فصلنامه مهندسی ترافیک، سال بیست و سوم، شماره ۹۲، بهار ۱۴۰۲، ص. ۱۲-۱

تحلیل فنی و بررسی ناوگان هوشمند و مبتنی بر رانش الکتریکی DRT و قیاس آن با BRT و تراموا

نادر سنندجی (مسئول مکاتبات)، دکتری، مسئول مهندسی برق، واحد فنی و مهندسی شرکت واگن‌سازی تهران، تهران، ایران
E-mail: sanandaji@elec.iust.ac.ir
حامد دباغ‌زاده، کارشناسی ارشد، رئیس مهندسی برق، واحد فنی و مهندسی شرکت واگن‌سازی تهران، تهران، ایران

چکیده

سامانه اتوبوس تندرو نقشی اساسی در جابجایی مسافرین در کلان‌شهرها بر عهده دارد اما این سامانه به دلیل بهره‌گیری از موتورهای دیزلی، دارای مصرف سوخت و آلایندگی بالا و همچنین عمر مفید پایین است. از طرفی استفاده از روش‌های ریلی الکتریکی در سطح مسیرهای شهری مدت‌ها است که مورداستفاده قرار می‌گیرد، اما گسترش این مسیرهای به دلیل نیاز به زیرساخت تأمین توان و مسیر حرکت، امری پرهزینه تلقی می‌گردد. با پیشرفت فناوری ماشین‌های الکتریکی وابسته به باتری یا سلول هیدروژنی، ناوگان نوین رانش الکتریکی با نام DRT در برخی از کشورهای پیشرفته در حال بهره‌برداری است که هم‌زمان با انعطاف‌پذیری مطلوب، از مزایای فراوانی از قبیل هدایت نیمه اتوماتیک و مصرف انرژی پاک و بهینه برخوردار است. این مقاله، با توجه به تجارب و دانش فنی شرکت واگن سازی تهران در زمینه سیستم‌های رانش الکتریکی و هدایت خودکار، امکان استفاده از DRT و مقایسه آن با روش‌های مشابه BRT و تراموای شهری از نقطه‌نظر فنی، مهندسی و قابلیت انطباق با زیر ساخت‌های شهری را بررسی و درنتیجه نشان می‌دهد ناوگان DRT مزایای بسیاری در قیاس با BRT به همراه دارد و درعین‌حال، زیر ساخت‌های موردنیاز آن هزینه بسیار کمتری در قیاس با تراموا خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: حمل‌ونقل عمومی، ناوگان DRT، ناوگان BRT، تراموا، رانش الکتریکی، هدایت نیمه‌خودکار

۱. مقدمه و ادبیات پژوهش

سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی درون‌شهری نقش اساسی در جابجایی روزانه شهروندان در کلان‌شهرها داشته و از ارکان توسعه و رفاه در یک جامعه محسوب می‌گردند. بهبود عملکرد و کیفیت ناوگان حمل‌ونقل عمومی همراه با گسترش آن ازجمله اهداف اساسی در میان سیاست‌گذاران شهری در کشورهای مختلف بوده و این موضوع لزوم بهره‌مندی از فناوری‌های نوین، بهینه و سازگار با محیط‌زیست را آشکار می‌نماید. با توجه به وجود طیف وسیعی از وسایل نقلیه عمومی با قابلیت‌ها، انعطاف‌پذیری و ویژگی‌های متنوع در کنار مشخصات مختلف مسیرهای تردد شهری، تصمیم دقیق برای انتخاب نوع وسیله متناسب با آن مسیر باید بر اساس متغیرهای گوناگونی صورت گیرد. این متغیرها بر اساس میزان تقاضای استفاده از مسیر، هزینه ایجاد زیرساخت، ظرفیت، عمر مفید و ابعاد وسیله نقلیه، نحوه ایجاد رانش، منبع تأمین انرژی و میزان آلایندگی آن تعیین می‌گردند.

بر اساس وزن، گنجایش و ویژه بودن مسیر تردد، می‌توان سیستم‌های حمل‌ونقل درون‌شهری را دسته‌بندی نمود که در این طبقه‌بندی از راه‌آهن ریلی مترو به‌عنوان سنگین‌ترین دسته، سامانه اتوبوس تندرو (BRT)[۱] و قطارهای سبک شهری (LRT)[۲] به‌عنوان دسته میانی و تاکسی‌ها و دوچرخه‌های شهری به‌عنوان سبک‌ترین دسته حمل‌ونقل شهری یاد می‌شود. دسته میانی که شامل انواع اتوبوس‌ها با سوخت فسیلی یا الکتریکی، قطارهای سبک و تراموا[۳] است، درصد قابل‌توجهی از خدمات حمل‌ونقل عمومی شهری را در اقصی نقاط جهان به خود اختصاص می‌دهد. به‌عنوان‌مثال در شهر تهران (بدون وجود خطوط LRT)، بنابر جمع‌بندی شرکت واحد اتوبوس‌رانی، در خطوط اتوبوس‌رانی BRT در سال ۱۳۹۸ نزدیک به ۲۷۶ میلیون مسافر جابجا شده‌اند که اندکی کمتر از تعداد مسافرین سالانه متروی تهران در همان سال بوده است؛ بنابراین با توجه به نیاز و تقاضای بالا برای استفاده از دسته میانی ناوگان حمل‌ونقل شهری و انعطاف‌پذیری نسبی آن، استفاده از فناوری‌های نوین در طراحی بدنه و افزایش ظرفیت، الکتریکی کردن سیستم رانش و تأمین توان الکتریکی، هدایت و مسیریابی خودکار این دسته از وسایل نقلیه عمومی می‌تواند به مزایای قابل‌توجهی منتج گردد.

