می‌شود. از طرفی با افزایش سرعت از مقدار نیروی کشش کاسته بر نیروی مقاوم افزوده می‌شود. پس از مدتی نیروهای مقاوم با نیروی کشش برابر و در نتیجه نیروی شتاب‌دهنده ( $F_a$ ) برابر صفر می‌شود. از این پس قطار با سرعت ثابت و یکنواخت بر روی شیب به حرکت خود ادامه می‌دهد که به آن سرعت پایدار گفته می‌شود. سرعت پایدار را می‌توان با استفاده از رابطه (۷) بدست آورد.

$$R_t(v) - R_g - R_b(v) = 0 \quad (7)$$

جدول ۱. مودهای حرکتی مختلف

نشانه‌گر	توضیح	معادلات
شتاب‌گرفتن	در این حالت نیروی کشش $F_a$ مثبت است و نیروی مقاوم $R$ را برابری می‌کند.	$F_a = F_t - (R_g + R_b + R_r)$ $F_a > (R_g + R_b)$ $F_t > 0$ $R_g > 0$ $R_b > 0$
پایدار	در این حالت نیروی کشش $F_a$ صفر است و نیروی مقاوم $R$ را برابری می‌کند.	$F_a = F_t - (R_g + R_b + R_r)$ $F_a = 0$ $F_t = 0$ $R_g > 0$ $R_b > 0$
ترمزگرفتن	در این حالت نیروی کشش $F_a$ منفی است و نیروی مقاوم $R$ را برابری می‌کند.	$F_a = F_t - (R_g + R_b + R_r)$ $F_a < 0$ $F_t < 0$ $R_g > 0$ $R_b > 0$

رفتار حرکت قطار در مسیر طراحی شده، از طریق شبیه‌سازی حرکت آن در بلاک مورد نظر تعیین می‌شود. چنانچه به این مساله در هنگام طراحی توجه نگردد، ممکن است در برخی از قسمت‌ها به علت شیب زیاد، قطار زمان زیادی را با حداکثر توان و سرعت خیزش، صرف بالا رفتن از آن بنماید و در هنگام برگشت نیز برای حفظ حداکثر سرعت مجاز، بخش قابل توجهی از مسیر را با اعمال نیروی ترمز

در هر مرحله از این الگوریتم با انجام هر حرکت، آن حرکت به لیست ممنوعه اضافه شده و لیست ممنوعه طوری است که جدیدترین حرکت به لیست اضافه شده و حرکات قدیمی‌تر طبق شرایط تنظیم شده در مسئله، از لیست خارج می‌شوند. در الگوریتم جستجوی ممنوعه جواب‌هایی که در تابع هدف بهبود ایجاد نمی‌کنند ولی ممکن است ما را به جواب بهینه سراسری برسانند، مجاز هستند. البته با این شرط که آن حرکات‌ها در لیست ممنوعه قرار نداشته باشند.

#### ۴-۲-۴- مفاهیم و مبانی الگوریتم

جهت آشنایی با الگوریتم جستجوی ممنوعه لازم است که مفاهیم کلیدی این الگوریتم در این بخش شرح داده شود که براساس آن این الگوریتم روی مدل پروفیل سرعت قطار پیاده‌سازی شود.

#### ۴-۲-۴-۱- فضای جستجو

فضای جستجوی TS، به طور ساده فضایی از جواب‌های شدنی است که می‌توان آنها را حین جستجو بازدید کرد. فضای جستجو می‌تواند به طور ساده مجموعه‌ای از جواب‌های شدنی مسأله باشد. باید خاطر نشان کنیم که محدود کردن فضای جستجو به جواب‌های شدنی، همیشه ایده‌ی خوبی نیست؛ اجازه دادن به جستجو برای حرکت به جواب‌های نشدنی مطلوب در برخی موارد لازم و ضروری است.

#### ۴-۲-۴-۲- ساختار همسایگی

تعریف ساختار همسایگی به مقدار زیادی به تعریف فضای جستجو بستگی دارد. در هر گام از TS، یک انتقال محلی بر روی جواب  $(x)$  به کار می‌رود و جواب‌های همسایه  $N(x)$  (همسایگی‌های  $x$ )، را در فضای جستجو تولید می‌کند. در واقع  $N(x)$  زیرمجموعه‌ای از فضای جستجو است. در حالت کلی، برای هر مسأله‌ی مشخص، هر چه تعداد تعریف‌های ممکن برای فضای جستجو بیشتر باشد، ساختارهای همسایگی بیشتری وجود خواهد داشت. در واقع، ممکن است ساختارهای همسایگی مختلفی برای یک تعریف از فضای جواب مفروض وجود داشته باشد.

استراتژی‌های تقویت<sup>۷</sup> و تنوع بخشی<sup>۸</sup>، دو استراتژی برای انتخاب همسایگی در جستجوی ممنوعه هستند. استراتژی‌های

احتمالی هستند، در تقابل است. از انواع روش‌های بدون حافظه، می‌توان الگوریتم ژنتیک و تبرید شبیه‌سازی شده را نام برد (Glover, 2002).

اکتشاف واکنشی، در واقع به این معناست که یک انتخاب استراتژیک بد (یک انتخاب بر اساس مکانیزم از پیش تعیین شده) می‌تواند از یک انتخاب خوب تصادفی، اطلاعات بیشتری را فراهم کند. در روشی که از حافظه استفاده می‌کند، یک انتخاب بد که بر اساس استراتژی از پیش تعریف شده صورت می‌گیرد، می‌تواند سودمند و مفید باشد. اکتشاف واکنشی مبنای اساسی جستجوی هوشمند است، یعنی از ویژگی‌های جواب خوب جهت اکتشاف نواحی امیدبخش جدید استفاده شود.

این الگوریتم با توجه به شکل (۳)، جهت بهبود الگوریتم‌های جستجوی محلی ارایه شد. اصول این الگوریتم طوری است که حرکات خاصی را برای جستجوی محلی مجاز می‌داند که گرچه ممکن است این حرکات در کوتاه مدت نتیجه خاصی نداشته باشند ولی در بلند مدت می‌توانند الگوریتم را به سمت بهینه سراسری راهنمایی کنند.



شکل ۳. جلوگیری الگوریتم جستجوی تابو از بهینه محلی

اصول و مبانی TS، به جستجوی محلی اجازه می‌دهد که در هر جایی که به بهینه محلی رسید، با استفاده از حافظه‌ای که لیست ممنوعه<sup>۹</sup> نام دارند از بهینه محلی خارج و همچنین از برگشت به آن‌ها جلوگیری شود. این لیست، فرآیندهای اخیر جستجو را در خود ذخیره می‌کند. این همان اصلی است که رابطه بین جستجوی ممنوعه و مفاهیم هوش مصنوعی را برقرار می‌کند. این الگوریتم همانند الگوریتم ژنتیک، مبتنی بر جمعیت نیست و یک نقطه را گرفته و آن را بهبود می‌دهد. در جستجوی ممنوعه، تابوها توسط لیست ممنوعه که در طول زمان تغییر می‌کند، ذخیره شده و برای مدتی مورد انتخاب قرار نمی‌گیرند و ممنوعه به حساب می‌آیند. در واقع تابوها، حرکات‌های ممنوعه‌ای هستند که تا تعداد مشخصی مجوز خروج از حافظه را ندارند. وضعیت عناصر ممنوعه، توسط یک حافظه‌ی در حال تغییر مشخص می‌شود، که این حافظه اجازه می‌دهد که این وضعیت‌ها با توجه به زمان و شرایط تغییر کنند.

