افزایش بهره‌وری انرژی در سامانه‌های قطارشهری با بهینه‌سازی هم‌زمان مشخصه سرعت و توزیع زمان سفر قطارها

سعید احمدی[۱] ، دانشجوی دکتری، علی دستفان[۲]، دانشیار ، محسن اصیلی[۳]، استادیار

دانشکده مهندسی برق و رباتیک - دانشگاه صنعتی شاهرود- شاهرود- ایران
saeedahmadi@shahroodut.ac.ir[1], Dastfan@shahroodut.ac.ir[2], m.assili@shahroodut.ac.ir[3]

چکیده: مصرف بالای انرژی الکتریکی در سامانه‌های قطارشهری، بسیاری از پژوهشگران را بر آن داشته است تا به دنبال راهکارهایی برای صرفه‌جویی انرژی باشند. از طرف دیگر سرویس‌دهی مناسب همراه با دقت و سرعت بالا از خواسته‌های اصلی مسافران به‌عنوان مشتریان این سامانه‌هاست. در این میان بهره‌برداری کارآمد قطارها[۱] به دلیل در نظر گرفتن هم‌زمان صرفه‌جویی انرژی و وقت‌شناسی، از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مقاله ضمن ارائه راهکاری برای صرفه‌جویی انرژی با رعایت قیدهای مربوط به زمان سفر، تأثیر در نظر گرفتن نرخ متغیر میزان بازیابی انرژی بازتولیدی ترمزی، در بهبود کاهش انرژی مصرفی کل شبکه نشان داده‌شده است. این کار طی یک فرایند بهینه‌سازی دومرحله‌ای انجام‌شده است. ابتدا با در نظر گرفتن انرژی خالص قطار همراه با زمان سفر بین ایستگاهی به‌عنوان تابع هدف، با استفاده از الگوریتم مرتب‌سازی نا مغلوب[۲]، مشخصه‌های سرعت[۳] بهینه برای سیستم تک‌قطاره به‌دست‌آمده است، سپس با توزیع زمان سفر بین ایستگاه‌ها و استفاده از مشخصه‌های بهینه مرحله قبل انرژی کل دریافتی سیستم چندقطاره از شبکه بالادستی حداقل شده است. نتایج شبیه‌سازی در خط ۱ قطارشهری مشهد کارایی روش موردنظر را تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: صرفه‌جویی انرژی، قطارشهری، مشخصه سرعت بهینه، انرژی بازتولیدی ترمزی، مرتب‌سازی نا مغلوب،بهره-برداری کارآمد قطار، بهینه‌سازی دو هدفه.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۵/۷/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۶/۰۲/۳۱

نام نویسنده‌ی مسئول : سعید احمدی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی برق و رباتیک

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.8.5]

۱- مقدمه

امروزه سامانه‌های قطارشهری به دلیل داشتن ویژگی‌هایی مانند ظرفیت حمل مسافر بالا، سرعت عمل و وقت‌شناسی، کاهش ترافیک و کاهش آلودگی هوا، به‌عنوان بهترین نوع ناوگان حمل‌ونقل شهری در شهرهای بزرگ مطرح می‌باشند. از طرفی مصرف انرژی الکتریکی در این سامانه‌ها بالاست. این موضوع می‌تواند برای شرکت‌های توزیع برق بخصوص در ساعت‌های اوج مصرف، به‌عنوان چالش جدی بشمار آید. بهترین راهکار برای حل این مشکل، صرفه‌جویی انرژی است. ازآنجاکه بخش عمده انرژی مربوط به سیستم کششی قطارهاست، مطالعات انجام‌شده بیشتر در این حوزه هستند[1]. استفاده از انرژی بازتولیدی ترمزی (شامل ذخیره‌سازهای انرژی، پستهای باقابلیت برگشت توان به شبکه و تنظیم جدول زمانی حرکت قطارها)، راهبری اقتصادی، کاهش تلفات در سامانه‌های تغذیه و آسایشی، روش‌های صرفه‌جویی انرژی در سیستم کششی قطارها هستند. راهبری اقتصادی (بهینه‌سازی مشخصه سرعت برحسب مکان (پروفایل سرعت)) و تنظیم جدول زمانی حرکت قطارها، به دلیل سازگاری با سامانه‌های موجود و هزینه پایین، بیش از همه موردتوجه پژوهشگران قرارگرفته‌اند.

هدف اصلی در بهره‌برداری کارآمد قطار، کاهش انرژی مصرفی ضمن رعایت قیدهای مربوط به زمان سفر است، گرچه اهداف دیگری نیز مانند هزینه و پارامترهای کیفیت توان وجود دارند که می‌توان مسئله را به‌صورت بهینه‌سازی تک‌هدفه همراه با قیدها و یا به‌صورت بهینه‌سازی چندهدفه در نظر گرفت. قسمت عمده‌ای از این صرفه-جویی را می‌توان با بهینه‌سازی مشخصه سرعت به دست آورد، لذا مطالعات زیادی به این موضوع اختصاص‌یافته‌اند. اولین بار اصل ماکزیمم پونتریاگین برای پیدا کردن راهبرد کنترل بهینه قطار در[2] مورداستفاده قرار گرفت. اخیراً نیز روش‌های مبتنی بر این اصل برای رسیدن به بهره‌برداری کارآمد در [3, 4] بکار رفته‌اند. در [5-7] از روش‌های کلاسیک نظیر برنامه‌ریزی دینامیکی، ضرایب لاگرانژ، روش گرادیان، برنامه‌ریزی متوالی درجه دوم و برنامه‌ریزی غیرخطی برای تعیین راهبری بهینه استفاده‌شده است. روش‌های هوشمند نیز در این حوزه استفاده وسیعی داشته‌اند. الگوریتم ژنتیک در [8-10] بکار رفته است. از تئوری مورچه‌ها نیز برای بهینه‌سازی مشخصه سرعت تک‌قطاره در [11] استفاده‌شده است. الگوریتم سرد کردن فلزات[۴] برای حداقل کردن انرژی کل مصرفی در [12] بکار رفته است. تئوری تصمیم و معیار غلبه کردن در [13] برای پیدا کردن جبهه پرتو[۵] در بهینه‌سازی دوهدفه انرژی-زمان استفاده‌شده است. برای بهینه‌سازی مشخصه سرعت، در [14] یک الگوریتم مبتنی بر کنترل مشارکتی برای تعیین زمان بهینه ترک ایستگاه‌ها معرفی‌شده است. مشخصه‌های سرعت بهینه برای بهره‌برداری خودکار[۶] باهدف بالا بردن میزان پذیرندگی شبکه در [15] تعیین‌شده‌اند. دو روش بهینه‌سازی بر اساس صرفه‌جویی انرژی و بازیابی انرژی در [16] معرفی‌شده‌اند. الگوریتم‌های تکاملی مبتنی بر شاخص‌ها و دیفرانسیل تکاملی و سرد کردن فلزات برای پیدا کردن مشخصه‌های سرعت کارآمد در [17, 18] استفاده‌شده‌اند. بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات نیز به‌منظور تعیین مشخصه سرعت بهینه برای ATO و جبهه پرتوی انرژی-زمان در [19-21] استفاده‌شده است. برای رسیدن به راهبری کارآمد، از الگوریتم‌های مبتنی بر سامانه‌های خبره و یادگیری تقویتی بدون نیاز به مشخصه‌های سرعت از پیش تعیین‌شده نیز در [22] استفاده‌شده است. در [23] روش بهینه‌سازی مبتنی بر برنامه‌ریزی اعداد صحیح برای تنظیم جدول زمانی و الگوریتم ژنتیک تطبیقی برای کنترل قطار ارائه‌شده است تا زمان سفر و انرژی کاهش داده شود. در [24] نیز مرور جامعی بر بهره‌برداری کارآمد قطار در سامانه‌های قطارشهری انجام‌شده و درنهایت نتیجه گرفته‌شده است که در مطالعات آینده، بهینه‌سازی یکپارچه جدول زمانی و مشخصه سرعت باید بیشتر موردتوجه قرار گیرد. با جمع‌بندی تحقیقات قبلی، می‌توان آن‌ها را بطور کلی در ۲ گروه اصلی زیر دسته‌بندی کرد:

الف- مطالعات بر روی سامانه‌های تک‌قطاره با هدف تعیین مشخصه بهینه سرعت در مسیر بین دو ایستگاه متوالی. در این مطالعات صرف‌نظر از روش مورداستفاده، هدف اصلی حداقل کردن انرژی مصرفی قطار است که منطقی است زیرا قطار دیگری در سیستم وجود ندارد که بتواند انرژی بازتولیدی قطار موردنظر را استفاده کند و پذیرندگی شبکه بی‌معنی است (گرچه این روش برای قطارهای داخل شهری استفاده‌شده است ولی واقعیت امر این است که در عمل برای این قطارها چنین وضعیتی رخ نمی‌دهد و مطالعه تک‌قطاره بیشتر برای قطارهای بین‌شهری و سریع‌السیر مناسب است که واقعاً در اطراف آن‌ها قطار دیگری وجود ندارد).