استفاده از رانش الکتریکی و کنترل نیمه‌خودکار وسایل حمل‌ونقل شهری با توجه به مزایای متعدد آن، در سال‌های اخیر توجه و سرمایه‌گذاری فراوانی را در اقصی نقاط جهان، به‌ویژه در کشورهای پیشرفته به خود جلب کرده است. در این مقاله، با تکیه بر دانش و تجربه بالای شرکت واگن‌سازی تهران در زمینه استفاده از سیستم‌های رانش الکتریکی و عملکرد خودکار قطار (ATO)[۴]، امکانات، مزایا و قابلیت‌های استفاده از یک ناوگان نوین الکتریکی حمل‌ونقل شهری با نام DRT[۵] موردبررسی قرار می‌گیرد که ازلحاظ طبقه‌بندی قابل قیاس با BRT و ترام است.

۲. روش پژوهش

همان‌طور که در بخش مقدمه مطرح شد، سیستم DRT موردنظر شرکت واگن‌سازی تهران مزایا و قابلیت‌های قابل‌توجهی در قیاس با ناوگان BRT یا ترام خواهد داشت. سیستم DRT مدنظر از سه قسمت مجزا[۶] تشکیل شده است که هر بخش توسط یک مفصل با گنگ‌وی[۷] به دیگری متصل خواهد بود (درمجموع، دو گنگ‌وی) که تماس این قسمت‌ها با زمین جهت ایجاد اصطکاک رانشی توسط چرخ‌های لاستیکی صورت می‌پذیرد. این سیستم یک وسیله نقلیه با ارتفاع ورود پایین[۸] و قابلیت سوار و پیاده شدن بسیار ساده و راحت بوده که توان رانش آن توسط باتری‌های موجود در داخل وسیله نقلیه و یا سلول هیدروژنی تأمین می‌گردد. توان الکتریکی جریان مستقیم[۹] ایجادشده توسط باتری‌ها با استفاده از تجهیزات الکترونیک قدرت مدرن و پیشرفته (اینورترهای[۱۰] قدرت) به‌صورت متناوب[۱۱] درآمده تا موتورهای الکتریکی آن امکان رانشی مطمئن، نرم و پایدار را ایجاد نمایند. سیستم کنترل و هدایت نیمه‌خودکار آن نیز به‌وسیله فرمان‌های ارسال‌شده از خطوط مغناطیسی روی سطح جاده و دریافت این فرمان‌ها توسط سنسورهای تعبیه‌شده در زیر بدنه DRT و سپس

پردازش بلادرنگ روی‌داده دریافت شده صورت می‌پذیرد. بااین‌حال راهبر نیز توسط فرمان تعبیه‌شده در کابین خود، به‌سادگی قادر به اصلاح و یا تغییر مسیر در صورت ضرورت خواهد بود. در شکل ۱، نمونه‌ای از یک سامانه DRT که در شهر شانگهای چین مورد بهره‌برداری قرار گرفته است، قابل‌مشاهده است.

شکل ۱. نمونه‌ای از یک سامانه DRT سه کابینه مورد بهره‌برداری در شهر شانگهای چین

مسئله اصلی در این مقاله، بررسی امکان‌سنجی بهره‌برداری از ناوگان DRT در سیستم حمل‌ونقل شهری است تا با در نظر گرفتن چندین نقطه‌نظر اساسی، مزایای سیستم DRT در قیاس با روش‌های مشابه دیگر مشخص گردد. این نقطه‌نظرها عبارت خواهند بود از:

- ویژگی‌های فنی وسیله نقلیه
- ظرفیت وسیله نقلیه
- هزینه ساخت وسیله نقلیه و زیرساخت آن
- کیفیت سواری و آسایش مسافرین
- میزان آلایندگی و سازگاری با محیط‌زیست

بنابراین ارائه داده‌های معتبر و تحلیل منطقی برای نشان دادن مزیت‌های DRT بر اساس هر یک از نقطه‌نظرهای فوق از اهداف این مقاله است که در بخش‌های بعدی به تفکیک موردبررسی قرار خواهند گرفت.

۲-۱ بررسی ویژگی‌های فنی DRT

ویژگی‌های فنی DRT که از دیدگاه حمل‌ونقل شهری دارای اهمیت هستند و باید با روش‌های مشابه در ناوگان تراموا و BRT قیاس گردند. به دلیل ماهیت الکتریکی سیستم رانش تراموا و DRT، بسیاری از ویژگی‌های این دو ناوگان مشابه یکدیگر خواهند بود و برتری محسوسی نسبت به ناوگان دیزلی BRT دارند.

ویژگی‌های فنی که در این قسمت موردبررسی قرار می‌گیرند، عبارت‌اند از:

- ابعاد و اندازه
- ویژگی‌های سیستم رانش
- تطابق با مسیرهای شهری

در زیر بخش‌های زیر، این ویژگی‌ها مطرح و با نمونه‌های مشابه BRT و تراموا قیاس خواهند شد.

۲-۱-۱ ابعاد وسیله نقلیه

ابعاد یک سامانه DRT مطابق جدول ۱ نمایش داده شده و مقایسه آن با ناوگان رایج و استاندارد BRT و تراموا که به‌طورمعمول و استاندارد در سطح جهان استفاده می‌گردد، قابل‌مشاهده است.

