

طراحی و شبیه سازی شبکه تغذیه ترکشن راه آهن شهری همراه با روش عددی برای تسریع حل معادلات و تضمین همگرایی

محمد علی صندیدزاده (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

شیرین صفرخانی، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

امیر حیدری، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ساوه، ساوه، ایران

Email:sandidzadeh@iust.ac.ir

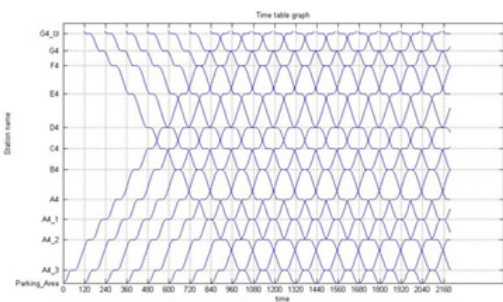
پذیرش: ۹۲/۰۹/۰۵

دریافت: ۹۱/۱۲/۱۸

چکیده

در این مقاله به اصول طراحی نرم افزار شبیه ساز شبکه ترکشن راه آهن شهری، به منظور تعیین محل پستهای یکسوساز، تأیید ظرفیت واحدهای یکسوساز، انتخاب کابل فیدر و سطح مقطع هادی شبکه ترکشن و همچنین تأیید ظرفیت ترانسفورماتور اصلی پست فشار قوی و غیره پرداخته خواهد شد. همچنین یک مدار معادل برای شبکه مورد نظر ارائه خواهد شد و پس از یافتن معادلات حاکم بر شبکه، با استفاده از روش بهینه سازی داگ لگ، ضمن تضمین همگرایی، سرعت حل معادلات-که تعداد و ابعاد آنها زیاد است- افزایش داده خواهد شد. در این مقاله جهت حصول اطمینان از پاسخهای به دست آمده، ملاحظات موجود در استانداردهایی همچون EN۶۰۱۴۶، CEI EN ۵۰۳۲ و IEC۱۴۶، CEI EN ۵۰۳۲۹ مد نظر قرار گرفته است. برای بررسی اعتبار نتایج حاصل با در نظر گرفتن پستهای موجود در خط چهار متروی تهران (حد فاصل ایستگاه ارم سبز و چهارراه ولیعصر) شبیه سازی انجام شده است.

واژه‌های کلیدی: تغذیه ترکشن، سیستم راه آهن شهری، شبیه ساز پست های یکسوساز



[Gomez et. al, 2012]

از آنجایی که طراحی شبیه ساز برای کل سیستم با توجه به اثرگذاری زیرسیستمهای بسیار زیاد بر روی آن بسیار مشکل است، بنابراین تغییرات و اثرات اجزای مهم در طراحی نرم افزار مورد توجه قرار خواهد گرفت. در نرم افزار طراحی شده ملاحظات مربوط به حضور هم زمان چند قطار در خط مورد نظر قرار گرفته است.

در ادامه این مقاله بخشهای مختلف مطالب بر اساس الگوی ذیل ارائه شده اند:

۱- مقدمه

۲- معرفی سیستم راه آهن برقی

۳- تحلیل داده های ورودی مساله

۴- تعریف خروجی های نرم افزار

۵- معیارهای مهم طراحی

۶- تبیین متدولوژی طراحی شبیه ساز شبکه و روش حل

معادلات حاکم بر سیستم

۷- الگوریتم شبیه سازی

۸- نتایج شبیه سازی

۹- نتیجه گیری

۲. معرفی سیستم راه آهن برقی

در یک سیستم راه آهن برقی، زیر سیستم های متعددی وجود دارند که بر یکدیگر تاثیر می گذارند و در تقابل با هم بر کارایی کل سیستم مستقیماً تاثیر گذارند. از مهم ترین این زیر سیستمها می توان به سیستم سیگنالینگ، شبکه تغذیه، و سیستم درایو تراکشن اشاره کرد.

۱. مقدمه

سیستمهای تغذیه تراکشن، توان الکتریکی مورد نیاز قطار را به کمک سیستم توزیع توان تراکشن و سیستم بازگشت توان تأمین می کنند [Metrolinx Agency]. از آنجا که قطارهای برقی جهت ایجاد نیروی پیشرانه نیاز به سوخت های فسیلی ندارند، بنابراین سیستم های تغذیه متناظر با آنها، کمترین اثرات مخرب زیست محیطی را به همراه دارند [Garcia et. al, 2013].

در سیستمهای حمل و نقل مانند مترو، سیستم تراکشن الکتریکی به دلیل تغییرات مداوم بار الکتریکی دارای پیچیدگیهای بسیار است [Iannuzzi, Ciccarelli, and Lau-ria, 2012]. این پیچیدگیها بستگی به تعداد و نوع زیر سیستمهایی دارند که کل سیستم را شامل می شوند و بر کل سیستم اثر می گذارند. به عنوان مثال می توان از موتورهای DC مجهز به چارپاهای DC به DC یا از موتورهای القایی سه فاز مجهز به اینورتر به عنوان تراکشن موتور استفاده کرد. نوع سیستم سیگنالینگ که خود می تواند بلوک ثابت یا بلوک متحرک باشد نیز بر طراحی شبکه تاثیر خواهد گذاشت [Ho, et. al, 2002].

توجه به چنین محدودیت ها و ملاحظاتی، بدون استفاده از نرم افزارهای شبیه سازی امکان پذیر نیست. از سوی دیگر نیاز روزافزون به مطالعات مهندسی با در نظر گرفتن جزئیات زیاد به عنوان بخشی از فرآیند طراحی شبکه تغذیه تراکشن ایجاب می کند تا تعداد و چیدمان پستهای تغذیه تراکشن در طول خط، به عنوان یکی از مهم ترین مشخصه های سیستم الکتریکی راه آهن شهری با استفاده از نرم افزارهای شبیه سازی انجام شود. استفاده از ابزارهای شبیه سازی برای کمک به حل مشکلات مهندسی به طور گسترده ای انجام می شود [Maceri and Casciati, 2003]. حوزه راه آهن نیز از این امر مستثنی نبوده و بسیاری از کارهای تحقیقاتی برای بهبود خدمات سرویس و افزایش قابلیت اطمینان سیستم راه آهن به کمک ابزارهای شبیه سازی انجام شده است

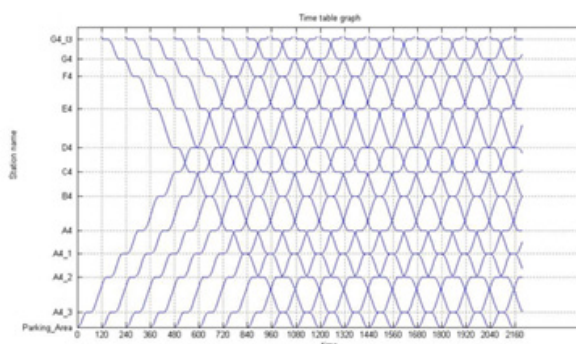
۱-۲ سیستم سیگنالینگ و پروفیل حرکت قطارها

به طور کلی دو نوع اصلی از سیستمهای سیگنالینگ عبارتند از سیستم بلوک ثابت و بلوک متحرک. نوع سیستم سیگنالینگ مستقیماً بر پروفیل حرکت قطار تاثیر می گذارد. پروفیل حرکت قطارها وابستگی شدید به نوع سیستم سیگنالینگ دارد. در واقع گراف حرکت قطار با توجه به محدودیتهایی که سیستم سیگنالینگ و ویژگیهای درایو ترکشن تعیین می کنند، مشخص می شود [Ho, 2002].

با توجه به اینکه تعداد، ترافیک و پروفیل حرکت قطارها در طراحی شبکه تغذیه ترکشن مستقیماً اثر دارد، بنابراین باید در شبیه سازی ها مورد توجه قرار گیرد.

