

## طراحی بهینه سیستم ذخیره‌ساز متحرک با حجم محدود برای سیستم حمل و نقل ریلی الکتریکی شهری

عباس کمیجانی<sup>۱</sup>، محمدرضا ذوالقدری<sup>۲\*</sup>، سالار آتش پر گرگری<sup>۳</sup>، غلامرضا کبریایی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

akomijani@alum.sharif.edu

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

zolghadr@sharif.edu

<sup>۳</sup> رئیس گروه آمار و برنامه‌ریزی تلفیقی، سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق

s.atashpar@satba.gov.ir

<sup>۴</sup> مدیرکل دفتر توسعه مدیریت و فناوری اطلاعات، سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق

Gh.kebriaei@satba.gov.ir

**چکیده:** احیای انرژی ترمزی در سیستم‌های حمل و نقل ریلی الکتریکی شهری می‌تواند انرژی مصرفی و هزینه‌های عملیاتی سیستم را کاهش دهد. در این مقاله، طراحی بهینه سیستم ذخیره‌ساز متحرک با حجم محدود برای سیستم حمل و نقل ریلی الکتریکی شهری ارائه شده است. از ابرخازن به عنوان سیستم ذخیره‌ساز در این مقاله استفاده شده است. تابع هدف در این مطالعه، مجموع هزینه سالیانه شامل هزینه انرژی مصرفی و هزینه استهلاک ابرخازن در یک سال است. طراحی بهینه با توجه به پنج سناریوی ترافیکی (با تعداد مسافر و سرفاصله متفاوت) انجام شده است. تعیین بهینه ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز می‌تواند هزینه خرید ذخیره‌ساز و هزینه انرژی مصرفی را کاهش دهد در حالی که وضعیت نوسانات ولتاژ سیستم را نیز بهبود می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی مؤثر بودن روش ارائه شده را تأیید می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** سیستم‌های حمل و نقل ریلی الکتریکی شهری، سیستم ذخیره‌ساز متحرک، ابرخازن، محدودیت حجم.

## ۱. مقدمه

شتاب‌گیری به قطار برمی‌گرداند.

سیستم‌های ذخیره‌ساز به دو صورت ساکن (در پست‌های تغذیه) و متحرک (نصب بر روی قطارها) پیاده‌سازی می‌شوند. سیستم ذخیره‌ساز متحرک دارای مزایای نظیر کاهش تقاضای توان از پست‌ها در زمان شتاب‌گیری، کاهش تلفات خط و در نتیجه افزایش بازده، بهبود افت ولتاژ در شبکه و در نتیجه امکان بهره‌بری از ترافیک بیشتر، امکان توان‌دهی مستقل (بدین معنا که در مواقعی می‌توان از انرژی ذخیره‌شده در این سیستم به‌جای برق اصلی استفاده کرد) می‌باشد. با این حال در هر مورد می‌توان این دو انتخاب را از نظر فنی و اقتصادی با هم مقایسه کرد. در این مقاله بدون مقایسه سیستم متحرک با سیستم ساکن، بهینه‌سازی سیستم ذخیره‌ساز متحرک مورد بررسی قرار گرفته است. شایان ذکر است که در استفاده از سیستم متحرک محدودیت‌هایی نظیر اضافه شدن وزن واگن‌ها و اشغال فضای واگن‌ها را نیز باید در نظر داشت.

سیستم‌های ذخیره‌ساز مختلفی نظیر ابرخازن [۲]، باتری [۳] و چرخ طیار [۴] برای استفاده در UERTS پیشنهاد شده است. ذخیره‌ساز مناسب برای احیای انرژی ترمزی در سیستم حمل‌ونقل ریلی، باید ویژگی‌های نظیر چگالی توان زیاد، چگالی انرژی مناسب، بازده مناسب، طول عمر و قابلیت اطمینان زیاد، قیمت مناسب، تعمیر و نگهداری کم را داشته باشد. در جدول (۱) اطلاعات مربوط به ذخیره‌سازهای مختلف ارائه شده است [۵]. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مجموع ابرخازن یکی از مناسب‌ترین ذخیره‌کننده‌های انرژی برای استفاده در سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی الکتریکی است.

سیستم ذخیره‌ساز متحرک<sup>۳</sup> (OESS) مبتنی بر ابرخازن در تحقیقات مختلف نیز پیشنهاد شده است. در تعیین مشخصات ابرخازن، مشخصات سیستم و قطار (شامل مشخصات مسیر و وزن قطار) مؤثر است [۶].

در مرجع [۷] روشی ارائه شده است که می‌تواند برای UERTS با وسایل نقلیه متعدد استفاده شود. برای ارزیابی اثر اندازه ESS در محاسبه انرژی نهایی و کمک به تعیین بهینه آن، چهار گزینه در نظر گرفته شده و سیستم تحت چرخه سرعت یکسان شبیه‌سازی شده است. این کار قابل تعمیم به سیستم‌های بزرگ نیست و همچنین طراحی بهینه محسوب نمی‌شود. همچنین نویسندگان هزینه‌های عملیاتی و محدودیت حجم را لحاظ نکرده‌اند.

امروزه حمل‌ونقل ریلی الکتریکی شهری<sup>۱</sup> (UERTS) به دلیل امکان جابه‌جایی عظیم مسافر، عدم استفاده از سوخت‌های فسیلی و عدم آلودگی هوا مورد توجه کشورهاست. در این سیستم‌ها قطارها با استفاده از انرژی الکتریکی به حرکت درمی‌آیند و عمده‌ترین مصرف‌کننده انرژی الکتریکی در سیستم‌های ریلی الکتریکی هستند. مصرف زیاد انرژی ناشی از جرم زیاد قطار و مسافران و شتاب‌گیری و ترمزهای متعدد قطار است. قطارها از طریق ریل اصلی و ریل سوم (یا خطوط بالاسری) به پست‌های تغذیه متصل می‌شوند. این پست‌ها نیز شبکه برق UERTS را به شبکه قدرت متصل می‌کند. پست‌های تغذیه معمولاً به صورت یک‌طرفه‌اند و تنها امکان شارش توان از سیستم قدرت به UERTS وجود دارد.