ب- مطالعات مرتبط با سامانه‌های چندقطاره که معمولاً بهینه-سازی به‌صورت دومرحله‌ای انجام‌شده است. تحقیقات این بخش را نیز می‌توان به سه زیرگروه زیر تقسیم کرد:

- بهینه‌سازی مشخصه سرعت قطارها با هدف حداقل کردن انرژی ورودی کل شبکه، در اغلب این مطالعات میزان پذیرندگی شبکه در نظر گرفته نشده است.
- تنظیم جدول زمانی حرکت قطارها با هدف هم‌زمانی هرچه بیشتر ترمز و شتاب‌گیری قطارها و استفاده حداکثری از انرژی بازتولیدی آن‌ها.
- بهینه‌سازی هم‌زمان مشخصه‌های سرعت و تنظیم جدول زمانی با هدف حداقل کردن انرژی ورودی کل شبکه (بهره‌برداری کارآمد قطارها) که در اکثر این تحقیقات نیز ، بازهم مشخصه بهینه هر قطار مبتنی بر حداقل سازی فقط انرژی مصرفی به‌دست‌آمده است. درحالی‌که میزان پذیرندگی شبکه در این سامانه‌ها عامل مؤثری دررسیدن به پاسخ بهینه است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.8.5]

در این مقاله بهینه‌سازی مشخصه سرعت همراه با توزیع زمان سفر انجام‌شده است. مهم‌ترین نوآوری تحقیق حاضر این است که به موضوع از منظر جدیدی پرداخته‌شده است و با در نظر گرفتن « نرخ بازیابی انرژی بازتولیدی»، انرژی خالص دریافتی هر قطار (اختلاف بین انرژی مصرفی و انرژی تحویلی به شبکه) حداقل شده است. ازآنجاکه میزان پذیرندگی شبکه معلوم نیست، چندین جبهه پرتوی انرژی-زمان متناظر با مقادیر مختلف نرخ بازیابی انرژی بازتولیدی که ازاین‌پس با α نشان داده خواهد شد، محاسبه‌شده‌اند و تأثیر آن‌ها بر کاهش انرژی ورودی کل شبکه نشان داده‌شده است. نرخ بازیابی در مراجع [3] و [9] و [11-13]و [16-22] در نظر گرفته نشده (یا صفر فرض شده) است و در [7]و [8]و [10] ثابت فرض شده است و در [14]و [15] با مفهومی متفاوت سعی شده است با استفاده از روش‌هایی مانند سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی و یا پست‌های اینورتری توان ذخیره و یا به شبکه بالادستی برگردانده شود و نرخ بازیابی افزایش داده شود که با دیدگاه این مقاله متفاوت است.

ویژگی دیگر این است که در بهینه‌سازی تک‌قطاره در مطالعات قبلی روش‌های نسبتاً پیچیده‌ای استفاده‌شده است که در بعضی موارد جهت ساده‌سازی، تقریب‌هایی وارد مسئله شده است، ولی در این مقاله با انتخاب دو پارامتر تصمیم سرعت و زمان خلاصی قطار سعی شده است ضمن اینکه مشخصه سرعت به‌دست‌آمده بهینه باشد، همه قیدها و محدودیت‌های الکتریکی و مکانیکی نیز رعایت شود و دقت و سرعت شبیه‌سازی و بهینه‌سازی نیز بالا است (گرچه چون روش غیر برخط است، سرعت در مرحله دوم اهمیت است) و مهم‌تر از همه اینکه به‌سادگی قابلیت پیاده‌سازی در راهبری دستی توسط راهبران را داراست. درنهایت، با توجه به اینکه در بخش بهینه‌سازی تک‌قطاره، جبهه پرتو برای همه فاصله‌های بین ایستگاهی به‌دست‌آمده است، می‌توان از این نتایج برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و برنامه‌ریزی نیز در صورت نیاز به تغییر زمان سفر کل مسیر به‌سادگی استفاده کرد و توزیع زمان سفر جدید را طوری انجام داد که حداکثر صرفه‌جویی انرژی حاصل گردد.

۲- شبیه‌سازی سیستم تک‌قطاره

شبیه‌سازی حرکت قطار بر اساس معادله مکانیکی حرکت مدل می‌شود[25].

$$M\frac{dv}{dt}=F_{\mathrm{T}}(x,v)-R_{\mathrm{T}}(x,v) \qquad (۱)$$

که M جرم کل قطار شامل قسمت‌های گردان و مسافران است، x موقعیت و v سرعت قطار و F_{T} نیروی کششی (ترمزی) قطار و R_{T} مقاومت کل قطار است که

$$R_{\mathrm{T}}(x,v)=R(v)+R_{\mathrm{c}}(x)+R_i(x) \quad [\mathrm{kN}] \qquad (۲)$$

$$R(v)=\mathrm{A}+\mathrm{B}v+\mathrm{C}v^2 \qquad (۳)$$

$$R_{\mathrm{c}}=\begin{cases}\dfrac{650}{(r_{\mathrm{c}}-55)} & r_{\mathrm{c}}>400\,\mathrm{m}\\ \dfrac{750}{r_{\mathrm{c}}} & 150m\le r_{\mathrm{c}}\le 400\,\mathrm{m}\\ 5 & r_{\mathrm{c}}<150\,\mathrm{m}\end{cases} \qquad (۴)$$

$$R_i(x)=Mg\sin\alpha=Mgi(x) \qquad (۵)$$

$R(v)$و $R_{\mathrm{c}}(v)$و $R_i(v)$ به ترتیب مقاومت‌های قطار، انحنا و شیب مسیر و Aو Bو C ضرایب ثابت و r_{c} شعاع انحنا و i شیب مسیر هستند. روابط مقاومت قطار و انحنای مسیر معمولاً به‌صورت تجربی به دست می‌آیند.

در شبیه‌سازی تک‌قطاره، حالت‌های کاری حرکت قطار متناسب با مشخصات قطار و مسیر محاسبه می‌شوند. هر برنامه حرکتی بین دو ایستگاه متوالی شامل چهار حالت کاری شتاب‌گیری، ثابت نگه‌داشتن سرعت[۷]، خلاصی[۸] و ترمز گیری است که فازهای شتاب و ترمز الزامی هستند ولی دو فاز دیگر اختیاری هستند و به پارامترهایی نظیر فاصله بین دو ایستگاه و مشخصات هندسی مسیر و برنامه زمانی حرکت قطارها نیز بستگی دارند. حالت خلاصی برای کاهش انرژی مصرفی مفید است ولی از طرفی باعث افزایش زمان سفر می‌شود و با انتخاب مناسب آن می‌توان مصالحه‌ای بین انرژی و زمان سفر برقرار کرد که در بخش‌های بعد بیشتر به آن پرداخته خواهد شد.