در این مقاله از گراف حرکت قطارها (نمودار مکان-زمان) مطابق شکل ۱ استفاده شده [Sandidzadeh, Safarkhani and Mirabadi, 2007]. گراف حرکت به خوبی وضعیت ترافیکی خط را نشان می دهد و براساس آن، در هر لحظه می توان تعداد و موقعیت مکانی تمامی قطارهای موجود در خط رفت و برگشت را تعیین کرد.

طبق شکل ۱، در شبیه سازی نمونه ارایه شده، پس از ۱۰۹۷/۵ ثانیه ظرفیت خط پر می شود و در این حالت ۱۸ قطار رفت و برگشت در دو خط موجود است.



شکل ۱. گراف حرکت

۲-۲ سیستم تغذیه ترکشن

یک سیستم راه آهن برقی در واقع یک مدار الکتریکی

گسترده با پست های تغذیه ترکشن مربوطه به عنوان منبع تامین نیروی برق قطارها محسوب می شود. در چنین سیستمی با توجه به اینکه بار الکتریکی سیستم (قطار) در طول خط در حال حرکت است، بنابراین ولتاژ دو سر بار مدام در حال تغییر است که خود بر پیچیدگی های طراحی می افزاید. توان نامی چنین پست هایی با توجه به توسعه سیستم در آینده و نیاز فعلی و به کمک محاسبات و شبیه سازی های کامپیوتری با در نظر گرفتن حداقل هدوی سیستم تعیین می شود [Sibal, 2011]. به طور کلی نیاز های طراحی شبکه یک سیستم راه آهن برقی به چهار گروه اصلی طبقه بندی می شوند [Ho, et al, 2002]. که عبارتند از:

الف) انتقال توان

ب) محتوای هارمونیکی توان منتقل شده

ج) نوع و پخش بار سیستم

د) سازگاری الکترومغناطیسی

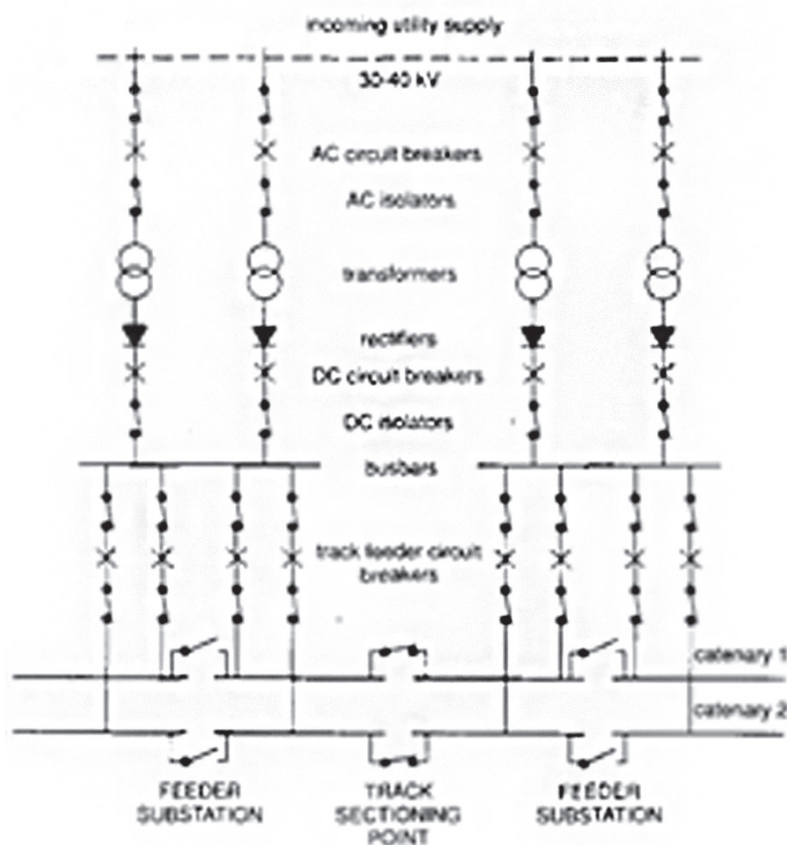
در سیستمهای حمل و نقل ریلی شهری، به دلیل فاصله های کوتاه تر بین ایستگاه ها، وزن کمتر قطارها، سرعت کمتر آنها و ملاحظات از این دست، از ولتاژ تغذیه DC برای برق رسانی به قطارها استفاده می شود. معمولاً به علت خطرات ناشی از ولتاژهای بالا، ولتاژهایی بیش از ۳۰۰۰ ولت بکار گرفته نمی شوند. در بیشتر سیستمهای برق رسانی به قطارها در راه آهن شهری از ولتاژهای بین ۷۵۰ الی ۱۵۰۰ به دلیل جنبه های اقتصادی آن استفاده می شود [Ciccarelli, Lauria, 2012 and Tricoli]. در این سیستمها، ولتاژ سه فاز گرفته شده از شبکه سراسری از طریق پست های ترانسفورماتور/یکسوساز یا TRS ۱۲ و ۲۴ پالسه به جریان مستقیم در ولتاژ نامی شبکه خط تماس تبدیل می شود.

در بخش یکسوساز پست، اجزای سوئیچینگ به صورت واحد هستند که برای کلاس بار VI با توجه به استاندارد EN60146 طراحی می شوند [Kießling, et al, 2010].

مطابق شکل ۲ در صورت طراحی مناسب، هر پست یکسوساز بایستی دارای دو منبع توانی مستقل از دو پست

یکسوساز مجاور برای عملکرد نرمال خط راه آهن شهری کافی باشد. شبکه تراکشن بایستی طبق توان تراکشن مورد نیاز برای قطار و بر پایه معیارهای طراحی خط و در نظر گرفتن سرفاصله زمانی بین دو قطار مسیر طراحی شود. ظرفیت پست های یکسوساز باید پاسخگوی ملاحظات فنی استاندارد IEC146 را مانند ۱۰۰٪ جریان نامی در عملکرد ممتد، ۱۵۰٪ جریان نامی برای دو ساعت عملکرد و ۳۰۰٪ جریان نامی برای یک دقیقه عملکرد باشد. جریان یکسوشده در ولتاژ نامی 750VDC از طریق کلیدهای 750VDC، خط را تغذیه می کنند و عمل توزیع توسط ریل سوم و یا بالاسری انجام می گیرد [Kiessling, et al, 2010 and Mellitt, 1978].

فشار قوی (HVS) مختلف مانند پست ۶۳/۲۰ کیلوولت باشد. دو پست یکسوساز مجاور از دو باس بار مختلف متعلق به یک پست فشار قوی تغذیه می گردند. هر پست یکسوساز شامل دو یکسوساز است که هریک به ترانسفورماتور مربوط به خود وصل می شوند. ترانسفورمرها به طور موازی با هم کار می کنند و به طور مشترک بار تراکشن را تغذیه می کنند. هنگامی که یکی از آنها به هر دلیلی از سرویس خارج شود، یکسوساز دیگر بار تراکشن مربوطه را تأمین خواهد کرد. محل و ظرفیت پست یکسوساز در کل طول خط بایستی طوری در نظر گرفته شود که هرگاه یکی از آنها به دلیل بروز خطا از سرویس خارج شد، ظرفیت اضافه بار پست



شکل ۲. مدار تک خطی سیستم تغذیه تراکشن

۲-۳ مدل سازی تجهیزات تراکشن

درایوهای تراکشن راه آهن باید این قابلیت را داشته باشند که در محدوده وسیعی از سرعت، موتورهای تراکشن اعم از DC یا AC را کنترل کنند. در موتورهای DC به کمک چاپرهای DC به راحتی می توان به این مهم دست یافت. اما هزینه های تعمیر و نگهداری و مشکلات موتورهای DC باعث شده است امروزه به جای استفاده از تراکشن موتورهای DC، از تراکشن موتورهای AC که هزینه های تعمیر و نگهداری کمتری دارند و رشد تجهیزات الکترونیک قدرت، کنترل آنها را در محدوده وسیعی از سرعت ممکن ساخته است استفاده شود [Kemp, 1989 and Ho, et al., 2002].