زمانی که قطار از ایستگاه شروع به حرکت می‌کند، انرژی الکتریکی از پست تغذیه وارد ریل‌ها شده و با عبور از آن به قطار می‌رسد. این انرژی باعث به کار افتادن موتورهای کشنده قطار و حرکت آن می‌شود. زمانی که قطار به ایستگاه نزدیک می‌شود و باید ترمز بگیرد، موتورهای کشنده به حالت ژنراتوری می‌روند و انرژی جنبشی روی شفت را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. در صورت تزریق این انرژی الکتریکی به ریل‌ها سطح ولتاژ شبکه UERTS بالا رفته و می‌تواند باعث عملکرد سیستم حفاظتی شود. بدین منظور روش‌هایی نظیر تنظیم برنامه حرکت قطارها [۱]، استفاده از مقاومت‌های ترمزی و استفاده از ذخیره‌سازها<sup>۲</sup> (ESS) [۲] پیشنهاد شده است.

روش تنظیم برنامه حرکت قطارها به این صورت است که زمان ترمز و شتاب‌گیری قطارها به گونه‌ای تنظیم می‌شود که انرژی ترمزی قطار صرف شتاب‌گیری قطار دیگر شود تا از این طریق ولتاژ شبکه بیش از حد افزایش نیابد. پیاده‌سازی سخت و امکان‌ناپذیری انرژی کم، از مشکلات این روش است.

استفاده از مقاومت‌های ترمزی باعث هدررفت انرژی، تولید گرما و افزایش دما و افزایش خرابی تجهیزات از جمله خود مقاومت ترمزی می‌شود.

استفاده از ذخیره‌سازها می‌تواند از هدررفت انرژی جلوگیری کند. آن‌ها انرژی را در زمان ترمزگیری جذب می‌کنند و در زمان

1. Urban Electrical rail transportation systems (UERTS)  
2. Energy storage system (ESS)

3. Onboard energy storage system (OESS)

جدول (۱): مقایسه ذخیره‌سازهای انرژی [۵]

نوع سیستم	چگالی انرژی (kWh/ft <sup>3</sup> )	چگالی توان (kW/ft <sup>3</sup> )	بازدهی الکتریکی روزانه (%)	عمر مفید (years)	هزینه سالانه (\$/kWh)
باتری اسید سربی	۲	۳	۹۲	۸	۲۵
باتری نیکل متال هیدرید	۵	۲۰۰	۹۲	۸	۸۰
باتری لیتیوم یون	۶	۶	۸۸	۷	۱۲۰
باتری سدیم سولفور	۷	۲۵	۸۸	۷	۸۵
ابر خازن	۱/۵	۵۰۰۰	۹۴	۳۰	۸۵
چرخ طیار سرعت پایین	۸	۲۰	۹۰	۳۰	۴۰
چرخ طیار سرعت بالا	۱۲	۵۰	۸۹	۳۰	۸۰

## ۲. روش تحقیق

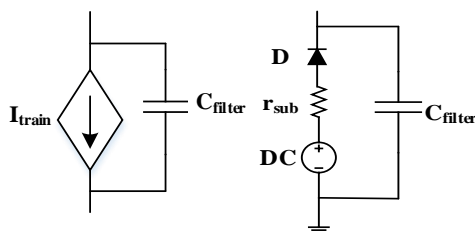
### ۲.۱. مدل سیستم حمل و نقل ریلی الکتریکی

قطارها بخش اصلی سیستم‌های حمل و نقل ریلی هستند که روی ریل اصلی حرکت می‌کنند. انرژی قطارها از طریق ریل‌های اصلی و سوم و پست‌های تغذیه از شبکه اصلی تأمین می‌شود. در این مقاله از مدل‌های ارائه شده در مرجع [۱۰] استفاده می‌شود. مدل پست و قطار در شکل (۱) ارائه شده است. همچنین ریل‌های قطار به صورت مقاومت متغیر با زمان (با توجه به موقعیت قطارها) ارائه می‌شود. مقادیر در نظر گرفته شده برای متغیرهای مدل‌های اجزا در جدول (۲) آورده شده است. مقدار جریان الکتریکی ورودی قطار ( $I_{Train}$ ) نیز از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$I_{Train} = \frac{P_{Train}}{V_{Train}} \quad (1)$$

جدول (۲): مقادیر متغیرهای اجزای مدل‌ها [۱۱]

متغیر	مقدار	واحد
$R_{Third rail}$	۲۲/۴	mΩ/km
$R_{Main rail}$	۳۶/۷	mΩ/km
$V_{DC}$	۸۰۳	V
$R_{SUB}$	۶	mΩ
$C_{post}$	۱	F
$C_{train}$	۳	mF



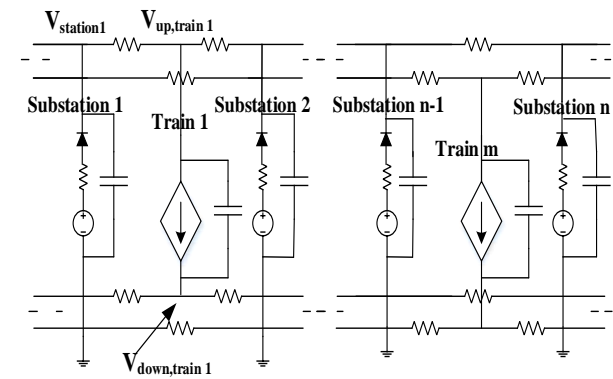
شکل (۱): مدل‌های الکتریکی برای قطار و پست

در مرجع [۸] مدل شبیه‌سازی توسعه داده شده است. همچنین یک اندازه‌گیری بازده انرژی برای ارزیابی تراموای مجهز به سیستم ذخیره‌ساز متحرک ساخته شده است. مدل شبیه‌سازی این مقاله شامل اجزای مکانیکی، سیستم ذخیره‌ساز انرژی، جداول تعریف شیب خط و توقف تراموا می‌باشد. شبیه‌سازی‌ها برای سه سناریو از جمله بدون ابرخازن، احیای ناقص و احیای کامل انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که هرچه ظرفیت ذخیره‌ساز بیشتر باشد صرفه‌جویی توان بیشتر است. البته هزینه خرید نیز افزایش می‌یابد. در این مطالعه، هزینه ابرخازن و انرژی و محدودیت حجم لحاظ نشده است.