- هنگامی که تابع هدف به مقدار آستانه از پیش تعیین شده نزدیک شود در این مطالعه شرط توقف بعد از تعداد معینی تکرار در نظر گرفته شده است.

#### ۴-۳- پیاده‌سازی الگوریتم جستجوی تابو در

##### بهینه‌سازی سرعت قطار

در تولید پروفیل سرعت قطار از متغیرهای سرعت، زمان و مکان می‌توان استفاده نمود که ما در مقاله مشابه تحقیق لو و همکارانش از متغیر مکان به عنوان ورودی مدل و متغیر استفاده نمودیم. ابتدا برای ترسیم پروفیل سرعت قطار و بهینه‌سازی آن باید تمام نیروهای وارد بر آن را در نظر بگیریم و با استفاده از داده‌های خط و قطار به ترسیم پروفیل سرعت پردازیم. پس از یافتن روند ترسیم پروفایل خط با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی به پروفایل سرعت بهینه دست خواهیم یافت. در پروفایل بهینه نقاط تغییر فاز حرکت به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که حداقل خطا و حداقل مدت زمان شتاب‌گیری را به دنبال داشته باشند.

تابع هزینه مسئله، حداقل کردن مدت زمان شتاب‌گیری است و محدودیت‌های مسئله محدودیت سرعت، زمان و خصوصیات مسیر است که با جریمه در تابع هدف لحاظ می‌گردد. فضای جستجو این مسئله بین حد پایین و حد بالای متغیرهای مکان است و ساختار همسایگی جواب‌هایی است که بر اثر عملیات تعریفی روی هر جواب به دست می‌آیند. تابوها در این مسئله حالت‌ها هستند. مثلاً دو متغیر با ۱۰ عمل ۱۰۰ حالت دارد که این ۱۰۰ حالت به عنوان تابو وارد لیست خارج می‌شوند. همچنین در این روش ممکن است، مشابه تحقیق لو و همکارانش (Lu, et al, 2013) پروفیل سرعت پیشنهادی قابلیت اعمال برای قطار را نداشته باشد. مدل ریاضی مسئله به صورت زیر است.

$$Y = I \times \Delta T \times (1 + \lambda \times (Error_2 + Error_1)) \quad (8)$$

که در آن  $Error_1 = 100$  و  $Error_2 = 30$  و هدف کمینه کردن  $Y$  با فرض محدودیت‌های مسیر حداقل نمودن مدت زمان شتاب‌گیری و حداقل خطای رد کردن محدودیت سرعت و زمان است. در واقع خطاها محدودیت‌هایی هستند که با جریمه وارد تابع هدف شدند. خطای اول محدودیت رعایت

تقویت، یعنی تعدیل و تغییر قوانین انتخاب همسایه، برای جواب‌هایی که دارای کیفیت خوبی هستند. این استراتژی‌ها می‌توانند یک بازگشت به سمت نواحی جذاب را ایجاد کنند تا آن مناطق کامل‌تر جستجو شوند. در پیاده‌سازی این استراتژی‌ها، بیشتر از حافظه آشکار استفاده می‌شود، زیرا در این حافظه، کل جواب‌های خوب باید به منظور آزمایش همسایگی‌های بعدی آن‌ها، ذخیره شوند. تفاوت اساسی بین تقویت و تنوع‌بخشی، این است که در حین گام تقویت، جستجو بر روی همسایگی‌های جواب‌های خوب متمرکز می‌شود. انتخاب فضای جستجو و ساختار همسایگی، تقریباً مهمترین گام در پیاده‌سازی الگوریتم جستجوی ممنوعه است. بسته به مدل مسئله طراحی این دو شاخصه متفاوت است که در ادامه به نحوه پیاده‌سازی آن در مدل دینامیک حرکت قطار می‌پردازیم.

#### ۴-۲-۳- لیست تابو

مهمترین حافظه در جستجوی ممنوعه، لیست ممنوعه است. تابوها توسط لیست ممنوعه که در طول زمان تغییر می‌کند، ذخیره شده و برای مدتی مورد انتخاب قرار نمی‌گیرند و ممنوعه به حساب می‌آیند. در واقع تابوها، حرکت‌های ممنوعه‌ای هستند که تا تعداد مشخصی مجوز خروج از تابو لیست را ندارند. رایج‌ترین ساختارهای تابو، شامل ذخیره‌سازی تعداد کمی از حرکت‌های انجام شده روی جواب فعلی و جلوگیری از حرکت معکوس است.

#### ۴-۲-۴- معیار توقف

به‌طور نظری، جستجو می‌تواند برای همیشه ادامه پیدا کند، مگر این‌که مقدار بهینه مسئله، از قبل مشخص شده باشد. در عمل، به‌طور واضح و مشخص، جستجو باید در نقطه‌ای متوقف شود. رایج‌ترین معیارهای توقفی که در الگوریتم جستجوی ممنوعه مورد استفاده قرار می‌گیرند، به صورت زیر است:

- پس از تعداد معینی تکرار
- میزان ثابتی از زمان CPU
- پس از تعداد تکرارهای معینی که هیچ بهبودی در تابع هدف ایجاد نکنند





شکل ۴. فلوجارت الگوریتم TS در مدل پروفیل سرعت قطار

در این بخش ابتدا به معرفی تاریخچه و ساختار الگوریتم جستجوی ممنوعه پرداختیم و علت استفاده از این الگوریتم را شرح دادیم و در نهایت نحوه پیاده سازی الگوریتم را روی مدل پروفیل سرعت قطار نمایش دادیم. در بخش بعد نتایج پیاده سازی دو سناریو در دو مطالعه موردی بررسی خواهد شد.

#### ۵- نتایج شبیه سازی

در این مطالعه دو سناریو را به عنوان استراتژی حرکت قطار در نظر گرفتیم. سناریو سه فاز که قطار در سه فاز شتاب گیری، خلاصی و ترمز گیری به مقصد می رسد و سناریو پنج فاز که شامل شتاب گیری، خلاصی، شتاب گیری، خلاصی و ترمز گیری است. هدف در واقع حداقل کردن مدت زمان شتاب گیری با استفاده از الگوریتم جستجوی ممنوعه است که در حالت سه فاز، یک بازه شتاب گیری و حالت پنج فاز دو بازه شتاب گیری خواهیم داشت. از داده های دو مسیر در مترو تهران جهت شبیه سازی استفاده نمودیم، که در ادامه به تحلیل نتایج پرداخته می شود.

کردن ماکزیمم سرعت در طول مسیر و خطای دوم محدودیت زمان طی کردن مسیر است.

در تولید پروفیل سرعت زمان به اندازه  $\Delta T = 0.1$  اضافه می شود و  $I$  مجموع زمان های شتاب گیری است که هدف یافت پروفیلی از سرعت با حداقل زمان شتاب گیری و حد قابل قبولی از رعایت محدودیت ها است.

در این مطالعه دو سناریو را به عنوان استراتژی حرکت قطار در نظر گرفتیم و با الگوریتم جستجوی ممنوعه مکان بهینه تغییر فاز حرکت را به دست آوردیم. سناریو سه فاز که قطار در سه فاز شتاب گیری، خلاصی و ترمز گیری به مقصد می رسد. ورودی تابع هزینه دو متغیره، مکان تغییر فاز شتاب گیری به فاز خلاصی و مکان تغییر فاز خلاصی به ترمز گیری است و هدف حداقل نمودن زمان فاز شتاب گیری است. از آنجا که در این سناریو دو متغیر داریم برای هر متغیر ۱۸ عمل در نظر گرفتیم که هر حالت در الگوریتم حاصل ضرب دو عمل است، در واقع در هر تکرار الگوریتم جستجوی ممنوعه  $18 \times 18 = 324$  حالت بررسی می گردد. حالت ها تابوها هستند و طول تابو نصف تعداد حالت ها یعنی ۱۶۲ حالت در نظر گرفته شده است.