عملکرد اصلی تجهیزات تراکشن دریافت جریان و توان متناسب با تقاضای بار بر اساس پروفیل حرکت قطار و محاسبات شبکه تغذیه است. ولتاژ تغذیه DC می تواند در محدوده ۳۰٪ - الی ۲۰٪ مقدار نامی تغییر کند. بنابراین ایجاد مدل وابسته به ولتاژ برای شبیه سازی تجهیزات تراکشن متداول ضروری است. برای این منظور در این مقاله از مدل درایو وابسته به ولتاژ که توسط Yu, Struand and Denning [Yu, Struand and Denning, 1994] و همچنین Goodman و همکاران [Goodman, et al, 1987] معرفی شده است، استفاده می شود.

برای ایجاد ارتباط بین مدار الکتریکی و سیستم تغذیه توان از مدل ولتاژ- مقاومت استفاده می شود که در آن مقادیر ولتاژ و مقاومت به مقدار سرعت و مود عملکرد قطار بستگی دارد [Ho, et al., 2002].

در این مقاله از اطلاعات مربوط به یک تراکشن موتور AC که در سیستم راه آهن شهری تهران مورد بهره برداری قرار گرفته است و در محاسبات طراحی و شبیه سازی مورد نیاز است، استفاده خواهد شد.

بر این اساس نمودار نیروی تراکشن بر حسب سرعت در شکل ۳ نشان داده شده است. رحداکث شار و ولتاژ استاتور

در سرعت پایه و فرکانس f_1 حاصل می شود.

در ناحیه ۱، مقدار شار حداکثر و ثابت است و همزمان با افزایش سرعت در فرکانس لغزش ثابت توان افزایش می یابد. فرکانس لغزش با کنترل حلقه بسته ثابت نگه داشته می شود. این امر باعث ایجاد ناحیه نیروی تراکشن ثابت می شود.

در ناحیه ۲، همزمان با افزایش سرعت، فرکانس لغزش افزایش یافته و شار کاهش می یابد. هنگام افزایش فرکانس به f_2 ، ولتاژ درحد حداکثر، ثابت نگه داشته می شود. جریان استاتور با عمل کنترل حلقه بسته ثابت می ماند. بنابراین توان ثابت مانده و نیروی تراکشن کاهش می یابد. حد فرکانس f_2 برای جریان استاتور هم فاز، به نقطه ای بستگی دارد که در آن گشتاور سیستم به حداکثر خود رسیده است.

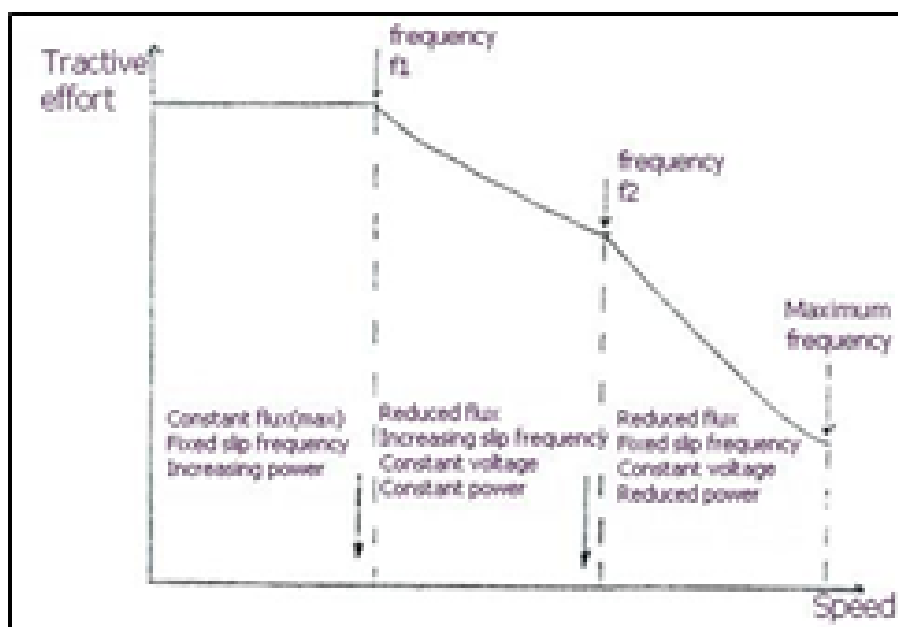
در ناحیه ۳، ضمن افزایش سرعت با کاهش جریان استاتور و شار مواجه هستیم. این موضوع در فرکانس لغزش ثابت و ولتاژ ثابت رخ می دهد. بنابراین توان کاهش می یابد.

۳. تحلیل داده های ورودی و تعیین خروجی های مورد نیاز

داده های مورد نیاز برای طراحی و شبیه سازی به چند قسمت تقسیم می شوند. در طراحی شبکه تغذیه برای برق رسانی به بار، از یک سو اطلاعاتی در مورد بار الکتریکی هر قطار مورد نیاز است و از سوی دیگر اطلاعاتی راجع به ترانسفورماتورها، یکسوسازها و تجهیزات داخل پست مورد نظر احتیاج است. همچنین داده های مربوط به خط و داده های بهره برداری نیز در طراحی و انجام شبیه سازی دقیق و مناسب مورد لزوم هستند. در ادامه اطلاعات مورد نیاز که به عنوان ورودی های نرم افزار نیاز هستند، طبقه بندی شده است [Kiessling, et al, 2010 Mellitt, 1978 and].

۳-۱ داده های مربوط به بار الکتریکی قطارها

داده های ذیل در مورد وسایل نقلیه ریلی مورد استفاده در شبکه مورد نیاز هستند. بدیهی است در صورت استفاده از چندین نوع وسیله نقلیه مختلف، طراحی می بایست بر



شکل ۳. مشخصه نیروی تراکشن بر حسب سرعت موتور آسنکرون

پیچ اولیه و یکی از سیم پیچهای ثانویه

مبنای داده هایی انجام شود که به ازای آنها خروجیهای نرم افزار قابل اطمینان باشند [Sandidzadeh, Safarkhani and Mirabadi, 2010].

۳-۳ داده های مربوط به واحد پست یکسوساز

واحد پست یکسوساز نیز دارای ماهیت و داده های خاصی است که در طراحی نقش ویژه ای ایفا می کنند. این داده ها عبارتند از:

نوع کانورتر، توان نامی، ولتاژ نامی خروجی، ولتاژ بی باری و جریان نامی

۳-۴ سایر داده ها

بجز داده های مذکور در سه دسته فوق، داده های ذیل که ناشی از خط و بهره برداری هستند نیز مورد نیاز طراح خواهند بود.