جدول ۱. ابعاد DRT و قیاس آن با BRT و تراموا

	BRT		New Tram	DRT
	تک کابین	دو کابین	چهار کابین	سه کابین
طول (متر)	۱۲	۱۷,۹	۳۶	۳۰,۵
عرض (متر)	۲,۵۵		۲,۶۵	۲,۵۰
ارتفاع (متر)	۳,۱۵		۳,۸	۳,۶
تعداد صندلی	۲۴	۴۸	۵۲	۵۶
حداکثر ظرفیت (با مسافرین ایستاده)	۸۰	۱۲۰	۳۶۰	۳۰۸

۲-۱-۲ عملکرد رانش، ترمز و متوسط زمان موردنیاز برای سفر بین دو ایستگاه مجاور

عملکرد سیستم رانش و ترمز هر سیستم حمل‌ونقل شهری با توجه به زمان و سرفاصله موردنیاز برای رسیدن از هر ایستگاه به ایستگاه بعدی، تأمین شتاب رانش مناسب و ترمز گیری با شتاب مطلوب و ایمن دارای اهمیت است. با توجه به جدول ۲، امکان مشاهده ویژگی‌های رانش در مسیرهای با شیب کمتر از ۱۰ درصد و قیاس آن با دو ناوگان BRT و تراموا وجود دارد.

قابل‌ذکر است که مقادیر این جدول توسط حداکثر توان و گشتاور موتور رانش، قطر چرخ‌ها و وزن وسیله نقلیه تعیین می‌گردد. از طرفی، به دلیل پایدار بودن شتاب‌های رانش و ترمز، دور موتور الکتریکی و گشتاور در DRT نسبت به عملکرد موتورهای دیزلی در BRT، استهلاک تجهیزات رانش در DRT نسبت به BRT بسیار کمتر است. این امر منجر به افزایش طول عمر محصول[۱۲]، کاهش هزینه‌های تعمیر، نگهداری و بازدیدهای دوره ای خواهد شد.

جدول ۲. ویژگی‌های حرکتی DRT و قیاس آن با BRT و تراموا

	BRT	New Tram	DRT
منبع تأمین توان	سوخت دیزلی، گاز یا هیبرید	خط برق	باتری یا سلول هیدروژنی
حداکثر سرعت (km/h)	۸۰	۷۰	۷۰
شتاب متوسط رانش تا حداکثر سرعت (m/s^2)	۱	۰,۷	تا حدی بیش از ۱
شتاب متوسط ترمزی (m/s^2)	-۱,۵	-۱	-۱,۱

با توجه به مقادیر درج‌شده در جدول ۲، میزان جابجایی وسیله نقلیه از حالت توقف تا رسیدن به حداکثر سرعت قابل‌محاسبه است. چون شتاب حرکتی سیستم‌ها متغیر با زمان است و مقادیر ارائه‌شده بر اساس شتاب متوسط داده شده است، محاسبات این بخش بر اساس روابط شتاب متغیر با زمان مطرح خواهد شد. شتاب متوسط رانش تا حداکثر سرعت به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\bar{a} = \frac{1}{T}\int_0^T a(t)dt \qquad (۱)$$

که $\bar{a}$ نشان‌دهنده شتاب متوسط تا قبل از رسیدن به حداکثر سرعت، T زمان لازم برای رسیدن به حداکثر سرعت از لحظه شروع حرکت (مبدأ زمانی صفر)، t نشان‌دهنده متغیر لحظه‌ای زمان و $a(t)$ شتاب در لحظه t است. از طرف دیگر، برای

سرعت لحظه‌ای تا قبل از رسیدن به حداکثر سرعت رابطه زیر برقرار است:

$$v(t) = \int_0^t a(\tau)d\tau \qquad (۲)$$

که $v(t)$ سرعت در لحظه t و همچنین τ متغیر زمانی به ازای هر لحظه $\tau \le t$ بعد از شروع حرکت است. مقدار جابجایی در بازه شروع حرکت تا رسیدن به حداکثر سرعت نیز به‌صورت رابطه (۳) است:

$$x = \int_0^T v(t)dt \qquad (۳)$$

که x مقدار جابجایی از شروع حرکت تا رسیدن به حداکثر سرعت و سایر پارامترها در روابط قبلی تعریف شده‌اند. با توجه به روابط (۱) الی (۳)، مقدار جابجایی به شکل زیر خواهد شد:

$$x = \int_0^T \int_0^t a(\tau)d\tau dt = \frac{T^2\bar{a}}{2} \qquad (٤)$$

اکنون و با در نظر داشتن اینکه حداکثر سرعت در لحظه T حاصل می‌شود، رابطه (۵) را می‌توان از روابط (۱) و (۲) استخراج نمود:

$$V_{\max} = \int_0^T a(\tau)d\tau = \bar{a}T \qquad (۵)$$

که $V_{\max}$ حداکثر سرعت است و سایر پارامترها در روابط قبلی تعریف شده‌اند؛ بنابراین با در نظر داشتن روابط (٤) و (۵)، مقدار جابجایی برای رسیدن به حداکثر سرعت برابر است با:

$$x = \frac{V_{\max}^2}{2\bar{a}} \qquad (٦)$$

با در نظر داشتن رابطه (٦) و رجوع به مقادیر جدول ۲، مقدار حداکثر مسافت تا رسیدن به سقف سرعتی برای هر یک از سه ناوگان DRT، BRT و تراموا قابل‌محاسبه است (با تبدیل یکای سرعت یعنی کیلومتر بر ساعت به متر بر ثانیه).

از طرفی، با استدلال مشابه روابط (۱) الی (٦) اما برای شتاب منفی ترمزی، مقدار مسافت موردنیاز ترمز (طول خط ترمز) برای توقف کامل از حداکثر سرعت نیز قابل‌محاسبه است که این مقادیر در جدول ۳ قابل‌مشاهده است.