سناریو دوم سناریو پنج فاز شتاب گیری، خلاصی، شتاب گیری، خلاصی و ترمز گیری است. ورودی تابع هزینه چهار متغیره ۱. مکان تغییر فاز شتاب گیری به فاز خلاصی اول ۲. مکان تغییر فاز خلاصی اول به شتاب گیری دوم ۳. مکان تغییر فاز شتاب گیری دوم به فاز خلاصی دوم ۴. مکان تغییر فاز خلاصی به ترمز گیری است و هدف حداقل نمودن مدت زمان دو فاز شتاب گیری است.

از آنجا که در سناریو دوم، چهار متغیر داریم برای هر متغیر هشت عمل در نظر گرفتیم که هر حالت در الگوریتم حاصل ضرب چهار عمل است، در واقع در هر تکرار الگوریتم جستجوی ممنوعه  $8 \times 8 \times 8 \times 8 = 4096$  حالت بررسی می گردد که زمان بر است اما نتیجه قابل قبولی می دهد. با توجه به شکل (۴) پیاده سازی الگوریتم در مدل پروفیل سرعت قطار به صورت فلوجارت مقابل است.

جدول ۲. خصوصیات مسیر اول

طول مسیر	ایستگاه مبدا	۰ تا ۱۱۰	۱۱۰ تا ۲۶۰	۲۶۰ تا ۱۵۳۰	۱۵۳۰ تا ۱۶۴۰
شیب مسیر	۰	۰	۰	۰,۰۰۱۹	۰

جدول ۳. محدودیت سرعت مسیر اول

طول مسیر	۰ تا ۵۰۰	۵۰۰ تا ۷۰۰	۷۰۰ تا ۱۶۴۰
سرعت بیشینه (m/s)	۲۰	۱۵	۲۰

### ۱-۵- نتایج شبیه‌سازی مسیر اول در حالت سه‌فازی

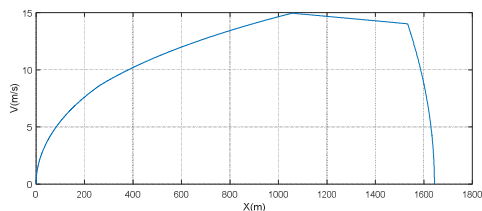
در حالت سه‌فازی سه فاز شتاب‌گیری، خلاصی و ترمزگیری تعریف نمودیم که هدف کاهش مدت زمان شتاب‌گیری جهت کاهش مصرف انرژی است. به این منظور از دو مسیر با خصوصیات خط و محدودیت سرعت متفاوت برای آزمایش الگوریتم جهت بهینه‌سازی استفاده نمودیم. خصوصیات مسیر اول و محدودیت سرعت آن در جدول (۲) و (۳) آمده است. فرضیات مدل دینامیکی قطار را نیز در جدول (۴) مشاهده می‌فرمایید.

جدول ۴. فرضیات مدل دینامیکی قطار

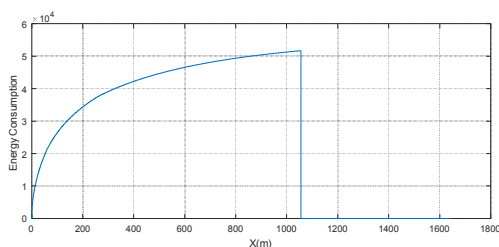
شتاب گرانش (g)	کسری از وزن قطار (beta)	جرم قطار (M)	زمان (delta T)	ضریب جریحه (lamda)	طول مسیر (Xmax)	محدودیت زمان سیر (Tmax)
۹,۸۱	۰,۰۹	۳۵۰ تن	۰,۱	۲	۱۶۴۰	۱۰۰

جدول ۵. پارامترهای الگوریتم در سناریو سه‌فازی در مسیر اول

شرط خاتمه (MaxIt)	طول تابو (TL)	تعداد عملیات (nAction)	تابوها (تعداد حالتها)	تعداد متغیر	بازه X1	بازه X2
۵۰	۱۶۲	۱۸	۳۲۴	۲	۱۶۴۰ و ۱	۱۶۴۰ و ۱



شکل ۵. نمودار سرعت - مکان تکرار اول در سناریو ۳ فازی



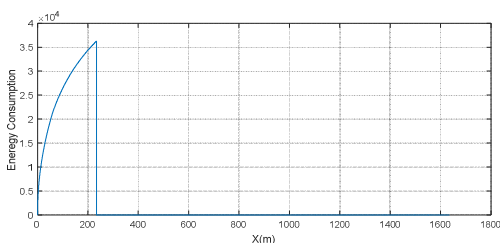
شکل ۶. نمودار انرژی - مکان تکرار اول در سناریو ۳ فازی

در جدول (۵) پارامترهای الگوریتم آمده است.

با پیاده‌سازی الگوریتم جستجوی ممنوعه بروی مدل ریاضی جواب بهینه در هر بار ران و در هر ۵۰ تکرار، در تکرارهای اولیه به جواب مشخص ۳۴۲۲,۱ می‌رسد. این الگوریتم بر خلاف الگوریتم جستجوی محلی در دام بهینه محلی نمی‌افتد. در هر تکرار حلقه اصلی الگوریتم کل ۳۲۴ حالت تعریف شده را چک کرده و از بین آنها بهترین جواب را انتخاب می‌کند و در ادامه حالت بهترین جواب را وارد لیست تابو می‌کند و تا ۱۶۲ تکرار اجازه خروج از لیست را نمی‌دهد. در تکرار اولیه هزینه ۷۶۷۹,۹ با مقادیر متغیر  $X1=1055$  و  $X2=1531$  به دست آمده است. زمان شتاب‌گیری ۱۲۵ ثانیه و کل زمان سیر ۴۰۰ ثانیه محاسبه شده است. نمودار سرعت - مکان نیرو - مکان و انرژی - مکان به صورت زیر است.

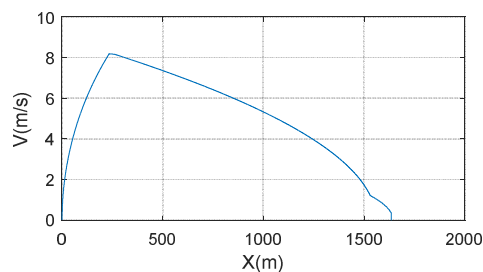
الگوریتم جستجوی تابو در ۱۰۵ ثانیه در ۵۰ تکرار در تکرار ۶-ام روی جواب ۳۴۲۲,۱ همگرا می‌شود. با توجه به تابع هدف تفاوت جواب در تکرارهای مختلف در مدت زمان شتاب‌گیری و میزان خطای جواب است. از طرفی الگوریتم در هر تکرار جواب‌هایی که خطای سرعت دارند را رد می‌کند در

نتیجه جواب‌های خوب تنها خطای زمان که مقدار کمی دارد را شامل می‌شوند. در واقع یک پروفیل سرعت بهینه مستلزم زمان سیر طولانی‌تری است زیرا سرعت و شتاب جهت کاهش انرژی مصرفی تا جای ممکن کاهش یافته است. در ادامه به بررسی جواب بهینه و نمودار آن می‌پردازیم.



