

بهینه‌سازی مصرف سوخت قطار دیزل-الکتریک با استفاده از کنترل فازی آینده‌نگر

محمد سعادت*، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

محسن اصفهانیان، دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

سعید بهبهانی، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: msaadat@mecheng.iut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۴/۰۸/۰۶ - پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۱۵

چکیده

قطارهای دیزل-الکتریک یکی از مهمترین ارکان صنعت حمل و نقل محسوب می‌شوند و بخش قابل توجهی از مصرف سوخت را به خود اختصاص می‌دهند. یکی از عوامل موثر در میزان مصرف سوخت این وسیله نقلیه، نحوه شتاب‌گیری و ترمزگیری یا به عبارت دیگر، منحنی تغییرات سرعت قطار با زمان می‌باشد. هر چند روش‌های عددی موجود در محاسبه منحنی بهینه سرعت، نتایج قابل قبولی را بدست می‌دهند، ولیکن استفاده از این روش‌ها در انجام محاسبات، امری بسیار زمانبر خواهد بود. به منظور کاهش زمان محاسبات، استفاده از منطق فازی به عنوان یک روش کارآمد مورد توجه واقع شده است. در مقاله حاضر رویکرد کنترل فازی آینده‌نگر جهت بهبود مصرف سوخت قطار دیزل-الکتریک به کار گرفته شده است. یک کنترل کننده فازی با در نظر گرفتن شیب مسیر پیش‌رو، برای تغییرات سرعت تصمیم‌گیری می‌نماید. بدین ترتیب یک منحنی تغییرات نزدیک به منحنی تغییرات سرعت بهینه بدست خواهد آمد. مضافاً با آنالیز حساسیت پارامترهای کنترل آینده‌نگر پیاده‌سازی شده، عملکرد الگوریتم کنترل بهبود داده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در صورت پیاده‌سازی الگوریتم توسعه داده شده، مصرف سوخت قطار به میزان ۲/۷ درصد کاهش خواهد یافت.

واژه‌های کلیدی: مصرف سوخت، قطار دیزل-الکتریک، کنترل فازی آینده‌نگر

۱- مقدمه

در میزان مصرف سوخت مورد بررسی قرار نگرفته است. در حال حاضر راننده بر اساس تجربه خود اقدام به شتاب‌گیری و ترمز می‌نماید که لزوماً به لحاظ مصرف سوخت، بهینه نیست. یک رویکرد جدید در حوزه بهسازی مصرف سوخت وسایل نقلیه جاده‌ای، روش کنترل آینده‌نگر^۱ می‌باشد. منطق اصلی این روش، استفاده از اطلاعات مسیر پیش‌رو (از قبیل شیب جاده، پیچ و قوس جاده، اطلاعات ترافیکی و ...) در تصمیم‌گیری‌های کنترلی برای شتاب‌گیری و ترمز می‌باشد. در رویکرد آینده‌نگر قسمتی از مسافت مسیر پیش‌رو به عنوان "پنجره آینده‌نگری" انتخاب شده و از مشخصات مسیر داخل این پنجره میانگین گرفته می‌شود. این مقادیر میانگین بیانگر

با توجه به افزایش روزافزون مصرف انرژی و هزینه‌های ناشی از آن، تمامی صنایع در جهت کاهش مصرف انرژی و افزایش بازده تلاش می‌کنند. صنعت حمل و نقل به‌عنوان یکی از پر مصرف‌ترین صنایع در این زمینه حائز اهمیت است. با توجه به سهم عمده حمل و نقل ریلی در جایجایی کالا و مسافر، کاهش مصرف سوخت در این حوزه می‌تواند از جنبه اقتصادی و زیست‌محیطی مهم باشد. مسائل بسیاری در میزان مصرف سوخت در لوکوموتیو تاثیرگذار است، که از جمله آنها می‌توان به میزان نیروی درگ وارده بر قطار، کیفیت چرخ و ریل، بازده اجزای داخلی لوکوموتیو و نحوه رانندگی اشاره نمود. مروری بر ادبیات موضوع نشان می‌دهد که تاثیر عملکرد راننده