تعیین بازگشت پذیری انرژی در هنگام ترمز به خط، مقاومت کابل های فیدر در دمای بهره برداری، مقاومت ریل حرکتی در دمای بهره برداری، مقاومت ریل سوم هادی و یا کابل بالاسری در دمای بهره برداری و ضریب تنظیم ولتاژ

توان سیستم های کمکی، حداقل سرعتی که در آن از ترمز الکتریکی استفاده می شود، حدود ولتاژ حداکثر و حداقل و مقدار نامی جهت تغذیه تراکشن موتورها، بازده وسیله نقلیه از چرخ تا پانتوگراف (کلکتورهای جریان)، نمودار نیروی تراکشن بر حسب سرعت، نمودار نیروی ترمزی بر حسب سرعت، نمودار نیروهای تراکشن و ترمزی بر حسب ولتاژ و نمودار حدود جریان در دو حالت تراکشن و ترمزی بر حسب ولتاژ

۳-۲ داده های مربوط به ترانسفورمر یکسوساز

داده های زیر مربوط به نوع ترانسفورماتور پست یکسوسازی است که در انجام طراحی مورد نیاز خواهند بود [Mellitt, 1978] و [Kiessling et al, 2010]:
توان نامی، ولتاژ ثانویه و امپدانس اتصال کوتاه بین سیم

پست یکسوساز

به منظور برآورده کردن هدوی موردنظر تأمین گردد، بررسی در نظر گرفتن درجه بندی کافی برای تجهیزات در بدترین شرایط بهره برداری به طوری که تجهیزات سیستم قدرت از قبیل یکسوساز، مدارشکنهای مربوط به فیدرها، فیدرهای خط و ریل سوم یا بالاسری و دیگر تجهیزات مربوطه بدون تحمل اضافه بار بتوانند بهره برداری از قطارها را پشتیبانی کنند، و بررسی میانگین توان، جریان، حداکثر و کمینه ولتاژ قطار در حالت خروج از سرویس یک یونیت یکسوساز و یا یک پست یکسوساز به طور کامل از سیستم تغذیه.

۶. تبیین متدولوژی طراحی شبیه ساز شبکه و روش

حل معادلات حاکم بر سیستم

۶-۱ متدولوژی طراحی شبیه ساز شبکه

در این نرم افزار علاوه بر شبیه سازی حرکت یک قطار در خط محاسبات مربوط به پست های تغذیه تراکشن نیز انجام می شود. برای این منظور به اطلاعاتی نظیر پروفیل طولی خط مورد نظر، مشخصات موتور تراکشن قطار، حداکثر و متوسط سرعت حرکت در خط نیاز است و خروجی آن، وضعیت حرکت قطار (موقعیت لحظه ای، سرعت، توان و ...)، زمان حرکت بین دو ایستگاه و توان مصرفی در هر قسمت خواهد بود. سپس از اطلاعات به دست آمده جهت رسم گراف حرکت قطار استفاده می شود (نمودار شکل ۱). خروجی های این بخش بر اساس برنامه زمانبندی حرکت قطارها در خط، طول مدت توقف آنها در هر ایستگاه، هدوی حرکت آنها و نتایج محاسبات مرحله قبل به دست خواهد آمد [Mellitt, 1978, Sandidzadeh, Safarkhani and Miraba-di, 2007].

در مرحله بعدی، شبیه سازی الکتریکی شبکه تغذیه تراکشن انجام می شود. اولین گام برای این منظور، در نظر گرفتن مدل ریاضی شبکه سیستم تغذیه تراکشن با توجه به ساختار شبکه سیستم تغذیه تراکشن DC است. سپس دینامیکی پارامترهای حرکت قطار و پارامترهای الکتریکی لحظه ای برای تمام نقاط

۴. تعیین خروجیهای نرم افزار

تصمیم گیری در مورد امکان یا عدم امکان اجرای طراحیهای انجام شده، به مشخصات و داده هایی که برای انتخاب تجهیزات و دستگاههای الکتریکی، موقعیت و نصب آنها لازم است، بستگی دارد. خروجیهای نرم افزار شبیه ساز طراحی که مد نظر قرار گرفته اند عبارتند از:

توان و جریان هر یک از پستهای یکسوساز، جریان موثر و پیک مربوط به هر فیدر، ولتاژ موثر و پیک مربوط به هر پست، ولتاژی که در هر نقطه از خط بر روی قطار دیده می شود، نمودارهای سرعت- زمان، شتاب- زمان، ولتاژ- زمان، جریان- زمان، توان (kW)- زمان، تعیین خروجیها در حالت از سرویس خارج شدن تجهیزات پست یکسوساز، تعیین خروجیها در حالت خروج یک واحد پست، یکسوساز به طور موقت و اثر آن بر توان پستهای دیگر و تعیین خروجیها در حالت خروج یک واحد پست یکسوساز به طور کامل از سیستم تغذیه و اثر آن بر توان پستهای دیگر

۵. معیارهای مهم طراحی

طراحی انجام شده در شبکه تغذیه تراکشن راه آهن شهری می بایست بر اساس معیارهای مهم و قابل قبول بین المللی و مبتنی بر تجربیات به عمل آمده در این راستا و استانداردهای تدوین شده باشد. معیارهای مهم زیر از جمله ملاحظات منظور شده در طراحی نرم افزار شبیه ساز پیش رو است [Mellitt, 1978 and Kiessling, et al, 2010]:

بررسی برآورده شدن نیازهای استانداردهای CEI EN 50328 و CEI EN 50329 کلاس VI، تحت شرایط هدوی مسیر در مورد خروجی های اخذ شده از نرم افزار، بررسی تأمین سطح ولتاژ کافی در بدترین شرایط بهره برداری قطار، ولتاژ حداقل دیده شده توسط قطار، از پایین ترین حد ولتاژ موتور تراکشن بالاتر باشد. ولتاژ میانگین کافی برای قطار

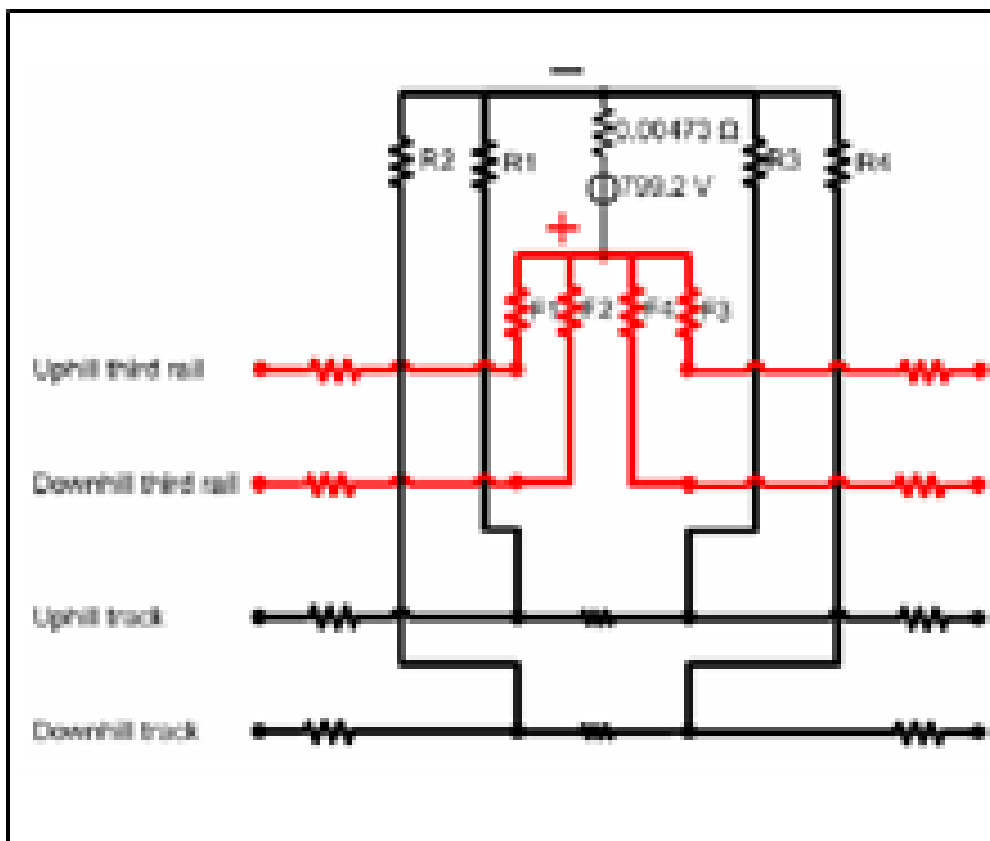
شبکه تغذیه به طور مکانیکی محاسبه می‌شوند.

