



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

رساله دکتری مهندسی برق قدرت

**بهینه‌سازی هزینه انرژی و سرمایه‌گذاری در سیستم قطارشهری
با در نظر گرفتن همزمان ذخیره‌سازهای انرژی و پروفایل سرعت**

نگارنده: سعید احمدی

استاد راهنما

دکتر علی دستفان

تیرماه ۱۳۹۶

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

رساله دکتری مهندسی برق قدرت

**بهینه‌سازی هزینه انرژی و سرمایه‌گذاری در سیستم قطارشهری
با در نظر گرفتن همزمان ذخیره‌سازهای انرژی و پروفایل سرعت**

نگارنده: سعید احمدی

استاد راهنما

دکتر علی دستفان

استاد مشاور

دکتر محسن اصیلی

تیرماه ۱۳۹۶

تقدیم به پدر و مادر عزیزم؛

مهربان فرشتگانی که لحظات ناب باور بودن، لذت و غرور دانستن، جسارت خواستن، عظمت رسیدن و تمام تجربه های یکتا و زیبای زندگیم، مدیون حضور سبز آنهاست.

تقدیم به همسر فداکارم؛

به پاس قدر دانی از قلبی آکنده از عشق و معرفت که محیطی سرشار از سلامت و امنیت و آرامش و آسایش برای من فراهم آورده است. او که اسوه صبر و تحمل بوده و مشکلات مسیر را برایم تسهیل نمود.

تقدیم به پسر مهربانم؛

که همواره در طول تحصیل متحمل زحماتم بود و تکیه گاه من در مواجهه با مشکلات است؛ وجودش مایه دلگرمی من می باشد.

تشکر و قدردانی

سپاس بی کران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت.

نمی توانم معنایی بالاتر از تقدیر و تشکر بر زبانم جاری سازم و سپاس خود را در وصف استادان خویش آشکار نمایم، که هر چه گویم و سراپیم، کم گفته ام. بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم. اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تامین می کند و سلامت امانت هایی را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ برحسب وظیفه و از باب ”مَنْ لَمْ يَشْكُرِ الْمَخْلُوقَ لَمْ يَشْكُرِ الْخَالِقَ“ از جناب آقای دکتر **علی دستفان** که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛ از استاد صبور و با تقوا، جناب آقای دکتر **محسن اصیلی**، که زحمت مشاوره این رساله را در حالی متقبل شدند که بدون مساعدت ایشان، این پروژه به نتیجه مطلوب نمی رسید؛ از اساتید فرزانه و دلسوز؛ جناب آقایان دکتر **مهدی بانژاد**، دکتر **مجید علومی** و دکتر **مرتضی رحیمیان** که زحمت داوری این رساله را متقبل شدند؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم.

همچنین بر خود لازم می دانم از کلیه عزیزانی که مرا در انجام این رساله به هر شکلی یاری نموده اند، بخصوص همکاران عزیز شرکت بهره برداری قطارشهری مشهد، که با صمیمیت فراوان، ضمن در اختیار گذاشتن اطلاعات فنی لازم، زمینه کاربردی کردن نتایج این پژوهش را فراهم نمودند، تشکر و قدردانی نمایم.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

تعهد نامه

اینجانب سعید احمدی دانشجوی دوره دکتری رشته برق / قدرت دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله بهینه‌سازی هزینه انرژی و سرمایه‌گذاری در سیستم قطارشهری با در نظر گرفتن همزمان ذخیره‌سازهای انرژی و پروفایل سرعت تحت راهنمایی آقای دکتر علی دستفان متعهد می‌شوم .

تحقیقات در این رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است. در استفاده از نتایج پژوهش محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است. مطالب مندرج در رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.

کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید. حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت می‌گردد.

در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.

در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه رایانه‌ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

امروزه استفاده از سامانه‌های قطار شهری به‌عنوان اصلی‌ترین سیستم حمل و نقل در داخل شهرهای بزرگ با چالش‌هایی روبرو است که یکی از مهم‌ترین آن‌ها، مصرف بالای انرژی الکتریکی است. گروهی از راه‌کارهای معرفی شده برای کاهش انرژی که میزان صرفه‌جویی بالایی دارند، معمولاً با هزینه بالایی نیز همراه هستند. اگر هدف فقط کاهش انرژی باشد و مزیت اقتصادی راه‌کار ارائه شده، مدنظر قرار نگیرد، چه‌بسا ممکن است راهبرد پیشنهادی، اقتصادی و در نتیجه عملی نباشد.

در این پژوهش با استفاده از مشخصه سرعت بهینه قطار همراه با ذخیره‌سازهای ساکن انرژی خازنی، سعی شده است تا ضمن صرفه‌جویی در میزان مصرف انرژی کل شبکه، موضوع از نظر اقتصادی نیز مدنظر قرار گیرد. به این منظور، ابتدا روشی جدید برای به دست آوردن مشخصه بهینه سرعت قطار در فاصله بین دو ایستگاه متوالی ارائه شده است که در عین دقت، امکان پیاده‌سازی عملی را نیز به‌سادگی دارد. با معرفی پارامترهای تصمیم‌پیشنهادی جهت بهینه‌سازی، الگوریتم و فرایند بهینه‌سازی بطور کامل تشریح شده است. برای اعتبارسنجی روش پیشنهادی، نتایج حاصله برای سیستم مورد مطالعه، با نتایج موجود از شبیه‌سازی شرکت سازنده، مقایسه شده است. نرخ متغیر استفاده از انرژی بازتولیدی ترمزی به‌عنوان یک پارامتر تأثیرگذار در بهینه‌سازی مشخصه سرعت، برای اولین بار معرفی شده است؛ سپس با استفاده از گراف‌های انرژی-زمان برای هر فاصله بین ایستگاهی و توزیع زمان سفر بین ایستگاه‌ها، انرژی کل سیستم چندقطاره نیز کاهش داده شده است و تأثیر متغیر بودن نرخ استفاده از انرژی بازتولیدی در کاهش انرژی نشان داده شده است. در ادامه ذخیره‌سازهای ساکن خازنی به‌عنوان راهکار دوم صرفه‌جویی انرژی معرفی شده‌اند و تأثیر بهینه‌سازی اندازه و مکان آن‌ها، بر صرفه‌جویی انرژی کل سیستم نشان داده شده است. در انتها اعتبار سنجی روش پیشنهادی، با استفاده از مقادیر واقعی پارامترهای مؤثر در تابع هزینه و کاربرد آن‌ها برای سیستم مورد مطالعه (خط ۱ قطار شهری مشهد) انجام شده است. با انجام تحلیل اقتصادی، نشان داده شده است که روش پیشنهادی استفاده ترکیبی از ذخیره‌سازها و مشخصه سرعت بهینه، می‌تواند در کاهش هزینه کل انرژی و سرمایه‌گذاری سیستم مفید باشد.

کلمات کلیدی: سامانه قطار شهری، ذخیره‌ساز ساکن انرژی، ابرخازن، انرژی بازتولیدی ترمزی، مشخصه سرعت قطار، بهینه‌سازی، الگوریتم مرتب‌سازی نا مغلوب، هزینه سرمایه‌گذاری و انرژی، صرفه‌جویی انرژی.

لیست مقالات مستخرج از رساله

- [۱] احمدی، سعید؛ دستفان، علی. (۱۳۹۳)، " صرفه جویی در مصرف انرژی الکتریکی سیستم قطارشهری با استفاده از الگوی سرعت مناسب"، بیست و نهمین کنفرانس بین المللی برق ایران (PSC29)، تهران، ایران.
- [۲] احمدی، سعید؛ دستفان، علی؛ اصیلی، محسن. " افزایش بهره‌وری انرژی در سامانه‌های قطارشهری با بهینه‌سازی همزمان مشخصه سرعت و توزیع زمان سفر قطارها"، نشریه علمی پژوهشی کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، ۱۳۹۶، پذیرفته‌شده (در نوبت چاپ).
- [3] Ahmadi, S. and Dastfan, A., 2016, May. "Energy saving in urban railway using speed profile optimization". 24th Iranian Conf. Elec. Eng. (ICEE), IEEE, Tehran, Iran, May 2016, pp. 1076-1081.
- [4] Ahmadi, S. and Dastfan, A., Assili, M. "Improving Energy-Efficient Train Operation in Urban Railways: Employing the Variation of Regenerative Energy Recovery Rate", IET Intelligent Transport Systems, Accepted Manuscript, DOI: 10.1049/iet-its.2016.0256, Online ISSN 1751-9578 Available online: 26 May 2017.

فهرست

۱	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱ تعریف موضوع
۵	۲-۱ ضرورت انجام پروژه
۵	۳-۱ نوآوری پروژه
۶	۴-۱ اهداف پروژه
۷	۵-۱ مروری بر فصل‌های رساله
۱۱	فصل دوم: روش‌های صرفه‌جویی در مصرف انرژی الکتریکی در سیستم قطار شهری
۱۲	۱-۲ مقدمه
۱۲	۲-۲ استفاده از انرژی بازتولیدی ترمزی
۱۳	۱-۲-۲ سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی
۱۳	۱-۱-۲-۲ سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی نصب شده روی قطار
۱۴	۲-۱-۲-۲ مزایای ذخیره‌ساز نصب شده روی قطار:
۱۴	۳-۱-۲-۲ معایب ذخیره‌ساز نصب شده روی قطار:
۱۶	۴-۱-۲-۲ سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی ساکن (نصب‌شده در کنار مسیر)
۱۸	۵-۱-۲-۲ باتری‌ها
۱۹	۶-۱-۲-۲ خازن‌های الکتروشمیایی دولایه (ابرخازن‌ها)
۲۰	۷-۱-۲-۲ چرخ طیار
۲۱	۸-۱-۲-۲ ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی ابرسانا (SMES)
۲۲	۲-۲-۲ پست‌های برگشت‌پذیر (دوطرفه)
۲۴	۳-۲-۲ تنظیم جدول زمانی حرکت قطارها
۲۵	۳-۲ تکنیک‌های راهبری اقتصادی
۲۶	۱-۳-۲ پروفایل سرعت قطار
۲۶	۱-۱-۳-۲ معادلات حرکت قطار
۲۸	۴-۲ کاهش تلفات در سیستم تغذیه و کشش
۲۹	۵-۲ کاهش مصرف انرژی در سامانه‌های آسایشی
۳۱	فصل سوم: بررسی مطالعات انجام‌شده در زمینه‌ی کاهش مصرف انرژی در قطار شهری
۳۲	۱-۳ مقدمه
۳۲	۲-۳ بررسی تحقیقات انجام‌شده در زمینه‌ی کاربرد ذخیره‌سازهای انرژی در سامانه‌های قطار شهری
۳۲	۱-۲-۳ مقایسه‌ی فنی و اقتصادی فناوری‌های مختلف ذخیره‌سازی برای قطار شهری
۳۹	۲-۲-۳ مطالعات انجام‌شده در رابطه با سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی ساکن و نصب‌شده روی قطار

۳-۳	مرور مطالعات انجام شده در رابطه با پست‌های دوطرفه.....	۴۷
۴-۳	مطالعات انجام شده در رابطه با جدول زمانی.....	۴۹
۵-۳	مطالعات انجام شده درباره راهبری اقتصادی و پروفایل سرعت.....	۵۰
۶-۳	مطالعات درباره بهینه‌سازی همزمان جدول زمانی و پروفایل سرعت.....	۵۷
۷-۳	ضرورت بهینه‌سازی همزمان ذخیره‌سازهای انرژی و پروفایل سرعت.....	۶۱
۶۵	فصل چهارم: بهینه‌سازی مشخصه سرعت قطار.....	
۱-۴	مقدمه.....	۶۶
۲-۴	بهینه‌سازی مشخصه سرعت در سیستم یک قطاره.....	۶۶
۱-۲-۴	شبیه‌سازی مشخصه سرعت برای فاصله بین دو ایستگاه متوالی.....	۶۶
۱-۱-۲-۴	محاسبات سرعت و موقعیت در هر لحظه.....	۶۸
۲-۱-۲-۴	محاسبات توان قطار.....	۶۹
۳-۱-۲-۴	فلوچارت شبیه‌سازی سیستم یک قطاره.....	۷۰
۲-۲-۴	اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی یک قطاره با استفاده از خروجی‌های شبیه‌سازی شرکت ELIN.....	۷۲
۳-۲-۴	تعیین کلیه پروفایل‌های سرعت ممکن در یک فاصله بین ایستگاهی.....	۷۴
۴-۲-۴	محاسبه انرژی و زمان سفر در فاصله بین ایستگاهی.....	۷۶
۱-۴-۲-۴	نرخ استفاده از انرژی بازتولیدی ترمزی.....	۷۷
۵-۲-۴	فرآیند بهینه‌سازی پروفایل سرعت.....	۷۹
۶-۲-۴	نتایج شبیه‌سازی فاصله بین ایستگاهی در مسیر سراسیمی و سربالایی.....	۸۱
۷-۲-۴	تحلیل نتایج شبیه‌سازی یک قطاره:.....	۸۲
۱-۷-۲-۴	تحلیل منحنی‌های سرعت و شتاب و توان.....	۸۲
۲-۷-۲-۴	تحلیل گرافهای انرژی مصرفی و بازتولیدی.....	۸۶
۳-۷-۲-۴	تحلیل گرافهای انرژی خالص دریافتی و جبهه پرتو و تأثیر متغیر بودن α بر بهینه‌سازی.....	۸۹
۳-۴	حداقل کردن انرژی مصرفی در سیستم چند قطاره.....	۹۵
۱-۳-۴	توزیع زمان سفر بین ایستگاه‌ها با استفاده از شیب منحنی جبهه پرتوی انرژی-زمان.....	۹۵
۲-۳-۴	تحلیل نتایج شبیه‌سازی کاهش مصرف در کل شبکه.....	۹۹
۱۰۵	فصل پنجم: بهینه‌سازی همزمان مشخصه سرعت قطار و ذخیره‌سازهای ساکن انرژی خازنی.....	
۱-۵	مقدمه.....	۱۰۶
۲-۵	مدل‌سازی سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی ساکن خازنی.....	۱۰۶
۳-۵	راهبرد کنترلی سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی ساکن خازنی.....	۱۰۸
۱-۳-۵	حالت کنترلی تثبیت ولتاژ.....	۱۰۹
۲-۳-۵	حالت کنترلی صرفه‌جویی انرژی.....	۱۰۹
۳-۳-۵	ولتاژهای شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز انرژی.....	۱۰۹

۴-۵	مدل سازی شبکه DC قطارشهری	۱۱۰
۵-۵	الگوریتم پیشنهادی بهینه سازی	۱۱۱
۱-۵-۵	الگوریتم ژنتیک عدد صحیح	۱۱۴
۲-۵-۵	مقایسه نتایج شبیه سازی سناریوهای مختلف	۱۱۶
۱۲۵	فصل ششم: تحلیل اقتصادی بهینه سازی همزمان مشخصه سرعت و ذخیره سازی های خازنی	
۱-۶	مقدمه	۱۲۶
۲-۶	محاسبه هزینه کل سرمایه گذاری و انرژی	۱۲۶
۳-۶	تحلیل حساسیت تابع هزینه کل	۱۳۰
۱-۳-۶	تغییر قیمت انرژی الکتریکی	۱۳۰
۲-۳-۶	تغییر قیمت ابرخازن	۱۳۲
۳-۳-۶	تغییرات نرخ بهره	۱۳۳
۴-۳-۶	رشد سالیانه قیمت انرژی الکتریکی	۱۳۳
۵-۳-۶	افزایش تعداد سال های مطالعه (افزایش عمر ذخیره سازها)	۱۳۴
۶-۳-۶	تأثیر تغییر همزمان قیمت خازن و نرخ بهره بر سناریوی هدف	۱۳۴
۱۳۷	فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادها	
۱-۷	نتیجه گیری	۱۳۸
۲-۷	پیشنهادها برای پژوهش های آتی	۱۴۰
۱۴۱	پیوست آ: مشخصات فنی خط ۱ قطارشهری مشهد	
۱-آ	مشخصات فنی قطارها	۱۴۲
۲-آ	مشخصات فنی مسیر	۱۴۵
۳-آ	مشخصات الکتریکی شبکه	۱۴۵
۴-آ	اطلاعات بهره برداری و جدول زمانی	۱۴۶
۱۴۹	منابع	

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان شکل
۳	شکل (۱-۱) نمودار توزیع انرژی در یک سیستم قطار شهری نمونه [1]
۷	شکل (۲-۱) اهداف کوتاه‌مدت و بلندمدت پروژه
۱۳	شکل (۱-۲) شماتیک جریان انرژی در بازتولید انرژی ترمزی [20]
۱۳	شکل (۲-۲) مسیر انرژی در ذخیره‌ساز نصب‌شده روی قطار [20]
۱۶	شکل (۳-۲) مسیر انرژی در ذخیره‌سازهای ساکن نصب‌شده در کنار مسیر [20]
۲۳	شکل (۴-۲) مسیر انرژی در پست تغذیه با قابلیت برگرداندن انرژی به شبکه [20]
۲۶	شکل (۵-۲) پروفایل سرعت نمونه برای مسیر بین دو ایستگاه [75]
۳۶	شکل (۱-۳) ذخیره‌ساز ابرخازن نصب شده روی قطار ساخته‌شده توسط شرکت BOMBARDIER [43]
۳۷	شکل (۲-۳) ساختار شماتیک ذخیره‌ساز انرژی از نوع چرخ طیار [45]
۳۸	شکل (۳-۳) ساختار ذخیره‌ساز چرخ طیار همراه با تجهیزات جانبی [25]
۴۸	شکل (۴-۳) ساختار پست برگشت‌پذیر نمونه [20]
۶۴	شکل (۵-۳) تأثیر متقابل راهکارهای صرفه‌جویی انرژی [1]
۶۷	شکل (۱-۴) محدودیت سرعت در فاصله بین دو ایستگاه قطار شهری
۶۸	شکل (۲-۴) پروفایل سرعت با سه محدودیت سرعت در فاصله بین دو ایستگاه
۶۹	شکل (۳-۴) منحنی نیروی کشش قطار برحسب سرعت
۷۱	شکل (۴-۴) فلوچارت شبیه‌سازی حرکت قطار بین دو ایستگاه متوالی در سیستم یک‌قطاره
۷۲	شکل (۵-۴) مشخصه نیروی کشش و توان مکانیکی برحسب زمان قطار خط ۱ مشهد - حداکثر وزن واگن (AW3) - سفر با حداقل زمان [106]
۷۳	شکل (۶-۴) مشخصه شبیه‌سازی شده توان مکانیکی برحسب زمان قطار خط ۱ مشهد (AW3) - سفر با حداقل زمان
۷۳	شکل (۷-۴) مشخصه سرعت و شتاب برحسب زمان قطار خط ۱ مشهد - حداکثر وزن واگن (AW3) - سفر با حداقل زمان [106]
۷۳	شکل (۸-۴) مشخصه شبیه‌سازی شده سرعت برحسب زمان قطار خط ۱ مشهد (AW3) - سفر با حداقل زمان
۷۵	شکل (۹-۴) مشخصه سرعت برحسب زمان با محدوده ممکن تغییرات متغیرهای تصمیم در فاصله بین دو ایستگاه
۷۶	شکل (۱۰-۴) گراف انرژی - زمان برای یک فاصله بین ایستگاهی نمونه
۸۱	شکل (۱۱-۴) پاسخ‌های مغلوب و غیرمغلوب (جبهه پرتو) برای یک فاصله بین ایستگاهی نمونه
۸۳	شکل (۱۲-۴) پروفایل سرعت برحسب مکان مسیر سراسیمه برای مقادیر مختلف t_{cr} و V_{cr}
۸۳	شکل (۱۳-۴) پروفایل سرعت برحسب مکان مسیر سربالایی برای مقادیر مختلف t_{cr} و V_{cr}
۸۴	شکل (۱۴-۴) پروفایل سرعت برحسب زمان مسیر سراسیمه برای مقادیر مختلف t_{cr} و V_{cr}

- شکل (۴-۱۵) پروفایل سرعت برحسب زمان مسیر سربالایی برای مقادیر مختلف t_{cr} و V_{cr} ۸۴
- شکل (۴-۱۶) رویه تغییرات زمان سفر مسیر سراسیبی برحسب تغییرات t_{cr} و V_{cr} ۸۴
- شکل (۴-۱۷) منحنی شتاب برحسب زمان مسیر سراسیبی برای مقادیر مختلف t_{cr} و V_{cr} ۸۵
- شکل (۴-۱۸) توان الکتریکی همراه با مصرف داخلی قطار برحسب زمان- مسیر سراسیبی برای مقادیر مختلف V_{cr} ۸۵
- شکل (۴-۱۹) گراف انرژی مصرفی برحسب زمان مسیر سراسیبی برای کلیه مقادیر ممکن t_{cr} و V_{cr} ۸۷
- شکل (۴-۲۰) گراف انرژی بازتولیدی برحسب زمان مسیر سراسیبی برای کلیه مقادیر ممکن t_{cr} و V_{cr} ۸۷
- شکل (۴-۲۱) رویه تغییرات انرژی مصرفی مسیر سراسیبی برحسب تغییرات t_{cr} و V_{cr} ۸۷
- شکل (۴-۲۲) گراف انرژی مصرفی برحسب زمان مسیر سربالایی برای کلیه مقادیر ممکن t_{cr} و V_{cr} ۸۸
- شکل (۴-۲۲) گراف انرژی مصرفی برحسب زمان مسیر سربالایی برای کلیه مقادیر ممکن t_{cr} و V_{cr} ۸۸
- شکل (۴-۲۳) گراف انرژی بازتولیدی برحسب زمان مسیر سربالایی برای کلیه مقادیر ممکن t_{cr} و V_{cr} ۸۸
- شکل (۴-۲۴-الف) گراف انرژی خالص دریافتی برحسب زمان مسیر سراسیبی برای کلیه مقادیر t_{cr} و V_{cr} ۸۹
- همراه با جبهه پرتو $\alpha = 1$
- شکل (۴-۲۴-ب) گراف انرژی خالص دریافتی برحسب زمان مسیر سراسیبی برای کلیه مقادیر t_{cr} و V_{cr} ۸۹
- همراه با جبهه پرتو $\alpha = 0$
- شکل (۴-۲۵-الف) گراف انرژی خالص دریافتی برحسب زمان مسیر سربالایی برای کلیه مقادیر ممکن V_{cr} ۹۱
- و t_{cr} ، همراه با جبهه پرتو $\alpha = 1$
- شکل (۴-۲۵-ب) گراف انرژی خالص دریافتی برحسب زمان مسیر سربالایی برای کلیه مقادیر ممکن V_{cr} و t_{cr} ، همراه با جبهه پرتو $\alpha = 0$ ۹۱
- شکل (۴-۲۶) تغییرات انرژی برحسب زمان سفر ۹۵
- شکل (۴-۲۷) خط متروی نمونه دومسیره با n ایستگاه ۹۷
- شکل (۵-۱) سامانه ذخیره‌ساز ساکن خازنی متصل به شبکه مترو ۱۰۷
- شکل (۵-۲) مدل ذخیره‌ساز ساکن خازنی (منبع جریان کنترل‌شده) ۱۰۸
- شکل (۵-۳) مدل شبکه قطارشهری همراه با ذخیره‌سازهای انرژی ۱۱۱
- شکل (۵-۴) فرآیند حداقل سازی انرژی مصرفی کل شبکه ۱۱۳
- شکل (۵-۵) مشخصه سرعت واقعی و بهینه شبیه‌سازی شده برای یک‌فاصله بین ایستگاهی سراسیبی ۱۱۷
- شکل (۵-۶) مشخصه سرعت واقعی و بهینه شبیه‌سازی شده برای یک‌فاصله بین ایستگاهی سربالایی ۱۱۷
- شکل (۵-۷) توان لحظه‌ای پست کشش شماره ۵- راهبری عادی ۱۲۳
- شکل (۵-۸) توان منفی لحظه‌ای پست کشش شماره ۵- راهبری بهینه ۱۲۳
- شکل (۵-۹) حداکثر توان لحظه‌ای منفی در پست‌های کشش ۱۲۳
- شکل (۵-۱۰) حداکثر تعداد شاخه‌های موازی ذخیره‌سازها (n_{pmax}) در پست‌های کشش ۱۲۴
- شکل (۵-۱۱) SOC برای ذخیره‌ساز واقع در پست کشش ۵- راهبری عادی ۱۲۴
- شکل (۵-۱۲) SOC برای ذخیره‌ساز واقع در پست کشش ۵- راهبری بهینه ۱۲۴

- شکل (۱-۶) تغییرات هزینه انرژی کل برحسب قیمت واحد انرژی الکتریکی ۱۳۰
- شکل (۲-۶) تغییرات هزینه کل سرمایه‌گذاری و انرژی برحسب قیمت واحد انرژی الکتریکی ۱۳۱
- شکل (۳-۶) تغییرات درصد صرفه‌جویی هزینه کل انرژی برحسب قیمت واحد انرژی الکتریکی ۱۳۱
- شکل (۴-۶) تغییرات درصد صرفه‌جویی هزینه کل سرمایه‌گذاری و انرژی برحسب قیمت واحد انرژی الکتریکی ۱۳۱
- شکل (۵-۶) تغییرات هزینه کل سرمایه‌گذاری و انرژی برحسب قیمت ابرخازن ۱۳۲
- شکل (۶-۶) تغییرات درصد صرفه‌جویی هزینه کل سرمایه‌گذاری و انرژی برحسب قیمت ابرخازن ۱۳۲
- شکل (۷-۶) تغییرات درصد صرفه‌جویی هزینه کل سرمایه‌گذاری و انرژی نسبت به نرخ بهره ۱۳۳
- شکل (۸-۶) تغییرات درصد صرفه‌جویی هزینه کل سرمایه‌گذاری و انرژی نسبت به رشد سالیانه قیمت برق ۱۳۴
- شکل (۹-۶) تغییرات درصد صرفه‌جویی هزینه کل سرمایه‌گذاری و انرژی برحسب عمر ذخیره‌ساز ۱۳۵
- شکل (۱۰-۶) تأثیر تغییر همزمان قیمت خازن و نرخ بهره بر درصد صرفه‌جویی هزینه کل سرمایه‌گذاری و انرژی ۱۳۵
- شکل (۱-آ) منحنی مشخصه مکانیکی شتاب‌گیری قطار نمونه‌ی خط شماره یک قطارشهری مشهد ۱۴۲
- شکل (۲-آ) منحنی مشخصه مکانیکی ترمز‌گیری قطار نمونه‌ی خط شماره یک قطارشهری مشهد ۱۴۲
- شکل (۳-آ) پروفایل ارتفاع مسیر همراه با محل پست‌ها و ایستگاه‌ها برای خط ۱ قطارشهری مشهد ۱۴۵

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان جدول
۳۳	جدول (۱-۳) ویژگی‌های اصلی سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی مورد استفاده در قطارشهری [20]
۶۱	جدول (۲-۳) مقایسه اقتصادی و سازگاری روش‌های صرفه‌جویی انرژی [1]
۹۲	جدول (۱-۴) تأثیر تغییرات α بر جبهه پرتو برای فاصله بین ایستگاهی نمونه
۹۳	جدول (۲-۴) زمان سفر و انرژی مصرفی در فاصله‌های بین ایستگاهی مسیر شمال (غدیر به وکیل‌آباد)
۹۴	جدول (۳-۴) زمان سفر و انرژی مصرفی در فاصله‌های بین ایستگاهی مسیر جنوب (وکیل‌آباد به غدیر)
۱۰۲	جدول (۴-۴) انرژی‌های کل شبکه در سناریوهای مختلف شبیه‌سازی
۱۰۴	جدول (۵-۴) زمان سفر بین ایستگاهی برنامه‌ریزی شده و بهینه برای سیستم مورد مطالعه
۱۱۸	جدول (۱-۵) مشخصات فنی هر بلوک ابرخازن مورد استفاده در ذخیره‌ساز [114]
۱۱۹	جدول (۲-۵) ساختار ذخیره‌سازها و انرژی‌های شبکه در سناریوهای مختلف
۱۱۹	جدول (۳-۵) خروجی‌های تحلیل شبکه در سناریوهای مختلف
۱۲۸	جدول (۱-۶) پارامترهای مورد استفاده در تحلیل اقتصادی بهینه‌سازی هزینه انرژی و سرمایه‌گذاری
۱۲۹	جدول (۲-۶) مقادیر انرژی و هزینه در سناریوهای مختلف به ازای پارامترهای جدول (۱-۶)
۱۴۳	جدول (۱-آ) پارامترهای ورودی قطار نمونه‌ی خط شماره یک قطارشهری مشهد
۱۴۳	جدول (۲-آ) ضرایب منحنی مشخصه مکانیکی برای هر واگن قطار خط شماره یک قطارشهری مشهد
۱۴۴	جدول (۳-آ) تغییرات بازده موتور قطار برحسب سرعت در حالت موتوری
۱۴۴	جدول (۴-آ) تغییرات بازده موتور قطار برحسب سرعت در حالت ترمزی
۱۴۶	جدول (۵-آ) محدودیت سرعت در کل طول خط شماره یک قطارشهری مشهد
۱۴۶	جدول (۶-آ) مشخصات الکتریکی خط شماره یک قطارشهری مشهد
۱۴۶	جدول (۷-آ) سرفاصله زمانی (هدوی) حرکت قطارها در طول سال در خط شماره یک قطارشهری مشهد
۱۴۷	جدول (۸-آ) زمان سفر و توقف در فاصله‌های بین ایستگاهی در مسیر شمال (غدیر به وکیل‌آباد)
۱۴۸	جدول (۹-آ) زمان سفر و توقف در فاصله‌های بین ایستگاهی در مسیر جنوب (وکیل‌آباد به غدیر)

فصل اول:

مقدمه

۱-۱ تعریف موضوع

بحران انرژی و آلودگی محیط‌زیست دو عامل مهم هستند که در حال حاضر موردتوجه محققان در زمینه‌های مختلف در سرتاسر جهان قرار گرفته‌اند. در این میان سیستم حمل و نقل با مصرف حدود ۳۰٪ کل انرژی، سهم زیادی را به خود اختصاص داده است که شامل حمل و نقل هوایی، دریایی، زمینی و ریلی می‌گردد. حمل نقل ریلی به دلیل ویژگی‌هایی همچون ظرفیت حمل مسافر بالا و رفاه بیشتر از اهمیت بالایی برخوردار است. سامانه‌های قطار برقی و متروها در داخل شهرهای بزرگ با دو ویژگی منحصربه‌فرد آلودگی کمتر و بازده بالای انرژی موردتوجه خاص قرار گرفته‌اند. البته مصرف بالای انرژی الکتریکی این سامانه‌ها موردتوجه شرکت‌های برق و بهره‌برداران است و محققین همواره به دنبال راهکارهایی هستند تا با بالا بردن هرچه بیشتر بازده انرژی، علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش گازهای آلاینده، هزینه جابجایی مسافر را نیز کاهش دهند و انگیزه بیشتری برای سرمایه‌گذاری در این سامانه‌ها فراهم گردد. سامانه‌های ریلی شهری به چهار گروه اصلی تقسیم می‌شوند که عبارتند از: تراموا^۱، خطوط ریلی سبک^۲، مترو^۳ و قطارهای محلی^۴ که مترو بیشترین نقش را در جابجایی مسافر دارد [1].

شرکت‌های قطارشهری با فشارهای رو به افزایشی جهت کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های بهره‌برداری و تأثیرات زیست‌محیطی روبرو هستند. با توجه به پیچیدگی چنین سامانه‌هایی، حصول نتیجه مناسب فقط از طریق یک روش جامع و همه‌جانبه ممکن است به گونه‌ای که تعداد زیاد وابستگی‌های بین زیرسیستم‌ها را در نظر بگیرد. چنین روشی به مجموعه کاملی از شاخص‌های عملکرد کلیدی نیاز دارد که امکان تحلیل چند سطحی از عملکرد شاخص انرژی واقعی سیستم، ارزیابی راهکارهای صرفه‌جویی انرژی و نمایش نتایج به‌دست‌آمده از تدابیر فوق را فراهم کند. با درک مناسب این شاخص‌ها، بهینه‌سازی مصرف انرژی و افزایش راندمان انرژی سیستم به بهترین وجه ممکن انجام خواهد شد [2].

¹ Tramway

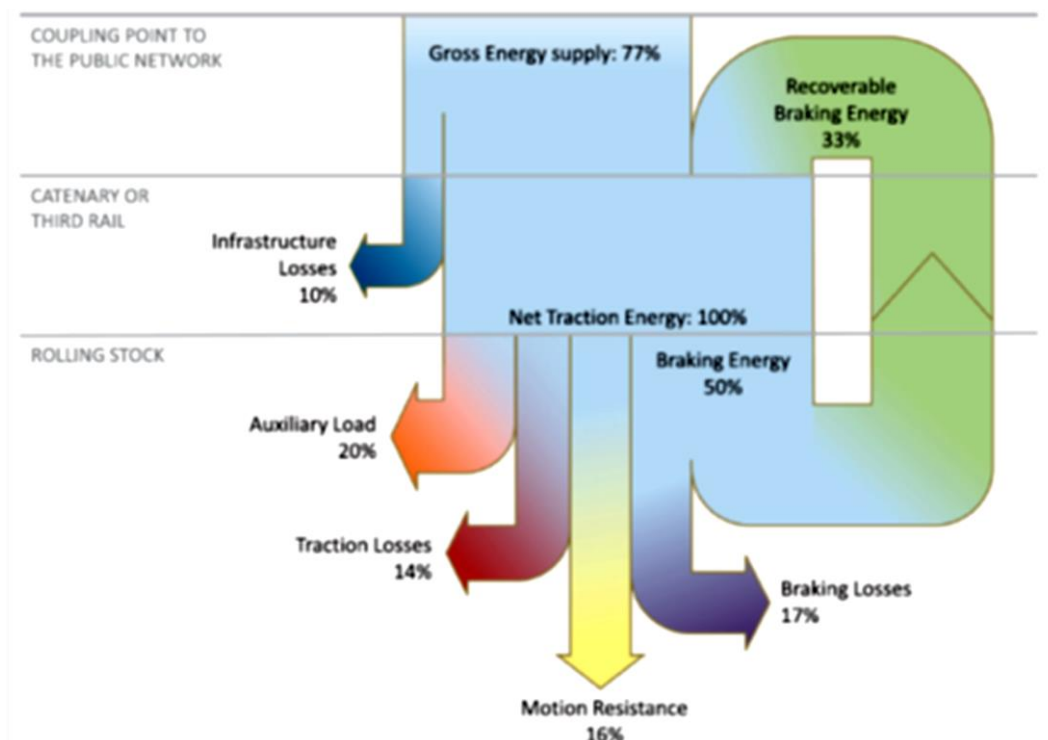
² Light Rail Transport(LRT)

³ Rapid Rail Transport(Metro)

⁴ Regional or Commuter Transport

انرژی مصرفی در مترو را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد: انرژی سیستم کششی^۱ (انرژی ناوگان) که شامل انرژی مستقیم مصرفی برای حرکت قطار و مصارف داخلی آن است و انرژی غیر کششی که بقیه مصارف از قبیل روشنایی و تهویه ایستگاه‌ها، تونل‌ها، دپوها و غیره را شامل می‌شود. از آنجاکه قسمت عمده انرژی مصرفی (حدود ۸۰ درصد) در سیستم کششی مصرف می‌شود [1]، اهمیت این بخش بیشتر است و اغلب تحقیقات و مطالعات روی این قسمت متمرکز شده‌اند.

شکل (۱-۱) نمودار توزیع انرژی در قطار را نشان داده است؛ البته باید توجه داشت که اعداد برای یک سیستم نمونه می‌باشند و در سامانه‌های مختلف تفاوت زیادی با یکدیگر دارند. نمودار، تلفات بخش‌های مختلف را نشان می‌دهد که بخش اول تلفات زیرساخت، شامل تلفات در پست‌ها و شبکه توزیع است (که قسمت عمده به شبکه توزیع مربوط است). این تلفات به سطح ولتاژ و میزان بار ترافیکی سیستم بستگی دارد، بنابراین در ولتاژهای پایین و ترافیک سنگین بسیار حائز اهمیت است و برای شبکه‌های ۶۰۰، ۷۵۰، ۱۵۰۰ و ۳۰۰۰ ولت DC به ترتیب حدود ۲۲، ۱۸، ۱۰ و ۶ درصد است [1].



شکل (۱-۱) نمودار توزیع انرژی در یک سیستم قطارشهری نمونه [1]

¹ Traction System

حدود ۲۰ درصد از انرژی توسط سامانه‌های کمکی قطار مصرف می‌شود که قسمت عمده آن صرف سیستم تهویه مطبوع می‌شود که به شدت به شرایط آب‌وهوایی بستگی دارد. بخش عمده دیگری از انرژی کششی به غلبه بر مقاومت حرکتی اختصاص می‌یابد که شامل مقاومت آئرو دینامیکی و اصطکاک مکانیکی بین چرخ‌ها و ریل می‌شود. مقاومت آئرو دینامیکی با مجذور سرعت افزایش می‌یابد بنابراین تأثیر آن در قطارهای محلی نسبت به تراموا خیلی بیشتر است [1]. در سرعت‌های پایین مقاومت مکانیکی مهم‌تر است که جرم قطار مهم‌ترین عامل مؤثر در این مقاومت است. اینورترهای جدید باراندامان حدود ۹۸٫۵ تا ۹۹٫۵ درصد و موتورهای الکتریکی DC با بازده ۹۰ تا ۹۴ درصد یا موتورهای القایی با بازده ۹۳ تا ۹۵ درصد بخش دیگری از تلفات را به خود اختصاص می‌دهند. تلفات در گیربکس نیز حدود ۲ تا ۴ درصد است [1]. بزرگ‌ترین بخش از انرژی کششی در طی فرایند ترمز هدر می‌رود که میزان این انرژی به نوع سیستم ریلی بستگی دارد ولی به‌طور کلی می‌توان گفت حدود ۵۰٪ است. این میزان با افزایش تعداد توقف‌ها زیاد می‌شود، بنابراین در تراموا و مترو بیشتر از قطارهای محلی است. با استفاده از حالت ژنراتوری موتورها و بازتولید انرژی ترمزی^۱ می‌توان بخشی از توان را بازگرداند ولی حدود یک‌سوم آن به دلیل استفاده از ترمز اصطکاکی و تلفات در موتور، مبدل و شبکه هدر می‌رود [1].

انرژی کششی به عوامل متعددی بستگی دارد که عبارتند از: هندسه خط (شیب و انحنای مسیر، تعداد و محل ایستگاه‌ها، محدودیت‌های سرعت و...)، مشخصه‌های قطار (سیستم کنترل، شتاب، وزن، موتور، سیستم قدرت کمکی)، سیستم قدرت تغذیه (تعداد و محل پست‌های ترانسفورماتوری، نوع تجهیزات، مشخصات هادی‌ها و سطح ولتاژ) و شرایط کاری (فاصله زمانی بین حرکت قطارها، ساختار قطار، زمان توقف و...). مصرف انرژی سیستم کششی را می‌توان با تغییر برخی از پارامترهای فوق کاهش داد. فعالیت‌های مربوط به افزایش راندمان انرژی را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد، تدابیر بهره‌برداری که هدف از آن‌ها استفاده از سیستم قطار و زیرساخت‌های موجود به‌صورت مؤثرتر (با بازدهی بیشتر) است که با کمترین تغییرات در تجهیزات امکان‌پذیر است. در مقابل تدابیر فناوریانه جدید که نیاز به سرمایه‌گذاری و تغییرات زیاد در سیستم دارند. در این رساله پس از معرفی روش‌های مختلف صرف جویی انرژی به استفاده همزمان دو روش و بررسی مزایای آن پرداخته شده است.

¹ Regenerative Braking Energy

۱-۲ ضرورت انجام پروژه

با توجه به اینکه یکی از چالش‌های اصلی در کاربرد سامانه‌های قطار شهری، مصرف بالای انرژی است، کاهش مصرف و تلفات انرژی از اولویت‌های اصلی تحقیقات در این حوزه می‌باشند. مطالعات زیادی جهت کاهش مصرف انجام شده است؛ ولی با توجه به عدم وجود نتایج مستند، مقایسه آن‌ها به راحتی ممکن نیست. گرچه نتایج تحقیقات انجام شده به طور شفاف موجود نیست و بعضاً با یکدیگر در تناقض می‌باشند، ولی با جمع‌بندی مطالعات انجام شده، می‌توان گفت که در اغلب تحقیق‌های انجام شده از یک روش جهت کاهش مصرف انرژی استفاده شده است. گرچه در بهینه‌سازی، چند هدف انتخاب شده‌اند ولی تأثیر متقابل تدابیر اتخاذ شده در حوزه‌های مختلف بر یکدیگر بررسی نشده است. از آنجاکه راه کارهای صرفه‌جویی انرژی بر یکدیگر تأثیر متقابل دارند، توجه به این موضوع ضروری است. ممکن است تأثیر در جهت مثبت باشد یعنی اینکه حالت هم‌افزایی داشته باشند یا اینکه یکدیگر را خنثی کنند. عدم توجه به یک روش هنگام به کارگیری روش دیگر، ممکن است باعث غیراقتصادی شدن نتیجه راه کار موردنظر بشود. مدنظر قرار دادن اثرات متقابل می‌تواند نتایج تحلیل‌های اقتصادی و یا بهره‌وری انرژی را تغییر دهد. برای بررسی این موضوع، انجام پروژه‌ای با در نظر گرفتن دو موضوع صرفه‌جویی انرژی و کاهش هزینه‌ها ضروری است که در این رساله، با در نظر گرفتن هم‌زمان مشخصه سرعت و ذخیره‌سازهای انرژی، به آن پرداخته شده است.

۱-۳ نوآوری پروژه

همانطور که توضیح داده شد، در مطالعات قبلی با وجود پرداختن به مباحث متنوع، بعضی از موضوع‌ها یا مورد بررسی قرار نگرفته‌اند و یا با دیدگاهی متفاوت مطالعه شده‌اند؛ لذا نوآوریهای این پروژه را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

- (۱) بهینه‌سازی همزمان پروفایل سرعت و ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی برای اولین بار در این پروژه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. به عبارت دیگر با در نظر گرفتن همزمان ذخیره‌ساز و پروفایل سرعت، بهینه‌سازی در مصرف انرژی با حداقل هزینه انجام شده است.

- (۲) نشان داده شده است که میزان استفاده مجدد از انرژی بازتولیدی ترمزی به شرایط شبکه بستگی دارد و متغیر در نظر گرفتن آن منجر به بهبود نتایج بهینه‌سازی می‌شود.
- (۳) با توزیع زمان سفر بین ایستگاه‌ها و استفاده از ضریب بازیابی متغیر انرژی بازتولیدی ترمزی، صرفه‌جویی انرژی بیشتر حاصل شده است.
- (۴) با تعریف ضریب بازیابی انرژی بازتولیدی برای کل شبکه، معیار جدیدی برای بهینه‌سازی انرژی مصرفی کل شبکه معرفی شده است.
- (۵) سعی شده با استفاده از پارامترهای دقیق و واقعی اقتصادی، نتایج حاصل شده از تحقیق برای مدیران و برنامه‌ریزان شرکت‌های بهره‌برداری قطارشهری کشور قابل استفاده باشد.

۴-۱ اهداف پروژه

هدف کلی این پروژه صرفه‌جویی انرژی و کاهش تلفات با حداقل هزینه سرمایه‌گذاری در سیستم قطارشهری است.

اهداف جزئی آن به صورت زیر خلاصه شده‌اند:

- ✓ کاهش مصرف و صرفه‌جویی انرژی با بهینه‌سازی پروفایل سرعت و ذخیره‌سازهای ساکن به صورت جداگانه و همزمان و مقایسه‌ی نتایج آن‌ها و ارزیابی اقتصادی روش صرفه‌جویی فوق.
 - ✓ ارائه‌ی راهکار مناسب صرفه‌جویی انرژی متناسب با ویژگی‌های هر سامانه‌ی قطارشهری.
- اقدام اصلی در این بخش، انتخاب تابع هدف مناسب برای رسیدن به اهداف اصلی موردنظر پروژه بوده است. از آنجاکه در این تحقیق دو هدف اصلی، کاهش مصرف انرژی و کاهش هزینه‌ها یا اقتصادی بودن روش می‌باشند، در تابع هدف نیز این دو معیار در نظر گرفته شده‌اند. به عبارت دیگر، مصرف انرژی و هزینه در یک بازه زمانی مشخص حداقل شده است. دیاگرام دسته‌بندی اهداف پروژه در شکل (۲-۱) نشان داده شده است.

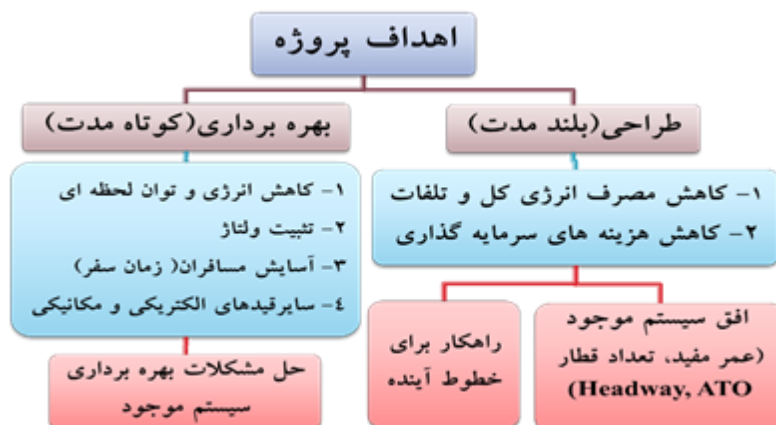
۵-۱ مروری بر فصل‌های رساله

با مشخص شدن تابع هدف و در نظر گرفتن کاهش مصرف انرژی و کاهش هزینه‌ها به عنوان معیارهای اصلی در آن، باید پروفایل سرعت و ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی به نحوی محاسبه شوند که اهداف موردنظر برآورده شوند. در تعیین پروفایل سرعت چون منحنی‌های سرعت مختلف تفاوت چندانی از نظر هزینه‌ی اجرایی ندارند، بنابراین اگر مصرف انرژی حداقل گردد، خودبه‌خود هزینه نیز حداقل خواهد شد. به عبارت دیگر هزینه فقط تابع مقدار انرژی مصرفی است.

در انتخاب ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی، هزینه شامل دو بخش اصلی است، یکی مربوط به مقدار انرژی مصرفی است بنابراین ظرفیت ذخیره‌ساز باید طوری انتخاب شود که هزینه‌ی انرژی مصرفی حداقل گردد، از طرفی هزینه‌ی سرمایه‌گذاری خرید و نصب و نگهداری سیستم نیز بخش قابل توجهی از هزینه را شامل می‌شود، بنابراین باید بین این دو بخش مصالحه‌ای برقرار گردد. پس باید شاخص‌هایی انتخاب شوند که به طور جامع و مؤثر بیانگر عملکرد سیستم از نظر فنی و اقتصادی باشند.

برای انجام پروژه و امکان بررسی دقیق، چهار سناریو در نظر گرفته شده است و پس از انجام شبیه‌سازی، نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این سناریوها عبارتند از:

- سناریوی اول: سیستم نمونه با پروفایل سرعت معمولی و بدون سیستم ذخیره‌ساز
- سناریوی دوم: سیستم با پروفایل سرعت بهینه و بدون سیستم ذخیره‌ساز انرژی



شکل (۱-۲) اهداف کوتاه مدت و بلندمدت پروژه

▪ سناریوی سوم: سیستم نمونه با ذخیره‌ساز بهینه و پروفایل سرعت معمولی

▪ سناریوی چهارم: سیستم با بهینه‌سازی ذخیره‌ساز و پروفایل سرعت

ابتدا با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی، برای سیستم معمولی میزان مصرف انرژی به‌عنوان حالت مبنا محاسبه‌شده و پس از انجام شبیه‌سازی‌ها در حالت‌های مختلف، سناریوهای فوق از نظر مصرف انرژی و میزان صرفه‌جویی با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

در فصل دوم کلیه روش‌های کاهش مصرف انرژی در سامانه‌های قطارشهری به‌صورت اجمالی بیان‌شده‌اند. روش استفاده از انرژی بازتولیدی ترمزی و زیرمجموعه‌های آن بطور کامل معرفی شده است و مزایا و معایب هریک از آن‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

فصل سوم به بررسی مطالعات انجام‌شده در زمینه کاهش مصرف انرژی اختصاص یافته است. تمرکز اصلی در این فصل بر روی تحقیقات انجام‌شده در رابطه با ذخیره‌سازهای انرژی، پست‌های برگشت‌پذیر، تنظیم جدول زمانی و راهبری بهینه است. پس از تحلیل مطالعات انجام‌شده در هر زمینه، به موضوع تأثیرات متقابل این روش‌ها بر یکدیگر پرداخته شده است. از آنجاکه این موضوع تاکنون در تحقیقات قبلی به‌صورت کامل مدنظر قرار نگرفته است، اهمیت انجام بهینه‌سازی هم‌زمان مشخصه سرعت و ذخیره‌سازهای ساکن انرژی به تفصیل بیان‌شده است.

در فصل چهارم ضمن بررسی دقیق‌تر موضوع بهینه‌سازی مشخصه سرعت قطار، ابتدا روشی جدید، ساده و درعین‌حال دقیق برای به دست آوردن مشخصه سرعت بهینه قطار در حالت منفرد و در مسیر بین دو ایستگاه متوالی، بدون حضور سایر قطارها معرفی شده است و نحوه شبیه‌سازی توضیح داده شده است و صحت نتایج شبیه‌سازی پیشنهادی با یک نمونه شبیه‌سازی موجود به‌عنوان مرجع، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه پارامتر نرخ استفاده از انرژی بازتولیدی از منظر جدید و متفاوت با دیدگاه‌های مطالعات قبلی معرفی شده است. در بخش دوم این فصل، حداقل کردن انرژی مصرفی در سیستم چندقطاره مطرح‌شده است و روش ترکیبی استفاده از مشخصه سرعت بهینه همراه با توزیع زمان سفر بین ایستگاه‌ها معرفی شده است.

در فصل پنجم بهینه‌سازی هم‌زمان مشخصه سرعت و استفاده از ذخیره‌سازهای ساکن مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا به نحوه مدل‌سازی ذخیره‌ساز و شبکه DC شامل قطارها و ذخیره‌سازها

پرداخته شده است. سپس با انتخاب انرژی کل ورودی شبکه به عنوان تابع هدف، بهینه‌سازی مکان و ظرفیت خازن‌ها به روشی جدید، با استفاده از الگوریتم ژنتیک، انجام شده است و نتایج شبیه‌سازی برای شبکه مورد مطالعه (خط ۱ قطارشهری مشهد) ارائه شده است.

در فصل ششم با انتخاب هزینه کل سرمایه‌گذاری و انرژی به عنوان هدف اصلی، وضعیت سناریوهای مختلف معرفی شده در فصل قبل، از نظر میزان صرفه‌جویی انرژی و هزینه با یکدیگر مقایسه شده است. پارامترهای مؤثر بر هزینه کل معرفی شده‌اند و با انجام تحلیل حساسیت، تأثیر تغییرات پارامترهای مختلف بر هزینه کل بررسی شده است.

در فصل هفتم، ابتدا به تحلیل کلی نتایج روش معرفی شده پرداخته شده است و سپس موضوعات مفید برای تحقیقات آینده معرفی شده‌اند. مشخصات فنی و اطلاعات بهره‌برداری سیستم مورد مطالعه نیز در پیوست (آ) آورده شده است.

فصل دوم:

**روش‌های صرفه‌جویی در
مصرف انرژی الکتریکی در
سیستم قطار شهری**

۲-۱ مقدمه

به‌طور کلی روش‌های کاهش مصرف انرژی را می‌توان به چهار دسته زیر تقسیم کرد: استفاده از انرژی بازتولیدی ترمزی، کاهش تلفات در سیستم تغذیه و کشش، کاهش مصرف انرژی در سامانه‌های آسایشی و راهبری اقتصادی^۱. اندازه‌گیری و جمع‌آوری اطلاعات مربوط به مصرف انرژی در سیستم قطار شهری به‌خودی‌خود یک فعالیت در جهت بهره‌وری انرژی نیست ولی می‌تواند ابزاری سودمند جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی باشد. این موضوع با ورود بحث بازار برق و خصوصی‌سازی در سامانه‌های ریلی و مباحث مربوط به صورت حساب‌های برق مصرفی، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. استانداردسازی تجهیزات و روش‌های اندازه‌گیری، استفاده از مولدهای انرژی‌های تجدیدپذیر و مدیریت هوشمند استفاده از انرژی ترمزی و منابع تجدیدپذیر و در نتیجه هوشمند سازی شبکه از اقداماتی هستند که در این راستا می‌توانند به بهره‌وری انرژی منجر شوند. در ادامه به توضیح روش‌های کاهش مصرف انرژی پرداخته شده است.

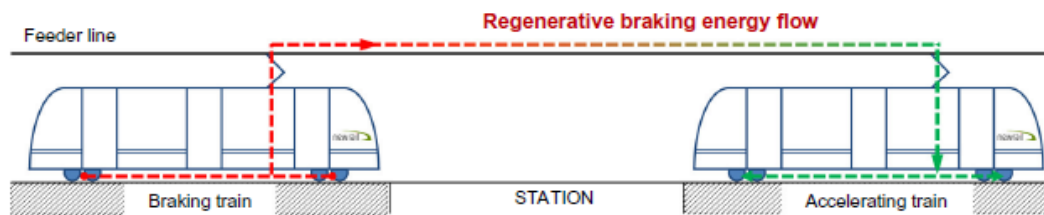
۲-۲ استفاده از انرژی بازتولیدی ترمزی

یکی از روش‌های اصلی که جهت کاهش مصرف انرژی و کاهش تلفات بکار می‌رود، استفاده از انرژی جنبشی قطار در زمان ترمز گیری است. بدین ترتیب که موتور الکتریکی محرک قطار توسط سیستم کنترلی به حالت ژنراتوری درآمده و انرژی را به سیستم باز پس می‌دهد. راه‌های استفاده از این روش عبارتند از: بهینه‌سازی جدول زمانی حرکت قطارها و فاصله زمانی بین حرکت دو قطار متوالی^۲ به‌طوری‌که حتی‌الامکان، هنگام ترمز یک قطار در یک ایستگاه، قطار یا قطارهای دیگری در نزدیکی آن در حال شتاب‌گیری باشند تا بتوانند این انرژی را جذب کنند. راه دوم استفاده از سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی^۳ (ESS) است. آخرین راه حل در این روش، استفاده از پست‌های دوطرفه و بازگرداندن انرژی

^۱ Eco Driving

^۲ Headway

^۳ Energy Storage Systems



شکل (۱-۲) شماتیک جریان انرژی در بازتولید انرژی ترمزی [20]

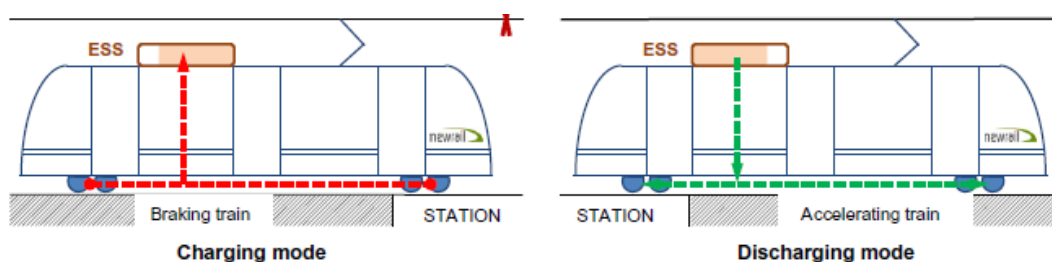
اضافی به شبکه سراسری است. مسیر انتقال انرژی در طی فرآیند بازتولید انرژی ترمزی در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.

۲-۱-۲ سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی

این سامانه‌ها می‌توانند به‌صورت ساکن در ایستگاه‌ها یا کنار مسیر قطار و یا روی خود آن نصب گردند. در مدل‌های موجود در پست، انرژی یک قطار برای قطارهای بعدی ذخیره می‌گردد؛ ولی در نوع دوم، انرژی ذخیره‌شده هنگام ترمز، در شتاب‌گیری بعدی خود قطار استفاده می‌شود. هر نوع دارای ویژگی‌های خاصی می‌باشند که به‌طور خلاصه در ادامه به آن‌ها اشاره شده است.

۲-۱-۲-۲ سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی نصب شده روی قطار^۱

این سامانه‌ها با ذخیره‌ی انرژی جنبشی قطار هنگام ترمز و استفاده از آن در هنگام شتاب‌گیری بعدی می‌توانند نقش مؤثری در صرفه‌جویی انرژی ایفا کنند. مسیر جریان انرژی در این ذخیره‌سازها در شکل (۲-۲) نشان داده شده است.



شکل (۲-۲) مسیر انرژی در ذخیره‌ساز نصب‌شده روی قطار [20]

^۱ On-board

۲-۱-۲ مزایای ذخیره‌ساز نصب شده روی قطار:

- پیک سایی توان موردنیاز در زمان شتاب‌گیری قطار که باعث کاهش هزینه‌ی انرژی و حداقل شدن تلفات اهمی در خطوط تغذیه می‌شود.
- محدود کردن افت ولتاژ، که می‌تواند اجازه داشتن ترافیک بالاتر را بدون نیاز به تغییر در زیرساخت‌های موجود فراهم کند (فاصله‌ی زمانی بین حرکت قطارها^۱ (هدوی) کاهش یابد).
- عملکرد آن‌ها مانند منابع تغذیه مستقل است و در مواقع اضطراری، در دپوها و در قسمت‌هایی که خط بالاسری وجود ندارد قابل استفاده هستند.
- در مقایسه با سیستم ذخیره‌ساز انرژی ساکن، به دلیل عدم وجود تلفات خط، راندمان این سامانه‌ها بالاتر است.
- با توجه به این‌که کنترل سیستم ذخیره‌ساز انرژی مستقل از شرایط ترافیکی است، مدیریت انرژی بازیافتی ساده‌تر است ([3] و [4]).

۲-۱-۲ معایب ذخیره‌ساز نصب شده روی قطار:

نیاز به فضای اضافی دارند و در نتیجه وزن قطار نیز افزایش می‌یابد که می‌تواند منجر به افزایش ۱ تا ۲ درصدی مصرف انرژی شود؛ بنابراین اضافه کردن سیستم ذخیره‌ساز نصب شده روی قطار، به قطارهای موجود، معمول نیست ولی می‌تواند در طرح‌های جدید از ابتدا لحاظ گردد؛ که باید بهینه‌سازی لازم از نظر ابعاد در نظر گرفته شود؛ زیرا اندازه‌ی بزرگ‌تر، وزن را زیاد می‌کند و اندازه‌ی کوچک‌تر، (قدرت کمتر) باعث اتلاف بخشی از انرژی خواهد شد ([3] و [4]).

انتخاب اندازه‌ی بهینه برای این ذخیره‌سازها بستگی به عملکرد اصلی آن‌ها دارد (مثلاً قرار است برای صرفه‌جویی انرژی، کاهش افت ولتاژ یا حرکت بدون خط بالاسری باشد) چون در هر حالت، پارامترهای طراحی متفاوت خواهند بود و نتیجه‌ی بهینه‌سازی اندازه نیز فرق خواهد داشت. یک معیار کلی برای رسیدن به اهداف صرفه‌جویی انرژی، این است که سیستم ذخیره‌ساز انرژی بتواند حداکثر انرژی ترمزی را در زمان کوتاهی جذب نماید [5].

¹ Headway

طراحی سیستم ذخیره‌ساز انرژی نصب شده روی قطار برای مقاصد پایدارسازی ولتاژ، نیاز به در نظر گرفتن کلیه‌ی مشخصه‌های خط از قبیل فاصله بین پست‌ها و جدول زمانی حرکت قطارها دارد. اگر هدف، راهبری قطار بدون خط بالاسری باشد، باید کلیه‌ی مصارف مربوط به کشش و سامانه‌های کمکی در نظر گرفته شود و قطار بتواند فقط توسط سیستم ذخیره‌ساز انرژی به حرکت عادی خود ادامه دهد. در اینجا بهینه‌سازی روش راهبری قطار نیز در حداقل کردن اندازه‌ی سیستم ذخیره‌ساز انرژی بسیار حائز اهمیت است [6] و [7].