در مرجع [۹] تعیین ظرفیت بهینه ذخیره‌ساز انرژی برای احیای انرژی ترمزی در راه‌آهن برقی ارائه شده است. در این مقاله باتری‌های سنتی به همراه ابرخازن‌های تازه توسعه‌یافته به عنوان سیستم ذخیره‌ساز ترکیبی فرض شده‌اند. همچنین برنامه‌ریزی خطی با اعداد صحیح (MILP) ارائه شده است که شامل تعداد چرخه‌های باتری می‌باشد. در این مقاله، سیستم ذخیره‌ساز ترکیبی دقیق مدل‌سازی شده است ولی اثر مشخصات UERTS بر توان مصرفی لحاظ نشده است.

در تحقیقات صورت گرفته مواردی نظیر تأثیر مشخصات واقعی سیستم در توان قطار، مدل منطبق بر واقعیت سیستم UERTS، تأثیر ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز بر میزان مصرف انرژی سیستم و محدودیت حجم سیستم ذخیره‌ساز در هنگام پیاده‌سازی عملی مورد توجه قرار نگرفته است. در این مقاله ابتدا مدل‌سازی دقیق اجزا و سیستم ارائه می‌شود. سپس روند طراحی سیستم ذخیره‌ساز برای سیستم UERTS با در نظر گرفتن محدودیت حجم توضیح داده می‌شود. در نهایت روند ارائه شده روی نمونه مطالعاتی مقاله پیاده‌سازی خواهد شد.

### 1. Mixed Integer Linear Programing (MILP)



شکل (۲): مدل کلی شبکه

## ۲.۲. سیستم ذخیره‌ساز انرژی متحرک

سیستم‌های ذخیره‌ساز متحرک روی قطار نصب می‌شوند. این سیستم‌ها انرژی را در زمان ترمزگیری ذخیره می‌کنند و در زمان شتاب‌گیری آن را در اختیار قطار قرار می‌دهند. در این مقاله از ابرخازن به‌عنوان سیستم ذخیره‌سازی انرژی استفاده شده است. ابرخازن‌ها دارای مزایای نظیر چگالی توان زیاد، دوره عمر بسیار زیاد، تعمیر و نگهداری کم، عدم تولید آلودگی زیست‌محیطی، قابلیت نصب روی سقف وسیله ریلی و ایمنی زیاد است که آن‌ها را برای این کاربرد مناسب می‌کند. استراتژی شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز متحرک با توجه به ولتاژ قطار به‌صورت زیر در نظر گرفته شده است:

۱. در زمان شتاب‌گیری، اگر ولتاژ قطار از ولتاژ آستانه تخلیه کمتر باشد و ابرخازن بار کافی برای تغذیه قطار داشته باشد، توان لازم تا کمینه شارژ (۲۵٪ شارژ کامل) از ابرخازن گرفته می‌شود.
۲. در زمان ترمزگیری، اگر ولتاژ قطار از ولتاژ آستانه شارژ کمتر باشد، توان ترمزی به شبکه تزریق می‌شود.
۳. در زمان ترمزگیری، اگر ولتاژ قطار بیش از ولتاژ آستانه شارژ باشد، و ابرخازن ظرفیت خالی برای ذخیره توان ترمزی را داشته باشد، توان ترمزی در سیستم ذخیره‌ساز تا تکمیل ظرفیت ذخیره خواهد شد.
۴. در زمان ترمزگیری، اگر ولتاژ قطار بیش از ولتاژ آستانه شارژ باشد، و ابرخازن ظرفیتی برای ذخیره توان ترمزی را نداشته باشد توان به شبکه تزریق می‌شود.

در رابطه فوق،  $P_{Train}$  توان ورودی قطار است که با توجه به مشخصات مسیر حرکت قطار (شامل شیب، شعاع انحنا و وجود تونل) و مشخصات قطار (شامل جرم قطار و مسافران، سرعت و شتاب حرکت) تعیین می‌شود. همچنین ولتاژ دو سر قطار است. روابط (۲) و (۳) توان قطار در حالت شتاب‌گیری و ترمزگیری را نشان می‌دهد.

$$P_{Train} = \frac{F_{Tr}v}{\eta} + P_{Acc} \quad (2)$$

$$P_{Train} = -\eta F_{Tr}v + P_{Acc} \quad (3)$$

در روابط فوق،  $F_{Tr}$  نیروی کشش قطار،  $v$  سرعت حرکت قطار،  $\eta$  بازده اجزای مختلف قطار (از جمله گیربکس، درایور و موتور کشش) و  $P_{Acc}$  توان سایر اجزای قطار به‌جز موتورهای (برای روشنایی، تهویه و...) است. همچنین از روش دیویس [۱۲] برای مدل‌سازی نیروی‌های مقاوم اصلی (شامل اصطکاک بین چرخ‌ها و ریل‌ها و اصطکاک هوا) استفاده شده است. نیروی کشش با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$F_{Trac} = (K_1 + K_2v + KK_3v^2) + (10^{-5} \times mgs) + 7.5m/r + ma \quad (4)$$

در رابطه فوق،  $K_1$ ،  $K_2$  و  $K_3$  ضرایب رابطه دیویس،  $K$  ضریب وجود تونل،  $m$  جرم کل قطار،  $g$  شتاب گرانشی زمین،  $s$  میزان شیب،  $r$  شعاع قوس و  $a$  شتاب حرکت قطار است. همچنین نیروی مقاوم راه‌اندازی ( $F_{st}$ ) برای سرعت‌های کمتر از ۱/۳۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد و از رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$F_{st} \cong 67 \times 10^{-3} \times m \quad (5)$$

در نهایت مدل سیستم حمل‌ونقل ریلی به‌صورت شکل (۲) در نظر گرفته شد [۱۰]. این مدل با استفاده از روش تحلیل ولتاژ گره که در رابطه (۶) ارائه شده است، در هر گام زمانی تحلیل می‌گردد و مقادیر ولتاژ، جریان و توان هر بخش محاسبه می‌شود.