شکل ۹. نمودار انرژی - مکان بهینه در سناریو سه‌فازی

با توجه به شکل (۸) نمودار نیروی کششی در بازه شتاب‌گیری بسته به مقدار سرعت متغیر است و در شکل (۹) مقدار انرژی تا مکان ۲۳۳ به علت وجود نیروی ترکشن در حال افزایش است.



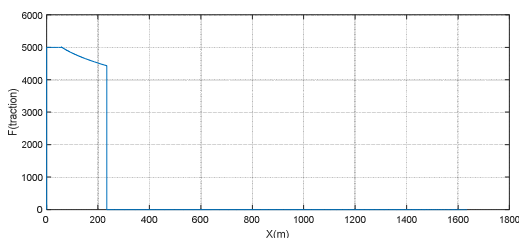
شکل ۷. نمودار سرعت - مکان بهینه در سناریو سه‌فازی

با توجه به شکل (۷) در مکان ۲۳۳ تغییر استراتژی حرکت از شتاب‌گیری به خلاصی و در مکان ۱۶۳۵ از خلاصی به ترمزگیری مشاهده می‌شود. زمان شتاب‌گیری در حداقل مقدار خود و ۵۶ ثانیه است. خطای سرعت و خطای متغیرها صفر است اما خطای زمان سیر ۳۰ می‌باشد.

### ۵-۲- نتایج شبیه‌سازی مسیر اول در حالت پنج‌فازی

در این بخش پنج‌فاز شتاب‌گیری اول خلاصی اول شتاب‌گیری دوم خلاصی دوم و ترمزگیری در نظر گرفته شده است. قطار با این پروفیل مسیر اول را طی می‌کند. پارامترهای الگوریتم در این سناریو در جدول (۶) مشاهده می‌شود. در این بخش چهار متغیر تغییر استراتژی حرکت تعریف شده است که هر کدام حد پایین و حد بالا دارند.

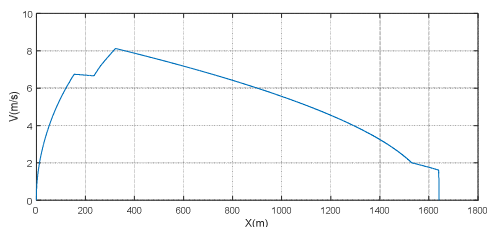
تعداد عملیات تعریف شده در حالت پنج‌فازی هشت عمل و از آنجا که چهار متغیره است  $8 \times 8 \times 8 \times 8 = 4096$  حالت ترکیبی بدست می‌آید. حد پایین و حد بالا در واقع فضای جستجوی الگوریتم می‌باشد.



شکل ۸. نمودار نیروی کششی - مکان بهینه در سناریو سه‌فازی

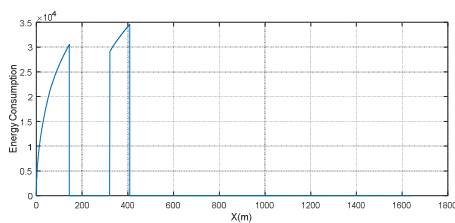
جدول ۶. پارامترهای الگوریتم در سناریو پنج‌فازی

شرط خاتمه (MaxIt)	طول تابو (TL)	تعداد عملیات (nAction)	تابوها (تعداد حالتها)	تعداد متغیر	بازه X1	بازه X2	بازه X3	بازه X4
۵۰	۲۰۴۸	۸	۴۰۹۶	۴	۱۴۰۰ و ۱۶۰۰	۱۵۰۰ و ۱۶۰۰	۱۶۰۰ و ۱۶۴۰	۱۶۴۰ و ۱۶۶۰

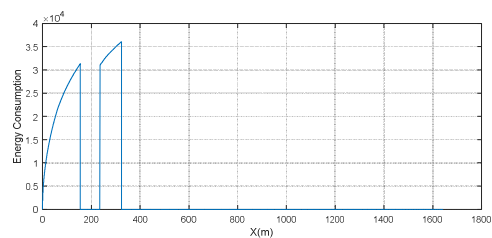


شکل ۱۰. نمودار سرعت - مکان تکرار اول در سناریو پنج‌فازی

در تکرار اول جواب تولید شده هزینه ۳۵۰۷,۵ با مقادیر متغیر  $X3=323, X4=1640, X2=235, X1=154$  خطای زمان ۳۰ و مدت زمان شتاب‌گیری ۵۷,۵ ثانیه است. با توجه به شکل (۱۰) دو فاز شتاب‌گیری و دو فاز خلاصی رسم شده است.



شکل ۱۴. نمودار انرژی-مکان بهینه در سناریو ۵ فازی



شکل ۱۱. نمودار انرژی - مکان تکرار اول در سناریو پنج فازی

با توجه به شکل (۱۴) نمودار انرژی - مکان بهینه دو فاز مصرف انرژی دقیقاً در بازه شتاب‌گیری اول و دوم مشاهده می‌شود زیرا مصرف انرژی تابعی از نیروی کششی و نیروی کششی تابعی از شتاب‌گیری است. با کاهش مدت زمان این دو بازه در میزان مصرف انرژی صرفه‌جویی می‌شود.

### ۳-۵- نتایج شبیه‌سازی مسیردوم در حالت سه‌فازی

در این بخش نتایج پیاده‌سازی الگوریتم TS در مدل سه‌فازی را بروی مسیر دوم شرح خواهیم داد. خصوصیات مسیر دوم و محدودیت سرعت آن در جدول (۷) و (۸) آمده است.

جدول ۷. خصوصیات مسیر دوم

طول مسیر	ایستگاه مبدا	تا ۰ تا ۳۰۰	تا ۷۰۰ تا ۹۴۰	ایستگاه مقصد
شیب مسیر	۰	۸	۰	۳

جدول ۸. محدودیت سرعت مسیر دوم

طول مسیر	ایستگاه مبدا	تا ۰ تا ۹۴۰	تا ۷۰۰ تا ۱۶۴۰
سرعت بیشینه (m/s)	۱۶,۷	۲۲,۵	۱۶,۷

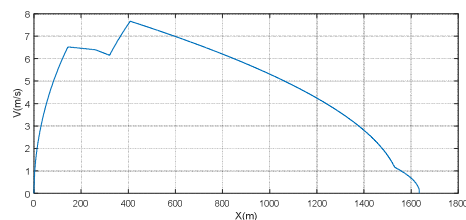
در جدول (۹) فرضیات مدل دینامیکی قطار و در جدول (۱۰) پارامترهای الگوریتم در این سناریو مشاهده می‌شود.

جدول ۹. فرضیات مدل دینامیکی قطار

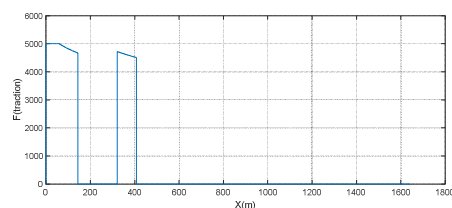
شتاب گرانش (g)	کسری از وزن قطار (beta)	جرم قطار (M)	زمان (delta T)	ضریب جریحه (lamda)	طول مسیر (Xmax)	محدودیت زمان سیر (Tmax)
۹,۸۱	۰,۰۹	۳۵۰ تن	۰,۱	۲	۹۴۰	۸۰

در تکرار دوم هزینه ۳۴۶۴,۸ و مقادیر متغیر  $X1=149$   $X2=225$   $X3=313$   $X4=1630$  محاسبه شده است که این جواب تنها شامل خطای زمان می‌باشد.