معمولاً سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی نصب شده روی قطار، همراه با مقاومت‌های ترمزی نصب می‌گردند تا در صورتی که به هر علت انرژی برگشتی بیش از ظرفیت ذخیره باشد، سیستم در برابر آسیب‌های احتمالی محافظت گردد. این موضوع ممکن است در فواصل زمانی کوچک بین حرکت قطارها مهم نباشد و انرژی اضافی توسط بقیه‌ی سیستم جذب گردد ولی اگر فاصله‌ی زمانی زیاد باشد، ممکن است اضافه ولتاژ سیستم بیش‌ازحد مجاز گردد و رله‌های حفاظتی عمل نمایند.

برای کنترل ذخیره‌سازهای نصب شده روی قطار باید پارامترهای زیادی مانند سرعت قطار، وضعیت شارژ^۱ ذخیره‌ساز، توان موردنیاز سیستم کششی و ولتاژ شبکه مدنظر قرار گیرند. به عبارت دیگر این سیستم کنترلی باید این اطمینان را ایجاد کند که سیستم ذخیره‌ساز انرژی به‌اندازه کافی شارژ شده تا بتواند قطار را در حالت شتاب‌گیری پیش‌برد و به‌اندازه‌ی کافی تخلیه‌شده باشد تا بتواند بیشترین مقدار انرژی جنبشی را در زمان ترمز جذب کند. عنصر ذخیره‌ساز مورد استفاده در سیستم نصب شده روی قطار بیشتر بستگی به هدف نصب سیستم دارد. با توجه به پاسخ سریع، هزینه نسبتاً پایین و چگالی توان بالا، به نظر می‌رسد که ابرخازن (EDLC)^۲، بهترین گزینه باشد [8]. ولی به دلیل چگالی انرژی پایین اگر هدف هدایت قطار بدون خط بالاسری باشد مناسب نیست و باتری‌های لیتیوم-یون می‌توانند بهتر عمل کنند. باید توجه داشت که ذخیره‌ساز مغناطیسی ابرسانا (SMES)^۳ و چرخ طیار^۴ با توجه به معایبی که برای آن‌ها ذکر گردید خیلی برای کاربردهای نصب شده روی قطار مناسب نیستند. شاید بهترین گزینه، ذخیره‌سازهای ترکیبی خازن-باتری باشند؛ به خصوص در زمانی که هدف حرکت قطار

^۱ State Of Charge (SOC)

^۲ Electrochemical Double Layer Capacitor

^۳ Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)

^۴ Flywheel

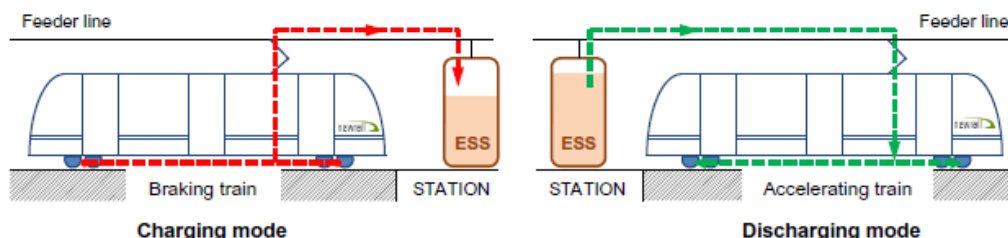
بدون خط بالاسری باشد. در این سامانه‌ها، خازن می‌تواند توان پیک را جذب کند و یا توان لازم برای شتاب‌گیری را فراهم نماید و باتری‌ها ادامه‌ی کار را دنبال نمایند. بدین ترتیب باتری‌ها در برابر ضربات شدید و همچنین تعداد دفعات زیاد شارژ و تخلیه محافظت می‌شوند و ضمن بهبود عملکرد سیستم، عمر آن نیز افزایش می‌یابد [9].

اغلب تحقیقات انجام‌شده و مقالات موجود درباره‌ی ذخیره‌سازهای نصب شده روی قطار، در مورد ابرخازن‌ها است و این مطلب خود نشان‌دهنده‌ی این است که مناسب‌ترین گزینه برای این کاربرد، EDLC است [4]. نکته‌ی قابل‌تأمل این است که در اغلب مطالعات، شبیه‌سازی‌های مختلفی جهت ارزیابی عملکرد سیستم و تحلیل‌های گوناگون انجام‌شده است، ولی نتایج کاربردی سودمندی انتشار پیدا نکرده است.

۲-۲-۱-۴ سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی ساکن^۱ (نصب‌شده در کنار مسیر^۲)

در این سیستم انرژی در هنگام ترمز ذخیره می‌شود تا در هنگام نیاز برگردانده شود. فرآیند شارژ و دشارژ، هر یک نیاز به یک کنترل‌کننده دارند که معمولاً به‌صورت تابعی از ولتاژ خط عمل می‌کند [10]. اگر به دلیل ترمز یک قطار، اضافه ولتاژی در سیستم رخ دهد، ذخیره‌ساز وارد حالت شارژ شده و انرژی را جذب می‌کند و برعکس در زمان شتاب‌گیری که ولتاژ خط افت می‌کند، سیستم انرژی ذخیره‌شده‌ی خود را آزاد کرده و دوباره ولتاژ را به حالت تعادل برمی‌گرداند (شکل (۲-۳)).

ذخیره‌سازهای ساکن معمولاً در پست‌های موجود نصب می‌گردند یا در جاهایی که افت ولتاژ خط حداکثر باشد؛ که نزدیکی ایستگاه‌ها می‌تواند برای این منظور مکان‌های مناسبی باشند. این ذخیره‌سازها معمولاً با هدف کاهش توان مصرفی کل سیستم به کار می‌روند. البته یکی از نتایج مهم



شکل (۲-۳) مسیر انرژی در ذخیره‌سازهای ساکن نصب‌شده در کنار مسیر [20]

¹ Stationary Energy Storage System

² Wayside

استفاده از آن‌ها، پایداری ولتاژ سیستم به‌خصوص در نقاط دور از پست‌ها است که شاید مهم‌ترین برتری آن‌ها نسبت به پست‌های دوطرفه نیز باشد. در حقیقت ذخیره‌ساز ساکن، نیاز به احداث پست‌های جدید را برای جبران افت ولتاژ در انتهای خطوط مرتفع می‌سازد [11]. بطور کلی می‌توان گفت که ذخیره‌سازهای ساکن را می‌توان در کنار مسیر و یا در داخل پست‌ها نصب کرد. هنگامی که ذخیره‌ساز در فاصله بین پست‌ها قرار می‌گیرد، مانند یک پست جدید موقتی رفتار می‌کند و باعث می‌شود که مسیر عبور جریان کوتاه‌تر شود و افت ولتاژ در حالت موتوری و یا افزایش آن در حالت بازتولیدی کمتر می‌شود؛ لذا نصب در کنار مسیر بیشتر با هدف کاهش نوسانات ولتاژ انجام می‌شود؛ البته کاهش مصرف انرژی را نیز به همراه دارد. درحالی‌که نصب در داخل پست‌های کشش تأثیری در مسیر و مقدار جریان عبوری از خط ندارد و تأثیر چندانی بر محدود کردن تغییرات ولتاژ ندارد و هدف اصلی آن صرفه‌جویی انرژی است. مشابه ذخیره‌سازهای نصب شده روی قطار، این سامانه‌ها نیز می‌توانند نقش بسزایی در کاهش مصرف اوج انرژی در زمان شتاب‌گیری قطارها داشته باشند؛ که خود منجر به صرفه‌جویی قابل‌توجهی در هزینه‌ها می‌گردد. به‌علاوه می‌توانند به قطارها کمک کنند تا در صورت وقفه در تغذیه، خود را به نزدیک‌ترین ایستگاه برسانند و به‌عبارت‌دیگر قابلیت اطمینان سیستم را بالا ببرند. در مقایسه با سامانه‌های نصب شده روی قطار، این سامانه‌ها محدودیت وزن و نیاز به فضای اضافی را ندارند. ضمن این‌که ذخیره‌سازهای ساکن می‌توانند در یک‌زمان، انرژی بازیافتی حاصل از ترمز چند قطار را جذب کنند. نصب و نگهداری و تعمیر این سامانه‌ها نیز تأثیری در بهره‌برداری کل سیستم قطارشهری ندارد. به دلیل وجود تلفات خط، راندمان آن‌ها نسبت به سیستم نصب شده روی قطار کمتر است. چون موضوع فوق، مستقیماً به فاصله‌ی بین قطار در حال ترمز و محل نصب سیستم ذخیره‌ساز انرژی بستگی دارد، انجام مطالعات دقیق جهت بهینه‌سازی محل نصب سیستم ذخیره‌ساز انرژی در طول مسیر ضروری است [8]. قابلیت جذب انرژی توسط خطوط، شدیداً به شرایط ترافیکی و تعداد و فاصله‌ی قطارهای موجود در خط بستگی دارد؛ لذا هنگام طراحی ذخیره‌ساز ساکن باید شرایط ترافیکی در نظر گرفته شود و تمام سناریوهای ممکن از نظر فاصله‌ی زمانی حرکت قطارها در طراحی بهینه‌ی ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز انرژی مدنظر قرار گیرند [12]. با توجه به این‌که ذخیره‌سازهای ساکن، محدودیت‌های کمتری از نظر وزن و فضای موردنیاز نسبت به انواع نصب شده روی قطار دارند، دامنه‌ی کاربرد فناوری‌های

مناسب برای آن‌ها وسیع‌تر است. برای مقاصد پیک‌سای و پایداری ولتاژ، ابرخازن‌ها مناسب‌اند؛ ولی برای مصارف طولانی‌مدت، باز هم به دلیل چگالی انرژی پایین خیلی مناسب نیستند. در مورد چرخ طیار، محدودیت‌های مربوط به ایمنی در این حالت کمتر است. به نظر می‌آید که SMES نیز گزینه‌ی مناسبی باشد ولی مشکلاتی نظیر هزینه و پیچیدگی بالا و میدان‌های مغناطیسی قوی، باز هم از توسعه‌ی کاربرد آن‌ها جلوگیری می‌کند [13]. در بین باتری‌ها، انواع پایه سدیم با توجه به ظرفیت‌های توانی بالا و هزینه‌ی پایین سرمایه‌گذاری در هر سیکل، مناسب‌اند و تکامل باتری‌های لیتیوم-یون و نیکل-متال هیدرید^۱ نیز در آینده آن‌ها را بیشتر قابل استفاده خواهد کرد.

صرف‌نظر از نوع ذخیره‌ساز، کل سیستم شامل سه قسمت ذخیره‌ساز، مبدل الکترونیک قدرت و کنترل کننده، جهت مدیریت فرآیند شارژ و دشارژ است. عنصر ذخیره‌ساز انرژی می‌تواند باتری، ابرخازن، چرخ طیار و SMES باشد که در فصل بعدی ضمن اشاره به مزایا و معایب هر یک، مسیر تاریخی مطالعات و تحقیقات انجام‌شده در هر مورد آورده شده است.

۲-۱-۲-۵ باتری‌ها

باتری‌ها به‌عنوان عناصر ذخیره‌ساز انرژی، نه‌تنها در قطارشهری بلکه از دیرباز در صنایع مختلف کاربرد وسیعی داشته‌اند. با گذشت زمان، فناوری ساخت این تجهیزات تغییر کرده و روزبه‌روز در حال بهبود است و انواع گوناگون آن‌ها دارای خصوصیات مختلفی می‌باشند که عبارتند از:

باتری‌های سرب - اسید که قدیمی‌ترین و پرکاربردترین نوع می‌باشند که در مقایسه با باتری‌های دیگر هزینه‌ی نسبتاً پایین، قابلیت اعتماد و راندمان بالا، عمر نسبتاً کوتاه، چگالی انرژی پایین و چگالی توان بالایی دارند. نرخ تخلیه خودبه‌خودی در آن‌ها بسیار کم است و در دمای پایین عملکرد ضعیفی دارند و به‌طور کامل تخلیه نمی‌شوند. عیب اصلی آن‌ها تأثیر منفی بر محیط‌زیست به خاطر وجود فرایند سرب است که با جایگزینی سرب با مواد سبک‌تری مانند کربن امکان توسعه‌ی کاربرد آن‌ها وجود دارد [14]. نیاز به تعمیرات و نگهداری کم، قابلیت اعتماد و چگالی انرژی و توان بالاتر و عمر بیشتر نسبت به باتری‌های اسید - سرب، از ویژگی‌های باتری‌های نیکل کادمیوم است ولی نرخ تخلیه خودبه‌خود آن‌ها بالاست. کاربرد آن‌ها در قطارشهری به‌عنوان پشتیبان و کمکی است. در عوض باتری‌های NiMH دارای

^۱ NiMH

چگالی انرژی و توان بالاتر بوده و عمر طولانی‌تری دارند. استفاده از مواد سمی مانند کادمیوم کم شده، راندمان خیلی بالا نیست و نرخ تخلیه خودبه‌خودی بالاست (که جداکننده‌های جدید می‌توانند آن را کاهش دهند). معروف‌ترین باتری‌های پایه‌ی لیتیوم، باتری لیتیوم - یون و لیتیوم - پلیمر است. مزایای آن‌ها عبارتند از: چگالی نسبتاً بالای انرژی و توان، راندمان بالا، نرخ تخلیه خودبه‌خود پایین، تعداد دفعات شارژ و دشارژ بالا (نداشتن اثر حافظه). معایب این گروه نیز، نیاز به سیستم کنترل جهت مدیریت دما و ولتاژ و وضعیت شارژ (SOC)^۱ و هزینه‌ی بالا به علت نیاز به مدارهای حفاظتی و قاب خاص است [15]. از نظر هزینه‌های ساخت و بسته‌بندی، باتری‌های لیتیوم پلیمری ارزان‌تر هستند و ریسک آتش‌سوزی آن‌ها نیز کمتر است؛ ولی دامنه دمای کاری آن‌ها پایین و طول عمر آن‌ها نیز کمتر است [16]. کاربرد باتری‌های لیتیوم - یونی در تجهیزات قابل حمل مانند لپ‌تاپ و موبایل بسیار زیاد است و به دلیل ویژگی‌های ممتاز چگالی توان و انرژی، در خودروهای الکتریکی، کیفیت توان و کاربردهای فضایی نیز استفاده می‌شوند [16]. باتری‌های فوق در قطار شهری نیز در فعالیتهای تحقیقاتی در حال استفاده می‌باشند و تحقیقات بیشتر روی پیدا کردن ترکیب‌های الکتروشیمیایی جدید است تا ضمن بهبود طول عمر و چگالی توان و انرژی، هزینه‌ها نیز کاهش یابد. باتری‌های پایه‌ی سدیم (ZEBRA)؛ دارای بازده انرژی بالا، عمر نسبتاً طولانی و چگالی انرژی و توان نسبتاً بالا هستند. عیب اصلی آن‌ها دمای کار بالاست (۳۰۰°) که کاربرد آن‌ها را در سامانه‌های ساکن بزرگ، مانند مقاصد بهبود کیفیت توان و پیک سایی محدود کرده است. فناوری‌های دیگر نیز مانند هوا - فلز که چگالی انرژی بالا و قیمت‌های مناسبی دارند در دست بررسی و تحقیق می‌باشند [17].

۲-۱-۲-۶ خازن‌های الکتروشیمیایی دولایه (ابر خازن‌ها)

خازن‌های الکتروشیمیایی به نام‌های مختلفی همچون ابرخازن، سوپر خازن و EDLC شناخته می‌شوند که علت تفاوت معمولاً به شرکت‌های سازنده و نام‌های تجاری آن‌ها بازمی‌گردد. صرف‌نظر از نام‌گذاری، این خازن‌ها انرژی الکتریکی را در فضای رابط بین الکترولیت و الکترود جامد ذخیره می‌کنند. به دلیل ظرفیت پایین خازن‌های الکتروستاتیکی، کاربرد آن‌ها به مصارف توان پایین محدود می‌گردد. درحالی‌که EDLC ها قادرند انرژی بسیار بیشتری از خازن‌های معمولی را ذخیره کنند و توان بیشتری

¹ State Of Charge

نیز نسبت به باتری‌ها تأمین نمایند [18]. تفاوت ساختاری این خازن‌ها با خازن‌های الکترولیتی این است که سطح الکتروده آن‌ها به صورت متخلخل است؛ بنابراین سطح مؤثر (A) بسیار بزرگ است و فاصله بین الکترودها (d) نیز بسیار کم و طبق رابطه‌ی $c = \epsilon \cdot A/d$ ظرفیت بسیار بالاست. چگالی انرژی بالای این خازن‌ها به دلیل ظرفیت بیشتر در واحد حجم آن‌ها است [18].

مطالب کامل در زمینه‌ی تاریخچه، دسته‌بندی، کاربردها، مدل‌سازی و آزمایش‌های ابرخازن‌ها در [19] آورده شده است. از نکات حائز اهمیت در این تحقیق، موضوع سری کردن خازن‌ها است. با توجه به نامساوی بودن ظرفیت آن‌ها (به دلیل تلورانس ساخت، افزایش دما در سیستم و پیری خازن‌ها) تقسیم ولتاژ یکسان نخواهد بود و ممکن است بعضی از آن‌ها اضافه ولتاژ پیدا کنند که نیاز به مداری جهت ایجاد تقارن (بالانس) است. دو نوع مدار اکتیو و پسیو معرفی شده‌اند که نوع اکتیو به دلیل تلفات کمتر مطلوبیت بیشتری دارد. البته پیچیدگی مدار کنترل و هزینه‌ی بالای آن را نیز باید مدنظر داشت. از مزایای EDLC ها نسبت به سایر ذخیره‌سازها، می‌توان علاوه بر چگالی توان بالا، به راندمان شارژ بالا، عمر طولانی، سرعت شارژ و دشارژ بالا و دامنه دمای کاری وسیع اشاره کرد. همچنین تنها با اندازه‌گیری ولتاژ خروجی می‌توان وضعیت شارژ را به سادگی محاسبه کرد. البته باید توجه داشت که این خازن‌ها فقط برای دامنه‌ی محدودی از نیازهای انرژی و توان مفید می‌باشند و در خارج از این محدوده‌ها روش‌های دیگر مناسب‌ترند. تحقیقات اخیر بیشتر روی افزایش چگالی انرژی آن‌ها متمرکز شده است [20]. مشخصه‌های ابرخازن‌ها، آن‌ها را برای کاربرد به عنوان ذخیره‌ساز انرژی در سامانه‌های قدرت و قطار شهری بسیار مناسب کرده است. به دلیل سرعت پاسخ بالا، می‌توانند هم در مقاصد تثبیت ولتاژ و هم تأمین توان حداکثر، مفید واقع شوند.

۲-۱-۲-۲ چرخ طیار

ذخیره‌ساز چرخ طیار شامل یک سیستم الکترومکانیکی است که انرژی جنبشی را در یک مجموعه به نام روتور ذخیره می‌کند. انرژی ذخیره‌شده متناسب با اینرسی روتور و مجذور سرعت آن است. علاوه بر آن دارای یک ماشین سنکرون آهنربای دائم است که چرخ طیار از جنس کامپوزیت روی محور روتور آن کوپل شده است. مجموعه‌ی روتور در داخل یک محفظه‌ی خلأ توسط بلبرینگ‌های مغناطیسی به صورت معلق نگه‌داشته شده، تا اصطکاک کاهش یابد و تلفات به حداقل برسد [21].

استفاده از روتورهای کامپوزیتی سبک، اینرسی روتور را کاهش می‌دهد ولی اجازه می‌دهد که روتور با سرعت بسیار بیشتری بچرخد و در نتیجه انرژی جنبشی ذخیره‌شده، نسبت به مدل‌های قدیمی با روتور فولادی و بلبرینگ‌های مکانیکی بسیار بالاتر است. ماشین سنکرون می‌تواند در حالت موتوری باشد و توسط منبع تغذیه انرژی جنبشی را در چرخ طیار ذخیره کند. همچنین ماشین می‌تواند در حالت ژنراتوری باشد و انرژی جنبشی ذخیره‌شده در محور روتور را به انرژی الکتریکی تبدیل کند و به سیستم برگشت دهد. نیاز به یک مبدل که بتواند این تبدیل وضعیت ماشین را انجام دهد و توان ورودی و خروجی را کنترل کند، کاربرد چرخ طیار را برای سال‌های متمادی در قدرت‌های بالا محدود کرده بود [22]؛ ولی در سال‌های اخیر با پیشرفت الکترونیک قدرت، امکان استفاده مطمئن، باراندمان بالا فراهم شده است.

مزایای چرخ طیار عبارتند از : فرآیند سریع شارژ و دشارژ به دفعات بسیار زیاد، راندمان بالا، چگالی انرژی و توان بالا، قابلیت اندازه‌گیری وضعیت شارژ از طریق سرعت زاویه‌ای، رنج وسیع دمایی عملکرد و استفاده از موادی که برای طبیعت مضر نمی‌باشند. ضمناً هزینه‌ی کل، مانند سایر ذخیره‌سازها مثل باتری و EDLC به صورت خطی با سطح قدرت و انرژی بالا نمی‌رود. مزایای فوق کاربرد چرخ طیار را به عنوان ذخیره‌ساز انرژی در کاربردهای متنوعی همچون حمل و نقل و کیفیت توان مناسب نموده است [23]، [24].

علیرغم مزایای فوق، چرخ طیار معایبی دارد که تاکنون کاربرد آن را در سیستم ریلی محدود کرده است، اولین مورد ریسک بالا از نظر انفجار و از هم پاشیدن در خطاهای فاجعه‌آمیز مانند اضافه بار است. گرچه استفاده از روتورهای کامپوزیتی جدید تقویت شده با فیبر، این خطر را نسبت به روتورهای فلزی بسیار کاهش داده است [25]. مشکل دیگر وزن زیاد چرخ طیار است که برای نصب روی قطار اصلاً مناسب نیست.

۲-۱-۸ ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی ابرسانا (SMES)

اساس کار این ذخیره‌سازها، ذخیره‌ی انرژی الکتریکی در میدان مغناطیسی تولیدشده به وسیله‌ی جریان DC عبوری از داخل یک سیم‌پیچ ابرسانا است. این سیم‌پیچ معمولاً از جنس

نوبیدیوم-تیتانیوم^۱ بوده که توسط سیستم خنک‌کننده در درجه حرارت زیر دمای بحرانی خود نگه‌داشته شده است (مقاومت داخلی آن تقریباً صفر است و جریان می‌تواند بسیار زیاد باشد). وقتی منبع DC جدا شود، انرژی آزاد خواهد شد. برای حفظ حالت ابررسانایی سیم‌پیچ، آن را در داخل هلیوم مایع در یک محفظه‌ی سرمایشی ایزوله شده با خلأ غوطه‌ور می‌سازند. همچون سایر ذخیره‌سازها، ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی ابررسانا نیز نیاز به یک مبدل توان اختصاصی جهت کنترل توان ورودی و خروجی دارد. مزایای اصلی ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی ابررسانا، راندمان ذخیره‌سازی انرژی بالا و سرعت پاسخ بسیار بالای آن است. به‌علاوه آن‌ها قابلیت این را دارند که تقریباً به‌طور کامل دشارژ شوند و تعداد دفعات شارژ و دشارژ آن‌ها بسیار زیاد است [26]. معایب اصلی آن‌ها، هزینه‌ی بالای سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری به دلیل نیاز به سیستم خنک‌کنندگی است؛ همچنین میدان مغناطیسی بسیار قوی خصوصاً در قدرت‌های بالا از معضلات این سیستم است. ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی ابررسانا اغلب برای کاربردهای پایداری شبکه به کار می‌روند [13]. البته ویژگی‌های آن‌ها، پتانسیل استفاده در کاربردهای قطارشهری به‌خصوص به‌عنوان ذخیره‌ساز ساکن را به وجود آورده است.

۲-۲-۲ پست‌های برگشت‌پذیر (دوطرفه)

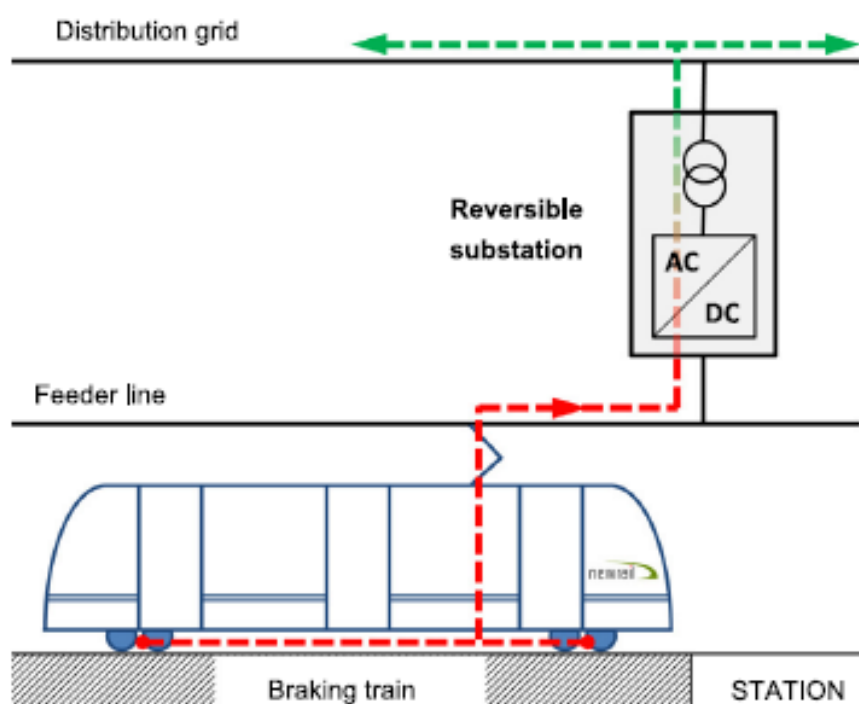
یکی از محدودیت‌های سامانه‌های قطارشهری مجهز به فناوری بازتولید انرژی ترمزی، قابلیت محدود جذب این انرژی است؛ زیرا حتی اگر یک‌سوساز پست‌های تغذیه، از نوع تریستوری کنترل‌شده نیز باشد و امکان جذب انرژی توسط قطارهای مجاور را در بالاترین سطح ممکن فراهم سازد، در زمان‌هایی که قطاری در نزدیکی وجود ندارد و یا ذخیره‌سازها به هر دلیلی قادر به جذب این انرژی نباشند، بخشی از انرژی به‌صورت تلفات در مقاومت‌های دینامیکی تلف خواهد شد. شاید بهترین راهکار برای حل این مشکل، استفاده از پست‌های دوطرفه باشد [20]؛ زیرا وقتی انرژی به شبکه بالادستی انتقال پیدا می‌کند، همیشه امکان جذب آن وجود دارد. به‌عبارت‌دیگر قابلیت بازیابی انرژی حدود ۱۰۰٪ می‌شود. انرژی برگشتی به شبکه می‌تواند برای مقاصدی مانند روشنایی، آسانسورها، سیستم اداری و ... استفاده شود و یا متناسب با قوانین هر کشور به تأمین‌کننده اصلی برق فروخته شود؛ یعنی مشابه یک منبع تولید پراکنده در نظر گرفته شود. معمولاً هدف اصلی این پست‌ها، بیشینه کردن انرژی برگشتی

¹ Nd-Ti

به شبکه AC است که با این کار، ممکن است اولویت هدف تبادل توان بین قطارها از بین برود. البته می‌توان هردو هدف را نیز به‌طور همزمان در نظر گرفت که این کار با طراحی کنترل کننده مناسب امکان‌پذیر است. در این پست‌ها معمولاً بجای استفاده از مبدل‌های دیودی از مبدل‌های اینورتری دوطرفه استفاده می‌شود، تا امکان برگشت انرژی به شبکه بالادستی وجود داشته باشد؛ البته ساختار آن‌ها می‌تواند حالت‌های مختلفی داشته باشد مثلاً در پست‌های موجود با مبدل دیودی، مبدل اینورتری با یک‌سوساز فعلی موازی گردد، یا اینکه یک مبدل ترستوری کنترل‌شده با یک اینورتر IGBT موازی شود که هریک ویژگی‌های خاص خود را دارند و از نظر هزینه متفاوت می‌باشند. ساختار شماتیک نمونه ساخته‌شده این پست در شکل (۴-۲) نشان داده شده است.

به‌طور کلی می‌توان مزایای استفاده از این پست‌ها را به‌صورت زیر برشمرد ([20] و [27] و [28]):

- امکان بازیافت کامل انرژی
- بهبود پارامترهای کیفیت توان، بخصوص شاخص THD و کاهش هارمونیک‌ها در هر دو طرف شبکه AC و DC با توجه به امکان استفاده از فیلترها در ساختار این پست‌ها



شکل (۴-۲) مسیر انرژی در پست تغذیه باقابلیت برگرداندن انرژی به شبکه [20]

- امکان تنظیم ولتاژ خروجی در هر دو حالت موتوری و برگشت انرژی و در نتیجه تلفات کمتر (با توجه به قابل کنترل بودن مبدل‌ها)
 - تلفات کمتر نسبت به استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی (البته اگر جایی درست انجام نشود ممکن است تلفات بیشتر شود)
 - نیاز به فضای کمتر نسبت به سیستم ذخیره‌ساز انرژی
 - محدودیت‌های ایمنی کمتر نسبت به سیستم ذخیره‌ساز انرژی
 - فراهم بودن امکان نصب و تعمیر همزمان با کار قطار
- بعضی از معایب استفاده از این پست‌ها عبارتند از [28]:
- درجهایی که نیاز به حرکت قطار بدون شبکه تغذیه است، مفید نمی‌باشند.
 - به‌عنوان پایدارساز ولتاژ و کاهش‌دهنده حداکثر توان لحظه‌ای مناسب نمی‌باشند.
 - هزینه سرمایه‌گذاری معمولاً بالا است.
 - ممکن است با قوانین خرید و فروش برق در یک کشور متناسب نباشد و یا امکان فروش برق وجود نداشته باشد.
 - برای کاهش زمان بازگشت سرمایه باید انرژی مبادله شده بین قطارها کاهش یابد و بیشتر به شبکه انرژی فروخته شود که این موضوع نیاز به مطالعات دقیق اقتصادی دارد و همچنین به قوانین کشورها و قیمت برق بستگی دارد.

۲-۲-۳ تنظیم جدول زمانی حرکت قطارها

با برنامه‌ریزی مناسب حرکت قطارها، می‌توان شرایطی فراهم آورد که در هنگام ترمز یک قطار، قطار دیگری در نزدیکی آن در حال شتاب‌گیری باشد. به این ترتیب امکان تبادل انرژی بین قطارها یا به عبارت دیگر قابلیت جذب شبکه برای انرژی بازتولیدی ترمزی افزایش می‌یابد. هر چه میزان همزمانی فرایند شتاب و ترمز بیشتر باشد، صرفه‌جویی انرژی بیشتر خواهد بود.

اگر نسبت کل انرژی برگشتی به خط به کل انرژی (جنبشی و پتانسیل) قابل بازتولید در فرایند ترمز گیری، قدرت پذیرش شبکه^۱ تعریف شود، با یک برنامه‌ریزی صحیح در مورد زمان حرکت و توقف

¹ Receptivity

قطار می‌توان قدرت پذیرش شبکه را بالا برد [29]. علاوه بر این، با بهینه‌سازی جدول زمانی حرکت قطارها می‌توان از شتاب‌گیری همزمان چند قطار نیز جلوگیری کرد و در نتیجه علاوه بر کاهش حداکثر توان لحظه‌ای، در هزینه‌های سرمایه‌گذاری نیز صرفه‌جویی کرد. پارامترهای مؤثر در این راستا، فاصله‌ی زمانی بین حرکت قطارها، زمان سفر و زمان توقف (که شامل زمان سوار و پیاده شدن مسافری می‌شود) هستند؛ که با تنظیم مناسب آن‌ها می‌توان صرفه‌جویی قابل‌توجهی در مصرف انرژی داشت [30]. به‌طور کلی می‌توان گفت مسئله‌ی جدول زمانی شامل پیدا کردن زمان‌های ورود کلیه قطارها به همه‌ی ایستگاه‌ها و خروج آن‌هاست.

۳-۲ تکنیک‌های راهبری اقتصادی

هدف از این تکنیک‌ها، عملکرد قطار با بیشترین بازده ممکن است؛ ضمن اینکه ایمنی و دقت (وقت‌شناسی) حفظ گردد. راهبری اقتصادی می‌تواند در کنار کاهش مصرف انرژی، آسایش مسافران را از طریق رانندگی نرم‌تر بهبود بخشد و فرسایش قسمت‌های متحرک را نیز کاهش دهد. بهینه‌سازی مشخصه سرعت برحسب مکان قطار (پروفایل سرعت)^۱، خلاص کردن (سرخوردن)^۲ و استفاده از شیب مسیر، اصلی‌ترین کارها در راهبری اقتصادی می‌باشند [31].

با توجه به اینکه عامل اصلی مصرف انرژی در قطار، سیستم کششی است و مقدار نیروی موردنیاز جهت حرکت قطار نیز رابطه مستقیم با سرعت آن دارد، انتخاب پروفایل مناسب برای سرعت حرکت قطار در طول مسیر بین ایستگاه‌ها، می‌تواند تعیین‌کننده مقدار انرژی مصرفی باشد. انتخاب سرعت و شتاب مناسب، هم در کنترل قطارهای معمولی و هم در بهره‌برداری خودکار قطار^۳ (ATO) حائز اهمیت است. در ادامه ضمن تعریف پروفایل سرعت و معرفی عوامل مؤثر در آن، نحوه بهینه‌سازی و تأثیر آن بر مصرف انرژی توضیح داده شده است.

¹ Speed Profile

² Coasting

³ Automatic Train Operation (ATO)

۲-۳-۱ پروفایل سرعت قطار

سرعت قطار از لحظه حرکت از یک ایستگاه تا زمان توقف در ایستگاه بعدی، می‌تواند مقادیر مختلفی داشته باشد که منحنی سرعت برحسب مکان (زمان) را پروفایل سرعت می‌نامند. شکل (۲-۵) یک نمونه کلی از پروفایل سرعت برحسب موقعیت قطار را نشان می‌دهد. در این شکل، A ناحیه موتوری (شتاب‌گیری اولیه)، C1 و C2 ناحیه‌های خلاصی، RM1 و RM2 ناحیه‌های شتاب‌گیری مجدد، CR ناحیه سرعت ثابت و D1 و D2 ناحیه‌های ترمز گیری می‌باشند.

۲-۳-۱-۱ معادلات حرکت قطار

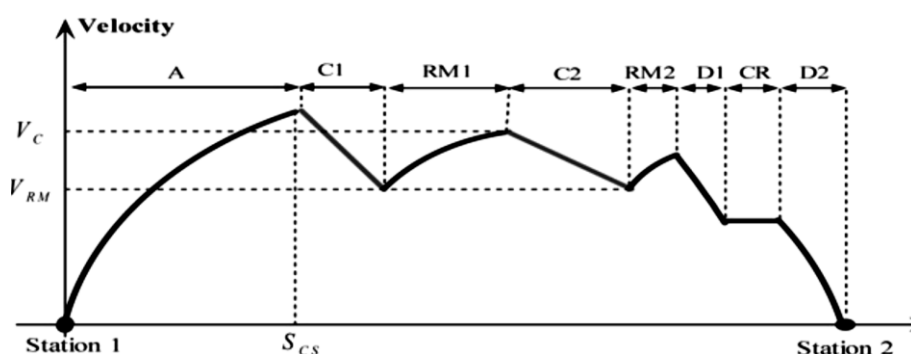
شبیه‌سازی حرکت قطار بر اساس معادله مکانیکی حرکت مدل می‌شود [32]. معادله حرکت قطار بر اساس معادلات فیزیکی و قانون دوم نیوتن استوار است که به‌طور کلی می‌توان آن را به‌صورت رابطه (۲-۱) بیان کرد.

$$M \frac{dv}{dt} = F_T(v) - R_T(v) \quad (2-1)$$

که M جرم کل قطار شامل قسمت‌های گردان و مسافران است، v سرعت قطار و F_T نیروی کششی (ترمزی) قطار و R_T مقاومت کل قطار است که

$$R_T(v) = R(v) + R_c(x) + R_i \quad (2-2)$$

$$R(v) = A + Bv + Cv^2 \quad (2-3)$$



شکل (۲-۵) پروفایل سرعت نمونه برای مسیر بین دو ایستگاه [75]

$$R_c = \begin{cases} \frac{650}{(r_c - 55)} & r_c > 400 \text{ m} \\ \frac{750}{r_c} & 150 \text{ m} \leq r_c \leq 400 \text{ m} \\ 5 & r_c < 150 \text{ m} \end{cases} \quad (۴-۲)$$

$$R_i = M \cdot g \cdot \tan \theta = M g i \quad (۵-۲)$$

$R(v)$ و $R_c(v)$ و $R_i(v)$ به ترتیب مقاومت‌های قطار، انحنا و شیب مسیر هستند. A و B و C ضرایب ثابت و r_c شعاع انحنا، θ زاویه ریل با محور افق و i شیب مسیر می‌باشند. روابط مقاومت قطار و انحنای مسیر معمولاً به صورت تجربی به دست می‌آیند. جزئیات کامل روابط فوق در [33] آمده و از ذکر آن‌ها در اینجا خودداری شده است.

با توجه به برآیند نیروهای فوق، سه حالت کاری برای حرکت قطار تعیین می‌شود که عبارتند از: الف- حالت موتوری ب- حالت خلاصی ج- حالت ترمزی. اگر از دیدگاه شتاب (dv/dt) رابطه (۱-۲) را در نظر بگیریم، در حالت $dv/dt > 0$ قطار در حالت شتاب‌گیری است و اگر $dv/dt < 0$ در حالت شتاب منفی (ترمزی) و در حالت $dv/dt = 0$ سرعت ثابت^۱ است که رژیم‌های کاری قطار نامیده می‌شوند. در حالت خلاصی، معمولاً موتورهای خاموش و نیروی اعمالی از طرف سیستم الکتریکی به چرخ‌ها صفر است؛ درحالی‌که شتاب قطار می‌تواند به شیب مسیر بستگی داشته باشد. اگر شیب مسیر منفی باشد، سرعت قطار خلاص شده، زیاد خواهد شد و اگر شیب مثبت باشد، سرعت قطار کم خواهد شد (رژیم شتاب منفی). تفاوت بین این مفاهیم، باید در تحلیل شرایط کاری مدنظر قرار گیرد [34].

مهم‌ترین عامل در تعیین پروفایل سرعت، محدودیت‌های مربوط به حداکثر سرعت می‌باشند؛ که خود به پارامترهای مختلفی نظیر ساختار قطار، انحنا و شیب مسیر، تحمل مکانیکی ریل، سوئیچ‌های موجود در مسیر، آب‌وهوا، علائم توقف و محدودیت‌های موقتی بستگی دارند که قطار باید تمام آن‌ها را برآورده کند؛ بنابراین در هر بخش از مسیر، یک سرعت ماکزیمم (V_{max}) تعریف می‌شود که حداکثر سرعت عملی قطار باید از این مقدار کمتر باشد.

با توجه به موارد فوق، الگوریتم تولید پروفایل سرعت را می‌توان به صورت یک مسئله بهینه‌سازی مدل کرد؛ برای این کار معمولاً دو الگوریتم در نظر گرفته می‌شود که باید معادلات حرکت و محدودیت‌ها

¹ Cruising

را برآورده کنند. یکی الگوریتم پروفایل سرعت مبتنی بر کوتاه‌ترین زمان سفر^۱، که هدف، انجام سفر در کوتاه‌ترین زمان ممکن است. این بهینه‌سازی منجر به کنترل بنگ- بنگ^۲ می‌شود. بدین ترتیب که قطار با حداکثر نیروی کشش شتاب بگیرد و با حداکثر سرعت حرکت کند و به محض نزدیک شدن به محدودیت سرعت یا ایستگاه، با حداکثر شتاب منفی ترمز کند [35]. این الگوریتم دارای معایب زیادی از قبیل اتلاف انرژی بالا و بازده کم، فرسایش بیش از حد چرخ‌ها و خرابی زیاد سیستم ترمز و قطار، فشار بیش از حد به راهبر، نارضایتی مسافری به دلیل وجود تغییرات شدید شتاب در هنگام تغییرات متناوب سرعت‌گیری و شتاب‌گیری است و بیشتر جنبه تئوری داشته و جهت محاسبه حداقل زمان سفر ممکن، به کار می‌رود و ممکن است فقط در شرایط خاص مانند تأخیرهای به وجود آمده در طی مسیر استفاده شود. الگوریتم دیگر پروفایل سرعت مبتنی بر زمان سفر بهینه است. تابع هدف در این الگوریتم دارای دو بخش است به‌طوری‌که همزمان، مدت زمان سفر و مقدار انرژی مصرفی حداقل شوند. انتخاب شکل تابع هدف مبنای تفاوت روش‌های مختلف بهینه‌سازی در این الگوریتم است.

۲-۴ کاهش تلفات در سیستم تغذیه و کشش

تلفات انرژی در شبکه توزیع را می‌توان با انتخاب ولتاژ نامی بالاتر سیستم (افزایش ولتاژ، کاهش جریان و تلفات را به دنبال دارد)، کاهش داد؛ گرچه هزینه سرمایه‌گذاری سیستم بالاتر است. روش دیگر، استفاده از هادی‌های با مقاومت الکتریکی کم، در خطوط تغذیه است؛ درحالی‌که روش افزایش تعداد ریل سوم (موازی کردن ریل‌ها) که در متروی زیرزمینی لندن نیز استفاده شده، هزینه‌ی بالایی دارد. تعویض ریل‌های فولادی با ریل‌های آلایاژ آلومینیومی می‌تواند مقاومت را حدود ۵۰٪ کاهش دهد [1]. کابل‌های ابرسانا نیز می‌توانند جایگزین خطوط معمولی شوند که هنوز موضوع در مرحله‌ی تحقیقات است. استفاده از تجهیزات باراندا با بالاتر از قبیل اینورترهای جدید و ماشین‌های سنکرون با آهنربای دائم^۳ (PMSM) که راندا حدود ۹۷٪ دارند و در ضمن نیاز به تعمیر و نگهداری کمتری دارند، نیز مناسب است [1]. البته نیاز به اینورترهای خاص، هزینه‌ها را افزایش می‌دهد. مدیریت بهینه‌ی تجهیزات کششی متناسب با شرایط کاری نیز می‌تواند ۱ تا ۵ درصد کاهش مصرف را به دنبال داشته

¹ Flat-out case

² Bang- Bang Control

³ Permanent Magnet Synchronous Machines

باشد؛ مثلاً خاموش کردن موتور بعضی از واگن‌های سیستم کششی، بجای کار کردن همه‌ی آن‌ها با بخشی از قدرت، که این تدابیر دارای هزینه نسبتاً پایین هستند. روش دیگر، کاهش وزن قطار است که نسبت درصد صرفه‌جویی، به درصد کاهش وزن قطار، حدود ۰,۶ تا ۰,۸ تخمین زده می‌شود؛ گرچه این کار باعث کاهش انرژی بازتولیدی ترمزی می‌شود. وزن کمتر با خرابی کمتر ریل‌ها و چرخ‌ها و استهلاک کمتر ترمزها همراه است و هزینه‌ی تعمیرات را نیز کاهش می‌دهد. کاهش طول قطار در زمان‌های غیر اوج مسافر، نیز باعث کاهش وزن و صرفه‌جویی انرژی می‌شود [1].

۲-۵ کاهش مصرف انرژی در سامانه‌های آسایشی

کنترل خودکار سیستم تهویه^۱ (HVAC) و استفاده از هوای تازه تونل و کاهش مدت‌زمان باز بودن درهای قطار و استفاده از پمپ‌های حرارتی در مناطق سردسیر، کنترل هوشمند دور کمپرسورها و خنک کردن محیط تونل با استفاده از تهویه‌ی طبیعی، می‌توانند منجر به کاهش مصرف انرژی شوند. کاهش مصرف HVAC و روشنایی در قطارهای پارک شده نیز می‌تواند منجر به کاهش حدود ۵۰٪ در انرژی مصرفی این قطارها شود [36]. تغییر سیستم روشنایی به لامپ‌های LED نیز می‌تواند علاوه بر کاهش مستقیم مصرف، منجر به کاهش مصرف سیستم تهویه نیز بشود. هرچند پارامترهای فوق از عوامل تأثیرگذار در بهینه‌سازی مصرف می‌باشند [1]، ولی از آنجاکه این بخش سهم نسبتاً کوچکی در کل انرژی مصرفی دارد و تأثیر آن نیز در افزایش بازده کل سیستم خیلی زیاد نیست، تمرکز تحقیقات بر روی این زمینه کمتر بوده است.

¹ Heating, Ventilating, and Air Conditioning

فصل سوم:

بررسی مطالعات انجام شده در

زمینه‌ی کاهش مصرف انرژی

در قطار شهری

۳-۱ مقدمه

در فصل قبل ضمن بیان ضرورت پرداختن به موضوع افزایش بهره‌وری و کاهش مصرف انرژی، روش‌های صرفه‌جویی انرژی در قطار شهری و بخصوص سیستم کششی شرح داده شد. هدف این بخش این است که ضمن مرور راهکارهای مختلف، تحقیقات انجام شده مورد نقد و بررسی قرار گیرند و در انتها ویژگی‌های روش پیشنهادی نیز بیان شود. از میان راهکارهای ذکر شده همان‌طور که قبلاً اشاره گردید، بازتولید انرژی ترمزی و راهبری اقتصادی، نقش بیشتری در کاهش مصرف دارند، بنابراین در این فصل روش‌های مربوط به این حوزه‌ها مدنظر قرار گرفته‌اند. ابتدا انواع ذخیره‌سازهای انرژی و مقایسه عملکرد آن‌ها در حالت ساکن و نصب شده روی قطار، سپس پست‌های دوطرفه و تبادل حداکثر انرژی بین قطارها و در انتها روش‌های راهبری اقتصادی مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهند گرفت.

۳-۲ بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی کاربرد ذخیره‌سازهای انرژی در سامانه‌های قطار شهری

عنصر ذخیره‌ساز انرژی می‌تواند باتری، ابرخازن، چرخ طیار و SMES باشد که ابتدا به مقایسه فنی و اقتصادی آن‌ها پرداخته شده است؛ سپس مطالعات انجام شده مورد نقد و بررسی قرار گرفته‌اند.

۳-۲-۱ مقایسه‌ی فنی و اقتصادی فناوری‌های مختلف ذخیره‌سازی برای قطار شهری

تجهیزات معرفی شده به عنوان ذخیره‌ساز انرژی را می‌توان از نقطه‌نظرهای مختلفی باهم مقایسه کرد. اولین معیار مقایسه را می‌توان تکامل و بلوغ فنی در نظر گرفت. از این لحاظ باتری‌های اسید-سرب با توجه به سابقه‌ی کاربرد حدود ۱۰۰ ساله از همه کامل‌تر و باتری‌های نیکل-کادمیوم و نیکل-متال هیدرید و پایه لیتیوم و پایه سدیم را می‌توان به عنوان فناوری‌هایی در نظر گرفت که سابقه‌ی کاربردی نسبتاً طولانی در بازار دارند. با توجه به پیشرفت‌های قابل توجه تجربی در سال‌های اخیر، چرخ طیارها و ابرخازن‌ها نیز به عنوان فناوری‌های خوش‌نامی شناخته شده‌اند. ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی ابررسانا نیز اگرچه از لحاظ فنی شناخته شده‌اند ولی هنوز از نظر تجاری خیلی کاربردی نیستند. باتری‌های هوا-فلز نیز هنوز تحت مطالعه است و به عنوان فناوری‌های تجاری شناخته نمی‌شوند. کاربردهای تجهیزات ذخیره‌ساز انرژی شامل باتری‌ها، چرخ طیار، ابرخازن‌ها و آرایش‌های ترکیبی آن‌ها در

سیستم‌های قطار شهری در [37] ارائه شده است. ضمن بررسی سیستم‌های کنترلی شارژ و دشارژ، استفاده مؤثر از تجهیزات بر اساس کاربرد آن‌ها دسته‌بندی شده است. مقالات علمی و کاربردهای صنعتی ذکر شده‌اند و بیان شده است که چون اطلاعات دقیقی از تجهیزات نصب شده در دست نیست، فقط سازندگان و مشتریان از مزایا و معایب واقعی تجهیزات و توجیه اقتصادی کاربرد آن‌ها اطلاع دارند. پیشنهاد شده است کاری به صورت مشترک توسط گروه‌های تحقیقاتی بی طرف و سازندگان و بهره‌برداران انجام شود.

هنگام انتخاب یک سیستم به عنوان ذخیره ساز در سیستم حمل و نقل ریلی، چگالی توان و انرژی از پارامترهای تعیین کننده به حساب می‌آیند. اگر ذخیره ساز از نوع نصب شده روی قطار باشد وزن و حجم سیستم نیز از عوامل مهم می‌باشند. جدول (۱-۳) ویژگی‌های اصلی ذخیره سازهای مورد استفاده در قطار شهری را نشان می‌دهد.

همان طور که در جدول دیده می‌شود باتری‌ها بالاترین چگالی انرژی در واحد وزن و حجم را نسبت به سایر ذخیره سازها دارند. در میان باتری‌ها، مدل‌های پایه‌ی لیتیوم چگالی انرژی کمتری نسبت به باتری‌های پایه‌ی سدیم دارند ولی به دلیل فشرده سازی بیشتر چگالی آن‌ها در واحد حجم بیشتر است و برای کاربردهای نصب شده روی قطار مناسب‌اند. در حالی که از نظر چگالی توان، چرخ طیار و EDLC در بالاترین موقعیت قرار دارند، ضمن این که چرخ طیار از نظر چگالی انرژی هم بالاتر است.

جدول (۱-۳) ویژگی‌های اصلی سامانه‌های ذخیره ساز انرژی مورد استفاده در قطار شهری [20]

	Energy and power density			Discharge time	Efficiency (%)	Self-discharge (daily % of rated capacity)	Durability (number of cycles)	Capital cost (\$/kW h)	Capital cost (\$/kW)
	W h/kg	W/kg	kW h/m ³						
lead-acid batteries	20-50	25-300	50-80	Seconds-hours	70-90	0.05-0.3	200-2000	50-400	300-600
Ni-Cd batteries	30-75	50-300	60-150	Seconds-hours	60-80	0.2-0.6	1500-3000	400-2400	500-1500
NiMH batteries	60-80	200-250	100-150	Seconds-hours	65-70	1-2	1500-3000	400-2400	-
Li-ion batteries	75-200	100-350	150-500	Seconds-hours	90-100	0.1-0.3	1000-10,000	500-2500	1200-4000
Li-poly batteries	100-200	150-350	150-200	Seconds-hours	90-100	0.15	600-1500	900-1300	-
NaS batteries	120-240	120-230	110-250	Seconds-hours	75-90	20	2000-3000	300-500	1000-3000
ZEBRA batteries	100-120	150-200	120-180	Seconds-hours	85-90	15	>2500	100-200	150-300
Flywheel	5-100	1000-5000	20-80	Milliseconds-minutes	90-95	100	<10 ⁷	1000-5000	250-350
EDLC	2.5-15	500-5000	10-30	Milliseconds-minutes	90-100	20-40	<10 ⁶	300-2000	100-300
SMES	0.5-5	500-2000	0.2-2.5	Milliseconds-seconds	95-100	10-15	>100,000	1000-10,000	200-300

از نظر زمان تخلیه که در کاربردهایی نظیر پیک سایی و پایداری ولتاژ حائز اهمیت است، چرخ طیار، SMES و ابرخازن‌ها به دلیل داشتن پاسخ سریع از باتری‌ها بسیار مناسب‌ترند. SMES ها به دلیل این که انرژی را به صورت جریان الکتریکی ذخیره می‌کنند بالاترین سرعت تخلیه را دارا می‌باشند که تأثیر به سزایی در هزینه‌های کلی سیستم دارد و باتری‌های لیتیومی و چرخ طیار و ابرخازن‌ها و SMES راندمانی بالاتر از ۹۵٪ دارند و از نظر نرخ تخلیه‌ی خودبه‌خودی باتری‌ها (به جز باتری‌های سدیمی) پایین‌ترین مقادیر را دارند؛ البته با توجه به این که پریود ذخیره‌سازی در قطارشهری در حدود دقیقه است، بالا بودن نرخ تخلیه اهمیت زیادی ندارد و دوام و ماندگاری سیستم ذخیره‌ساز انرژی نیز پارامتری است که در هزینه‌های نهایی مؤثر است. به خصوص در کاربردهای مربوط به قطارشهری که تعداد دفعات شارژ و دشارژ خیلی زیاد است این مسئله اهمیت زیادی دارد. از این نظر باتری‌ها شرایط خوبی ندارند. حتی فناوری‌های جدید باتری‌های لیتیوم-یون عمری در حدود ده هزار بار شارژ و دشارژ دارند در حالی که SMES و ابرخازن و چرخ طیار قادرند حداقل چند صد هزار مرتبه شارژ و دشارژ شوند. در جدول، هزینه‌ی ذخیره‌ساز در واحد انرژی و واحد توان نیز آورده شده است. (البته هزینه‌ی بهره‌برداری، نگهداری و جایگزینی لحاظ نشده و فقط سرمایه‌گذاری اولیه در نظر گرفته شده است.) همان‌طور که دیده می‌شود، باتری‌ها به خصوص نوع اسید-سرب کمترین قیمت در واحد انرژی را دارند ولی وقتی قیمت در واحد توان مدنظر باشد، باتری‌ها خیلی گران‌تر هستند. با توجه به نوع کاربرد قطارشهری شاید مقایسه‌ی هزینه‌ی سرمایه‌گذاری به ازای هر پریود شارژ و دشارژ بهتر باشد و نتیجه‌ی بهتری حاصل گردد. این مقایسه در [38] انجام شده و نشان داده شده که باتری‌ها هزینه‌ی بالاتری برای پریود کاری دارند.

کاربرد ذخیره‌سازهای انرژی از نوع باتری از مدت‌ها پیش در قطارشهری آغاز شده است. اولین بار پست‌های باتری از سال ۱۹۱۲ تا ۱۹۲۷ در قطارشهری ژاپن به صورت موازی با شبکه‌ی تغذیه‌ی اصلی به کار رفته‌اند. علت اصلی کاربرد این باتری‌های در آن زمان ضعف شبکه‌ی اصلی برق و کمبود توان در ساعت‌های اوج بوده است. بنابراین باتری‌هایی با ظرفیت بالا که فضای زیادی را نیز اشغال می‌کردند نصب گردیدند. البته پس از ۱۵ سال با اصلاح شبکه‌ی تغذیه این مجموعه نیز حذف گردید. امروزه شبکه‌های تغذیه معمولاً به اندازه‌ی کافی قوی و پایدار می‌باشند و اهداف دیگری همچون کاهش توان حداکثر، کاهش افت ولتاژ و تلفات و استفاده از حداکثر توان بازتولیدی ترمزی مدنظر است. پست‌های

باتری اسیدی در سال ۱۹۸۰ در ایستگاه ناکاشیما نصب شد و تأثیر آن‌ها بر جلوگیری از کاهش ولتاژ در یک دوره‌ی آزمایشی سه‌ساله تأیید گردید. استفاده از سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی ساکن از نوع باتری لیتیوم - یونی از سال ۲۰۰۷ در قطار هیبریدی شهر Kobe ژاپن انجام شده است [39]. سال ۲۰۱۳ نیز یک نمونه‌ی سیستم ذخیره‌ساز انرژی ساکن باتری لیتیوم - یونی در سئول کره نصب شد و مزایای آن عملاً مورد تأیید قرار گرفته است [40]. البته با توجه به چگالی قدرت و طول عمر کم باتری‌ها معمولاً از آن‌ها به‌عنوان ذخیره‌ساز نصب شده روی قطار کمتر استفاده شده است. ولی همان‌طور که اشاره گردید بیشتر کارهای تحقیقاتی در کشور ژاپن انجام گرفته است.

تحقیقات انجام شده درباره‌ی ابرخازن‌ها را می‌توان به دو گروه عمده تقسیم کرد. گروه اول در رابطه با سامانه‌های کنترلی و مبدل‌ها است و گروه دیگر به کاربرد ابرخازن‌ها و مقایسه‌ی بین سیستم ذخیره‌ساز انرژی‌های ساکن و نصب شده روی قطار از نوع خازنی و غیر خازنی اختصاص یافته‌اند. چون اغلب تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی ذخیره‌سازها مبتنی بر کاربرد ابرخازن‌ها است؛ ابتدا اشاره‌ای به مطالعات مربوط به مبدل‌ها و سامانه‌های کنترلی شده است و بعد از مطالعه سایر ذخیره‌سازها، به کاربرد ابرخازن در ذخیره‌سازها پرداخته شده است.

در [41] مقایسه‌ی فناوری‌های ساخت ابرخازن انجام شده است. در این تحقیق دو نوع ابرخازن مقایسه شده‌اند که تأکید بیشتر روی نوع دولایه‌ی کربن - کربن است. قیمت خازن‌ها در آن زمان ۲-۳ سنت به ازای هر فاراد بوده است (در حال حاضر قیمت خرده‌فروشی حدود ۲ سنت است) که در صورت تکمیل فناوری‌ها انتظار می‌رود که تا ۰/۵ کاهش پیدا کند و یکی از نقاط ضعف اصلی ابرخازن از میان برداشته شود. با قیمت‌های فعلی در ظرفیت‌های کمتر از ۱۰۰Wh خازن‌ها قابل‌رقابت با باتری‌ها می‌باشند (کاربرد در خودروهای الکتریکی). در این تحقیق ضمن معرفی کارخانه‌های سازنده، خصوصیات فنی و قیمت خازن‌ها با یکدیگر مقایسه شده و این تحقیق مرجع مناسبی در این زمینه است.

یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی برای قطار بدون تغذیه‌ی ریل در [42] معرفی شده است که شارژ خازن‌ها در ایستگاه انجام می‌شود. در این تحقیق برای نمایش خصوصیات انرژی از یک توصیف گرافیکی استفاده شده است. هدف از طراحی این سیستم و مدار کنترلی مربوطه این بوده که ظرفیت خازن‌ها طوری انتخاب شوند تا در بدترین حالت امکان رسیدن قطار از یک ایستگاه به ایستگاه بعدی فراهم باشد

که می‌توان کاربردهای مختلفی را برای آن متصور شد. یک نمونه ذخیره‌ساز ابرخازنی قابل نصب بر روی قطار ساخت شرکت Bombardier با نام تجاری MITRAC با قدرت نامی ۱۰۰ کیلووات و انرژی ۱ کیلووات ساعت برای نصب بر روی قطار سبک شهری (LRV)^۱ در شکل (۱-۳) نشان داده شده است [43].