$$\begin{bmatrix} Y_{1,1} & \dots & Y_{1,m} & Y_{1,(m+1)} & \dots & Y_{1,(m+n)} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{m,1} & \dots & Y_{m,m} & Y_{m,(m+1)} & \dots & Y_{m,(m+n)} & 0 & \dots & 0 \\ \hline Y_{(m+1),1} & \dots & Y_{(m+1),m} & Y_{(m+1),(m+1)} & \dots & Y_{(m+1),(m+n)} & Y_{(m+1),(m+n+1)} & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ Y_{(m+n),1} & \dots & Y_{(m+n),m} & Y_{(m+n),(m+1)} & \dots & Y_{(m+n),(m+n)} & 0 & 0 & Y_{(m+n),(m+2n)} \\ \hline 0 & \dots & 0 & Y_{(m+n+1),(m+1)} & \dots & 0 & Y_{(m+n+1),(m+n+1)} & \dots & Y_{(m+n+1),(m+2n)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & 0 & \ddots & 0 & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & Y_{(m+2n),(m+n)} & Y_{(m+2n),(m+n+1)} & \dots & Y_{(m+2n),(m+2n)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_m \\ \hline I_{m+1} \\ \vdots \\ I_{m+n} \\ \hline I_{m+n+1} \\ \vdots \\ I_{m+2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_m \\ \hline V_{m+1} \\ \vdots \\ V_{m+n} \\ \hline V_{m+n+1} \\ \vdots \\ V_{m+2n} \end{bmatrix} \quad (6)$$

سناریوهای مختلف و هزینه استهلاك سالیانه ابرخازن‌هاست که به صورت رابطه (۷) نمایش داده می‌شود. پنج سناریوی ترافیکی در نظر گرفته شده که مشخصات آن‌ها در جدول (۳) آمده است. در هر سناریوی ترافیکی تعداد قطار (از نوع DC و AC) موجود در مسیر و همچنین تعداد مسافر آن متفاوت است که برای هر یک از آن‌ها با توجه به اطلاعات واقعی خط مقادیری در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به برنامه تردد قطارها در نمونه مطالعاتی، سرفاصله قطارها و سهم هر یک از سناریوها که همان تعداد تکرار آن سناریو در یک روز می‌باشد محاسبه شده است. مقادیر هر یک از این متغیرها برای هر سناریوی ترافیکی در جدول (۳) ارائه شده است.

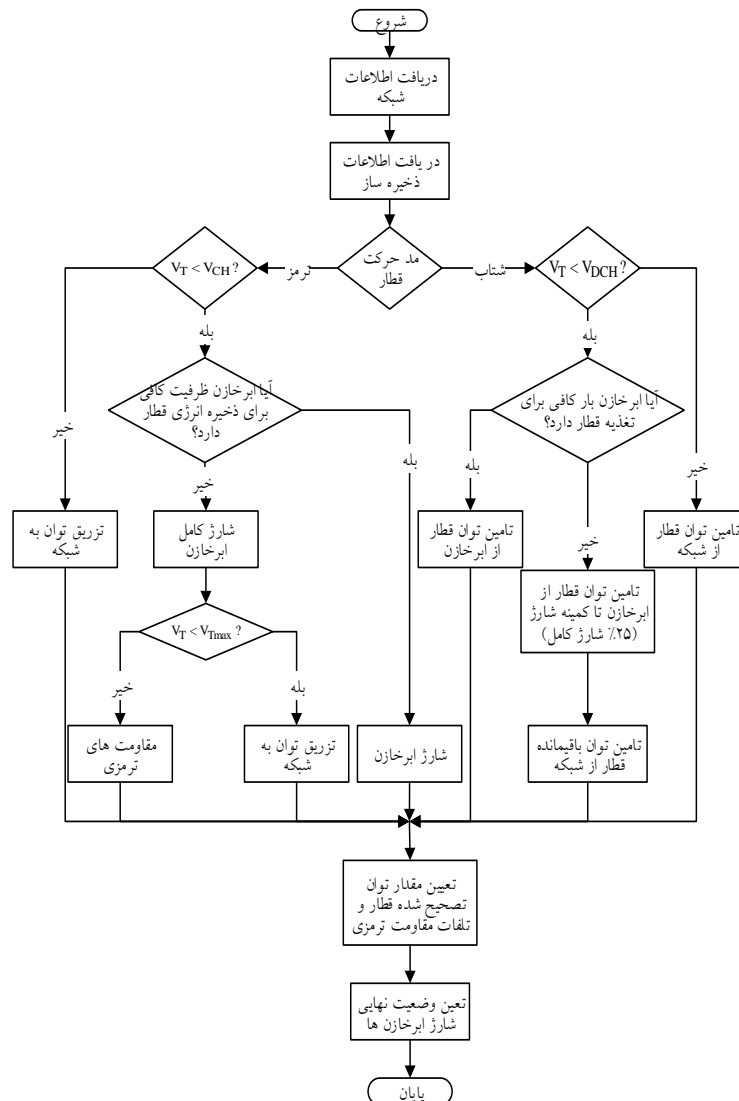
$$F = 365 \sum_{j=1}^5 \left( N_j \left( K_E E_j + \sum_{i=1}^n \frac{N_{cyj,i}}{10^6} N_{p,i} N_{s,i} C_{sc,i} \right) \right) \quad (7)$$

۵. در زمان ترمزگیری، اگر ولتاژ قطار از ولتاژ بیشینه (۹۰۰ ولت) بیشتر باشد، توان در ترمز دینامیکی تلف می‌شود.

ولتاژ آستانه شارژ و تخلیه ابرخازن به ترتیب ۷۰۰ و ۷۳۰ ولت در نظر گرفته شده است. محدوده مناسب تغییرات ولتاژ ابرخازن توسط سازنده و با توجه به جلوگیری از آسیب به ابرخازن‌ها و عملکرد مناسب و محدودیت مبدل‌های الکترونیک قدرت تعیین شده است. شایان ذکر است نزدیک بودن مقادیر آستانه شارژ و تخلیه نباید به عنوان مشکل دیده شود؛ زیرا مقادیر این دو به ترتیب برای زمان ترمزگیری و شتاب‌گیری است و در یک زمان رخ نمی‌دهد. روند نمای روش کنترل شارژ و تخلیه ابرخازن در شکل (۳) ارائه شده است.