با انتخاب Δt به‌عنوان پله زمانی شبیه‌سازی، با استفاده از معادله (۱)، شتاب قطار در هرلحظه حساب می‌شود و با استفاده از معادلات (۶)، (۷)و (۸) موقعیت و سرعت قطار در لحظه موردنظر محاسبه می‌شوند.

$$V_t=V_{t-1}+a_t\Delta t \quad [\mathrm{m/s}] \qquad (۶)$$

$$\Delta X=\frac{V_t^{\,2}-V_{t-1}^{\,2}}{2a_t} \quad [\mathrm{m}] \qquad (۷)$$

$$X_t=X_{t-1}+\Delta X \quad [\mathrm{m}] \qquad (۸)$$

که V_tو X_t سرعت و موقعیت جدید قطار هستند. توان مصرفی و بازتولیدی قطار هم از روابط (۹)و (۱۰) محاسبه می‌شوند.

$$P_{cons}=\frac{F_T\times v}{\eta} \quad [\mathrm{kW}] \qquad (۹)$$

$$P_{regen}=F_T\times v\times\eta \quad [\mathrm{kW}] \qquad (۱۰)$$

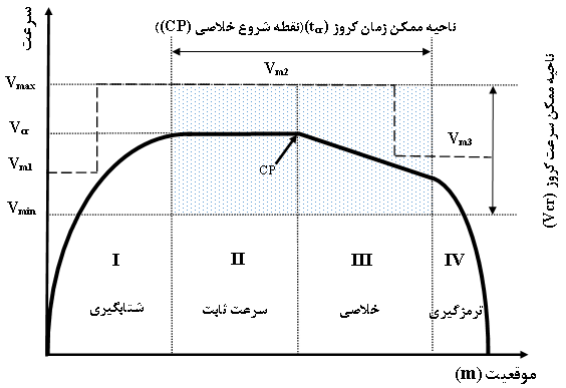
رابطه (۹) برای حالت کاری شتاب، سرعت ثابت و خلاصی که $F_{\mathrm{T}}\ge 0$ است و رابطه (۱۰) برای حالت ترمزی که $F_{\mathrm{T}}<0$ است، بکار می‌روند. ویژگی مهم این شبیه‌سازی، قابلیت در نظر گرفتن هر تعداد محدودیت سرعت و پیچیدگی‌های مسیر شامل انحنا و شیب‌های متفاوت است و ضمن رعایت جرک، دقت کافی جهت تعیین دقیق نقطه توقف را داراست. دقت و اعتبار شبیه‌سازی با مقایسه نتایج با شبیه‌سازی انجام‌شده توسط شرکت سازنده‌ی واگن‌های قطار خط یک مشهد مورد ارزیابی و تأیید قرارگرفته است[26].

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.8.5]

۳- بهینه‌سازی مشخصه‌سرعت سیستم تک‌قطاره

همان‌طور که در بخش قبل گفته شد، حرکت قطار طبق معادله دینامیکی مدل شده و چهار حالت حرکتی برای هر فاصله بین ایستگاهی شبیه‌سازی می‌شوند و مشخصه سرعت برحسب مکان (مشخصه سرعت) مطابق شکل (۱) به دست می‌آید.



شکل (۱): مشخصه سرعت – مکان (پروفایل سرعت) نمونه با چهار حالت کاری و نواحی ممکن متغیرهای تصمیم

حال با انتخاب سرعت قطار در ابتدای ناحیه سرعت ثابت (سرعت کروز (V_{cr})) و مدت‌زمان ثابت نگه‌داشتن سرعت (t_{cr}) (متناظر با لحظه انتقال به حالت خلاصی) به‌عنوان متغیرهای تصمیم و انرژی خالص دریافتی قطار و زمان سفر به‌عنوان توابع هدف، کلیه پاسخ‌های ممکن (مشخصه‌های سرعت) تعیین می‌شوند. درنهایت طی یک فرایند بهینه‌سازی دوهدفه، جبهه پرتوی انرژی-زمان به دست می‌آید. مدل حداقل سازی انرژی خالص J_e و زمان سفر بین ایستگاهی J_t طبق رابطه (۱۱) بیان می‌شود. لازم به توضیح است که روابط (۱۲) تا (۱۷) مدل ریاضی جدیدی را برای مدل‌سازی قطار ارائه نمی‌کنند و همان مدل‌های معمول محاسبه انرژی و زمان سفر هستند که در منابع قبلی هم استفاده‌شده‌اند، فقط در اینجا یک فرمولاسیون جدید درزمینه بهینه‌سازی معرفی‌شده است. به‌عبارت‌دیگر تأکید بر روی معرفی روش جدید نیست بلکه دخالت دادن یک کمیت جدید بنام α است که دیدگاه جدید و متفاوتی را برای تعیین پاسخ‌های بهینه و تفکیک پاسخ‌های خوب و نامناسب ایجاد می‌کند و درنهایت منجر به رسیدن به صرفه‌جویی بیشتر انرژی کل سیستم نسبت به روش‌های قبلی می‌شود.

$$\min J_t(k,j), J_e(k,j) \quad ,k=1,2,\ldots,N(j),\ j=1,2,\ldots,2n-2 \qquad (۱۱)$$

که n تعداد ایستگاه‌ها و $2n-2$ تعداد فاصله‌های بین ایستگاهی در کل مسیر رفت‌وبرگشت است.

$$J_t(k,j)=T_{IS}(k,j)=\int_0^{L(j)}\frac{1}{v}dx \qquad (۱۲)$$

$$J_e(k,j)=E_{net}(k,j)=E_{cons}(k,j)-\alpha E_{regen}(k,j) \qquad (۱۳)$$

$$\alpha=\frac{E_{regen\text{-}reused}}{E_{regen}} \qquad (۱۴)$$

$$0\le\alpha\le 1$$

$$E_{cons}(k,j)=\int_0^{T_{IS}(k,j)}P_{cons}(t)dt \qquad (۱۵)$$

$$E_{regen}(k,j)=\int_0^{T_{IS}(k,j)}P_{regen}(t)dt \qquad (۱۶)$$

$$T_{IS\,min}(j)<T_{IS}(k,j)<T_{IS\,max}(j) \qquad (۱۷)$$

ناحیه ممکن برای متغیرهای تصمیم در شکل (۱) نشان داده‌شده است. V_{cr} می‌تواند بین دو مقدار حداکثر سرعت مجاز V_{max} و حداقل سرعت قابل‌قبول V_{min} (ازنظر آسایش مسافران) تغییر کند. V_{m1} و V_{m2} و V_{m3}محدودیت‌های سرعت در طول مسیر هستند که معمولاً کمتر از حداکثر سرعت مجاز بهره‌برداری هستند. E_{cons} و E_{regen} به ترتیب انرژی مصرفی و بازتولیدی ترمزی در یک‌فاصله بین ایستگاهی هستند. مقدار α در رابطه (۱۴) به‌صورت ریاضی بین شده است که نشان‌دهنده نسبت مقدار انرژی بازتولیدی استفاده‌شده توسط بقیه قطارها($E_{regen\text{-}reused}$) به کل انرژی بازتولیدی است. واضح است که مقدار آن بین صفر و یک تغییر می‌کند. نقطه خلاصیt_{cr} هم در ناحیه‌ای بین موقعیتی که قطار به‌سرعت V_{cr} می‌رسد و ابتدای ناحیه ترمزی تغییر می‌کند. با تغییر پارامترهای تصمیم در ناحیه ممکن، برای فاصله بین ایستگاهی j تعداد $N(j)$ پاسخ ممکن به دست می‌آید که هر مشخصه سرعت تولیدشده را می‌توان با شاخص k نام‌گذاری کرد. این پاسخ‌ها متناظر با نقاط $(J_t(k,j), J_e(k,j))$ در صفحه انرژی-زمان هستند. اگر همه حالت‌های ممکن شبیه‌سازی شوند، گراف انرژی-زمان‌برای فاصله بین ایستگاهی موردنظر به دست می‌آید. نمونه‌هایی از مشخصه‌های سرعت به‌دست‌آمده در شکل (۲) نشان داده‌شده است.