یکی دیگر از تحقیقات در رابطه با مبدل‌ها و کنترل آن‌ها [18] است. در این مقاله یک درایو الکتریکی کنترل شده با قابلیت بازتولید انرژی مورد بحث قرار گرفته که قابلیت هدایت قطار بدون تغذیه‌ی ورودی^۲ را نیز دارا است. یک مبدل کوچک DC/DC دوطرفه‌ی سه سطحی به عنوان مبدل تبادل توان در نظر گرفته شده و تحلیل حالت‌های کاری با جزئیات کامل انجام شده است. الگوریتم کنترلی کنترل ولتاژ خط DC و ولتاژ و جریان خازن، به طور مختصر تحلیل و راهنمای طراحی ابرخازن، ارائه شده است. ویژگی‌های اصلی این تحقیق را می‌توان استفاده از مبدل دوطرفه‌ی سه سطحی دانست که برخلاف درایوهای دیگر که از مبدل‌های پشت‌به‌پشت دوطرفه و ماتریسی استفاده می‌کنند، در صورت وقفه‌ی منبع تغذیه قادر به تأمین بار می‌باشد و در حال کار نیز در زمان شتاب‌گیری مصرف پایینی دارد که از ایجاد اغتشاشات در منابع تغذیه ضعیف جلوگیری می‌کند. به علاوه مبدل سه سطحی نیاز به سلف فیلتر



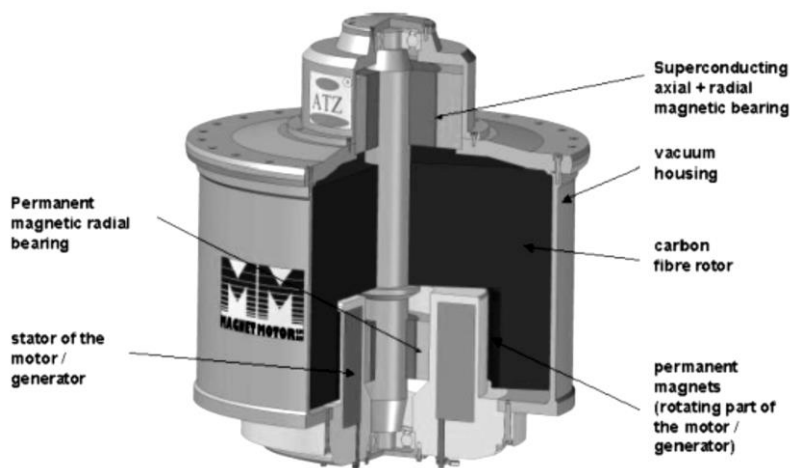
شکل (۱-۳) ذخیره‌ساز ابرخازن نصب شده روی قطار ساخته شده توسط شرکت BOMBARDIER [43]

¹ Light Rail Vehicle

² Drive ride-through capability

کوچک‌تری دارد و ولتاژ نامی سوئیچ‌ها نیز پایین‌تر است که باعث تلفات کمتر شده و نیازی به مقاومت برای متعادل سازی ولتاژ خازن‌ها نیست. علاوه بر این سازگاری الکترومغناطیسی نیز به دلیل اعوجاج کمتر ولتاژ، افزایش می‌یابد.

با توجه به محدودیت‌های ذکر شده برای چرخ طیار کاربردهای محدودی برای آن در رابطه با سامانه‌های ریلی ذکر شده است که از آن جمله می‌توان به نصب یک نمونه در خط ریلی سریع‌السیر در پست Zushi در سال ۱۹۸۸ در کشور ژاپن اشاره کرد؛ که قدرت و انرژی نامی آن به ترتیب 2000 kW و 25 kWh است و ضمن صرفه‌جویی ۱۲٪ در مصرف انرژی هنوز در حال کار است [39]. در سال ۲۰۰۰ یک نمونه به صورت آزمایشی به قدرت 300 kW در متروی زیرزمینی لندن نصب گردید، که تأثیر به سزایی در کاهش افت ولتاژ خط در ساعات اوج مصرف داشت [44]. پروژه‌ی دیگری که با مشارکت موسسه‌ی بزرگ علمی تحقیقاتی و اجرایی در کشور اسپانیا انجام شده است، تحقیق، ساخت، توسعه و آزمایش سیستم ذخیره‌ساز انرژی جنبشی چرخ طیار در دو مرحله بوده است که ابتدا در سال ۲۰۰۳ یک نمونه به قدرت 350 kW و انرژی 200 MJ ساخته شد و نمونه‌ی دوم در سال ۲۰۰۶ آغاز گردید و قابلیت ذخیره‌ی 3.2 MJ و انتقال توان 5.6 MW در زمان ۹.۵ دقیقه را داشت. هدف طراحی هر دو سیستم ذخیره‌ساز انرژی، مسطح سازی مصرف انرژی و استفاده از انرژی بازتولید ترمزی بوده است. مشکل اساسی این سامانه‌ها که در ابتدا قابل پیش‌بینی نبود، مشکل حرارتی و تلفات اصطکاک بوده



شکل (۲-۳) ساختار شماتیک ذخیره‌ساز انرژی از نوع چرخ طیار [45]

است که در نمونه‌ی اول حداکثر توان دائمی قابل دریافت به 150 kW محدود شده است [45]. اجزای یک نمونه ذخیره‌ساز در شکل (۳-۲) نشان داده شده است.

یک نمونه‌ی دیگر چرخ طیار در متروی زیرزمینی لندن نصب شده که سه واحد 100 kW بوده و نتایج عملی نشان‌دهنده‌ی بهبود افت ولتاژ و کاهش پیک جریان کشیده شده از پست است [46]. نمونه‌های دیگری از چرخ طیار نصب شده روی قطار نیز آزمایش شده‌اند که می‌توان به کار انجام شده توسط شرکت آلتوم در شهر روتردام هلند اشاره کرد که ظرفیت سیستم 335 kW و 4 kWh و سرعت آن 2000 rpm است. این مجموعه قادر است قطاری به وزن 40 تن را حدود 2 km با سرعت متوسط 50 km/h بدون نیاز به خط بالاسری هدایت کند و برای مناطق مرکزی شهرهای تاریخی مناسب است [47]. جدیدترین نمونه از این نوع که در پی تفاهم شرکت آلتوم و گروه ویلیامز ساخته شده است چرخ طیار قدرت هیبریدی ویلیامز است که روی قطارهای شرکت آلتوم نصب گردیده است [48].

علیرغم ویژگی‌های ذکر شده برای چرخ طیار، هنوز این سیستم قابلیت اعتماد کافی را ندارد و بخصوص با توجه به مشکلات به وجود آمده (متلاشی شدن بر اثر بروز خطا) در نمونه مورد استفاده در هلند، به‌عنوان ذخیره‌ساز در اولویت قرار ندارد [25]. یک نمونه چرخ طیار همراه با تجهیزات جانبی آن در شکل (۳-۳) نشان داده شده است.



شکل (۳-۳) ساختار ذخیره‌ساز چرخ طیار همراه با تجهیزات جانبی [25]

۲-۲-۲ مطالعات انجام شده در رابطه با سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی ساکن و نصب شده روی قطار

ذخیره‌سازهای ساکن می‌توانند به یکی از دو روش مستقل و یا متصل به پست‌های موجود نصب شوند. نصب مستقل بیشترین قابلیت انعطاف را فراهم می‌کند تا ذخیره‌ساز در بهترین موقعیت ممکن نصب شود و حداکثر ممکن خواسته‌های طراحی را برآورده سازد. در حالت اتصال به پست‌های موجود، ذخیره‌سازها در داخل یا مجاورت پست‌ها قرار می‌گیرند تا حداکثر استفاده از زیرساخت‌های موجود به عمل آید و هزینه تا حد امکان کاهش یابد. این روش نصب با هدف صرفه‌جویی انرژی مناسب است. عملکرد و ساختار ذخیره‌ساز در این حالت به زیرساخت‌های موجود وابسته است [49]. با توجه به این که ضرورت استفاده از ذخیره‌سازها جهت بازیابی انرژی ترمزی تقریباً موضوعی اثبات شده است، مسئله‌ی مهم بعدی تعیین اندازه‌ی مناسب و بهینه‌سازی اندازه‌ی آن‌هاست که در این راستا نیز تحقیقات زیادی انجام شده است. [50] یکی از مطالعاتی است که در این زمینه انجام شده است. در این تحقیق نصب سیستم ذخیره‌ساز انرژی‌های خازنی ساکن در طول یک خط مترو بررسی شده است و تأثیر اندازه‌ی سیستم ذخیره‌ساز و نحوه‌ی توزیع آن‌ها در شرایط مختلف بررسی شده است. برای تعیین ساختار سیستم ذخیره‌ساز انرژی، پارامترهایی مانند ظرفیت انرژی، تغییرات ولتاژ، حداکثر جریان مجاز و تلفات توان در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب انجام شده و یک کنترل کننده پخش توان جهت مدیریت توان عبوری از سیستم ذخیره‌ساز انرژی به صورت تابعی از ولتاژ شبکه و وضعیت شارژ ذخیره‌ساز معرفی شده است. علت استفاده از خازن در ذخیره‌ساز، باوجود چگالی انرژی کمتر نسبت به باتری‌ها، مشخصه‌ی بهینه‌ی توان آن‌ها ذکر شده است، که می‌تواند با پیک‌های توان ترمزی وفق پیدا کند. به علاوه برخلاف باتری‌ها که برای تعیین وضعیت شارژ آن‌ها الگوریتم‌های پیچیده‌ای لازم است، وضعیت شارژ خازن‌ها فقط با اندازه‌گیری ولتاژ آن‌ها امکان پذیر است. ویژگی این تحقیق نسبت به [3] این است که در آنجا تأثیر ظرفیت انرژی مورد مطالعه قرار نگرفته است.

همچنین در [51] مزایای سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی مختلف در هر دو حالت ساکن و نصب شده روی قطار بررسی شده‌اند؛ ولی تعیین محل و اندازه‌ی سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی ساکن بررسی نشده است. یکی از ویژگی‌های این تحقیق، تعیین الگوریتم کنترلی برای ذخیره‌ساز ساکن است. تعیین الگوریتم نسبت به کنترل کننده سیستم نصب شده روی قطار مشکل تر است زیرا پارامترهایی نظیر

فاصله‌ی قطار تا سیستم ذخیره‌ساز انرژی و ولتاژ دو سر سیستم ذخیره‌ساز انرژی نیز تأثیرگذار می‌باشند. برای محاسبه ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز انرژی، انرژی جنبشی و پتانسیل هر دو در نظر گرفته شده‌اند؛ ولی این‌که چرا مقدار ۰,۶۵ مجموع انرژی جنبشی و پتانسیل برای محاسبه‌ی ظرفیت استفاده شده، مشخص نیست. حالت‌های مختلف برای تعداد و ظرفیت ذخیره‌ساز، شبیه‌سازی و نتایج مقایسه شده‌اند و در نهایت نشان داده شده است که صرفه‌جویی انرژی در سناریوهای ترافیک کم، بیشتر است. ضمناً نشان داده شده که با بهینه‌سازی ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز انرژی برای صرفه‌جویی انرژی، ولتاژ خط بهبود چندانی پیدا نمی‌کند و تلفات خط نیز ثابت می‌ماند درحالی‌که در سیستم ذخیره‌ساز انرژی نصب شده روی قطار ولتاژ خط بهبود می‌یابد و تلفات کم می‌شود. یکی از معایب این تحقیق این است که تحلیل هزینه انجام نشده است؛ زیرا ممکن است با زیاد شدن تعداد سیستم ذخیره‌ساز انرژی، صرفه‌جویی بیشتر شده باشد ولی در عوض بازده سرمایه کم شده باشد.

مزایا و محدودیت‌های ذخیره‌ساز ساکن و نصب شده روی قطار در [12] نیز مقایسه شده است. در این تحقیق که در ادامه تحقیق قبلی است، قطار همراه با ابرخازن شبیه‌سازی شده است. با استفاده از شبیه‌سازی، حالت‌های مختلف سیستم ذخیره‌ساز انرژی برای خط دوی متروی بروکسل بررسی شده است و نشان داده شده که کاهش مصرف انرژی حاصل توسط سیستم ذخیره‌ساز انرژی ساکن، تابعی از شرایط ترافیکی، اندازه‌ی سیستم ذخیره‌ساز انرژی و نحوه‌ی توزیع آن‌ها در طول خط است. در نهایت با استفاده از نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده است که گرچه صرفه‌جویی حاصل شده در سیستم ذخیره‌ساز انرژی نصب شده روی قطار بیشتر است، ولی مقدار خازن موردنیاز در سیستم ذخیره‌ساز انرژی ساکن کمتر است. البته مزایایی هم چون پیک سایه توان، کاهش افت ولتاژ و کاهش تلفات خط از خصوصیات ویژه‌ی ذخیره‌ساز نصب شده روی قطار است. البته باید توجه داشت که مبنای بهینه‌سازی جهت انتخاب اندازه‌ی سیستم ذخیره‌ساز انرژی منطقی به نظر نمی‌رسد و نتایج داده شده ممکن است بهترین پاسخ‌ها نباشد.

در [52] ذخیره‌سازهای ساکن و نصب شده روی قطار مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و نشان داده شده است که، گرچه انرژی بازتولیدی در حالت نصب شده روی قطار بیشتر است، ولی صرفه‌جویی انرژی نسبت به نوع ساکن کمتر است. برای عنصر ذخیره‌ساز هم دو حالت ابرخازن و باتری‌های لیتیومی توان

بالا مقایسه شده‌اند. ضرورت استفاده از مبدل DC/DC در ذخیره‌سازهای ابرخازنی نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در نهایت با انجام تحلیل هزینه فایده^۱، نشان داده شده است که استفاده از ذخیره‌سازهای متحرک برای قطارهای موجود توجیه اقتصادی ندارد و زمان بازگشت سرمایه برای ابرخازن‌ها تقریباً دو برابر باتری است. در [53] یک فرایند بهینه‌سازی برای انتخاب مشخصات سیستم ذخیره‌ساز انرژی در مرحله‌ی طراحی ارائه شده است. اهدافی که برای تعیین پارامترهای بهینه مدنظر قرار گرفته‌اند عبارتند از میزان صرفه‌جویی انرژی، حداقل کردن جریان پست و کاهش افت ولتاژ در خط DC. سیستم ذخیره‌ساز انرژی موردنظر ساکن از نوع خازنی با مبدل DC/DC در نظر گرفته شده و برای بهینه‌سازی از برنامه‌ریزی غیرخطی استفاده شده است و به کمک آن مراجع بهینه برای کنترل سیستم ذخیره‌ساز انرژی محاسبه شده‌اند. برای تعیین ولتاژ مبنای سیستم ذخیره‌ساز انرژی از روش کنترلی حالت لغزشی استفاده شده که با توجه به مقاوم بودن ذاتی در برابر اغتشاشات عملکرد بهینه تضمین می‌شود. البته مدل مداری استفاده شده خیلی کوچک است و بجای مدل کردن یک سیستم ریلی واقعی، فقط یک منبع، یک ذخیره‌ساز و یک قطار در نظر گرفته شده است.

در [54] یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی خازنی ساکن مورد مطالعه قرار گرفته که توسط یک مبدل DC/DC دوطرفه کنترل می‌شود. پارامترهای اصلی سیستم ذخیره‌ساز انرژی با استفاده از روش بهینه‌سازی محاسبه شده‌اند. شبیه‌سازی برای خطوط قطار شهری در جنوب ایتالیا انجام شده تا قابلیت روش ارائه شده به صورت عملی برای محاسبه‌ی خازن‌ها نشان داده شود. برای حل معادلات از جعبه‌ابزار بهینه‌سازی در نرم‌افزار متلب استفاده شده است و نشان داده شده که محل نصب خازن‌ها روی افت ولتاژ تأثیر دارد و بهترین محل جایی است که قبلاً بیشترین افت ولتاژ را داشته است. البته در این تحقیق فقط هدف بهینه‌سازی ولتاژ بوده و اهداف دیگری لحاظ نگردیده‌اند که ممکن است بهینه نباشد. در [55] برای پیدا کردن محل بهینه‌ی سیستم ذخیره‌ساز انرژی ساکن خازنی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده و هدف حداقل کردن انرژی جذب شده از منبع بوده است. از شبکه‌های عصبی جهت مدل‌سازی رفتار سیستم استفاده شده است. برای مدیریت انرژی در سیستم ذخیره‌ساز انرژی نصب شده روی قطار از روشی مبتنی بر فرکانس استفاده شده که برای همه‌ی عناصر ذخیره‌ساز از جمله چرخ طیار، خازن و

¹ Cost-benefit analysis

باتری قابل استفاده است و نشان داده شده که روش موردنظر تأثیر قابل توجهی در کاهش مصرف انرژی، بهبود پروفایل ولتاژ DC و کاهش حداکثر جریان پست‌ها و تلفات شبکه دارد. البته باید توجه داشت که فرضیات ساده‌سازی مسئله خیلی زیاد هستند؛ ضمن این که مقادیر انتخاب شده مثل ظرفیت $3000F$ برای ابرخازن غیرمعمول به نظر می‌رسد و در شبیه‌سازی نیز فقط یک قطار منظور شده است.

در [56] با استفاده از داده‌های واقعی، شبکه‌ی تغذیه و قطارهای متروی تهران مدل شده‌اند. این داده‌ها شامل پروفایل سرعت، زمان‌های سفر و مشخصات فنی قطارهاست. با مدل‌سازی قطار و سیستم ذخیره‌ساز انرژی به‌عنوان منبع جریان، شبیه‌سازی انجام شده است. برای محاسبه‌ی اندازه‌ی مناسب سیستم ذخیره‌ساز انرژی در هر ایستگاه از یک روش ساده استفاده شده است؛ به این ترتیب که فرض شده یک سوساز دوطرفه باشد، میزان انرژی منفی در طول هر پریود زمانی فاصله زمانی حرکت قطارها به صورت لحظه‌ای محاسبه شده و بیشترین مقدار برای هر ایستگاه به عنوان انرژی در دسترس فرض شده است. میزان انرژی قابل صرفه‌جویی در دو حالت اوج و غیر اوج حساب شده و با استفاده از رابطه‌ی ساده‌ی انرژی جنبشی، مقدار خازن‌ها محاسبه شده است. یکی از ایرادهای این تحقیق این است که فرض شده در هر ایستگاه مسافری یک پست وجود دارد؛ در حالی که عملاً این گونه نیست. ضمن اینکه وقتی در یک پست بازتولید حداکثر است، ممکن است در سایر پست‌ها توان برگشتی حداکثر نباشد؛ در حالی که این روش برای تمام پست‌ها مقدار حداکثر به عنوان انرژی در دسترس در نظر گرفته شده است. ادامه‌ی تحقیق قبل در [57] آمده است که در آن ارزیابی اقتصادی نیز انجام شده و با توجه به این که سیستم اغلب در حالت غیر پیک کار می‌کند مقادیر خازن‌های برای این زمان‌ها محاسبه شده است و محاسبات اقتصادی با استفاده از روابط پارامتری برای قیمت خازن، مبدل و انرژی بیان شده و در نهایت زمان برگشت سرمایه ده ماه برآورده شده که منطقی به نظر نمی‌رسد.

در [58] روش تعیین ساختار یک ذخیره‌ساز نصب شده روی قطار بررسی شده است. در ابتدا روش ساختاری بر اساس تطبیق ظرفیت انجام شده و نشان داده که در این روش فقط بخشی از انرژی ترمزی جذب و باقی تلف می‌شود. بنابراین در این تحقیق برای جذب حداکثر انرژی ترمزی قیدهایی ظرفیت و توان به‌طور همزمان در نظر گرفته شده‌اند و یک مدل ریاضی ارائه شده است. به‌وسیله‌ی شبیه‌سازی نشان داده شده است که روش فوق می‌تواند تمام انرژی ترمزی را دریافت کند و نسبت

صرفه‌جویی انرژی به وزن ذخیره‌ساز بالا است. برای یک سیستم واقعی، با روش معمولی، مقدار خازن‌ها محاسبه شده ولی چون جذب این توان باعث عبور جریانی بیش از مقدار نامی از خازن‌ها می‌شود امکان جذب تمام انرژی وجود نداشته؛ سپس با در نظر گرفتن حداکثر توان خازن‌ها اعمال محدودیت‌های شارژ و دشارژ مقادیر خازن‌ها محاسبه شده است. البته محاسبه‌ی این قسمت نیاز به پیدا کردن مقدار ضریبی به نام α دارد که تا حدودی احتمال غیر بهینه شدن جواب نهایی را افزایش می‌دهد.

محاسبه ظرفیت خازن‌ها در سامانه‌های ذخیره‌ساز ساکن در [59] انجام شده است. یک شبیه‌سازی کامل در نرم‌افزار PSCAD انجام شده و چهار بلوک جداگانه برای پست کششی^۱، قطار، پست خازنی و مبدل در نظر گرفته شده و محاسبات کامل برای تعیین پارامترهای مبدل و ظرفیت خازن‌ها انجام شده است. مدل استفاده شده برای خازن فقط شامل مقاومت سری و خازن است و از شاخه موازی به دلیل زمان کوتاه شارژ و دشارژ (حدود ۵ تا ۱۰ دقیقه) صرف‌نظر شده است. سیستم کنترلی جهت کنترل مبدل با استفاده از تئوری کنترل چند متغیره غیرمتمرکز، ولتاژ واقعی خط DC را با ولتاژ مبنای پست مقایسه می‌کند تا وضعیت افزایش یا کاهش بودن تعیین شود و همزمان جریان بانک خازنی نیز کنترل شود. تأثیر فاصله ذخیره‌ساز بر پایداری ولتاژ بررسی شده و نشان داده شده که اگر فاصله خازن از پست اصلی از حدی بیشتر شود، می‌تواند بر نوسانات ولتاژ تأثیر زیادی داشته باشد. یکی از نکات مهم در این تحقیق اختلاف بین حداکثر تئوری و عملی شارژ خازن است که دلیل آن جلوگیری مبدل از اضافه جریان خازن‌ها اعلام شده است که باید در آرایش آن‌ها تجدیدنظر به عمل آید (تعداد شاخه‌های موازی افزایش یابد). در نهایت با کمک نتایج عملی اندازه‌گیری در متروی شهر مدلین کلمبیا نشان داده شده که سیستم ذخیره‌ساز ساکن پیک مصرف را کاهش می‌دهد ولی محاسبات خازن‌ها بهینه نیست.

در [60] یک روش کنترلی برای خازن‌های نصب شده روی قطار ارائه شده است و هدف اصلی آن بهینه‌سازی صرفه‌جویی انرژی و کاهش مصرف است. در این راستا از بازخورد سرعت و گشتاور واقعی قطار جهت تعیین ولتاژ و جریان مرجع برای کنترل مبدل استفاده شده است و یکی از مزایای مهم که برای آن ذکر شده است این است که نیازی به داشتن پروفایل سرعت از پیش تعیین شده، ندارد. ولتاژ

¹ Traction Substation

مرجع سیستم ذخیره‌ساز انرژی بر اساس مقایسه انرژی جنبشی و انرژی ذخیره‌شده در میدان الکتریکی ابرخازن تعیین‌شده و جریان مرجع نیز به کمک گشتاور و سرعت واقعی قطار تعیین‌شده است و محاسبات خازن انجام‌شده است و نتایج عملی روی یک سیستم آزمایشگاهی نشان داده شده است. در [4] علاوه بر مطالعات فوق، تحلیلی اقتصادی انجام‌شده و علاوه بر ارائه نتایج کنترلی برای ابرخازن، زمان بازگشت سرمایه ۳ تا ۴ سال برآورد شده است. البته نتایج عملی میدانی وجود ندارد و تحلیل فقط بر پایه شبیه‌سازی و سیستم آزمایشگاهی است و ممکن است برآورد اقتصادی دقیق نباشد.

در [8] بهینه‌سازی اندازه و مکان سیستم ذخیره‌ساز انرژی انجام‌شده است. البته فرض‌های ساده کننده‌ای مانند وجود یک پست تغذیه در یک سر خط برای محاسبات مدار معادل الکتریکی شبکه در نظر گرفته شده است و با استفاده از روش لاگرانژین، بهینه‌سازی ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز انرژی انجام‌شده سپس با تغییر مکان آن، نتایج مقایسه گردیده و بهترین جواب انتخاب شده است. از نقاط ضعف این تحقیق، عدم بررسی تأثیر فاصله زمانی حرکت قطارها در تابع هدف بهینه‌سازی است. البته در تابع هدف پارامترهای حداقل سازی جریان پست، حداقل سازی ابعاد سیستم ذخیره‌ساز انرژی و پروفایل ولتاژ خط DC در نظر گرفته شده‌اند. در [61] روش طراحی مناسب اندازه و محل یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی ساکن ارائه شده است و به کمک شبیه‌سازی، با قرار دادن سیستم ذخیره‌ساز انرژی در مکان‌های مختلف میزان صرفه‌جویی انرژی مقایسه شده است. یکی از مزایای این تحقیق نسبت به مطالعات قبل از آن تعیین محلی برای سیستم ذخیره‌ساز انرژی غیر از ایستگاه‌ها است. ضمن اینکه پارامترهای مربوط به توپولوژی مسیر و مشخصات شبکه و قطار نیز به‌طور کامل در نظر گرفته شده‌اند و نشان داده شده که فرایند ترکیبی تعیین اندازه و محل سیستم ذخیره‌ساز انرژی علاوه بر صرفه‌جویی انرژی، دامنه جریان تحویلی از پست را نیز کاهش می‌دهد و پروفایل ولتاژ نیز بهبود پیدا می‌کند و می‌توان قدرت مبدل‌های الکترونیک قدرت را نیز کمتر انتخاب کرد. از نقایص آن می‌توان به بررسی شبکه با یک قطار و عدم بررسی تأثیر قطارها بر نتایج و همچنین روش سعی و خطا اشاره کرد که تضمینی برای بهینه بودن پاسخ‌ها وجود ندارد.

در [62] یک استراتژی کنترلی برای مدیریت انرژی در یک سیستم قطارشهری با سیستم ذخیره‌ساز انرژی خازنی ارائه‌شده و ضمن معرفی مدلی برای سیستم ذخیره‌ساز انرژی، استراتژی کنترل

توصیف شده است و روش جدیدی برای تخمین مقدار مورد نیاز سیستم ذخیره ساز انرژی با استفاده از پیش بینی مقدار لحظه ای انرژی باز تولیدی تحویلی به هر پست ارائه شده است. شبیه سازی در محیط نرم افزار متلب انجام شده و با ساخت یک نمونه 3kW عملکرد استراتژی کنترلی نشان داده شده است و در ضمن مدل کامل با جزئیات بیشتری نسبت به شبیه سازی های قبلی در نظر گرفته شده و از ویژگی های آن این است که استراتژی کنترلی و مدل ارائه شده دینامیکی و زمان واقعی می باشد.

در زمینه ی بهینه سازی طراحی، تحقیقات زیادی با استفاده از روش های تحلیلی و ابتکاری انجام شده است و نکته ای که در یکی از تحقیقات اخیر بیشتر به آن پرداخته شده است؛ این است که باید به موضوع طراحی سیستم ذخیره ساز انرژی به عنوان یک تابع دارای چند هدف به طور همزمان نگاه کرد و فقط بر روی یک هدف متمرکز نگردید [63]. موضوعی که مؤلفین در گزارش خود به عنوان هدف اول انتخاب کرده اند جبران افت ولتاژ لحظه ای بوده است. سپس اهداف همزمان مانند کاهش حداکثر توان پیک را با تغییر در پارامترهای طراحی دنبال کرده اند، و یا این که ابتدا اوج توان را کاهش داده و سپس تحلیل اقتصادی را اضافه کرده اند. در نهایت این گزارش تحقیقاتی راهنمای جامعی برای شبیه سازی های دقیق و آزمایش های عملی برای حصول به بهترین نتیجه در طراحی سیستم ذخیره ساز انرژی ساکن ارائه کرده است. ضمن این که این موضوع نیز در نظر گرفته شده است که هر سامانه ای ویژگی های خاص خود را داراست و راهنمای طراحی نمی تواند همواره یک راه حل را برای تمام سامانه ها پیشنهاد نماید.

در [64] یک تابع هدف چند متغیره برای طراحی یک سیستم ذخیره ساز انرژی ساکن خازنی معرفی شده است که اهداف اصلی آن، بهبود راندمان انرژی و پروفایل ولتاژ قطار است. برای اثبات قابلیت ذاتی این روش در بهبود همزمان چند پارامتر، شبیه سازی روی یک سیستم مورد مطالعه انجام شده و نتایج عملی برای یک نمونه آزمایشگاهی آورده شده است. تعیین اندازه ذخیره ساز ساکن هیبریدی (باتری- ابرخازن) برای یک قطار سریع السیر با هدف حداقل کردن هزینه کل سرمایه گذاری و هزینه بهره برداری در یک روز کاری با استفاده از نرم افزار GAMS در [65] انجام شده است. نشان داده شده است که هرچه عمق دشارژ¹ (DOD) کمتر باشد، بهتر است و خازن ها فقط وقتی مقرون به صرفه خواهند

¹ Depth of discharge (DOD)

شد که DOD بیش از ۶۰٪ باشد (که هزینه روزانه باتری‌ها به دلیل کاهش عمر آن‌ها، زیاد می‌شود). دلیل قابل استفاده بودن باتری‌ها این است که با توجه به نوع قطار، تعداد دفعات توقف و در نتیجه شارژ و دشارژ در یک روز کم است؛ لذا این نتایج برای قطارشهری قابل استناد نیست. در [66] یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای تعیین محل و ظرفیت ذخیره‌ساز ساکن معرفی شده است. از ویژگی‌های این تحقیق این است که بجای استفاده از توان ماکزیمم، از توان متوسط پستها برای تعیین ساختار ذخیره‌سازها استفاده شده است. هدف بهینه‌سازی، صرفه‌جویی انرژی و بهبود پروفایل ولتاژ بوده است. نشان داده شده است که تغییر هدوی قطارها روی ظرفیت ذخیره‌سازها مؤثر است و هرچه ترافیک بیشتر باشد، به دلیل تبادل انرژی بیشتر بین قطارها، میزان ابرخازن موردنیاز کمتر و در نتیجه میزان صرفه‌جویی هم کمتر است.

در [67] روشی برای کنترل مدیریت انرژی ذخیره‌سازهای ساکن مدل خازن لیتیوم-یونی^۱ (LiC) برای قطارشهری پیشنهاد شده است. ضمن پرداختن به ویژگی مهم LiC ها که چگالی انرژی بالا در حد باتری‌ها و چگالی توان بالا نزدیک به ابرخازن‌ها است، استراتژی کنترلی معرفی شده است که مبتنی بر بازگرداندن حداکثر انرژی ترمزی از قطارهای در حال ترمزاست. نتایج کاربرد استراتژی پیشنهادی بر روی یک شبیه‌ساز الکترومکانیکی بررسی شده است و نشان داده شده است که می‌تواند علاوه بر صرفه‌جویی انرژی، پروفایل ولتاژ پانتوگراف را هم بهبود بخشد. در ادامه تحقیق فوق، در [68] استراتژی کنترلی مبتنی بر مدیریت زمان واقعی سطح ولتاژ در نقطه اتصال به شبکه، با هدف بهبود صرفه‌جویی انرژی و افت ولتاژ در شبکه تغذیه ارائه شده است. بهینه‌سازی ظرفیت و مکان ذخیره‌سازها همراه با بهبود استراتژی مدیریت انرژی در [69] انجام شده است و با مدیریت هماهنگ جریان انرژی در چند ذخیره‌ساز، صرفه‌جویی افزایش داده شده است. تابع هدف، راندمان اقتصادی و درصد جبران افت ولتاژ در نظر گرفته شده است. بهینه‌سازی بطور همزمان با تعیین ضرایب کنترلی شارژ و دشارژ و تعداد بلوک‌های موازی ابرخازن‌ها در پست‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شده است و نشان داده شده که نتایج نسبت به بهینه‌سازی‌های قبلی که ضرایب کنترلی را ثابت فرض می‌کرده‌اند، بهبود یافته است.

¹ Lithium-ion Capacitor

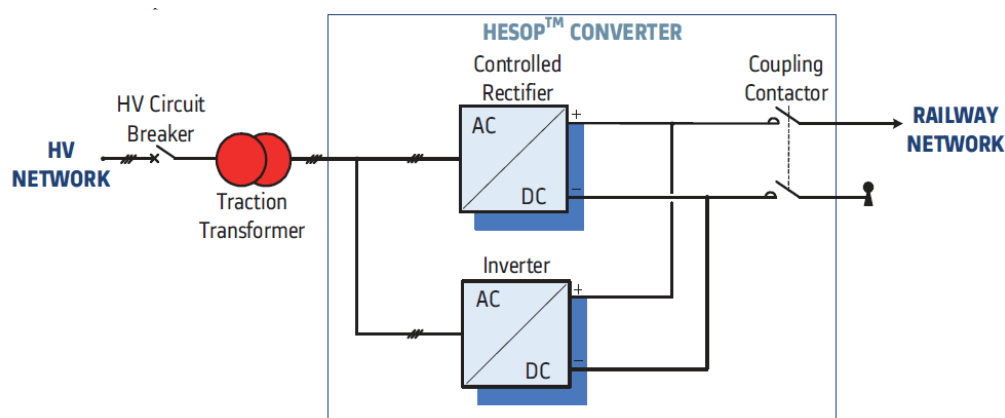
عیب مشترک همه تحقیقات فوق این است که برای تعیین مقدار ذخیره‌سازها از مشخصه سرعت عادی و حتی در بعضی از موارد از مشخصه سرعت با کوتاه‌ترین زمان سفر استفاده شده است، درحالی‌که اگر همزمان با طراحی ذخیره‌سازها، از مشخصه سرعت بهینه هم استفاده شود، می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی در کاهش ظرفیت ذخیره‌ساز موردنیاز داشته باشد و توجیه اقتصادی استفاده از ذخیره‌سازها را افزایش دهد. این موضوع برای اولین بار در این رساله موردتوجه قرار گرفته است.

۳-۳ مرور مطالعات انجام شده در رابطه با پست‌های دوطرفه

تحقیقات تئوری در این زمینه پست‌های دوطرفه، بیشتر در راستای مباحث الکترونیک قدرت است که به‌طور مفصل در حوزه مربوطه انجام شده است ولی در راستای کاربرد در سامانه‌های حمل و نقل ریلی نیز مطالعاتی انجام شده که می‌توان به [70] اشاره کرد که مقایسه‌ای بین یکسوکونده تریستوری و یکسوکونده دیودی انجام شده و نشان داده شده که گرچه قیمت یکسوکونده بیشتر است و فضای بیشتری نیز موردنیاز است ولی به دلیل صرفه‌جویی انرژی بیشتر و تنظیم ولتاژ بهتر و محدودسازی جریان خطا و کاهش تعداد کل پست‌های موردنیاز (به دلیل قابلیت تنظیم ولتاژ) صرفه‌جویی هزینه حدود ۱۰٪ را به دنبال دارد. همچنین نشان داده شده که اگر مبدل تریستوری دوطرفه باشد و قابلیت بازگرداندن انرژی به شبکه را داشته باشد، صرفه‌جویی انرژی چشمگیری پیدا می‌کند که با توجه به پروفایل سرعت، راندمان قطار، مقاومت ریل و ترافیک شبکه ممکن است به ۵۰٪ نیز برسد. با تحلیل اقتصادی، نشان داده شده که زمان بازگشت سرمایه در ارتقای پست‌های دیودی موجود به پست‌های اینورتری دوطرفه، حدود ۲ تا ۲٫۵ سال است؛ البته با توجه به محاسبات تقریبی، نتایج دقیق به نظر نمی‌رسند و نیاز به مطالعات دقیق‌تری است. از اشکالات این تحقیق، شبیه‌سازی یک سیستم ساده جهت بررسی میزان انرژی مصرفی و صرفه‌جویی انرژی و هزینه است که ممکن است نتایج قابل‌تعمیم به شبکه‌های واقعی نباشد.

یکی از پروژه‌های تحقیقاتی در راستای کاهش مصرف انرژی در سامانه‌های حمل و نقل ریلی، RailEnergy است که [20] ارائه‌دهنده بخشی از نتایج حاصل از این پروژه است. هدف این پروژه برگرداندن انرژی اضافه به شبکه AC از طریق پست دوطرفه بوده است. مزایای کلیدی مورد انتظار از

این پروژه، بازتولید حدود ۹۹٪ انرژی ترمزی در تمام زمان‌ها با اولویت تبادل انرژی بین قطارها، حذف مقاومت‌های مکانیکی در قطار و کاهش وزن و تلفات حرارتی مربوطه، تنظیم ولتاژ مبدل و کاهش تلفات و امکان جذب انرژی از قطارهای دورتر، کاهش هارمونیک‌ها و افزایش ضریب قدرت در طرف AC می‌باشند که بدین منظور پس از انجام مطالعات تئوری دو نمونه پست ۷۵۰ ولت دوطرفه توسط شرکت آلتوم تحت عنوان HESOP^۱ ساخته شدند (شکل ۳-۴) و در یک خط تراموای اختصاصی در فرانسه مورد آزمایش قرار گرفتند. ساختار این پست‌ها متشکل از یک یک‌سوساز کنترل‌شده تریستوری موازی شده با یک اینورتر IGBT است. وظیفه تغذیه قطار در حالت موتوری بر عهده یک‌سوساز است و با تنظیم ولتاژ امکان بازیافت انرژی را افزایش می‌دهد ولی انرژی اضافی توسط اینورتر به شبکه برگردانده می‌شود. اینورتر فوق در حالت موتوری می‌تواند به‌عنوان فیلتر اکتیو، هارمونیک‌های تولیدی یک‌سوساز را جبران کند یا ضریب قدرت را بهبود بخشد. ولی یک‌سوساز فقط در حالت موتوری کار می‌کند. از ویژگی‌های مهم این مجموعه، استفاده از یک سیستم کنترلی مشترک است که وضعیت کاری هر مبدل را به‌طور دینامیکی کنترل می‌نماید و تغییر وضعیت حالت کاری بدون هیچ وقفه‌ای انجام می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی افزایش قابلیت بازیابی انرژی تا ۹۹٪ و صرفه‌جویی انرژی حدود ۷٪ را نشان می‌دهد و اکنون این سیستم به‌صورت تجاری آماده‌شده است ولی هیچ نتیجه عملی و تحلیل اقتصادی از کاربرد صنعتی آن ارائه نشده است.



شکل (۳-۴) ساختار پست برگشت‌پذیر نمونه [20]

¹ Harmonic and Energy Saving Optimizer

در [28] مقایسه‌ای بین ذخیره‌سازهای ساکن از نوع باتری، ابرخازن و چرخ طیار با پست‌های برگشت‌پذیر انجام داده و پارامترهای اندازه، هزینه سرمایه‌گذاری، تلفات انرژی و صرفه‌جویی انرژی در خطوط پرتراфик مترو مورد بررسی قرار گرفته است. ضمن بیان اینکه در ترافیک سنگین استفاده از ذخیره‌ساز نصب شده روی قطار به دلیل انرژی ترمزی زیاد، غیرعملی و غیراقتصادی است، با محاسبه هزینه سیستم ذخیره‌ساز انرژی ساکن به قدرت 1 MW (حدود 1 میلیون دلار)، با توجه به اینکه این هزینه حدود 4 تا 10 برابر انواع مختلف پست‌های برگشت‌پذیر است؛ از دیدگاه اقتصادی، تقریباً استفاده از ذخیره‌سازهای ساکن را منتفی دانسته است و زمان برگشت سرمایه برای آن‌ها را حدود 30 سال تعیین کرده است. درحالی‌که با استفاده از پست‌های برگشت‌پذیر متشکل از پل تریستوری موازی با اینورتر IGBT ضمن داشتن بیشترین صرفه‌جویی، ولتاژ DC شبکه و قطار نیز بهبود پیدا می‌کند. درنهایت می‌توان گفت با اینکه اطلاعات دقیق اقتصادی درباره پست‌های دوطرفه موجود نیست ولی اگر مالکیت شبکه AC در اختیار خود شرکت بهره‌بردار قطار شهری باشد، معمولاً اقتصادی‌ترین روش بازتولید انرژی ترمزی، استفاده از پست‌های دوطرفه است [25].

۳-۴ مطالعات انجام شده در رابطه با جدول زمانی

در زمینه‌ی بهبود جدول زمانی مطالعات زیادی انجام شده است. اولین بار در سال 1971 تکنیک‌های بهینه‌سازی جهت حل مسئله‌ی جدول زمانی استفاده شده است [71]. از آن‌پس محققین مدل‌های بهینه‌سازی مختلفی را با توابع مختلفی همچون زمان انتظار مسافری، تقاضای حمل و نقل، مصرف انرژی، زمان تأخیر، قابلیت اعتماد، هزینه بهره‌برداری و مقاوم بودن ارائه کرده‌اند. زمان توقف در ایستگاه‌ها و زمان سفر بین ایستگاه‌ها دو پارامتر اصلی در برنامه‌ریزی سرویس‌دهی قطارها می‌باشند. در [72] با استفاده از برنامه‌ریزی دینامیکی، مجموعه‌ای از زمان‌های سفر و توقف بهینه برای یک ناحیه از خط پیشنهاد داده شده است که سایر قیدهای بهره‌برداری را نیز برآورده می‌سازد. عملکرد و امکان استفاده از کنترل در زمان واقعی به‌وسیله شبیه‌سازی نشان داده شده است. در این تحقیق از انرژی بازتولیدی صرف‌نظر شده است. با توجه به این‌که یک جدول زمانی مؤثر باید منافع شرکت‌های قطار شهری و مسافری را در کنار مسئله مهم کاهش آلودگی هوا در نظر بگیرد، معمولاً موضوع به‌صورت

یک مسئله تصمیم‌گیری با چند تابع هدف مورد بررسی قرار می‌گیرد که در بخش‌های بعدی این رساله به آن پرداخته شده است.

۳-۵ مطالعات انجام شده درباره راهبری اقتصادی و پروفایل سرعت

برای محاسبه نقطه شروع خلاصی^۱ و بهینه‌سازی مشخصه سرعت از روش‌های مختلف جستجو استفاده شده که به‌طور کلی به دو دسته روش‌های کلاسیک (تحلیلی) مانند روش فیبوناچی و روش گرادیان و روش‌های ابتکاری^۲ تقسیم می‌شوند. در روش‌های کلاسیک معمولاً یک مدل ریاضی برای تحلیل مسئله لازم است که حل آن زمان‌بر است ولی دقت بالایی دارند. در حالی که در سال‌های اخیر روش‌های ابتکاری نیز جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده‌اند و مطالعات زیادی پیرامون آن‌ها انجام شده است. این روش‌ها پاسخ خوبی ارائه می‌دهند ولی مانند روش‌های تحلیلی بهترین پاسخ را نمی‌دهند؛ ولی با توجه به کاهش زمان محاسبات بسیار مفید هستند. با توجه به ویژگی کاهش زمان محاسبات کاربرد این روش‌ها در کنترل خودکار قطار نیز رو به افزایش است. الگوریتم ژنتیک و شبکه‌های عصبی مصنوعی از مهم‌ترین روش‌های مورد استفاده در این گروه می‌باشند که مطالعات زیادی با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف نظیر شرایط خط، تحلیل همزمان چند قطار در خط و نرخ مسافر‌گیری، انجام شده است.

در [34] یک نرم‌افزار شبیه‌سازی به نام TrainSim به زبان C^{++} معرفی شده و با نرم‌افزارهای تجاری مقایسه شده است. در این تحقیق ضمن بیان نقش‌های مختلف شبیه‌سازی، معادلات مکانیکی به‌طور کامل توضیح داده شده و پروفایل سرعت برای دو الگوریتم زمان حداقل و زمان بهینه آورده شده است. الگوریتم ژنتیک را برای جست‌وجوی نقاط مناسب برای شروع فرایند خلاص کردن قطار به کار برده است و با استفاده از الگوریتم ژنتیک سلسله مراتبی تعداد نقاط خلاص کردن مورد نیاز را برای شرایط ترافیکی مختلف تعیین می‌کند و تأثیر نقطه‌ی شروع خلاصی بر میزان مصرف انرژی و زمان سفر در [73] بررسی شده است. در [74] روش‌های جست‌وجو برای پیدا کردن نقطه‌ی شروع خلاصی معرفی شده‌اند که عبارتند از روش‌های کلاسیک و عددی و ابتکاری که ضمن مقایسه‌ی خصوصیات هر روش، امکان استفاده از آن‌ها جهت مقاصد زمان واقعی مانند بهره‌برداری خودکار بررسی شده است. در نهایت

¹ Coasting Point

² Heuristic

با استفاده از الگوریتم ژنتیک جدول مراجعه برای تولید نقاط شروع خلاصی و موتوری و ترمزی ایجاد شده است و زمان توقف به حداقل رسانده شده و میزان انرژی مصرفی نیز محاسبه شده است. در [75] ضمن معرفی نرم‌افزار شبیه‌سازی SimuX از الگوریتم ژنتیک برای پیدا کردن نقاط شروع خلاصی استفاده شده و از شبکه‌ی عصبی مصنوعی به عنوان تخمین زننده‌ی مصرف انرژی و زمان حرکت برای نقاط انتخابی الگوریتم ژنتیک استفاده شده است؛ تا فقط نقاط نزدیک به بهینه انتخاب گردند و زمان شبیه‌سازی کاهش پیدا کند. تأثیر عوامل مختلفی مانند ولتاژ پایین‌تر از مقدار نامی و شیب مسیر نیز بر روی نقاط شروع خلاصی بررسی شده است و نشان داده شده که چون حالت کاری خلاصی انرژی بازتولیدی ترمزی را کاهش می‌دهد، استفاده از این حالت در ساعات غیر پیک که انرژی بازتولیدی هدر می‌رود، می‌تواند مؤثرتر باشد.

در [76] ترکیبی از اصول فیزیکی و روش‌های راهبری قطار همراه با روش‌های جست‌وجوی ابتکاری استفاده شده است و به کمک الگوریتم ژنتیک و تعریف یک تابع برازش، توازن بین مصرف انرژی و زمان سفر برقرار شده است. عوامل مختلفی که می‌توانند مصرف انرژی و زمان سفر را تحت تأثیر قرار دهند به دو گروه استاتیکی و دینامیکی تقسیم شده‌اند. پارامترهای استاتیکی مانند فاصله‌ی بین ایستگاه‌ها، محدودیت‌های سرعت و...، به عنوان ورودی در نظر گرفته شده‌اند و در طی فرایند مدل‌سازی تغییر نمی‌کنند. پارامترهای دینامیکی عبارتند از شتاب مثبت، شتاب ترمزی و نقطه‌ی شروع خلاصی که انرژی موردنیاز را برای سفر تعیین می‌کنند که به عنوان متغیر بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند تا تابع انرژی حداقل گردد. و نشان داده شده که با افزایش ده درصدی زمان سفر، می‌توان ۴۰٪ صرفه‌جویی انرژی به دست آورد؛ البته فقط حالت یک قطار بررسی شده است. در [77] ضمن تکمیل تحقیق قبلی، بهینه‌سازی مسیر حرکت یک قطار جهت رسیدن به حداقل مصرف انرژی و حداکثر بازتولید انرژی بررسی شده است. سپس کاهش انرژی خالص مصرفی بین دو پست مجاور وقتی از مسیرهای بهینه استفاده شود، در نظر گرفته شده است. این کار با استفاده از GA در نرم‌افزار متلب انجام شده است. برای سیستم چندقطاره نشان داده شده که دستیابی به کاهش بیشتر مصرف انرژی با تنظیم برنامه حرکت قطارها در هر دو مسیر رفت و برگشت حاصل می‌شود یعنی باید محاسبات مسیریابی یک قطاره دوباره و با معیارهای بهینه‌سازی متفاوت انجام شود.

یک الگوریتم بهینه سازی مصرف کل انرژی در یک سیستم چندقطاره DC بر اساس روش بهینه سازی گرادیان در [78] ارائه شده است و مشخصه های مختلف قطارها از جمله تأثیر سیستم بازتولید انرژی ترمزی بررسی شده است. با استفاده از نتایج عددی نشان داده شده است که پروفایل سرعت و ورودی های کنترلی به شدت به زمان ترک ایستگاه وابسته اند. همچنین اهمیت تحلیل عددی برای درک میزان صرفه جویی انرژی نشان داده شده است و این که روش فوق برای کنترل ولتاژ بهینه پست ها نیز قابل استفاده است. میزان صرفه جویی انرژی حاصل از این روش نسبت به روش معمولی، بین ۴ تا ۱۸ درصد است. باید توجه داشت که روش فقط برای دو قطار متوالی مورد ارزیابی قرار گرفته و سعی شده زمان ترمز گیری و شتاب گیری یکسانی داشته باشند در حالی که قطارهای روبرو اهمیت بیشتری دارند؛ ضمناً مدل سازی الکتریکی ارائه نشده است. در [79] بهره برداری بهینه از سیستم قطارشهری با حداقل کردن مصرف انرژی مورد بحث قرار گرفته و ضمن بیان تدابیر ممکن برای پیدا کردن پروفایل سرعت بهینه، مشخصه هایی که باید در بهره برداری قطارها مورد توجه قرار گیرند، توضیح داده شده و روش های بهینه سازی مبتنی بر تئوری کنترل بهینه مرور شده اند. این روش ها عبارتند از برنامه ریزی دینامیکی، روش گرادیان و برنامه ریزی متوالی مرتبه ۲ که دو روش آخر برای کنترل وضعیت شارژ تجهیزات ذخیره کننده انرژی نیز مناسب اند. تمرکز اصلی این تحقیق بر بهینه سازی کامل سیستم چندقطاره همراه با تجهیزات ذخیره ساز بوده و فرمان های شارژ و دشارژ و پروفایل سرعت همزمان بهینه شده اند. با انتخاب انرژی کل خروجی از کلیه پست ها به عنوان تابع هدف، نتایج حاصل از سه روش مقایسه شده اند ولی باز هم شبیه سازی فقط برای دو قطار است و نتایج کلی به نظر نمی آیند.

یک روش بهینه سازی بر اساس الگوریتم ژنتیک چند جمعیتی با ماتریس طول متغیر برای بهینه سازی مصرف انرژی و کنترل قطار در [80] آورده شده و تأثیر طول قطار در مطالعات در نظر گرفته شده است که برای قطارهای شهری اگر بار نقطه ای هم در نظر گرفته شود، خطای محاسبات زیاد نخواهد بود. در [81] با کاهش حداکثر سرعت بین دو ایستگاه و افزایش شتاب مثبت و منفی (به جای استفاده از حالت خلاصی که به دلیل کم بودن فاصله بین ایستگاه ها و کوچک بودن زمان سفر، ممکن است بهترین راهکار نباشد) انرژی مصرفی حداقل شده و محدودیت زمانی نیز برآورده شده است که نتایج شبیه سازی برای متروی سائوپائولو نشان دهنده صرفه جویی انرژی با استفاده از این روش است. در

[31] یک شبیه‌سازی چندقطاره مبتنی بر یک شبیه‌سازی یک‌قطاره معرفی شده است و طی شبیه‌سازی نشان داده شده که ترکیب بازتولید انرژی، معرفی نقاط خلاص کردن و سبک راهبری اصلاح شده توانایی افزایش بیش از ۵۰ درصدی در بازده را دارد که ۲۳٪ کاهش مصرف می‌تواند به‌وسیله بازتولید انرژی و ۲۳٪ به‌وسیله راهبردهای تعیین نقطه خلاصی و ۴٪ با اتخاذ سبک راهبری مناسب حاصل گردد. موضوع با استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی هم تکرار شده و نتایج صرفه‌جویی بیشتر انرژی را نشان داده است. شبیه‌سازی بر روی یک خط قطار محلی انجام شده است.

در سامانه‌های قطار شهری با بهره‌برداری خودکار، عامل اصلی ایجاد بی‌نظمی زمان توقف در ایستگاه‌ها است که برای حفظ نظم در ترافیک دو روش وجود دارد یکی اینکه زمان توقف در ایستگاه‌ها افزایش یا کاهش داده شود (بسته به اینکه فاصله بین دو قطار متوالی خیلی طولانی یا کوتاه شده باشد). روش دیگر اصلاح پروفایل سرعت است که می‌تواند با تغییر حداکثر سرعت، شتاب مثبت یا منفی و یا نقطه شروع خلاصی انجام شود که چون مسافران تمایل ندارند زمان انتظار طولانی شود، معمولاً روش دوم ترجیح داده می‌شود. در [82] تأثیر برنامه حرکت و طرح خط بر مصرف انرژی در مترو به‌وسیله روش تحلیلی و مدل شبیه‌سازی بررسی شده است و عملکرد روش مقایسه شده و کاربرد مدل شبیه‌سازی بر روی خط A متروی شهر رم ایتالیا نشان داده شده است. با تعریف یک ضریب صرفه‌جویی نشان داده شده که فاصله زمانی بین ۱۲۰ تا ۱۵۰ ثانیه بین حرکت قطارها از لحاظ صرفه‌جویی انرژی ایده‌آل هستند. البته باید توجه داشت که شیب مسیر و اغتشاشات ترافیکی در نظر گرفته نشده‌اند.

در [83] بدون اثبات و با استفاده از شبیه‌سازی و مقایسه نتایج، نشان داده شده که اگر فاصله بین ایستگاه‌ها کمتر از ۱۸۰۰ متر باشد، حداکثر سرعت قطارهای مترو باید بین ۳۰ تا ۷۰ km/hr تنظیم شود تا هزینه انرژی و زمان سفر کمتر باشد. نتایج به‌صورت منحنی‌های هزینه و زمان در فاصله‌های بین ایستگاه‌های یک خط شبیه‌سازی شده‌اند. در تحقیق فرضیات ساده کننده زیادی در نظر گرفته شده مثلاً مسیر مستقیم و بدون شیب در نظر گرفته شده و نحوه شتاب و ترمز مشخص نیست. در [84] همین موضوع با در نظر گرفتن نرخ مسافر گیری بررسی شده و نشان داده شده که اگر نرخ مسافر گیری بیش از ۶۰٪ باشد، هزینه انرژی و زمان سفر با افزایش سرعت فنی تغییرات جزئی خواهند داشت. در [85] یک روش بهینه‌سازی پیش‌بین برای محاسبه پروفایل سرعت انرژی بهینه بین دو ایستگاه استفاده

شده است و نتایج بهینه‌سازی به صورت یک تابع سرعت بر حسب فاصله برای یک قطار محلی آورده شده است.

برای تعیین مسیر با کارایی انرژی معمولاً دو نوع استراتژی بکار می‌روند، یک روش استفاده از مد خلاصی است؛ به طوری که محدوده زمانی حفظ گردد و صرفه‌جویی انرژی نیز حاصل شود. روش دیگر کنترل دینامیکی سرعت قطار ضمن حفظ زمان مورد نیاز سفر است. در [86] یک روش جستجوی مسیر قطار مبتنی بر فاصله معرفی شده که بر اساس آن سه الگوریتم بهینه‌سازی برای جستجوی پروفایل سرعت بهینه استفاده شده‌اند. این مدل بجای جستجو برای پیدا کردن یک ورودی کنترل پیچیده برای سیستم کششی قطار، یک حد سرعت برای هر موقعیت از پیش تعیین شده در طول مسیر را می‌دهد. نشان داده شده که الگوریتم مورچه‌ها در مقایسه با الگوریتم ژنتیک، توازن بهتری را بین پایداری و کیفیت نتایج برقرار می‌کند. برای کاربردهای غیر زمان واقعی از برنامه‌ریزی دینامیکی استفاده شده است تا کیفیت پاسخ‌ها بهبود یابد. توصیه شده تا برای شناسایی مسیر بهینه یک قطار و بهبود مقاوم بودن نتایج جستجو شده از چند الگوریتم استفاده شود. مطالعه انجام شده بر روی قطارهای سریع‌السیر با مسیر طولانی است و به همین دلیل تحقیق انجام شده فقط بر روی یک قطار بدون در نظر گرفتن اثر سایر قطارها انجام شده است.

روش بهینه‌سازی پروفایل سرعت برای یک قطار سریع‌السیر با هدف بهینه کردن انرژی و زمان سفر، با استفاده از الگوریتم ارزیابی تفاضلی و سرد کردن فلزات در [87] ارائه شده است. نشان داده شده است که روش بهینه‌سازی چندهدفه برای پیدا کردن مشخصه‌های سرعت ممکن در مقایسه با روش‌های معمولی می‌تواند حالت‌های بهره‌برداری بیشتری را برای راهبر یا سیستم ATO در موقعیت‌های مختلف فراهم کند و ضمن کاهش مصرف انرژی، جبران تأخیر یا اضافه بودن وقت را نیز بنماید؛ البته بهینه‌سازی انجام شده یک قطاره است و تأثیر بازتولید انرژی در نظر گرفته نشده است.

در [30] مروری بر تحقیقات انجام شده در جهت صرفه‌جویی انرژی از دیدگاه بهره‌برداری قطار شهری انجام شده است و بخصوص بر بهینه‌سازی طرح‌های خلاصی قطار متمرکز شده است. ضمن معرفی هزینه انرژی مربوط به سیستم کششی، عوامل مختلف مؤثر بر این هزینه و تأثیر هریک بررسی شده است. مطالعات انجام شده در مورد حالت خلاصی، شیب مسیر، خصوصیات قطار و بهره‌برداری

سیستم نیز مرور شده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در [88] استفاده از روش ترمز پله‌ای بجای ترمز ثابت مدنظر قرار گرفته است. بدین ترتیب که در سرعت بالا نیروی ترمزی کمتر است؛ هرچه سرعت کمتر شده، نیروی ترمزی بیشتر شده است. چون در ابتدا ترمز شدید نیست، از اضافه ولتاژ جلوگیری شده و توان ترمزی بازتولیدی نیز بهتر قابل استفاده است (زیرا اگر توان لحظه‌ای زیاد شود امکان جذب نیست و تلف خواهد شد). راهکار فوق از طریق سیستم کمک راهبر در سال ۲۰۱۲ در ژاپن اجرا شده ولی مشکلات اجرایی داشته و برای ATO مناسب است که مشکل اجرا به دلیل نگرانی راهبر از تأخیر است. در این روش ترمز باید زودتر از حد معمول شروع شود. روش راهبری برای صرفه‌جویی انرژی در [89] ارائه شده است که محدودیت زمان سفر نیز حفظ گردد و نشان داده شده که اگر ترمز گیری در سرعت معمول انجام شود و از قابلیت بازتولید انرژی به‌طور کامل استفاده شود (فقط ترمز الکتریکی) نسبت به حالتی که خلاصی در سرعت پایین‌تر باشد و ترمز الکتریکی و مکانیکی قوی‌تر استفاده شود، مصرف انرژی کمتر است. یک سیستم کمک راهبری نیز معرفی شده که برای مسیرهای حالت عادی، مصرف را کاهش داده ولی در مسیرهای سخت (شیب زیاد) عملکرد مناسبی نداشته است.

در یک سیستم حمل و نقل عمومی بزرگ برای دو قطار پشت سرهم دو حالت وجود دارد، یکی اینکه قطار پشت سر به‌صورت سیستماتیک همان پروفایل سرعت قطار جلویی را بکار برد یا اینکه قطار دوم سرعت خود را با یک پروفایل متفاوت تنظیم کند که منطبق بر سرعت، موقعیت و مقدار انرژی بازتولیدی قطار جلویی باشد. بدین ترتیب با عملکردی سنکرون شده می‌توان بازده بازیافت انرژی بالاتری کسب کرد. در [90] با استفاده از برنامه‌ریزی دینامیکی در محیط C^{++} پروفایل سرعت برای قطار عقبی از دو قطار پشت سرهم طوری بهبود بخشیده شده‌است که نوسانات ولتاژ حداقل گردد و راندمان انرژی بازیافتی حداکثر شود.

در [91] پروفایل سرعت بهینه با استفاده از برنامه‌ریزی دینامیکی برای صرفه‌جویی انرژی و کاهش هزینه‌ها محاسبه شده است. بهینه‌سازی در دو مرحله انجام شده است، ابتدا با استفاده از برنامه‌ریزی دینامیکی و در نظر گرفتن شیب و انحنای مسیر، پروفایل‌های سرعت تقریباً بهینه با هدف حداقل کردن انرژی الکتریکی موردنیاز سیستم کششی محاسبه شده‌اند به‌طوری‌که قیدهای زمان سفر، فاصله‌ی زمانی حرکت قطارها، محدودیت‌های شتاب و ... برآورده شود. در گام دوم بهینه‌سازی مجموعه‌ی

پروفایل‌های سرعت در یک نرم‌افزار شبیه‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفته تا میزان توان جذب شده از شبکه توسط قطارها تخمین زده شود و با مشخص شدن میزان صرفه‌جویی انرژی، کارایی روش تأیید شده است. برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار متلب انجام شده و در شبیه‌سازی فقط بین دو ایستگاه در نظر گرفته شده و دو ذخیره‌ساز ساکن نیز در نظر گرفته شده‌اند و از شیب و انحنای مسیر در این بخش صرف نظر شده است. با بررسی نتایج شبیه‌سازی، حداکثر جریان پست حدود ۲۰٪ و انرژی مصرفی حدود ۵٪ کاهش یافته است. لذا بیان شده که می‌توان مقادیر نامی مبدل‌های الکترونیک قدرت را کاهش داد. افت ولتاژ قطار کاهش یافته، ولی جهش‌های ولتاژ افزایش یافته است. با افزایش تعداد پله‌های زمانی شبیه‌سازی (کوچک کردن پله‌های تغییرات گشتاور)، زمان محاسبات شدیداً افزایش یافته است.