توانایی پشتیبانی بارهای الکتریکی موجود را خواهند داد:

جریان نامی به طور مداوم، یک ونیم برابر جریان نامی برای مدت دو ساعت مداوم و با فاصله زمانی ۳ ساعت و ۳ برابر جریان نامی برای مدت یک دقیقه مداوم و با فاصله زمانی ۳۰ دقیقه جریان های اندازه‌گیری شده در فیدرهای F1، F2، F3 و F4 هر پست، معادل جریان جاری شده در ریل سوم می‌باشد. مقدار موثر جریان جاری شده در فیدرها بایستی از حداکثر جریان مجاز ریل سوم کمتر باشد.

۶-۲ معادلات حاکم بر سیستم

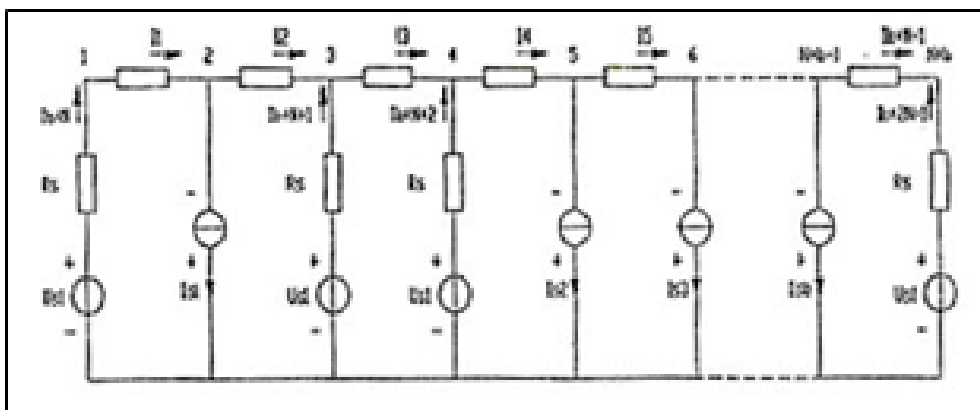
در شکل ۴، مدار مدل معادل پستهای یکسوساز نشان داده شده است. فیدرها در همان محل پست یکسوساز به ریل سوم متصل شده و از مقاومت آنها صرف نظر شده است. یکسوسازها از استانداردهای CEI EN 50328 و CEI EN 50329 کلاس VI پیروی می‌کنند. در صورتی که شرایط زیر برآورده شوند تجهیزات پست های یکسوساز



شکل ۴. مدل پست یکسوساز

است. بردار جریان $[I_1, I_2, I_3, \dots, I_{b+N-1}]$ جریان های هر شاخه از شبکه تراکشن و بردار $[I_{(b+N)}, I_{(b+N+1)}, I_{(b+N+2)}, \dots, I_{(b+2N-1)}]$ جریان هر شاخه RS است [Mellitt, 1978].
با در نظر گرفتن هدوی مربوط به خط مورد نظر، هنگامی که خط به طور کامل اشغال است می توان مدار معادل شبکه را به صورت شکل ۵ در نظر گرفت:

ابتدا فرض می شود که سیستم دارای تعداد N پست RS و b قطار در طول خطی دارای m ایستگاه، باشد. در شکل ۳ شبکه ای با تعداد $N+b-1$ شاخه که محل شاخه ها همان محل قطار و پست های RS است نشان داده می شود.
مقاومت هر شاخه شبکه تراکشن $[R_1, R_2, R_3, \dots, R_{(b+N-1)}]$ است. بردار جریان $[I_{s1}, I_{s2}, I_{s3}, \dots, I_{sb}]$ مربوط به جریان قطارها



شکل ۵. مدل مداری شبکه سیستم تغذیه تراکشن برطبق ترکیب شبکه سیستم تغذیه ترکشن DC

برگشت است که حل همزمان آنها با روشهای متداول حل معادلات غیرخطی نظیر نیوتن-رافسون و گوس-سایدل غیراصولی است، زیرا پاسخ معادلات یا واگرا خواهند شد و یا حل آنها زمان زیادی به طول می انجامد. در انجام این شبیه سازی از روشهای مذکور جوابی حاصل نشد و به ناچار از روش نوین تری با اطمینان از همگرا شدن جوابها استفاده شد [Manassah, 2001]. پاسخ دستگاه معادلات غیرخطی $f(i)=0$ شامل یافتن راه حلی است که به ازای آن هر یک از معادلات دستگاه صفر گردد.

۶-۳ روش ناحیه اعتماد داگ لگ

به طور کلی روش های بهینه سازی بازگشتی به دو گروه طبقه بندی می شوند:
الف) روش های جستجوی خطی
ب) روشهای ناحیه اعتماد

برای محاسبه بردار I و جریان های جاری در مدار از معادلات کیرشهف $Y_{nn}e=I$ استفاده می شود. برای این منظور از روابط KCL در محل RS ها و قطارها و همچنین روابط KVL در حلقه های مربوط به دو RS مجاور استفاده می شود. در بردار I جریان مربوط به پست های RS با استفاده از مدار معادل نورتن منابع به دست می آید، در حالی که جریانهای مربوط به قطارها مجهول هستند. از حل دینامیک حرکت قطارها در خط، بردار توان مصرفی قطارها حاصل خواهد شد. از آنجا که حاصل ضرب ولتاژ در جریان هر مصرف کننده، توان مصرف کننده را نتیجه می دهد، می توان در محل قطارها با حل دستگاه معادلات غیرخطی $P=f(i)$ ، جریان قطارها را به دست آورد. اما حل دستگاه معادلات غیرخطی فوق برحسب جریان قطارها با پیچیدگی های خاصی همراه است. تعداد معادلات غیرخطی و مجهولات این دستگاه معادل تعداد مجموع قطارهای موجود در خط رفت و

با تعریف ژاکوبین سیستم فوق به صورت ذیل:

$$J(x_k) = [F_1(x_k)^T @ F_2(x_k)^T @] \quad (1)$$

و همچنین تعریف تابع داگ لگ به شکل ذیل:

$$[\min_d [1/2 F(x_k)^T F(x_k) + d^T J(x_k)^T F(x_k) + 1/2 d^T (J(x_k)^T J(x_k)) d] \quad (2)$$

با برآورده ساختن شرط $F(x_{k+1}) < F(x_k)$ همگرایی پاسخ تضمین خواهد شد.

برای حداقل سازی معادله فوق از روند زیر استفاده می شود:

$$d = d_c + \lambda (d_{GN} - d_c) \quad (3)$$

که در آن

$$d_c = -\alpha J(x_k)^T F(x_k) \quad (4)$$

$$(d_{GN} = -J(x_k)^{-1}) F(x_k) \quad (5)$$

به گونه ای که $\Delta \geq \|d\|$.

در رابطه فوق Δ شعاع ناحیه اعتماد می باشد.

به این ترتیب ماتریس I به دست می آید [Manassah, 2001]. سپس برای محاسبه ولتاژ نقاط شبکه تراکشن از قانون اهم طبق رابطه زیر استفاده می گردد:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ U_{N+b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ U_{N+b-1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & R_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{N+b-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ I_{N+b-1} \end{bmatrix}$$

در ماتریس فوق $U_0 = U_{s1}$ است.

در این بین روشهای ناحیه اعتماد، روشهای بهینه سازی قابل اعتماد و موثری هستند که در آن به کمک یک مدل کوادراتیک از تابع هدف، مساله تحلیل می شود [Choi, Kim and Choi, 2004].