جدول ۳. مسافت طی شده برای شتاب‌گیری و طول خط ترمز در DRT و قیاس آن با BRT و تراموا

	BRT	New Tram	DRT
مسافت طی شده تا رسیدن به حداکثر سرعت (متر)	۲٤۷	۲٦۰	۱۹۰
طول خط ترمز (متر)	۲۳	۳۵	۲۸

۲-۱-۳ تطابق با خط

تطابق با خط و راه‌های شهری از دیگر مواردی است که باید برای هر ناوگان حمل‌ونقل شهری مدنظر قرار گیرد. یک ناوگان حمل‌ونقل در شرایطی می‌تواند به‌عنوان یک گزینه مطلوب برای جابجایی مسافرین در سطح شهر تلقی گردد که با محدودیت‌های مسیرهای درون‌شهری سازگاری داشته و از انعطاف‌پذیر موردنیاز برای تطابق با خطوط شهری نیز برخوردار باشد. لذا ناوگان DRT مدنظر این مقاله باید از نقطه نظراتی با ناوگان‌های رایج یعنی BRT و تراموا مورد مقایسه قرار گیرد. موارد و پارامترهایی که در این مقایسه‌های باید مطرح گردد در جدول ٤ قابل‌مشاهده است. همان‌طور که در این جدول قابل‌مشاهده است، ناوگان DRT موردنظر از انعطاف‌پذیری مطلوبی برای تردد در سطح شهر برخوردار است.

جدول ٤. تطابق DRT با خط و قیاس آن با BRT و تراموا

	BRT	New Tram	DRT
حداقل شعاع دور زدن (متر)	۱۵	۲۵	۲۵
حداقل عرض مسیر دوطرفه (متر)	۷	۸	۷
جهت حرکت	یک‌طرفه	دوطرفه	دوطرفه

۲-۲ زیرساخت موردنیاز، هزینه و چرخه ساخت

ازجمله عوامل تعیین‌کننده جهت استفاده و بهره‌برداری از یک ناوگان حمل‌ونقل، ملزومات و هزینه ایجاد بستر و راه و همچنین هزینه تولید، نگهداری و تعمیر وسیله نقلیه است. واضح است که یک وسیله نقلیه تنها در شرایطی می‌تواند به‌عنوان یک گزینه مطلوب برای استفاده در حمل‌ونقل شهری در نظر گرفته شود که هزینه ساخت و نگهداری آن وسیله و همچنین راه موردنیاز و ادوات کنترلی در آن مقرون‌به‌صرفه در قیاس با سایر روش‌ها باشد. ازاین‌رو در جدول ۵، ملزومات موردنیاز برای ایجاد زیرساخت لازم برای خط DRT و قیاس آن با BRT و تراموا قابل‌مشاهده است.

جدول ۵. زیرساخت‌های موردنیاز برای DRT و قیاس آن با BRT و تراموا

	BRT	New Tram	DRT
حداقل طول بستر (متر)	۲۵	٤۰	۳۰
حداقل عرض بستر (متر)	۱,۵ تا ۲	۲ تا ۲,۵	۱,۵ تا ۲
ایجاد بستر بر سطح جاده‌های کنونی	نیازی ندارد	نیازمند احداث زیرساخت ریل و خط انتقال برق	تنها نیاز به نصب مگنت‌های ارزان‌قیمت دارد
تجهیزات الکتریکی و مکانیکی اطراف بستر	نیازمند تجهیزات سیگنال و هماهنگی با درب‌های وسیله نقلیه	نیازمند تجهیزات مخابراتی، سیگنال و هماهنگی با درب‌های وسیله نقلیه	نیازمند تجهیزات سیگنال و هماهنگی با درب‌های وسیله نقلیه
چرخه ساخت	۱۰ ماه تا یک سال	۲ تا ۳ سال	۱۰ ماه تا یک سال

نکته قابل‌توجه در جدول ۵ این است که نیازمندی‌ها برای ایجاد بستر DRT تقریباً مشابه با BRT خواهد بود و مستلزم استفاده از تجهیزات الکتریکی و مکانیکی چندان فراتر از BRT نیست. تنها با افزودن خطوط نشانگر مگنت بر سطح مسیر می‌توان هدایت نیمه اتوماتیک DRT را میسر نمود. از طرفی وزن کل DRT نیز چندان بالا نبوده و با وزن به ازای محور برابر با ۷,۵ تن، نیاز به تقویت پل‌ها یا سایر زیرساخت‌های مسیر وجود ندارد؛ بنابراین، با توجه به ظرفیت حضور مسافر بیشتر در DRT نسبت به BRT، عدم نیاز به ایجاد زیرساخت گران‌قیمت برخلاف تراموا و همچنین امکان انطباق بالا با پل‌ها و شیب‌های مختلف مسیر، DRT به‌عنوان یک ناوگان بهینه و به‌صرفه می‌تواند برای به‌کارگیری در حمل‌ونقل شهری مطرح گردد. به‌عنوان‌مثال در کشور چین، هزینه ایجاد هر کیلومتر زیرساخت برای تراموای شهری در حدود بیست میلیون یورو برآورد شده است که این رقم برای ایجاد زیرساخت هر کیلومتر DRT برابر با پنج میلیون یورو و برای ایجاد زیرساخت هر کیلومتر مسیر

BRT، برابر با چهار میلیون یورو تخمین زده شده است. البته ذکر این نکته ضروری است که ناوگان DRT، با اندکی تغییرات و افزودن مگنت‌های هدایت، می‌تواند از خطوط کنونی BRT نیز استفاده نماید که این موضوع یک مزیت در قیاس با تراموا خواهد بود.