۲- مرور روش‌های کنترل بهینه قطار

طیف وسیعی از روش‌های عددی جهت ارایه الگوریتم‌های کنترل بهینه قطار و کاهش مصرف انرژی به‌کار گرفته شده است (Khmelnitsky, 2000). در این راستا، منحنی سرعت بهینه و فرموله کردن آن برای حرکت قطار روی مسیر بدون شیب و فراز به‌وسیله اصل ماکزیمم و تحلیل تابعی برای اولین بار توسط هولت ثابت شد (Howlett, 1990). نقطه ضعف پژوهش انجام شده توسط وی، عدم لحاظ نمودن شیب و فراز مسیر و محدودیت سرعت در محاسبات بود. به منظور رفع این مشکل، در ادامه مساله در حالت بدون شیب و فراز با در نظر گرفتن محدودیت سرعت بررسی شد (Howlett & Pudney, 1994). هانسن پروفیل انرژی بهینه برای حرکت قطار از یک ایستگاه تا ایستگاه بعدی و روی مسیر بدون شیب و فراز را تشریح نمود (Hansen, 2008). وی چهار فاز، شتاب‌گیری تا سرعت ماکزیمم، حفظ سرعت ثابت، حرکت بدون نیروی محرک و در نهایت ترمز را به عنوان بخش‌های اصلی پروفیل انرژی بهینه ارایه نمود. هولت و پادنی نشان دادند که استفاده از الگوریتم‌های بهینه می‌تواند تا ۱۳ درصد مصرف سوخت را کاهش دهد (Pudney & Howlett, 1995). هولت در ادامه مطالعات خود حرکت قطار روی مسیر با تابع شیب و فراز پله‌ای را بررسی نمود و مجموعه‌ای از معادلات کلیدی را با استفاده از معادلات کان-تاکر ارایه داد (Howlett, 1996). وی همچنین نشان داد که با برقرار بودن معادلات فوق‌الذکر، بایستی نسبت دنده قطار تعویض شود تا پروفیل بهینه سرعت حاصل گردد. در ادامه معادلات کان-تاکر برای مسیری که شیب و فراز آن به صورت پیوسته تغییر می‌کند نیز تعمیم داده شد (Cheng & Howlett, 1997).

مساله بهسازی مصرف سوخت برای هر قطعه شیب و فراز مسیر به‌صورت مینیمم‌سازی محلی مصرف سوخت با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی حل شد و در آن بهترین نقطه‌ای که بایستی قبل از یک فراز سرعت را افزایش داد به‌دست آمد (Howlett, Pudney, Vu, 2009). در مطالعه دیگری روش اصل ماکزیمم جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی در خطوط مترو مورد استفاده قرار گرفت (Khmelnitsky, 2000).

روش آینده‌نگر به عنوان یک ابزار موثر در کاهش مصرف سوخت کامیون توسط هلسترم استفاده شد که در آن از برنامه‌ریزی پویا در حل مساله بهینه‌سازی استفاده نمود

مشخصات مسیر پیش‌رو خواهد بود. شروع پنجره آینده‌نگری در فاصله مشخصی از مکان فعلی و سیله‌نقلیه قرار دارد، که این فاصله به‌عنوان بازه اعمال فرامین کنترلی قبلی شناخته می‌شود. در واقع یک بخش آینده‌نگری اطلاعات مسیر پیش‌رو را استخراج کرده و به بخش کنترلی ارسال می‌نماید. بخش کنترلی می‌تواند با استفاده از این اطلاعات، بر مبنای تئوری‌های مختلف کنترلی عمل نماید.

تاکنون رویکرد آینده‌نگر در حوزه حمل و نقل ریلی به کار گرفته نشده است و لذا با توجه به نقش مشهود این رویکرد در بهینه‌سازی مصرف انرژی در حوزه‌های مشابه، عملکرد مثبت آن در حوزه حمل و نقل ریلی قابل انتظار است. بنابراین اولین سهم علمی مقاله حاضر را می‌توان بکارگیری رویکرد کنترل آینده‌نگر در جهت کاهش مصرف سوخت قطارهای دیزل-الکتریک و نشان دادن اهمیت اقتصادی آن دانست. این الگوریتم نه‌تنها برای پیاده‌سازی عملی در وسایل کمکی راننده قطار در داخل کابین، بلکه برای آموزش رانندگان قطار نیز قابل استفاده است.

در تحقیقات موجود که رویکرد کنترل آینده‌نگر را استفاده نموده‌اند، با توجه به مساله مورد نظر خود مشخصات پنجره آینده‌نگری شامل طول پنجره و طول بازه اعمال فرامین کنترلی قبلی را اعداد ثابتی در نظر گرفته‌اند. درحالی‌که این پارامترها باید تحت تاثیر عواملی از قبیل سرعت لحظه‌ای و سیله‌نقلیه و ... انتخاب شوند و به صورت دینامیک تغییر یابند. با توجه به اینکه تحقیقات موجود در زمینه کنترل آینده‌نگر در مراحل اولیه خود می‌باشد، این تحقیقات روی ساختار داخلی بخش آینده‌نگر و پارامترهای موثر آن بحث نکرده‌اند. بنابراین دومین سهم علمی مقاله حاضر را می‌توان نشان دادن اهمیت تنظیم پارامترهای داخلی رویکرد کنترل آینده‌نگر در جهت کاهش مصرف سوخت دانست.

به منظور پیاده‌سازی الگوریتم کنترل آینده‌نگر، پس از مرور ادبیات موضوع و بحث و بررسی ساختار الگوریتم، مدل دینامیکی حرکت قطار جهت شبیه‌سازی ارایه شده است. جهت بیان صورت مساله بهینه‌سازی مصرف سوخت و زمان سفر، تابع هزینه مناسب معرفی شده است و الگوریتم کنترل آینده‌نگر در یک مثال عددی بکار گرفته شده است. نتایج حاصل از آن با نتایج حاصل از کنترل PID مقایسه و عملکرد الگوریتم پیشنهادی با تنظیم پارامترهای پنجره آینده‌نگری بهینه‌سازی شد.