الگوریتم در تکرار ششم روی هزینه ۳۴۵۸,۷ مدت زمان شتاب‌گیری ۵۶,۷ همگرا شده است. با توجه به شکل (۱۲) مقادیر متغیر  $X4=1635$   $X3=408$   $X2=320$   $X1=144$  است. مکان متغیر چهارم که در واقع همان مسافت ترمزی است در هر دو سناریو در حالت بهینه یکسان و برابر ۱۶۳۵ می‌باشد. از آنجا که تعداد حالت‌های مورد بررسی در هر بار تکرار ۴۰۹۶ حالت ترکیبی از عملیات رو متغیرها بود زمان اجرای الگوریتم در ۵۰ تکرار ۳۰۲۴۲,۴۳ ثانیه محاسبه شده است.



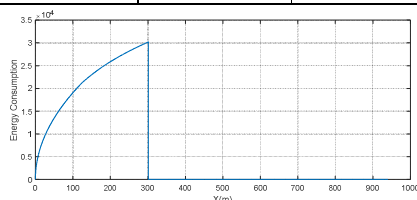
شکل ۱۲. نمودار سرعت-مکان بهینه در سناریو ۵ فازی



شکل ۱۳. نمودار نیروی کششی-مکان بهینه در سناریو ۵ فازی

جدول ۱۰. پارامترهای الگوریتم در سناریو سه‌فازی در مسیر دوم

بازه X2	بازه X1	تعداد متغیر	تابوها(تعداد حالتها)	تعداد عملیات (nAction)	طول تابو(TL)	شرط خاتمه(MaxIt)
۹۴۰ و	۹۴۰ و	۲	۳۲۴	۱۸	۱۶۲	۵۰



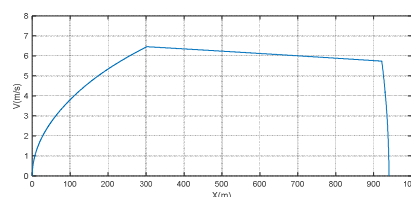
شکل ۱۶. نمودار انرژی - مکان بهینه در سناریو سه‌فازی

با توجه به شکل (۱۶) انرژی مصرفی از مکان شروع خلاصی کاهش یافته و به صفر می‌رسد.

#### ۵-۴- نتایج شبیه‌سازی مسیردوم در حالت پنج‌فازی

در این بخش ۵ فاز شتاب‌گیری اول خلاصی اول شتاب‌گیری دوم خلاصی دوم و ترمزگیری در نظر گرفته شده است. پارامترهای الگوریتم در این سناریو در جدول (۱۱) مشاهده می‌شود. در این بخش چهار متغیر تغییر استراتژی حرکت تعریف شده است که هر کدام حد پایین و حد بالا دارند. تعداد عملیات تعریف شده در حالت پنج‌فازی، هشت عمل و از آنجا که چهار متغیره است  $4 \times 8 \times 8 \times 8 = 2048$  حالت ترکیبی به دست می‌آید. حد پایین و حد بالا در واقع تعیین‌کننده فضای جستجوی الگوریتم هستند.

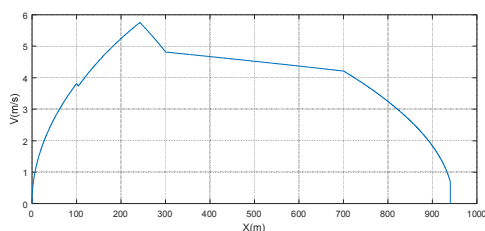
جواب به دست آمده در تکرار اول  $6087.8$  با  $X1=311$  و  $X2=926$  است. الگوریتم در تکرار هفتم روی مقدار  $5569.3$  با  $X1=301$  و  $X2=921$  همگرا شده است. مدت زمان اجرای الگوریتم  $195.5$  ثانیه محاسبه شده است. با توجه به شکل (۱۵) نمودار سرعت - مکان در حالت بهینه نشان داده شده است که در مکان  $301$  تغییر فاز شتاب‌گیری به خلاصی و در مکان  $921$  تغییر فاز خلاصی به ترمزگیری مشاهده می‌شود. مدت زمان شتاب‌گیری  $91$  ثانیه و کل زمان سیر  $200$  ثانیه محاسبه شده است. در واقع در این مسیر نیز مشابه مسیر اول جواب‌های خوب به دست آمده شامل خطای زمان است و در زمانی طولانی‌تر اما با پروفیل سرعت بهتر به مقصد می‌رسند.



شکل ۱۵. نمودار سرعت - مکان بهینه در سناریو سه‌فازی

جدول ۱۱. پارامترهای الگوریتم در سناریو پنج‌فازی مسیر دوم

بازه X4	بازه X3	بازه X2	بازه X1	تعداد متغیر	تابوها(تعداد حالتها)	تعداد عملیات (nAction)	طول تابو(TL)	شرط خاتمه(MaxIt)
۹۴۰ و	۹۴۰ و	۹۴۰ و	۹۴۰ و	۴	۴۰۹۶	۸	۲۰۴۸	۵۰



شکل ۱۷. نمودار سرعت - مکان تکرار اول در سناریو پنج‌فازی

در تکرار اول جواب بدست آمده  $4977.6$  و مدت زمان شتاب‌گیری  $81.6$  ثانیه محاسبه شده است. با توجه به شکل (۱۷) نمودار سرعت - مکان مقادیر متغیرها  $X1=100$   $X2=104$   $X3=242$   $X4=940$  به دست آمده است.

با مقایسه شکل (۱۹) و (۱۵) مشاهده می‌نماییم که مصرف انرژی در حالت سه‌فازی یک بار و در حالت پنج‌فازی دو بار صورت می‌گیرد. با مقایسه شکل (۲۱) و (۱۸) میزان انرژی مصرفی در حالت بهینه به سبب کاهش مدت زمان شتاب‌گیری کمتر از میزان مصرف انرژی در تکرار اول است.

با توجه به جدول زیر قطار در مسیر اول در سناریو سه‌فازی شامل شتاب‌گیری خلاصی و ترمزگیری انرژی کمتری به نسبت سناریو پنج‌فازی مصرف می‌کند زیرا الگوریتم به دنبال جوابی با حداقل زمان شتاب‌گیری و حداقل خطا است. اما در مسیر دوم برعکس مسیر اول قطار در حالت پنج‌فازی که شامل دو فاز شتاب‌گیری و دو فاز خلاصی است انرژی کمتری به نسبت سناریو سه‌فازی مصرف می‌کند. در نتیجه با توجه به مسیرهای مختلف با خصوصیات مختلف استراتژی‌های متفاوتی پیشنهاد می‌شود.

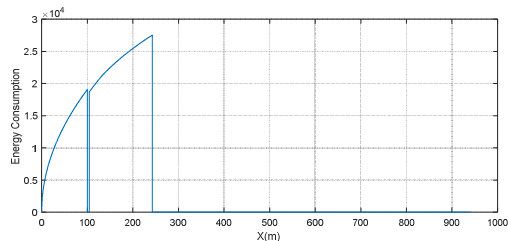
جدول ۱۲. مقایسه نتایج شبیه‌سازی

مقادیر بهینه متغیرها	مقدار بهینه تابع هدف	
X1=233 X2=1635	۳۴۲۲,۱	مسیر اول با ۳ فاز
X1=144 X2=320 X3=408 X4=1635	۳۴۵۸,۷	مسیر اول با ۵ فاز
X1=301 X2=921	۵۵۶۹,۳	مسیر دوم با ۳ فاز
X1=174 X2=175 X3=237 X4=930	۴۹۲۸,۸	مسیر دوم با ۵ فاز

این نتایج با فرض ثابت بودن پارامترهای الگوریتم و مدل دینامیکی قطار به دست آمده است. در بخش بعد با تغییر این پارامترها به بررسی نتایج و اثر آنها بر روی شبیه‌سازی می‌پردازیم.