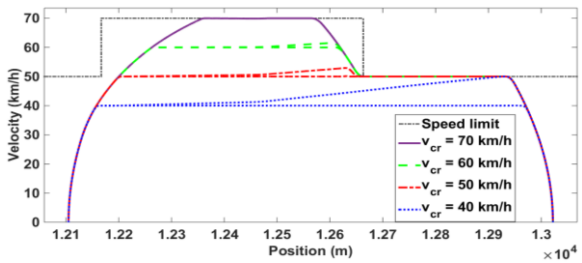
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.8.5]

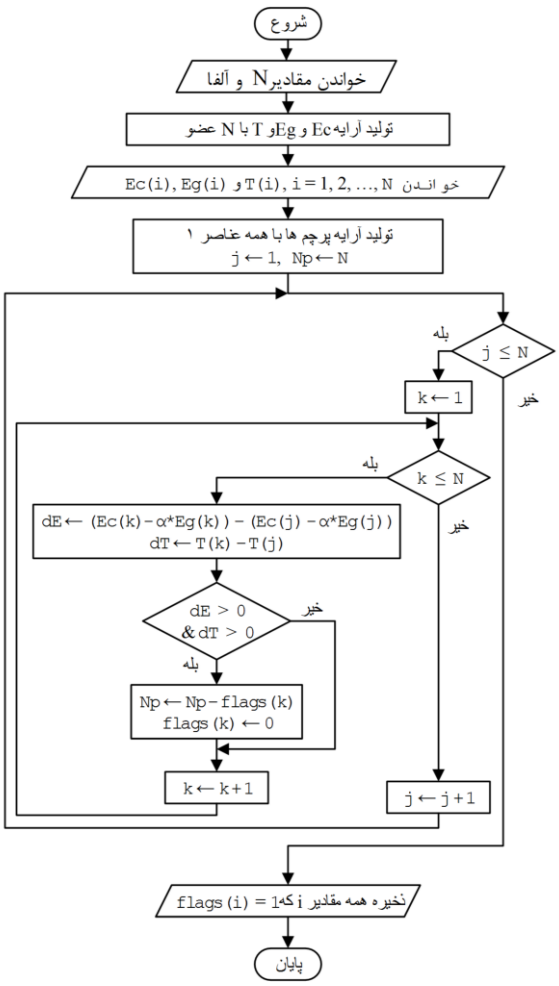
پس از محاسبه همه مشخصه‌های سرعت ممکن، جبهه پرتو برای فضای پاسخ‌های ممکن توسط یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر مرتب‌سازی غیر مغلوب به دست می‌آید [27]. الگوریتم موردنظر در شکل (۳) نشان داده‌شده است.کلیه حالت‌های ممکن انرژی-زمان همراه با جبهه پرتوی آن برای یک ایستگاه نمونه در شکل (۴) نشان داده‌شده است. تعداد پاسخ‌های غیر مغلوب که روی پرتو قرار می‌گیرند برای هر مقدار ثابت α، N_p است. شبیه‌سازی در فضای نرم‌افزار متلب انجام‌شده است. الگوریتم پیشنهادی جستجوی کاملی[۹] را انجام می‌دهد و پیدا کردن پاسخ‌های بهینه را تضمین می‌کند و به‌اندازه کافی سریع و دقیق است و زمان شبیه‌سازی هم قابل‌قبول است [28].

تغییر α جبهه پرتو و پاسخ‌های بهینه را تغییر می‌دهد، لذا انتخاب مقادیر متفاوت برای آن، انرژی خالص و درنتیجه پاسخ‌های نهایی را تغییر می‌دهد. به‌عبارت‌دیگر با تغییر α تعدادی از پاسخ‌ها که قبلاً روی جبهه پرتو قرار داشته‌اند، از حالت بهینه خارج می‌شوند و پاسخ‌های دیگری جای آن‌ها را می‌گیرند. این موضوع در شکل (۴) به‌خوبی برای یک‌فاصله بین ایستگاهی سراشیبی نشان داده‌شده است. در یک سیستم چندقطاره مقدار α به وضعیت سایر قطارها بستگی دارد و از قبل قابل پیش‌بینی نیست، درحالی‌که در تحقیقات قبلی ثابت و اغلب صفر فرض شده است که ممکن است به ازدست‌دادن پاسخ‌های بهینه بیانجامد. بنابراین نوآوری این مقاله در نظر گرفتن تغییرات α است. برای انجام این کار بجای استفاده از یک جبهه پرتو، اجتماع پرتوها به ازای مقادیر مختلف α بکار رفته است.

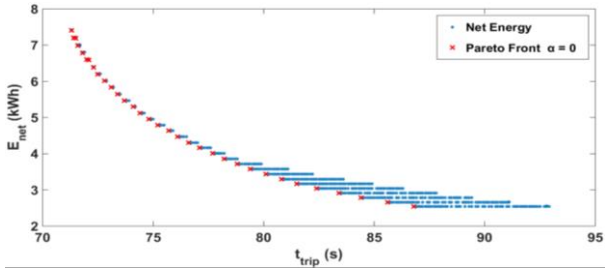
یکی از ویژگی‌های روش پیشنهادی این است که همان‌طور که در گراف‌های انرژی-زمان دیده می‌شود، پاسخ‌هایی که روی جبهه پرتو قرار ندارند، خیلی از آن دور نیستند. این موضوع به دلیل نوع انتخاب پارامترهای تصمیم در بهینه‌سازی است. طبق اصل کنترل بهینه برای رسیدن به حداقل انرژی مصرفی، شتاب مثبت و ترمزی باید حداکثر باشد، لذا در شبیه‌سازی سایر مقادیر برای شتاب انتخاب‌نشده و شتاب-گیری مجدد هم به‌جز در موارد ضروری(شیب‌های خیلی زیاد یا محدودیت سرعت‌پایین) استفاده‌نشده است. درحالی‌که در بعضی مراجع مانند [19] با در نظر گرفتن شتاب‌های مختلف و ترمز و شتاب مکرر، پاسخ‌هایی با مصرف انرژی زیاد در فضای پاسخ‌ها تولیدشده‌اند که از جبهه پرتو فاصله زیادی دارند و فرایند بهینه‌سازی را کندتر می-



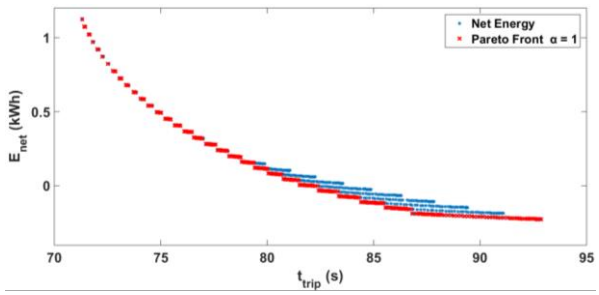
شکل (۲): مشخصه‌های سرعت برای یک فاصله بین ایستگاهی سراشیبی نمونه با مقادیر مختلف پارامترهای تصمیم



شکل (۳): الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر مرتب‌سازی نا مغلوب برای تعیین جبهه پرتوی انرژی-زمان یک فاصله بین ایستگاهی



الف- $\alpha = 0$



ب- $\alpha = 1$

شکل (۴): گراف انرژی-زمان همراه با جبهه پرتو برای یک فاصله بین ایستگاهی سراشیبی نمونه با مقادیر مختلف α

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.8.5]

کنند.

۴- حداقل کردن انرژی مصرفی در سیستم چندقطاره

در این بخش، زمان سفر کل مسیر، با استفاده از مشخصه‌های سرعت بهینه به‌دست‌آمده در بخش قبل، طوری بین ایستگاه‌ها توزیع‌شده است که انرژی دریافتی کل از شبکه بالادستی حداقل شود. فرایند کار را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

مرحله ۱: واردکردن مشخصات الکتریکی سیستم و زمان کل سفر برنامه‌ریزی‌شده ($T_{\text{tot,sch}}$) و زمان‌های سفر فاصله بین ایستگاهی ($T_{\text{IS,sch}}$)، اجتماع جبهه‌های پرتوی مشخصه‌های سرعت برای مقادیر مختلف $0 \le \alpha \le 1$ که قبلاً محاسبه‌شده‌اند.

مرحله ۲: انجام شبیه‌سازی پخش توان DC در شبکه چندقطاره و تعیین انرژی کل ورودی سیستم.

مرحله ۳: به دست آوردن حداقل انرژی کل مصرفی شبکه با توزیع مناسب زمان سفر بین ایستگاه‌ها با استفاده از روش بهینه-سازی جستجوی کامل در یک بخش از مسیر با تکرار شبیه-سازی سیستم چندقطاره و انجام پخش بار DC در کل شبکه حداقل به‌دست‌آمده در این مرحله نسبی است).

مرحله ۴: تکرار مرحله ۳ برای سایر بخش‌های مسیر و تعیین حداقل انرژی کل ورودی سیستم

مرحله ۵: استخراج بهترین مشخصه‌های سرعت برای زمان سفر برنامه‌ریزی‌شده.