در رابطه با بهره‌برداری خودکار نیز مطالعاتی انجام شده که اغلب آن‌ها نیاز به اطلاعات دقیقی از مدل قطار و پروفایل سرعت بهینه‌ی از پیش تعیین شده دارند. در [92] دو الگوریتم بهره‌برداری هوشمند قطار (ITO)^۱ معرفی شده‌اند که بتوانند قطار را بدون نیاز به استفاده از پروفایل سرعت هدف به صورت خودکار بهره‌برداری کنند و ضمن این که به اطلاعات دقیق مدل قطار نیازی ندارند، شاخص‌های حفاظت اضافه سرعت، آسایش و به موقع رسیدن حفظ کردند و قادر باشند با محدودیت‌های سرعت مختلف و زمان‌های سفر مختلف خود را تطبیق دهند و راهکارهای کنترلی خود را به صورت دینامیکی تغییر دهند. اساس کار مبتنی بر شبیه‌سازی کنترل هوشمند قطار توسط انسان است که یکی الگوریتم مبتنی بر سامانه‌های خبره و دیگری بر اساس یادگیری هوشمند است که مصرف انرژی را به صورت زمان واقعی بهینه می‌نماید. با جمع‌بندی و ارزیابی داده‌های انسانی، یک سری قوانین "اگر - آنگاه"^۲ با در نظر گرفتن موقعیت، سرعت و زمان سفر به عنوان ورودی و نرخ شتاب و ترمز به عنوان خروجی استخراج شده‌اند که تعیین‌کننده‌ی حالت‌های بهره‌برداری قطار، از قبل با استفاده از اطلاعات فعلی و بعدی هستند. نتایج کار برای حالت‌های مختلف تحلیل شده است.

الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات^۳ (MOPSO) در [93] برای تعیین جبهه پرتوی^۴

انرژی- زمان و پروفایل‌های سرعت بهینه مبتنی بر شبیه‌سازی یک قطار با ATO واقعی استفاده شده

^۱ Intelligent Train Operation

^۲ If - Then

^۳ Multi Objective Particle Swarm Optimization

^۴ Pareto Front

است و نتایج برای یک خط واقعی از متروی زیرزمینی شهر مادرید اسپانیا اعتبار سنجی شده‌اند. با استفاده از الگوریتم معرفی شده، تعداد حالت‌های ممکن افزایش داده شده است ولی به دلیل انتخاب نامناسب متغیرهای تصمیم، حالت‌های زیادی نیز به وجود آمده است که از جبهه پرتو فاصله زیادی دارند و در ضمن باعث طولانی شدن فرایند بهینه‌سازی می‌شوند. در [94] ابتدا با استفاده از MOPSO یک جبهه پرتوی بهینه از پروفایل‌های سرعت که نسبت به تغییرات بار مقاوم هستند، با در نظر گرفتن دو هدف انرژی و زمان سفر ساخته شده‌اند؛ سپس با استفاده از اطلاعات آماری درباره تأخیرها، پروفایل‌های سرعت بهینه به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که انرژی مصرفی حداقل شود. تغییرات وزن، فقط در سه حالت دیده شده است و فقط انرژی مصرفی حداقل شده است و انرژی بازتولیدی در نظر گرفته نشده است.

۳-۶ مطالعات درباره بهینه‌سازی همزمان جدول زمانی و پروفایل سرعت

با توجه به قیمت روزافزون انرژی و مسائل محیطی، راهکارهای بهره‌برداری با بازدهی انرژی بالای قطار^۱ به عنوان یکی از روش‌های مؤثر در کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و مصرف انرژی مورد توجه قرار گرفته‌اند. این نوع بهره‌برداری شامل بهینه‌سازی جدول زمانی و کنترل سرعت می‌شود. بهینه‌سازی جدول زمانی جهت استفاده‌ی حداکثر از انرژی ترمزی، زمان‌های شتاب و ترمز را همزمان می‌کند و با کنترل روش راهبری قطار نیز می‌توان مصرف انرژی کششی را تحت قیدهای جدول زمانی به حداقل رساند تا در نهایت مصرف انرژی خالص بهبود یابد. در روش‌های معمول کنترل بهینه‌ی قطار، پروفایل سرعت را در هر فاصله (بین دو ایستگاه) به صورت جداگانه بهینه می‌کنند اما چون توزیع زمان سفر بین ایستگاه‌ها بهینه نیست، نمی‌توان اطمینان داشت که پاسخ برای کل مسیر سفر بهینه است. از طرف دیگر مطالعات بهینه‌سازی جدول زمانی معمولاً فرض می‌کنند که سرعت حرکت قطار ثابت است و انرژی مصرفی صرف غلبه بر مقاومت حرکت قطار در طول سفر می‌شود که این فرض غیر دقیق است و نباید برای مسیرهای کوتاه مانند مترو به کار رود؛ زیرا به دلیل تخمین غیردقیق انرژی مصرفی، ممکن

¹ Energy Efficient Train Operation

است جدول زمانی به دست آمده بهینه نباشد. در سال‌های اخیر تحقیقات انجام شده سعی داشته‌اند تا این دو موضوع را به طور همزمان در نظر بگیرند.

در [95] با فرمول بندی تحلیلی، پروفایل سرعت بهینه برای یک زمان سفر ثابت بین دو ایستگاه محاسبه شده است؛ سپس با استفاده از یک الگوریتم عددی، زمان سفر بین ایستگاه‌های مختلف توزیع شده، به طوری که بهینه بودن الگوریتم توزیع زمان تضمین شده باشد. الگوریتم نیز بهبود داده شده تا یک جدول زمانی مجتمع تولید گردد. در این مطالعه اثبات شده است که برای مسیرهای کوتاه نیاز به حالت سرعت ثابت نیست؛ ضمن این که برای حداقل کردن مصرف انرژی باید شتاب مثبت و منفی حداکثر باشد. نتایج شبیه سازی بر روی متروی پکن نشان دهنده‌ی ۱۴,۵٪ کاهش مصرف انرژی برای کل مسیر است. زمان محاسبه‌ی پاسخ بهینه نیز ۰,۱۵ ثانیه است که برای کاربرد زمان واقعی و بهره‌برداری خودکار مناسب است؛ البته در این تحقیق فقط یک قطار در نظر گرفته شده و تأثیر فاصله‌ی زمانی بین حرکت قطارها بررسی نشده و انرژی بازتولیدی نیز در نظر گرفته نشده است.

از دیدگاه راندمان انرژی مقالات موجود راهکارهای بالا بردن بازده انرژی را به دو گروه تقسیم می‌کنند: راهبردهای صرفه جویی انرژی و راهبردهای بازیافت انرژی؛ هدف گروه اول کاهش مصرف انرژی به وسیله‌ی بهینه سازی پارامترهای پروفایل سرعت نظیر سرعت، شتاب و خلاص کردن است. کاهش رفتار نادرست راهبران نیز در این راستا بسیار مهم است. راهبردهای بازیافت انرژی سامانه‌های ترمزی با قابلیت بازتولید انرژی را روی قطارها در نظر می‌گیرند که معمولاً با تجهیزات ذخیره ساز انرژی همراه هستند. هر دو راهکار برای اجرایی شدن به زمان سفر اضافی نیاز دارند (راهکار اول برای حالت خلاصی و راهکار دوم برای همزمان کردن بهتر فازهای شتاب و ترمز قطارها).

در [96] با در نظر گرفتن زمان ذخیره (که معمولاً حدود ۳ تا ۸ درصد حداقل زمان سفر بین دو ایستگاه است) سعی شده است مدل قطار بهینه سازی گردد تا بتوان پروفایل سرعتی را تعیین کرد که انرژی را بهینه می‌کند. پارامترهای حرکت قطار به عنوان متغیرهای کنترلی در نظر گرفته شده و در دو حالت با و بدون سیستم بازیافت انرژی بررسی شده‌اند. مدل‌ها و روش‌های مورد نظر روی یک سیستم واقعی آزمایش شده و نتایج اولیه حاکی از صرفه جویی قابل توجه در انرژی است. لازم به ذکر است که در این تحقیق تغییرات شتاب که به رفتار راهبران بستگی دارد، در نظر گرفته نشده و فقط برای ATO

مناسب است و در اجرای راهبرد فوق از قاعده‌ی رفتن هر چه سریع‌تر به حالت خلاصی استفاده شده و نیاز به سیستم کمک راهبری نیز دارد. [97] با هدف پیدا کردن راهکارهای بازدهی انرژی بهینه بر اساس الگوهای سرعت ارائه شده است و سعی شده تأثیر این راهکارها را بر ترافیک خطوط از طریق شبیه‌سازی تخمین بزند. در این راستا زمان‌های ذخیره در حالت سفر و مسافرگیری به‌عنوان بخشی از جدول زمانی برنامه‌ریزی شده جهت پوشش تأخیرهای احتمالی و جلوگیری از گسترش تأخیر بین قطارها در نظر گرفته شده‌اند و تأثیر آن‌ها بر راهکارهای صرفه‌جویی انرژی بررسی شده است.

در [98] یک مدل بهینه‌سازی کامل برای کنترل چند قطار از دیدگاه سیستمی تعریف شده که هم جدول زمانی و هم پروفایل سرعت را بهینه می‌کند؛ ضمن این که با این الگوریتم چندمرحله‌ای فاصله‌ی زمانی بین حرکت قطارها نیز به‌صورت بهینه محاسبه می‌گردد و نقایص کار قبلی را پوشش می‌دهد و با شبیه‌سازی داده‌های واقعی خط پکن نشان داده شده که روش موردنظر می‌تواند در یک روز مصرف انرژی را حدود ۲۴٪ کاهش دهد. یکی از پارامترهایی که می‌تواند در مصرف انرژی نقش داشته باشد، ضریب بهره‌برداری از حداکثر ظرفیت قطار است که در اینجا ثابت فرض شده است و می‌توان آن را متغیر در نظر گرفت. در [99] با استفاده از یک الگوریتم تکاملی مبتنی بر شاخص، مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه تولید شده که هم زمان سفر و هم انرژی مصرفی را بهینه می‌کند. در حقیقت پروفایل‌های سرعت به‌دست آمده در این روش بین زمان سفر و انرژی مصرفی مصالحه برقرار می‌کنند. نتایج به‌دست آمده روی داده‌های یک خط واقعی نیز آزمایش شده و صحت کار تأیید شده است. البته انرژی بازتولیدی ترمزی در این مطالعه در نظر گرفته نشده است.

در [100] یک مدل بهره‌برداری قطار با بهره‌وری انرژی معرفی شده است که مبتنی بر اطلاعات ترافیکی زمان واقعی است و با ترکیب روش تحلیلی و عددی و استفاده از شکل هندسی مسیر و استفاده از روش برنامه‌ریزی غیرخطی، الگوی سفر با بهره‌وری انرژی را به دست آورده است. البته شبیه‌سازی فقط برای یک بخش از فاصله بین دو ایستگاه انجام شده است و برای هر زیربخش تعداد زیادی متغیر تصمیم شامل زمان‌های شتاب، سرعت کروز و سرعت خلاصی در نظر گرفته شده که برای قطارهای شهری با طول مسیر بین ایستگاهی کوتاه، ضروری به نظر نمی‌آید. انرژی بازتولیدی هم در نظر گرفته نشده است. در [101] ابتدا با استفاده از یک الگوریتم عددی، استراتژی راهبری بهینه برای یک زمان

سفر مشخص تعیین شده است؛ سپس یک روش کنترلی مشارکتی معرفی شده است تا با تنظیم زمان ترک ایستگاه و استفاده از تبادل انرژی بین قطار در حال ترمز و قطار در حال شتاب در مسیر مخالف، انرژی مصرفی قطار را حداقل نماید. چون میزان استفاده از انرژی بازتولیدی به شرایط بقیه قطارها بستگی دارد، انتخاب راندمان ثابت ۴۰ درصد برای بازتولید قابل قبول نیست. ضمن اینکه قطار می‌تواند با سایر قطارهای نزدیک و در مسیر موافق هم تبادل انرژی داشته باشد که در نظر گرفته نشده است.

یک مدل بهره‌برداری با بهره‌وری انرژی در [102] فرمول بندی شده است و به‌طور مشترک جدول زمانی و پروفایل سرعت را بهینه کرده است. از الگوریتم ژنتیک برای حل مدل استفاده شده و داده‌های عددی از متروی پکن به‌کاررفته‌اند و نشان داده شده که فاصله‌ی زمانی بزرگ‌تر بین حرکت قطارها منجر به نرخ صرفه‌جویی انرژی کوچک‌تر می‌شود و نسبت به روش دومرحله‌ای بهینه‌سازی جدول زمانی و پروفایل سرعت به‌صورت جداگانه، این روش مصرف انرژی خالص را حدود ۲۰٪ کاهش می‌دهد. در این تحقیق نرخ شتاب ثابت فرض شده که خیلی واقعی نیست؛ همچنین فاصله‌ی زمانی بین حرکت قطارها ثابت فرض شده که اگر قابل‌انعطاف باشد می‌تواند باز هم مصرف انرژی را کاهش دهد. ممکن است به دلیل وجود اغتشاشات در بهره‌برداری واقعی این پروفایل سرعت خیلی خوب نباشد که باید عملاً مورد آزمایش قرار گیرد.

در سیستم‌های قطارشهری، موضوعات مرتبط با تنظیم فاصله زمانی بین قطارها توجه زیادی را به خود معطوف کرده‌اند. اطمینان از نظم فاصله زمانی می‌تواند باعث کاهش زمان‌های تأخیر و انتظار مسافران شود. در [103] یک روش کنترلی تحلیلی یکپارچه معرفی شده تا فاصله زمانی بین قطارها را با تنظیم زمان ورود به ایستگاه، بهینه کند. نشان داده شده که با انتخاب روش موردنظر، زمان متوسط انتظار مسافری و انرژی مصرفی کاهش می‌یابد و همچنین روش در فاصله زمانی بزرگ‌تر بین قطارها عملکرد بهتری دارد. شتاب قطار در هر بخش مسیر ثابت فرض شده است و در سایر روابط حرکت نیز ساده‌سازی انجام شده است. در [104] مرور جامعی بر موضوع بهره‌برداری کارآمد قطار انجام شده است؛ ابتدا به مسئله توزیع انرژی در قطار پرداخته شده است؛ سپس مقاله‌های بهینه‌سازی جدول زمانی بررسی شده‌اند. این مقاله‌ها به دو گروه محدود کردن اوج توان مصرفی و حداکثر کردن استفاده از انرژی بازتولیدی تقسیم شده‌اند. مقاله‌های مربوط به بهینه‌سازی مشخصه سرعت نیز به دو دسته الگوریتم‌های

تحلیلی و عددی تقسیم شده‌اند. در نهایت نتیجه‌گیری شده است که روش ترکیبی (بهینه‌سازی همزمان جدول زمانی و پروفایل سرعت) می‌تواند به دلیل صرفه‌جویی بیشتر در آینده مورد توجه محققین قرار گیرد.

۳-۷ ضرورت بهینه‌سازی همزمان ذخیره‌سازهای انرژی و پروفایل سرعت

مطالعات زیادی جهت کاهش مصرف سامانه‌های قطار شهری انجام شده ولی با توجه به عدم وجود نتایج مستند، مقایسه آن‌ها به راحتی ممکن نیست. گرچه نتایج تحقیقات انجام شده به طور شفاف موجود نیست و بعضاً با یکدیگر در تناقض می‌باشند، ولی با جمع‌بندی کلی آن‌ها، ویژگی‌های روش‌های اصلی در جدول (۳-۲) مقایسه شده‌اند. ملاحظه می‌شود که روش‌هایی که فقط به بهینه‌سازی بهره‌برداری با استفاده از امکانات موجود مربوط می‌شوند؛ یعنی بهینه‌سازی جدول زمانی و راهبری اقتصادی، هزینه سرمایه‌گذاری کمی نیاز دارند ولی میزان صرفه‌جویی آن‌ها نیز محدود است. استفاده از سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی نصب شده روی قطار برای سامانه‌های موجود خیلی مناسب نمی‌باشند زیرا به تغییرات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری زیادی نیاز دارند و ممکن است از نظر اجرایی نیز با سیستم موجود سازگاری نداشته باشند، مثلاً باعث افزایش بیش از حد وزن شوند و یا اینکه در فضای موجود روی قطار امکان نصب این تجهیزات نباشد؛ ضمن اینکه هزینه آن‌ها نیز بالا است.

ذخیره‌سازهای ساکن علی‌رغم هزینه بالا، چون می‌توانند صرفه‌جویی قابل توجهی را به دنبال داشته باشند و نصب آن‌ها در سامانه‌های موجود نیز راحت‌تر است، حائز اهمیت هستند. پست‌های

جدول (۳-۲) مقایسه اقتصادی و سازگاری روش‌های صرفه‌جویی انرژی [1]

روش مورد نظر	میزان صرفه‌جویی (درصد)	سازگاری با سیستم موجود	هزینه سرمایه‌گذاری
ذخیره‌ساز انرژی نصب شده روی قطار	۵ - ۲۵	متوسط	زیاد
ذخیره‌ساز انرژی ساکن	۵ - ۲۵	زیاد	زیاد
پست‌های دوطرفه	۵ - ۲۰	زیاد	زیاد
راهبری اقتصادی	۵ - ۱۰	زیاد	کم
بهینه‌سازی جدول زمانی	۱ - ۱۰	زیاد	کم

دوطرفه نیز قابلیت صرفه‌جویی بالایی دارند ولی همان‌طور که قبلاً اشاره شد یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های آن‌ها، نحوه‌ی برگشت انرژی به شبکه‌ی بالادستی است که چون در اغلب کشورها، شرکت‌های بهره‌بردار قطار شهری و تأمین‌کننده‌ی برق جدا هستند و از طرفی قوانین تدوین شده‌ی جهت فروش این برق به شبکه وجود ندارد، در حال حاضر حداقل برای چنین حالتی که شبکه متعلق به شرکت قطار شهری نیست، استفاده از ذخیره‌سازهای ساکن مقرون به صرفه تر است [105]. از طرفی با توجه به کاربرد منابع انرژی‌های تجدیدپذیر در شبکه و معرفی شبکه‌های هوشمند، استفاده از ذخیره‌سازها امری اجتناب‌ناپذیر است؛ بنابراین مبنای اصلی کار در این تحقیق، استفاده از سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی ساکن انتخاب شده است.

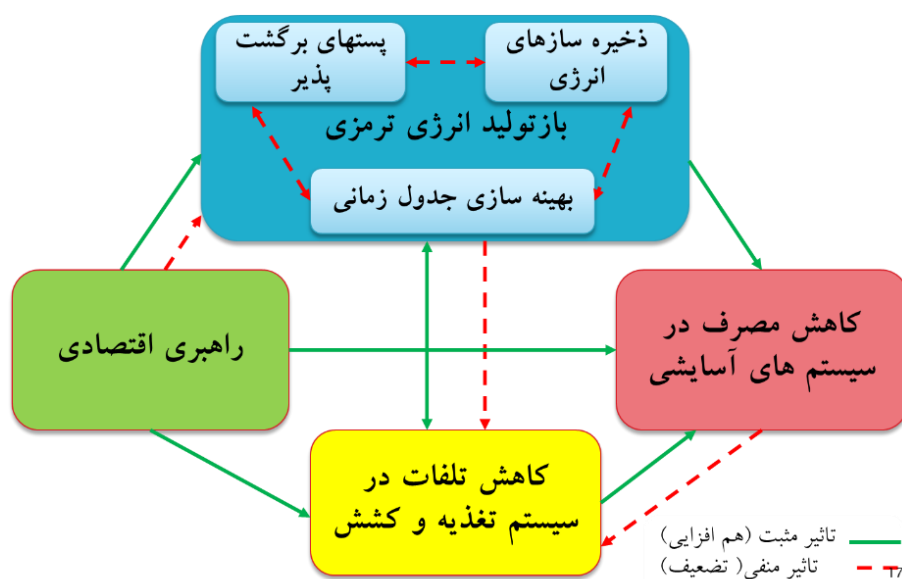
ذخیره‌ساز انرژی نوع SMES در حال حاضر به دلیل مشکلات و مسائل فنی، فقط جنبه‌ی تئوری و شبیه‌سازی داشته [20] و بعید به نظر می‌رسد که در کوتاه‌مدت نیز بتواند مورد استفاده‌ی عملی قرار گیرد و از آنجاکه هدف این پروژه پیدا کردن راه علمی و عملی برای کاهش مصرف سامانه‌های قطار شهری موجود است، این تجهیز مورد بررسی قرار نگرفته است. چرخ طیار نیز به دلیل مسائلی که در بخش قبل ذکر گردید، مورد استفاده قرار نمی‌گیرد [105] و همان‌طور که در اغلب مقالات مشاهده می‌شود، ابرخازن مناسب‌ترین عنصر جهت استفاده در سیستم ذخیره‌ساز است. البته با مدنظر قرار دادن شبکه‌های هوشمند و سامانه‌های ذخیره‌ساز در شبکه‌های قدرت و نیاز به چگالی انرژی بالا، می‌توان باتری‌ها را نیز در کنار ابرخازن‌ها در نظر گرفت و سامانه‌های ذخیره‌ساز ترکیبی را بکار برد.

با جمع‌بندی مطالعات انجام شده در این فصل، مشاهده می‌شود که در اغلب تحقیقات انجام شده از یک روش جهت کاهش مصرف انرژی استفاده شده است. گرچه در بهینه‌سازی چند هدف انتخاب شده‌اند ولی تأثیر متقابل تدابیر اتخاذ شده در حوزه‌های مختلف بر یکدیگر بررسی نشده است؛ فقط در بعضی از مطالعات، تأثیر وضعیت ترافیکی یعنی فاصله زمانی بین حرکت قطارها بر عملکرد روش موردنظر بررسی شده است که فاصله زمانی بین حرکت قطارها به عنوان یکی از روش‌های اصلی صرفه‌جویی مطرح نیست. از آنجاکه راه کارهای صرفه‌جویی انرژی بر یکدیگر تأثیر متقابل دارند، توجه به این موضوع ضروری است. ممکن است تأثیر در جهت مثبت باشد یعنی اینکه حالت هم‌افزایی داشته باشند یا اینکه یکدیگر را خنثی کنند. به عنوان مثال وقتی پست دوطرفه در نظر گرفته می‌شود، هدف

اصلی برگرداندن انرژی اضافی به شبکه بالادستی است در این صورت تبادل انرژی بین قطارها در اولویت نیست و ممکن است حداکثر نباشد؛ درحالی که اگر با توجه به تلفات کمتر اولویت اول تبادل انرژی بین قطارها باشد، سپس باقیمانده‌ی انرژی اضافی به شبکه برگشت داده شود، ممکن است نتایج تحلیل‌های اقتصادی و یا بهره‌وری انرژی تغییر نماید.

یکی از عوامل تأثیرگذار بر بهینه‌سازی ظرفیت سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی، پروفایل سرعت است. این دو روش بر یکدیگر تأثیر معکوس دارند؛ به عبارت دیگر اگر پروفایل سرعت اقتصادی جهت حرکت قطار انتخاب گردد، با توجه به اینکه حداکثر استفاده از حالت خلاصی به عمل می‌آید، انرژی جنبشی باقیمانده در حالت ترمزی به حداقل می‌رسد و انرژی قابل بازتولید ترمزی کاهش می‌یابد. اگر طراحی ذخیره‌ساز بدون توجه به این فرایند انجام گردد، از نظر اقتصادی اشکال دارد زیرا سرمایه‌گذاری بیش از حد انجام شده و ممکن است ذخیره‌ساز هیچ‌وقت به حداکثر ظرفیت شارژ خود نرسد. در سامانه‌های ریلی با حجم ترافیک سبک و متوسط، در بهینه‌سازی معمولاً به کاهش مصرف انرژی اهمیت بیشتری داده می‌شود و زمان سفر در اولویت بعد قرار دارد، لذا پروفایل سرعت اقتصادی می‌تواند تأثیر بیشتری داشته باشد. از طرفی همان‌طور که ذکر شد، این روش به‌تنهایی نمی‌تواند حداکثر صرفه‌جویی را به دنبال داشته باشد، پس باید همزمان تعیین ظرفیت ذخیره‌ساز و پروفایل سرعت انجام گردد. از طرفی مشکل اصلی سیستم ذخیره‌ساز، هزینه‌ی بالای آن است که انتظار می‌رود با در نظر گرفتن همزمان دو راهکار فوق، علاوه بر کاهش بیشتر مصرف انرژی، با کاهش ظرفیت ذخیره‌ساز موردنیاز، هزینه سرمایه‌گذاری نیز کاهش یافته و روش اقتصادی‌تر باشد. تاکنون در مطالعات قبلی مقدار بهینه‌ی ذخیره‌ساز موردنیاز سیستم محاسبه نشده است تا بتوان به‌درستی در مورد میزان هزینه و مقایسه‌ی آن با سایر روش‌ها اظهار نظر کرد.

در شکل (۳-۵) اثر متقابل روش‌های مختلف بر یکدیگر نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، بعضی از روش‌های صرفه‌جویی یکدیگر را تقویت می‌کنند و بعضی اثر منفی دارند و برای اینکه حداکثر صرفه‌جویی حاصل گردد باید علاوه بر اینکه از همه راهکارها به‌صورت همزمان استفاده شود، این اثرات متقابل نیز منظور گردد که تاکنون در تحقیقات انجام شده مدنظر قرار نگرفته



شکل (۳-۵) تأثیر متقابل راهکارهای صرفه جویی انرژی [1]

است. لذا در این رساله سعی شده است تا با استفاده همزمان از مشخصه بهینه قطار و ذخیره سازهای ساکن خازنی و استفاده از اثرات مثبت آنها بر یکدیگر، هزینه های سرمایه گذاری و انرژی حداقل شود.

فصل چهارم:

بهینه‌سازی مشخصه

سرعت قطار

۴-۱ مقدمه

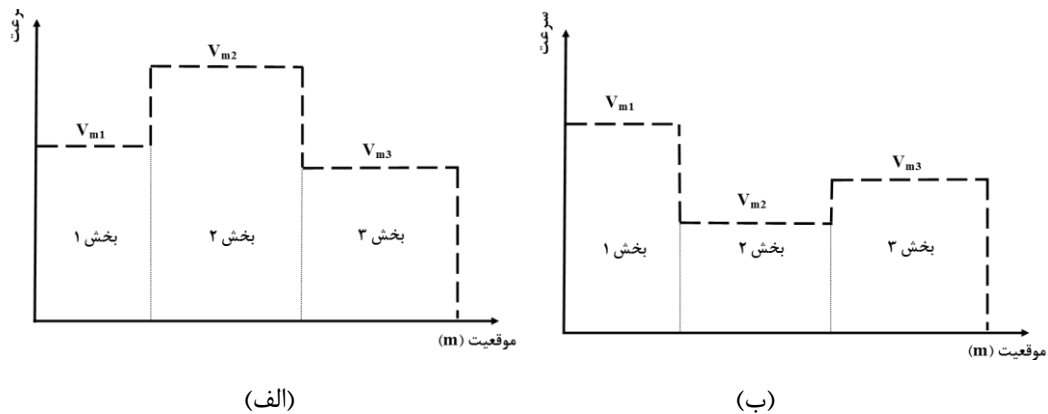
همان‌طور که در فصل قبل اشاره شد، بهینه‌سازی مشخصه سرعت حرکت قطارها در فاصله بین دو ایستگاه متوالی، به دلیل اینکه هزینه زیادی در بر ندارد، در میان محققین از جاذبه زیادی برخوردار است. بهینه‌سازی این مشخصه، در حقیقت یک فرایند بهینه‌سازی مکانیکی است. ماهیت بهینه‌سازی مشخصه سرعت قطارهای درون‌شهری با توجه به فاصله کم بین ایستگاه‌ها، می‌تواند با فرایند مربوط به قطارهای سریع‌السیر متفاوت باشد. در تحقیقات قبلی روش‌هایی برای این کار معرفی شده است که بعضی از آنها پیچیدگی زیادی دارند. درحالی‌که در این بخش سعی شده ضمن حفظ دقت، روش ارائه‌شده تا حد امکان ساده باشد. در ادامه، روش کار به تفصیل بیان شده است.

۴-۲ بهینه‌سازی مشخصه سرعت در سیستم یک‌قطاره

۴-۲-۱ شبیه‌سازی مشخصه سرعت برای فاصله بین دو ایستگاه متوالی

هدف از انجام این بخش، شبیه‌سازی حرکت یک قطار با استفاده از معادلات الکتریکی و مکانیکی حاکم بر آن (مشخصه‌های قطار) و اطلاعات فیزیکی مسیر و تعیین مشخصه سرعت قطار است. با توجه به اینکه پروفایل سرعت معمولاً شامل چهار رژیم کاری شتاب‌گیری، سرعت ثابت، خلاصی و ترمزی است؛ برای تغییر پروفایل می‌توان متغیرهای مختلفی را به‌عنوان متغیر تصمیم یا کنترل در نظر گرفت؛ که در ابتدا باید مسیر موردنظر به زیر بخش‌هایی تقسیم شود که مبنای این تقسیم‌بندی می‌تواند محدودیت سرعت مجاز و تغییر شیب مسیر باشد که با توجه به کوتاهی مسیر فقط محدودیت سرعت در نظر گرفته شده است. از طرفی محدودیت سرعت، خود نیز به پارامترهای مختلفی مانند حداکثر سرعت بهره‌برداری، محل سوزن‌ها و انحنای مسیر بستگی دارد.

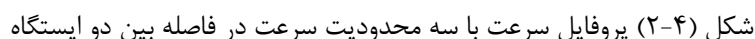
در حالت کلی می‌توان دو وضعیت را برای محدودیت سرعت در مسیر مترو در نظر گرفت که در شکل (۴-۱) نشان داده شده است. شکل (۴-۱ الف) حالتی است که محدودیت سرعت در میانه مسیر بیشتر از ابتدا و انتهای مسیر است و با توجه به اینکه معمولاً سرعت مجاز در ابتدا و انتهای مسیر، به دلیل نزدیکی به ایستگاه و رعایت مسائل ایمنی، کمتر از سرعت مجاز در میانه مسیر است، این حالت عمومی‌تر است و کاربرد بیشتری دارد. شکل (۴-۱ ب) معمولاً در مواردی که محدودیت‌هایی مانند



شکل (۴-۱) محدودیت سرعت در فاصله بین دو ایستگاه قطارشهری

سوزن یا انحنای زیاد در میانه مسیر وجود دارد بکار می‌رود. البته با توجه به شتاب‌گیری در ابتدای مسیر و ترمز‌گیری جهت توقف دقیق در ایستگاه در انتهای مسیر، عملاً سرعت قطار در این بخش‌ها کمتر از مقدار مجاز است و می‌توان بدون تأثیر منفی در دقت نتایج، شکل ساده‌تری را برای پروفایل سرعت در نظر گرفت؛ ولی با این وجود، برای عمومیت بخشیدن بیشتر به شبیه‌سازی، حالت (الف) در نظر گرفته شده و در شکل (۴-۲) نشان داده شده است. در این شکل، V_{max} حداکثر سرعت مجاز بهره‌برداری، V_{min} حداقل سرعت مجازی است که به آسایش مسافران لطمه‌ای وارد نشود و محدودیت‌های سرعت V_{m1} و V_{m3} که بین این دو مقدار هستند؛ مربوط به محدودیت‌های مسیر و ایستگاه‌ها می‌باشند.

در شبیه‌سازی یک‌قطاره، 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، خلاصی و ترمز‌گیری 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 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 شده است. در شکل (۴-۲) حالت کلی یعنی وجود هر چهار رژیم کاری برای حرکت قطار در نظر گرفته شده است. فلوچارت شبیه‌سازی حرکت یک قطار بین دو ایستگاه متوالی در بخش بعد آورده شده است.



با توجه به اینکه معادلات حرکت قطار (معادلات (۲-۱) تا (۲-۵)) غیرخطی می‌باشند و علاوه بر اینکه به زمان وابسته‌اند، تابع سرعت نیز می‌باشند، حل دقیق آن‌ها مشکل است. لذا برای شبیه‌سازی حرکت قطار معمولاً از حالت شبه دینامیکی استفاده می‌شود؛ به این ترتیب که با در نظر گرفتن پله‌های کوچک زمانی، در هر پله با داشتن مقادیر متغیرها در لحظه قبل، مقدار آن‌ها در لحظه فعلی محاسبه می‌شود. با انتخاب Δt به عنوان پله زمانی شبیه‌سازی، با استفاده از معادله (۲-۱)، شتاب قطار (a_t) در هر لحظه حساب می‌شود و با استفاده از معادلات (۴-۱)، (۴-۲) و (۴-۳) موقعیت و سرعت قطار در لحظه مورد نظر محاسبه می‌شوند که V_{t-1} و X_{t-1} سرعت و موقعیت قطار در لحظه قبل (پله قبل شبیه‌سازی) و V_t و X_t سرعت و موقعیت جدید قطار هستند.

$$\Delta X = \frac{V_t^2 - V_{t-1}^2}{2a_t} \quad [\text{m}] \quad (2-4)$$

$$X_t = X_{t-1} + \Delta X \quad [\text{m}] \quad (3-4)$$

قیدهای سرعت نیز همواره کنترل می‌شوند که در هر نقطه از مسیر، سرعت کمتر از حداکثر مقدار مجاز مسیر باشد (رابطه (۴-۴)) و سرعت در ابتدا و انتهای میسر بین دو ایستگاه متوالی صفر باشد (رابطه (۴-۵)). 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^۱ (سرعت تغییرات شتاب)، طبق رابطه (۴-۶)، دقت کافی جهت تعیین دقیق نقطه توقف را داراست.

$$V(x) < V_{\max} \quad 0 < x < L \quad (۴-۶)$$

$$V(x) = 0 \quad x = 0, x = L \quad (۵-۴)$$

$$J = \left| \frac{d^2 V}{dt^2} \right| \leq Jerk_{\max} \quad (۶-۴)$$

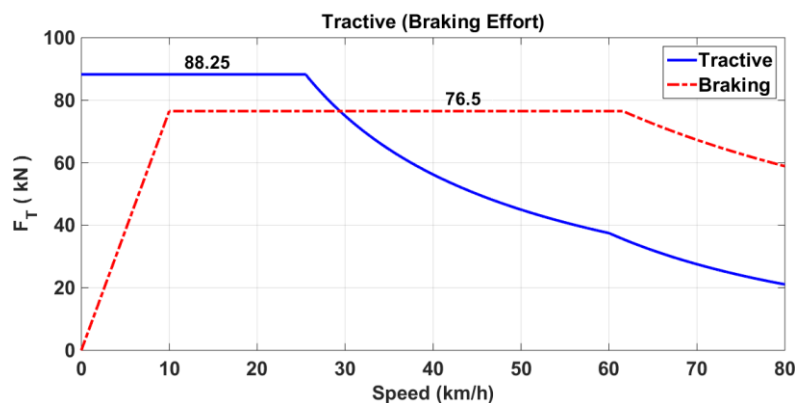
۴-۲-۱-۲ محاسبات توان قطار

توان مصرفی (P_{cons}) و توان بازتولیدی قطار (P_{regen}) در هر لحظه، تحت تأثیر مؤلفه‌های نیروی کشش (F_T) و سرعت قطار (V) طبق روابط (۴-۷) و (۴-۸) محاسبه می‌شوند [32].

$$P_{\text{cons}} = \frac{F_T \times V}{\eta} \quad [\text{kW}] \quad (۷-۴)$$

$$P_{\text{regen}} = F_T \times V \times \eta' \quad [\text{kW}] \quad (۸-۴)$$

رابطه (۴-۷) برای حالت کاری شتاب، سرعت ثابت و خلاصی که $F_T \geq 0$ است و رابطه (۴-۸) برای حالت ترمزی که $F_T < 0$ است، بکار می‌روند. در این معادلات، η بازده موتور الکتریکی، گیربکس و اینورتر و η' بازده مجموعه ژنراتور الکتریکی، گیربکس و اینورتر است. یک نمونه منحنی نیروی کشش قطار (F_T) برحسب سرعت، برای قطارهای سیستم مورد مطالعه (خط ۱ قطارشهری مشهد)، در شکل (۴-۳) نشان داده شده است. در این شکل نیروی کشش در حالت موتوری و قدر مطلق آن در حالت ترمزی نشان داده شده است. سایر مشخصات عددی در پیوست (آ) آمده است.



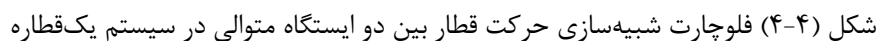
شکل (۴-۳) منحنی نیروی کشش قطار برحسب سرعت

¹ Jerk

۴-۱-۲-۳-۴ فلوجارت شبیه سازی سیستم یک قطاره

همانطور که قبلاً ذکر شد، شبیه‌سازی حرکت قطار در فاصله بین دو ایستگاه متوالی، یک شبیه‌سازی مکانیکی است؛ لذا از آنجاکه برای مطالعه سیستم چندقطاره، مدل الکتریکی قطار موردنیاز است، محاسبه توان مصرفی و بازتولیدی و در نتیجه شبیه‌سازی سیستم یک‌قطاره الزامی است. فلوجارت شبیه‌سازی سیستم یک‌قطاره در فاصله بین دو ایستگاه متوالی در شکل (۴-۴) آورده شده است که به صورت خلاصه توضیح داده می‌شود. ابتدا مشخصات فیزیکی مسیر شامل شماره و موقعیت ایستگاه مبدأ (X_0)، شیب و انحنای مسیر و محدودیت‌های سرعت همراه با اطلاعات قطار شامل جرم (M)، حداکثر شتاب مثبت (a_{max}) و ترمزی (a_{min}) و حداکثر جرک قطار (J_{max}) و پله زمانی شبیه‌سازی و متغیرهای تصمیم مدت زمان حرکت قطار با سرعت ثابت^۱ (t_{cr}) و سرعت کروزینگ (V_{cr}) به عنوان ورودی داده می‌شوند. با استفاده از روابط (۲-۲) تا (۴-۲)، مقاومت مسیر در نقطه شروع محاسبه می‌شود. با شروع حرکت از حالت شتاب‌گیری و استفاده از معادلات فوق، مقادیر مقاومت مسیر و با استفاده از روابط (۴-۱) تا (۴-۳)، سرعت و موقعیت، در پله زمانی بعدی حساب می‌شوند. در هر پله شبیه‌سازی محدودیت سرعت کنترل می‌شود تا در صورت نیاز، حالت کار قطار عوض شود. با توجه به مقدار V_{cr} و t_{cr} ، حالت سرعت ثابت نیز شبیه‌سازی می‌شود؛ سپس در صورت وجود زمان کافی، قطار به حالت خلاصی می‌رود؛ در غیر این صورت مستقیماً وارد ناحیه ترمزی می‌شود. شبیه‌سازی تا جایی ادامه پیدا می‌کند تا سرعت قطار به صفر برسد. در هر پله با استفاده از روابط (۴-۷) و (۴-۸) توان مصرفی و بازتولیدی و در نتیجه انرژی خالص دریافتی E_{net} (تفاضل انرژی مصرفی و بازتولیدی) قطار محاسبه می‌شود. مقدار شتاب در هر لحظه، با استفاده از رابطه (۲-۱) و مشخصه نیروی کشش قطار، با در نظر گرفتن محدودیت جرک محاسبه می‌شود. پارامترهای t_{ref} و a_c همان زمان کروز t_{cr} و شتاب a_t هستند که به صورت موقت تعریف شده‌اند. برای توقف دقیق در محل ایستگاه مقصد، در هر لحظه از شبیه‌سازی، با استفاده از شبیه‌سازی ترمز معکوس موقعیت تغییر حالت کاری برای لحظه بعد، پیش بینی شده است. با انجام این شبیه‌سازی، مدل قطار به عنوان یک بار دینامیکی به دست می‌آید که مقدار توان و موقعیت آن در هر لحظه در شبکه الکتریکی مشخص است.

¹ Cruising time

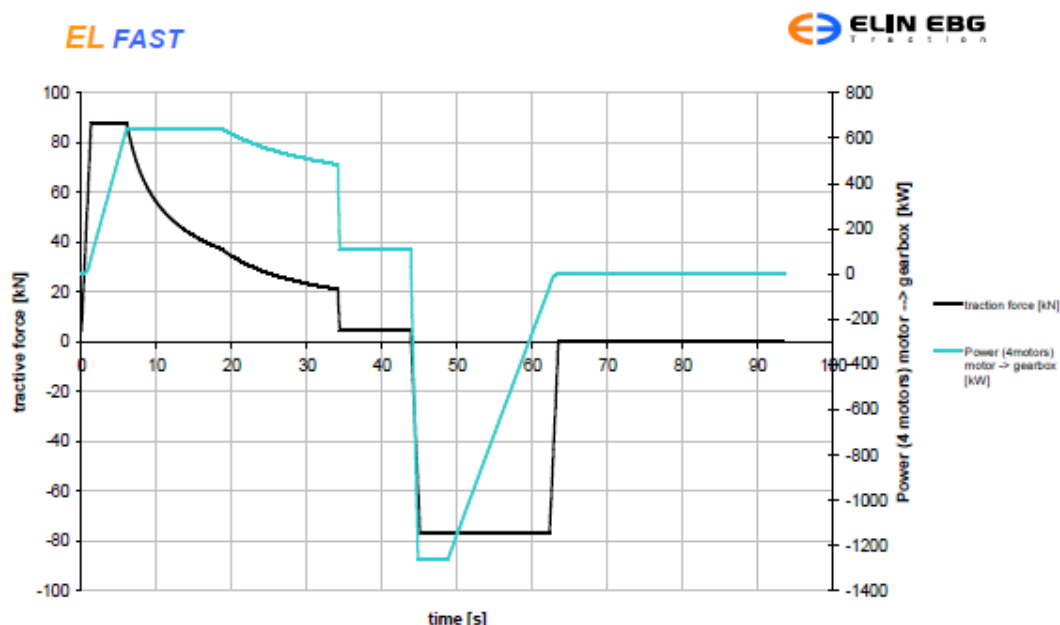


۴-۲-۲ اعتبارسنجی^۱ نتایج شبیه‌سازی یک قطاره با استفاده از خروجی‌های شبیه‌سازی شرکت Elin

دقت و اعتبار شبیه‌سازی، با مقایسه نتایج با شبیه‌سازی انجام‌شده توسط شرکت Elin، سازندهی واگن‌های قطار خط یک مشهد مورد ارزیابی و تأیید قرار گرفته است [106].

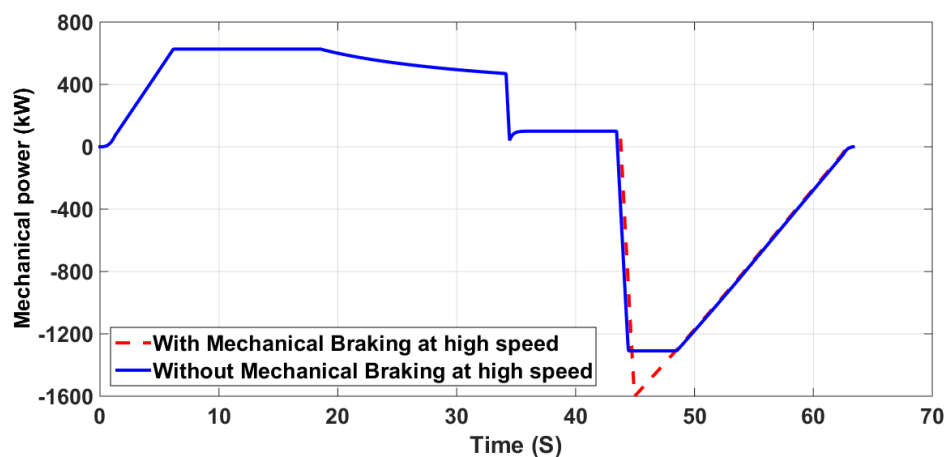
مشخصه‌های نیروی کشش و توان مکانیکی برحسب زمان در شبیه‌سازی Elin در شکل (۴-۴) آورده شده است. منحنی‌های مشابه حاصل از خروجی شبیه‌سازی مورد استفاده در این رساله، نیز در شکل (۴-۶) نشان داده شده است که حاکی از شباهت زیاد نتایج است. منحنی قرمز رنگ در شکل (۴-۶)، با در نظر گرفتن ترمز مکانیکی در سرعت بالا است (به دلیل وجود ترمز مکانیکی مقدار توان بیشتری اعمال شده است. درحالی‌که اگر این بخش از ترمز نباشد، قدرت ترمزی کمتر است). البته این بخش در توان الکتریکی و انرژی بازتولیدی در نظر گرفته نمی‌شود.

مشخصه‌های سرعت و شتاب برحسب زمان، طبق شبیه‌سازی Elin در شکل (۴-۷) نشان داده شده است. منحنی سرعت بر اساس شبیه‌سازی انجام‌شده، در شکل (۴-۸) آورده شده است که مشابه نتایج Elin است. همان‌طور که در شکل‌ها دیده می‌شود، در ناحیه موتوری (شتاب‌گیری) توان تا مقدار

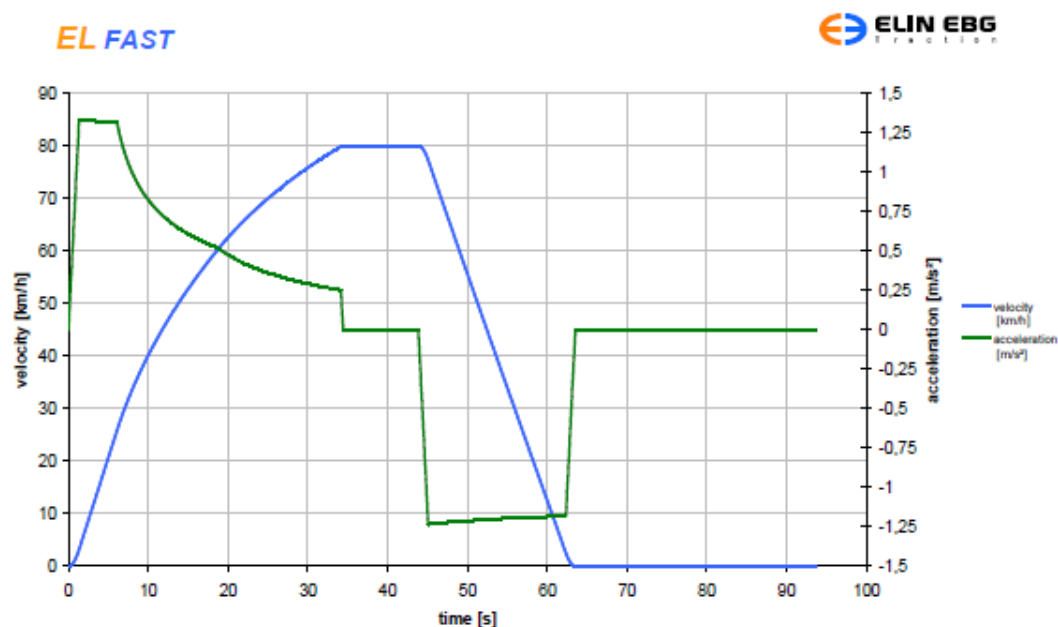


شکل (۴-۵) مشخصه نیروی کشش و توان مکانیکی برحسب زمان قطار خط ۱ مشهد - حداکثر وزن واگن (AW3) - سفر با حداقل زمان [106]

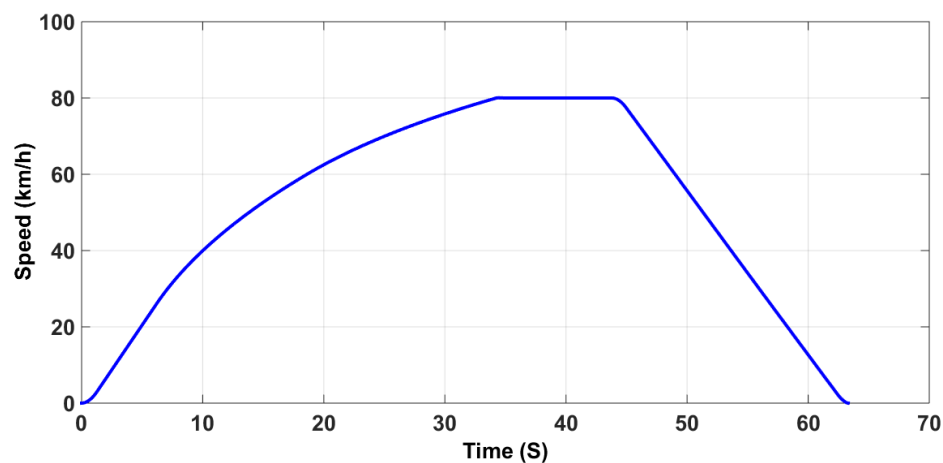
¹ Validation



شکل (۴-۶) مشخصه شبیه‌سازی شده توان مکانیکی برحسب زمان قطار خط ۱ مشهد - سفر با حداقل زمان



شکل (۴-۷) مشخصه سرعت و شتاب برحسب زمان قطار خط ۱ مشهد - حداکثر وزن - حداقل زمان سفر [106]



شکل (۴-۸) مشخصه شبیه‌سازی شده سرعت برحسب زمان قطار خط ۱ مشهد (AW3) - سفر با حداقل زمان

نامی افزایش یافته سپس طبق مشخصه، وارد ناحیه توان ثابت می‌شود و تا زمانی که سرعت به مقدار

حداکثر خود برسد، گشتاور تولیدی کاهش می‌یابد. در ناحیه سرعت ثابت، مقدار کمی نیرو جهت پیش بردن قطار و حفظ سرعت استفاده می‌شود. در ناحیه ترمزی، نیرو و توان منفی شده که به معنی بازتولید است. این روند تا زمانی که قطار توقف کند، ادامه دارد. لازم به ذکر است که در این منحنی‌ها حالت خلاصی وجود ندارد زیرا هدف از شبیه‌سازی، حالت حداقل زمان سفر بوده است که قطار با حداکثر شتاب ممکن تا سرعت بیشینه، شتاب می‌گیرد، سپس سرعت ثابت نگه‌داشته شده و در انتها با حداکثر شتاب منفی ممکن، ترمز گرفته می‌شود تا قطار در ایستگاه بعدی متوقف شود (در صورت وجود حالت خلاصی، زمان سفر افزایش پیدا می‌کند).

۴-۲-۳ تعیین کلیه پروفایل‌های سرعت ممکن در یک فاصله بین ایستگاهی^۱

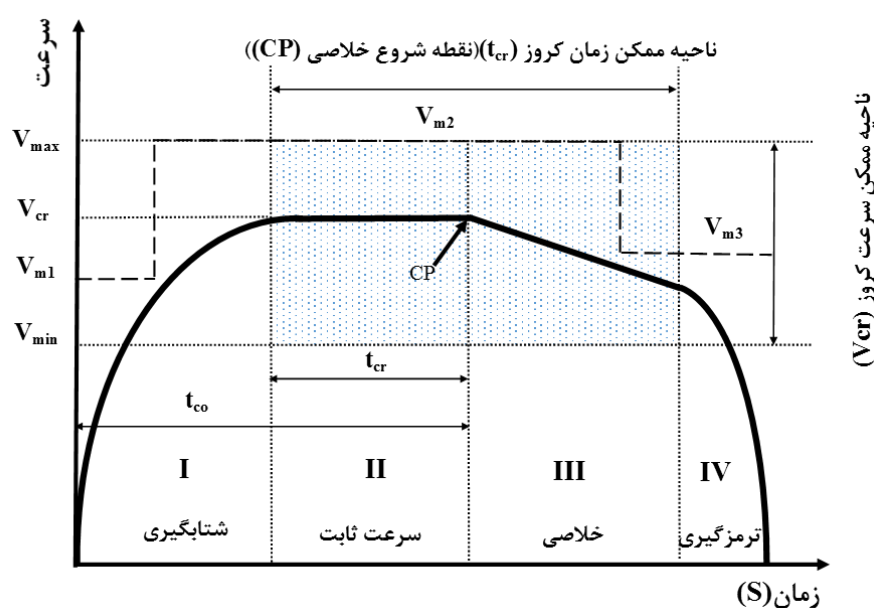
برای بهینه‌سازی پروفایل سرعت قطار با هدف حداقل کردن انرژی مصرفی، در این رساله ابتدا کلیه حالت‌های ممکن شبیه‌سازی شده است؛ سپس از میان آن‌ها، پاسخی که کمترین انرژی را دارد، به‌عنوان پاسخ بهینه تعیین شده است. در این بخش نحوه به دست آوردن فضای پاسخ‌های ممکن توضیح داده شده است. در مشخصه سرعت قطار، چهار ناحیه کاری وجود دارد که با تغییر مدت زمان هریک از آن‌ها، می‌توان مشخصه متفاوتی به دست آورد.

پارامترهای اصلی که برای تغییر مشخصه سرعت استفاده می‌شوند عبارتند از: حداکثر سرعت قطار، مقدار شتاب حالت موتوری و ترمزی و تعداد و محل نقاط خلاصی و شتاب‌گیری مجدد. همانطور که در فصل ۳ توضیح داده شد، طبق اصل کنترل بهینه، بهترین حالت برای شتاب موتوری و ترمزی، انتخاب مقدار حداکثر آن‌ها است؛ لذا در این رساله نیز همین مقادیر انتخاب شده‌اند. با توجه به کوتاه بودن فاصله بین ایستگاه‌ها در قطارشهری و همچنین پیشنهاد راهکاری ساده و اجرایی برای راهبران قطار در راهبری، موضوع شتاب‌گیری مجدد نیز در نظر گرفته نشده است (ضمن اینکه در بخش بعد توضیح داده شده است که این کار منجر به تولید پاسخ‌های غیر بهینه می‌شود). بنابراین دو پارامتر تصمیم‌گیری باقی مانده‌اند؛ یکی حداکثر سرعتی که قطار به آن می‌رسد و پس از آن سرعت ثابت نگه داشته می‌شود (V_{cr}) و دیگری مدت زمان حرکت با سرعت ثابت (t_{cr}) که متناظر با نقطه خلاصی قطار است. مشخصه سرعت برحسب زمان، همراه با محدوده تغییرات متغیرهای تصمیم در شکل (۴-۹)

^۱ Inter-station (IS)

نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که این منحنی، مشابه پروفایل سرعت یعنی مشخصه سرعت برحسب مکان (شکل (۴-۲)) است. لازم به توضیح است که زمان خلاصی (t_{co}) نیز می‌تواند به‌عنوان پارامتر تصمیم انتخاب شود؛ ولی دلیل اینکه زمان سرعت ثابت (t_{cr}) به‌عنوان پارامتر تصمیم انتخاب شده است، این است که t_{co} به V_{cr} وابسته است (اول باید زمان رسیدن به V_{cr} را به دست آورد سپس زمان کروز را به آن اضافه کرد).

در این شکل فرض شده است که ابتدا قطار تا سرعت V_{cr} شتاب می‌گیرد؛ سپس سرعت آن برای مدت t_{cr} در این مقدار ثابت نگه‌داشته می‌شود و پس از گذشت زمان t_{cr} از لحظه رسیدن به V_{cr} ، خلاص می‌شود (توان ورودی موتور صفر می‌شود) و در نهایت با رسیدن به محدوده ایستگاه وارد حالت ترمزی می‌گردد و متوقف می‌شود. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، برای V_{cr} ناحیه‌ای در نظر گرفته شده که به حداکثر سرعت مجاز در مسیر (V_{max}) و حداقل سرعتی که به آسایش مسافران لطمه‌ای وارد نکند (V_{min})، محدود شده است. موقعیت نقطه شروع خلاصی (CP) که متناظر با زمان شروع خلاصی t_{co} است، در شکل نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۴-۹) دیده می‌شود، t_{cr} می‌تواند بین صفر تا حداکثر مقدار ممکن تغییر کند. به عبارت دیگر، ناحیه مربوط به t_{cr} ، به لحظه رسیدن به حداکثر



شکل (۴-۹) مشخصه سرعت بر حسب زمان با محدوده ممکن تغییرات متغیرهای تصمیم در فاصله بین دو ایستگاه

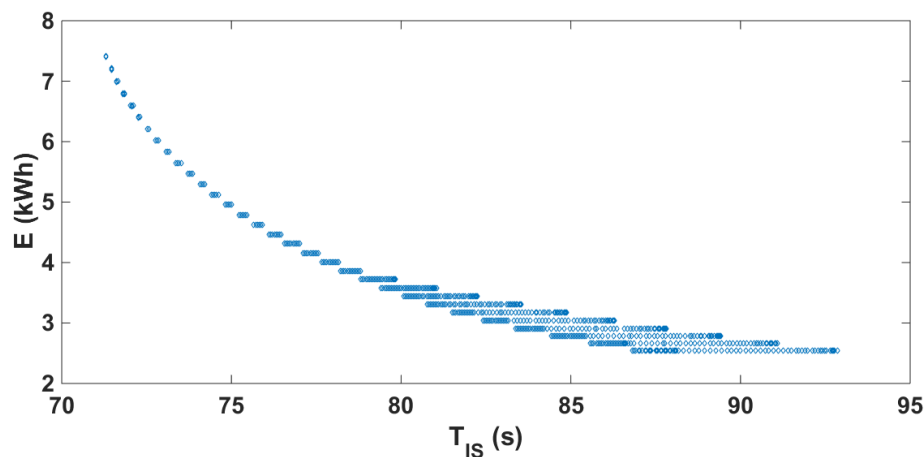
سرعت دلخواه و ابتدای ناحیه ترمزی محصور است. با انتخاب مقادیر مختلف برای متغیرهای تصمیم، می‌توان انرژی مصرفی و زمان سفر متناظر با آن را به وسیله شبیه‌سازی حرکت قطار محاسبه نمود. اگر هدف فقط پیدا کردن پاسخ‌های ممکن برای یک زمان سفر از پیش تعیین شده باشد، باید از بین نتایج شبیه‌سازی شده، پاسخ‌هایی که زمان سفر آن‌ها برابر مقدار معین است، را انتخاب کرد؛ ولی ویژگی روش معرفی شده این است که تمام حالت‌های ممکن را، با تمام زمان سفرهای ممکن بین دو ایستگاه می‌دهد؛ که این نتایج می‌تواند برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی مفید باشد. شاید انتخاب زمان سفر غیر از آنچه در برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده است، بتواند به پاسخ‌های بهتری در کل شبکه منجر شود؛ که به این موضوع در بخش (۳-۴) پرداخته شده است. اگر تمام حالت‌های ممکن شبیه‌سازی شوند، گراف انرژی بر حسب زمان سفر برای یک فاصله‌ی بین دو ایستگاه متوالی، مشابه شکل (۴-۱۰) به دست می‌آید. در گراف شکل (۴-۱۰) مشاهده می‌شود که هرچه زمان سفر بیشتر شود، انرژی مصرفی کمتر خواهد شد؛ لذا باید مصالحه‌ای بین آن‌ها برقرار شود.

۴-۲-۴ محاسبه انرژی و زمان سفر در فاصله بین ایستگاهی

زمان سفر بین دو ایستگاه متوالی T_{IS} را می‌توان برای هر حالت شبیه‌سازی از رابطه (۴-۹) به

دست آورد.

$$T_{IS} = \int_0^L \frac{1}{v} dx \quad (۴-۹)$$



شکل (۴-۱۰) گراف انرژی- زمان برای یک فاصله بین ایستگاهی نمونه

درواقع این زمان، مجموع پله‌های زمانی شبیه‌سازی است که در فلوچارت شکل (۴-۴) نیز نشان داده شده‌اند. یعنی مدت زمانی است که سرعت از مقدار صفر در ایستگاه مبدأ زیاد می‌شود تا زمانی که دوباره در ایستگاه مقصد به صفر می‌رسد (متوقف می‌شود). با انتخاب مقادیر مختلف برای پارامترهای تصمیم، تغییرات T_{IS} برای هر فاصله بین ایستگاهی بین یک مقدار حداقل $T_{IS \min}$ متناظر با مشخصه سرعت حداقل زمان ممکن (بیشترین مقدار V_{cr} و بدون حالت خلاصی) و یک مقدار حداکثر $T_{IS \max}$ (متناظر با کمترین سرعت کروز و زمان کروز صفر) خواهد بود که در رابطه (۴-۱۰) نشان داده شده است.

$$T_{IS \min} < T_{IS} < T_{IS \max} \quad (۴-۱۰)$$

انرژی مصرفی قطار (E_{cons}) در هر فاصله بین ایستگاهی را می‌توان از انتگرال‌گیری توان مصرفی P_{cons} در مدت زمان حرکت قطار طبق رابطه (۴-۱۱) به دست آورد.

$$E_{cons} = \int_0^{T_{IS}} P_{cons}(t) dt \quad (۴-۱۱)$$

به صورت مشابه می‌توان انرژی بازتولیدی ترمزی E_{regen} را از جمع توان‌های بازتولیدی لحظه‌ای

قطار (P_{regen}) طبق رابطه (۴-۱۲) محاسبه کرد.

$$E_{regen} = \int_0^{T_{IS}} P_{regen}(t) dt \quad (۴-۱۲)$$

انرژی خالص قطار (E_{net})، تفاضل انرژی مصرفی و بازتولیدی قطار است. سؤالی که در اینجا مطرح می‌شود این است که از انرژی بازتولیدی ترمزی که قطار امکان تولید بالقوه آن را دارد، چه مقدار را می‌تواند به شبکه تحویل دهد؟ پاسخ این است که میزان استفاده از انرژی بازتولیدی ترمزی به شرایط بقیه قطارها و شبکه بستگی دارد؛ لذا ضریبی به این منظور تعریف شده است که در ادامه به توصیف آن پرداخته شده است.