### ۳.۲. تابع هدف

هدف این مقاله طراحی سیستم ذخیره‌ساز متحرک برای سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی است. تابع هدف مسئله شامل تلفات انرژی سالیانه در

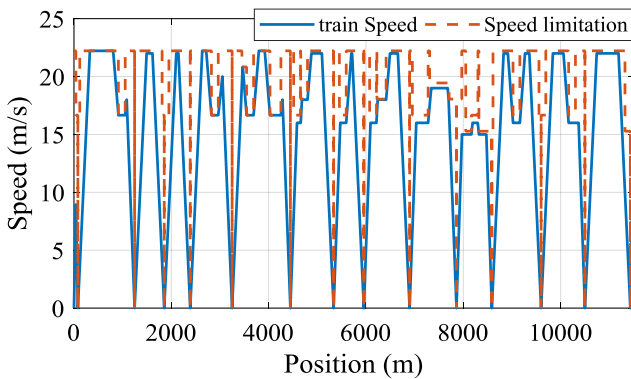


شکل (۳): روند نمای روش کنترل شارژ و تخلیه ابرخازن

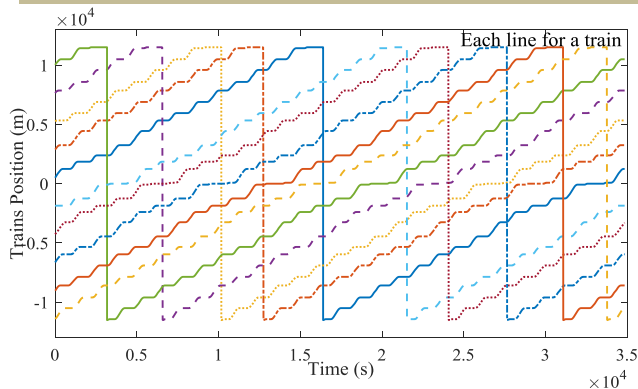
### ۳. شبیه‌سازی

نمونه مطالعاتی این مقاله بخشی از خط ۱ متروی تهران شامل ۸ پست و ۱۴ ایستگاه است. با توجه به برنامه حرکتی سیستم مورد مطالعه، پنج سناریوی ترافیکی در نظر گرفته شد که اطلاعات آن در جدول (۳) آورده شده است.

یکی از مهم‌ترین ورودی‌های مسئله پروفیل حرکت قطارهاست که با توجه به محدودیت سرعت در نقاط مختلف مسیر تعیین می‌شود. در این مقاله، حداکثر شتاب در ترمزگیری و شتاب‌گیری ( $\pm 1 \text{ m/s}^2$ ) لحاظ شده است. در شکل (۴) پروفیل حرکت قطار (توپر) به همراه محدودیت سرعت (خط چین) برحسب مکان رسم شده است. این پروفیل برای حرکت تمام قطارها لحاظ شده است. همچنین در شکل (۵)، روند حرکت قطارها برحسب زمان در سناریوی ترافیکی ۵ نشان داده شده است. در این شکل هر نمودار مربوط به یکی از قطارهاست.



شکل (۴): محدودیت سرعت و پروفیل سرعت برحسب موقعیت



شکل (۵): پروفیل سرعت قطارها در سناریوی پنج برحسب زمان

در این بخش، ابتدا سیستم مورد مطالعه در حالت بدون سیستم ذخیره‌ساز شبیه‌سازی می‌شود تا نتایج طراحی با آن مقایسه گردد. سپس سیستم ذخیره‌ساز با قید حجم طراحی می‌شود. در این مقاله به دلیل کوچک بودن فضای ممکن از روش جست‌وجو برای بهینه‌سازی استفاده می‌شود. نتایج حل مسئله شامل تعیین نوع و تعداد شاخه موازی ابرخازن‌ها برای دو نوع قطار AC و DC مورد استفاده در سیستم است.

در این رابطه،  $J$  شماره سناریوی ترافیکی،  $N_j$  سهم روزانه سناریوی ترافیکی  $J$ ،  $K_E$  هزینه واحد انرژی مصرفی (برابر ۹/۳۸ سنت بر کیلووات ساعت)،  $E_j$  انرژی مصرفی در سناریوی ترافیکی  $J$ ،  $n$  شماره سیستم ذخیره‌ساز متحرک،  $N_{cy,j,i}$  تعداد سیکل کامل شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز  $i$  در سناریوی ترافیکی  $J$ ،  $N_{p,i}$  و  $N_{s,i}$  به ترتیب تعداد شاخه موازی و واحدهای سری ابرخازن در سیستم ذخیره‌ساز  $i$  و  $C_{SC,i}$  هزینه خرید ابرخازن برای سیستم ذخیره‌ساز  $i$  است.

جدول (۳): اطلاعات سناریوهای ترافیکی [۱۰]

سناریوی ترافیکی	تعداد قطار		مسافر (بر $\text{m}^2$ )	سهم روزانه (تعداد)	سرفاصله قطارها (دقیقه)
	DC	AC			
صندلی (۱)	۲	۱	-	۱	۱۳-۱۴
بار کم (۲)	۲	۲	۳	۴	۱۰-۱۱
بار عادی (۳)	۳	۲	۵	۶	۸-۹
اضافه بار (۴)	۴	۳	۷	۴	۵-۶
اضافه بار استثنایی (۵)	۶	۴	۱۰	۱	۴-۵

### ۴.۲. طراحی سیستم ذخیره‌ساز انرژی متحرک

در این مقاله، طراحی سیستم ذخیره‌ساز متحرک با در نظر گرفتن محدودیت حجم با استفاده از جست‌وجوی فضای پاسخ‌های ممکن انجام می‌شود. فضای ممکن برای نوع ابرخازن‌ها در این مقاله شامل محصولات شرکت ماکسول [۱۳] در نظر گرفته شده است. اطلاعات ابرخازن‌ها در جدول (۴) ارائه شده است [۱۳]. سطر اول جدول (۴) برای به کار نرفتن ابرخازن لحاظ شده است.