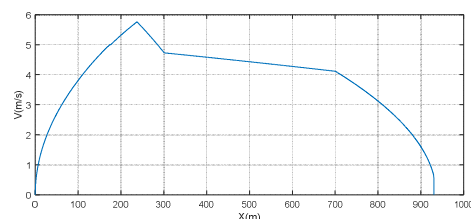
#### ۵-۵- تغییر پارامترهای مسئله

پارامترهایی از جمله فضای جستجو، طول تابو، تعداد عملیات و نوع عملیات در همگرایی به جواب بهینه و مدت زمان اجرای الگوریتم موثر هستند. تغییرات زیر در مدل سه‌فاز در مسیر اول اعمال شده است.

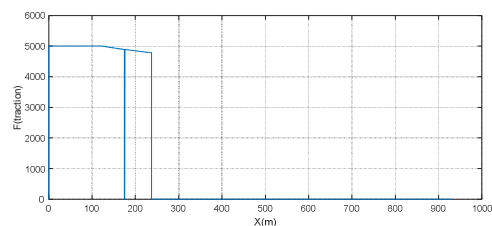


شکل ۱۸. نمودار انرژی - مکان تکرار اول در سناریو پنج‌فازی

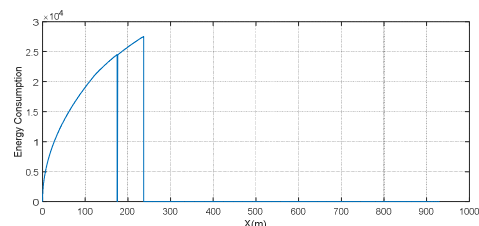
با پیاده‌سازی الگوریتم در تکرار ششم روی هزینه ۴۹۲۸,۸ و مدت زمان شتاب‌گیری ۸۰,۸ ثانیه همگرا شده است. با توجه به شکل (۱۹) در مکان ۱۷۴ تغییر استراتژی حرکت از شتاب‌گیری به خلاصی در مکان ۱۷۵ از خلاصی به شتاب‌گیری در مکان ۲۳۷ از شتاب‌گیری به خلاصی و در مکان ۹۳۰ قطار شروع به ترمزگیری می‌نماید. از آنجا که تعداد حالت‌های مورد بررسی در هر بار تکرار ۴۰۹۶ حالت ترکیبی از عملیات رو متغیرها بود زمان اجرای الگوریتم در ۵۰ تکرار ۲۵۱۳۵,۶۱ ثانیه محاسبه شده است.



شکل ۱۹. نمودار سرعت - مکان بهینه در سناریو پنج‌فازی



شکل ۲۰. نمودار نیروی کششی - مکان بهینه در سناریو پنج‌فازی



شکل ۲۱. نمودار انرژی - مکان بهینه در سناریو پنج‌فازی

جدول ۱۳. مقایسه تعداد عملیات

تعداد عملیات	جواب بهینه	همگرایی (تکرار)	زمان اجرا (ثانیه)
۱۰	۳۴۲۲,۱	۲۳	۱۷,۴۳
۱۴	۱,۳۴۲۲	۱۰	۵۹,۵۸
۱۸	۳۴۲۲,۱	۶	۱۰۵
۲۴	۳۴۲۲,۱	۴	۱۹۹,۸۷
۳۰	۳۴۲۲,۱	۴	۳۴۸,۹۷

نماییم در تکرار کمتری به جواب بهینه می‌رسیم و زمان اجرای الگوریتم نیز کاهش می‌یابد.

طول تابو در واقع تعداد دفعاتی است که هر تابو در زمان اجرای الگوریتم ممنوعه به حساب می‌آید. طول تابو در حالت سه‌فازی، ۱۶۲ فرض شده است که با کاهش طول تابو در تکرار کمتری به جواب بهینه می‌رسیم.

همانطور که در بخش‌های قبلی اشاره شد فضای جستجوی این الگوریتم را برای متغیر اول و دوم بین ۱ تا ۱۶۴۰ فرض نمودیم. با تغییر بازه حد پایین و بالا نتایج در جدول (۱۴) مشاهده می‌شود.

با توجه به جدول (۱۳) با افزایش تعداد عملیات زمان اجرای الگوریتم افزایش یافته اما در تکرار کمتری به جواب بهینه می‌رسد. از طرفی هرچه عملیات را هوشمندانه‌تر انتخاب

جدول ۱۴. تغییر فضای جستجو

حد پایین	حد بالا	جواب بهینه	مقدار متغیر X1	مقدار متغیر X2	همگرایی	زمان اجرا (ثانیه)
۱ و ۱۰۰	۱۶۴۰ و ۱۶۴۰	۳۴۲۲,۱	۲۳۳	۱۶۳۵	۶	۱۰۶
۱۰۰ و ۵۰	۱۶۰۰ و ۱۶۰۰	۴۷۱۵,۳	۴۳۲	۱۶۰۰	۳	۲۶,۴۸
۵۰ و ۵۰	۱۶۲۰ و ۱۶۲۰	۳۸۷۹,۶	۲۹۸	۱۶۲۰	۷	۵۱,۳۷
۲۰۰ و ۱۰۰	۱۶۴۰ و ۱۶۴۰	۳۴۲۲,۱	۲۳۳	۱۶۴۰	۲	۱۱۵,۱۴
۱۰۰ و ۵۰	۱۶۴۰ و ۱۶۰۰	۳۴۲۲,۱	۲۳۳	۱۶۳۰	۳	۱۰۹
۱۰۰ و ۱۰۰	۱۶۴۰ و ۴۰۰	۳۴۲۲,۱	۲۳۳	۱۶۳۵	۱۱	۹۴,۹۶
۱۰۰ و ۱۰۰	۱۶۰۰ و ۱۰۰	۴۷۲۷,۵	۴۳۵	۱۶۰۰	۱۴	۱۸,۷۷
۲۰۰ و ۱۰۰	۱۶۴۰ و ۵۰۰	۳۴۲۲,۱	۲۳۳	۱۶۴۰	۲	۱۰۸,۸۷

#### ۵-۶- مقایسه نتایج با الگوریتم ژنتیک

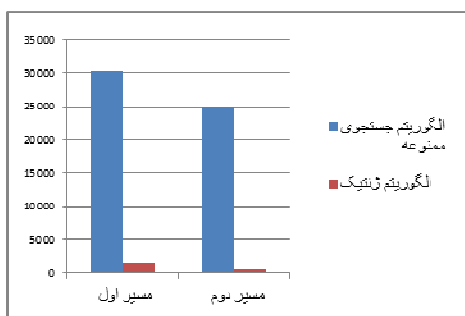
الگوریتم جستجوی ممنوعه بر خلاف ژنتیک از حافظه ممنوعه جهت جلوگیری از تکرار جواب‌های بازدید شده و تنوع جواب با استفاده از استراتژی تنوع بخشی استفاده می‌کند. در واقع با پیاده‌سازی این دو الگوریتم در پروفیل سرعت قطار تفاوت بین دو الگوریتم فراابتکاری، یکی براساس جمعیت و دیگری بر اساس جستجو را نشان می‌دهد.