۲-۳ کیفیت سواری و آسایش مسافرین

کیفیت سواری و آسایش مسافرین از دیگر مواردی است که برای امکان‌سنجی استفاده ناوگان حمل‌ونقل شهری باید موردبررسی قرار گیرد. برای این منظور مواردی از قبیل سطح دسترسی ارتفاع وسیله نقلیه هنگام سوار یا پیاده شدن، پایدار بودن و نامحسوس بودن شتاب‌گیری، ترمز گیری و ثابت ماندن سرعت هنگام رسیدن به سقف مقدار خود، چگونگی دسترسی مسافرین به وسیله نقلیه و محل قرارگیری کابین راهبر از مواردی است که باید موردبررسی قرار گیرد. عدم رعایت استانداردهای آسایش سفر در یک ناوگان، موجب نارضایتی مسافرین و درنتیجه عدم اقبال آن‌ها برای استفاده از آن ناوگان خواهد شد. برای این منظور، مقایسه کیفیت سواری میان DRT، BRT و تراموا در جدول ٦ قابل‌مشاهده است.

جدول ٦. کیفیت سواری DRT و قیاس آن با BRT و تراموا

	BRT	New Tram	DRT
سطح ورود	لزوماً سطح پایین نیست	سطح پایین	سطح پایین
پایداری رانش و ترمز	شتاب رانش و ترمز ناپایدار و ناراحت‌کننده	شتاب رانش و ترمز پایدار	شتاب رانش و ترمز پایدار
موقعیت کابین راهبر	یک- جهته	دو- جهته	دو- جهته
سطح دسترسی شهری	سطح مسیرهای شهری	به‌صورت مجزا از مسیرهای شهری	سطح مسیرهای شهری

علاوه بر موارد مطرح‌شده در جدول فوق، تجربه بصری مسافرین داخل DRT نیز می‌تواند بسیار مطلوب باشد. در طراحی موردنظر، بیش از ۷۰ درصد سطح خارجی بدنه توسط شیشه‌های بزرگ پوشیده می‌شود که جلوه بسیار خوبی برای مسافرین می‌تواند داشته باشد. تمام ناحیه داخلی که مسافرین در آن قرار دارند، با کریدورهایی با پهنای ۱٫۳ متر به یکدیگر متصل است که فضای جابجایی مناسب و امکان انتخاب محل قرارگیری مطلوب را برای مسافرین مهیا می‌سازد. همچنین طراحی بدنه DRT به صورتی است که امکان انتخاب رنگ‌های مختلف برای آن و ایجاد تنوع ظاهری به‌سادگی میسر است.

۲-٤ مصرف انرژی و سازگاری با محیط‌زیست

یکی از عوامل مهم در انتخاب وسیله نقلیه مناسب برای ناوگان حمل‌ونقل عمومی مخصوصاً در شهرها، میزان آلایندگی، سازگاری با محیط‌زیست، مصرف انرژی و سطح نویز صوتی ایجادشده توسط وسیله نقلیه است. میزان مصرف انرژی یک وسیله نقلیه بر اساس ویژگی‌های آیرودینامیکی، وزن، نوع عملکرد و کارایی رانش آن تعیین می‌گردد. در وسایل نقلیه الکتریکی، کنترل گشتاور با تجهیزات الکترونیک قدرت صورت می‌گیرد که این امر منجر به رانش بهینه و کاهش مصرف انرژی می‌گردد. همچنین در وسایل نقلیه الکتریکی دنده‌های تک خط برای انتقال گشتاور به محورها کفایت می‌کند. این کنترل بهینه گشتاور در کنار بازده بالاتر موتورهای الکتریکی نسبت به موتورهای احتراق داخلی و دیزل، منجر به مصرف انرژی کمتر خواهد شد. از طرف دیگر، استفاده از رانش الکتریکی مزیت بهره‌مندی از تولید توان ترمز احیائی[۱۳] را به دنبال خواهد شد. در این شرایط، موتور الکتریکی DRT جهت کاهش سرعت می‌تواند در نقش یک ژنراتور الکتریکی عمل کرده و انرژی جنبشی وسیله نقلیه که سرعت آن باید کاهش یابد یا متوقف گردد، به انرژی الکتریکی تبدیل شود. بخش قابل‌توجهی از این

انرژی الکتریکی می‌تواند با استفاده از مدارات الکترونیک قدرت برای شارژ مجدد باتری‌های DRT به کار رود و بر اساس نوع مدار الکترونیک قدرت و کیفیت آن، بخش قابل‌توجهی از انرژی جنبشی در حین ترمز گیری یا حرکت DRT در مسیرهای سرازیری، مجدداً با شارژ باتری قابل‌استفاده خواهد بود. برای یک مقایسه منصفانه میان مصرف توان در DRT با BRT بدون در نظر گرفتن وزن، می‌توان از انرژی به ازای واحد وزن (ژول بر کیلوگرم) استفاده نمود. مقدار انرژی موردنیاز ورودی بر واحد وزن به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$E_I = \frac{E_P}{\eta} - E_B \qquad (۷)$$