در این نرم افزار از روش ناحیه اعتماد داگ لگ استفاده شد.

نکاتی که در مورد ارزیابی و مقایسه روش های حل بهینه معادلات مورد توجه قرار می گیرند عبارتند از:

تعداد تکرار برای حصول همگرایی، زمان لازم برای محاسبات، دقت جواب، قابلیت اطمینان جهت حصول همگرایی و حافظه لازم جهت ذخیره سازی داده ها در رایانه. روش ناحیه اعتماد داگ لگ دارای مزایای زیر نسبت به روش های متداول مورد استفاده در پخش بار شبکه های تغذیه می باشد:

تعداد تکرارهای کم برای حصول همگرایی، دقت زیاد در محاسبات، عدم وابستگی حصول همگرایی به مقادیر اولیه انتخابی و تابع

اطمینان از همگرا شدن تکنیک های ناحیه اعتماد، احتمال یافتن پاسخ را در شرایطی که مقدار اولیه پاسخ با مقدار نهایی فاصله زیاد دارد و یا احتمال ویژه شدن ماتریس ژاکوبین، $J(x_k)$ ، زیاد است، تا حدود زیادی افزایش می دهد.

(6)

سیستم تغذیه بررسی می شود. این امر توسط دو برابر شدن مقاومت معادل پست مربوطه تحقق می یابد.

د- اثر از سرویس خارج شدن یک پست یکسوساز از سیستم تغذیه بررسی می شود. تمامی حالت های ممکن با خروج یک پست امتحان می گردند.

ه- توان میانگین، حداکثر جریان عبوری از فیدرها و ریل سوم و حداقل ولتاژ قرار گرفته روی هر قطار در شرایط کار عادی و در شرایط کار غیر عادی شبکه با توجه به بندهای ج و ه بررسی می شوند.

و- امکان کاهش تعداد، تغییر ظرفیت و چیدمان پست های یکسوساز در طول خط و با تکرار مراحل فوق بررسی می شود

ز- تغییر پارامترها در صورت نیاز و بازگشت به مرحله الف تا حصول به نتایج بهینه (بطوری که هیچ بهبود چشمگیری با تغییرات تئوری بیشتر حاصل نشود).

۸. نتایج شبیه سازی دینامیک سیستم تغذیه ترکشن

شبیه سازی های انجام شده بر اساس اطلاعات ارائه شده توسط شرکت راه آهن شهری تهران و حومه روی بخشی از خط ۴ انجام شده است. شکل ۶ بخشی از پلان ایستگاهها و محل پست های یکسوساز خط ۴ متروی تهران که شبیه سازی برای آن انجام شده است را نشان می دهد.

به طور کلی نمودار متوسط توان کشیده شده در محل پست های یکسوساز از این منظر اهمیت دارد که بر اساس آن می توان تعداد پست ها و اطمینان از جوابگو بودن تعداد در نظر گرفته شده را ارزیابی کرد. با فرض اینکه پست یکسوساز در محل F4 از مدار خارج باشد، با اجرای شبیه سازی خروجی برنامه در شکل ۷ نشان داده شده است. از آنجائی که توان پست های یکسوساز در اطلاعات ورودی نرم افزار برابر با $2 \times 2250 \text{ kW}$ در نظر گرفته شده است، از این نمودار مشخص می شود که در محل پست های واقع در E4 و D4، بیشترین متوسط توان کشیده می شود و این پست ها

از آنجائی که شبکه تغذیه ترکشن یک شبکه دینامیکی است، محاسبات فوق تنها در مورد وضعیت شبکه در لحظه زمانی t صحت دارد. برای لحظه $(t+\Delta t)$ ابتدا بایستی موقعیت و بار قطار در لحظه جدید طبق مشخصات قطار و موتور ترکشن آن و همچنین ساختار شبکه تغذیه و وضعیت بارگذاری تعیین گردد و سپس مدار معادل شبکه ترکشن در وضعیت جدید مشخص شود. سپس ماتریس جدید طبق روش فوق الذکر نوشته شده و پارامترهای مورد نیاز در لحظه جدید محاسبه شوند. این حلقه محاسبات تا زمان حصول نتیجه ادامه پیدا خواهد کرد. شایان ذکر است که زمان حرکت بارها با توجه به گراف حرکت در دست است.

به طور کلی با توجه به پروفیل طولی مسیر مورد نظر، زمان بندی حرکت قطارها، نوع و مشخصات قطار، مشخصات حرکتی قطار، نوع ترانسفورماتور یکسوساز، ولتاژ شبکه ترکشن و مقاومت ریل حرکتی، توزیع پست های RS و ظرفیت ترانسفورماتور یکسوساز مربوط به هر RS از طریق شبیه سازی کامپیوتری حاصل می گردد.

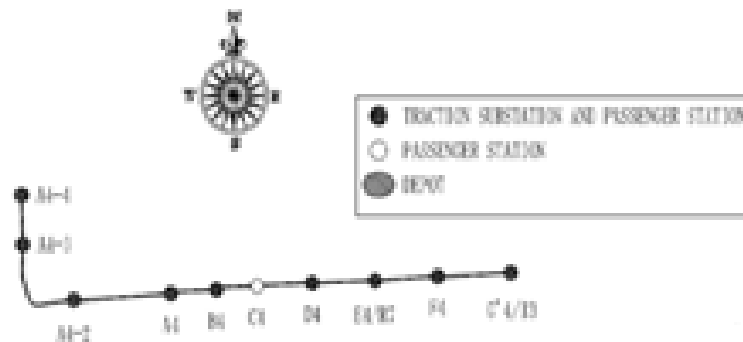
۷. الگوریتم شبیه سازی

به طور کلی به منظور بهینه کردن تعداد و محل پست های یکسوساز در طول خط مورد نظر، الگوریتم سیستماتیک زیر در انجام عملیات شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفته است [Mellitt, 1978, Kiessling, et al, 2010]:

الف- ابتدا مجموع توان مورد نیاز برای بهره برداری خط با هدوی تعیین شده تخمین زده می شود. سپس با توجه به مقدار تخمین زده شده، در هر ایستگاه ظرفیت مورد نیاز برای پست های یکسوساز به عنوان پیش فرض در نظر گرفته می شود.

ب- شبیه سازی کامل خط هنگامی که قطارها در دو مسیر رفت و برگشت با هدوی مورد نظر حرکت می کنند، انجام می شود.

ج- اثر از سرویس خارج شدن یک یونیت یکسوساز از

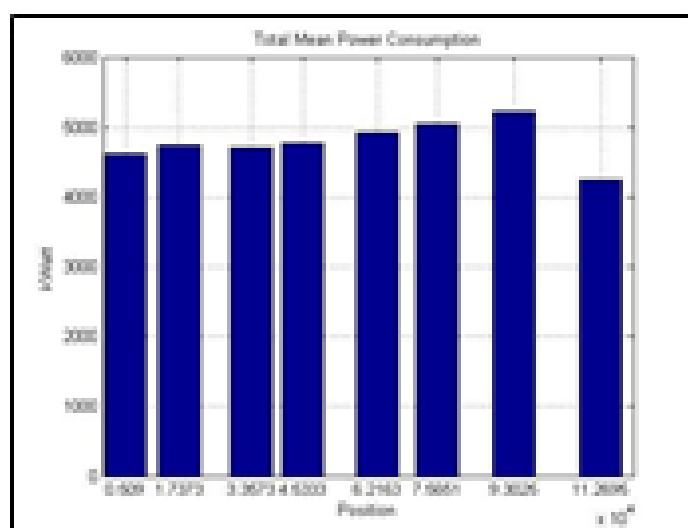


شکل ۶. پلان بخشی از پست های یکسوساز خط ۴

مورد نظر منطقی و شاید اجتناب ناپذیر باشد. اما در صورتی که در مرحله طراحی خط و پست باشیم، می توان با اضافه کردن پست جدید و جابجایی پستهای از قبل تعیین شده مشکل را حل کرد.