۴-۲-۱- نرخ استفاده از انرژی بازتولیدی ترمزی^۱

موضوعی که تاکنون در مطالعات قبلی بندرت به آن پرداخته شده است، این است که همواره سعی بر این بوده است که پروفایل سرعت طوری محاسبه شود که انرژی مصرفی حداقل گردد. در حالی که

^۱ Regenerative braking Energy Recovery Rate (RERR)

در کلیه سیستم‌های امروزی، انرژی بازتولیدی ترمزی و استفاده از آن نیز مطرح است. به عبارت دیگر انرژی خالص دریافتی توسط قطار باید مدنظر قرار گیرد که می‌توان آن را با رابطه (۴-۱۳) بیان کرد.

$$E_{\text{net}} = E_{\text{cons}} - \alpha E_{\text{regen}} \quad (4-13)$$

در معادله فوق، E_{cons} انرژی کل مصرفی، E_{net} انرژی خالص دریافتی، E_{regen} انرژی بازتولیدی ترمزی برای حرکت قطار در یک فاصله بین دو ایستگاه متوالی، همه برحسب kWh هستند. طبق رابطه (۴-۱۴)، α ضریبی است که بیانگر میزان استفاده مجدد از انرژی بازتولیدی است.

$$\alpha = \frac{\text{مجموع انرژی بازتولیدی ترمزی استفاده شده قطار در فاصله بین ایستگاهی}}{\text{مجموع انرژی بازتولیدی ترمزی یک قطار در فاصله بین ایستگاهی}} \quad (4-14)$$

هر مقدار از انرژی بازتولیدی که به هر علتی نتواند به شبکه تحویل داده شود، باعث افزایش ولتاژ قطار خواهد شد؛ لذا برای جلوگیری از آسیب احتمالی قطار و عمل کردن سیستم حفاظتی، مقاومت‌های ترمزی روی قطار نصب شده‌اند که توسط یک سیستم کنترلی وارد مدار شده و این انرژی اضافی را به صورت حرارت تلف می‌کنند تا از اضافه ولتاژ جلوگیری شود. بنابراین رابطه (۴-۱۴) را می‌توان به صورت رابطه (۴-۱۵) نیز نمایش داد. در این رابطه E_{resist} مقدار انرژی است که در مقاومت‌های ترمزی روی قطار به صورت حرارت تلف می‌شود.

$$\alpha = \frac{E_{\text{regen}} - E_{\text{resist}}}{E_{\text{regen}}} \quad (4-15)$$

با توجه به روابط (۴-۱۴) و (۴-۱۵) واضح است که همواره $0 \leq \alpha \leq 1$ خواهد بود.

اگر بخواهیم یک قطار را به تنهایی بررسی کنیم، چون قطار دیگری در مجاورت آن وجود ندارد و به عبارت دیگر شبکه‌ای برای جذب انرژی بازتولیدی نیست، می‌توان α را صفر فرض کرد و جبهه پرتو را برای انرژی مصرفی به دست آورد. شاید بتوان گفت در حالت یک قطار تعریف α بی‌معنی است مگر اینکه سیستم ذخیره‌ساز انرژی داشته باشیم یا انرژی به مصرف سایر مصرف‌کننده‌های کمکی برسد؛ زیرا وقتی شبکه و سایر قطارها در نظر گرفته نشوند، با توجه به اینکه پست‌ها نیز معمولاً بدون قابلیت برگشت انرژی فرض می‌شوند، جایی برای استفاده مجدد انرژی بازتولیدی ترمزی وجود ندارد. ولی اگر قطار در یک شبکه فرض شود، α معمولاً عددی بزرگ‌تر از صفر خواهد بود. ضریب α به پارامترهای مختلفی نظیر ساختار شبکه، فاصله زمانی بین حرکت قطارها، جدول زمانی حرکت قطارها و زمان یک

سفر کامل وابسته است و حتی اگر موارد فوق ثابت باشند، پروفایل سرعت خود قطار و سایر قطارهای شبکه می‌تواند بر مقدار ضریب فوق تأثیرگذار باشد. در تحقیقات قبلی معمولاً بهینه‌سازی پروفایل سرعت برای هر فاصله بین دو ایستگاه فقط با هدف حداقل کردن انرژی مصرفی بوده است و در موارد جزئی که α غیر صفر در نظر گرفته شده است، برای آن مقدار ثابتی فرض شده است؛ درحالی‌که همان‌طور که اشاره شد، مقدار ضریب اولاً ثابت نیست و ثانیاً باید قطار در شبکه قرار گیرد تا بسته به وضعیت، مقداری برای آن به دست آید.

باتوجه به مطالب ذکر شده، شاید بنظر برسد که در این فصل که هدف بررسی سیستم یک‌قطاره است، استفاده از ضریب α و بحث درباره تأثیر آن، بی‌معنی باشد؛ ولی باتوجه به اینکه قرار است در بخش بعد برای سیستم چندقطاره، از نتایج این بخش استفاده شود، لازم است که اثر تغییرات α بر نتایج بهینه‌سازی بطور کامل مورد بررسی قرار گیرد. میزان تأثیرگذاری متغیر بودن α ، در بخش تحلیل نتایج همین فصل بصورت کمی نشان داده شده است و در بخش ۴-۳ نیز تأثیر آن مجدداً مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

۴-۲-۵ فرآیند بهینه‌سازی پروفایل سرعت

هدف از انجام این بخش، به دست آوردن پروفایل‌های سرعتی است که در آن‌ها انرژی خالص دریافتی قطار در یک فاصله بین ایستگاهی حداقل شود. برای تولید همه پروفایل‌های سرعت ممکن، دو متغیر تصمیم مدت زمان حرکت قطار با سرعت ثابت (t_{cr}) و سرعت کروزینگ (V_{cr}) در نظر گرفته شده‌اند. از طرفی هر مقدار ممکن انتخابی برای V_{cr} و t_{cr} منجر به به‌دست آمدن یک مشخصه سرعت منحصر بفرد برای قطار در آن فاصله بین ایستگاهی می‌شود که معادل یک نقطه در فضای دوبعدی انرژی-زمان است. بعبارت دیگر بهینه‌سازی می‌تواند به معنی پیدا کردن زوج نقطه‌های (انرژی-زمان) باشد که در آن‌ها، انرژی و زمان سفر حداقل باشند.

می‌توان برای یک زمان سفر مشخص، حالت‌های ممکن و بهینه را به دست آورد و یا همان‌طور که قبلاً گفته شد، برای زمان سفر نیز یک محدوده در نظر گرفت و یک جبهه پرتو برای گراف انرژی-زمان به دست آورد. جبهه پرتوی فوق را می‌توان با استفاده روش‌های جستجو و مرتب‌سازی محاسباتی

یا هوشمند به دست آورد. در اینجا با توجه به اینکه تعداد پاسخ‌ها زیاد نیست (فضای مقادیر توابع هدف کوچک است) و از طرفی محاسبات را می‌توان بصورت غیر برخط^۱ نیز انجام داد، برای به دست آوردن جواب‌های بهینه مطلق (پاسخ‌های غیر مغلوب)، 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 آمده است [107]. روش کار به این ترتیب است که با فرض یک مقدار ثابت برای α ، تمام پاسخ‌های ممکن برای مشخصه سرعت در آن فاصله بین ایستگاهی محاسبه می‌شوند (کلیه زوج‌های $(E_{\text{net}}$ و T_{IS}). اگر تعداد این پاسخ‌ها برای فاصله ایستگاهی موردنظر، N باشد، انرژی خالص و زمان سفر تمام حالت‌های ممکن به دست آمده، با یکدیگر مقایسه می‌شوند و جواب‌هایی که هیچ‌وقت در مقایسه با سایر جواب‌ها مغلوب نمی‌شوند، به عنوان پاسخ‌های بهینه یا جبهه پرتو انتخاب می‌شوند و مقادیر متغیرهای تصمیم متناظر با آن‌ها (زوج‌های $(t_{\text{cr}}$ و V_{cr}))، به عنوان مجموعه پرتو^۲ انتخاب می‌شوند تا در شبیه‌سازی کل سیستم استفاده شوند. تعداد پاسخ‌های بهینه واقع بر روی جبهه پرتو N_p خواهد بود و همواره $N_p < N$ است.

شبیه‌سازی در فضای نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. الگوریتم پیشنهادی جستجوی کاملی^۳ را انجام می‌دهد و پیدا کردن پاسخ‌های بهینه را تضمین می‌کند و به اندازه کافی سریع و دقیق است و زمان شبیه‌سازی هم قابل قبول است [108].

معادله بهینه‌سازی چندهدفه را می‌توان به شکل رابطه (۴-۱۶) نشان داد:

$$\min J_t(k), J_e(k), \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (4-16)$$

که k شماره پاسخ موردنظر است. توابع هدف، همان مقادیر زمان سفر و انرژی خالص روابط (۴-۹) و

(۴-۱۳) هستند که با اضافه شدن شاخص k به صورت روابط (۴-۱۷) و (۴-۱۸) بازنویسی شده‌اند.

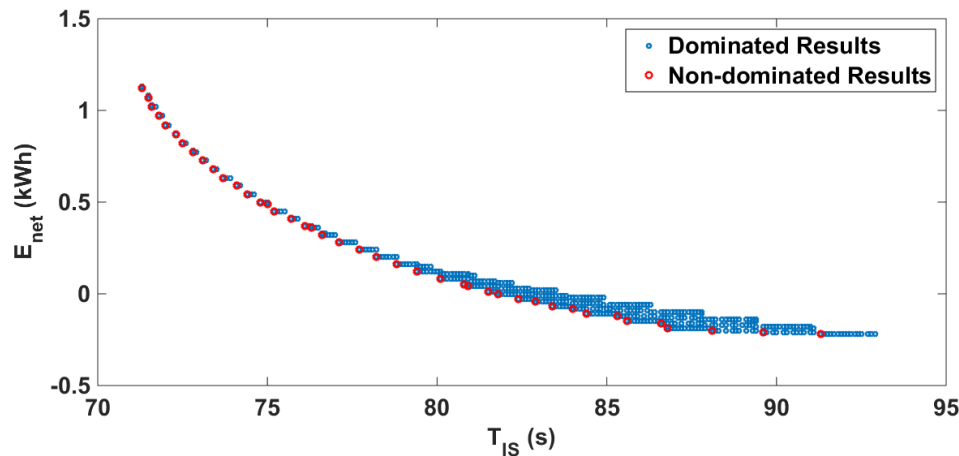
$$J_t(k) = T_{\text{IS}}(k) = \int_0^L \frac{1}{v} dx \quad (4-17)$$

$$J_e(k) = E_{\text{net}}(k) = E_{\text{cons}}(k) - \alpha E_{\text{regen}}(k) \quad (4-18)$$

¹ Offline

² Pareto Set

³ Exhaustive Search



شکل (۴-۱۱) پاسخ‌های مغلوب و غیرمغلوب (جبهه پرتو) برای یک فاصله بین ایستگاهی نمونه

قیدهای مرتبط با این بهینه‌سازی، کلیه معادلات (۲-۱) تا (۲-۵) و (۴-۱) تا (۴-۱۵) هستند، که چون هنگام بدست آوردن مجموعه پاسخ‌های ممکن، قیدهای فوق مدنظر قرار گرفته‌اند، در این فرایند بهینه‌سازی نیز رعایت شده‌اند و از ذکر مجدد آنها خودداری شده است. با توجه به ساده و واضح بودن الگوریتم مرتب‌سازی غیرمغلوب، نیازی به توضیحات بیشتر نیست. توضیحات تکمیلی در [107] ارائه شده است؛ لذا فقط برای یک فاصله بین ایستگاهی بعنوان نمونه، پاسخ‌های مغلوب و غیر مغلوب در شکل (۴-۱۱) نشان داده شده است. در این شکل پاسخ‌های غیر مغلوب یعنی جبهه پرتو با نقاط قرمز رنگ مشخص شده‌اند.

۴-۲-۶ نتایج شبیه‌سازی فاصله بین ایستگاهی در مسیر سراسیابی و سربالایی

در ادامه، منحنی‌های استخراج‌شده از شبیه‌سازی یک قطاره برای سیستم مورد مطالعه (مسیر خط ۱ مشهد)، برای فاصله بین دو ایستگاه فلسطین و طالقانی به طول ۹۱۷ متر، در هر دو مسیر رفت و برگشت آورده شده است. دلیل انتخاب این قسمت از مسیر این است که دارای شیب متوسطی است و رفتار هر دو حالت سراسیابی و سربالایی در شبیه‌سازی قابل مشاهده است. از طرفی شیب خیلی زیاد نیست که رفتارهای خاص بروز کند. البته در بخش‌های دیگری از مسیر شیب‌های زیاد تا حدود ۴ درصد نیز وجود دارد که در بررسی‌های دیگر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و رفتار مسیر در حالت‌های خاص نیز مدنظر قرار گرفته است. ارتفاع ایستگاه فلسطین (شماره ۱۴ در شبیه‌سازی حرکت از وکیل‌آباد به سمت

غدير و شماره ۳۱ در مسير برگشت) ۱۷۵,۲ متر پايين‌تر از ايستگاه وکیل‌آباد (مرجع) و ارتفاع ايستگاه طالقانی (شماره ۱۵ در شبیه‌سازی حرکت از وکیل‌آباد به سمت غدير و شماره ۳۰ در مسير برگشت) ۱۸۲,۶ متر پايين‌تر از ايستگاه وکیل‌آباد (اختلاف ارتفاع ۷,۴ متر و شیب متوسط ۰,۸ درصد) است. تعداد واگن‌ها در هر قطار ۲ و جرم کل هر واگن ۶۰ تن در نظر گرفته شده است. فاصله بين دو ايستگاه، شیب و انحنای مسير از جدول مشخصات خط استخراج می‌شود. V_{cr} سرعت کروزینگ است که برای پوشش ناحیه حداکثری پاسخ‌های ممکن، بين ۴۰ تا ۷۰ کیلومتر بر ساعت انتخاب شده و با پله‌های ۱ km/h افزایش داده می‌شود. t_{cr} از صفر تا حد ممکن (تا جایی که در مسافت باقیمانده امکان ترمز با حداکثر شتاب مجاز و توقف دقیق در ايستگاه باشد) با پله‌های ۱ ثانیه‌ای افزایش می‌یابد. برای ضریب α مقادیر ثابتی جهت مقایسه تغییرات این ضریب و تأثیر آن بر انرژی خالص مصرفی در نظر گرفته شده است و خروجی‌های زیر به‌دست‌آمده‌اند:

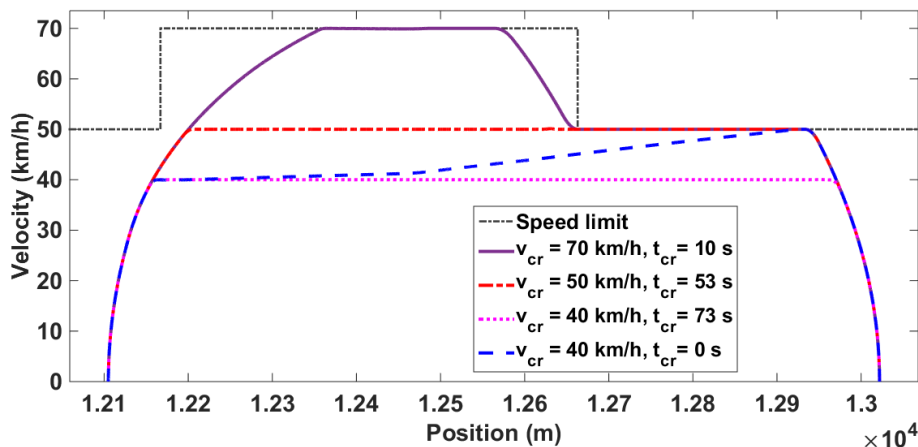
- ✓ پروفایل سرعت برحسب مکان برای هر حالت ورودی V_{cr} و t_{cr}
- ✓ مشخصه‌های توان بر حسب زمان سفر و برای همه حالت‌های متغیرهای تصمیم V_{cr} و t_{cr}
- ✓ گراف‌های انرژی برحسب زمان برای کلیه حالات ممکن برای متغیرهای تصمیم V_{cr} و t_{cr}
- ✓ رویه‌های زمان سفر (T_{IS}) و انرژی مصرفی و انرژی بازتولیدی و انرژی خالص مصرفی برحسب متغیرهای سرعت کروزینگ و زمان خلاصی

نتایج در شکل‌های (۴-۱۲) تا (۴-۲۵) نشان داده شده و در ادامه به تحلیل آن‌ها پرداخته شده است.

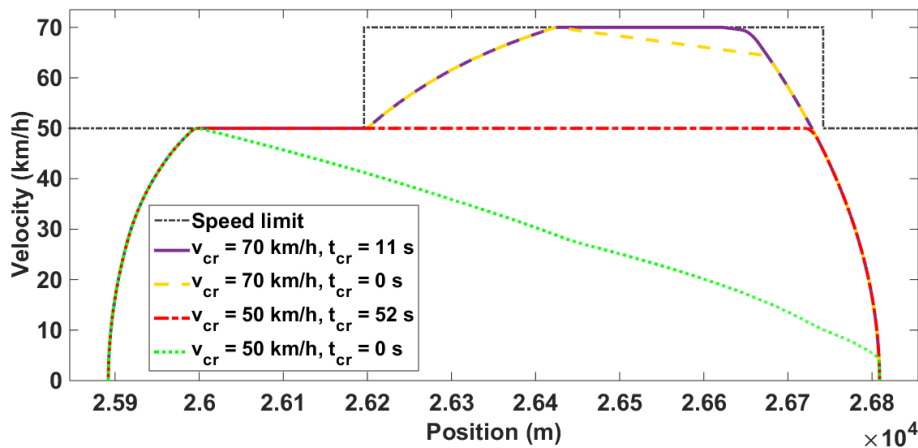
۴-۲-۷ تحلیل نتایج شبیه‌سازی یک قطاره:

۴-۲-۷-۱ تحلیل منحنی‌های سرعت و شتاب و توان

- ابتدا تأثیر تغییرات پارامترهای تصمیم V_{cr} و t_{cr} بر مشخصه سرعت مورد بررسی قرار می‌گیرد.
- ❖ تغییرات پروفایل سرعت بر حسب مکان در شکل‌های (۴-۱۲) و (۴-۱۳) نشان داده شده است. نکته اصلی در این مشخصه‌ها این است که با تغییر پارامترهای تصمیم، در همه شرایط، نقطه محل توقف قطار در ايستگاه مقصد، ثابت است و محدودیت‌های سرعت در طول مسير نیز بدرستی رعایت شده‌اند.



شکل (۴-۱۲) پروفایل سرعت برحسب مکان مسیر سراسیابی برای مقادیر مختلف V_{cr} و t_{cr}



شکل (۴-۱۳) پروفایل سرعت برحسب مکان مسیر سربالایی برای مقادیر مختلف V_{cr} و t_{cr}

❖ همانطور که در شکل‌های (۴-۱۴) و (۴-۱۵) مشاهده می‌شود، با افزایش V_{cr} ، زمان سفر در

هر دو مسیر سراسیابی و سربالایی کاهش پیدا می‌کند.

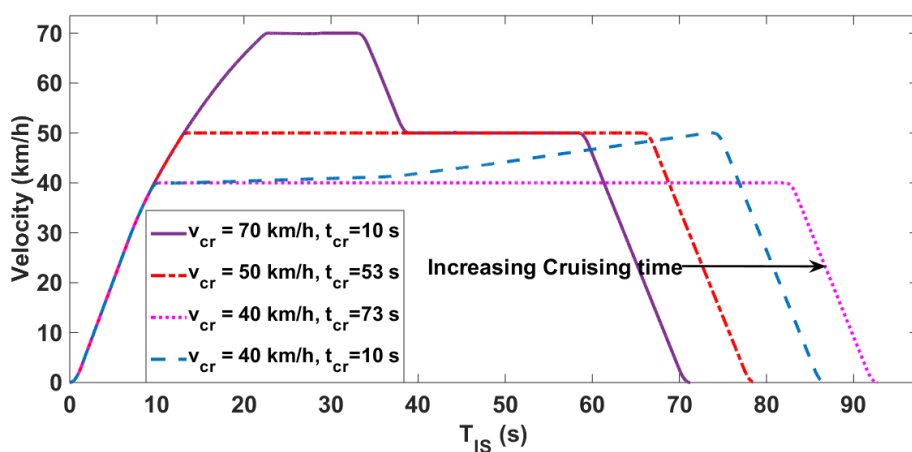
❖ هرچه قطار دیرتر به حالت خلاصی وارد شود یعنی مدت بیشتری با سرعت ثابت حرکت کند

(افزایش t_{cr})، در مسیر سربالایی زمان سفر کاهش می‌یابد که منطقی است چون از افت سرعت

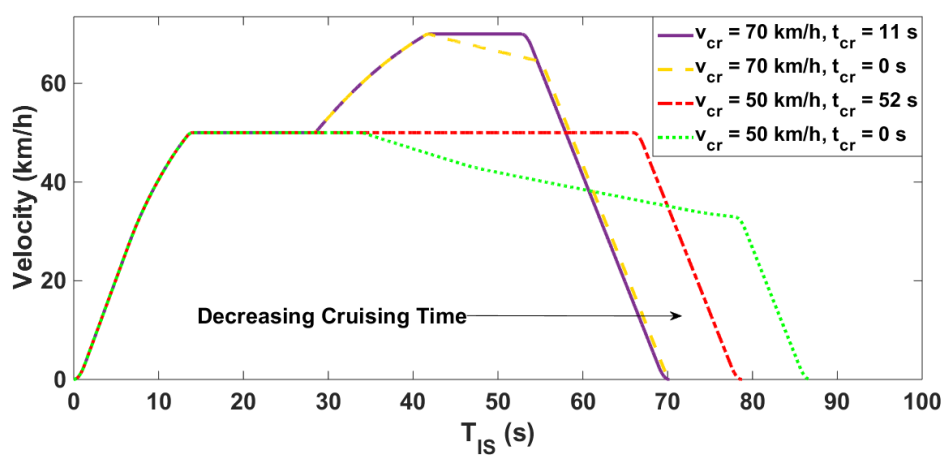
جلوگیری شده است (شکل ۴-۱۵)؛ ولی در سراسیابی چون کروز کردن جلو افزایش سرعت را

می‌گیرد انتظار داریم که زمان سفر بیشتر شود ولی تغییرات زمان سفر ناچیز است (شکل ۴-

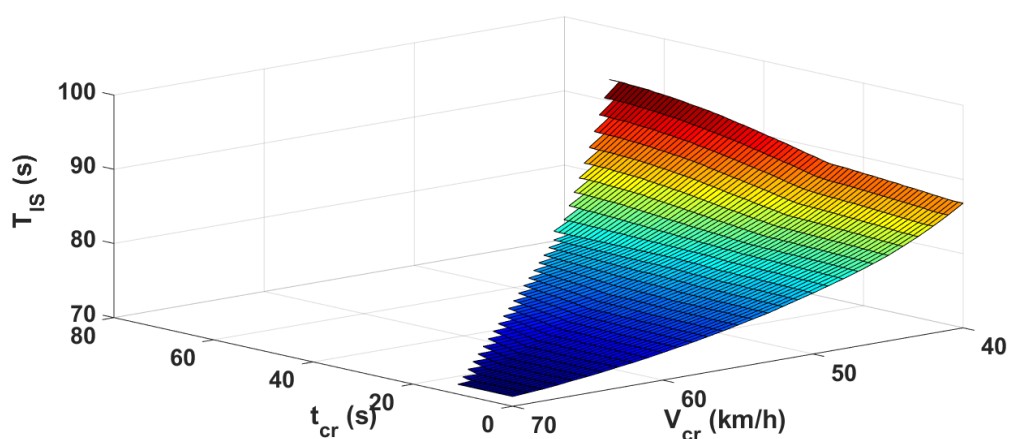
۱۴). البته اگر شیب مسیر بیشتر باشد، این اختلاف زمان بیشتر خواهد شد.



شکل (۴-۱۴) پروفایل سرعت برحسب زمان مسیر سرایشی برای مقادیر مختلف V_{cr} و t_{cr}

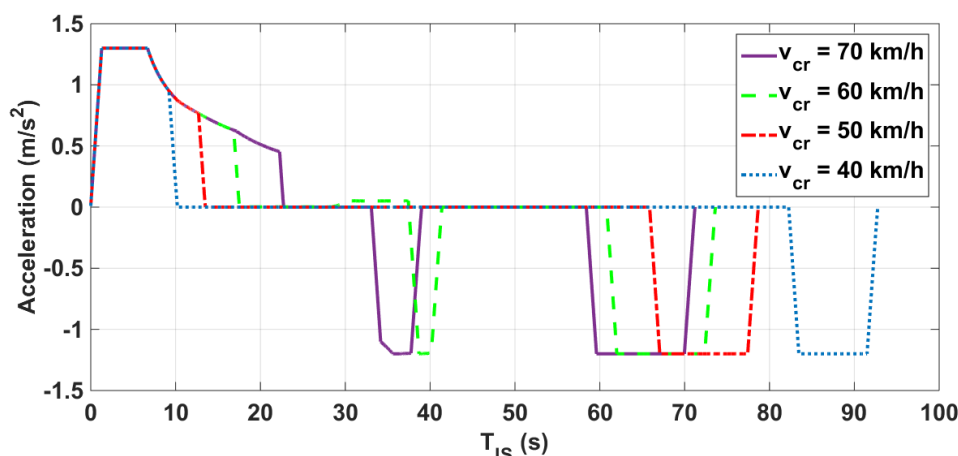


شکل (۴-۱۵) پروفایل سرعت برحسب زمان مسیر سرالایی برای مقادیر مختلف V_{cr} و t_{cr}

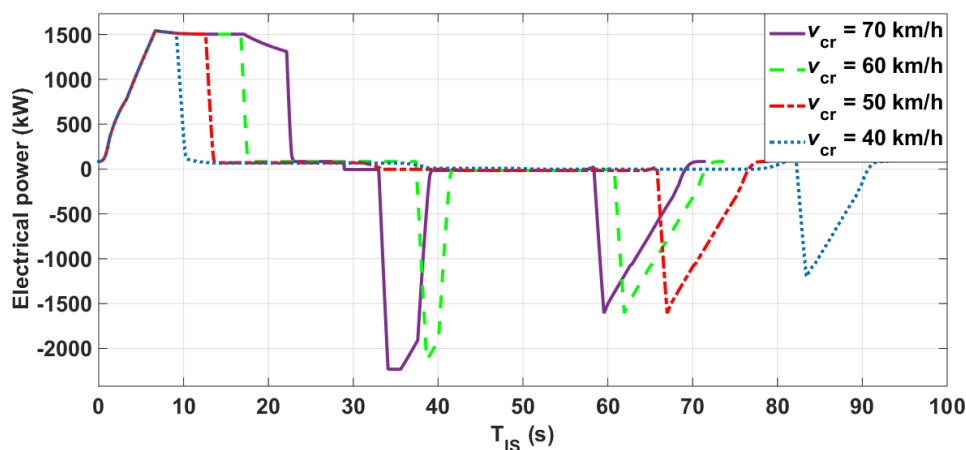


شکل (۴-۱۶) رویه تغییرات زمان سفر مسیر سرایشی برحسب تغییرات V_{cr} و t_{cr}

- ❖ افزایش زمان سفر می‌تواند به وسیله انتخاب سرعت کمتر، به عنوان سرعت کروز به وجود آید که در مشخصه سرعت برحسب زمان شکل‌های (۴-۱۴) و (۴-۱۵) و رویه T_{IS} شکل (۴-۱۶)، برای هردو حالت سراسیابی و سربالایی به خوبی مشاهده می‌شود.
- ❖ منحنی‌های تغییرات شتاب بر حسب V_{cr} در شکل (۴-۱۷) نشان داده شده‌اند، که ضمن رعایت حداکثر شتاب موتوری و ترمزی، جرک مجاز نیز در طول مسیر رعایت شده است (تغییرات ناگهانی در منحنی شتاب وجود ندارد).
- ❖ تغییرات توان برحسب زمان سفر برای مسیر سراسیابی در شکل (۴-۱۸) آورده شده است. مشاهده می‌شود که در حالت موتوری، توان مثبت (مصرف) و در حالت خلاصی توان صفر (موتورها خاموش) و در حالت ترمزی و سرعت ثابت نیز، توان منفی (بازتولید) است. در قسمت



شکل (۴-۱۷) منحنی شتاب برحسب زمان مسیر سراسیابی برای مقادیر مختلف V_{cr} و t_{cr}



شکل (۴-۱۸) توان الکتریکی همراه با مصرف داخلی قطار برحسب زمان- مسیر سراسیابی برای مقادیر مختلف V_{cr}

سرعت ثابت، بدلیل شیب طبیعی مسیر، قطار تمایل به افزایش سرعت دارد؛ لذا برای ثابت نگه داشتن سرعت، باید از حالت ترمزی استفاده شود که منجر به بازتولید انرژی می‌شود. در این منحنی همچنین تأثیر زمان خلاصی و سرعت کروز بر مقدار انرژی بازتولیدی دیده می‌شود که هرچه قطار زودتر خلاص شود، مقدار انرژی بازتولیدی کمتر است (سطح زیر منحنی قسمت توان منفی کوچکتر است). سرعت کروز بالاتر ضمن اینکه مقدار توان مصرفی را افزایش می‌دهد، مقدار انرژی بازتولیدی را نیز افزایش می‌دهد (برای $V_{cr} = 70 \text{ km/h}$ سطح زیر منحنی توان مثبت و منفی، بیشترین مقدار ممکن را دارا است (منحنی بنفش‌رنگ)). با توجه به این اثرات، می‌توان حالت مناسب را طوری انتخاب کرد که انرژی خالص با در نظر گرفتن یک مقدار معین برای α ، کمترین مقدار ممکن باشد.

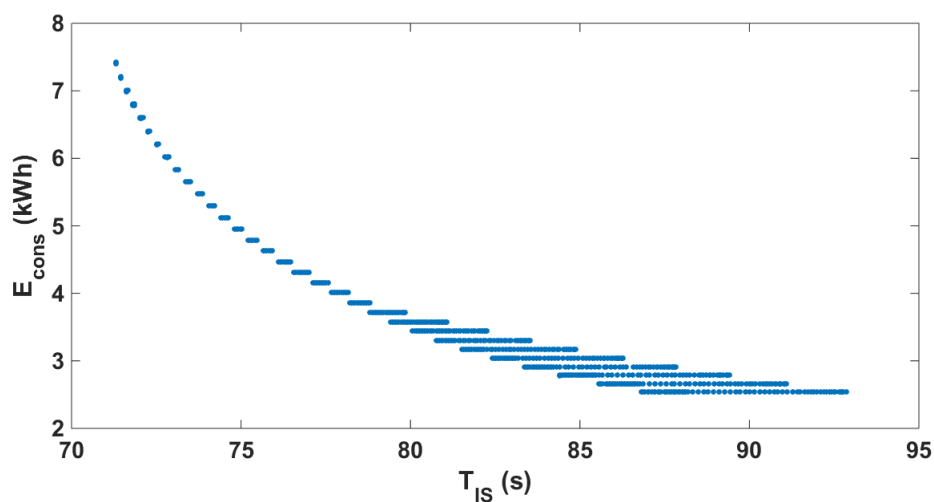
۲-۷-۲-۴ تحلیل گراف‌های انرژی مصرفی و بازتولیدی

منحنی‌های مربوط به انرژی را می‌توان از دو دیدگاه مورد بررسی قرار داد، ابتدا تأثیر پارامترهای تصمیم بر مقادیر انرژی مصرفی و بازتولیدی مورد بررسی قرار گرفته است؛ سپس تأثیر تغییرات α مطالعه شده است.

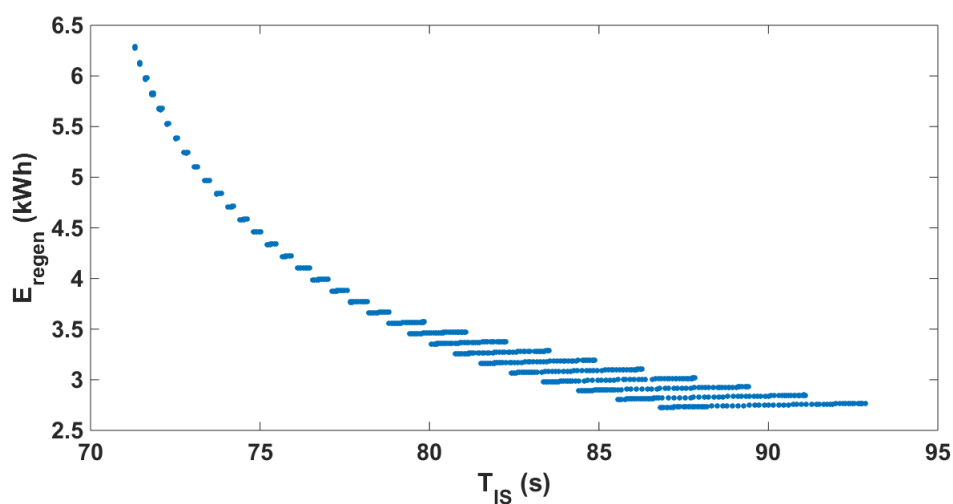
❖ در شکل‌های (۴-۱۹) و (۴-۲۰) گراف انرژی مصرفی و بازتولیدی در مسیر سراسیابی برحسب زمان سفر نشان داده شده است. همانطور که انتظار می‌رفت، مشاهده می‌شود که با افزایش زمان سفر، انرژی مصرفی و بازتولیدی هردو کاهش پیدا می‌کنند. در شکل (۴-۱۶) نشان داده شد که این کاهش زمان سفر می‌تواند بوسیله افزایش t_{cr} یا کاهش V_{cr} حاصل شود.

❖ ارتباط انرژی مصرفی با متغیرهای تصمیم V_{cr} و t_{cr} در رویه‌ی شکل شماره (۴-۲۱) نشان داده شده است. مشابه منحنی توان در شکل (۴-۱۸)، کاهش V_{cr} به کاهش انرژی مصرفی نیز منجر می‌شود؛ ولی تغییر زمان کروز تأثیر چندانی بر انرژی مصرفی در این بخش از مسیر، با شیب محدود ندارد و تغییر شیب، می‌تواند تأثیرگذاری t_{cr} را بهتر نشان دهد.

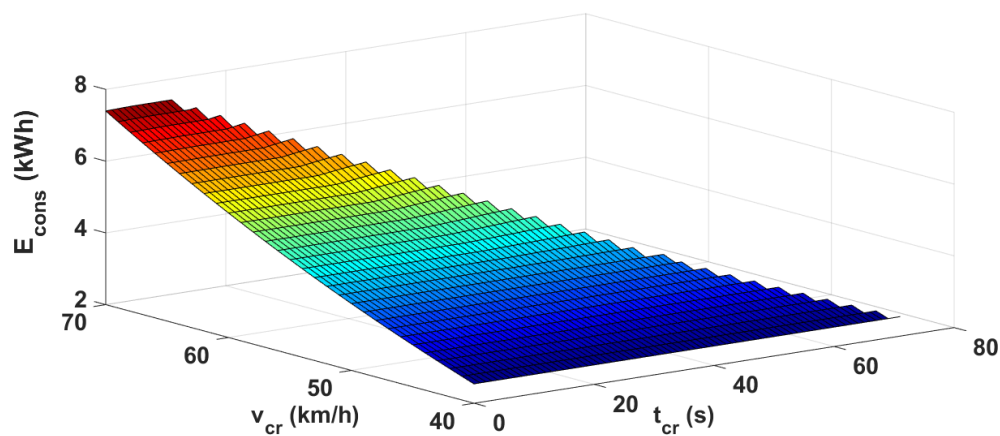
❖ گراف انرژی مصرفی و بازتولیدی در مسیر سربالایی برحسب زمان سفر در شکل‌های (۴-۲۲) و (۴-۲۳) نشان داده شده است. در اینجا هم مشاهده می‌شود که با افزایش زمان سفر، انرژی مصرفی و بازتولیدی هردو کاهش پیدا می‌کنند.



شکل (۴-۱۹) گراف انرژی مصرفی برحسب زمان مسیر سراسیابی برای کلیه مقادیر ممکن V_{cr} و t_{cr}

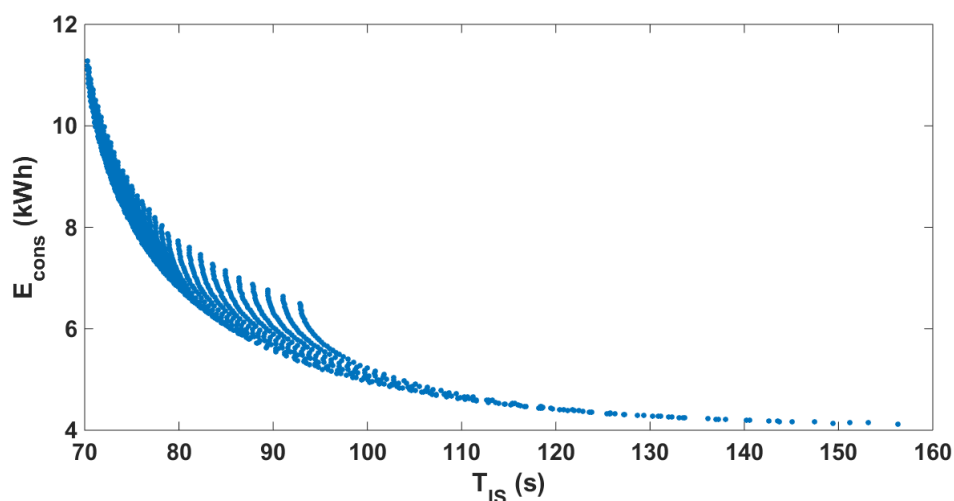


شکل (۴-۲۰) گراف انرژی بازتولیدی برحسب زمان مسیر سراسیابی برای کلیه مقادیر ممکن V_{cr} و t_{cr}

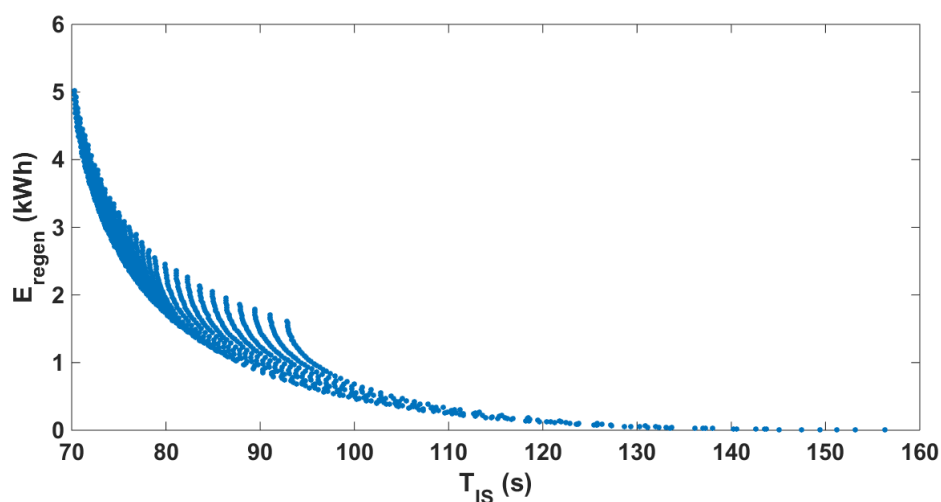


شکل (۴-۲۱) رویه تغییرات انرژی مصرفی مسیر سراسیابی برحسب تغییرات V_{cr} و t_{cr}

- ❖ تفاوت بین زمان سفر در مسیر سراسیابی و سربالایی به وضوح در شکل‌های (۴-۱۲) تا (۴-۱۸) مشاهده می‌شود؛ با وجود اینکه طول مسیر یکسان است (همان مسیر در جهت رفت و برگشت در نظر گرفته شده است)، زمان سفر در سربالایی خیلی بیشتر است، که منطقی است.
- ❖ اختلاف شیب، همچنین باعث شده است که میزان انرژی مصرفی نیز در سربالایی خیلی بیشتر باشد. شیب مسیر در سراسیابی نیز کمک کرده است تا انرژی بازتولیدی نیز در سراسیابی بیشتر شود؛ که هردو نتیجه منطقی هستند.



شکل (۴-۲۲) گراف انرژی مصرفی برحسب زمان مسیر سربالایی برای کلیه مقادیر ممکن V_{cr} و t_{cr}

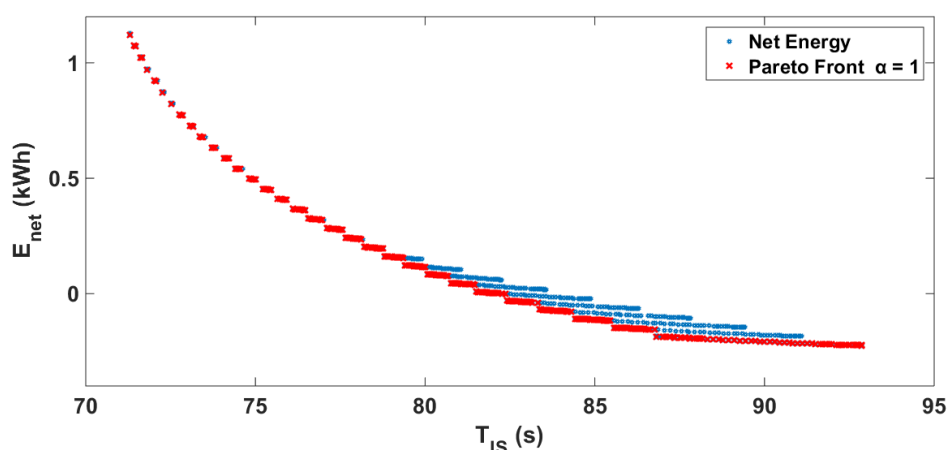


شکل (۴-۲۳) گراف انرژی بازتولیدی برحسب زمان مسیر سربالایی برای کلیه مقادیر ممکن V_{cr} و t_{cr}

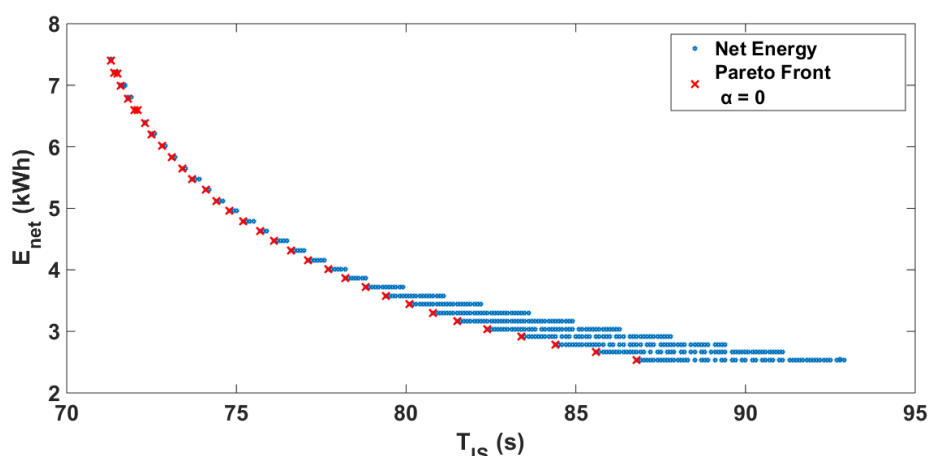
۳-۷-۲-۴ تحلیل گراف‌های انرژی خالص دریافتی و جبهه پرتو و تأثیر متغیر بودن α بر بهینه‌سازی

گراف انرژی خالص دریافتی در مسیر سراسیابی برای مقادیر $\alpha = 0$ و $\alpha = 1$ به ترتیب در شکل‌های (۴-۲۴-الف) و (۴-۲۴-ب) و برای مسیر سربالایی در شکل‌های (۴-۲۵-الف) و (۴-۲۵-ب) نشان داده شده‌اند.

تغییر α ، جبهه پرتو و پاسخ‌های بهینه را تغییر می‌دهد؛ لذا انتخاب مقادیر متفاوت برای آن، انرژی خالص و در نتیجه پاسخ‌های نهایی را تغییر می‌دهد. به عبارت دیگر، 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. در یک سیستم چندقطاره، مقدار α به وضعیت سایر قطارها بستگی دارد و از قبل قابل پیش‌بینی نیست؛ در حالی که در تحقیقات قبلی ثابت و اغلب صفر فرض شده است که ممکن است منجر



شکل (۴-۲۴-الف) گراف انرژی خالص دریافتی برحسب زمان مسیر سراسیابی برای کلیه مقادیر V_{cr} و t_{cr} همراه با جبهه پرتو $\alpha = 1$



شکل (۴-۲۴-ب) گراف انرژی خالص دریافتی برحسب زمان مسیر سراسیابی برای کلیه مقادیر V_{cr} و t_{cr} همراه با جبهه پرتو $\alpha = 0$

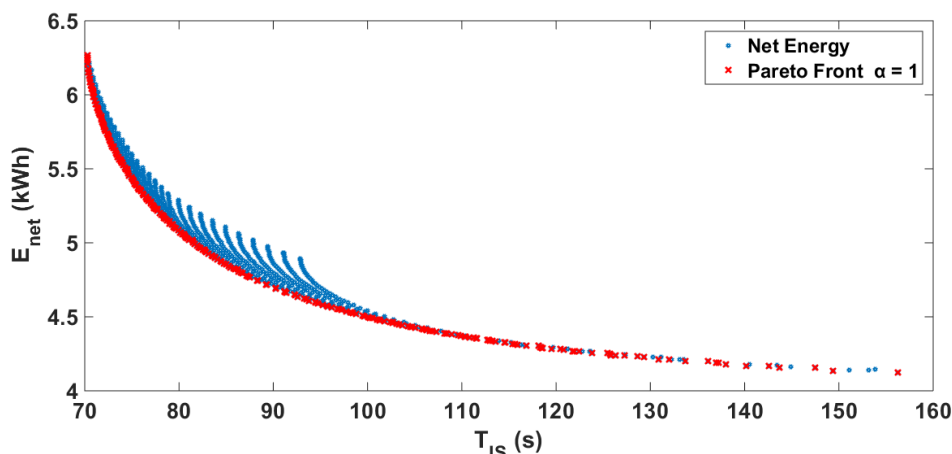
به از دست دادن پاسخ‌های بهینه شود. بنابراین نوآوری این تحقیق، در نظر گرفتن تغییرات α است. برای انجام این کار بجای استفاده از یک جبهه پرتو، اجتماع پرتوها به ازای مقادیر مختلف α بکار رفته است. یکی از ویژگی‌های روش پیشنهادی این است که همان‌طور که در گراف‌های انرژی-زمان دیده می‌شود، پاسخ‌هایی که روی جبهه 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 انتخاب نشده و شتاب‌گیری مجدد هم به‌جز در موارد ضروری (شیب‌های خیلی زیاد یا محدودیت سرعت‌پایین) استفاده نشده است. درحالی‌که در بعضی مراجع مانند [93] با در نظر گرفتن شتاب‌های مختلف و ترمز و شتاب مکرر، پاسخ‌هایی با مصرف انرژی زیاد در فضای پاسخ‌ها تولید شده‌اند که از جبهه پرتو فاصله زیادی دارند و فرایند بهینه‌سازی را کندتر می‌کنند (گرچه درحال حاضر بهینه‌سازی بصورت غیر برخط است ولی باتوجه به اینکه قابلیت استفاده در کاربردهای برخط^۱ را نیز دارد، کم بودن زمان بهینه‌سازی حائز اهمیت است). در [109] ضربی به نام نرخ پذیرش تعریف شده است که نسبت انرژی بازتولیدی استفاده شده یک قطار به کل انرژی بازتولیدی آن است، عیب اصلی آن تعریف این است که برای کل مسیر یک مقدار ثابت در نظر گرفته می‌شود. در ادامه تأثیر تغییرات α بر گراف انرژی خالص و جبهه پرتو بررسی شده است.

❖ با انتخاب همه حالت‌های ممکن برای پارامترهای تصمیم، گراف انرژی-زمان به دست آمده و فضای کامل پاسخ‌ها همراه با جبهه پرتوی آن برای دو مقدار $\alpha = 0$ و $\alpha = 1$ برای فاصله بین ایستگاهی سرایشی در شکل (۴-۲۴) رسم شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، جواب‌های واقع در جبهه پرتو هم از نظر میزان انرژی و هم زمان سفر توسط سایر جواب‌ها مغلوب نشده‌اند (هیچ پاسخ دیگری در فضای جواب‌ها وجود ندارد که از هردو نظر بهتر از این‌ها باشد). تفاوت بین جبهه‌های پرتو در شکل (۴-۲۴ الف) برای $\alpha = 0$ و شکل (۴-۲۴ ب) برای $\alpha = 1$ کاملاً مشهود است. حتی همان‌طور که دیده می‌شود، برای $\alpha = 0$ هیچ پاسخ بهینه‌ای در محدوده

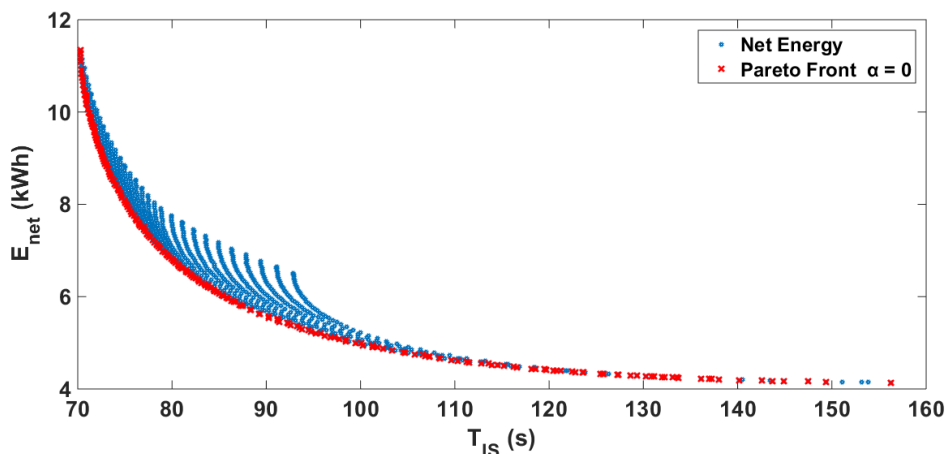
¹ Online

زمانی ۸۷ تا ۹۳ ثانیه روی جبهه پرتو قرار ندارد. حالت مشابه برای مسیر سربالایی نیز در شکل‌های (۴-۲۵-الف) و (۴-۲۵-ب) مشاهده می‌شود.

❖ مقادیر انرژی خالص دریافتی منفی در شکل (۴-۲۴-الف) برای مسیر سراسیابی، به این معنی است که چون انرژی بازتولیدی می‌تواند از انرژی مصرفی بیشتر شود، اگر فرض شود همه این انرژی به شبکه برگردانده شود ($\alpha = 1$)، در طی این بخش از مسیر، در مجموع، قطار نه تنها مصرف نکرده است، بلکه مقداری انرژی هم به شبکه تحویل داده است. البته این فرض در شرایط عادی برقرار نیست؛ ولی با استفاده از راهکارها و تدابیری می‌تواند محقق شود، که در فصل بعد با استفاده از ذخیره سازهای انرژی، نحوه محقق شدن آن، نشان داده شده است.



شکل (۴-۲۵-الف) گراف انرژی خالص دریافتی برحسب زمان مسیر سربالایی برای کلیه مقادیر ممکن V_{cr} و t_{cr} همراه با جبهه پرتو $\alpha = 1$



شکل (۴-۲۵-ب) گراف انرژی خالص دریافتی برحسب زمان مسیر سربالایی برای کلیه مقادیر ممکن V_{cr} و t_{cr} همراه با جبهه پرتو $\alpha = 0$

❖ جبهه‌های پرتو برای این فاصله بین ایستگاهی و مسیر برگشت آن (سربالایی) در جدول (۴-۱) خلاصه شده‌اند. برای مسیر سراسیابی 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 $0 \leq \alpha \leq 1$ اجتماع تعداد 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 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 استفاده شده است که احتمال رسیدن به پاسخ‌های نهایی بهتر را افزایش می‌دهد.

با انجام شبیه‌سازی برای همه فاصله‌های بین ایستگاهی در مسیر خط مورد مطالعه، گراف انرژی - زمان برای آن‌ها به‌دست‌آمده که نتایج بطور خلاصه در جدول‌های (۴-۲) و (۴-۳) برای مسیر رفت

جدول (۴-۱) تأثیر تغییرات α بر جبهه پرتو برای فاصله بین ایستگاهی نمونه

مقدار α	۰	۰,۱	۰,۲	۰,۳	۰,۴	۰,۵	۰,۶	۰,۷	۰,۸	۰,۹	۱	$0 \leq \alpha \leq 1$
تعداد حالت‌ها روی جبهه پرتو (N_p) فاصله بین ایستگاهی سراسیابی ($N(j) = 1095$)	۶۹	۲۱۳	۲۵۵	۲۷۲	۲۸۵	۲۹۴	۲۹۸	۳۰۳	۳۰۷	۳۰۸	۳۱۰	۳۵۳ (N_u)
تعداد حالت‌ها روی جبهه پرتو (N_p) فاصله بین ایستگاهی سربالایی ($N(j) = 1051$)	۲۲۰	۲۲۵	۲۲۳	۲۲۲	۲۲۷	۲۲۸	۲۳۴	۲۳۸	۲۴۲	۲۴۸	۲۶۱	۲۸۳ (N_u)

جدول (۴-۲) زمان سفر و انرژی مصرفی در فاصله‌های بین ایستگاهی مسیر شمال (غدير به وكيل آباد)

شماره ایستگاه	نام ایستگاه	فاصله با ایستگاه بعدی (m)	زمان سفر برنامه ریزی شده	حداکثر انرژی مصرفی (KWh)	حداقل زمان سفر	حداقل انرژی مصرفی (KWh)	حداکثر زمان سفر	محدوده ممکن برای زمان سفر (s)
۱	۲۲- وكيل آباد							
۴۳	۲۱- کوهستان پارک	۱۳۶۸	۴۰.۸	۱۲.۴	۴۰.۵	۱۲.۴	۴۰.۵	۴۰.۵-۴۰.۵
۴۲	۲۰- نمایشگاه	۱۰۱۵	۸۳	۱۵.۱	۷۲	۸.۵	۱۳۹	۱۳۹-۷۲
۴۱	۱۹- اقبال لاهوری	۱۰۵۶	۸۷	۱۴.۳	۷۴	۸	۱۳۵	۱۳۵-۷۴
۴۰	۱۸- صیاد شیرازی	۱۰۲۷	۸۹	۱۳.۸	۷۲	۷.۳	۱۲۹	۱۲۹-۷۲
۳۹	۱۷- صدف	۷۷۹	۷۹	۱۱.۹	۵۹	۵.۷	۱۰۷	۱۰۷-۵۹
۳۸	۱۶- هفت تیر	۷۲۱	۷۸	۱۱.۴	۵۷	۵.۱	۱۰۸	۱۰۸-۵۷
۳۷	۱۵- دانش آموز	۸۰۸	۷۴	۱۱.۵	۶۱	۵.۲	۱۱۳	۱۱۳-۶۱
۳۶	۱۴- سید رضی	۷۸۰	۸۰	۱۱.۲	۵۹	۴.۷	۱۱۳	۱۱۳-۵۹
۳۵	۱۳- کوثر	۸۵۰	۷۹	۱۱.۶	۶۳	۵	۱۲۱	۱۲۱-۶۳
۳۴	۱۲- پارک ملت	۸۰۷	۸۱	۱۰.۵	۵۹	۳.۹	۱۱۹	۱۱۹-۵۹
۳۳	۱۱- آزادی	۱۰۵۷	۱۰۰	۱۷.۳	۸۴	۸.۹	۱۶۲	۱۶۲-۸۴
۳۲	۱۰- خیام	۱۰۱۵	۸۱	۱۲.۱	۷۱	۴.۹	۱۵۳	۱۵۳-۷۱
۳۱	۹- فلسطین	۱۱۹۰	۱۰۶	۱۱.۸	۸۵	۴.۴	۱۷۳	۱۷۳-۸۵
۳۰	۸- طالقانی	۹۱۷	۸۶	۱۱.۳	۷۰	۴.۱	۱۵۶	۱۵۶-۷۰
۲۹	۷- قائم	۶۱۳	۶۰	۹.۲	۵۰	۲.۶	۸۵	۸۵-۵۰
۲۸	۶- شریعتی	۷۶۲	۷۸	۸.۷	۶۶	۲.۸	۱۴۰	۱۴۰-۶۶
۲۷	۵- امام خمینی	۱۴۰۸	۱۰۸	۱۲	۹۴	۴.۱	۲۱۰	۲۱۰-۹۴
۲۶	۴- بسیج	۱۰۸۵	۹۵	۱۰.۵	۷۴	۲.۸	۱۸۵	۱۸۵-۷۴
۲۵	۳- هفده شهریور	۸۲۷	۷۰	۸.۴	۶۲	۲.۵	۹۰	۹۰-۶۲
۲۴	۲- پروین اعتصامی	۷۴۵	۶۶	۸.۶	۵۷	۲.۶	۸۵	۸۵-۵۷
۲۳	۱- غدیر شمال	۸۵۷	۱۱۵	۷.۸	۱۱۵	۲.۷	۱۳۰	۱۳۰-۱۱۵

و برگشت گنجانده شده است. در این جدول‌ها، حداکثر انرژی مربوط به حالت حداقل زمان سفر است که متغیر تصمیم سرعت کروزیگ بیشترین مقدار خود را دارا است و زمان خلاصی نیز صفر است.