که در آن، E_I انرژی مصرف‌شده توسط وسیله نقلیه به ازای هر کیلوگرم، E_P انرژی لازم برای ایجاد رانش به ازای هر کیلوگرم و E_B انرژی بازگشتی از ترمز احیائی به ازای هر کیلوگرم است. همچنین در این رابطه، η تلفات کلی سیستم که برای سیستم رانش الکتریکی DRT حاصل‌ضرب بازده موتور، بازده اینورتر، تلفات دنده و رانشگر[۱۴] انتقال توان از موتور به محورها است؛ اما این تلفات برای موتور دیزلی BRT، برابر با حاصل‌ضرب بازده موتور در ضریب تلفات جعبه‌دنده و انتقال توان رانشگر به محورها است. مقدار E_P علاوه بر گشتاور موتور و سرعت حرکت، تابعی از مسافت طی شده بعد از شروع رانش و قبل از شروع ترمز گیری نیز خواهد بود که خود بر اساس فاصله بین دو ایستگاه و طول خط ترمز تعیین می‌گردد. با فرض ثابت ماندن سرعت پس از پایان شتاب‌گیری و استفاده موتور از حداکثر توان، رابطه میان E_B و E_P به‌صورت زیر خواهد بود:

$$E_B = \frac{b}{d-b} E_P \qquad (۸)$$

که در رابط فوق، d متوسط فاصله ایستگاه‌های مجاور برحسب متر و b مقدار طولی از خط ترمز که در آن از ترمز احیائی استفاده می‌شود. متوسط فاصله میان ایستگاه‌ها در خطوط اتوبوس‌رانی تهران حدود ۶۸۰ متر است؛ و با رجوع به جدول شماره ۳ که میزان خط ترمز DRT برابر با ۲۸ متر است، می‌توان گفت که حدود ٤ درصد از انرژی قابل بازیافت توسط ترمز احیائی خواهد بود.

از طرفی دیگر با رجوع به رابطه (۷)، با توجه به تجربه شرکت واگن‌سازی تهران در استفاده از اینورترهای الکترونیک قدرت با بهره بسیار بالا (نزدیک به ۹۸ درصد)، موتورهای الکتریکی با بهره مطلوب (بالای ۹٤ درصد) و در نظر گرفتن تلفات اندک دنده، مقدار η برای سیستم DRT مدنظر واگن‌سازی تهران را می‌توان تا حد ۹۰ درصد در نظر گرفت؛ بنابراین می‌توان گفت که در یک سیستم DRT، به ازای هر یک ژول انرژی بر واحد وزن موردنیاز رانش، مقدار انرژی الکتریکی مصرفی بر واحد وزن در حد ۱٫۰۷ ژول بر کیلوگرم خواهد بود. این در حالی است که بازده موتورهای دیزلی مورداستفاده در BRT در بهترین شرایط، رقمی در حد ۵۰ تا ۵۵ درصد است و از طرفی دیگر تلفات جعبه‌دنده با توجه به نیاز به گیربکس‌های چند سرعته در رانشگرهای دیزلی رقمی در حدود ۷۵ تا ۸۵ درصد است که حاصل‌ضرب این دو رقم در حد ٤۷ درصد خواهد بود. با در نظر گرفتن رابطه (۷) و با توجه به صفر بودن توان احیائی در سیستم‌های BRT (صفر بودن E_B در سیستم‌های رانش احتراقی)، می‌توان گفت که به ازای هر یک ژول انرژی بر واحد وزن موردنیاز رانش، مقدار انرژی مصرفی بر واحد وزن که حاصل از سوختن گازوئیل است، در حد ۲٫۱۳ تا ۲٫٦٦ ژول بر کیلوگرم خواهد بود که این مقدار حدوداً ۲ تا ۲٫۵ برابر بیشتر از DRT است. افزون بر این، با توجه به طراحی فضای داخلی DRT، ظرفیت مسافر DRT نسبت به وزن خالص از BRT بیشتر خواهد بود که این موضوع، درنهایت منجر به کاهش چشمگیر میزان انرژی مصرفی DRT به نسبت هر مسافر در قیاس با BRT خواهد شد.

در کنار کاهش مصرف انرژی به ازای هر مسافر در سیستم DRT، استفاده از انرژی الکتریکی برای رانش به‌منزله عدم سوزاندن سوخت‌های فسیلی در داخل شهرها در این ناوگان است بنابراین DRT به‌عنوان یک روش حمل‌ونقل سبز بدون

ایجاد آلایندگی در شهر تلقی می‌گردد. همچنین، نویز صوتی موتورهای الکتریکی بسیار کمتر از موتورهای دیزلی بوده و آلودگی صوتی ناشی از ناوگان DRT تا حد چشمگیری کمتر از BRT خواهد بود که این موضوع به‌منزله آسایش بیشتر برای ساکنین و مجاورین خطوط حمل‌ونقل و کیفیت سفر بهتر برای مسافرین است.

برای جمع‌بندی مباحث مطرح‌شده در این بخش، مقایسه میان DRT، تراموا و BRT در جدول ۷ قابل‌مشاهده است.

جدول ۷. مصرف انرژی، آلایندگی و سازگاری با محیط‌زیست

	BRT	New Tram	DRT
انرژی مصرفی واحد (کیلوژول بر نفر-کیلومتر)	۷۲۰ تا ۱۰۸۰	۱۸۰ تا ۳۶۰	۷۲ تا ۲۸۸
میزان دی‌اکسید کربن تولیدی	۱۵ گرم بر نفر- کیلومتر	صفر	صفر
سطح نویز صوتی (دسی‌بل)	۷۵	حدود ۷۰	کمتر از ۷۰
سازگاری با محیط‌زیست	سازگاری پایین	سازگاری بالا	سازگاری بالا