در بخش قبل برای هر فاصله بین ایستگاهی تعداد N حالت ممکن به دست آمد که برای هر مقدار α، تعداد N_{p} حالت روی پرتو قرار داشتند (N_{p} برای هر مقدار α می‌تواند متفاوت باشد). اگر فرض کنیم مقدار متوسط N، ۱۰۰۰ باشد، برای یک شبکه واقعی مانند سیستم موردمطالعه با ۲۲ ایستگاه و ۴۲ فاصله بین ایستگاهی تعداد کل حالت‌های ممکن که باید بررسی شود، N^{2n-2} یعنی حدود 10^{45} است که بسیار زیاد است. از طرفی اگر N_{p} با یک مقدار α انتخاب شود، ممکن است بعضی از پاسخ‌های بهینه را از دست بدهیم. با انتخاب N_{u} یعنی اجتماع همه جبهه‌های پرتو، باوجوداینکه $N_{\text{p}} < N_{\text{u}} < N$ ولی بازهم تعداد حالت‌ها بسیار زیاد است و روش‌های موجود اعم از هوشمند یا کلاسیک ممکن است به جواب‌های بهینه محلی منتهی شوند. ولی با انتخاب N_{u} مطمئن هستیم که فضا کوچک‌تر شده و از آن مهم‌تر اینکه، همه پاسخ‌ها برای فاصله‌های بین ایستگاهی بهینه هستند و حتی در شرایط وجود اغتشاش، گرچه ممکن است پاسخ کل سیستم بهینه نباشد، ولی هر ایستگاه به‌تنهایی بازهم بهینه است.

برای حل مشکل فوق، از این حقیقت استفاده‌شده است که در شبکه‌های واقعی قطارشهری هر پست برق بخشی از خط، شامل تعداد محدودی از فاصله‌های بین ایستگاهی (بین ۲ تا ۴) را تغذیه می‌کند که به دلایل حفاظتی و رعایت ایمنی بیشتر، این بخش‌ها توسط فاصله هوایی از یکدیگر جدا می‌شوند. می‌توان گفت که تأثیر متقابل آن‌ها روی یکدیگر کم است و آن‌ها را تقریباً مستقل از یکدیگر فرض کرد و میزان استفاده از انرژی ترمزی یک قطار در یک بخش، توسط قطارهای واقع در بخش‌های دیگر را نادیده گرفت. درنتیجه بهینه‌سازی به بخش‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شود. البته باید توجه داشت که این کار، حوزه بهینه‌سازی را محدود می‌کند و منجر به پاسخ‌های بهینه محلی می‌شود.

در این مقاله با فرض ثابت بودن زمان کل سفر، بخش‌هایی شامل فاصله بین چهار ایستگاه متوالی در هر طرف مسیر (مجموعاً ۶ فاصله) طوری انتخاب‌شده‌اند که امکان استفاده از انرژی بازتولیدی حداکثر باشد. یعنی فاصله‌های d و $d+1$ و $d+2$ از یک‌طرف خط و $2n-d-3$ و $2n-d-2$ و $2n-d-1$ از طرف دیگر خط، که $2n-2 \le d \le 1$ است. برای بقیه فاصله‌ها، زمان برنامه‌ریزی‌شده لحاظ می‌شود و برای این ۶ فاصله توزیع زمان انجام می‌شود و زمان‌هایی که انرژی را حداقل می‌کنند ($T_{\text{IS,calc}}$)، استخراج می‌شوند. تابع هدف و قیدهای بهینه‌سازی در ادامه آورده شده‌اند.

$$\min\ E_{\text{in-tot}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{sub}}} \int_0^{T\text{sim}} I_{\text{sub}(i)}(t)\, U_{\text{sub}(i)}(t)\, dt \qquad (۱۸)$$

$$s.t.\ \ T_{\text{tot}} = \sum_{j=1}^{2n-2} T_{\text{IS,sch}}(j) + T_{\text{turn}} = T_{\text{tot,sch}} \qquad (۱۹)$$

$$\sum_{j=d}^{d+2} T_{\text{IS,calc}}(m,j) = \sum_{j=d}^{d+2} T_{\text{IS,sch}}(j), m = 1,2,\ldots,N_{\text{u}}(j) \qquad (۲۰)$$

$$\sum_{j=2n-d-3}^{2n-d-1} T_{\text{IS,calc}}(m,j) = \sum_{j=2n-d-3}^{2n-d-1} T_{\text{IS,sch}}(j) \qquad (۲۱)$$

که N_{sub} تعداد پست‌های کشش و I_{sub} و V_{sub} به ترتیب جریان و ولتاژ هر پست و $E_{\text{in-tot}}$ انرژی کل ورودی از شبکه بالادستی برحسب kWh و T_{tot} زمان کل سفر و T_{turn} زمان دور زدن قطارها در ابتدا و انتهای مسیر (که ثابت فرض شده‌اند). T_{sim} بازه زمانی حرکت قطارهاست که برای شبیه‌سازی انتخاب‌شده است. درنهایت با محاسبه مقادیری از m که انرژی مصرفی را حداقل می‌کنند، مشخصه‌های سرعت متناظر با آن‌ها نیز انتخاب می‌شود.

بهینه‌سازی فوق برای تمام بخش‌های شبکه انجام‌شده و با ترکیب نتایج همه آن‌ها، پاسخ‌های بهینه برای کل سیستم به دست می‌آیند. لازم به ذکر است، ازآنجاکه به دلیل بزرگ بودن ابعاد مسئله، و پیچیدگی و زمان‌بر بودن محاسبات، زیر بخش‌های جداگانه برای سیستم در نظر گرفته شدند و برای هر قسمت پاسخ‌های بهینه محاسبه شدند، ممکن است بعضی از پاسخ‌های بهینه که با در نظر گرفتن هم‌زمان همه ایستگاه‌ها و توزیع زمان کل بین آن‌ها به دست می‌آیند در فرایند فوق ازدست‌رفته باشند. به‌عبارت‌دیگر ممکن است پاسخ بهینه نهایی محلی باشد و با استفاده از روش‌های جامع‌تر بهینه‌سازی، جواب‌های بهتری را نیز بتوان به دست آورد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.8.5]

۵- تحلیل نتایج شبیه‌سازی

۵-۱- مشخصات سیستم موردمطالعه

خط ۱ قطارشهری مشهد به‌عنوان سیستم موردمطالعه انتخاب‌شده است. قطارها شامل واگن‌های خود کشش هستند. مشخصه نیروی کشش و ترمزی هر واگن برحسب سرعت در شکل (۵) نشان داده‌شده است. نیروی مقاوم قطار از رابطه (۲۲) به دست می‌آید[26].

$$R(v) = 6.4M + 130q + 0.14Mv + (.046 + .0065(N_V - 1))Sv^2 \quad [N] \qquad (۲۲)$$

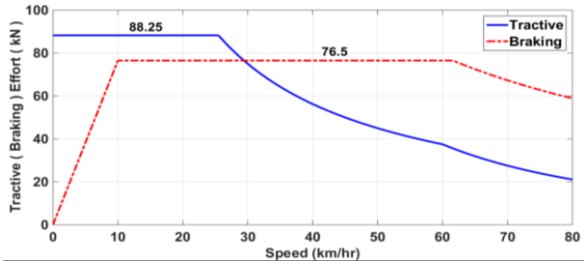
که S سطح مقطع قطار (۹,۷۵ m^2) و تعداد محورها (هر واگن ۶ محور)، q تعداد واگن در هر قطار (۱،۲ یا ۳) است. سایر مشخصات هر واگن در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): مشخصات هر واگن

مشخصه	مقدار
جرم واگن خالی (AW0)	۴۳ تن
حداکثر جرم مسافر(AW3)	۱۸,۹ تن
جرم قسمت گردان	۳,۷ تن
راندمان اینورتر	٪ ۹۷
راندمان موتور (وابسته به‌سرعت)	٪ ۹۳ – ۸۳
حداکثر شتاب مثبت	۱,۳ m/s2
حداکثر شتاب ترمزی	۱,۲ m/s2
حداکثر جرک	۱ m/s3
توان مصرفی روشنایی و تهویه	۴۲ kW