جدول (۳-۴) زمان سفر و انرژی مصرفی در فاصله‌های بین ایستگاهی مسیر جنوب (وکیل آباد به غدیر)

شماره ایستگاه	نام ایستگاه	فاصله با ایستگاه بعدی (m)	زمان سفر برنامه ریزی شده	حداکثر انرژی مصرفی (kWh)	حداقل زمان سفر (s)	حداقل انرژی مصرفی (kWh)	حداکثر زمان سفر (s)	محدوده ممکن برای زمان سفر (s)
۱	۲۲- وکیل آباد	۱۰۰۰	۲۱۵	۶,۶	۲۰۳	۱,۷	۲۱۸	۲۱۶-۲۰۵
۲	۲۱- کوهستان پارک	۱۰۱۵	۹۲	۶,۵	۷۰	۲,۵	۱۰۲	۹۶-۷۵
۳	۲۰- نمایشگاه	۱۰۵۶	۸۷	۶,۲	۷۲	۲,۵	۱۰۵	۹۰-۷۳
۴	۱۹- اقبال لاهوری	۱۰۲۷	۸۸	۶,۴	۷۱	۲,۴	۱۰۳	۸۵-۷۵
۵	۱۸- صیاد شیرازی	۷۷۹	۶۸	۶,۳	۵۸	۲,۴	۸۰	۷۵-۶۱
۶	۱۷- صدف	۷۲۱	۶۸	۶	۵۵	۲,۴	۷۵	۷۵-۶۰
۷	۱۶- هفت تیر	۸۰۸	۷۱	۶,۴	۶۲	۲,۵	۸۳	۷۳-۶۳
۸	۱۵- دانش آموز	۷۸۰	۶۷	۶,۶	۵۸	۲,۵	۸۰	۷۳-۶۰
۹	۱۴- سید رضی	۸۵۰	۶۹	۶,۶	۶۴	۲,۴	۸۷	۷۶-۶۵
۱۰	۱۳- کوثر	۸۰۶	۶۲	۶,۷	۵۹	۲,۵	۸۳	۷۵-۶۰
۱۱	۱۲- پارک ملت	۱۰۵۸	۱۰۰	۹,۸	۸۳	۱,۹	۱۲۱	۱۰۰-۸۵
۱۲	۱۱- آزادی	۱۰۱۵	۸۴	۷,۱	۷۴	۲,۵	۱۰۲	۹۵-۸۰
۱۳	۱۰- خیام	۱۱۹۰	۹۵	۷,۷	۸۵	۲,۵	۱۱۷	۱۱۴-۹۰
۱۴	۹- فلسطین	۹۱۷	۸۵	۷,۱	۷۱	۲,۵	۹۳	۸۷-۷۳
۱۵	۸- طالقانی	۶۱۳	۶۵	۶,۹	۵۵	۲,۶	۶۶	۶۶-۵۶
۱۶	۷- قائم	۷۶۲	۷۵	۶,۳	۶۶	۲,۵	۷۹	۷۷-۶۷
۱۷	۶- شریعتی	۱۴۰۸	۱۰۸	۸,۳	۹۱	۲,۶	۱۳۷	۱۳۷-۱۰۰
۱۸	۵- امام خمینی	۱۰۸۵	۸۳	۸,۳	۷۴	۲,۶	۱۱۰	۱۱۰-۸۰
۱۹	۴- بسیج	۸۲۷	۹۱	۸,۹	۶۱	۲,۵	۹۶	۹۶-۶۶
۲۰	۳- هفده شهریور	۷۴۵	۷۲	۸,۹	۵۷	۲,۶	۸۸	۸۸-۶۰
۲۱	۲- پروین اعتصامی	۹۲۳	۱۸۶	۵,۴	۱۱۴	۱,۶	۲۱۱	۱۹۰-۱۳۰
۲۲	۱- غدیر	۲۱۰	۸۰	۰,۴	۷۹	۴	۷۹	۷۹
۲۳	۰- غدیر جنوب							

یعنی قطار با حداکثر شتاب به بیشترین مقدار سرعت خود می‌رسد و تا زمان رسیدن به ناحیه ترمزی این سرعت حفظ می‌شود (البته محدودیت‌های سرعت رعایت می‌شوند). حداقل انرژی نیز متناظر با

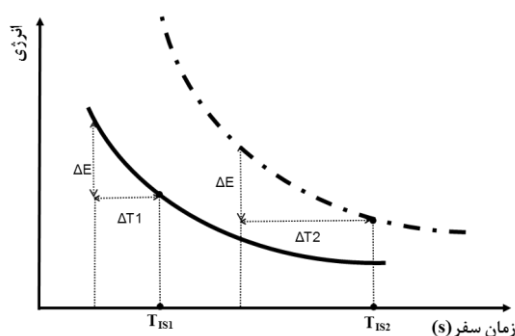
بیشترین زمان سفر است. در این حالت، از خلاصی قطار بیشترین استفاده می‌شود و انرژی بازتولیدی حداقل مقدار خود را دارد.

این مقادیر که هریک معرف یک مشخصه سرعت برای فاصله بین ایستگاهی موردنظر هستند، برای مدیران و برنامه ریزان شرکت‌های بهره‌برداری بسیار مفید هستند و می‌توان با ایجاد مصالحه‌ای بین انرژی مصرفی و زمان سفر، بهترین گزینه ممکن را انتخاب کرد. علاوه بر این می‌توان با استفاده از مشخصه‌های بهینه، برای تغییر زمان سفر کل مسیر نیز برنامه ریزی کرد.

۳-۴ حداقل کردن انرژی مصرفی در سیستم چندقطاره

۳-۴-۱ توزیع زمان سفر بین ایستگاه‌ها با استفاده از شیب منحنی جبهه پرتوی انرژی-زمان

تنظیم جدول زمانی در راهبری دستی به دلیل عدم قطعیت رفتار راهبران، نمی‌تواند کاهش انرژی قابل‌قبولی را فراهم کند و انتظارات لازم را برآورده کند. از طرفی با توجه به جبهه پرتو که برای هر فاصله بین ایستگاهی به دست آمده است؛ با استفاده از شیب منحنی انرژی - زمان، روش جدیدی برای کاهش انرژی کل ورودی پیشنهاد گردید که با استفاده از dE/dt برای ایستگاه‌های مختلف و مرتب کردن آن‌ها بتوان با تغییر زمان سفر در بعضی از ایستگاه‌ها، بدون تغییر زمان سفر کل، انرژی مصرفی قطارها را کاهش داد. برای این منظور با توجه به شکل (۴-۲۶)، اگر زمان سفر در ایستگاه‌هایی که در آن‌ها dE/dt بیشترین مقدار منفی را دارد، افزایش داده شود و برای ایستگاه‌هایی که کمترین مقدار منفی را دارد، تا حد امکان کاهش داده شود، مجموع انرژی کل مصرفی قطارها کاهش خواهد یافت، ضمن اینکه زمان کل سفر ثابت خواهد ماند.



شکل (۴-۲۶) تغییرات انرژی برحسب زمان سفر

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

مرحله ۱: وارد کردن مشخصات الکتریکی سیستم و زمان کل سفر برنامه‌ریزی‌شده ($T_{tot,sch}$) و زمان‌های سفر برنامه‌ریزی شده فاصله بین ایستگاهی ($T_{IS,sch}$)، اجتماع جبهه‌های پرتوی مشخصه‌های سرعت برای مقادیر مختلف $0 \leq \alpha \leq 1$ که قبلاً محاسبه شده‌اند.

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 بهینه‌سازی جستجوی کامل در یک بخش از مسیر با تکرار شبیه‌سازی 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.

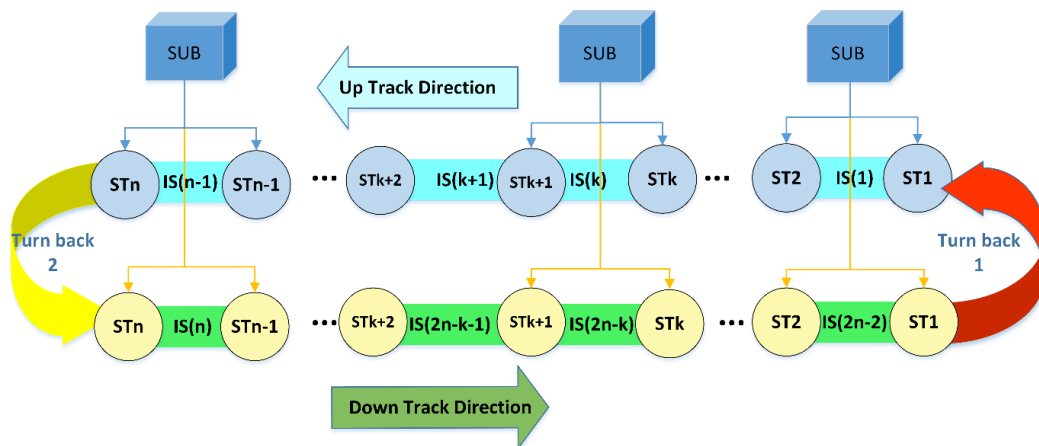
در بخش قبل برای هر فاصله بین ایستگاهی تعداد N حالت ممکن به دست آمد که برای هر مقدار α ، تعداد N_p حالت روی پرتو قرار داشتند (N_p برای هر مقدار α می‌تواند متفاوت باشد). اگر فرض کنیم مقدار متوسط N ، ۱۰۰۰ باشد، برای یک شبکه واقعی مانند سیستم مورد مطالعه با ۲۲ ایستگاه و ۴۲ فاصله بین ایستگاهی تعداد کل حالت‌های 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، با وجود اینکه $N_p < N_u < N$ ولی باز هم 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 باز هم بهینه است.

برای حل مشکل فوق، از این حقیقت استفاده شده است که در شبکه‌های واقعی قطارشهری هر پست برق بخشی از خط، شامل تعداد محدودی از فاصله‌های بین ایستگاهی (بین ۲ تا ۴ فاصله بین

ایستگاهی) 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. در نتیجه 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 شکل (۴-۲۷)، شماتیک یک خط قطارشهری ساده با یک مسیر رفت و برگشت، نشان داده شده است. تعداد ایستگاه‌ها n فرض شده که هر ایستگاه، با نماد ST_k نشان داده است (شماره هر ایستگاه در مسیر رفت و برگشت یکسان است). بنابراین تعداد کل فاصله‌های بین ایستگاهی (IS) ، $2n-2$ خواهد بود که برای ایستگاه مبدأ شماره k ، با نماد $IS(k)$ در مسیر رفت و با نماد $IS(2n-k)$ در مسیر برگشت نشان داده شده است.

در این رساله، با فرض ثابت بودن زمان کل سفر، بخش‌هایی شامل فاصله بین چهار ایستگاه متوالی (سه فاصله بین ایستگاهی در هر طرف مسیر و مجموعاً ۶ فاصله در دو طرف) طوری انتخاب شده‌اند که امکان استفاده از انرژی بازتولیدی حداکثر باشد. یعنی فاصله‌های k و $k+1$ و $k+2$ از یک طرف خط (مسیر رفت) و فاصله‌های $2n-k-3$ و $2n-k-2$ و $2n-k-1$ از طرف دیگر خط دقیقاً در موقعیت مکانی روبروی فاصله‌های قبلی در مسیر برگشت (شکل ۴-۲۷)، انتخاب شده‌اند، که $1 \leq k \leq 2n-2$ است. برای بقیه فاصله‌ها، زمان برنامه‌ریزی شده لحاظ می‌شود و برای این ۶ فاصله توزیع زمان انجام می‌شود و



شکل (۴-۲۷) خط متروی نمونه دومسیره با n ایستگاه

زمان‌هایی که انرژی را حداقل می‌کنند، استخراج می‌شوند. تابع هدف و قیدهای بهینه‌سازی در ادامه آورده شده‌اند.

$$\min E_{in-tot} = \sum_{i=1}^{N_{sub}} \int_0^{T_{sim}} I_{sub(i)}(t) V_{sub(i)}(t) dt \quad (۱۷-۴)$$

$$s.t. \sum_{j=1}^{2n-2} T_{IS,sch}(j) + T_{tum} = T_{tot,sch} \quad (۱۸-۴)$$

$$\sum_{j=k}^{k+2} T_{IS,calc}(m, j) = \sum_{j=k}^{k+2} T_{IS,sch}(j), \quad m = 1, 2, \dots, N_u(j) \quad (۱۹-۴)$$

$$\sum_{j=2n-k-3}^{2n-k-1} T_{IS,calc}(m, j) = \sum_{j=2n-k-3}^{2n-k-1} T_{IS,sch}(j), \quad m = 1, 2, \dots, N_u(j) \quad (۲۰-۴)$$

که N_{sub} تعداد پست‌های کشش، I_{sub} و V_{sub} به ترتیب جریان و ولتاژ هر پست، E_{in-tot} انرژی کل ورودی از شبکه بالادستی برحسب kWh، $T_{tot,sch}$ زمان سفر برنامه ریزی شده برای یک سفر کامل (حرکت از ایستگاه ۱ و رسیدن مجدد به همان ایستگاه) و T_{tum} زمان دور زدن قطارها در ابتدا و انتهای مسیر (که ثابت فرض شده‌اند). $T_{IS,sch}$ زمان سفر برنامه ریزی شده برای یک فاصله بین ایستگاهی و $T_{IS,calc}$ زمان سفر بین ایستگاهی است که انرژی کل ورودی را حداقل می‌کند. T_{sim} ، بازه زمانی حرکت قطارهاست که برای شبیه‌سازی انتخاب شده است. از آنجا که حرکت قطارها متناوب است، بازه زمانی شبیه‌سازی T_{sim} برابر یک دوره تناوب یعنی هدوی قطارها در نظر گرفته شده است (برای سیستم واقعی مورد مطالعه، شبیه‌سازی برای هدوی ۳۰۰ ثانیه انجام شده است).

هدف بهینه‌سازی در این بخش، حداقل کردن انرژی کل ورودی از طریق کلیه پست‌های کشش در سیستم چندقطاره، در بازه زمانی شبیه‌سازی، طبق رابطه (۱۷-۴) است. در این رابطه، i شاخص شماره پست کشش است.

قیدهای بهینه‌سازی به صورت روابط (۱۸-۴) تا (۲۰-۴) بیان شده‌اند. طبق رابطه (۱۸-۴)، باید زمان سفر برنامه ریزی شده کلیه فاصله‌های بین ایستگاهی، با اضافه زمان دور زدن در انتهای مسیر، برابر با زمان برنامه ریزی شده برای کل مسیر باشد. رابطه (۱۹-۴) بیانگر این است که مجموع زمان سفر محاسبه شده برای سه فاصله انتخاب شده در مسیر رفت، باید برابر مجموع مقادیر برنامه ریزی شده آنها باشد. قید ثابت بودن مجموع زمان سفر برای فاصله‌های بین ایستگاهی منتخب در مسیر برگشت نیز

طبق رابطه (۴-۲۰) بیان شده است. برای فاصله بین ایستگاهی z ام، تعداد کل پاسخ‌های بهینه که از اجتماع جبهه‌های پرتو در بخش قبل بدست آمده اند (و در این بخش بعنوان تعداد حالت‌های ممکن برای آن IS در شبیه‌سازی چندقطاره در نظر گرفته می‌شوند)، $N_u(j)$ است که از بین آنها فقط مقداری که زمان سفر آن برابر مقدار برنامه ریزی شده است $(T_{Is,sch}(j))$ ، انتخاب می‌شود؛ ولی برای همان IS ، برای رسیدن به پاسخ بهینه نهایی، هریک از پاسخ‌ها را می‌توان انتخاب کرد و انرژی کل سیستم را محاسبه کرد. بنابراین $T_{Is,calc}$ ، با دوشاخص بصورت $T_{Is,calc}(m, j)$ نشان داده شده است. یعنی برای فاصله بین ایستگاهی z ام از میان $N_u(j)$ پاسخ ممکن، پاسخ شماره m ام انتخاب شده است.

در نهایت پخش توان DC در کل شبکه انجام شده و با محاسبه مقادیری از m (برای IS های انتخاب شده) که انرژی مصرفی را حداقل می‌کنند، مشخصه‌های سرعت متناظر با آن‌ها نیز انتخاب می‌شود. بهینه‌سازی فوق برای تمام زیربخش‌های شبکه (شامل سه IS روبرو به هم در هر طرف مسیر) انجام شده و با ترکیب نتایج همه آن‌ها، پاسخ‌های بهینه برای کل سیستم به دست می‌آیند. لازم به ذکر است، از آنجاکه 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 از دست‌رفته باشند. به عبارت دیگر ممکن است پاسخ بهینه نهایی، محلی باشد و با استفاده از روش‌های جامع‌تر بهینه‌سازی، جواب‌های بهتری را نیز بتوان به دست آورد.

۴-۳-۲ تحلیل نتایج شبیه سازی کاهش مصرف در کل شبکه

از آنجاکه تعداد حالت‌های شبیه‌سازی یک قطاره بسیار زیاد است، همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، بهینه‌سازی چندقطاره ابتدا بر روی بخش کوچکی از شبکه شامل ۶ فاصله بین ایستگاهی انجام شده است، سپس به کل شبکه تعمیم داده شده 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 انجام شده است. بازه زمانی شبیه‌سازی نیز ۵ دقیقه انتخاب شده است. نتایج انرژی برای سیستم مورد مطالعه در جدول (۴-۲) آورده شده است.

E_{in-tot} کل انرژی ورودی به سیستم است. $E_{cons-tot}$ مقدار انرژی مصرفی کل قطارها در طول دوره شبیه‌سازی است. تفاوت E_{in-tot} و $E_{cons-tot}$ در این است که، E_{in-tot} کل انرژی ورودی به شبکه از طریق شبکه بالادستی است و شامل تلفات شبکه نیز هست؛ درحالیکه، $E_{cons-tot}$ فقط توان مصرفی قطارها را نشان می‌دهد. $E_{regen-tot}$ انرژی بازتولیدی کل قطارهاست که از طریق خط بالاسری به شبکه DC شامل بقیه قطارها، برگردانده شده است. E_{loss} کل تلفات الکتریکی در شبکه است (تلفات پست‌ها، خطوط بالاسری، کابل‌های تغذیه و ریل‌ها) که طبق رابطه (۴-۲۱) محاسبه می‌شود. همه انرژی‌های فوق با انجام پخش بار DC در کل سیستم، محاسبه می‌شوند.

$$E_{in-tot} = E_{cons-tot} - E_{regen-tot} + E_{loss} \quad (۲۱-۴)$$

E_{block} بخشی از مجموع انرژی بازتولیدی قطارهاست که توسط بقیه قطارها و شبکه جذب نمی‌شود و معمولاً به‌صورت حرارت در مقاومت‌های ترمزی تلف می‌شود (رابطه (۴-۲۲)). در حقیقت $\sum E_{regen}$ ، مجموع انرژی بازتولیدی بالقوه قطارها است؛ درحالیکه $E_{regen-tot}$ به حالت بالفعل تبدیل شده و به شبکه تحویل شده است.

$$E_{block} = \left(\sum_{All\ trains} E_{regen} \right) - E_{regen-tot} \quad (۲۲-۴)$$

پارامتر دیگری که در جدول (۴-۴) مورد توجه است، ضریب β یعنی نرخ بازیابی انرژی بازتولیدی برای کل شبکه است که به‌صورت رابطه (۴-۲۳) تعریف می‌شود.

$$\beta = \frac{E_{regen-tot}}{E_{regen-tot} + E_{block}} \quad (۲۳-۴)$$

همانطور که در رابطه دیده می‌شود، کم شدن E_{block} منجر به افزایش β خواهد شد؛ بنابراین این پارامتر می‌تواند بعنوان یک شاخص مهم برای کل شبکه در نظر گرفته شود که در ادامه این بخش بصورت کمی نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

شبیه‌سازی در ۷ سناریو به‌صورت زیر انجام شده است:

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

(۲) بهینه‌سازی یک قطاره (همه فاصله‌ها با زمان برنامه‌ریزی شده 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 پاسخ‌های بهینه واقع در جبهه پرتو با $\alpha = 0.5$)؛

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

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

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

در سناریوی ۱ برای هر فاصله بین ایستگاهی، مشخصه سرعت با بالاترین انرژی مصرفی انتخاب شده است و انرژی‌های مختلف در کل سیستم محاسبه شده‌اند. در سناریوی ۲ با استفاده از بهینه‌سازی یک‌قطاره، مشخصه‌های سرعت بهینه برای هر فاصله بین ایستگاهی به دست آمده‌اند و مقدار صرفه‌جویی انرژی با کاربرد این مشخصه‌ها در کل سیستم، محاسبه شده است. در سناریوهای ۳ تا ۶ علاوه بر بهینه‌سازی انجام شده در سناریوی ۲، زمان کل سفر نیز به صورت بهینه در دو بخش شامل فاصله‌های بین ایستگاهی ۶ تا ۹ در دو طرف مسیر توزیع شده است. هدف این سناریوها مقایسه تأثیر α بر بهینه‌سازی کل سیستم است. در سناریوهای ۳ تا ۵ مشخصه‌های سرعت به ترتیب از جبهه‌های پرتو با $\alpha = 0$ و $\alpha = 0.5$ و $\alpha = 1$ انتخاب شده‌اند. در سناریوی ۶ مشخصه‌های سرعت از اجتماع جبهه‌های پرتو با تغییر α از صفر تا ۱ انتخاب شده‌اند. نشان داده شده است که با انتخاب تعداد بیشتری مشخصه سرعت بهینه به عنوان 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 تعیین شده α ، بهترین مشخصه سرعت انتخاب شده، نباشند. درحالی‌که در سناریوی ۶ حتماً بهترین پاسخ به دست می‌آید.

دو هدف اصلی این تحقیق، یکی کاهش انرژی کل ورودی و دیگری افزایش مقدار انرژی بازتولیدی ترمزی استفاده شده در شبکه هستند. همان‌طور که در جدول (۴-۴) 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 کل که توسط سایر قطارها استفاده شده است، رو به افزایش است که نشان‌دهنده این است که با بهینه‌سازی انجام‌شده در سناریوهای بعدی، به دو هدف خود نزدیک شده‌ایم. در نتایج همچنین مشاهده می‌شود که حداکثر انرژی کل ورودی در سناریوی ۱ است. در سناریوی ۲ با بهینه‌سازی یک‌قطاره، انرژی کل ورودی به میزان زیادی، کاهش می‌یابد. مقدار صرفه‌جویی که در زیر محاسبه‌شده است نیز قابل‌توجه است.

$$\text{انرژی کل در سناریوی موردنظر} - \text{انرژی کل در سناریوی پایه (۱)} = \text{صرفه‌جویی انرژی در سناریوی موردنظر} \\ \times 100 = \frac{\text{انرژی کل در سناریوی پایه (۱)}}{\text{صرفه‌جویی انرژی در سناریوی پایه (۱)}} \times 100$$

$$\text{صرفه‌جویی انرژی (سناریوی ۲)} = \frac{283.00 - 270.10}{283.00} \times 100 = 4.56\%$$

لازم به ذکر است که حالتی که به‌عنوان سناریوی پایه در نظر گرفته شده است، بدترین حالت در بین پاسخ‌های به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی یک‌قطاره 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 شتاب‌گیری‌های مکرر، میزان انرژی مصرفی در حالت پایه بیشتر از مقدار فعلی شبیه‌سازی‌شده خواهد بود و در نتیجه میزان صرفه‌جویی در سناریوی ۲ بیشتر از ۴,۵۶ درصد خواهد بود. در سناریوهای ۳ تا ۶ 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

جدول (۴-۴) انرژی‌های کل شبکه در سناریوهای مختلف شبیه‌سازی

β	Energy saving (%)	E_{block} (kWh)	E_{loss} (kWh)	$E_{\text{regen-tot}}$ (kWh)	$E_{\text{cons-tot}}$ (kWh)	$E_{\text{in-tot}}$ (kWh)	انرژی سناریو
۰,۵۸۴	-	۳۹,۵۲۴	۱۳,۴۳۱	۵۵,۵۹۳	۳۵۲,۱۶۳	۲۸۲,۹۹۹	سناریوی ۱
۰,۶۸۵	۴,۵۶	۲۸,۰۱۳	۱۳,۲۹۴	۶۰,۹۳۹	۳۱۷,۷۴۷	۲۷۰,۱۰۱	سناریوی ۲
۰,۷۰۶	۵,۰۵	۲۶,۱	۱۳,۳۹۳	۶۲,۷۹۵	۳۱۸,۱۱۵	۲۶۸,۷۱۳	سناریوی ۳
۰,۷۰۶	۵,۰۵	۲۶,۱	۱۳,۳۹۴	۶۲,۸۱	۳۱۸,۱۳	۲۶۸,۷۱۴	سناریوی ۴
۰,۷۰۶	۵,۰۸	۲۶,۰۵۳	۱۳,۲۵۶	۶۲,۶۲۲	۳۱۷,۹۸۱	۲۶۸,۶۱۵	سناریوی ۵
۰,۷۰۸	۵,۱۸	۲۶,۰۸۳	۱۳,۳۹۷	۶۳,۳۷۱	۳۱۸,۳۲۴	۲۶۸,۳۵	سناریوی ۶
۰,۷۷۲	۷,۸۶	۲۰,۶۴۱	۱۳,۴۶۸	۶۹,۹۳۲	۳۱۸,۲۵۱	۲۶۰,۷۶۸	سناریوی ۷

جبهه‌های پرتو حاصل می‌شود. در نتایج صرفه‌جویی در جدول (۴-۴) مشاهده می‌شود که مقدار صرفه‌جویی در سناریوهای ۳ تا ۶ بیشتر از سناریوی ۲ است و بیشترین صرفه‌جویی در سناریوی ۶ حاصل شده است که مزیت روش پیشنهادی و استفاده از اجتماع جبهه‌های پرتو با α های مختلف را نشان می‌دهد. گرچه تنظیم جدول زمانی در سناریوی ۶ انجام شده 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 انجام شده است (۶ فاصله از بین ایستگاهی از مجموع ۴۲ فاصله). برای بهبود مورد دوم، بهینه‌سازی روی بقیه بخش‌ها نیز انجام شده و نتایج آن‌ها در سناریوی ۷ با یکدیگر ترکیب شده که در جدول (۴-۴) نیز قابل مشاهده‌اند. کل صرفه‌جویی انرژی در دو مرحله بهینه‌سازی عبارت است از:

$$\text{کل صرفه‌جویی انرژی (سناریوی ۷)} = \frac{283.00 - 260.77}{283.00} \times 100 = 7.68\%$$

که با توجه به کم بودن انرژی سناریوی پایه، قابل قبول است (همانطور که قبلاً گفته شد سناریوی پایه خود به حالت بهینه نزدیک است و اگر شرایط واقعی در نظر گرفته شود، اختلاف انرژی و در نتیجه میزان صرفه‌جویی بیشتر قابل مشاهده خواهد بود). البته استفاده از یک روش بهینه‌سازی جامع‌تر و در نظر گرفتن سایر پارامترها در تنظیم جدول زمانی، ممکن است در رسیدن به جواب‌های بهتر، کمک کند. زمان سفرهای برنامه‌ریزی شده برای فاصله‌های بین ایستگاهی در سیستم مورد مطالعه و مقادیر به‌دست آمده برای آن‌ها در جدول (۴-۵) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در طی فرایند بهینه‌سازی و توزیع زمان سفر بین ایستگاه‌ها، زمان سفر کل ثابت نگه‌داشته شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار اولیه β برای سناریوی اول، ۰,۵۸۴ است که با انجام بهینه‌سازی پروفایل سرعت و توزیع زمان سفر به ۰,۷۷۲ افزایش یافته است ولی هنوز هم از مقدار ایده‌آل یعنی ۱ خیلی دور است که باید با انجام تدابیر دیگری مقدار آن افزایش داده شود. یکی از این تدابیر، استفاده از ذخیره‌سازها است که در فصل بعدی تأثیر آن نشان داده شده است.

جدول (۴-۵) زمان سفر بین ایستگاهی برنامه‌ریزی شده و بهینه برای سیستم مورد مطالعه

فاصله بین ایستگاهی مسیر شمال	زمان سفر برنامه ریزی شده	زمان سفر بهینه سناریوی ۷	$T_{IS\ max} - T_{IS\ min}$	فاصله بین ایستگاهی مسیر جنوب	زمان سفر برنامه ریزی شده	زمان سفر بهینه سناریوی ۷	$T_{IS\ max} - T_{IS\ min}$
۱ - ۲n	۱۱۵	۱۸۶	۱۳۰-۱۱۵	۲ - ۱s	۱۸۶	۱۱۴-۲۱۱	
۲ - ۳	۶۶	۷۳	۸۵-۵۷	۳ - ۲	۷۲	۵۷-۸۸	
۳ - ۴	۷۰	۸۶	۹۰-۶۲	۴ - ۳	۸۶	۶۱-۹۶	
۴ - ۵	۹۵	۸۱	۱۸۵-۷۴	۵ - ۴	۸۳	۷۴-۱۱۰	
۵ - ۶	۱۰۸	۱۱۰	۲۱۰-۹۴	۶ - ۵	۱۰۸	۹۱-۱۳۷	
۶ - ۷	۷۸	۷۹	۱۴۰-۶۶	۷ - ۶	۷۵	۶۶-۷۹	
۷ - ۸	۶۰	۶۵	۸۵-۵۰	۸ - ۷	۶۵	۵۵-۶۶	
۸ - ۹	۸۶	۸۲	۱۵۶-۷۰	۹ - ۸	۸۶	۷۴-۹۳	
۹ - ۱۰	۱۰۶	۱۰۱	۱۷۳-۸۵	۱۰ - ۹	۹۵	۸۵-۱۱۷	
۱۱ - ۱۰	۸۱	۸۴	۱۵۳-۷۱	۱۰ - ۱۱	۸۴	۷۴-۱۰۲	
۱۲ - ۱۱	۱۰۰	۹۵	۱۶۲-۸۴	۱۱ - ۱۲	۹۵	۸۳-۱۲۱	
۱۳ - ۱۲	۷۹	۶۱	۱۱۹-۵۹	۱۲ - ۱۳	۶۲	۵۹-۸۳	
۱۴ - ۱۳	۷۹	۷۱	۱۲۱-۶۳	۱۳ - ۱۴	۶۹	۶۴-۸۷	
۱۵ - ۱۴	۷۷	۶۷	۱۱۳-۵۹	۱۴ - ۱۵	۶۷	۵۸-۸۰	
۱۶ - ۱۵	۷۴	۶۶	۱۱۳-۶۱	۱۵ - ۱۶	۷۱	۶۲-۸۳	
۱۷ - ۱۶	۷۵	۷۱	۱۰۸-۵۷	۱۶ - ۱۷	۶۴	۵۵-۷۵	
۱۸ - ۱۷	۷۷	۶۷	۱۰۷-۵۹	۱۷ - ۱۸	۶۷	۵۸-۸۰	
۱۹ - ۱۸	۸۹	۸۲	۱۲۹-۷۲	۱۸ - ۱۹	۸۲	۷۱-۱۰۳	
۲۰ - ۱۹	۸۷	۸۴	۱۳۵-۷۴	۱۹ - ۲۰	۸۲	۷۲-۱۰۵	
۲۱ - ۲۰	۸۳	۸۰	۱۳۹-۷۲	۲۰ - ۲۱	۸۰	۷۰-۱۰۲	
۲۲ - ۲۱	۴۰.۵	۲۱۳	۴۰.۵-۴۰.۵	۲۱ - ۲۲	۲۱۳	۲۰.۳-۲۱۸	
Turn back		۷۹		۱s - ۱n	۷۹	۷۹-۸۰	
کل زمان شمال	۲۰۹۰ S	۱۹۷۴ S		کل زمان جنوب	۱۹۷۱ S		

فصل پنجم:

**بهینه‌سازی همزمان
مشخصه سرعت قطار و
ذخیره‌سازهای ساکن
انرژی خازنی**

۵-۱ مقدمه

همان‌طور که در فصل ۳ توضیح داده شد؛ گرچه در بعضی از تحقیقات مربوط به بهینه‌سازی پروفایل سرعت و جدول زمانی حرکت قطارها، به موضوع بازتولید انرژی پرداخته شده است؛ ولی فقط از قابلیت هم‌زمانی شتاب‌گیری و ترمزگیری قطارها استفاده شده است. در مطالعات مرتبط با ذخیره‌سازهای انرژی نیز به مقایسه انواع ذخیره‌سازها پرداخته شده، ذخیره‌سازهای ساکن و نصب شده روی قطار مقایسه شده‌اند و روش‌های کنترلی شارژ و دشارژ آن‌ها بررسی شده و تعیین اندازه و محل نصب بهینه ذخیره‌سازهای ساکن مورد مطالعه قرار گرفته است. در تحقیقات مربوط به ذخیره‌سازها نیز فقط بالا بردن بازده انرژی سیستم با استفاده از بازیابی انرژی بازتولیدی ترمزی، در نظر گرفته شده است و ظرفیت ذخیره‌سازها، برای مشخصه سرعت عادی یا مشخصه با حداقل زمان سفر، تعیین شده است که هزینه بالای تأمین ذخیره‌ساز را به دنبال دارد؛ درحالی‌که ممکن است بندرت از حداکثر ظرفیت آن استفاده شود.

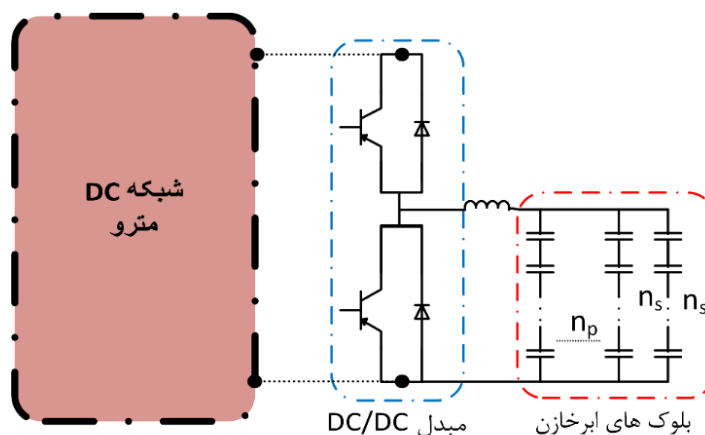
در تحقیق حاضر برای اولین بار، با استفاده هم‌زمان از ذخیره‌سازهای انرژی و مشخصه سرعت بهینه، بازده انرژی افزایش داده شده است. به عبارت دیگر با ترکیب روش صرفه‌جویی انرژی، با بازیابی انرژی بازتولیدی ترمزی، ضمن کاهش بیشتر انرژی مصرفی کل شبکه، ظرفیت ابرخازن مورد استفاده نیز کاهش یافته است. به این منظور ابتدا برای شبکه با مشخصه سرعت عادی، ظرفیت ذخیره‌ساز حساب شده است؛ سپس مقدار ابرخازن مورد نیاز برای شبکه با مشخصه سرعت بهینه محاسبه شده است و نشان داده شده که در حالت اخیر، هم ظرفیت ذخیره‌ساز کاهش یافته و هم انرژی دریافتی کل شبکه کم شده است. به این منظور ابتدا به مدل‌سازی شبکه قطارشهری همراه با ذخیره‌سازهای ساکن خازنی پرداخته شده و سپس نسبت به بهینه‌سازی و حداقل کردن انرژی کل ورودی شبکه اقدام شده است که در ادامه توضیح داده شده است.

۵-۲ مدل‌سازی سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی ساکن خازنی

با توجه به تعداد زیاد و سرعت بالای شتاب و ترمزگیری‌های قطار در طول یک روز، سامانه ذخیره‌ساز باید دارای مشخصه‌های مناسب یعنی چگالی توان، چگالی انرژی و عمر کاری بالایی، باشد

که در میان فناوری‌های موجود، ابرخازن‌ها درمجموع مناسب‌ترین گزینه هستند و چون تحقیق حاضر بر روی شبکه از قبل ساخته‌شده انجام می‌شود، نوع ساکن که از لحاظ نصب و اجرا محدودیت کمتری دارد، در نظر گرفته شده است.

سامانه ذخیره‌ساز از دو بخش اصلی تشکیل شده است؛ قسمت اول عنصر ذخیره کننده که از نوع ابرخازن است. چون ولتاژ نامی ابرخازن‌ها پایین و حدود ۲,۵ ولت است، معمولاً توسط شرکت‌های سازنده بلوک‌های آماده به صورت مجموعه سری از خازن‌ها ساخته می‌شود. حال با توجه به ولتاژ نامی شبکه، تعداد مناسبی از این بلوک‌ها با یکدیگر سری می‌شوند و با توجه به توان و انرژی مورد نیاز، تعداد کافی از این زنجیره‌های سری با یکدیگر موازی می‌شوند. بخش دوم مبدل DC/DC است که برای اتصال ذخیره‌ساز به شبکه بکار می‌رود. این مبدل به صورت دوطرفه کار می‌کند و هنگام ترمز گیری و افزایش ولتاژ شبکه به صورت مبدل کاهنده^۱ عمل کرده و انرژی را در خازن‌ها ذخیره می‌کند و در زمان شتاب گیری به صورت افزایشنده^۲ وارد عمل شده و انرژی را به شبکه برمی‌گرداند تا توسط قطارهای در حال شتاب گیری، استفاده شود. سامانه ذخیره‌ساز، شامل بلوک‌های ابرخازن و مبدل در شکل (۵-۱) نشان داده شده است.



شکل (۵-۱) سامانه ذخیره‌ساز ساکن خازنی متصل به شبکه مترو

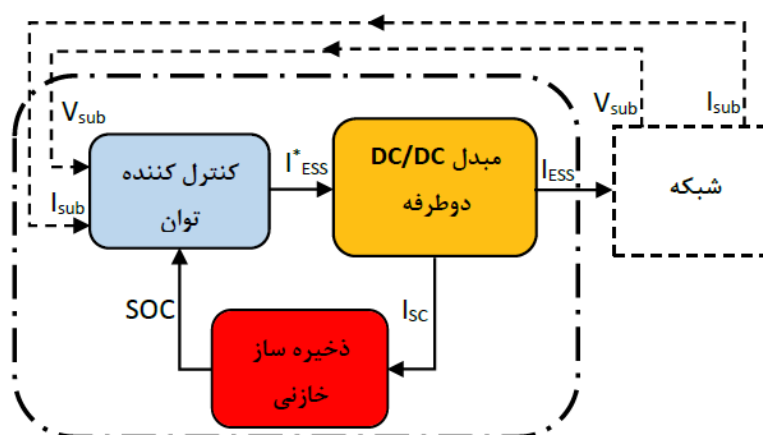
^۱ Buck

^۲ Boost

۳-۵ راهبرد کنترلی سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی ساکن خازنی

معمولاً ذخیره‌سازها با هدف صرفه‌جویی انرژی استفاده می‌شوند. البته تثبیت ولتاژ و کاهش نوسانات ولتاژ هم به‌عنوان هدف دوم در نظر گرفته می‌شود. برای کنترل عملکرد مبدل نیاز به یک سیستم مدیریت توان است که از اهمیت بالایی برخوردار است و همان‌طور که قبلاً اشاره شد مطالعات زیادی در زمینه نحوه کنترل مبدل و در نتیجه حداکثر کردن بازده ذخیره‌ساز انجام شده است. واحد کنترلی که بر اساس استراتژی کنترلی کار می‌کند، نحوه عملکرد مبدل را مشخص می‌کند. سه حالت کاری شارژ، دشارژ و خاموش، با بازخورد گرفتن از سه پارامتر ولتاژ شبکه، وضعیت شارژ ابرخازن‌ها و جریان لحظه قبل ذخیره‌ساز، تعیین می‌شود. این مجموعه را می‌توان با یک منبع جریان کنترل شونده مدل کرد که در شکل (۲-۵) نشان داده شده است. مقدار جریان این منبع به وضعیت کاری قطارها و پارامترهای کنترلی بستگی دارد. اگر ذخیره‌ساز در محلی نصب شده باشد که پست کشش هم قرار دارد، پارامترهای کنترلی ولتاژ پست، جریان پستها و وضعیت شارژ خازن‌ها می‌باشند و برای ذخیره‌سازهایی که در ایستگاه‌های بدون پست کشش قرار دارند، علاوه بر پارامترهای فوق، ولتاژ و جریان گره موردنظر نیز به‌عنوان پارامتر کنترلی موردنیاز است.

الگوریتم کنترلی مورد استفاده در شبیه‌سازی، مشابه روش استفاده شده در [12] است. ضمن اینکه در تغییر وضعیت از شارژ و دشارژ به خاموش یا برعکس که پرش ناگهانی برای جریان خازن‌ها



شکل (۲-۵) مدل ذخیره‌ساز ساکن خازنی (منبع جریان کنترل شده)

ایجاد می‌شود، برای جلوگیری از کاهش عمر خازن‌ها، محدودیت حداکثر نرخ تغییرات جریان در نظر گرفته شده است.

۵-۳-۱ حالت کنترلی تثبیت ولتاژ

در حالت تثبیت ولتاژ، با استفاده از بازخورد ولتاژ، هرگاه ولتاژ سیستم از یک حد آستانه پایین‌تر برود، ذخیره‌ساز وارد عمل می‌شود و با دشارژ خود، ولتاژ را در یک مقدار حداقل حفظ می‌کند تا از قطع قطارها به دلیل خطای افت ولتاژ جلوگیری کند. این اتفاق معمولاً در شتاب‌گیری هم‌زمان قطارها رخ می‌دهد. پس از اتمام مرحله شتاب‌گیری قطارها، ولتاژ سیستم رو به افزایش می‌رود و ذخیره‌ساز شروع به شارژ مجدد می‌کند که ممکن است انرژی خود را از پست یا قطارهای در حال ترمز بگیرد. البته کنترل باید طوری باشد که برای شارژ از پست جریان زیادی نکشد و شارژ سریع (جریان بالا) فقط در زمان ترمز رخ دهد. جریان گرفتن از پست در این حالت، مزیت دیگری نیز دارد که پیک سایی توان است.

۵-۳-۲ حالت کنترلی صرفه‌جویی انرژی

در حالت صرفه‌جویی انرژی، هرگاه قطار در حال ترمز است، با استفاده از بازخورد جریان فیدرها، ذخیره‌ساز شروع به شارژ و ذخیره انرژی می‌کند و هنگام شتاب قطار، شروع به تخلیه می‌کند. زمانی که قطاری در حال شتاب یا ترمز نیست، ذخیره‌ساز از پست انرژی جذب نمی‌کند. زمانی که یک قطار در حال شتاب و دیگری در حال ترمز است، جریان کل و ولتاژ پست مدنظر قرار می‌گیرند. اگر جریان پست خیلی زیاد شود، ذخیره‌ساز شروع به تخلیه می‌کند و برعکس اگر جریان پست در مرز منفی شدن قرار گیرد، ذخیره‌ساز شارژ خواهد شد. کنترل فوق علاوه بر بازخورد گرفتن از ولتاژ و جریان شبکه، به SOC خازن‌ها نیز بستگی دارد. ضمناً باید توجه داشت که در این حالت، نوسانات ولتاژ نیز تا حد قابل قبولی کاهش می‌یابند.

۵-۳-۳ ولتاژهای شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز انرژی

شاید مهم‌ترین بخش در راهبرد کنترلی، ولتاژهای شروع و توقف شارژ و دشارژ ابرخازن‌ها باشد. انتخاب این مقادیر می‌تواند در میزان صرفه‌جویی انرژی و همچنین در میزان بهره‌وری عملکرد ابرخازن‌ها

مؤثر باشد. انتخاب این ولتاژها در هر دو حالت کنترلی حائز اهمیت است. در اغلب تحقیقات قبلی، این مقادیر آستانه به‌صورت استاتیکی انتخاب شده‌اند. مثلاً در [110] که با هدف حداکثر کردن راندمان انرژی و حداکثر کردن صرفه‌جویی در کل سیستم انجام‌شده، نشان داده شده که حالت بهینه زمانی است که ولتاژ شروع شارژ، برابر ولتاژ بی‌باری پست باشد. در روش فوق گرچه ذخیره‌ساز بهترین بازده را داراست، ولی عیب آن این است که اجازه نمی‌دهد که بقیه قطارها از انرژی بازتولیدی بطور کامل استفاده کنند. برای اینکه خازن از پست شارژ نشود، باید ولتاژ شروع شارژ بزرگ‌تر از ولتاژ بی‌باری پست باشد. از طرفی باید این ولتاژ، کمتر از ولتاژ قطار در حال ترمز باشد تا بتواند از آن انرژی بگیرد. حال هرچه مقدار ولتاژ شروع شارژ در این محدوده کوچک‌تر باشد، انرژی بیشتری را ذخیره می‌کند؛ چون ذخیره‌ساز زودتر شروع به شارژ می‌کند و بازده ذخیره‌ساز بالا می‌رود، خوب است ولی بقیه قطارهای در حال شتاب در این لحظه باید انرژی مورد نیاز خود را از شبکه جذب کنند که باید بین این دو موضوع مصالحه برقرار شود و اولویت‌بندی مناسبی تعیین شود. در [50] بازده بالاتر ذخیره‌ساز به‌عنوان اولویت اصلی انتخاب شده است. ولتاژ شروع دشارژ نیز باید در محدوده بین ولتاژ بی‌باری پست و ولتاژ قطار در حال بازتولید باشد. در اینجا هرچه ولتاژ شروع دشارژ بزرگ‌تر باشد، ذخیره‌ساز سریع‌تر تخلیه می‌شود که بهتر است و به تثبیت ولتاژ نیز کمک بیشتری می‌کند ولی تلفات هم بالا می‌رود.

در این رساله، با تغییر ولتاژ شروع شارژ و دشارژ در یک بازه حول ولتاژ بی‌باری پست‌ها، بهترین مقادیر ولتاژهای آستانه کنترل مبدل، برای رفتن از یک حالت کاری به حالت دیگر، با انجام شبیه‌سازی‌های متعدد و محاسبه انرژی کل ورودی شبکه، طوری انتخاب شده‌اند که بیشترین صرفه‌جویی انرژی را به دنبال داشته باشد و در ضمن سایر قیدها مانند تغییرات دامنه ولتاژ را نیز برآورده سازند. برای افزایش طول عمر خازن‌ها و جلوگیری از تغییرات شدید جریان آن‌ها نیز، یک مقدار محدود کننده برای حداکثر نرخ تغییرات جریان ذخیره‌سازها در نظر گرفته شده است.

۵-۴ مدل‌سازی شبکه DC قطار شهری

سیستم تغذیه معمولاً از نوع DC با ولتاژ ۶۰۰، ۷۵۰، ۱۵۰۰ یا ۳۰۰۰ ولت است که در کشور ما در حال حاضر از سیستم ۷۵۰ ولت استفاده می‌شود. ولتاژ تغذیه از طریق پست‌های کشش توسط

ترانسفورماتورهای قدرت از شبکه بالادستی تأمین می‌شود؛ سپس توسط سیستم یک‌سوساز که معمولاً نوع دیودی ۱۲ پالسه است، ولتاژ DC موردنیاز فراهم می‌شود. تغذیه قطارها از طریق خطوط خروجی پستهای فوق و توسط شبکه بالاسری یا ریل سوم انجام می‌شود. در تحلیل شبکه، پست‌ها توسط یک منبع ولتاژ DC همراه با مقاومت داخلی و یک دیود سری مدل می‌شوند و خطوط تغذیه و ریل‌ها توسط مقاومت اهمی مدل می‌شوند. قطارها نیز با منابع جریان مدل می‌شوند که موقعیت آن‌ها نیز در حال تغییر است. در شکل (۳-۵) مدل یک شبکه قطارشهری نمونه همراه با ذخیره‌سازهای ساکن انرژی نشان داده شده است.

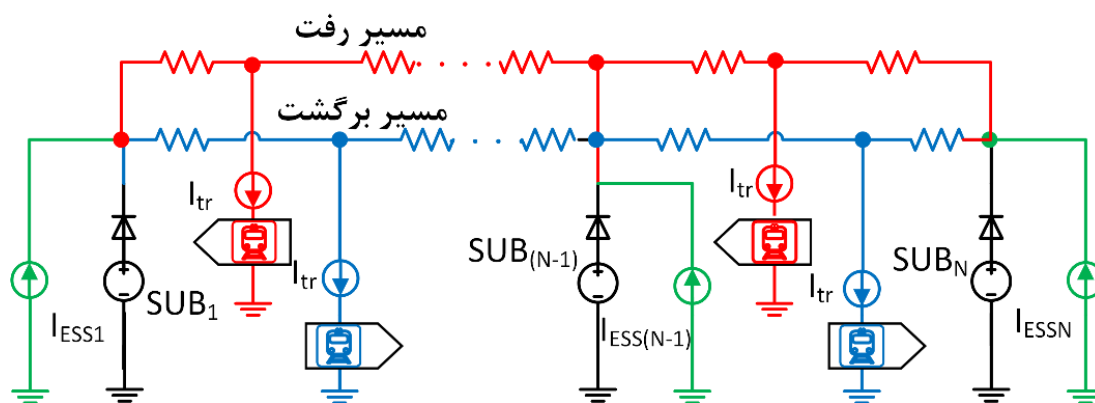
۵-۵ الگوریتم پیشنهادی بهینه‌سازی

هدف اصلی این تحقیق کاهش مصرف انرژی الکتریکی است، لذا مسئله به صورت حداقل سازی انرژی کل دریافتی شبکه از پست‌های کشش تعریف می‌شود که در رابطه (۱-۵) نشان داده شده است.

$$\min E_{\text{in-tot}} = \sum_{k=1}^{N_{\text{sub}}} \int_0^T V_{\text{sub}}(k) \cdot I_{\text{sub}}(k) dt \quad (1-5)$$

$$s.t. \int_0^T V_{\text{ESS}}(k) \cdot I_{\text{ESS}}(k) dt = 0, k = 1, 2, \dots, N_{\text{sub}} \quad (2-5)$$

که $E_{\text{in-tot}}$ انرژی کل دریافتی شبکه در یک دوره تناوب کاری برحسب kWh، N_{sub} تعداد پست‌های کشش، $V_{\text{sub}}(k)$ و $I_{\text{sub}}(k)$ به ترتیب ولتاژ و جریان پست k ام، $V_{\text{ESS}}(k)$ و $I_{\text{ESS}}(k)$ ولتاژ و جریان ذخیره‌ساز واقع در پست k ام و T دوره زمانی مطالعه، که همان فاصله زمانی حرکت قطارها در نظر گرفته شده



شکل (۳-۵) مدل شبکه قطارشهری همراه با ذخیره‌سازهای انرژی

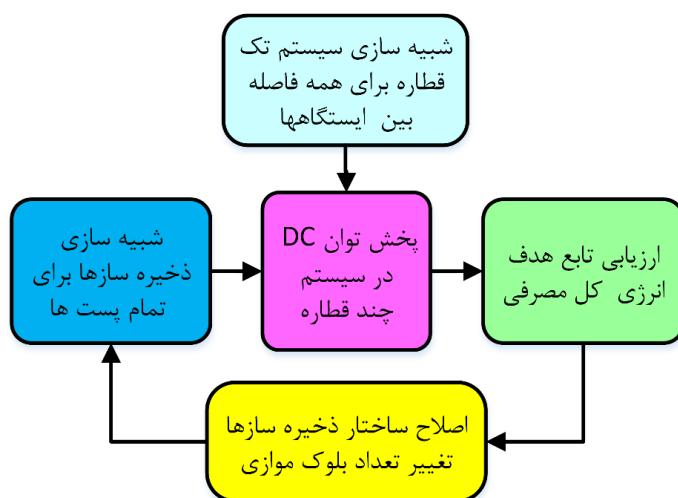
است. چون حرکت قطارها به صورت تناوبی است، مجموع انرژی دریافتی و تحویلی هر بانک خازنی باید در یک دوره تناوب صفر باشد که این موضوع به صورت قید رابطه (۵-۲) بیان شده است. ظرفیت بانک خازنی باید طوری انتخاب شود که انرژی کل مصرفی در بازه زمانی موردنظر حداقل شود. بانک خازنی نیاز به محل مشخصی برای نصب خازن‌ها و تجهیزات وابسته دارد و با توجه به محدودیت فضا، فرض شده که ذخیره‌سازها فقط در ایستگاه‌های دارای پست کشش نصب می‌شوند. چون هدف اصلی در این تحقیق، صرفه‌جویی انرژی است، فرض فوق اشکالی در کار ایجاد نمی‌کند و کلیت مسئله حفظ می‌شود. تعداد بلوک‌های سری n_s در یک زنجیره بانک خازنی، ثابت است و با توجه به ولتاژ نامی شبکه انتخاب می‌شود. پارامتر متغیر، n_p یعنی تعداد شاخه‌های موازی در هر ذخیره‌ساز است. این تعداد می‌تواند بین صفر و حداکثر مقدار ممکن تغییر کند. اگر برای یک پست $n_p=0$ شود یعنی ذخیره‌ساز وجود ندارد. حداکثر مقدار n_p در [57] با فرض برگشت‌پذیر بودن پستها، با استفاده از حداکثر مقدار لحظه‌ای توان منفی پستها محاسبه شده است. روش فوق به دلیل اینکه ممکن است در بعضی موارد توان لحظه‌ای زیاد باشد ولی توان متوسط کوچک باشد، همیشه جواب مناسبی نمی‌دهد. به عبارت دیگر با استفاده از ذخیره‌ساز با ظرفیت پایین‌تر می‌توان اجازه داد که این توان لحظه‌ای توسط سایر ذخیره‌سازها یا قطارهای واقع در محدوده جذب شود، در عوض هزینه خرید و نصب ذخیره‌سازها کاهش یابد. استفاده از انرژی بازتولیدی در یک بازه زمانی توسط قطارها هم می‌تواند مبنای مناسبی برای محاسبه ظرفیت کل خازن‌های موردنیاز باشد.

در [59] با داشتن مقدار انرژی قابل بازیابی در یک سناریوی بار متوسط و داشتن انرژی قابل ذخیره در هر ماژول خازنی، تعداد ماژول‌های خازنی موردنیاز محاسبه شده است. البته باید توجه داشت که خازن باید فقط برای بخشی از انرژی بازتولیدی طراحی شود که توسط بقیه قطارها جذب نمی‌شود. لذا از آنجا که محاسبه انرژی قابل بازیابی در شبکه بزرگ به راحتی امکان‌پذیر نیست، روش فوق برای یک ذخیره‌ساز ممکن است پاسخ خوبی بدهد ولی برای چند ذخیره‌ساز مناسب نیست (برای کل شبکه فقط یک عدد به عنوان درصدی از کل انرژی بازتولیدی شبکه، در اختیار است که اولاً تعیین اینکه چه مقدار از انرژی کل بازتولیدی قابل بازیافت است کار پیچیده‌ای است و به شرایط ترافیکی شبکه بستگی دارد، بعلاوه تعیین اینکه سهم هر ذخیره‌ساز چقدر است، کاری دشوار است). در [69] با توجه به محدودیت

فضا، حداکثر تعداد بلوک‌های موازی تعیین شده است. در این رساله از هر دو مقدار حداکثر لحظه‌ای و متوسط توان منفی در یک سیکل کاری استفاده شده است؛ ضمن اینکه در بهینه‌سازی، n_p آن قدر تغییر داده شده است تا دیگر تأثیری بر کاهش انرژی کل مصرفی نداشته باشد.

با تغییر تعداد شاخه‌های موازی هر ذخیره‌ساز، انرژی کل دریافتی شبکه محاسبه شده است. برای تعیین مقدار انرژی کل، در هر مرحله، پخش توان الکتریکی DC در کل شبکه انجام شده است و مقادیر انرژی کلیه پست‌ها و در نتیجه کل انرژی ورودی محاسبه شده است. بلوک دیاگرام حداقل کردن انرژی کل ورودی شبکه، در شکل (۴-۵) نشان داده شده است.

فرایند حداقل سازی، شامل ۵ زیر بخش است. ابتدا با توجه به مشخصه قطارها، شبیه‌سازی یک قطاره برای همه فاصله‌های بین ایستگاهی انجام می‌شود و خروجی آن شامل پروفایل سرعت، توان و شتاب قطارها تعیین می‌شود. ذخیره‌سازها نیز با انتخاب مقادیر اولیه برای ظرفیت و مکان آن‌ها با توجه با استراتژی کنترل که قبلاً توضیح داده شد، به‌عنوان منابع جریان مدل می‌شوند. مجموعه قطارها و ذخیره‌سازها به‌عنوان بارهای دینامیکی در سیستم چندقطاره قرار می‌گیرند و پخش بار DC روی شبکه شامل آن‌ها انجام می‌شود و مقادیر انرژی قطارها و انرژی کل ورودی پست‌ها و تلفات محاسبه می‌شوند. حال ارزیابی تابع هدف که انرژی کل سیستم است، انجام می‌شود و با توجه به مقدار تابع هدف، ساختار ذخیره‌ساز اصلاح می‌شود (تعداد بلوک‌های موازی ذخیره‌ساز در هر پست کشش تغییر



شکل (۴-۵) فرآیند حداقل سازی انرژی مصرفی کل شبکه

می‌کند). پس از تعیین مقادیر جدید توان ذخیره‌سازها، پخش بار و ارزیابی تابع هدف تکرار می‌شود. فرایند فوق تا زمانی که تابع هدف به مقدار بهینه برسد، ادامه پیدا می‌کند.

در همه مطالعات قبلی که در زمینه محاسبه ظرفیت ذخیره‌سازها یا بهینه‌سازی آنها انجام شده‌اند، ظرفیت ذخیره‌سازها برای مشخصه سرعت عادی یا مشخصه با حداقل زمان سفر تعیین شده است که ضمن هزینه بالای خرید و نصب تجهیزات ذخیره‌ساز، ممکن است در خیلی از شرایط از حداکثر ظرفیت آن استفاده نشود. ویژگی بارز این تحقیق این است که با بهینه کردن مشخصه سرعت قطارها بدون هیچ هزینه‌ای، ظرفیت ذخیره‌ساز موردنیاز نیز کاهش یافته است. ضمن اینکه مزایای دیگری مانند کاهش استهلاک قطارها را نیز به همراه دارد. برای رسیدن به این هدف، شبیه‌سازی در ۱۰ سناریو انجام شده است. ابتدا انرژی کل مصرفی در حالت عادی محاسبه شده و خازن موردنیاز محاسبه شده است، سپس مقدار خازن موردنیاز برای شبکه با مشخصه سرعت بهینه به دست آمده است. نتایج در بخش بعد به تفصیل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند.

۵-۵-۱ الگوریتم ژنتیک عدد صحیح^۱

برای رسیدن به هدف حداقل سازی انرژی کل ورودی شبکه، باید تعداد بهینه بلوک‌های موازی ذخیره‌سازهای خازنی در هر پست کشش محاسبه شود. برای بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک عدد صحیح استفاده شده است که شامل بخش مدل‌سازی مسئله^۲، ارزیابی تابع هدف^۳ و اعمال تغییرات ژنتیکی^۴ است. فرایند کار در ادامه آورده شده است.

ساختار ذخیره‌سازها در پست‌های کشش (تعداد شاخه‌های موازی n_{pk}) توسط کروموزوم X به عنوان یک عضو جمعیت مدل شده است (رابطه (۵-۳)).

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_n] \quad (۵-۳)$$

$$x_k = n_{pk}, k = 1, 2, \dots, N_{sub} \quad (۵-۴)$$

^۱ Integer Genetic Algorithm

^۲ Problem Encoding

^۳ Objective Function Evaluation

^۴ Genetic Manipulation

که N_{sub} تعداد پست‌های کشش در شبکه است (در شبکه مورد مطالعه ۱۱ پست کشش وجود دارد). برای تعداد شاخه‌های موازی خازن‌ها (n_{pk}) دو محدودیت وجود دارد، اول اینکه هرچه تعداد آن‌ها زیاد شود، هزینه ذخیره‌سازها زیاد می‌شود و دیگری محدودیت فیزیکی نصب ذخیره‌سازهاست (هر زنجیره شامل ۶ بلوک سری ابرخازن معرفی شده در جدول (۵-۱)، با احتساب فضای موردنیاز برای تهویه، به فضایی با ابعاد تقریبی $1 \times 1 \times 1$ متر نیاز دارد).

در سیستم مورد مطالعه، با بررسی اولیه با توجه به حداکثر توان منفی در هر پست در شرایط ترافیکی موجود، تعداد ۶ بلوک خازنی برای هر پست مناسب برآورد شده است و به‌عنوان یک قید برای بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. از نظر محدودیت فضا نیز با توجه به ابعاد ذخیره‌سازها، حداکثر تعداد مجاز ۱۰ زنجیره ابرخازنی موازی (هریک شامل ۶ بلوک سری) برای هر پست در نظر گرفته شده است، لذا حداکثر مجموع تعداد زنجیره‌های سری ($Sum_{n_{pk}}$) ۱۱۰ خواهد بود (۱۱ پست و در هر کدام ۱۰ زنجیره خازنی).

$$Sum_{n_{pk}} = \sum_{k=1}^{N_{sub}} n_{pk} \quad (5-5)$$

تابع هدف Z نیز به‌صورت رابطه (۵-۶) در نظر گرفته شده است.

$$\min Z = \left(\frac{E_{in-tot}^{max}}{E_{in-tot}^{max}} + wV \right) \quad (6-5)$$

که E_{in-tot} انرژی خالص ورودی کل سیستم در بازه موردنظر (یک هدوی) است و E_{in-tot}^{max} حداکثر مقدار انرژی خالص که متعلق به سناریوی راهبری عادی بدون خازن است. قید محدود بودن تعداد بلوک‌های موازی به‌عنوان یک تابع تخطی V^1 در نظر گرفته شده است که به‌صورت رابطه (۵-۷) تعریف شده است. ضریب وزنی w برای تابع تخطی در نظر گرفته شده است که با تکرار بهینه‌سازی، مقدار مناسب آن تعیین شده است. $sum_{n_{pk}}^{max}$ مجموع حداکثر تعداد مجاز زنجیره‌های موازی خازنی است که با توجه به قید محدودیت فیزیکی فضای نصب، ۱۱۰ در نظر گرفته شده است. طبق رابطه (۵-۷)، هرچه تعداد کل بلوک‌های موازی خازنی بیشتر شود، مقدار تخطی بیشتر می‌شود و تابع هدف از حداقل خود دور می‌شود.