از الگوریتم ژنتیک نیز در پیاده‌سازی در پروفیل سرعت استفاده نمودیم و در نهایت جهت بررسی کارایی الگوریتم جستجوی ممنوعه نتایج ژنتیک در جدول (۱۶) با نتایج جستجوی تابو مقایسه شده است.

با توجه به جدول (۱۴) هر چه بازه فضای جستجو کوچک‌تر لحاظ شود زمان اجرای الگوریتم کوتاه‌تر می‌شود و از طرفی دیرتر همگرا می‌شود. در حالی که بازه حد پایین و بالای متغیرها هوشمندانه انتخاب شود در تکرار کمتری به جواب بهینه می‌رسیم. زمان اجرای الگوریتم به عواملی چون فضای جستجو، تعداد عملیات بستگی دارد با کاهش فضای جستجو و کاهش تعداد عملیات زمان اجرای الگوریتم نیز کاهش می‌یابد.

جدول ۱۵. مقایسه دو الگوریتم GA و TS

مدت زمان اجرای الگوریتم (ثانیه)	همگرایی	مقادیر بهینه متغیرها	مقدار بهینه تابع هدف	
۱۰۵	۶	X1=233 X2=1635	۳۴۲۲,۱	مسیر اول در حالت ۳ فازی با جستجوی ممنوعه
۳۰۲۴۲	۵	X1=144 X2=320 X3=408 X4=1635	۳۴۵۸,۷	مسیر اول در حالت ۵ فازی با جستجوی ممنوعه
۶۲۸	۲۰	X1=296 X2=1629	۳۸۶۱,۳	مسیر اول در حالت ۳ فازی با ژنتیک
۱۵۲۶	۱۸	X1=124 X2=18 X3=290 X4=1634	۳۴۳۴,۳	مسیر اول در حالت ۵ فازی با ژنتیک
۱۹۵	۷	X1=301 X2=921	۵۵۶۹,۳	مسیر دوم در حالت ۳ فازی با جستجوی ممنوعه
۲۵۱۳۵	۶	X1=174 X2=175 X3=237 X4=930	۴۹۲۸,۸	مسیر دوم در حالت ۵ فازی با جستجوی ممنوعه
۴۸۲	۱۰	X1=315 X2=911	۵۶۹۷,۴	مسیر دوم در حالت ۳ فازی با ژنتیک
۵۲۸	۹	X1=314 X2=539 X3=544 X4=917	۵۷۴۶,۲	مسیر دوم در حالت ۵ فازی با ژنتیک



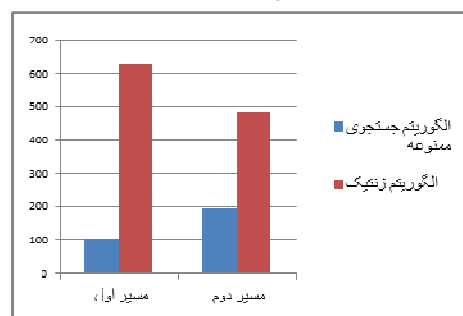
شکل ۲۳. نمودار میله‌ای مقایسه دو الگوریتم جستجوی ممنوعه و ژنتیک در سناریو پنج‌فازی

### ۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه پس از بررسی تاریخچه موضوع و مروری بر کارهایی که دیگران در زمینه بهینه‌سازی پروفیل سرعت انجام داده‌اند، به بررسی روش الگوریتم جستجوی تابو و مقایسه آن با الگوریتم‌های فازی و ژنتیک در این موضوع پرداختیم. ابتدا برای ترسیم پروفیل سرعت قطار و بهینه‌سازی آن باید تمام نیروهای وارد بر آن را در نظر بگیریم و با استفاده از داده‌های خط و قطار به ترسیم پروفیل سرعت بپردازیم. پس از یافتن روند ترسیم پروفایل خط با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی به پروفایل سرعت بهینه دست خواهیم یافت. در پروفایل بهینه

با توجه به جدول (۱۵) با مقایسه الگوریتم GA و TS

به این نتیجه رسیدیم که زمان اجرای الگوریتم ژنتیک در مسیر اول در حالت سه‌فازی طولانی‌تر از جستجوی ممنوعه بوده و مقدار جواب به دست آمده نیز کمتر است اما در حالت پنج‌فازی در زمانی کوتاه‌تر از زمان حل توسط TS، به جوابی نزدیک به جواب ۳۴۲۲,۱ می‌رسد.



شکل ۲۲. نمودار میله‌ای مقایسه دو الگوریتم جستجوی ممنوعه و ژنتیک در سناریو سه‌فازی

در مسیر دوم نیز الگوریتم ژنتیک در حالت پنج‌فازی در زمان کوتاه‌تری به جواب می‌رسد. الگوریتم ژنتیک در حالت پنج‌فازی برخلاف الگوریتم جستجوی تابو در زمان کمتری به جواب می‌رسد.



- در مدل‌سازی این پایان‌نامه جدول زمان‌بندی و مسئله زمان‌بندی قطار نیز در نظر گرفته شود.
- انرژی برگشتی در فاز ترمزگیری لحاظ شود و بهینه‌سازی حرکت چند قطار با توجه به جدول زمان‌بندی و مصرف انرژی برگشتی در فاز شتاب‌گیری با الگوریتم‌های فراابتکاری صورت گیرد.
- از برنامه‌ریزی چند هدفه با اهداف کاهش مصرف انرژی و کاهش زمان سیر با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده شود.
- از آنجا که الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری در بهینه‌سازی پروفیل سرعت قطار استفاده شده‌اند از الگوریتم‌های هیبریدی، به طور نمونه ترکیبی از الگوریتم ژنتیک و جستجوی ممنوعه جهت بهینه‌سازی پروفیل سرعت استفاده گردد.

#### ۷- پی‌نوشت‌ها

1. Dynamic Programming
2. Evolutionary Algorithms
3. Tabu List
4. Adaptive Memory
5. Responsive Exploration
6. Tabu List
7. Intensification

#### ۸- مراجع

صنیدیزاده م.ع.، پورانیان ز.، موحدی، م.، (۲۰۱۶)، "کاهش مصرف انرژی در حمل و نقل ریلی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات" فصلنامه علمی - پژوهشی مهندسی حمل و نقل، ۶۶۱۰-۶۵۹۸.

-Allen, L. A., & Chien, S. I. J., (2017), "Reducing Rail Energy Consumption through Coasting and Regenerative Braking" (No. 17-06235).

-Chang, S. H., Byen, Y. S., Baek, J. H., An, T. K., Lee, S. G., & Park, H. J., (1999), "An optimal automatic train operation (ATO) control using genetic algorithms (GA)", In TENCON 99. Proceedings of the IEEE Region 10 Conference, Vol. 1, pp. 360-362.

-Dalla Chiara, B., De Franco, D., Coviello, N., & Pastrone, D., (2017), "Comparative specific energy consumption between air transport and high-speed rail transport: A practical assessment". Transportation Research Part D: Transport and Environment, 52, pp.227-243.