۵-۲- نتایج شبیه‌سازی تک‌قطاره

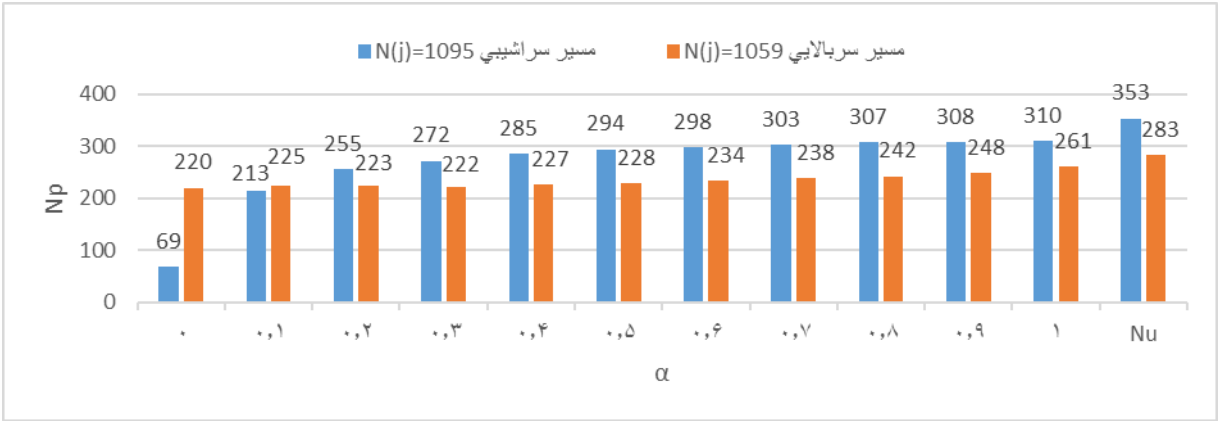
با تغییر متغیر تصمیم V_{cr} بین ۴۰ تا ۷۰km/h با پله‌های ۱km/h و t_{cr} با پله‌های ۱ ثانیه‌ای از صفرتا حداکثر مقدار ممکن، پاسخ‌های ممکن زیادی به دست آمدند که نمونه‌هایی از مشخصه‌های سرعت برای مسیر سراشیبی در شکل (۲) نشان داده‌شده است. همان‌طور که دیده می‌شود همه محدودیت‌های سرعت رعایت شده‌اند. تغییرات پارامترهای تصمیم، توان الکتریکی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. با افزایش V_{cr} توان مصرفی و بازتولیدی هردو زیاد می‌شوند درحالی‌که افزایش t_{cr} فقط روی توان بازتولیدی تأثیرگذار است. بنابراین انتخاب مناسب این



شکل (۵): مشخصه نیروی کششی و ترمزی(الکتریکی) هر واگن خط ۱ قطار شهری مشهد برحسب سرعت

پارامترها می‌تواند انرژی خالص را بطور قابل‌ملاحظه‌ای تغییر دهد. نتایج شبیه‌سازی نیز نشان می‌دهد که به کمک این دو پارامتر، تنوع وسیعی در فضای پاسخ‌ها ایجاد می‌شود.

با انتخاب همه حالت‌های ممکن برای پارامترهای تصمیم، گراف انرژی-زمان به دست می‌آید. فضای کامل پاسخ‌ها همراه با جبهه پرتوی آن برای دو مقدار $\alpha = 0$ و $\alpha = 1$ برای یک‌فاصله بین ایستگاهی سراشیبی به طول ۹۱۷ متر در شکل (۴) رسم شده است. تفاوت بین جبهه‌های پرتو در شکل (۴-الف) برای $\alpha = 0$ و شکل (۴-ب) برای $\alpha = 1$ کاملاً مشهود است. حتی همان‌طور که دیده می‌شود، برای $\alpha = 0$ هیچ پاسخ بهینه‌ای در محدوده زمانی ۸۷ تا ۹۳ ثانیه روی جبهه پرتو قرار ندارد. جبهه‌های پرتو برای این فاصله بین ایستگاهی و مسیر برگشت آن (سربالایی) در شکل (۶) خلاصه‌شده‌اند.برای مسیر سراشیبی تعداد کل حالت‌ها ۱۰۹۵ است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تعداد اعضای پرتوها برای مقادیر مختلف α مشابه یکدیگر نیستند. شاید بهترین حالت مقدار $\alpha = 1$ به نظر آید درحالی‌که تعداد جواب‌های بهینه برای این مقدار α، ۳۱۰ است و برای $0 \le \alpha \le 1$ اجتماع کل پاسخ‌های بهینه (N_u)، ۳۵۳ است. وضعیت مشابهی نیز برای مسیر سربالایی وجود دارد. بنابراین بهترین و جامع‌ترین حالت استفاده از اجتماع پاسخ‌های بهینه بجای استفاده از یک مقدار ثابت برای α است. در این صورت از وجود همه پاسخ‌های بهینه در مجموعه نهایی اطمینان خواهیم داشت تا با استفاده از آن‌ها در مرحله بعد بهینه‌سازی کل سیستم، احتمال به دست آوردن انرژی کل کمتر و درنتیجه صرفه‌جویی بیشتر افزایش یابد. تفاوت اصلی روش ارائه‌شده با



شکل (۶): نمودار تأثیر تغییرات α بر جبهه پرتو برای فاصله های بین ایستگاهی نمونه

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.8.5]

جدول (۲): انرژی‌های کل شبکه در سناریوهای مختلف شبیه‌سازی

انرژی / سناریو	$E_{\text{in-tot}}$ (kWh)	$E_{\text{regen-tot}}$ (kWh)	E_{loss} (kWh)	صرفه‌جویی انرژی (٪)
سناریوی ۱	۲۸۳,۰۰	۵۵,۵۹	۱۳,۴۳	-
سناریوی ۲	۲۷۰,۱۰	۶۰,۹۴	۱۳,۲۹	۴,۵۶
سناریوی ۳	۲۶۸,۷۱	۶۲,۷۹	۱۳,۳۹	۵,۰۵
سناریوی ۴	۲۶۸,۶۲	۶۲,۶۲	۱۳,۲۶	۵,۰۸
سناریوی ۵	۲۶۸,۳۵	۶۳,۳۷	۱۳,۴۰	۵,۱۸
سناریوی ۶	۲۶۰,۷۷	۶۹,۹۳	۱۳,۴۷	۷,۸۶

روش‌های قبلی در همین است که آن‌ها از تعداد N_p پاسخ بهینه مرحله اول به‌عنوان فضای حالت‌های ممکن در بهینه‌سازی کلی (مرحله دوم) استفاده کرده‌اند ولی در اینجا از $N_u>N_p$ پاسخ استفاده‌شده است که احتمال رسیدن به پاسخ‌های نهایی بهتر را افزایش می‌دهد.

۵-۳- تحلیل نتایج شبیه‌سازی کاهش مصرف در کل شبکه

ازآنجاکه تعداد حالت‌های شبیه‌سازی تک‌قطاره بسیار زیاد است، بهینه-سازی چندقطاره ابتدا بر روی بخش کوچکی از شبکه شامل ۶ فاصله بین ایستگاهی انجام‌شده است، سپس به کل شبکه تعمیم داده‌شده است. شبیه‌سازی چندقطاره با در نظر گرفتن فاصله زمانی بین حرکت قطارهای متوالی برابر ۵ دقیقه و فرض حرکت ۹ قطار در هر طرف مسیر انجام‌شده است. بازه زمانی شبیه‌سازی نیز ۵ دقیقه انتخاب‌شده است. نتایج انرژی در جدول (۲) آورده شده است.

$E_{\text{in-tot}}$ کل انرژی ورودی به سیستم از طریق شبکه بالادستی است. $E_{\text{regen-tot}}$ انرژی بازتولیدی کل قطارهاست که از طریق خط بالاسری به شبکه برگردانده شده است. E_{loss} کل تلفات الکتریکی در شبکه است که همه انرژی های فوق با انجام پخش بار DC در کل سیستم، محاسبه می‌شوند.