جدول (۴): اطلاعات ابرخازن‌ها [۱۳]

شماره	نوع	ظرفیت (F)	بیشینه ولتاژ (V)	قیمت (\$)	حجم ( $\text{cm}^3$ )	جرم (kg)
۱	None	-	-	-	-	-
۲	BMOD0063	۶۳	۱۲۰	۶۹۰۰	۵۴۶۲/۳۶	۶۱
۳	BMOD0083	۸۳	۴۵	۱۱۰۰	۱۰۲۱۷/۵۹	۱۰/۳
۴	BMOD0165	۱۶۵	۴۵	۱۳۰۰	۱۴۵۱۵/۴۷	۱۳/۵
۵	BMOD0500	۵۰۰	۱۵	۵۰۰	۵۰۸۷/۸۹	۵/۵
۶	BCAP0650	۶۵۰	۲/۵	۳۴	۱۸۹/۷۵	۰/۱۶
۷	BCAP1200	۱۲۰۰	۲/۵	۴۰	۲۷۲/۶۵	۰/۲۶
۸	BCAP1500	۱۵۰۰	۲/۵	۴۲	۳۱۳/۱۸	۰/۲۸
۹	BCAP2000	۲۰۰۰	۲/۵	۴۵	۳۷۵/۸۲	۰/۳۶
۱۰	BCAP3000	۳۰۰۰	۲/۵	۵۴	۵۰۸/۴۶	۰/۵۱

نوع ابرخازن‌ها از محصولات شرکت ماکسول انتخاب می‌شود که اطلاعات آن در جدول (۴) ارائه شده است.

### ۱.۳. شبیه‌سازی سیستم پایه

برای پیاده‌سازی مدل‌های ارائه شده از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. بخش تحلیل مسئله سه بخش دارد: بخش اول شامل مدل‌سازی حرکت قطار و محاسبه توان قطار است که با توجه به نیروهای وارد بر قطار تعیین می‌شود. بخش دوم شامل تعیین مشخصات سیستم ذخیره‌ساز به کار گرفته و ارائه آن به بخش سوم است. بخش سوم نیز مربوط به تحلیل شبکه الکتریکی در گام‌های زمانی مختلف است. در این بخش با محاسبه ماتریس ادمیتانس<sup>۱</sup> و جریان، ولتاژ نقاط مختلف محاسبه می‌شود. برای تعیین وضعیت دیود پست‌ها نیز از روش تکرار استفاده شده است. بدین ترتیب که شرایط اولیه‌ای (بر اساس حدس یا مقادیر متغیرها در گام زمانی قبل) برای روشن و خاموش بودن آن‌ها فرض می‌شود و در گام بعدی این فرض تأیید یا اصلاح می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی سیستم مورد مطالعه در سناریوهای ترافیکی مختلف در جدول (۵) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود درصد زیادی از انرژی دریافتی از پست‌ها به در بخش‌های مختلف تلف شده است. مجموع این تلفات در سناریوهای مختلف بین ۴۴ تا ۵۸ درصد انرژی دریافت شده است. از این میزان در سناریوهای مختلف بین ۳۱/۷ تا ۳۷/۲ درصد در زمان ترمزگیری در ترمزهای مکانیکی و دینامیکی تلف شده است. همچنین به دلیل عدم تزریق انرژی ترمزی به شبکه سطح ولتاژ از ۸۰۳ ولت فراتر نرفته است. روند کاهشی و افزایشی متغیرهای جدول (۵) نیز با توجه به افزایش تعداد قطار و مسافر توجیه‌پذیر است.

### جدول (۵): نتایج شبیه‌سازی سیستم قبل از به‌کارگیری OESS

سناریوی ترافیکی	۱	۲	۳	۴	۵
انرژی تأمین‌شده از پست‌ها (kWh)	۳۴۰۸	۵۱۳۹	۶۶۶۳	۹۷۲۴	۱۵۴۴۴
تلفات انرژی در پست‌ها (kWh)	۲۸	۵۳	۷۷	۱۴۱	۲۸۹
تلفات انرژی در خط‌ها (kWh)	۳۹۲	۶۹۸	۹۹۵	۱۶۰۵	۲۹۱۷
تلفات انرژی در ترمز دینامیکی (kWh)	۱۰۴۶	۱۶۱۰	۲۲۴۶	۳۴۴۷	۵۵۷۳
تلفات انرژی در ترمز مکانیکی (kWh)	۳۴	۵۲	۷۳	۱۱۲	۱۷۶
انرژی رانش و تجهیزات جانبی قطارها (KWh)	۲۹۸۸	۴۳۸۸	۵۵۹۱	۷۹۷۸	۱۲۲۳۸
بیشینه ولتاژ پست (V)	۸۰۳	۸۰۳	۸۰۳	۸۰۳	۸۰۳
کمینه ولتاژ پست (V)	۷۳۲	۷۱۶	۶۹۴	۶۸۵	۶۶۲

### 1. Admittance matrix

### ۲.۳. طراحی سیستم ذخیره‌ساز با قید حجم

در این مسئله با در نظر گرفتن قید حجم در دسترس، تعداد شاخه موازی ابرخازن‌ها محدود می‌شود تا جایی که ممکن است امکان انتخاب یک نوع ابرخازن سلب شود. به دلیل این کاهش فضای ممکن، از روش جست‌وجو برای تخصیص بهینه ابرخازن استفاده می‌شود. در این مقاله، هریک از قطارهای AC و DC دارای هفت واگن است که برخی دارای موتورند و برخی موتور ندارند. در نتیجه فضای در دسترس واگن‌ها با هم متفاوت است. حداکثر حجم در دسترس برای نصب سیستم ذخیره‌ساز در هریک از واگن‌ها به صورت جدول (۶) مشخص و در نظر گرفته شد.

با توجه به محدودیت حجم به دست آمده برای هر قطار، تعداد حداکثر شاخه موازی برای هر نوع ابرخازن در هر قطار قابل محاسبه می‌باشد که نتایج آن در جدول (۷) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود حالت‌های ممکن برای تخصیص ابرخازن (با احتساب عدم تخصیص) در قطارهای AC و DC به ترتیب ۱۱ و ۲۳ عدد است. در نتیجه کل فضای ممکن به ۲۵۳ عدد محدود می‌شود.