در پایان این قسمت، ذکر این نکته ضروری است که ایجاد زیرساخت برای شارژ باتری‌های الکتریکی DRT امری ضروری است. هر کیلومتر جابجایی با حداکثر ظرفیت در سسیتم‌های DRT، حدوداً نیازمند سی هزار کیلوژول انرژی خواهد بود که معادل ۸٫۳ کیلووات ساعت است. از طرفی هر کیلوگرم از باتری‌های لیتیوم-یون رایج در صنعت خودروهای برقی عموماً دارای ظرفیت ۰٫۲ کیلووات ساعت هستند. لذا هر کیلومتر رانش در DRT نیازمند ٤١ کیلوگرم باتری است که با توجه به طراحی نقشه‌ها و جانمایی باتری‌ها در زیر بدنه برای یک سیستم DRT در شرکت واگن‌سازی تهران، امکان استفاده از ۵ تن باتری وجود دارد که رانش ۱۲۰ کیلومتری با هر بار شارژ ۷ ساعته را مهیا می کند. با توجه به این موضع، تعبیه ایستگاه‌های شارژ باتری تنها در پایانه‌های ابتدا و انتهای هر مسیر موردنیاز است و لزومی بر تعبیه ایستگاه شارژ در میانه مسیر وجود نخواهد داشت.

۳. نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک ناوگان حمل‌ونقل شهری نوین بر مبنای رانش الکتریکی و کنترل نیمه‌خودکار با نام DRT معرفی گردید که به لحاظ ظرفیت، وزن و سطح دسترسی، هم‌ردیف با ناوگان BRT و تراموا است. شرکت واگن‌سازی تهران با بهره‌گیری از تجربه و دانش بالا در طراحی سیستم‌های رانش الکتریکی و کنترل خودکار، امکان‌سنجی استفاده از ناوگان DRT در ترافیک شهری را مطالعه نموده که در این مقاله، مزایا و قابلیت‌های DRT در قیاس با BRT و تراموا مطرح و از چندین نقطه‌نظر فنی، مهندسی و شهری موردمطالعه قرار گرفت. نتایج این مطالعات بر اساس این نقطه نظرات به‌صورت زیر ارائه شده است:

۱- ابعاد DRT در حد BRT و تراموای شهری است و قابلیت انعطاف مناسبی برای استفاده در سطح خیابان‌های شهری را دارا است، درعین‌حال طراحی داخلی آن به نحوی است که ظرفیت این ناوگان (با مسافرین ایستاده) بهتر از BRT و تقریباً مشابه تراموا است.

۲- عملکرد رانش، شتاب‌گیری و ترمز گیری در DRT بسیار پایدارتر از BRT بوده و آسایش بهتری برای مسافرین خواهد داشت. از طرفی دسترسی شهری در DRT مشابه با BRT بوده و حتی سطح دسترسی آن می‌تواند بهتر نیز باشد. این امر در کنار پایداری رانش و ترمز و طراحی فضای داخلی، برای مسافرین DRT تجربه سفر راحت‌تری در قیاس با BRT را فراهم می‌کند. ذکر این نکته ضروری است که امکان دسترسی به خطوط تراموا برای شهروندان سخت‌تر از دو ناوگان DRT و BRT است.

۳- تطابق با امکانات و سطح کیفیت راه‌های درون‌شهری از قبیل عرض مسیر و امکان تغییر مسیر برای DRT به‌خوبی میسر است و تفاوت چندانی با BRT ندارد. با ایجاد خطوط مگنت هدایت بر بستر مسیرهای کنونی امکان هدایت نیمه‌خودکار DRT به‌سادگی و با هزینه‌ای پایین میسر می‌گردد و به دلیل استفاده از باتری داخل وسیله نقلیه، نیازمند ایجاد خط انتقال توان الکتریکی نیست. این موارد برخلاف نیازمندی‌های تراموا است که زیرساخت ایجاد آن پرهزینه تلقی می‌گردد.

۴- به دلیل استفاده از موتورهای الکتریکی با بازده بالا در قیاس با موتورهای دیزلی BRT و عدم نیاز به جعبه‌دنده و همچنین امکان استفاده از ترمز احیائی، مصرف انرژی رانش DRT بر واحد مسافر در هر کیلومتر نسبت به BRT بسیار مطلوب‌تر است. همچنین آلایندگی سوخت در DRT موضوعیت نداشته و نویز صوتی آن نیز در قیاس با BRT بسیار کمتر است که سازگاری بهتر با محیط‌زیست را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج فوق، می‌توان گفت که استفاده از DRT مزایای بسیاری را که یک ناوگان با رانش الکتریکی می‌تواند داشته باشد در قیاس با BRT مهیا می‌سازد و درعین‌حال، انعطاف‌پذیری شهری بهتر و هزینه ایجاد زیرساخت پایین‌تر از سایر ناوگان الکتریکی نظیر تراموا را نیز با خود به همراه دارد. همچنین بر اساس فناوری باتری‌های الکتریکی لیتیوم-یون که اکنون به‌وفور در صنعت خودروسازی الکتریکی در جهان مورداستفاده قرار می‌گیرند، قابلیت پیمایش مسافت‌های درون‌شهری توسط DRT به شکل مطلوب قابل‌اجرا است و با ایجاد ایستگاه‌های شارژ باتری در ابتدا و انتهای مسیرهای شهری (و نه در تمامی نقاط)، امکان شارژ مناسب سیستم‌های DRT وجود دارد. لذا امکان بهره‌وری از DRT بدون نیاز به هزینه‌های سنگین ایجاد زیرساخت جهت ایجاد یک ناوگان بهینه، با آسایش و سازگار با محیط میسر خواهد بود و استفاده از این ناوگان می‌تواند به‌عنوان یک گزینه مطلوب در بهبود ترافیک شهری مطرح گردد.