نقاط تغییر فاز حرکت به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که حداقل خطا و حداقل مدت زمان شتاب‌گیری را به دنبال داشته باشند. در این مطالعه دو سناریو را به عنوان استراتژی حرکت قطار در نظر گرفتیم. سناریو سه‌فازی که قطار در سه فاز شتاب‌گیری، خلاصی و ترمزگیری به مقصد می‌رسد و سناریو پنج‌فازی که شامل شتاب‌گیری، خلاصی، شتاب‌گیری، خلاصی و ترمزگیری است. هدف در واقع حداقل کردن مدت زمان شتاب‌گیری با استفاده از الگوریتم جستجوی ممنوعه است که در حالت سه‌فازی، یک بازه شتاب‌گیری و حالت پنج‌فازی دو بازه شتاب‌گیری خواهیم داشت. از داده‌های دو مسیر در مترو تهران جهت شبیه‌سازی استفاده نمودیم. قطار در مسیر اول در سناریو سه‌فازی، انرژی کمتری به نسبت سناریو پنج‌فازی مصرف می‌کند. اما در مسیر دوم برعکس مسیر اول قطار در حالت پنج‌فازی که شامل دو فاز شتاب‌گیری و دو فاز خلاصی است انرژی کمتری به نسبت سناریو سه‌فازی مصرف می‌کند. در نتیجه با توجه به مسیرهای مختلف با خصوصیات مختلف استراتژی‌های حرکتی و پروفیل‌های متفاوتی پیشنهاد می‌شود.

با مقایسه الگوریتم TS و GA به این نتیجه رسیدیم که زمان اجرای الگوریتم ژنتیک در مسیر اول در حالت سه‌فازی طولانی‌تر از جستجوی ممنوعه بوده و مقدار جواب به دست آمده نیز کمتر است اما در حالت پنج‌فازی در زمانی کوتاه‌تر از زمان حل توسط TS، به جوابی نزدیک به جواب ۳۴۲۲٫۱ می‌رسد. در مسیر دوم نیز الگوریتم ژنتیک در حالت پنج‌فازی در زمان کوتاه‌تری به جواب می‌رسد. الگوریتم ژنتیک در حالت پنج‌فازی برخلاف الگوریتم جستجوی تابو در زمان کمتری به جواب می‌رسد. از طرفی زمان اجرای الگوریتم جستجوی ممنوعه در حالت پنج‌فازی در مسیر اول به نسبت بقیه حالت‌ها و مسیر دوم طولانی‌تر است زیرا فضای جستجو الگوریتم بزرگ است و در زمان طولانی به جواب خوب می‌رسد. با توجه به این موضوع و با در نظر گرفتن مسئله بزرگ بودن فضای جستجوی الگوریتم، اگر تعداد فازها و تغییرات حالت سیستم کمتر باشد الگوریتم جستجوی ممنوعه نتیجه بهتری را ارائه می‌دهد. با توجه به این مقاله و منابع پیشین، موضوعات زیر می‌تواند به عنوان زمینه‌ای برای تحقیقات آتی در نظر گرفته شوند.

- بررسی الگوریتم جستجوی تابو در مدل چند واگن قطار که در آن حرکت کلیه واگن‌های قطار بررسی شده و نیروی بین واگنی ناشی از دمپرها و فنرها نیز محاسبه شود و جرم گسترده قطار در نظر گرفته شود.

- Wang, J., & Rakha, H. A., (2017), "Electric train energy consumption modeling", *Applied energy*, 193, pp.346-355.
- Watanabe, K., (2018), "Reduction of energy consumption for running in pre-mass-production train set of Series E235: the verification of energy consumption for running and traction control conditions in regenerative braking due to expansion of regenerative brake region". *Japanese Railway Engineering*.
- Xu, X., Li, K., & Li, X., (2016), "A multi-objective subway timetable optimization approach with minimum passenger time and energy consumption". *Journal of Advanced Transportation*, 50(1), pp.69-95.
- Yang, X., Li, X., Ning, B., & Tang, T., (2015), "An optimisation method for train scheduling with minimum energy consumption and travel time in metro rail systems" *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 3(2), pp.79-98.
- Yin, J., Yang, L., Tang, T., Gao, Z., & Ran, B., (2017), "Dynamic passenger demand oriented metro train scheduling with energy-efficiency and waiting time minimization: Mixed-integer linear programming approaches". *Transportation Research Part B: Methodological*, 97, pp.182-213.
- Zhao, N., Roberts, C., Hillmansen, S., & Nicholson, G., (2015), "A multiple train trajectory optimization to minimize energy consumption and delay". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(5), pp.2363-2372.
- Zhao, N., Roberts, C., Hillmansen, S., Tian, Z., Weston, P., & Chen, L., (2017), "An integrated metro operation optimization to minimize energy consumption". *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 75, pp.168-182.
- Glover, F., & Laguna, M., (2002), "Handbook of Applied Optimization", chapter 3.6. 7: Tabu Search.
- Huang, Y., Yang, L., Tang, T., GAO, Z., & Cao, F., (2017), "Joint train scheduling optimization with service quality and energy efficiency in urban rail transit networks", *Energy*, 138, pp.1124-1147.
- Kampeerawat, W., & Koseki, T., (2017), "A strategy for utilization of regenerative energy in urban railway system by application of smart train scheduling and wayside energy storage system". *Energy Procedia*, 138, pp.795-800.
- Keskin, K., & Karamancioglu, A., (2017), "Energy-efficient train operation using nature-inspired algorithms", *Journal of Advanced Transportation*.
- Li, X., & Lo, H. K., (2014), "An energy-efficient scheduling and speed control approach for metro rail operations". *Transportation Research Part B: Methodological*, 64, pp.73-89.
- Liu, J., Guo, H., & Yu, Y., (2016). Research on the cooperative train control strategy to reduce energy consumption. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(5), pp.1134-1142.
- Scheepmaker, G. M., Goverde, R. M., & Kroon, L. G., (2017), "Review of energy-efficient train control and timetabling. *European Journal of Operational Research*", 257(2), pp.355-376.
- Su, S., Tang, T., & Roberts, C., (2015), "A cooperative train control model for energy saving" *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 16(2), pp.622-631.
- Su, S., Tang, T., Chen, L., & Liu, B., (2015), "Energy-efficient train control in urban rail transit systems" *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 229(4), pp.446-454.

# **The Effect of Using the Tabu Search Algorithm on the Speed of Achieving the Optimal Train Speed Profile (in order to Reduce Energy Consumption)**

*Mohammad Ali Sandidzadeh, Associate Professor, School of Railway Engineering, Iran University of Science, Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*Maryam Askarian, M.Sc., Grad., School of Railway Engineering, Iran University of Science, Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*Farzad Soleymani, Ph.D. Student, School of Railway Engineering, Iran University of Science, Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*E-mail: Sandidzadeh@iust.ac.ir*

Received: June 2020-Accepted: November 2020

## **ABSTRACT**

Rail transit plays an increasingly important role in the public transportation system, and effectively reducing its huge energy consumption is of great practical significance. Wider use of public transport, particularly rail and metro, is one way to save energy. A growing trend of applying the rail network and metro by governments on one hand and the considerable energy consumption of a train during one year, on the other hand, demonstrate the necessity of considering the consumed energy by train. Railway transportation consumes amounts of energy. Direct energy consumption to complete the transport tasks is the main part of energy consumption of rail transportation, especially the traction system, which leads to the railway transportation costly. Optimization of the train speed curve plays an important role in minimizing train energy consumption. In this paper, first, there was a review on models of train energy optimization with different characteristics and corresponding other algorithms to find the optimum speed profile and accuracy of them, Second Tabu Search (TS) algorithm as a new approach for optimizing the train speed profile to save energy will be investigated. In this approach, after determining the appropriate points of acceleration, neural and braking, a speed profile in which train could cover its route with minimum energy consumption will be achieved. We call these points "the variables for changing the training strategy. The algorithm was implemented in alternative routes. In this study, the simulations of the proposed method are implemented in MATLAB software and are finally compared with the Genetic Algorithm method.

**Keywords:** Optimal Train Speed Profile, Tabu Search Algorithm, Optimization, Energy Consumption