¹ Violation

در تابع هدف و تابع تخطی، برای نرمال کردن مقادیر انرژی و تعداد خازن‌ها و قابل مقایسه کردن آن‌ها، از مقادیر E_{in-tot}^{max} و sum_{njk}^{max} استفاده شده است.

$$V = \frac{sum_{njk}}{sum_{njk}^{max}} \quad (۷-۵)$$

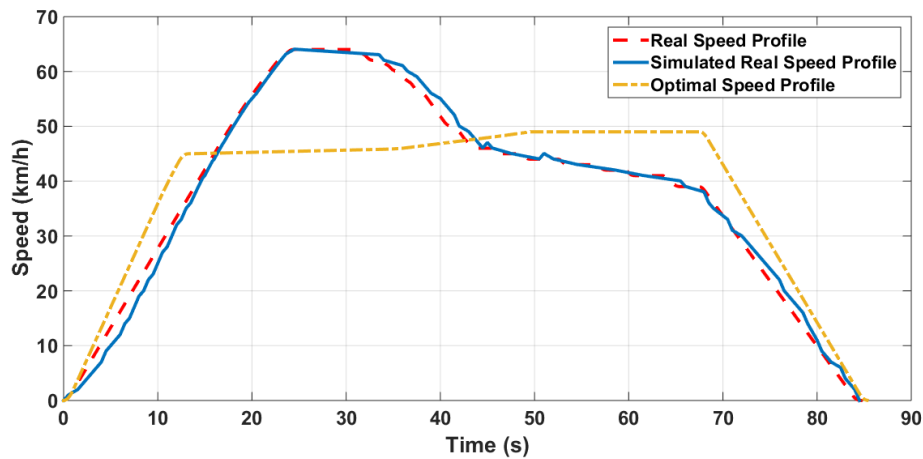
برای بهینه‌سازی، از الگوریتم ژنتیک جعبه‌ابزار بهینه‌سازی نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. مراحل اصلی دست‌کاری ژنتیک، انتخاب اعضای جمعیت، ترکیب و جهش هستند که در [111] بطور کامل شرح داده شده‌اند و در اینجا از ذکر جزئیات خودداری شده است.

۵-۵-۲ مقایسه نتایج شبیه‌سازی سناریوهای مختلف

برای شبیه‌سازی کل شبکه، ابتدا حرکت قطار در هر فاصله بین ایستگاهی با استفاده از شبیه‌ساز یک قطار مدلسازی شده است. با توجه به اینکه مشخصه سرعت واقعی قطار در راهبری دستی به شدت به رفتار راهبران وابسته است، برای مدلسازی حرکت در حالت واقعی، از داده‌های ذخیره‌شده در ثبت‌کننده وقایع^۱ قطارها استفاده شده است (در هر ثانیه ۲ نمونه از سرعت قطار ذخیره می‌شود). مشخصه‌های سرعت متنوعی از قطارها در ساعت‌ها و شرایط مختلف کاری رسم شده است. سپس نزدیک‌ترین نمونه از نظر زمان سفر به زمان برنامه‌ریزی‌شده، انتخاب شده است و توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی شده است. در شکل‌های (۵-۵) و (۶-۵) یک نمونه مشخصه سرعت واقعی و شبیه‌سازی شده برای یک فاصله بین ایستگاهی نمونه در مسیر سراسیپی و سربالایی نشان داده شده است. ضمن اینکه در این شکل‌ها میزان نزدیک بودن مشخصه سرعت شبیه‌سازی شده به مشخصه واقعی، نشان داده شده است؛ همانطور که مشاهده می‌شود در راهبری بهینه، سرعت بیشینه قطار خیلی کمتر است و در نتیجه علاوه بر کاهش مصرف قطارها که در بخش بعد نتایج آن آورده شده است، استهلاک قطارها هم به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

این کار برای تمام فاصله‌های بین ایستگاهی سیستم مورد مطالعه انجام شده است و در نهایت با انجام پخش توان DC برای کل شبکه، کلیه پارامترهای الکتریکی شامل ولتاژها، جریان‌ها، توان‌ها و انرژی مصرفی کل شبکه محاسبه شده‌اند.

¹ Event Recorder



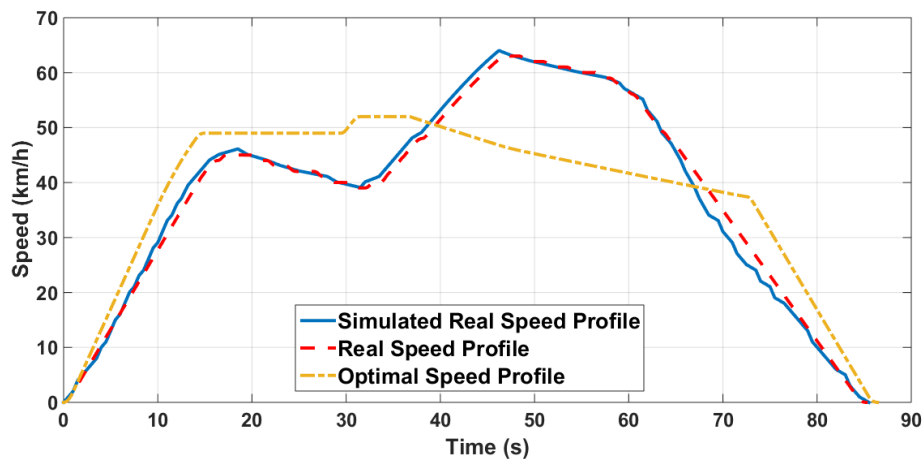
شکل (۵-۵) مشخصه سرعت واقعی و بهینه شبیه‌سازی شده برای یک فاصله بین ایستگاهی سراسی

گرچه محاسبه دقیق مقادیر ذخیره‌ساز می‌تواند به صورت تئوری انجام شود، ولی بهترین راهبرد طراحی عملی، استفاده از ماژول‌های آماده در بازار است. در این صورت نتیجه طراحی و بهینه‌سازی، محاسبه تعداد ماژول‌های سری و موازی ابرخازنی است. ابرخازن‌های مورد استفاده در ذخیره‌سازها ساخت شرکت Maxwell هستند. تعداد ماژول‌های سری، ثابت و برابر ۶ انتخاب شده است؛ لذا حداقل ظرفیت هر ذخیره‌ساز، یک زنجیره با توان نامی ۱۸۰ kW و ولتاژ نامی ۷۵۰ V DC شامل ۶ بلوک سری ابرخازن است. مشخصات فنی هر بلوک ابرخازن در جدول (۵-۱) آورده شده است [112].

سناریوهای مورد مطالعه در دو گروه *Norm.* با مشخصه سرعت عادی و *Opt.* با مشخصه

سرعت بهینه و مجموعاً در ۱۰ سناریو خلاصه شده‌اند که عبارتند از:

- *Norm.1*: مشخصه سرعت عادی بدون ذخیره‌ساز



شکل (۵-۶) مشخصه سرعت واقعی و بهینه شبیه‌سازی شده برای یک فاصله بین ایستگاهی سربالایی

- *Norm.2*: مشخصه سرعت عادی با حداکثر تعداد مجاز خازن در هر پست ($n_{pk}=10$)
- *Norm.3*: مشخصه سرعت عادی با توزیع یکنواخت خازن‌ها در پست‌ها ($n_{pk}=6$)
- *Norm.4*: مشخصه سرعت عادی با حداکثر خازن محاسبه‌شده از توان منفی لحظه‌ای
- *Norm.5*: مشخصه سرعت عادی با تعداد و مکان بهینه خازن‌ها
- *Opt.1*: مشخصه سرعت بهینه بدون ذخیره‌ساز
- *Opt.2*: مشخصه سرعت بهینه با حداکثر تعداد مجاز خازن در هر پست ($n_{pk}=10$)
- *Opt.3*: مشخصه سرعت بهینه با توزیع یکنواخت خازن‌ها در پست‌ها ($n_{pk}=6$)
- *Opt.4*: مشخصه سرعت بهینه با حداکثر خازن محاسبه‌شده از توان منفی لحظه‌ای
- *Opt.5*: مشخصه سرعت بهینه با تعداد و مکان بهینه خازن‌ها

نتایج در جدول‌های (۲-۵) و (۳-۵) نمایش داده شده‌اند.

نتایج شبیه‌سازی راهبری عادی به‌عنوان سناریوی پایه (*Norm.1*) در سطر اول جدول‌های (۵-۵) و (۲-۵) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، انرژی کل ورودی ۳۰۱٫۷ kWh است. در سناریوی *Norm.2* حداکثر تعداد خازن (با توجه به محدودیت فیزیکی محل نصب) استفاده شده است. انرژی ورودی با حدود ۱۲٪ کاهش به ۲۶۵٫۹ kWh رسیده است. عیب اساسی این سناریو، استفاده از تعداد بسیار زیاد خازن و در نتیجه افزایش هزینه‌ها است. این عیب از یک منظر دیگر نیز در آخرین ستون جدول (۳-۵) مشاهده می‌شود که مقدار متوسط SOC_{max} برای تمام ذخیره‌سازها ۶۸٪ شده است. به عبارت دیگر از حداکثر ظرفیت خازن‌ها استفاده نشده است.

جدول (۱-۵) مشخصات فنی هر بلوک ابرخازن مورد استفاده در ذخیره‌ساز [112]

پارامتر	مقدار
ولتاژ نامی	۱۲۵ V
ظرفیت نامی	۶۳ F
حداکثر جریان پیوسته	۲۴۰ A
حداکثر توان پیوسته	۱۸۰ kW
حداکثر انرژی قابل ذخیره	۱۳۷ Wh
انرژی قابل ذخیره در هر خازن	۳ Wh
تعداد ابرخازن سری	۴۸

جدول (۲-۵) ساختار ذخیره‌سازها و انرژی‌های شبکه در سناریوهای مختلف

E_{in-tot} (kWh)	Sum n_{pk}	n_{p11}	n_{p10}	n_{p9}	n_{p8}	n_{p7}	n_{p6}	n_{p5}	n_{p4}	n_{p3}	n_{p2}	n_{p1}	n_{pk} سناریو
۳۰۱,۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
۲۶۵,۹	۱۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۲
۲۶۴,۸	۶۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۳
۲۶۶,۶	۵۳	۵	۴	۴	۴	۴	۵	۵	۶	۶	۵	۵	۴
۲۶۶,۷	۳۸	۲	۶	۲	۱	۴	۲	۵	۵	۷	۳	۱	۵
۲۶۰,۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
۲۳۸,۵	۱۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۲
۲۳۹,۳	۶۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۳
۲۴۰,۸	۵۰	۶	۴	۵	۳	۳	۶	۵	۵	۵	۴	۴	۴
۲۴۱,۴	۳۵	۵	۳	۴	۰	۸	۲	۷	۳	۲	۰	۱	۵

جدول (۳-۵) خروجی‌های تحلیل شبکه در سناریوهای مختلف

$Mean$ SOC_{max}	ΔE	β	E_{loss}	E_{block}	$E_{regen-tot}$	$E_{cons-tot}$	E_{ESS}	E_{in-tot}	سناریو
۰	۰	۰,۷۵	۱۵,۴	۳۶,۵	۱۰۹,۸	۳۹۶,۲	۰	۳۰۱,۷	۱
۶۸	۱۱,۹	۰,۹۹	۱۴,۹	۱,۲	۱۳۷,۸	۳۸۸,۸	۸۳,۳	۲۶۵,۹	۲
۹۱	۱۲,۲	۱	۱۴,۹	۰,۲	۱۳۸,۷	۳۸۸,۶	۸۵,۳	۲۶۴,۸	۳
۹۵	۱۱,۷	۰,۹۹	۱۴,۹	۱,۸	۱۳۷,۲	۳۸۸,۸	۷۹,۸	۲۶۶,۶	۴
۱۰۰	۱۱,۶	۰,۹۹	۱۵,۱	۱,۸	۱۳۷,۳	۳۸۸,۹	۶۸,۱	۲۶۶,۷	۵
۰	۱۳,۸	۰,۷۷	۱۱,۸	۲۰,۶	۶۸,۹	۳۱۷,۲	۰	۲۶۰,۱	۱
۶۲	۲۱	۱	۱۱,۳	۰	۸۸,۷	۳۱۵,۸	۵۵,۵	۲۳۸,۵	۲
۸۹	۲۰,۷	۱	۱۱,۳	۰,۳	۸۷,۹	۳۱۵,۹	۵۷,۶	۲۳۹,۳	۳
۹۵	۲۰,۲	۰,۹۸	۱۱,۴	۱,۷	۸۶,۵	۳۱۵,۹	۵۳,۶	۲۴۰,۸	۴
۹۸	۲۰	۰,۹۸	۱۱,۶	۲,۱	۸۶,۱	۳۱۵,۹	۴۱,۵	۲۴۱,۴	۵

در سناریوی $Norm.3$ توزیع یکنواخت خازن‌ها در پست‌ها با $n_{pk}=6$ انجام شده است. دلیل انجام

این سناریو این است که اولاً، این توزیع به جدول زمانی و اغتشاشات احتمالی در حرکت قطارها وابسته

نیست (آرایی‌شی که در سناریوهای $Norm.4$ و $Norm.5$ برای ذخیره‌سازها به دست می‌آید به توان

لحظه‌ای پست‌ها بستگی دارد که خود متأثر از موقعیت قطارها و جدول زمانی است). ضمن اینکه برای رسیدن به این سناریو، توزیع یکنواخت از $n_{pk}=1$ شروع شد و تا $n_{pk}=10$ ادامه یافت و در نتایج مشاهده شد که با افزایش شاخه‌های موازی به ۷ و بیشتر، کاهش انرژی ناچیز است درحالی‌که هزینه رو به افزایش است. نتایج این سناریو در سطر سوم جدول‌های (۲-۵) و (۳-۵) آورده شده است. مشاهده می‌شود که صرفه‌جویی انرژی تقریباً برابر سناریوی Norm.2 است درحالی‌که تعداد خازن‌ها از ۱۱۰ به ۶۶ (حدود ۴۰٪) کاهش یافته است. متوسط SOC_{max} هم از ۶۸ به ۹۱ درصد افزایش یافته است. یعنی با هزینه کمتر، تقریباً همان مقدار صرفه‌جویی حاصل شده است.

در سناریوی Norm.4، ابتدا برای تخمین حداکثر تقریبی خازن‌ها، با فرض برگشت‌پذیر بودن پست‌ها، پخش توان در شبکه DC انجام شده است و مقدار توان لحظه‌ای منفی در تمام پست‌ها به دست آورده شده است. سپس با استفاده از رابطه (۵-۸)، حداکثر تعداد بلوک موازی خازن‌ها $n_{p_{max}}$ در هر پست محاسبه شده است.

$$n_{p_{max}} = \frac{P_{max}^{neg}}{0.75 \times P_{string}} \quad (۸-۵)$$

که P_{max}^{neg} حداکثر توان منفی در پست و P_{string} توان نامی هر زنجیره ابرخازن است. منحنی تغییرات توان لحظه‌ای با فرض برگشت‌پذیر بودن پست‌های کشش برای یک پست نمونه در شکل‌های (۵-۷) و (۵-۸) برای راهبری عادی و بهینه نشان داده شده‌اند. همین کار برای سایر پست‌ها نیز انجام شده است و در نهایت مقدار حداکثر توان‌های منفی لحظه‌ای و تعداد بلوک‌های موازی خازنی برای هر پست در راهبری عادی و بهینه به ترتیب در شکل‌های (۵-۹) و (۵-۱۰) نشان داده شده است. ضریب ۰,۷۵ به این دلیل در رابطه (۵-۸) استفاده شده است که در عمل برای افزایش طول عمر خازن‌ها، اجازه داده نمی‌شود که SOC از ۰,۲۵ کمتر شود. لذا بخشی از ظرفیت خازن استفاده نمی‌شود. نتایج نهایی این سناریو در ردیف ۴ جدول‌های (۲-۵) و (۳-۵) مشاهده می‌شود. در این حالت نیز تعداد خازن‌ها ۵۳ است درحالی‌که صرفه‌جویی انرژی نزدیک به سناریوی Norm.2 است.

در سناریوی Norm.5 بهینه‌سازی اندازه و مکان ذخیره‌سازها انجام شده است و تعداد کل خازن‌ها با کاهش چشمگیری به ۳۸ رسیده است؛ درحالی‌که صرفه‌جویی انرژی کمتر از ۱٪ کاهش یافته است، که از نظر اقتصادی بسیار حائز اهمیت است. برای رسیدن به این نتیجه از تابع تخطی اضافه شده

به تابع هدف انرژی کل استفاده‌شده است (رابطه ۵-۷). با توجه به توضیحات فوق، مقدار sum_{npk}^{max} در رابطه (۵-۷)، ۱۱۰ انتخاب‌شده است. با تکرار بهینه‌سازی برای مقادیر مختلف ضریب وزنی تابع تخطی، بهترین مقدار $w=0.05$ برای این ضریب به‌دست‌آمده است. پارامترهای اصلی الگوریتم ژنتیک شامل اندازه جمعیت، تعداد ژن هر کروموزوم، حداکثر تعداد تکرار، نرخ ترکیب و نرخ جهش به ترتیب ۴۰ و ۱۱ و ۵۰ و ۰.۸ و ۰.۱۵ انتخاب‌شده‌اند.

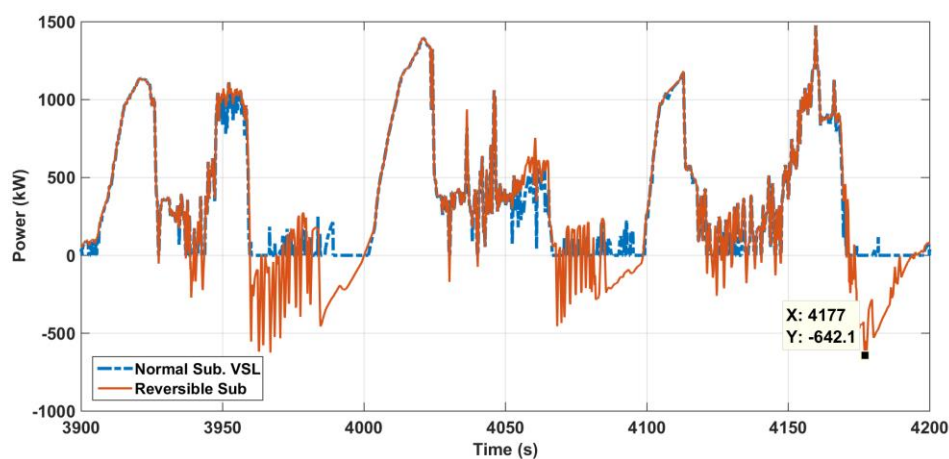
در سناریوهای گروه دوم مشخصه‌های سرعت بهینه استفاده شده‌اند. یکی از اهداف اصلی این تحقیق نشان دادن اثر مثبت مشخصه سرعت بهینه بر بهینه‌سازی ذخیره‌سازها است. در سناریوی *Opt.1* با استفاده از الگوریتم توضیح داده شده در فصل چهارم، مشخصه‌های سرعت بهینه برای همه فاصله‌های بین ایستگاهی با زمان برنامه‌ریزی‌شده، محاسبه شده‌اند. نمونه مشخصه‌های سرعت بهینه برای فاصله‌های بین ایستگاهی مورد اشاره در فصل قبل همراه با مشخصه سرعت عادی آن‌ها در مسیر سراسیابی و سربالایی در شکل‌های (۵-۵) و (۵-۶) رسم شده است؛ سپس با انجام پخش توان، انرژی کل ورودی محاسبه شده است. نتایج در ردیف ۶ جدول‌های (۵-۲) و (۵-۳) آورده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، بهینه‌سازی مشخصه سرعت، صرفه‌جویی چشمگیری (حدود ۱۴٪) در انرژی کل ورودی نسبت به سناریوی پایه دارد. با بهینه‌سازی مشخصه سرعت، پارامترهای دیگر نیز به میزان قابل توجهی تغییر کرده‌اند. انرژی کل مصرفی قطارها ($E_{cons-tot}$) از ۳۹۶ به ۳۱۷ کیلووات ساعت کاهش یافته است که دلیل اصلی این کاهش، استفاده از حالت خلاصی در مشخصه سرعت بهینه قطارها است. انرژی تلف‌شده در مقاومت‌های ترمزی (E_{block}) نیز کاهش یافته و به ۲۰ kWh رسیده است ولی هنوز هم زیاد است. انرژی بازتولیدی نیز کاهش یافته و در نتیجه قاعدتاً نیاز به ذخیره‌ساز هم کمتر خواهد بود.

سناریوی *Opt.2* مشابه *Norm.2* با مشخصه سرعت بهینه است که انرژی کل ورودی به kWh ۲۳۸.۵ کاهش یافته است (۲۱ درصد صرفه‌جویی) ولی همان‌طور که گفته شد تعداد خازن‌ها زیاد است. در سناریوی *Opt.3* با توزیع یکنواخت و $n_{pk}=6$ ، مقدار E_{in-tot} به ۲۹۳.۳ kWh کاهش یافته است. یعنی ۲۰.۷ درصد صرفه‌جویی که نزدیک به سناریوی *Opt.2* است ولی تعداد خازن‌ها خیلی کمتر است. سناریوی *Opt.4* نیز مشابه *Norm.4* است. صرفه‌جویی به ۲۰.۲ درصد و SOC_{max} متوسط به ۹۱٪ افزایش یافته است. درحالی‌که تعداد کل شاخه‌های موازی خازن‌ها به ۵۰ کاهش یافته است.

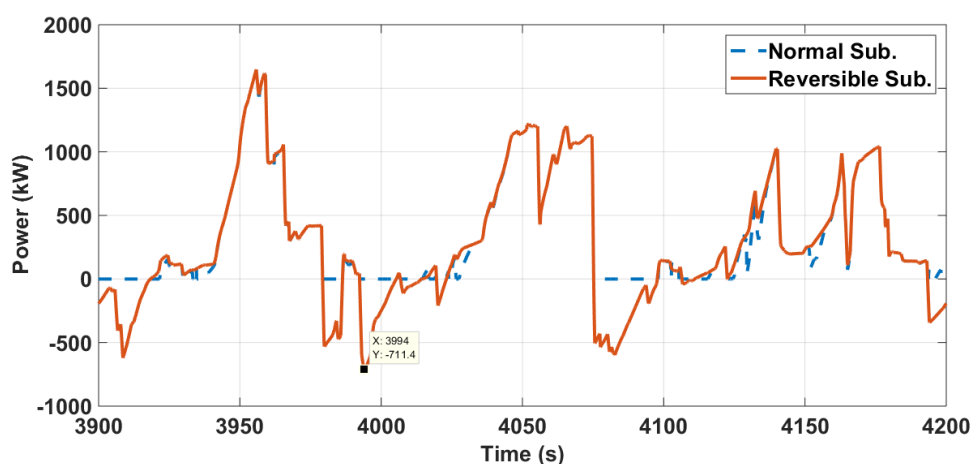
در سناریوی آخر یعنی $Opt.5$ ، بهینه‌سازی اندازه و مکان ذخیره‌سازها با مشخصه سرعت بهینه برای سیستم چندقطاره انجام شده است. نتایج در ردیف ۱۰ جدول‌های (۲-۵) و (۳-۵) نشان می‌دهد که صرفه‌جویی نسبت به سناریوی $Norm.5$ خیلی بیشتر است. بعلاوه تعداد کل خازن‌ها نیز از ۳۸ به ۳۵ کاهش پیدا کرده است. صرفه‌جویی کل انرژی مطابق رابطه (۹-۵) محاسبه می‌شود. با توجه با این نتایج می‌توان گفت که با بهینه‌سازی مشخصه سرعت، صرفه‌جویی بیشتر انرژی با خازن کمتر یعنی هزینه سرمایه‌گذاری کمتر حاصل شده است. علیرغم کاهش تعداد خازن‌ها از ۱۱۰ به ۳۵، صرفه‌جویی حدود ۱٪ از مقدار حداکثر خود کاهش یافته است که از نظر اقتصادی بسیار حائز اهمیت است. بازده ذخیره‌سازها نیز افزایش یافته و متوسط SOC_{max} به ۱ رسیده است. منحنی‌های SOC برای سناریوهای مختلف در شکل‌های (۱۱-۵) و (۱۲-۵) نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که سناریوهای $Norm.5$ و $Opt.5$ بهترین مشخصه‌ها را دارند.

$$\Delta E \%_{\max} = \frac{301.7 - 241.4}{301.7} \times 100 = 20\% \quad (۹-۵)$$

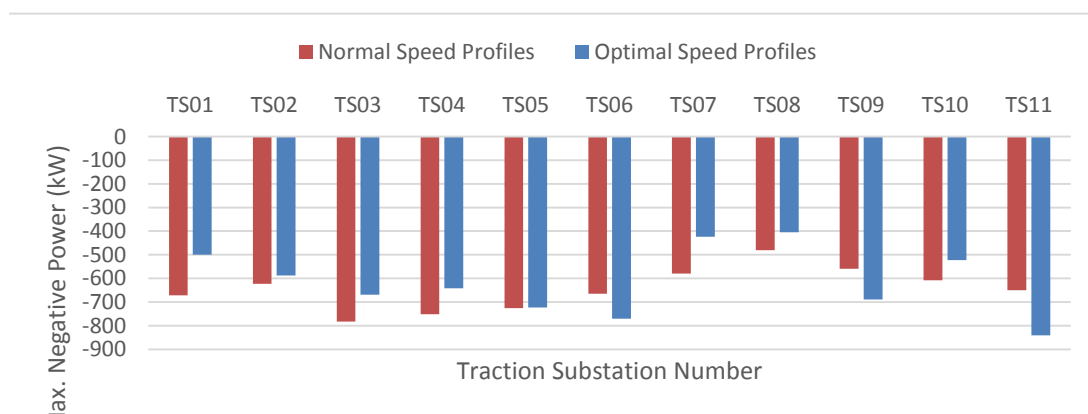
مقدار انرژی مبادله شده توسط ذخیره‌سازها با شبکه در یک دوره تناوب E_{ESS} است. مشاهده می‌شود که با استفاده از مشخصه سرعت بهینه، این انرژی از ۶۸ به ۴۱ kWh کاهش پیدا کرده است که می‌تواند عمر طولانی‌تر ابرخازن‌ها را به دنبال داشته باشد. در فصل قبل نرخ بازیابی انرژی بازتولیدی ترمزی برای کل شبکه به‌عنوان ضریب β تعریف شد. مشاهده می‌شود که با استفاده همزمان از ذخیره‌سازهای انرژی و بهینه‌سازی مشخصه سرعت این ضریب به سمت ۱ میل می‌کند. تلفات الکتریکی E_{loss} شبکه نیز با بهینه کردن مشخصه سرعت کاهش می‌یابد ولی به تعداد و محل ذخیره‌سازها بستگی ندارد. دلیل عدم کاهش تلفات شبکه با قرار گرفتن ذخیره‌سازهای ساکن در شبکه، این است که جریان خط تغییری نکرده است؛ قبلاً توان موردنیاز قطارها از طریق پست‌های کشش تأمین می‌شده است و حالا از طریق ذخیره‌سازها در همان مکان تأمین می‌شود.



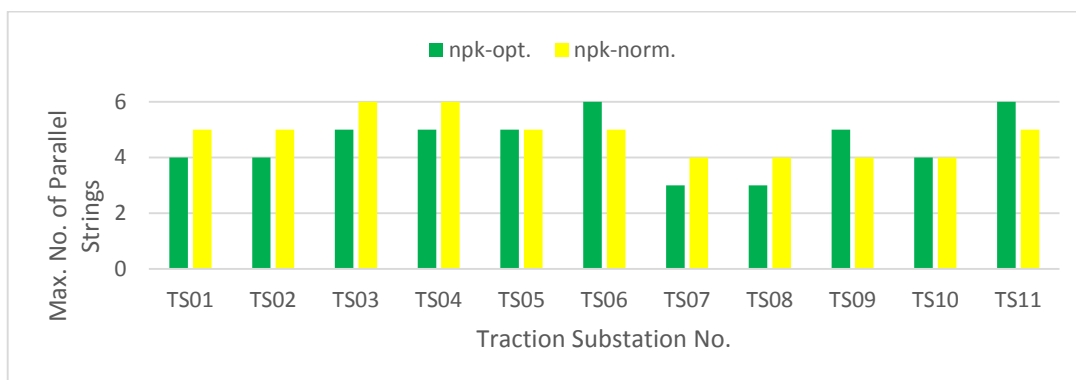
شکل (۷-۵) توان لحظه‌ای پست کشش شماره ۵ - راهبری عادی



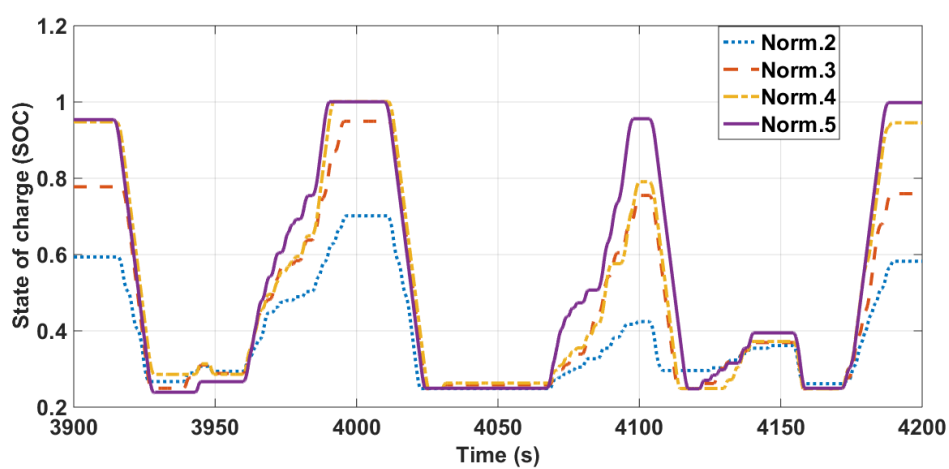
شکل (۸-۵) توان منفی لحظه‌ای پست کشش شماره ۵ - راهبری بهینه



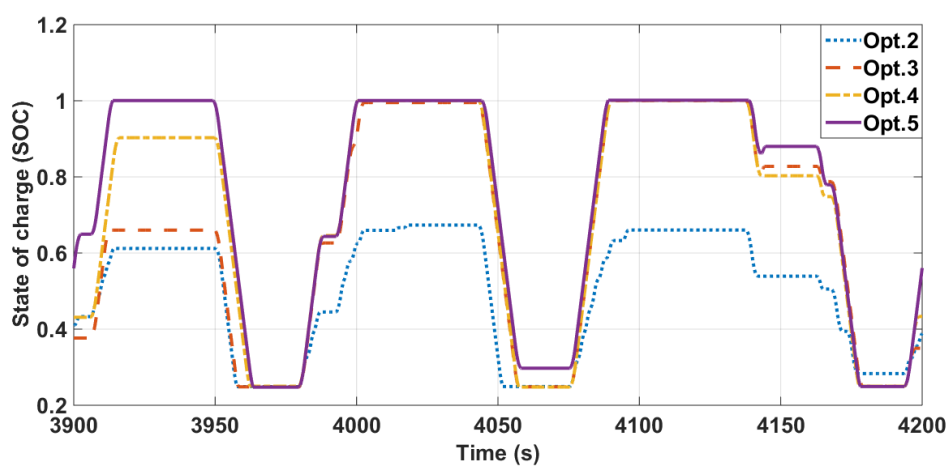
شکل (۹-۵) حداکثر توان لحظه‌ای منفی در پست‌های کشش



شکل (۵-۱۰) حداکثر تعداد شاخه‌های موازی ذخیره‌سازها ($n_{p_{max}}$) در پست‌های کشش



شکل (۵-۱۱) SOC برای ذخیره‌ساز واقع در پست کشش ۵- راهبری عادی



شکل (۵-۱۲) SOC برای ذخیره‌ساز واقع در پست کشش ۵- راهبری بهینه

فصل ششم:

تحلیل اقتصادی

بهینه‌سازی همزمان

مشخصه سرعت و

ذخیره‌سازهای خازنی

۱-۶ مقدمه

در بخش قبل نشان داده شد که استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی خازنی، از یک طرف انرژی کل ورودی سیستم را کاهش می‌دهد و از طرف دیگر باعث افزایش هزینه سرمایه‌گذاری می‌شود؛ لذا بهترین کار ایجاد مصالحه‌ای بین دو هدف یعنی هزینه انرژی و هزینه ذخیره‌ساز است. در این فصل ابتدا تابع هزینه، شامل هزینه کل انرژی و سرمایه‌گذاری تعریف شده است؛ سپس نقش پارامترهای مختلف در حداقل کردن هزینه کل بررسی شده است و با انجام تحلیل حساسیت میزان تأثیرپذیری تابع هدف از هریک از عوامل بررسی شده است.

۲-۶ محاسبه هزینه کل سرمایه‌گذاری و انرژی

تابع هدف نهایی یعنی هزینه کل (C_{tot}) به صورت رابطه (۱-۶) تعریف می‌شود.

$$C_{tot} = C_{ESS} + C_{energy} \quad (۱-۶)$$

که C_{ESS} هزینه کل ذخیره‌سازها است.

$$C_{ESS} = \begin{cases} 0 & n_{pk} = 0 \\ \sum_{k=1}^{N_{sub}} (C_0 + C_{module} \times n_s \times n_{pk}), & n_{pk} \neq 0 \end{cases} \quad (۲-۶)$$

C_0 هزینه ثابت شامل هزینه نصب و تجهیزات جانبی آن شامل مبدل‌های DC/DC و وسایل اندازه‌گیری و حفاظتی است. از آنجاکه این تجهیزات نیز با افزایش تعداد شاخه‌های موازی خازن‌ها، زیاد می‌شوند، می‌توان هزینه کل ذخیره‌سازها را به صورت ضربی از تعداد شاخه‌های موازی نیز در نظر گرفت و به صورت رابطه (۳-۶) نشان داد.

$$C_{ESS} = n_s \times C_{module} \times Sum_{npk} \times k_{equip} \quad (۳-۶)$$

که n_s تعداد بلوک‌های سری در هر زنجیره، Sum_{npk} تعداد کل شاخه‌های موازی ذخیره‌ساز در همه پست‌ها، C_{module} قیمت هر بلوک خازنی و k_{equip} ضریب مربوط به هزینه نصب و مبدل و سایر تجهیزات است. C_{energy} هزینه کل انرژی در دوره مطالعه است که با استفاده از روش ارزش خالص فعلی^۱ به صورت رابطه (۴-۶) بیان می‌شود [113].

¹ Net Present Value (NPV)

$$C_{\text{energy}} = \begin{cases} \delta \times E_{\text{tot}}^{\text{year}} \times \left[\frac{1 - (1+j)^N (1+i)^{-N}}{i-j} \right], & i \neq j \\ \delta \times E_{\text{tot}}^{\text{year}} \times \frac{N}{1+i}, & i = j \end{cases} \quad (4-6)$$

که δ قیمت واحد انرژی الکتریکی (در پایان سال اول مطالعه) برحسب \$/kWh، N تعداد سال‌های مطالعه (عمر مفید ذخیره‌ساز)، i نرخ بهره، j نرخ رشد قیمت انرژی الکتریکی (رشد قیمت برق به صورت سری هندسی در نظر گرفته شده است) و $E_{\text{tot}}^{\text{year}}$ انرژی کل مصرفی در یک سال که توسط رابطه (۵-۶) بیان می‌شود.

$$E_{\text{tot}}^{\text{year}} = \frac{1}{3.6 \times 10^5} \sum_{k=1}^{N_{\text{sub}}} \left[\left(\int_0^{T_{\text{peak}}} V_{\text{sub}} \cdot I_{\text{sub}} dt + \int_0^{T_{\text{off-peak}}} V_{\text{sub}} \cdot I_{\text{sub}} dt \right) \cdot N_{\text{day}}^{\text{normal}} + \left(\int_0^{T_{\text{holiday}}} V_{\text{sub}} \cdot I_{\text{sub}} dt \right) \cdot (365 - N_{\text{day}}^{\text{normal}}) \right] \quad (5-6)$$

که برای سیستم مورد مطالعه با زمان‌های هدوی مطابق جدول (۷-آ)، تعداد روزهای عادی ($N_{\text{day}}^{\text{normal}}$) در یک سال، ۳۰۰ روز است و هر روز عادی شامل ۶ ساعت با هدوی ۳۰۰ ثانیه (پیک مسافری) و ۱۰ ساعت با هدوی ۳۶۰ ثانیه است. بنابراین تعداد روزهای تعطیل ۶۵ روز است و هرروز ۱۵ ساعت کاری با هدوی ۱۲ دقیقه (۷۲۰ ثانیه) است؛ لذا تعداد کل هدوی های ۳۰۰، ۳۶۰ و ۷۲۰ ثانیه در هر سال به ترتیب، ۲۱۶۰۰، ۳۰۰۰۰ و ۴۸۷۵ است. انرژی کل ورودی سیستم در هدوی های ۵ و ۶ و ۱۲ دقیقه که به ترتیب عبارتند از: $E_{\text{in-tot}}(\text{HW } 300\text{s})$ و $E_{\text{in-tot}}(\text{HW } 360\text{s})$ و $E_{\text{in-tot}}(\text{HW } 720\text{s})$ برای با استفاده از پخش توان DC تعیین می‌شود؛ لذا می‌توان انرژی کل مصرفی سالانه را به صورت رابطه (۶-۶) بیان نمود (از آنجا که اطلاع دقیقی از نحوه رشد بار در دسترس نیست، فرض شده است که میزان مصرف انرژی سالانه در دوره مطالعه ثابت است ولی در صورت معلوم بودن، می‌توان این پارامتر را نیز مانند نرخ رشد قیمت، مدل کرد).

$$E_{\text{tot}}^{\text{year}} = E_{\text{in-tot}}(\text{HW } 300\text{s}) \times 21600 + E_{\text{in-tot}}(\text{HW } 360\text{s}) \times 30000 + E_{\text{in-tot}}(\text{HW } 720\text{s}) \times 4875 \quad (6-6)$$

یکی از مشکل‌ترین بخش‌های مربوط به تحلیل اقتصادی، تعیین پارامترهای تأثیرگذار در هزینه‌ها است. چون هدف این رساله، تجزیه و تحلیل یک سیستم واقعی است، سعی شده است تا حد امکان از

مقادیر واقعی استفاده شود. اولین پارامتر، هزینه انرژی است. در کشور ما هیچ مرجع رسمی برای تعیین قیمت واقعی انرژی وجود ندارد و سازمان‌های وابسته به وزارت نیرو نیز هریک بنا به نیاز خود، از اعداد متفاوتی استفاده می‌کنند. برای تعیین قیمت انرژی بهترین مرجعی که در اختیار است، گزارش‌های آژانس بین‌المللی انرژی^۱ است. با توجه به گزارش اطلاعات انرژی سال ۲۰۱۶ این سازمان [114]، میانگین قیمت انرژی برای مصارف صنعتی ۰,۱۲ دلار بر کیلووات ساعت بوده است. چون اغلب سازندگان ذخیره‌سازهای ابرخازنی، عمر مفید این سیستم‌ها را ۱۰ سال با حدود یک میلیون بار شارژ و دشارژ اعلام کرده‌اند [112]، دوره مطالعه ۱۰ سال در نظر گرفته شده است. نرخ بهره ۴ درصد فرض شده است و رشد قیمت برق نیز صفر در نظر گرفته شده است. قیمت هر بلوک ابرخازنی با مشخصات ذکرشده در جدول (۵-۱)، با استعلام از فروشندگان بین‌المللی و سایت‌های معتبر، ۴۸۰۰ دلار در نظر گرفته شده است (قیمت‌ها و مدل‌های اعلام‌شده متفاوت هستند که میانگین آن‌ها استفاده شده است). ضریب مربوط به قیمت تجهیزات نیز با توجه به اینکه بخش اصلی این هزینه مربوط به قیمت مبدل است، ۲۰ درصد در نظر گرفته شده است. این پارامترها در جدول (۶-۱) خلاصه شده‌اند. ضمناً از آنجاکه نرخ برابری ارز و ریال در حال تغییر است، و از طرفی قیمت انرژی و خازن به‌عنوان دو پارامتر اصلی تحلیل اقتصادی، برحسب دلار است، کلیه محاسبات این فصل برحسب دلار انجام شده است.

در جدول (۶-۲) مقادیر انرژی کل ورودی سیستم در همدوی های ۵ و ۶ و ۱۲ دقیقه یعنی $E_{in-tot} (HW 300s)$ و $E_{in-tot} (HW 360s)$ و $E_{in-tot} (HW 720s)$ برای سناریوهای مختلف با استفاده از

جدول (۶-۱) پارامترهای مورد استفاده در تحلیل اقتصادی بهینه‌سازی هزینه انرژی و سرمایه‌گذاری

پارامتر	مقدار
δ (قیمت واحد انرژی الکتریکی)	۰,۱۲ \$/kWh
C_{module} (قیمت خازن)	۴۸۰۰ دلار
N (عمر خازن)	۱۰ سال
i (نرخ بهره)	۰,۰۴
j (رشد سالیانه قیمت برق)	۰
K_{equip} (ضریب قیمت تجهیزات)	۱,۲
n_s (تعداد خازن سری)	۶

¹ International Energy Agency

جدول (۶-۲) مقادیر انرژی و هزینه در سناریوهای مختلف به ازای پارامترهای جدول (۶-۱)

سناریو	Sum_{nPK}	$E_{in-tot} (HW 300s)$	$E_{in-tot} (HW 360s)$	$E_{in-tot} (HW 720s)$	$E_{tot}^{year} (MWh)$	$C_{energy} (M\$)$	$C_{ESS} (M\$)$	$C_{tot} (M\$)$	$\Delta C_{tot} \%$	$\Delta E_{tot} \%$
Norm.1	۰	۳۰۱,۷	۳۰۰,۶	۳۶۳,۷	۱۷۳۰۹	۱۶,۹	۰,۰	۱۶,۹	۰,۰	۰,۰
Norm.2	۱۱۰	۲۶۵,۹	۲۷۵,۷	۳۲۹,۳	۱۵۶۲۱	۱۵,۲	۳,۸	۱۹,۰	-۱۲,۸	۹,۸
Norm.3	۶۶	۲۶۴,۸	۲۷۸,۶	۳۳۱,۳	۱۵۶۹۴	۱۵,۳	۲,۳	۱۷,۶	-۴,۲	۹,۳
Norm.4	۵۳	۲۶۶,۶	۲۷۹,۱	۳۳۲,۰	۱۵۷۴۹	۱۵,۳	۱,۸	۱۷,۲	-۱,۸	۹,۰
Norm.5	۳۸	۲۶۶,۷	۲۸۱,۴	۳۳۷,۹	۱۵۸۵۰	۱۵,۴	۱,۳	۱۶,۸	۰,۶	۸,۴
Opt.1	۰	۲۶۰,۱	۲۷۸,۵	۳۱۰,۶	۱۵۴۸۷	۱۵,۱	۰,۰	۱۵,۱	۱۰,۵	۱۰,۵
Opt.2	۱۱۰	۲۳۸,۵	۲۴۸,۹	۲۷۴,۰	۱۳۹۵۳	۱۳,۶	۳,۸	۱۷,۴	-۳,۲	۱۹,۴
Opt.3	۶۶	۲۳۹,۳	۲۵۰,۱	۲۷۶,۹	۱۴۰۲۱	۱۳,۷	۲,۳	۱۵,۹	۵,۵	۱۹,۰
Opt.4	۵۰	۲۴۰,۸	۲۵۱,۹	۲۸۵,۳	۱۴۱۵۰	۱۳,۸	۱,۷	۱۵,۵	۸,۰	۱۸,۳
Opt.5	۳۵	۲۴۱,۴	۲۵۷,۳	۲۹۱,۲	۱۴۳۵۱	۱۴,۰	۱,۲	۱۵,۲	۹,۹	۱۷,۱

پخش توان به دست آمده است. با استفاده از این انرژی‌ها و رابطه (۶-۶) مقدار انرژی مصرفی سالیانه E_{tot}^{year} در هر سناریو حساب شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، مشاهده می‌شود که انرژی کل مصرفی در سناریوی پایه *Norm.1* (مشخصه سرعت عادی بدون ذخیره‌ساز) بیشترین مقدار خود را دارد و در سناریوی *Opt.2* (مشخصه سرعت بهینه با حداکثر تعداد ذخیره‌ساز) کمترین مقدار را دارد و صرفه‌جویی انرژی ($\Delta E_{tot} \%$) بیشترین مقدار یعنی ۱۹,۴ درصد را دارا است. ولی در این سناریو، مقدار صرفه‌جویی هزینه کل ($\Delta C_{tot} \%$) منفی ۳,۲ درصد است. یعنی هزینه حتی بیشتر از سناریوی پایه است؛ لذا این سناریو از نظر اقتصادی با مقادیر فعلی پارامترها، توجیه‌پذیر نیست. در بین سناریوهای مورد مطالعه، سناریوی *Opt.1* یعنی راهبری بهینه بدون ذخیره‌ساز، از نظر اقتصادی با ۱۰,۵ درصد صرفه‌جویی بهترین است. ضمن اینکه درصد صرفه‌جویی انرژی نیز حدود ۱۰,۵ درصد و قابل قبول است. سناریوی هدف که *Opt.5* است (مشخصه سرعت بهینه با تعداد بهینه ذخیره‌ساز)، نیز با ۹,۹ درصد صرفه‌جویی هزینه، از نظر اقتصادی بعد از سناریوی *Opt.1* قرار دارد. این سناریو گرچه در حال حاضر و با دوره مطالعه ۱۰ ساله، از نظر اقتصادی در ردیف دوم است، ولی با توجه به صرفه‌جویی بالای انرژی (۱۷,۱ درصد) می‌تواند با تغییر بعضی از پارامترها، نسبت به سناریوی *Opt.1* از نظر اقتصادی نیز در

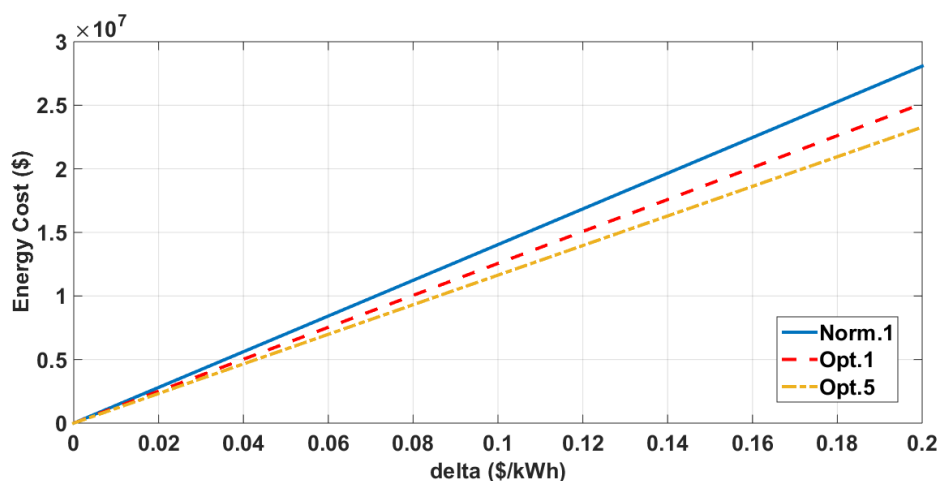
وضعیت بهتری قرار گیرد. برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر تحلیل اقتصادی، در بخش بعد تحلیل حساسیت نسبت به بعضی از پارامترها انجام شده است.

۳-۶ تحلیل حساسیت تابع هزینه کل

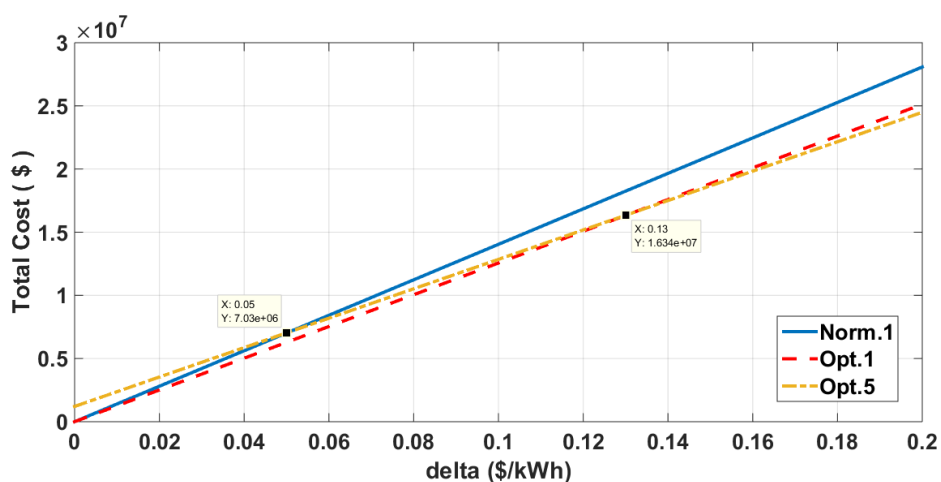
در تحلیل حساسیت با توجه به اینکه تعدادی از سناریوها از نظر بهینه بودن جایگاه مناسبی ندارند، برای اینکه امکان مقایسه بهتری فراهم شود، فقط سه سناریوی *Norm.1* (مشخصه سرعت عادی بدون ذخیره‌ساز) و *Opt.1* (مشخصه سرعت بهینه بدون ذخیره‌ساز) و *Opt.5* (مشخصه سرعت بهینه با تعداد بهینه ذخیره‌ساز) مقایسه شده‌اند.

۱-۳-۶ تغییر قیمت انرژی الکتریکی

همان‌طور که گفته شد، قیمت انرژی در حال حاضر ۰,۱۲ دلار بر کیلووات ساعت فرض شده است، که متوسط مقادیر ذکر شده در [114] است. بازه تغییرات بین صفر تا ۲۰ سنت برای این پارامتر در نظر گرفته شده و نتایج در شکل‌های (۱-۶) تا (۴-۶) نشان داده شده‌اند. در شکل (۱-۶) مشاهده می‌شود که با افزایش قیمت انرژی، هزینه کل انرژی نیز افزایش می‌یابد، که طبیعی است. تغییرات هزینه کل برحسب قیمت برق در شکل (۲-۶) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای قیمت‌های کمتر از ۱۳ سنت، راهبری بهینه بدون ذخیره‌ساز اقتصادی‌تر است و برای قیمت‌های بالاتر، راهبری بهینه با خازن گذاری بهینه، اقتصادی‌ترین سناریو است.

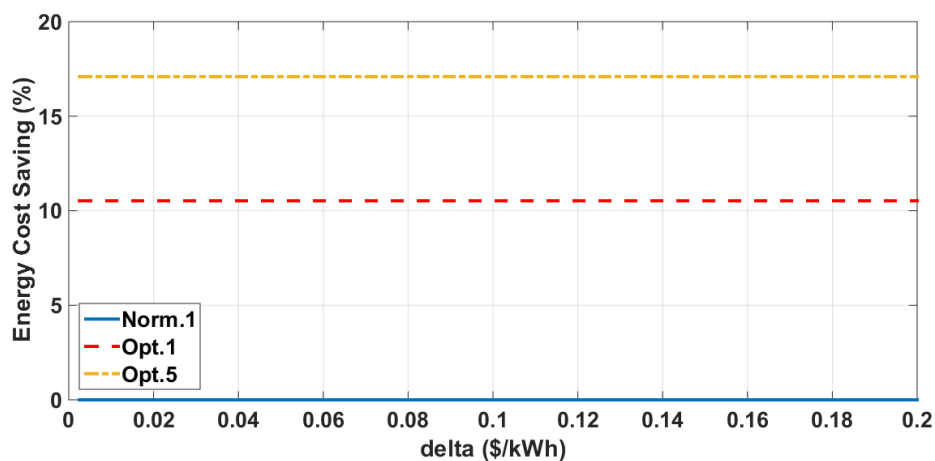


شکل (۱-۶) تغییرات هزینه انرژی کل برحسب قیمت واحد انرژی الکتریکی

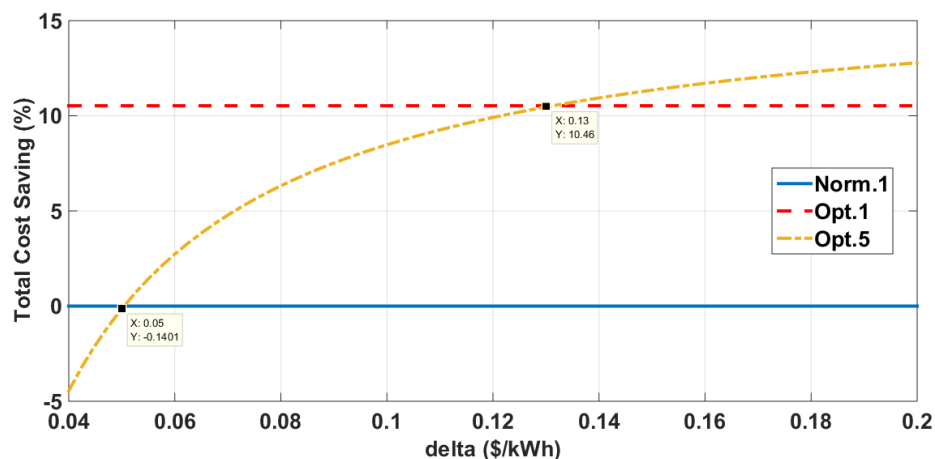


شکل (۲-۶) تغییرات هزینه کل سرمایه‌گذاری و انرژی برحسب قیمت واحد انرژی الکتریکی

شکل‌های (۳-۶) و (۴-۶) نیز درصد صرفه‌جویی هزینه انرژی و هزینه کل را نشان می‌دهند.



شکل (۳-۶) تغییرات درصد صرفه‌جویی هزینه کل انرژی برحسب قیمت واحد انرژی الکتریکی

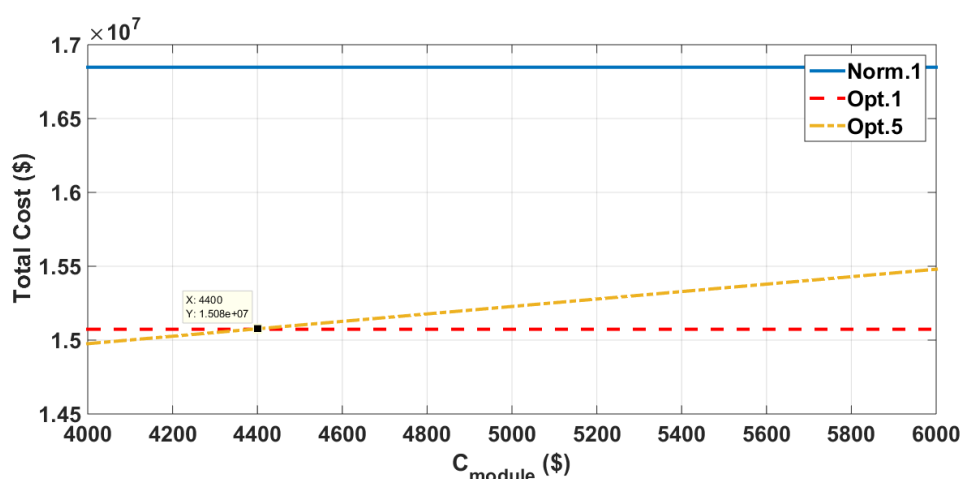


شکل (۴-۶) تغییرات درصد صرفه‌جویی هزینه کل سرمایه‌گذاری و انرژی برحسب قیمت واحد انرژی الکتریکی

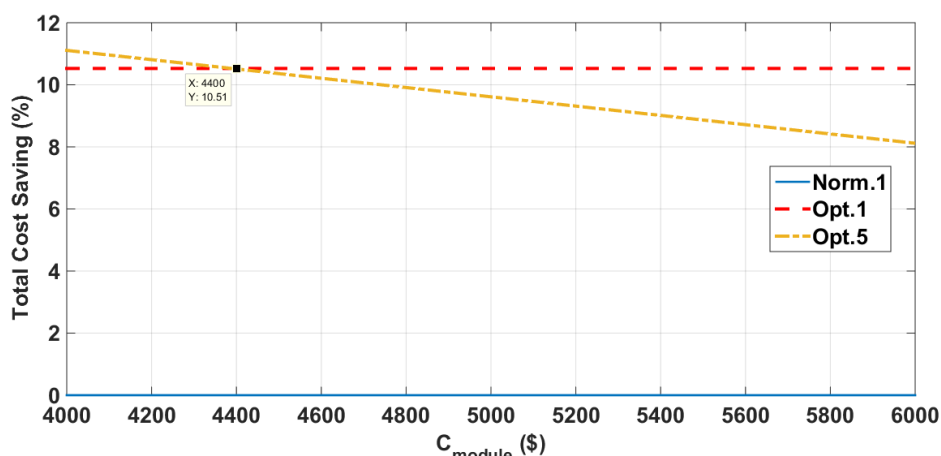
درمجموع با مقایسه منحنی‌های فوق می‌توان گفت که با فرض ثابت بودن سایر عوامل تأثیرگذار بر هزینه، اگر قیمت برق بیش از $0.13 \text{ \$/kWh}$ شود، خازن گذاری بهینه مقرون به صرفه تر است.

۶-۳-۲ تغییر قیمت ابرخازن

پارامتر بعدی قیمت ابرخازن‌ها است. از آنجاکه این فناوری نسبتاً جدید است و با توجه به پیشرفت فناوری نانو در جهان، قیمت ابرخازن‌ها به شدت رو به کاهش است، به صورتی که در شروع فرایند این رساله، قیمت هر بلوک خازنی از نوع معرفی شده در این فصل، از حدود ۶۰۰۰ دلار به کمتر از ۵۰۰۰ دلار رسیده است و پیش‌بینی‌های اقتصادی و بازار حاکی از ادامه این سیر نزولی است. تأثیر تغییر قیمت خازن بر هزینه‌ها در شکل‌های (۵-۶) و (۶-۶) نشان داده شده است.



شکل (۵-۶) تغییرات هزینه کل سرمایه‌گذاری و انرژی برحسب قیمت ابرخازن



شکل (۶-۶) تغییرات درصد صرفه‌جویی هزینه کل سرمایه‌گذاری و انرژی برحسب قیمت ابرخازن

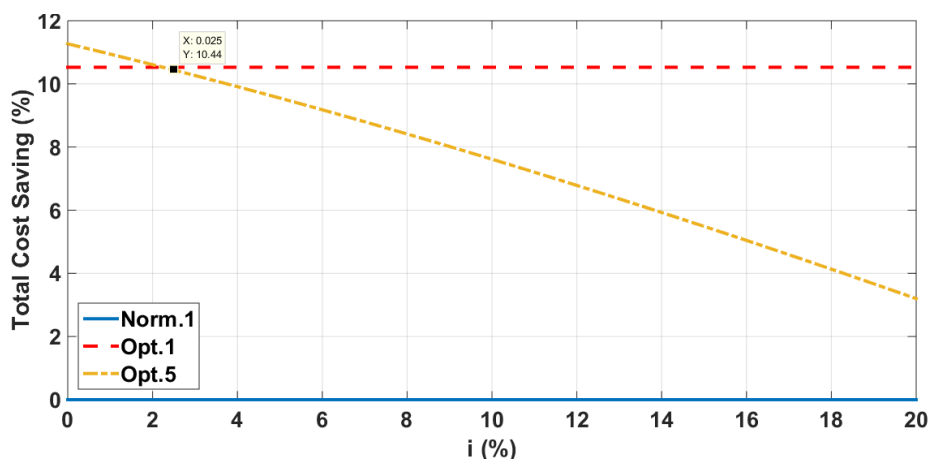
مشاهده می‌شود که با کاهش قیمت هر بلوک خازنی به کمتر از ۴۴۰۰ دلار، با فرض ثابت بودن سایر پارامترها، سناریوی مشخصه سرعت بهینه همراه با خازن گذاری بهینه، از نظر اقتصادی بهترین است. تأثیر تغییر قیمت مبدل و سایر تجهیزات جانبی ذخیره‌ساز را نیز می‌توان در همین افزایش قیمت خازن‌ها مدل کرد، لذا از بررسی جداگانه آن خودداری شده است.