شبیه‌سازی در ۶ سناریو به‌صورت زیر انجام‌شده است:

۱) همه فاصله‌های بین ایستگاهی با زمان‌های سفر برنامه‌ریزی‌شده (شرایط عادی به‌عنوان سناریوی پایه)؛

۲) بهینه‌سازی تک‌قطاره (همه فاصله‌ها با زمان برنامه‌ریزی‌شده و حداقل انرژی خالص دریافتی)؛

۳) توزیع زمان سفر بین ایستگاه‌های ۶ تا ۹ در دو طرف مسیر (استفاده از پاسخ‌های بهینه واقع در جبهه پرتو با $\alpha = 0$)؛

۴) توزیع زمان سفر بین ایستگاه‌های ۶ تا ۹ در دو طرف مسیر (استفاده از جبهه پرتو با $\alpha = 1$)؛

۵) توزیع زمان سفر بین ایستگاه‌های ۶ تا ۹ در دو طرف مسیر (استفاده از اجتماع جبهه‌های پرتو)؛

۶) تکرار سناریوی ۵ برای همه بخش‌های مسیر و ترکیب نتایج (بهینه‌سازی کلی).

شکل (۷): مشخصه تغییرات انرژی ورودی و بازتولیدی در سناریوهای مختلف

در سناریوی ۱ برای هر فاصله بین ایستگاهی، مشخصه سرعت با بالاترین انرژی مصرفی انتخاب‌شده است و انرژی‌های مختلف در کل سیستم محاسبه‌شده‌اند. در سناریوی ۲ با استفاده از بهینه‌سازی تک‌قطاره، مشخصه‌های سرعت بهینه برای هر فاصله بین ایستگاهی به‌دست‌آمده‌اند و مقدار صرفه‌جویی انرژی با کاربرد این مشخصه‌ها در کل سیستم، محاسبه‌شده است. در سناریوهای ۳ تا ۵ علاوه بر بهینه-سازی انجام‌شده در سناریوی ۲، زمان کل سفر نیز به‌صورت بهینه در دو بخش شامل فاصله‌های بین ایستگاهی ۶ تا ۹ در دو طرف مسیر توزیع‌شده است. هدف این سناریوها مقایسه تأثیر α بر بهینه‌سازی کل سیستم است. در سناریوهای ۳و ۴ مشخصه‌های سرعت به ترتیب از جبهه‌های پرتو با $\alpha = 0$ و $\alpha = 1$ انتخاب‌شده‌اند. در سناریوی ۵ مشخصه‌های سرعت از اجتماع جبهه‌های پرتو با تغییر α از صفرتا ۱ انتخاب‌شده‌اند. نشان داده‌شده است که با انتخاب تعداد بیشتری مشخصه سرعت بهینه به‌عنوان ورودی، نتایج بهینه‌سازی مطلوب‌تر هستند. در سامانه‌های چندقطاره مقدار واقعی α به موقعیت و عملکرد سایر قطارها بستگی دارد، بنابراین ممکن است که سناریوهای با مقدار از پیش تعیین‌شده α، بهترین مشخصه سرعت انتخاب‌شده، نباشند. درحالی‌که در سناریوی ۵ حتماً بهترین پاسخ به دست می‌آید.

دو هدف اصلی این تحقیق، یکی کاهش انرژی کل ورودی و دیگری افزایش مقدار انرژی بازتولیدی ترمزی استفاده‌شده در شبکه هستند. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، در سناریوی ۱ انرژی ورودی کل بیشترین مقدار و انرژی بازتولیدی حداقل مقدار خود را داراست و در سناریوهای بعدی روند تغییرات این دو انرژی برعکس یکدیگر است. یعنی انرژی مصرفی کل رو به کاهش و انرژی بازتولیدی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.8.5]

کل که توسط سایر قطارها استفاده‌شده است، رو به افزایش است که نشان‌دهنده این است که با بهینه‌سازی انجام‌شده به در سناریوهای بعدی به دو هدف خود نزدیک شده‌ایم.

در نتایج نیز مشاهده می‌شود که حداکثر انرژی کل ورودی در سناریوی ۱ است. در سناریوی ۲ با بهینه‌سازی تک‌قطاره، انرژی کل ورودی به حد قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. مقدار صرفه‌جویی که در زیر محاسبه‌شده است نیز قابل‌توجه است.

$$\text{صرفه‌جویی انرژی (سناریوی۲)} = \frac{283.00 - 270.10}{283.00} \times 100 = 4.56\%$$

لازم به ذکر است که حالتی که به‌عنوان سناریوی پایه در نظر گرفته‌شده است، بدترین حالت در بین پاسخ‌های به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی تک‌قطاره است که با توجه به ماهیت پارامترهای تصمیم‌گیری به پاسخ‌های بهینه نزدیک است. اگر مشخصه سرعت واقعی قطارها مدل شود با توجه به کمتر بودن شتاب‌های عملی و استفاده از ترمز گیری و شتاب‌گیری های مکرر، میزان انرژی مصرفی در حالت پایه بیشتر از مقدار فعلی شبیه‌سازی‌شده خواهد بود و درنتیجه میزان صرفه‌جویی در سناریوی ۲ بیشتر از ۴٫۵۶ درصد خواهد بود. در سناریوهای ۳ تا ۵ فرض شده که مجموع زمان‌های سفر ایستگاه‌های ۶ تا ۹ برابر مجموع مقدار برنامه‌ریزی‌شده آن‌هاست. با انتخاب زمان‌های سفر از جبهه‌های پرتو با مقادیر ثابت α، انرژی کل ورودی کاهش‌یافته ولی همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، حداکثر صرفه‌جویی با اجتماع جبهه‌های پرتو حاصل می‌شود. نتایج صرفه‌جویی در جدول (۲) نشان داده‌شده‌اند. دیده می‌شود که مقدار صرفه‌جویی در سناریوهای ۳ تا ۵ بیشتر از سناریوی ۲ است و بیشترین صرفه‌جویی در سناریوی ۵ حاصل‌شده است که مزیت روش پیشنهادی و استفاده از اجتماع جبهه‌های پرتو با αهای مختلف را نشان می‌دهد.

گرچه تنظیم جدول زمانی در سناریوی ۵ انجام‌شده ولی اختلاف با سناریوی ۲ هنوز کم است، که می‌تواند دو علت داشته باشد. اول اینکه تعداد کمی قطار در ناحیه موردنظر قرار دارند که قابلیت مشارکت در بازیابی انرژی بازتولیدی و کاهش انرژی ورودی کل سیستم را دارند. دوم اینکه بهینه‌سازی فقط در بخش کوچکی از کل سیستم انجام‌شده است(۶ فاصله از بین ایستگاهی از مجموع ۴۲ فاصله). برای بهبود مورد دوم، بهینه‌سازی روی بقیه بخش‌ها نیز انجام‌شده و نتایج آن‌ها در سناریوی ۶ با یکدیگر ترکیب‌شده که در جدول (۲) نیز قابل‌مشاهده‌اند. درنهایت کل صرفه‌جویی انرژی در دو مرحله بهینه‌سازی عبارت است از:

$$\text{کل صرفه جویی انرژی (سناریوی ۶)} = \frac{283.00 - 260.77}{283.00} \times 100 = 7.68\%$$

که قابل‌قبول است. البته استفاده از یک روش بهینه‌سازی جامع‌تر و در نظر گرفتن سایر پارامترها در تنظیم جدول زمانی، ممکن است دررسیدن به جواب‌های بهتر کمک کند.

۶- نتیجه

در این مقاله ابتدا با معرفی یک روش بهینه‌سازی ساده و دقیق و درعین‌حال عملیاتی برای بهینه‌سازی مشخصه سرعت قطارها، صرفه‌جویی حدود ۴٫۵ درصد در انرژی ورودی کل سیستم حاصل شد. سپس نشان داده شد که بهینه‌سازی انرژی خالص هر قطار با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای نرخ پذیرندگی انرژی بازتولیدی، بجای انرژی مصرفی، می‌تواند صرفه‌جویی انرژی را در سیستم چندقطاره باقابلیت بازتولید انرژی، بهبود بخشد. بعلاوه نتیجه گرفته شد که در نظر گرفتن نرخ بازیابی انرژی بازتولیدی متغیر، به جبهه‌های پرتوی انرژی-زمان متفاوت منتهی می‌شود. بنابراین در نظر گرفتن مقادیر ثابت برای α ممکن است به از دست دادن بعضی از پاسخ‌های بهینه منجر شود. نتایج شبیه‌سازی مبتنی بر داده‌های واقعی از خط ۱ قطارشهری مشهد، مؤثر بودن روش موردنظر را تأیید می‌کند.