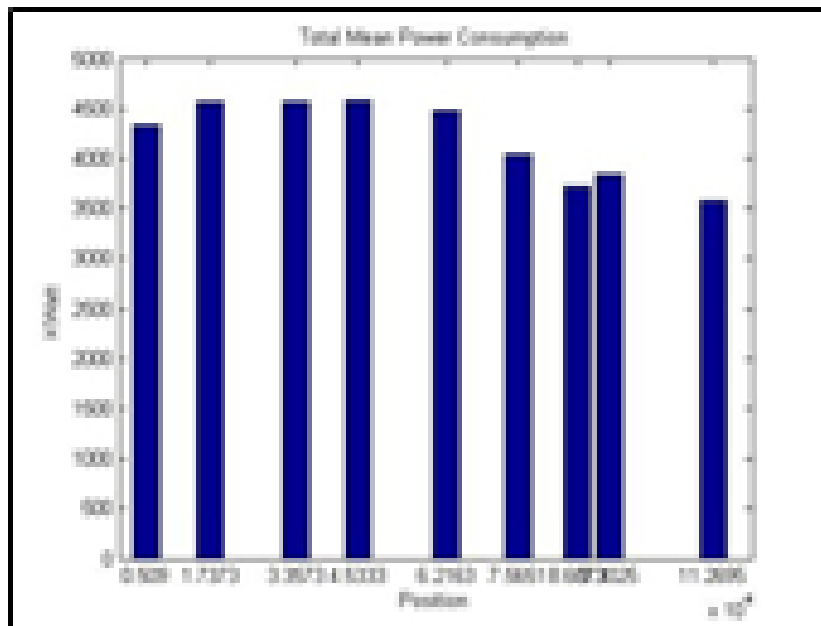
شکل ۸ نمودار متوسط توان کشیده شده در محل پست ها را در حالت اضافه شدن یک پست $2 \times 2250 \text{ kW}$ در محل ایستگاه F4 نشان می دهد. ملاحظه می شود که با اضافه شدن یک پست در محل ایستگاه واقع در محل $3/8687 \text{ متر}$ ، مقدار توان کشیده شده از پستها در این ناحیه به حالت نرمال می رسد و از مقدار توان نامی هر پست کمتر می گردد.

دچار اضافه بار شده اند. از آنجائی که فاصله بین E4 با G4 برابر 1967 m و فاصله بین E4 با G4 برابر $4/1737 \text{ m}$ است، حداکثر چهار قطار در سمت راست E4 و چهار قطار در سمت چپ آن وجود خواهد داشتبا توجه به این تعداد قطار، پست E4 از لحاظ توان کشیده شده در بدترین حالت قرار می گیرد. برای حل این مشکل در عمل دو راه حل پیشنهاد می شود؛ اول آنکه ظرفیت پست مربوطه افزایش داده شود و دیگر آنکه در محل یکی از پست های مجاور، پست دیگری قرارداد شود. در عمل در خطوط در حال بهره برداری افزایش ظرفیت پست



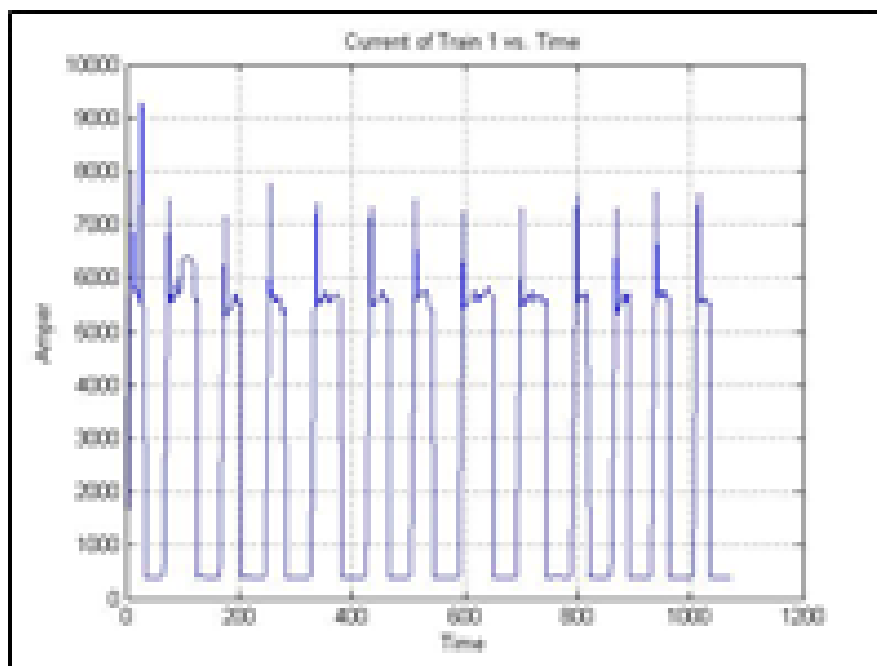
شکل ۷. نمودار متوسط توان کشیده شده در محل پستها