٤. پی‌نوشت‌ها

1. Bus Rapid Transit
2. Light Rail Transit
3. Tram
4. Automatic Train Operation
5. Digital-rail Rapid Transit
6. Articulated part
7. Gangway
8. Low-floor vehicle
9. Direct Current
10. Inverter
11. Alternating Current
12. Service life
13. Regenerative braking
14. Drivetrain

۵. مراجع

– مهدوی، ا.، مبین، م.، تقی‌زاده، ی. و کهندانی تفرشی، ع.، تعیین خطوط مناسب برای به‌کارگیری اتوبوس برقی باتری با شبیه سازی میزان مصرف انرژی و مدل درخت تصمیم مطالعه موردی خطوط اتوبوس‌رانی تهران، اسفند ۱۳۹۸، هجدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی حمل‌ونقل و ترافیک، تهران، صفحات ۵۱-۶۲.

– دوزندگان، م.، حسینی، و.، ملک‌لو، س.، ضرایب انتشار آلایندگی اتوبوس‌های مجهز به فیلتر جاذب دوده غیرکاتالیستی، بهمن ۱۳۹۶، ششمین همایش مدیریت آلودگی هوا و صدا، تهران.

– پوراسکندری، ح.، ارجمند، ع.، ملک‌محمدی، ج.، حمل‌ونقل عمومی اتوبوسرانی تندرو (BRT) و معیارهای مؤثر در طراحی سامانه ترافیکی آن، اسفند ۱٤۰۰، ششمین کنفرانس بین‌المللی پژوهش در علوم و مهندسی و سومین کنگره بین‌المللی عمران، معماری و شهرسازی آسیا، صفحات ۱ تا ۱۲.

– جمع‌بندی شرکت واحد اتوبوس‌رانی تهران ارائه‌شده در خبرگزاری تسنیم، مشاهده‌شده در دی‌ماه ۱۴۰۱ در آدرس اینترنتی:

https://www.tasnimnews.com/fa/news/1398/11/30/2205197

– حسنی، ف.، قربانی، م.، بررسی اثرات جانبی بهداشتی و زیست‌محیطی جایگزینی اتوبوس‌های برقی با دیزلی در شهر تهران، ۱۳۹۸، هجدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی حمل‌ونقل و ترافیک، تهران.

– خبرگزاری شینهوا چین، مشاهده‌شده در دی‌ماه ۱۴۰۱ در آدرس اینترنتی زیر:

https://www.shine.cn/news/nation/1710245364/

– گزارش بانک توسعه آسیایی در سال ۲۰۰۹، مشاهده‌شده در دی‌ماه ۱۴۰۱ در آدرس اینترنتی زیر:

https://www.adb.org/sites/default/files/publication/27836/bus-rapid-transit-prc.pdf

– مشاهده‌شده در دی‌ماه ۱۴۰۱ در روزنامه همشهری به آدرس اینترنتی زیر:

https://www.hamshahrionline.ir/news/240582

– Current Sustainable/Renewable Energy Reports, September 2021, Electrification of Medium- and Heavy-Duty Ground Transportation: Status Report, Vol. 8, Springer.

– W. Zeyu, X. Jur, F. Tian, and L. Ji, October 2018, Duration and Travel Time Impacts of Incidents, Study on direct torque control system of three-level inverter permanent magnet synchronous motor, IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Pages 1752-1756.

– Urban Rail Transit, March 2022, A. Technical Comparison of Commercially Available Trams and Review of Standardization Frame and Design Principles, Vol. 8, Springer.

– Journal of the Air & Waste Management Association, October 2011, Modeling Transit Bus Fuel Consumption on the Basis of Cycle Properties, Vol. 64, Taylor & Francis Publications.

– R. Sepe, K. Waterman, J. Tudino and P. H. Smith, September 2018, Lithium Ion Battery / Lithium Ion Capacitor Hybrid Portable Energy Storage Device for Pulsed Power Applications, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Pages 7055-7062.

Technical Analysis and Review of Smart Electrical-Based DRT and its Comparison with BRT and Tram

Nader Sanandaji*, PhD, Electrical Engineering Expert, Department of Research & Development, Tehran Wagon Manufacturing Co., Tehran, Iran
Hamed DabbaghZadeh, MSc, Head of Electrical Engineering Section, Department of Research & Development, Tehran Wagon Manufacturing Co., Tehran, Iran

E-mail: sanandaji@elec.iust.ac.ir

Abstract

Bus Rapid Transit (BRT) plays a major role in public transportation in the metropolis. However, the high-polluting diesel engines of such systems suffer from low efficiency and short life cycle. On the other hand, it is difficult to expand the electric railway routes and their expensive infrastructure in urban areas. With recent development in the design and manufacture of battery or hydrogen-based electrical traction motors, a state-of-the-art transit system named Digital-rail Rapid Transit (DRT) has emerged in advanced countries which has a high flexibility of use while benefits from the advantages of electric traction motors, that are high-efficiency consumption of green energy and semi-automatic operation. Considering the scientific and technical experiences of Tehran Wagon Manufacturing Company in design and assembly of electric propulsion and control, the possibility of the employment of DRT systems in urban transportation besides the relevant comparison with similar BRT and tram systems are proposed in this paper. The results of this paper show that DRT offers various advantages in comparison with BRT while its required infrastructures are far less expensive than tram and other light-rail vehicles.

Keywords: Urban Public Transportation, Digital-rail Rapid Transit (DRT), Bus Rapid Transit (BRT), Tram, Electric propulsion, Semi-Automatic Operation