### جدول (۶): حداکثر فضای در دسترس در هر واگن قطار

شماره واگن	قطار AC	قطار DC
۱	۰/۳۱۸	۰/۱۰۵
۲	۰/۲۱۶	۰/۱۰۵
۳	۰/۳۲۴	۰/۱۴۷
۴	۰/۳۲۴	۰/۱۴۷
۵	۰/۳۲۱	۰/۱۰۵
۶	۰/۲۱۶	۰/۱۰۵
۷	۰/۳۱۸	۰/۱۰۵
مجموع	۲/۰۳۷	۰/۸۱۹

### جدول (۷): حداکثر تعداد شاخه موازی ابرخازن‌های مختلف برای هر قطار

شماره	نوع	حداکثر تعداد شاخه موازی در قطار AC	حداکثر تعداد شاخه موازی در قطار DC
۱	None	-	-
۲	BMOD0063P125	۷	۴
۳	BMOD0083P048	۱	۰
۴	BMOD0165P048	۱	۰
۵	BMOD0500P016	۱	۰
۶	BCAP0650	۴	۲
۷	BCAP1200	۳	۱
۸	BCAP1500	۲	۱
۹	BCAP2000	۲	۱
۱۰	BCAP3000	۱	۱

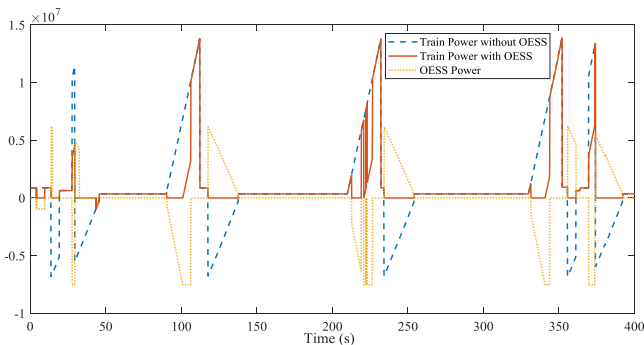


## طراحی بهینه سیستم ذخیره‌ساز متحرک با حجم محدود برای سیستم حمل‌ونقل ریلی الکتریکی شهری ۴۷

برای ذخیره‌ساز و در نظر داشتن مجموع هزینه به‌عنوان تابع هدف، باعث محدودیت توان تبدیلی شده است. در نتیجه این محدودیت تمام توان ترمزی احیا نشده است. همچنین توان تلف‌شده در خطوط در سناریوهای مختلف بین ۲۴ تا ۲۸ درصد کاهش یافته است که دلیل آن کاهش جریان عبوری از ریل‌هاست. به‌علاوه کاهش انرژی تأمین‌شده از پست باعث کاهش توان تلف‌شده در پست می‌باشد؛ همه این موارد به معنای افزایش بازده سیستم است. به‌علاوه میزان نوسانات ولتاژ در طول مسیر کاهش داشته است.

شکل (۷) نمودار توان قطار در دو حالت با و بدون سیستم ذخیره‌ساز و توان سیستم ذخیره‌ساز برای یکی از قطارها را نشان می‌دهد. در این شکل شارژ و دشارژ شدن ذخیره‌ساز در زمان ترمزگیری و شتاب‌گیری قطار قابل مشاهده است. تبادل توان بین ذخیره‌ساز و قطار به‌صورت ناقص صورت گرفته است که به‌دلیل انتخاب ظرفیت کم برای ذخیره‌ساز می‌باشد.

نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده این است که کاهش ۱۷/۲ درصدی هزینه سیستم مورد مطالعه به مجموعه ابرخازن با وزن ۱۶۱۲ (۸۵۴۰) کیلوگرم، حجم ۱/۶۸۳ (۰/۷۶۴۷) مترمکعب و هزینه خرید ۲۰۱۶۰۰ (۹۶۶۰۰۰) دلار برای قطارهای AC (و DC) نیاز دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود پاسخ بهینه هم از لحاظ فنی و هم از لحاظ اقتصادی مفید و عملی است.



شکل (۷): نمودار توان یک قطار در دو حالت با و بدون سیستم ذخیره‌ساز و توان سیستم ذخیره‌ساز

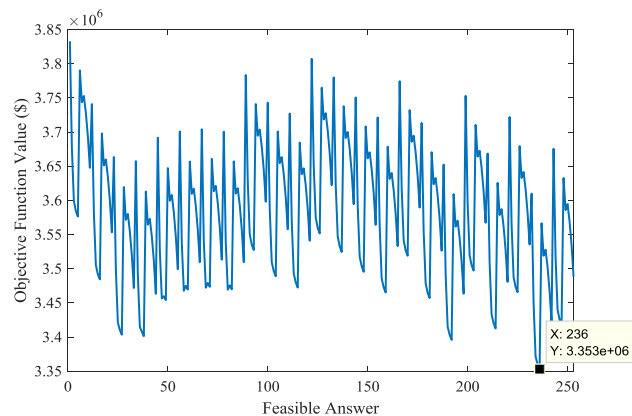
جدول (۹): نتایج شبیه‌سازی سیستم پس از بهینه‌سازی مقید OESS و درصد تغییرات نسبت به جدول (۵)

سناریوی ترافیکی	۱	۲	۳	۴	۵
انرژی تأمین‌شده از پست‌ها (kWh)	۲۶۹۴/۹	۳۹۸۴/۳	۵۱۶۸/۸	۷۴۰۴/۴	۱۱۷۹۰
تلفات انرژی در پست‌ها (kWh)	۱۸/۹۵	۳۳/۸۷	۵۰/۶	۸۹/۴۲	۱۹۰/۸۶
تلفات انرژی در خط‌ها (kWh)	۲۸۰/۵۲	۴۹۷/۴۱	۷۲۴/۲۷	۱۱۷۴/۴	۲۲۱۰/۸۴
تلفات انرژی در ترمز دینامیکی (kWh)	۷۳۰/۱	۱۱۳۸/۳	۱۶۲۳/۸	۲۵۱۹/۷	۴۱۳۵/۲
تلفات انرژی در ترمز مکانیکی (kWh)	۳۴	۵۲	۷۳	۱۱۲	۱۷۶
بیشینه ولتاژ پست (V)	۸۹۸	۸۹۸	۸۹۹	۸۹۸	۸۹۷
کمینه ولتاژ پست (V)	۷۴۷	۷۳۱	۷۲۳	۶۹۵	۶۶۲

با شبیه‌سازی همه حالت‌های ممکن مقدار تابع هدف برای هر یک محاسبه شد که نتایج آن در شکل (۶) قابل مشاهده است. نتایج مربوط به نوع و تعداد شاخه موازی ابرخازن در حالت بهینه در جدول (۸) ارائه شده است.