طراحی و شبیه سازی شبکه تغذیه ترکشن راه آهن شهری همراه با روش عددی

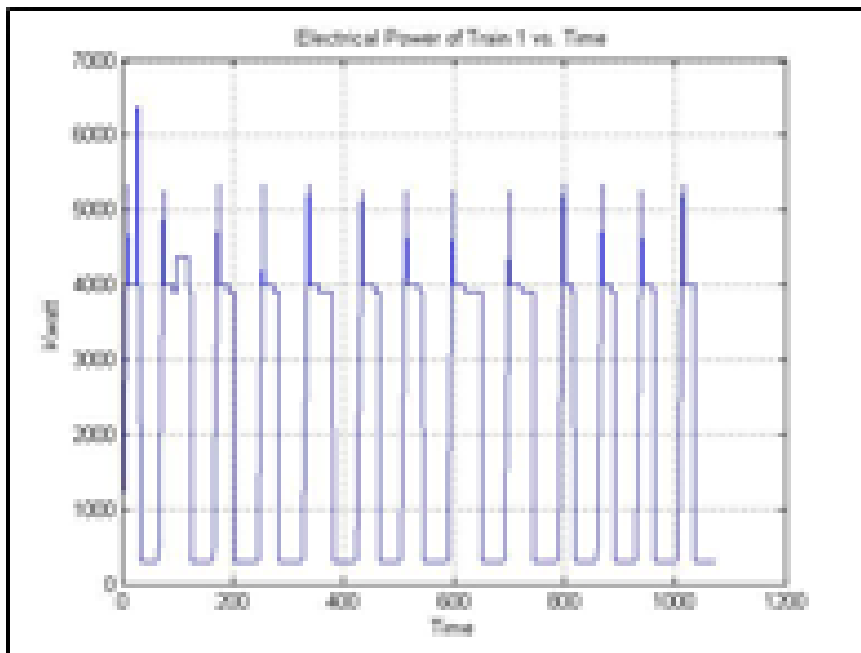


شکل ۸. نمودار متوسط توان کشیده شده در محل پستها با اضافه شدن در محل F4

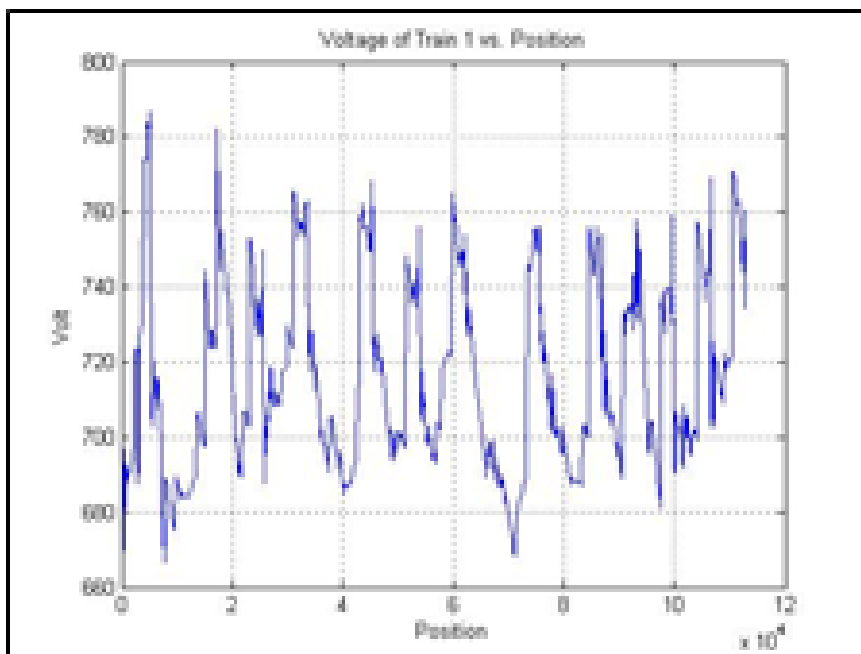
برای بررسی بیشتر در مورد وضعیت جدید پیشنهادی جهت احداث پست های یکسوساز بر اساس شبیه سازی های انجام شده، نمودارهای جریان- زمان، توان الکتریکی- زمان و ولتاژ- مکان مربوط به قطار شماره ۱ در مسیر رفت در شکل های ۹، ۱۰ و ۱۱ ارایه شده است.



شکل ۹. نمودار جریان- زمان مربوط به قطار رفت



شکل ۱۰. نمودار توان الکتریکی - زمان مربوط به قطار رفت



شکل ۱۱. نمودار ولتاژ- مکان مربوط به قطار رفت

در خط ۴ متروی تهران که از طریق پیمانکار مربوطه با استناد به مطالعات مهندسی معتبر اجرا شده در جدول ۱ آورده شده است. داده های جدول صحت نتایج نرم افزار توسعه داده شده را با نمونه عملی اجرا شده نشان می دهد.

چنان که از شکل های فوق بر می آید، نتایج حاصله قابل اطمینان بوده و طرح پیشنهادی جهت احداث پست های یکسوساز مناسب به نظر می رسد. به عنوان مقایسه تکمیلی نتایج نرم افزار توسعه یافته این مقاله با نتایج عملی اجرا شده

جدول ۱. محل پستهای تراکشن خط ۴ متروی تهران

ظرفیت	نوع پست	نام ایستگاه	کد ایستگاه	ردیف
۲ × ۲۵۰۰	RS	ارم سبز	A۴-۴	۱
۲ × ۳۳۰۰	RS	شهرک اکباتان	A۴-۳	۲
۲ × ۲۵۰۰	RS	بیمه	A۴-۲	۳
۲ × ۲۵۰۰	RS	میدان آزادی	A۴	۴
۲ × ۲۵۰۰	RS	استاد معین	B۴	۵
-	RIC	دکتر حبیب ا...	C۴	۶
۲ × ۲۵۰۰	RS	آزادی	D۴-H۲	۷
۲ × ۲۵۰۰	RS	توحید	E۴	۸
۲ × ۲۵۰۰	RS	میدان انقلاب	F۴	۹
۲ × ۲۵۰۰	RS	چهارراه ولیعصر	۱۳G'۴	۱۰

۹. نتیجه گیری

در این مقاله با در نظر گرفتن معیارهای مهم و استاندارد طراحی به حل دینامیک شبکه تغذیه تراکشن راه آهن شهری پرداخته شد. حل معادلات بر مبنای روش های محاسبات معادلات غیرخطی مانند داگ لگ برای سریع کردن محاسبات و تضمین همگرایی بود. نمودار متوسط توان کشیده شده از هر یک از پست های یکسوساز به عنوان نمودار کلیدی در تعیین تعداد و محل پست های یکسوساز ارایه شد و با شبیه سازی انجام گرفته، مقادیر لحظه ای پارامترهای الکتریکی شبکه تغذیه از قبیل توان، جریان و ولتاژ ارایه گردید. مقایسه عملی با پروژه اجرا شده توسط شرکت های معتبر، صحت نتایج و خروجی نرم افزار را نشان می دهد.

۱۰. مراجع

- Choi, H., Kim, S. and Choi, S. (2004) "Trust-region learning for ICA", Neural Networks, IEEE International Conference, Volume. 1, July, pp. 25-29.
- Ciccarelli, F., Lauria, D. and Tricoli, P. (2012) "Control of metro trains equipped with onboard super capacitors for energy saving and reduction of power peak demand", Transportation Research Journal, Part: C, pp. 36-49.
- Garcia, A., Gomez, C., Saa, R., Carballeria, F. G. and Carretero, Jesus (2013) "Optimizing the process

- Maceri, F. and Casciati, F. (2003) "Modelling and simulation of advanced problems and smart systems in civil engineering", Simulation Modelling Practice and Theory, pp. 5-6.
- Manassah, J.T. (2001) "Elementary mathematical and computational tools for electrical computer engineering using MATLAB", CRC Press.
- Mellitt, B. (1978) "Simulation for studying of operational and power supply conditions in rapid transit railways", IEEE (125), pp.298-303.
- Metrolinx Agency (2010) "GO electrification study Final Report-Appendix 7"- December, website: www.gotransit.com/electrification/
- Sibal, Vinod (2011) "Traction power supply system for California high speed project", AREMA Annual Conference, Sept. , Minneapolis, USA.
- Yu, J. G., Struand, R. W. and Denning, L. R. (1994) "A general motor modeling method for transit system simulation studies", COMPRAIL'94.
- اسناد ومدارک موجود در کتابخانه و مرکز اسناد شرکت راه آهن شهری تهران وحومه در مورد مشخصات خطوط مختلف متروی تهران.
- صندیدزاده، محمدعلی ، صفرخانی، شیرین ، میر آبادی، احمد (۱۳۸۶)"شبه سازی دینامیک حرکت قطار در راه آهن شهری"، فصلنامه علمی پژوهشی حمل و نقل، سال چهارم، شماره ۲ ، صفحه ۱۸۰-۱۷۳
- of designing and calculating railway catenary support infrastructure using a high productivity computational tool", Transportation Research Journal, Part: C, pp. 1-4.
- Gomez, C., Saa, R., Garcia, A., Carballeria, F. G. and Carretero, Jesus (2012) "A model to obtain optimal design of railway overhead knuckle junction using simulation", Simulation Modeling Practice and Theory, pp. 16-31.
- Goodman, C. J., Mellitt, B. and Rambukwella, N.B. (1987) "CAE for the electrical design of urban rail transit systems", COMPRAIL'87, pp. 173-193.
- Iannuzzi, D., Ciccarelli, F. and Lauria, D. (2012) "Stationary ultra-capacitors storage devices for improving energy saving and voltage profile of light transportation networks", Transportation Research Journal, Part: C, pp. 321-337.
- Ho, T. K., Mao, B. H., Yuan, A. A., Liu, H.D. and Fung, Y.F (2002) "Computer simulation and modeling in railway applications", Computer Physics Communication, pp. 1-10.
- Kiessling, Friedrich, Puschmann, Rainer, Schmieder, Axel and Schneider, Egid (2010) "Contact lines for electrical railways: Planning - design - implementation – maintenance", England, Wiley & Sons.
- Kemp, R. J. (1989) "Developments in electric traction", Power Engrg. J. pp. 71-82.