۳-۳-۶ تغییرات نرخ بهره

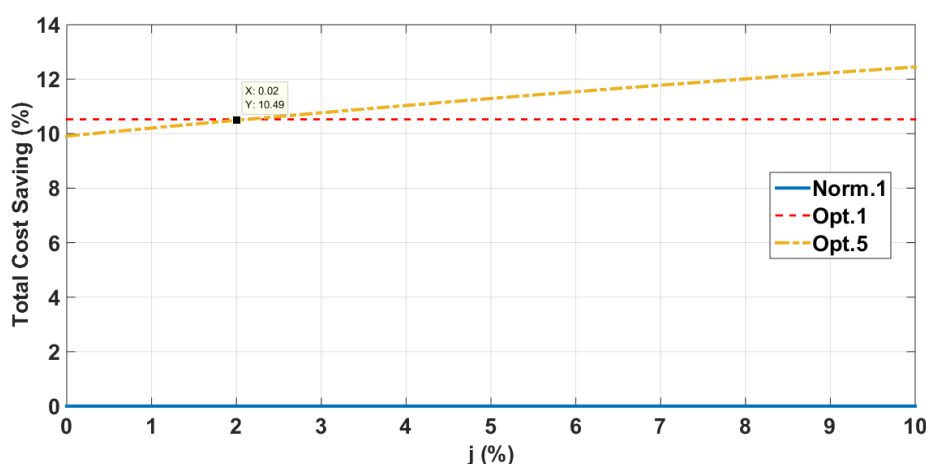
نرخ بهره نیز یکی از پارامترهایی است که بر هزینه کل تأثیرگذار است. در کشور ما به دلیل بالا بودن نرخ تورم، نرخ بهره مطلوب بالا است درحالی‌که در کشورهای صنعتی این نرخ کمتر از ۵ درصد است. لذا یک بازه از صفر تا ۲۰ درصد برای تغییرات آن در تحلیل حساسیت در نظر گرفته شده و نتایج در شکل (۷-۶) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که هزینه کل به شدت به نرخ بهره وابسته است و برای نرخ کمتر از ۲٫۵ درصد، سناریوی $Opt.5$ اقتصادی است ولی با افزایش نرخ بهره، توجیه اقتصادی این سناریو به سرعت کاهش می‌یابد (غیراقتصادی بودن خازن گذاری با وضعیت اقتصادی فعلی ایران). دلیل این امر این است که وقتی نرخ بهره بالا باشد، ارزش صرفه‌جویی‌های قیمت برق در سال‌های آینده ناچیز می‌شود؛ درحالی‌که برای خرید ذخیره‌ساز کل هزینه در سال اول پرداخت شده است.

۴-۳-۶ رشد سالیانه قیمت انرژی الکتریکی

قیمت برق را می‌توان در طول سال‌های مطالعه ثابت فرض کرد، ولی در نظر گرفتن رشد سالیانه قیمت برق بخصوص در زمانی که تورم بالا است، امری منطقی است. تأثیر تغییرات این پارامتر بر



شکل (۷-۶) تغییرات درصد صرفه‌جویی هزینه کل سرمایه‌گذاری و انرژی نسبت به نرخ بهره



شکل (۸-۶) تغییرات درصد صرفه‌جویی هزینه کل سرمایه‌گذاری و انرژی نسبت به رشد سالیانه قیمت برق

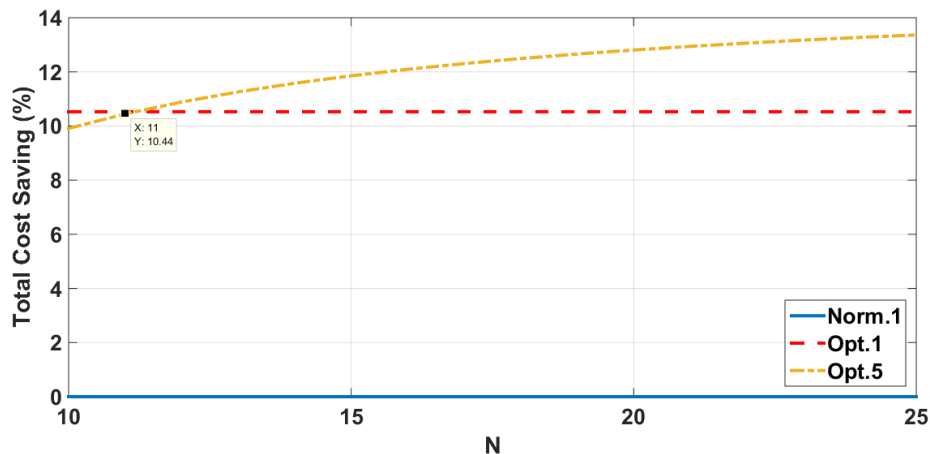
صرفه‌جویی هزینه کل، در شکل (۸-۶) نشان داده شده است. روند تأثیر این پارامتر برعکس نرخ بهره است، که منطقی است. یعنی هرچه قیمت برق در سال‌های آینده بیشتر افزایش پیدا کند، سرمایه‌گذاری امسال برای ذخیره‌سازها اقتصادی‌تر خواهد بود.

۶-۳-۵ افزایش تعداد سال‌های مطالعه (افزایش عمر ذخیره‌سازها)

همان‌طور که اشاره شد عمر مفید ابرخازن‌ها در حال حاضر توسط سازندگان حدود ۱۰ سال اعلام شده است، ولی با پیشرفت فناوری احتمال افزایش عمر آن‌ها زیاد است. این افزایش طول عمر در حال حاضر برای باتری‌ها تا حد زیادی محقق شده است و ذخیره‌سازهای نوع باتری لیتیومی با عمر بالای ۱۵ سال به بازار عرضه شده است. افزایش عمر ذخیره‌سازها نیز از پارامترهایی است که نقش مثبتی در اقتصادی نمودن سناریوهای استفاده از ذخیره‌ساز دارد. تأثیر تغییرات N بر هزینه در شکل (۹-۶) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که اگر عمر ذخیره‌ساز از ۱۱ سال بیشتر باشد، با مقادیر ثابت بقیه پارامترها، سناریوی سرعت بهینه و خازن بهینه، اقتصادی‌ترین است.

۶-۳-۶ تأثیر تغییر همزمان قیمت خازن و نرخ بهره بر سناریوی هدف

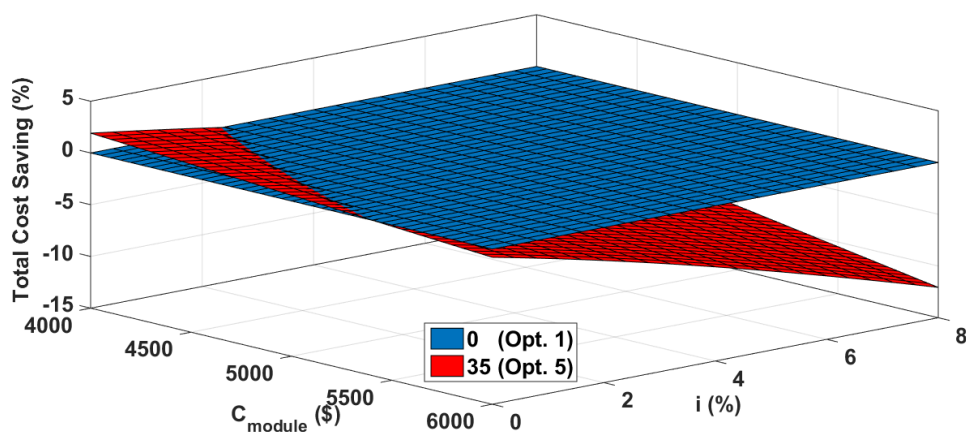
تغییرات همزمان چند پارامتر را بر هریک از سناریوها و یا تعدادی از آن‌ها نیز می‌توان بررسی کرد؛ برای جلوگیری از پیچیدگی شکل‌ها و تحلیل راحت‌تر، فقط تأثیر دو پارامتر قیمت خازن و نرخ بهره بر سناریوهای $Opt.1$ و $Opt.5$ در شکل (۱۰-۶) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در بازه وسیعی از تغییرات پارامترهای موردنظر، سناریوی مشخصه سرعت بهینه (منحنی آبی‌رنگ) از نظر



شکل (۹-۶) تغییرات درصد صرفه‌جویی هزینه کل سرمایه‌گذاری و انرژی بر حسب عمر ذخیره‌ساز

اقتصادی مناسب‌تر است و در بخش کوچکی نیز استفاده هم‌زمان از ذخیره‌ساز و مشخصه سرعت بهینه (منحنی قرمز رنگ)، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه تر است.

با جمع‌بندی نتایج فوق می‌توان گفت که استفاده از مشخصه سرعت عادی، چه با و چه بدون ذخیره‌ساز، تقریباً هیچ‌وقت مقرون به صرفه نیست و همان‌طور که از ابتدا پیش‌بینی شده بود و در نهایت نیز نشان داده شد، بهینه‌سازی پروفایل سرعت، علاوه بر کاهش انرژی کل مصرفی می‌تواند موضوع استفاده از ابرخازن‌ها را به عنوان ذخیره‌ساز ساکن که تاکنون غیراقتصادی ارزیابی می‌شده است، به راهکاری عملی و اقتصادی تبدیل کند. توجیه اقتصادی این روش به پارامترهای مختلفی بستگی دارد که تأثیر هر یک از آن‌ها بر مقدار هزینه کل و میزان صرفه‌جویی در این فصل نشان داده شد.



شکل (۱۰-۶) تأثیر تغییر هم‌زمان قیمت خازن و نرخ بهره بر درصد صرفه‌جویی هزینه کل سرمایه‌گذاری و انرژی

فصل هفتم:

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۷-۱ نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا با معرفی یک روش ساده و دقیق و درعین حال عملیاتی برای بهینه‌سازی مشخصه سرعت قطارها، صرفه‌جویی حدود ۴,۵ درصد در انرژی ورودی کل سیستم برای یک دوره تناوب با هدوی ۵ دقیقه در سیستم مورد مطالعه حاصل شد. سناریوی مبنا برای مقایسه این بهینه‌سازی، بدترین مشخصه سرعت به‌دست‌آمده از الگوریتم جستجوی کامل در فرایند به دست آوردن همه مشخصه‌های سرعت ممکن بود. 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 با قابلیت 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. مؤثر بودن روش موردنظر، با استفاده از نتایج شبیه‌سازی مبتنی بر داده‌های واقعی از خط ۱ قطارشهری مشهد، تأیید گردید. سپس، بهینه‌سازی همزمان انرژی و زمان سفر برای هر قطار در هر فاصله بین ایستگاهی با روش مبتنی بر الگوریتم مرتب‌سازی غیر مغلوب انجام شد و جبهه‌های پرتو برای مقادیر مختلف α به دست آمدند. استفاده از اجتماع جبهه‌های پرتو در بخش کوچکی از سیستم مورد مطالعه با ۶ فاصله بین ایستگاهی، باعث بهبود صرفه‌جویی انرژی به میزان ۰,۱ درصد شد. درنهایت با دو مرحله بهینه‌سازی، صرفه‌جویی کل حدود ۸ درصد حاصل شد که نتیجه قابل قبولی است. همان‌طور که اشاره شد، به دلیل محدودیت در بهینه‌سازی چندقطاره، ممکن است پاسخ‌های بهینه محلی تولید شده باشند ولی بهبود صرفه‌جویی به‌وضوح قابل‌رؤیت است و می‌توان انتظار داشت که روش‌های جامع‌تر بهینه‌سازی بتوانند تأثیر مثبت روش پیشنهادی را بهتر نشان دهند.

در بخش دوم پژوهش، مصرف انرژی در قطارشهری با استفاده همزمان از مشخصه‌های سرعت بهینه حرکت قطار و ذخیره‌سازهای ساکن ابرخازنی کاهش داده شد. سناریوی پایه در این بخش، مشخصه عادی حرکت قطارها بود که از روی ثبت‌کننده وقایع قطار به‌دست‌آمده و شبیه‌سازی شده است. این سناریو نسبت به سناریوی پایه که در مرحله قبل انتخاب شده بود، مصرف انرژی بسیار بالاتری داشت و درنتیجه میزان صرفه‌جویی‌ها در این مقایسه خیلی بیشتر است که به واقعیت نیز نزدیک‌تر

است. بهینه‌سازی پروفایل سرعت به‌تنهایی باعث صرفه‌جویی حدود ۱۴ درصد در انرژی کل نسبت به مشخصه سرعت واقعی شد. نتایج نشان می‌دهد که اگر ظرفیت بهینه ذخیره‌سازها با پروفایل سرعت عادی محاسبه شود، حداکثر ۱۲٪ صرفه‌جویی حاصل می‌شود. درحالی‌که اگر ابتدا مشخصه‌های سرعت بهینه شود، سپس ظرفیت ذخیره‌ساز محاسبه شود، صرفه‌جویی انرژی به میزان قابل‌ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند و به حدود ۲۰٪ می‌رسد. ضمن اینکه مقدار ابرخازن موردنیاز برای این کار کمتر از حالت مشخصه عادی سرعت است. استفاده از مشخصه سرعت بهینه در هنگام محاسبه ذخیره‌سازها، نه‌تنها باعث کاهش ظرفیت ابرخازن موردنیاز می‌شود، بلکه با کم شدن انرژی مبادله شده ذخیره‌سازها در هر دوره تناوب و در نتیجه باعث افزایش عمر کاری ابرخازن‌ها می‌شود؛ از طرفی مشاهده می‌شود که بهینه کردن مشخصه سرعت، تلفات شبکه را نیز کاهش می‌دهد که به دلیل کاهش توان مصرفی و بازتولیدی قطارها و در نتیجه، کاهش جریان خط است. نتیجه کاهش تلفات، افزایش بیشتر بازده انرژی کل شبکه است. ذخیره‌سازهای ساکن تأثیری بر تلفات شبکه ندارند، درحالی‌که باعث کاهش تلفات در مقاومت‌های ترمزی قطارها و در نتیجه افزایش راندمان می‌شوند.

از آنجاکه هدف اصلی این پژوهش، فقط کاهش انرژی ورودی کل شبکه نیست، با تعریف هزینه انرژی و قیمت ذخیره‌سازها به‌عنوان تابع هدف و انجام تحلیل اقتصادی، نشان داده شد که پارامترهای مختلفی بر هزینه کل تأثیرگذار هستند و گرچه با مقادیر فعلی انتخاب شده برای پارامترهای مؤثر، روش بهینه‌سازی پروفایل سرعت به‌تنهایی اقتصادی‌تر است، ولی با تغییرات جزئی مثلاً افزایش طول عمر ذخیره‌سازها و یا کاهش هزینه خرید آن‌ها که فرضی کاملاً منطقی است، سناریوی استفاده همزمان از مشخصه سرعت بهینه و خازن‌گذاری بهینه اقتصادی‌تر خواهد بود. به‌عبارت‌دیگر روش جدید پیشنهادی استفاده ترکیبی از مشخصه سرعت بهینه و ذخیره‌ساز انرژی خازنی در این پژوهش، کارایی و اثربخشی لازم را دارا است.

۲-۷ پیشنهادها برای پژوهش‌های آتی

علیرغم اینکه تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه روش‌های صرفه‌جویی انرژی در قطارشهری انجام شده است ولی بسیاری از آن‌ها در حد تئوری هستند و شاید در بعضی موارد امکان پیاده‌سازی نیز نداشته باشند. بنابراین هنوز زمینه‌های زیادی برای پژوهش‌های کاربردی در آینده وجود دارد که عناوین برخی از آن‌ها که با موضوع پژوهش حاضر نیز مرتبط هستند، عبارتند از:

- ✓ مدل‌سازی و تحلیل استفاده از ذخیره‌سازهای هیبریدی در یک سیستم واقعی
- ✓ بررسی و مقایسه روش‌های توزیع بهینه زمان سفر در مترو
- ✓ تحلیل اقتصادی پژوهش حاضر با در نظر گرفتن هزینه‌های اضافی
- ✓ بالا بردن بازده ذخیره‌سازها با استفاده روش‌های جدید کنترل و مدیریت توان
- ✓ استفاده از مشخصه‌های سرعت بهینه با روش ارائه‌شده در این پژوهش به صورت برخط در بهره‌برداری خودکار قطارها
- ✓ استفاده همزمان از ذخیره‌سازها، مشخصه سرعت بهینه و پست‌های برگشت‌پذیر جهت افزایش راندمان انرژی سیستم
- ✓ بهبود شاخص‌های کیفیت توان با استفاده همزمان از پست‌های برگشت‌پذیر و ذخیره‌سازهای انرژی
- ✓ استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی به منظور صرفه‌جویی انرژی در مترو و کاهش توان اوج در سیستم قدرت
- ✓ استفاده ترکیبی از مولدهای انرژی نو و ذخیره‌سازهای انرژی در سامانه‌های قطارشهری

پیوست آ:

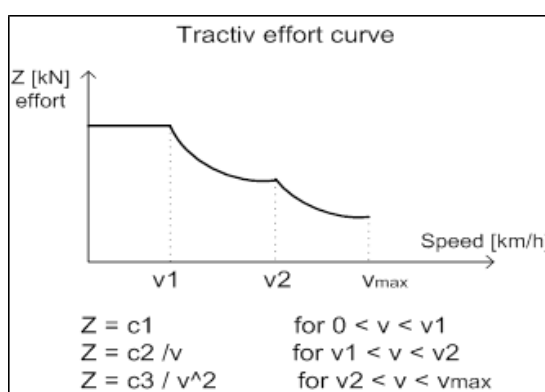
مشخصات فنی خط ۱

قطار شهری مشهد

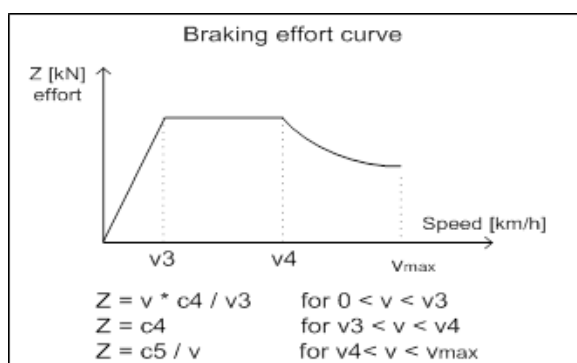
در این پیوست مشخصات قطارها و اطلاعات بهره‌برداری مورد استفاده در شبیه‌سازی آورده شده است.

آ-۱ مشخصات فنی قطارها

قطارهای مورد استفاده در این شبکه از نوع خود کشش می‌باشند. طراحی خط برای قطارهای سه واگنه انجام شده است ولی در حال حاضر هر رام قطار شامل دو واگن است. مشخصات فنی هر واگن در جدول‌های (آ-۱) تا (آ-۳) و منحنی مشخصه مکانیکی شتاب‌گیری و ترمز گیری قطار به ترتیب در شکل‌های (آ-۱) و (آ-۲) آورده شده است. لازم به ذکر است که توان مصرفی جانبی، با توجه به ضریب همزمانی (مثلاً عدم استفاده از سیستم گرمایش و سرمایش) در شبیه‌سازی مقدار 42kW برای هر واگن در نظر گرفته شده است.



شکل (آ-۱) منحنی مشخصه مکانیکی شتاب‌گیری قطار نمونه‌ی خط شماره یک قطارشهری مشهد



شکل (آ-۲) منحنی مشخصه مکانیکی ترمز گیری قطار نمونه‌ی خط شماره یک قطارشهری مشهد

جدول (آ-۱) پارامترهای ورودی قطار نمونه‌ی خط شماره یک قطار شهری مشهد

پارامترهای قطار	مقدار پارامترها به ازای هر واگن
پارامترهای مکانیکی	
جرم ساکن قطار خالی	۴۳ [t]
حداکثر جرم مسافر (برای حالت AW3)	۱۸/۹ [t]
جرم مؤثر (برای حالت AW3)	۶۵/۶ [t]
جرم دوار	۳/۷ [t]
حداکثر نیروی کشش	۸۸/۲۵ [KN]
حداکثر نیروی ترمزی الکترو دینامیکی	۷۶/۵ [KN]
حداکثر نیروی ترمزی مکانیکی	۱۲/۹ [KN]
حداکثر شتاب کششی مجاز	۱/۳ [m/s ²]
حداکثر شتاب ترمزی مجاز	۱/۲ [m/s ²]
حداکثر جرک (تغییرات شتاب)	۱ [m/s ³]
حداکثر سرعت مجاز طراحی	۸۰ [Km/h]
حداکثر سرعت مجاز بهره‌برداری	۷۰ [Km/h]
بازده مکانیکی (گیربکس)	۰/۹۷۵
طول قطار	۳۰ [m]
پارامترهای الکتریکی	
موتور الکتریکی سه فاز AC	۴×۱۳۰ [KW]
ولتاژ نامی تغذیه قطار	۷۵۰ DC [V]
حداکثر مجاز ولتاژ قطار	۹۰۰ DC [V]
حداقل مجاز ولتاژ قطار	۵۰۰ DC [V]
بازده موتور الکتریکی	تابع سرعت طبق جدول (آ-۳) و (آ-۴)
بازده مبدا	۰/۹۷
توان مصرفی جانبی	۷۳/۲ [KW]

جدول (آ-۲) ضرایب منحنی مشخصه مکانیکی برای هر واگن قطار خط شماره یک قطار شهری مشهد

ضرایب منحنی مشخصه مکانیکی قطار در حالت شتاب‌گیری و ترمز‌گیری (برای هر واگن)									
c1	c2	c3	v1	V2	c4	c5	v3	v4	vmax
[kN]	kN*[k m/h]	kN*(k m/h)^2	[km/h]	[km/ h]	[kN]	[kN*(k m/h)]	[km/ h]	[km/ h]	[km/h]
88.25	2256	135040	25.5	60	76.5	4712	10	61.2	80

جدول (آ-۳) تغییرات بازده موتور قطار برحسب سرعت در حالت موتوری

speed [RPM]	speed [km/h]	Electrical Motor efficiency [%]
163.7	3.37	48.43
600.1	12.34	83.13
1203	24.74	89.49
1620.6	33.32	91.32
1650.4	33.94	90.06
2313.2	47.57	93.23
2979	61.26	93.56
3305.6	67.97	93.51

جدول (آ-۴) تغییرات بازده موتور قطار برحسب سرعت در حالت ترمزی

speed [RPM]	speed [km/h]	Electrical Motor efficiency [%]
110.3	2.27	51.75
600.9	12.36	83.25
1238.1	25.46	89.91
1403.1	28.85	90.99
1553.5	31.94	91.63
1579.9	32.49	91.61
1753.1	36.05	92.31
1902.1	39.11	92.91
2200.1	45.24	93.3
2596.6	53.39	93.45
3207.4	65.95	93.29
3326.7	68.41	93.17

مقاومت قطار برای خط ۱ قطارشهری مشهد طبق رابطه (آ-۱) محاسبه می‌شود [106]:

$$R(v) = 0.0064M_{eff} + 0.13n + 0.00014M_{eff}V(0.000046 + 0.00000065(N - 1))AV^2 \quad [KN] \quad (\text{آ-۱})$$

که M_{eff} جرم مؤثر قطار (جرم واگن و مسافران و قسمت گردان) برحسب تن، n تعداد محورها (برای هر واگن ۶)، N تعداد واگن در هر قطار (در حال حاضر ۲ است ولی می‌تواند ۱ یا ۳ نیز باشد)، V سرعت قطار برحسب km/hr، A حداکثر سطح مقطع قطار برحسب مترمربع (9.85 m^2) است. با توجه به شرایط

بهره‌برداری قطار و تعداد مسافر می‌توان رابطه را به صورت ساده‌تر نمایش داد مثلاً برای قطار دو واگنه با حداکثر مسافر (AW_3) رابطه به شکل ساده زیر (معادله دیویس) درمی‌آید:

$$R(v) = 2.4 + 0.018368 V + 0.000459375 V^2 \quad [KN]$$

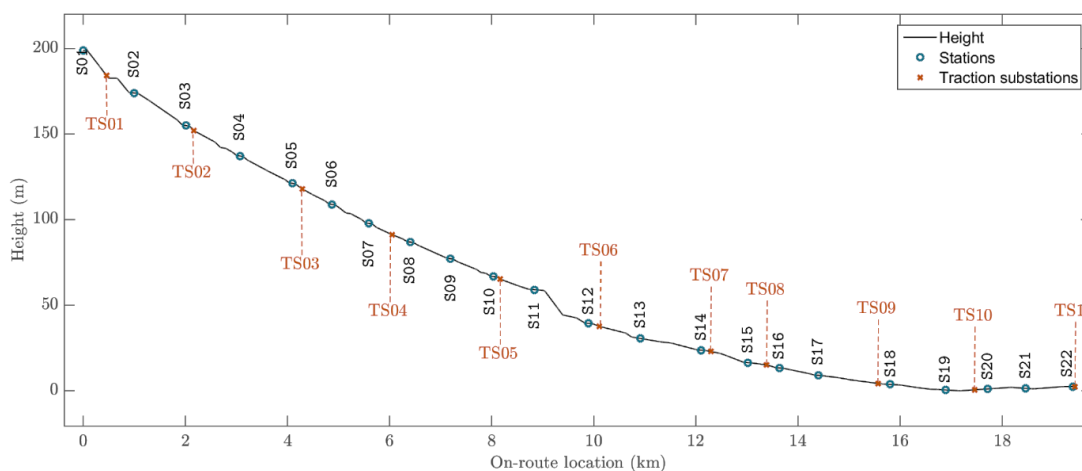
رابطه فوق برای مسیر هم‌سطح است و برای تونل باید مقاومت در ضریب ۱,۳ ضرب گردد.

آ-۲ مشخصات فنی مسیر

مسیر خط ۱ به طول تقریبی ۱۹ کیلومتر (در هر جهت) شامل دو بخش تونل و مسیر هم‌سطح است و تعداد ۱۱ پست کشش و ۲۲ ایستگاه مسافری در طول مسیر قرار دارند. پروفایل ارتفاع مسیر همراه با موقعیت ایستگاه‌ها و پست‌های کشش در شکل (آ-۳) نشان داده شده است. حداکثر محدودیت سرعت طراحی خط ۸۰ km/h است ولی حداکثر محدودیت بهره‌برادری ۷۰ km/h است. در تراک^۱ های واقع در ایستگاه‌ها حداکثر سرعت مجاز ۵۰ km/h است. سایر محدودیت‌ها به دلیل وجود قوس شدید یا سوزن‌ها در جدول (آ-۵) آورده شده است.

آ-۳ مشخصات الکتریکی شبکه

سیستم تغذیه خط از نوع شبکه بالاسری است که تغذیه توسط پست‌های کشش در طول خط انجام می‌شود. توان تحویلی از شبکه بالادستی ۲۰ kV توسط ترانسفورماتورهای قدرت سه سیم پیچ به ولتاژ ۶۰۰ ولت تبدیل می‌شود، سپس توسط یکسو سازهای دیودی ۶ و ۱۲ پالسه یکسو می‌شود و از



شکل (آ-۳) پروفایل ارتفاع مسیر همراه با محل پست‌ها و ایستگاه‌ها برای خط ۱ قطار شهری مشهد

¹ Track

طریق فیدرها به خط بالاسری منتقل می‌شود. مشخصات فنی الکتریکی در جدول (آ-۶) آورده شده است.

آ-۴ اطلاعات بهره‌برداری و جدول زمانی

زمان سیر بین ایستگاه‌ها و زمان توقف در هر ایستگاه طبق برنامه‌ریزی‌های انجام‌شده در جدول‌های (آ-۸) و (آ-۹) خلاصه شده‌اند. لازم به ذکر است که بعضی از زمان‌بندی‌های اعلام شده توسط مرکز فرمان در عمل قابل پیاده‌سازی و اجرا نیستند، لذا مقادیر آن‌ها اصلاح شده است.

جدول (آ-۵) محدودیت سرعت در کل طول خط شماره یک قطارشهری مشهد

موقعیت [m]	حداکثر سرعت مجاز خط [Km/h]
۰	۳۰
۴۹۵	۷۰
۱۹۲۰۲	۲۰
۱۹۹۲۹	۷۰
۳۸۴۱۹	۳۰
۳۹۲۸۲	۳۰

جدول (آ-۶) مشخصات الکتریکی خط شماره یک قطارشهری مشهد

پارامتر	مقدار
ولتاژ نامی شبکه	۷۵۰ V DC
ولتاژ بی‌باری پست	۸۴۰ V DC
تعداد پستهای کشش	۱۱
تعداد ایستگاه مسافری	۲۲
مقاومت اهمی خط بالاسری	۰٫۰۳۶ Ω/km
مقاومت اهمی ریل	۰٫۰۲۲ Ω/km

جدول (آ-۷) سرفاصله زمانی (هدوی) حرکت قطارها در طول سال در خط شماره یک قطارشهری مشهد

پارامتر	مقدار
تعداد روزهای عادی سال (N_{day}^{normal})	۳۰۰ روز
تعداد ساعت‌های اوج مسافر در روزهای عادی (T_{peak})	۶ ساعت
هدوی ساعت‌های اوج مسافر (HW_{peak})	۵ دقیقه
تعداد ساعت‌های عادی در روزهای عادی ($T_{off-peak}$)	۱۰ ساعت
هدوی ساعت‌های عادی ($HW_{off-peak}$)	۶ دقیقه
تعداد ساعت فعالیت در روزهای تعطیل ($T_{holiday}$)	۱۵ ساعت
هدوی روزهای تعطیل ($HW_{holiday}$)	۱۲ دقیقه

جدول (آ-۸) زمان سفر و توقف در فاصله‌های بین ایستگاهی در مسیر شمال (غدير به وكيل آباد)

شماره ایستگاه در شبیه سازی	نام ایستگاه	موقعیت نسبت به مبدأ وكيل آباد (m)	فاصله با ایستگاه بعدی (m)	کل زمان سفر برنامه ریزی شده بین دو ایستگاه	زمان توقف برنامه ریزی شده	زمان خالص سفر بین دو ایستگاه
۱	۲۲- وكيل آباد	۳۹۲۸۲			۶۰	
۴۳	۲۱- کوهستان پارک	۳۷۹۱۴	۱۳۶۸	۴۶۸	۲۰	۴۰۸
۴۲	۲۰- نمایشگاه	۳۶۸۹۹	۱۰۱۵	۱۰۳	۲۵	۸۳
۴۱	۱۹- اقبال لاهوری	۳۵۸۴۳	۱۰۵۶	۱۱۲	۲۵	۸۷
۴۰	۱۸- صیاد شیرازی	۳۴۸۱۶	۱۰۲۷	۱۱۴	۲۵	۸۹
۳۹	۱۷- صدف	۳۴۰۳۷	۷۷۹	۱۰۴	۲۵	۷۹
۳۸	۱۶- هفت تیر	۳۳۳۱۶	۷۲۱	۱۰۳	۲۵	۷۸
۳۷	۱۵- دانش آموز	۳۲۵۰۸	۸۰۸	۹۹	۲۵	۷۴
۳۶	۱۴- سید رضی	۳۱۷۲۸	۷۸۰	۱۰۵	۲۵	۸۰
۳۵	۱۳- کوثر	۳۰۸۷۸	۸۵۰	۱۰۴	۲۵	۷۹
۳۴	۱۲- پارک ملت	۳۰۰۷۱	۸۰۷	۱۰۶	۳۰	۸۱
۳۳	۱۱- آزادی	۲۹۰۱۴	۱۰۵۷	۱۲۰	۲۰	۱۰۰
۳۲	۱۰- خیام	۲۷۹۹۹	۱۰۱۵	۱۰۱	۲۰	۸۱
۳۱	۹- فلسطین	۲۶۸۰۹	۱۱۹۰	۱۲۶	۲۵	۱۰۶
۳۰	۸- طالقانی	۲۵۸۹۲	۹۱۷	۱۱۱	۲۵	۸۶
۲۹	۷- قائم	۲۵۲۷۹	۶۱۳	۸۵	۲۵	۶۰
۲۸	۶- شریعتی	۲۴۵۱۷	۷۶۲	۱۰۳	۲۵	۷۸
۲۷	۵- امام خمینی	۲۳۱۰۹	۱۴۰۸	۱۳۳	۲۵	۱۰۸
۲۶	۴- بسیج	۲۲۰۲۴	۱۰۸۵	۱۲۰	۳۰	۹۵
۲۵	۳- هفده شهریور	۲۱۱۹۷	۸۲۷	۱۰۰	۲۵	۷۰
۲۴	۲- پروین اعتصامی	۲۰۴۵۲	۷۴۵	۹۱	۲۰	۶۶
۲۳	۱- غدیر شمال	۱۹۵۹۵	۸۵۷	۱۳۵	۲۷۵	۱۱۵
کل زمان سفر در مسیر شمال (غدير به وكيل آباد)				۲۵۸۳	۴۹۰	۲۱۰۳

زمان کل سفر در مسیر غدیر به وكيل آباد ۴۳ دقیقه و برای مسیر برگشت از وكيل آباد به غدیر ۴۰ دقیقه برنامه ریزی شده است که با زمان توقف در انتهای مسیر، زمان کل یک سفر کامل ۸۷ دقیقه است. در این جدولها فاصله بین ایستگاهها نیز داده شده است. مبنای شماره گذاری ایستگاهها از وكيل آباد است تا در آینده، اضافه کردن بخش توسعه خط به فرودگاه راحت تر باشد.

جدول (آ-۹) زمان سفر و توقف در فاصله‌های بین ایستگاهی در مسیر جنوب (وکیل آباد به غدیر)

شماره ایستگاه در شبیه سازی	نام ایستگاه	موقعیت نسبت به مبدأ وکیل آباد (m)	فاصله با ایستگاه بعدی (m)	کل زمان سفر برنامه ریزی شده بین دو ایستگاه	زمان توقف برنامه ریزی شده	زمان خالص سفر بین دو ایستگاه
۱	۲۲- وکیل آباد	۰	۱۰۰۰	۲۳۰	۶۰	۲۱۵
۲	۲۱- کوهستان پارک	۱۰۰۰	۱۰۱۵	۱۱۲	۱۵	۹۲
۳	۲۰- نمایشگاه	۲۰۱۵	۱۰۵۶	۱۰۷	۲۰	۸۷
۴	۱۹- اقبال لاهوری	۳۰۷۱	۱۰۲۷	۱۰۸	۲۰	۸۸
۵	۱۸- صیاد شیرازی	۴۰۹۸	۷۷۹	۹۳	۲۰	۶۸
۶	۱۷- صدف	۴۸۷۷	۷۲۱	۹۳	۲۵	۶۸
۷	۱۶- هفت تیر	۵۵۹۸	۸۰۸	۹۶	۲۵	۷۱
۸	۱۵- دانش آموز	۶۴۰۶	۷۸۰	۹۲	۲۵	۶۷
۹	۱۴- سید رضی	۷۱۸۶	۸۵۰	۹۴	۲۵	۶۹
۱۰	۱۳- کوثر	۸۰۳۶	۸۰۶	۹۲	۲۵	۶۲
۱۱	۱۲- پارک ملت	۸۸۴۲	۱۰۵۸	۱۳۴	۳۰	۱۰۰
۱۲	۱۱- آزادی	۹۹۰۰	۱۰۱۵	۱۰۴	۱۵	۸۴
۱۳	۱۰- خیام	۱۰۹۱۵	۱۱۹۰	۱۲۰	۲۰	۹۵
۱۴	۹- فلسطین	۱۲۱۰۵	۹۱۷	۱۱۰	۲۵	۸۵
۱۵	۸- طالقانی	۱۳۰۲۲	۶۱۳	۹۰	۲۵	۶۵
۱۶	۷- قائم	۱۳۶۳۵	۷۶۲	۱۰۰	۲۵	۷۵
۱۷	۶- شریعتی	۱۴۳۹۷	۱۴۰۸	۱۳۳	۲۵	۱۰۸
۱۸	۵- امام خمینی	۱۵۸۰۵	۱۰۸۵	۱۰۳	۲۵	۸۳
۱۹	۴- بسیج	۱۶۸۹۰	۸۲۷	۱۱۱	۳۰	۹۱
۲۰	۳- هفده شهریور	۱۷۷۱۷	۷۴۵	۸۷	۲۰	۷۲
۲۱	۲- پروین اعتصامی	۱۸۴۶۲	۹۲۳	۳۰۶	۱۵	۱۸۶
۲۲	۱- غدیر	۱۹۳۸۵	۲۱۰	۳۵۵	۱۲۰	۸۰
۲۳	۰- غدیر جنوب	۱۹۵۹۵			۲۷۵	
کل زمان سفر در مسیر جنوب (وکیل آباد به غدیر)				۲۳۹۵	۴۵۵	۱۹۲۱

منابع

-
- [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] A. González-Gil, R. Palacin and P. Batty, "Optimal energy management of urban rail systems: key performance indicators," *Energy Conversion and Management*, vol. 90, pp. 282-291, 2015.
 - [3] M. Steiner, M. Klohr and S. Pagiela, "Energy storage system with ultracaps on board of railway vehicles," in *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, 2007.
 - [4] F. Ciccarelli, D. Iannuzzi and P. Tricoli, "Control of metro-trains equipped with onboard supercapacitors for energy saving and reduction of power peak demand," *Transportation Research Part C*, vol. 24, pp. 36-49, 2012.
 - [5] F. Ciccarelli, D. Iannuzzi and P. Tricoli, "Control of metro-trains equipped with onboard supercapacitors for energy saving and reduction of power peak demand," *Transportation Research Part C*, vol. 24, pp. 36-49, 2012.
 - [6] M. Ogasa, "Application of energy storage technologies for electric railway vehicles – examples with hybrid electric railway vehicles," *IEEEJ Trans Elect. Electron.*, vol. 5, pp. 304-311, 2010.
 - [7] M. Meinert, "New mobile energy storage system for rolling stock," in *13th European Conf. Power Electronics and Applications (EPE)*, Barcelona, Spain, 2009.
 - [8] D. Iannuzzi, D. Lauria and P. Tricoli, "Optimal design of stationary supercapacitors storage devices for light electrical transportation systems," *Optim. Eng.*, vol. 13, pp. 689-704, 2012.
 - [9] A. Kuperman and I. Aharon, "Battery–ultracapacitor hybrids for pulsed current loads: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 981-992, 2011.
 - [10] T. Konishi and M. Tobita, "Fixed energy storage technology applied for DC electrified railway (traction power substation)," in *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS)*, Bologna, 2012.
 - [11] A. Rufer, D. Hotellier and P. Barrade, "A Supercapacitor-Based Energy Storage Substation for Voltage Compensation in Weak Transportation Networks," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 19, no. 2, pp. 629-636, 2004.
 - [12] R. Barrero, X. Tackoen and J. van Mierlo, "Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network," *Proceedings of the Institution of*

- Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 224, pp. 207-225, 2010.
- [13] D. Sutanto and K. Cheng, "Superconducting magnetic energy storage systems for power system applications," in *Int. Conf. on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices(ASEMD)*, 2009.
- [14] A. Czerwinski, S. Obrebowski and Z. Rogulski, "New high-energy lead–acid battery with reticulated vitreous carbon as a carrier and current collector," *Power Sources*, vol. 198, pp. 378-382, 2012.
- [15] J. Zhang and J. Lee, "A review on prognostics and health monitoring of Li-ion battery," *Power Sources*, vol. 196, pp. 6007-6014, 2011.
- [16] S. Vazquez and e. al., "Energy Storage Systems for Transport," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 57, no. 12, pp. 3881-3895, 2010.
- [17] D. Casponi, M. Bini, S. Ferrari, E. Quartarone and P. Mustarelli, "Recent advances in the development of Li–air batteries," *Power Sources*, vol. 220, pp. 253-263, 2012.
- [18] P. Grbovic, P. Delarue, P. Moigne and P. Bartholomeus, "The ultracapacitor-based controlled electric drives with braking and ride-through capability: overview and analysis," *IEEE Trans.on Ind. Electron.*, vol. 58, no. 3, pp. 925-936, March 2011.
- [19] P. Sharma and T. Bhatti, "A review on electrochemical double-layer capacitors," *Energy Conversion and Management*, vol. 51, pp. 2901-2912, 2010.
- [20] A. Gonzalez- Gil, R. Palacin and P. Batty, "Sustainable urban rail systems: strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy," *Energy Conversion and Management*, vol. 75, pp. 374-388, 2013.
- [21] J. Abrahamsson and H. Bernhoff, "Magnetic bearings in kinetic energy storage systems for vehicular applications," *J. Electrical Systems*, pp. 225-236, 2011.
- [22] J. Jefferson and M. Ackerman, "A flywheel variator energy storage system," *Energy Conversion and Management*, vol. 37, pp. 1481-91, 1996.
- [23] M. Flynn, P. McMullen and O. Solis, "Saving energy using flywheels," *IEEE Ind. Appl. mag.*, vol. 14, pp. 69-76, 2008.
- [24] F. Werfel, "Compact HTS 5 kWh/250 kW flywheel energy storage system," *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, vol. 17, pp. 2138-41, 2007.
- [25] Devaux, F.O.; Tackoen, X., "Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks,TICKET TO KYOTO Project Final Report," INTERREG IVB, 2014.

-
- [26] C. Hsu and W. Lee, "Superconducting magnetic energy storage for power system application," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 29, pp. 990-996, 1993.
 - [27] D. Cornic, "Efficient recovery of braking energy through a reversible dc substation," in *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS)*, 2010.
 - [28] V. Gelman, "Comparison between wayside storage and reversible thyristor controlled rectifiers for heavy rail," *IEEE vehicular technology magazine*, pp. 70-80, 2013.
 - [29] X. Sun, S. Zhang, H. Dong and H. Zhu, "Optimal train schedule with headway and passenger flow dynamic models," in *IEEE Int. Conf. on Intelligent Rail Transportation (ICIRT)*, 2013.
 - [30] X. Feng, H. Zhang, Y. Ding, Z. Liu, H. Peng and B. Xu, "A review study on traction energy saving of rail transport," *Discrete Dynamics in Nature and Society*, p. (9), 2013.
 - [31] G. Hull, C. Roberts and S. Hillmansen, "Simulation of energy efficiency improvements on commuter railways," in *IET Conf. on Railway Traction Systems (RTS 2010)*, 2010, 2010.
 - [32] V. R. Vuchic, "Urban transit systems and technology," John Wiley & Sons, Inc., 2007.
 - [33] G. Boschetti and A. Mariscotti, "Integrated electromechanical simulation of traction systems: Relevant factors for the analysis and estimation of energy efficiency," in *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS)*, 2012.
 - [34] J. Jong and S. Chang, "Algorithms for generating train speed profiles," *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol. 6, pp. 356-371, 2005.
 - [35] P. Howlett, "The optimal control of a train," *Annals of Operations Research*, vol. 98, no. 1, pp. 65-87, 2000.
 - [36] UIC, "Energy efficiency technologies for railways," 2013. [Online].
 - [37] T. Ratniyomchai, S. Hillmansen and P. Tricoli, "Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways," *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 4, no. 1, pp. 9-20, 2014.
 - [38] H. Chen, T. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li and Y. Ding, "Progress in electrical energy storage system: A critical review," *Progress in Natural Science*, vol. 19, pp. 291-312, 2009.
 - [39] A. Okui, S. Hase, H. Shigeeda, T. Konishi and T. Yoshi, "Application of energy storage system for railway transportation in Japan," in *Int. Conf. Power Electronics Conf.*, Sapporo, Japan, 2010.
 - [40] M. Teshima and H. Takahashi, "Lithium ion battery application in traction power," in *International Power Electronics Conference*, 2014.

-
- [41] A. Burke, "The present and projected performance and cost of double-layer and pseudo-capacitive ultracapacitors for hybrid vehicle applications," in *Vehicle Power and Propulsion, 2005 IEEE Conference*, 2005.
 - [42] A. Allegre, A. Bouscayrol, P. Delarue, P. Barrade, E. Chattot and S. El-Fassi, "Energy storage system with supercapacitor for an innovative subwa," *IEEE Trans Ind. Electron.*, vol. 57, pp. 4001-12, 2010.
 - [43] "MITRAC Energy Saver - ECO4 Technologies - Bombardier," Bombardier, [Online]. Available: <http://www.bombardier.com/en/media/insight/economy-and-rail/eco4-technologies/mitrac-energy-saver.html>. [Accessed 29 5 2017].
 - [44] P. Radcliffe, J. Wallace and L. Shu, "Stationary applications of energy storage technologies for transit systems," in *IEEE Electrical Power & Energy Conference(EPEC)*, Halifax, NS, Canada, 2010.
 - [45] L. Garcia-Tabares and et al., "Development and testing of a 200 MJ/350 kW kinetic energy storage system for railways application," in *9th World Congress on Railway Research(WCRR)*, Lille, France, 2011.
 - [46] M. B. Richardson, "Flywheel energy storage system for traction applications," in *Proc. IEE Int. Conf. Power Electron., Mach. Drive*, Bath, U.K., 2002.
 - [47] F. Lacote, "Alstom–future trends in railway transportation," *Jpn. Rail Transp. Rev.*, vol. 42, pp. 4-9, 2005.
 - [48] H. Glickenstein, "Contactless payment debuts on London's busses, New and Improved Railways Around the World," *IEEE vehicular technology magazine*, pp. 19-25, 2013.
 - [49] IEEE-SA, "IEEE Guide for wayside energy storage systems for DC traction applications 1887-2017," IEEE Standards Association, 2017.
 - [50] R. Barrero, X. Tackoen and J. Mierlo, "Improving energy efficiency in public transport: stationary supercapacitor based energy storage systems for a metro network," in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Harbin, China, 2008.
 - [51] F. Foiadelli, M. Roscia and D. Zaninelli, "Optimization of storage devices for regenerative braking energy in subway systems," in *Power Engineering Society General Meeting, 2006*, Montreal, Canada, 2006.
 - [52] M. Ceraolo and G. Lutzemberger, "Stationary and on-board storage systems to enhance energy and cost efficiency of tramways," *Journal of Power Sources*, vol. 264, pp. 128-139, 2014.

-
- [53] L. Battistelli, F. Ciccarelli, D. Lauria and D. Proto, "Optimal design of DC electrified railway stationary storage system," in *Int. Conf. on Clean Electrical Power – ICCEP*, Capri, Italy, 2009.
 - [54] S. D'Avanzo, D. Iannuzzi, F. Murolo, R. Rizzo and P. Tricoli, "A sample application of supercapacitor storage systems for suburban transit," in *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS)*, 2010.
 - [55] J. S. Kashani and E. Farjah, "Applying neural network and genetic algorithm for optimal placement of ultra- capacitors in metro systems," in *IEEE Electrical Power and Energy Conf.*, 2011.
 - [56] R. Teymourfar, R. Nejati fard, B. Asaei and H. Iman-Eini, "Energy recovery in a metro network using stationary supercapacitors," in *2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies*, 2011.
 - [57] R. Teymourfar, B. Asaei, H. Iman-Eini and R. Nejati fard, "Stationary super-capacitor energy storage system to save regenerative braking energy in a metro line," *Energy Conversion and Management*, vol. 56, pp. 206-214, 2012.
 - [58] X. Shen, S. Chen, G. Li, Y. Zhang, X. Jiang and T. Lie, "Configure methodology of onboard supercapacitor array for recycling regenerative braking energy of URT vehicles," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 49, no. 4, pp. 1678-1686, 2012.
 - [59] A. Killer, A. Armstorfer, A. Diez and H. Biechl, "Ultracapacitor assisted regenerative braking in metropolitan railway systems," in *Intelligent Transportation Systems Symposium (CITSS)*, Colombian, 2012.
 - [60] D. Iannuzzi and P. Tricoli, "Speed-based state-of-charge tracking control for metro trains with onboard supercapacitors," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 27, no. 4, pp. 2129-2140, 2012.
 - [61] V. Calderaro, V. Galdi, G. Graber and A. Piccolo, "Siting and sizing of stationary SuperCapacitors in a Metro Network," in *AEIT Annual Conference*, Mondello, 2013.
 - [62] Z. Gao, Y. Fang and D. Sun, "Control strategy for wayside supercapacitor energy storage system in railway transit network," *J. Modern Power Systems, Clean Energy*, pp. 181-190, 2014.
 - [63] M. Schroeder, J. Yu and D. Tumim, "Guiding the selection and application of wayside energy storage technologies for rail transit and electric utilities," <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/tcrp/tcrp_webdoc_51.pdf>, 2010.

-
- [64] D. Iannuzzi, D. Lauria and F. Ciccarelli, "Wayside ultra-capacitors storage design for light transportation systems: A multi objective optimization approach," *International Review of Electrical Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 190-199, 2013.
 - [65] S. de la Torre, A. Sánchez-Racero, J. Aguado, M. Reyes and O. Martínez, "Optimal sizing of energy storage for regenerative braking in electric railway systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 3, pp. 1492-1500, 2015.
 - [66] B. Wang, Z. Yang, F. Lin and W. Zhao, "An improved genetic algorithm for optimal stationary energy storage system locating and sizing," *Energies*, vol. 7, no. 10, pp. 6434-6458, 2014.
 - [67] F. Ciccarelli, A. Del Pizzo and D. Iannuzzi, "Improvement of energy efficiency in light railway vehicles based on power management control of wayside lithium-ion capacitor storage," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 1, pp. 275-286, 2014.
 - [68] F. Ciccarelli, D. Iannuzzi, K. Kondo and L. Fratelli, "Line-voltage control based on wayside energy storage systems for tramway networks," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 1, pp. 884-899, 2016.
 - [69] H. Xia, H. Chen, Z. Yang, F. Lin and B. Wang, "Optimal energy management, location and size for stationary energy storage system in a metro line based on genetic algorithm," *Energies*, vol. 8, no. 10, pp. 11618-11640, 2015.
 - [70] V. Gelman, "Braking energy recuperation," *Vehicular Technology Magazine*, vol. 4, no. 3, pp. 82-89, 2009.
 - [71] X. Yang, B. Ning, X. Li and T. Tang, "A two-objective timetable optimization model in subway systems," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 15, no. 5, pp. 1913-1921, 2014.
 - [72] K. Wong and T. Ho, "Dwell-time and run-time control for DC mass rapid transit railways. IET Electric Power Applications," *IET Electric Power Applications*, vol. 1, no. 6, pp. 956-966, 2007.
 - [73] K. Wong and T. Ho, "Dynamic coast control of train movement with genetic algorithm," *International Journal of Systems Science*, vol. 35, no. 13-14, pp. 835-846, 2004.
 - [74] K. Wong and T. Ho, "Coast control for mass rapid transit railways with searching methods," *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, vol. 151, no. 3, pp. 365-376, 2004.
 - [75] S. Acikbas and M. Soylemez, "Coasting point optimisation for mass rail transit lines using artificial neural networks and genetic algorithms," *IET Electric Power Applications*, vol. 2, no. 3, pp. 172-182, 2008.

-
- [76] Y. Bocharnikov, A. Tobias, C. Roberts, S. Hillmansen and C. Goodman, "Optimal driving strategy for traction energy saving on DC suburban railways," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 1, no. 5, pp. 675-682, 2007.
 - [77] Y. Bocharnikov, A. Tobias and C. Roberts, "Reduction of train and net energy consumption using genetic algorithms for Trajectory Optimisation," in *IET Conf. on Railway Traction Systems (RTS 2010)*, 2010.
 - [78] M. Miyatake and H. Ko, "Numerical analyses of minimum energy operation of multiple trains under DC power feeding circuit," in *European Conf. on Power Electronics and Applications*, 2007.
 - [79] M. Miyatake and H. Ko, "Optimization of train speed profile for minimum energy consumption," *IEEE Trans. on Elec. and Electron. Eng.*, pp. 263-269, 2010.
 - [80] L. Wei, L. Qunzhan and T. Bing, "Energy saving train control for urban railway train with multi-population genetic algorithm," in *Int. Forum on Information Technology and Applications*, 2009.
 - [81] F. Alves and C. Pires, "Energy saving strategy in São Paulo Metro," in *IET Conf. on Railway Traction Systems (RTS 2010)*, 2010.
 - [82] G. Malavasi, P. Palleschi and S. Ricci, "Driving and operation strategies for traction-energy saving in mass rapid transit systems," *Proc. IMechE Part F: J. Rail and Rapid Transit*, vol. 225, pp. 475-482, 2011.
 - [83] X. Feng, B. Mao, X. Feng and J. Feng, "Study on the maximum operation speeds of metro trains for energy saving as well as transport efficiency improvement," *Energy*, vol. 36, pp. 6577-6582, 2011.
 - [84] J. Feng, S. Jia, H. Peng and B. Mao, "Study on the technical speeds of metro trains for traction energy saving and transport efficiency improvement," in *8th Int. Conf. on Traffic and Transportation Studies*, Changsha, China, 2012.
 - [85] S. Aradi, T. Becsi and P. Gaspar, "A predictive optimization method for energy-optimal speed profile generation for trains," in *IEEE 14th Int. Symp. on Computational Intelligence and Informatics (CINTI)*, Budapest, Hungary, 2013.
 - [86] S. Lu, S. Hillmansen, T. Ho and C. Roberts, "Single-train trajectory optimization," *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, vol. 14, no. 2, pp. 743-750, 2013.
 - [87] W. ShangGuan, X. Yan, B. Cai and J. Wang, "Multiobjective optimization for train speed trajectory in CTCS high-speed railway with hybrid evolutionary algorithm," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 16, no. 4, pp. 2215-2225, 2015.

-
- [88] T. Koseki, S. Watanabe, Y. Hamazaki, K. Kondo, T. Hasegawa and T. Mizuma, "Technology for energy-saving railway operation through power-limiting brakes—A case study at an urban railway," in *Int. Power Electronics Conf. (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE-ASIA)*, 2014.
 - [89] S. Watanabe and T. Koseki, "Train group control for energy-saving DC-electric railway operation," in *Int. Power Electronics Conf. (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE-ASIA)*, 2014.
 - [90] H. Tang, Q. Wang and C. Pe, "Optimizing train speed profiles to improve regenerative efficiency of transit operation," in *Joint Rail Conf. (JRC2014)*, Colorado Springs, CO, USA, 2014.
 - [91] V. Calderaro, V. Galdi, G. Graber, A. Piccolo and D. Coglianò, "An algorithm to optimize speed profiles of the metro vehicles for minimizing energy consumption," in *Int. Symp. on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, 2014.
 - [92] J. Yin, D. Chen and L. Li, "Intelligent train operation algorithms for subway by expert system and reinforcement learning," *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, vol. PP, no. 99, pp. 1-11, 2014.
 - [93] M. Domínguez, A. Fernández-Cardador, A. Cucala, T. Gonsalves and A. Fernández, "Multi objective particle swarm optimization algorithm for the design of efficient ATO speed profiles in metro lines," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 29, pp. 43-53, 2014.
 - [94] A. Fernández-Rodríguez, A. Fernández-Cardador, A. 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 Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 16, no. 4, pp. 2061-2071, 2015.
 - [95] S. Su, X. Li, T. Tang and Z. Gao, "A subway train timetable optimization approach based on energy-efficient operation strategy," *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, vol. 14, no. 2, pp. 883-893, 2013.
 - [96] V. Martinisa and M. Gallob, "Models and methods to optimise train speed profiles with and without energy recovery systems: a suburban test case," in *SIDT Scientific Seminar*, 2013.
 - [97] V. Martinis and U. Weidmann, "The evaluation of energy efficient solutions in train operation: a simulation-based approach," in *14th Swiss Transport Research Conf.*, Monte Verità / Ascona, 2014.
 - [98] S. Su, X. Li, T. Tang and Z. Gao, "Optimization of multitrain operations in a subway system," *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, pp. 673-684, 2014.

-
- [99] R. Chevrier, P. Pellegrini and 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.
 - [100] Q. Gu, T. Tang, F. Cao and Y. Song, "Energy-efficient train operation in urban rail transit using real-time traffic information," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 15, no. 3, pp. 1216-1233, 2014.
 - [101] S. Su, T. Tang and C. Roberts, "A cooperative train control model for energy saving," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 16, no. 2, pp. 622-631, 2015.
 - [102] X. Li and H. Lo, "An energy-efficient scheduling and speed control approach for metro rail operations," *Transportation Research Part B*, vol. 64, pp. 73-89, 2014.
 - [103] B. Ning, J. Xun, S. Gao and L. Zhang, "An integrated control model for headway regulation and energy saving in urban rail transit," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 16, no. 3, pp. 1469-1478, 2015.
 - [104] X. Yang, X. Li, B. Ning and T. Tang, "A survey on energy-efficient train operation for urban rail transit," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 17, no. 1, pp. 2-13, 2016.
 - [105] F. Devaux and X. Tackoen, "Guidelines for braking energy recovery systems in urban rail networks," 2014.
 - [106] K. Wolf, "Dynamic Performance LRV Mashhad_Doc: 4046228.00.07," ELIN EBG Traction GmbH, 2009.
 - [107] C. Coello, G. Lamont and D. V. Veldhuizen, *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*, Springer, 2007.
 - [108] A. Messac, *Optimization in Practice with MATLAB®: For Engineering Students and Professionals*, Cambridge University Press, 2015.
 - [109] M. Domínguez, A. Fernández-Cardador, A. P. Cucala and R. R. Pecharromán, "Energy savings in metropolitan railway substations through regenerative energy recovery and optimal design of ATO speed profiles," *IEEE TRANSACTIONS on automation science and engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 496-504, 2012.
 - [110] H. Lee, J. Song, H. Lee, C. Lee, G. Jang and G. Kim, "Capacity optimization of the supercapacitor energy storages on DC railway system using a railway powerflow algorithm," *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol. 7, no. 5, pp. 2739-2753, 2011.

-
- [111] Deep, Kusum, K. P. Singh, M. L. Kansal and C. Mohan, "A real coded genetic algorithm for solving integer and mixed integer optimization problems," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 212, no. 2, p. 505–518, 2009.
- [112] "Heavy Transportation Module, BMOD0063 P125 B08 Datasheet," 2017. [Online]. Available: http://www.maxwell.com/images/documents/125vmodule_ds_1014696-7.pdf.
- [113] C. S. Park, *Fundamentals of engineering economics*, Prentice Hall, 2004.
- [114] *Electricity information*, International Energy Agency, 2016.

Optimization of energy and investment costs in urban railway considering energy storage systems and speed profiles

Abstract

Nowadays, the use of urban railway systems as the major transport system in big cities, face challenges, one of the most important of which is high consumption of electrical energy. Formerly introduced measures to reduce energy consumption which have high energy saving, are usually associated with high costs. If the goal is just to reduce the energy and economic benefits of the proposed solution are not considered, the suggested strategy may not be economic, and thus not practical.

In this study, by using the optimal speed profile of the trains simultaneously with super capacitor stationary energy storage systems (SESS), we have tried to reduce the energy consumption of the entire network from an economic standpoint. For this purpose, first a new method was introduced to obtain the optimum speed profile of a train between two successive stations. The method has considered practical implementation as well as accuracy. By introducing the optimization decision parameters, the algorithm and optimization process was fully described. To assess the validity of the proposed method, the obtained simulation results for trains in the studied system has been compared with the results of the simulation done by manufacturing company. In this section for the first time, the variable regenerative energy recovery rate (RERR) for each inter-station was introduced as an effective parameter in speed profile optimization. By using energy-time graphs for each inter-station (IS) and distributing total traveling time between inter-stations, total energy consumption of the multi-train system has been reduced and the impact of variable RERR in energy reduction was also shown. Then the supercapacitor SESSs were presented as the second solution and the effect of the optimization of their size and location on total energy saving in the whole system was shown. Finally, validation of the proposed method was conducted, using the actual values of parameters in the cost function and their applications in the studied system (Mashhad Urban Railway Line 1). By performing the economic analysis, it was shown that the proposed method, using a combination of SESSs and the optimal speed profiles, could be useful in reducing the total cost of energy and investment.

Keywords: Urban railway system, stationary energy storage system, supercapacitors, regenerative braking energy recovery rate, speed profile of train, optimization, non-dominated sorting algorithm, energy and investment costs, energy savings.



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical and Robotic Engineering

Ph.D. Thesis in Power Engineering

**Optimization of energy and investment costs
in urban railway
considering energy storage systems and speed profiles**

By: Saeed Ahmadi

Supervisor:
Dr. Ali Dastfan

July 2017