در روش پیشنهادی، بهینه‌سازی هم‌زمان انرژی و زمان سفر برای هر قطار در هر فاصله بین ایستگاهی با روش مبتنی بر الگوریتم مرتب-سازی غیر مغلوب انجام شد و جبهه‌های پرتو برای مقادیر مختلف α به دست آمدند. استفاده از اجتماع جبهه‌های پرتو در سناریوی ۵ باعث بهبود صرفه‌جویی انرژی به میزان ۰٫۱ درصد شد. درنهایت با دو مرحله بهینه‌سازی، صرفه‌جویی کل ۷٫۶۸ درصد حاصل شد که قابل‌قبول است. به دلیل محدودیت در بهینه‌سازی چندقطاره، ممکن است پاسخ‌های بهینه محلی تولیدشده باشند ولی بهبود صرفه‌جویی به‌وضوح قابل‌رؤیت است و می‌توان انتظار داشت که روش‌های جامع‌تر بهینه-سازی بتوانند تأثیر مثبت روش پیشنهادی را بهتر نشان دهند.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از همکاری و همفکری کلیه عزیزانی که در واحدهای مختلف شرکت بهره‌برداری قطارشهری مشهد سپاسگزاری نمایند. همکاری این عزیزان در تهیه اطلاعات لازم برای شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌های مختلف پارامترهای شبکه و انرژی مصرفی قطارها برای صحه‌گذاری نتایج شبیه‌سازی قابل‌تقدیر است.

مراجع

[1] A. Gonzalez Gil, R. Palacin, P. Batty and J. Powell, "A systems approach to reduce urban rail energy consumption," *Energy Conversion and Management*, vol. 80, pp. 509-524, 2014.

[2] P. G. Howlett, "An optimal strategy for the control of a train," J. Australian Math. Soc. Ser. B, vol. 4, no. 31, pp. 454–471, 1990.

[3] S. Su, T. Tang, X. Li, and Z. Y. Gao, "Optimization on multi-train operation in subway system," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 15, no. 2, pp. 673–684, Apr. 2014.

[4] G. M. Scheepmaker and R. M. P. Goverde, "The interplay between energy-efficient train control and scheduled running time supplements," *Journal of Rail Transport Planning & Management*, vol. 5, no. 4, pp. 225–239, Dec. 2015.

[5] P.G. Howlett, P.J. Pudney, Xuan Vu, "Local energy minimization in optimal train control," Automatica, vol. 45, no. 11, pp. 2692-2698, Nov. 2009.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.8.5]

[6] M. Miyatake, H. Ko, "Optimization of Train Speed Profile for Minimum Energy Consumption," IEEJ Trans. on Elect. Electron. vol. 5, no. 3 pp. 263–269, may 2010.
[7] E. Rodrigo, S. Tapia, J.M. Mera, M. Soler, "Optimizing electric rail energy consumption using the Lagrange multiplier technique," *J. Transp. Eng.* Vol.139, no.3, pp.321–329, Mar. 2013.
[8] A. Albrecht, P. Howlett, P. Pudney, X. Vu, and P. Zhou, "The key principles of optimal train control- Part 1: Formulation of the model, strategies of optimal type, evolutionary lines, location of optimal switching points," Transportation Research Part B: Methodological, 2015.
[9] J. C. Goodwin, D. I. Fletcher, and R. F. Harrison, "Multi-train trajectory optimisation to maximise rail network energy efficiency under travel-time constraints," *Proc. Inst. Mech. Eng., Part F: J. f Rail Rapid Transit*, Jul. 2015.
[10] X. Li, H. K. Lo, "An energy-efficient scheduling and speed control approach for metro rail operations," Transportation Research Part B, vol. 64, pp. 73–89, 2014.
[11] S. Lu, S. Hillmansen, T. Kin Ho, and C. Roberts, "Single-train trajectory optimization," IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 14, no. 2, pp. 743–750, Jun. 2013.
[12] K. Kim, S. Chien, "Optimal train operation for minimum energy consumption considering track alignment, speed limit, and schedule adherence," J. Transp. Eng. Vol.137, no.9, pp.665–674, 2011.
[13] M. Domínguez, A. Fernández, A. P. Cucala, and P. Lukaszewicz, "Optimal design of metro automatic train operation speed profiles for reducing energy consumption," Proc. Inst. Mech. Eng. Part F-J. Rail Rapid Transit, vol. 225, no. 5, pp. 463–474, Sep. 2011.
[14] S. Su, T. Tang, and C. Roberts, "A cooperative train control model for energy saving," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 16, no. 2, pp. 622–631, Apr. 2015.
[15] M. Domínguez, A. Fernández-Cardador, A. P. Cucala, R. R. Pecharroman, "Energy savings in metropolitan railway substations through regenerative energy recovery and optimal design of ATO speed profiles," IEEE Trans. Automation Science and Eng. Vol. 9, no.3, pp.496–504, 2012.
[16] V. De Martinis, M. Gallob, "Models and methods to optimize train speed profiles with and without energy recovery systems: a suburban test case," Proc. Social and Behavioral Sciences, vol.87, pp. 222 – 233, 2013.
[17] R. Chevrier, P. Pellegrini, J. Rodriguez, "Energy saving in railway timetabling: A bi-objective evolutionary approach for computing alternative running times," *Transportation Research Part C*, vol. 37, pp. 20–41, 2013.
[18] W. ShangGuan, X. H. Yan, B. G. Cai and J. Wang, "Multi-objective optimization for train Speed trajectory in CTCS high-speed railway with hybrid evolutionary algorithm," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 16, no. 4, pp. 2215 - 2225, Mar. 2015.
[19] M. Domínguez, A. Fernández-Cardador, A. P. Cucala, T. Gonsalves, and A. Fernandez-Rodríguez, "Multi objective particle swarm optimization algorithm for the design of efficient ATO speed profiles in metro lines," Eng. Appl. Artif. Intell. vol. 29, pp. 43–53, Mar. 2014.
[20] A. Fernández-Rodríguez, A. Fernández-Cardador, A. P. Cucala, M. Domínguez, and T. Gonsalves, "Design of robust and energy-efficient ATO speed profiles of metropolitan lines considering train load variations and delays," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 16, no. 4, pp. 2061–2071, Aug. 2015.
[21] J. Liu, B. Cai, G. Xu, and G. Sun. "Energy Consumption Modeling and Optimization of Traction Control for High-speed Railway Trains." *Int. J. Control and Automation* 8, no. 10, pp. 109-124, 2015.
[22] J. Yin, D. Chen, and L. Li, "Intelligent train operation algorithms for subway by expert system and reinforcement learning," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 15, no. 6, pp. 2561 –2571. 2014.
[23] X. Yang, X. Li, B. Ning, and T. Tang. "An optimisation method for train scheduling with minimum energy consumption and travel time in metro rail systems." *Transportmetrica B: Transport Dynamics* vol.3, no. 2, pp. 79-98, 2015.
[24] X. Yang, X. Li, B. Ning, and T. Tang, "A survey on energy-efficient train operation for urban rail transit," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 17, no. 1, pp. 2-13, Jan. 2016.
[25] Vukan R. Vuchic, *Urban transit systems and technology*. John Wiley & Sons, 2007.
[26] K. Wolf, "Dynamic performance LRV Mashhad", ELIN EBG Traction GmbH, Rep. Doc: 4046228.00.07, 2009.
[27] C.A.C. Coello, G.B. Lamont, and D.A. Van Veldhuizen, *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*, Springer, 2007.
[28] A. Messac, *Optimization in Practice with MATLAB®: For Engineering Students and Professionals*, Cambridge University Press, 2015.

زیرنویس‌ها

[1] Energy-Efficient Train Operation
[2] Non-dominated Sorting Algorithm
[3] Speed profile
[4] Simulated Annealing (SA)
[5] Pareto front
[6] Automatic Train Operation (ATO)
[7] Cruising
[8] Coasting
[9] Exhaustive Search

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-14]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.1.8.5]