جدول (۸): نتایج بهینه‌سازی مقید OESS

نوع	شاخه موازی	واحد سری	هزینه خرید (\$)
قطار AC	۲	۲۲۴	۲۰۱۶۰۰
قطار DC	۴	۵	۹۶۶۰۰۰
مجموع			۱۱۶۷۶۰۰



شکل (۶): مقادیر تابع هدف پاسخ‌های ممکن

شبیه‌سازی سیستم مورد مطالعه با سیستم طراحی‌شده نشان می‌دهد که مصرف انرژی سالانه سیستم از ۴۳۱۶۹/۵ به ۳۳۲۳۰/۳ مگاوات ساعت کاهش یافته است که صرفه‌جویی ۹۳۲۲۹۷ دلار را نشان می‌دهد. این مقدار صرفه‌جویی با هزینه استهلاک ابرخازن‌ها به میزان ۲۳۴۹۸۵ دلار به دست آمده است. همچنین مقدار تابع هدف از ۴۰۴۹۳۱۲ به ۳۳۵۲۰۰۰ دلار (۶۹۷۳۱۲ دلار صرفه‌جویی) کاهش یافته که نشان‌دهنده کاهش ۱۷/۲ درصدی است. سایر نتایج و مقایسه آن با حالت بدون ابرخازن سیستم در جدول (۹) گزارش شده است.

با توجه به نتایج در سناریوهای مختلف میزان توان تلف‌شده در ترمز دینامیکی ۲۵ تا ۳۰ درصد کاهش یافته است. محدودیت حجم



## ۴. نتیجه گیری

نشان می دهد.

نتایج شبیه سازی نشان می دهد که سیستم مجهز به سیستم ذخیره ساز متحرک با محدودیت حجم از نظر حجم، وزن و هزینه معقول و مناسب است. همچنین سیستم حمل و نقل ریلی مجهز به سیستم ذخیره ساز متحرک با محدودیت حجم، مصرف انرژی سالیانه را ۲۳ درصد و مجموع هزینه سیستم را ۱۷/۲ درصد کاهش می دهد. در نتیجه، سیستم طراحی شده هم از نظر فنی و هم از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است.

## تقدیر

نویسندگان از سازمان بهره وری انرژی ایران (ساتبا) برای حمایت های آن ها تحت قرارداد شماره ۹۴/۲۱۱ تقدیر می کنند.

هدف این مقاله طراحی بهینه سیستم ذخیره ساز متحرک با حجم محدود برای سیستم حمل و نقل ریلی الکتریکی شهری با استفاده از روش جست و جوست. ابرخازن به عنوان سیستم ذخیره ساز به کار گرفته شد. در این مقاله مجموع هزینه سالیانه سیستم شامل هزینه انرژی و استهلاک ابرخازن به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. محدودیت حجم در دسترس باعث کاهش فضای جست و جو گردید که در نتیجه از روش جست و جو برای بهینه سازی سیستم ذخیره ساز متحرک استفاده شده است. بخشی از خط یک متروی تهران به عنوان نمونه مطالعاتی این مقاله در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه سازی سیستم مجهز به ذخیره سازی متحرک مؤثر بودن روش ارائه شده را تأیید می کند و اثر محدودیت حجم در مقادیر تابع هدف را

## مراجع

- [1] Domínguez, M., Fernández-Cardador, A., Cucala, A. P., Pecharromás, R. R., "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.
- [2] Shen, X. J., Chen, Sh., Li, G., Zhang, Y., Jiang, X., Lie, T. T., "Configure Methodology of Onboard Supercapacitor Array for Recycling Regenerative Braking Energy of URT Vehicles", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 49, No. 4, pp. 1678-1686, 2013.
- [3] Sun, Y., Zhong, J., Li, Z., Tian, W., Shahidehpour, M., "Stochastic Scheduling of Battery-Based Energy Storage Transportation System with The Penetration of Wind Power", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 8, No. 1, pp. 135-144, 2017.
- [4] Mukoyama, S., Nakao, K., Sakamoto, H., Matsuoka, T., Nagashima, K., Ogata, M., Yamashita, T., Miyazaki, Y., Miyazaki, K., Maeda, T., Shimizu, H., "Development of Superconducting Magnetic Bearing for 300 kW Flywheel Energy Storage System", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 27, No. 4, pp. 1-4, 2017.
- [5] Willis, H. L., Scott, W. G., "Distributed Power Generation: Planning and Evaluation Power Engineering", CRC Press, Chapter 10, 2000.
- [6] Biryukov, V. V., Kulekina, A. V., "The Calculation Features of The Electrical Energy Storage Devices Parameters in Transport", In 11<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology (IFOST), IEEE, pp. 41-43, June 2016.
- [7] Zhao, K., Wang, X., Yang, Z., You, X., "Study and Simulation of On-board Energy Saving System with Electric Double Layer Capacitor of Railway Vehicle", In International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCSM), Vol. 15, pp. 336-339, IEEE, October 2010.
- [8] Streit, L., Drabek, P., "Simulation and Emulation of Tram with Onboard Supercapacitors on Pilsen Tram Line", In International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), pp. 703-706, 2013.
- [9] De la Torre, S., Sánchez-Racero, A. J., Aguado, J. A., Reyes, M., Martínez, O., "Optimal Sizing of Energy Storage For Regenerative Braking in Electric Railway Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 30, No. 3, pp. 1492-500, 2015.
- [10] Komijani, A., Zolghadri, M., "Optimal Design of Onboard Super-Capacitor Based Energy Storage Systems for Urban Electrical Rail Transportation Using Particle Swarm Optimization", In 5<sup>th</sup> International Conference on Recent Advances in Railway Engineering (ICRARE), 2017.
- [11] Tehran Urban & Suburban Railway Operation Co., Available at: "<http://Metro.Tehran.ir>", Last Seen: 2017/10/22.
- [12] Boschetti, G., Mariscotti, A., "The Parameters of Motion Mechanical Equations as a Source of Uncertainty for

*Traction Systems Simulation*", In Proceeding of 20<sup>th</sup> [13] Maxwell Technologies, Inc., Available at: IMEKO World Congress, pp. 1-6, 2012. "<http://www.Maxwell.com>", Last Seen: 2017/10/22.