آینده‌نگر طراحی شد. مطابق آنچه که در شکل ۱ نشان داده شده است، کنترل آینده‌نگر، یک طرح کنترلی پیش‌بینی‌کننده است که با توجه به تغییرات شیب و فراز مسیر پیش‌روی وسیله‌نقلیه، عملیات شتابگیری و ترمز آن را کنترل می‌نماید. کنترل آینده‌نگر را می‌توان به دو بخش آینده‌نگری و کنترل‌کننده فازی تقسیم نمود.

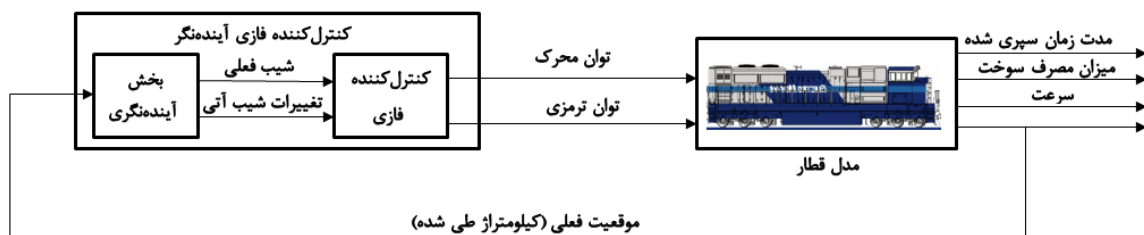
در بخش آینده‌نگری (شکل ۲)، پایگاه اطلاعات شیب و فراز مسیر بایستی در اختیار باشد. این پایگاه اطلاعات در مسیرهای ریلی، به صورت مجموعه اطلاعات کیلومترآژ شروع و پایان هر قطعه همراه با شیب یا فراز مختص آن ارایه می‌شود. وظیفه بخش آینده‌نگری، استخراج شیب مسیر پیش‌رو بر اساس موقعیت فعلی می‌باشد. مطابق شکل ۲ برای این کار یک پنجره آینده‌نگری در نظر گرفته می‌شود، و با دانستن موقعیت فعلی، مسافتی برای بازه اعمال فرامین کنترلی قبلی در نظر گرفته می‌شود. سپس مسافتی به عنوان پنجره آینده‌نگری لحاظ شده و از اطلاعات این پنجره میانگین گرفته و مقادیر میانگین به عنوان اطلاعات مسیر پیش‌رو به بخش کنترل فازی ارسال می‌شود.

(Hellström et al., 2009).

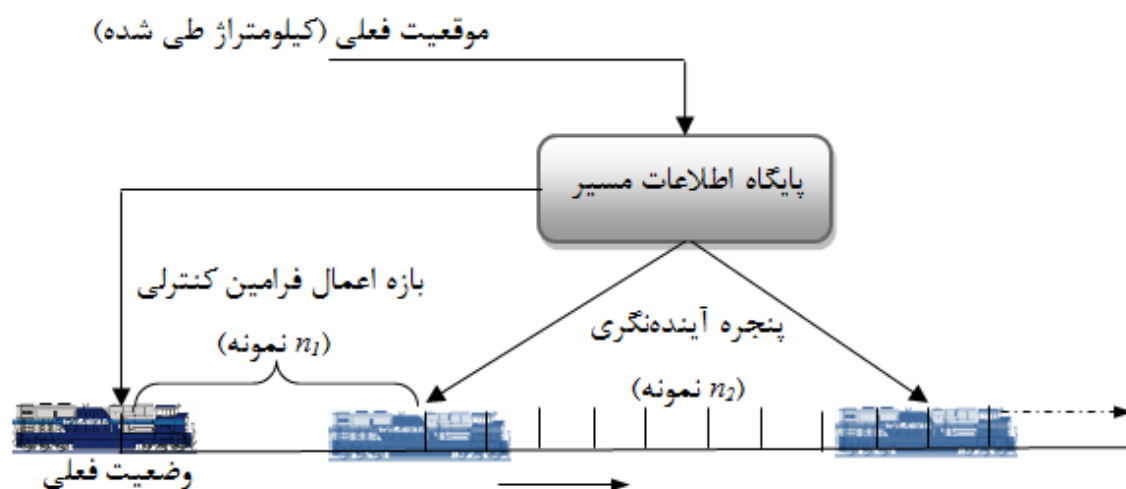
هر چند روش‌های عددی معرفی شده نتایج قابل قبولی را ارایه می‌دهند، ولیکن به دلیل دقت مورد نیاز در گسسته‌سازی مساله، استفاده از این روش‌ها، یک فرایند زمان‌بر و پرهزینه بوده و عملاً در برنامه‌های کامپیوتری داخل کابین قابل استفاده نیستند. روش آینده‌نگر فازی توسط گنجی و همکارانش به عنوان یک روش سریع در بهینه‌سازی مصرف انرژی خودروهایی سواری هیبرید استفاده شد (Ganji, Kouzani, Hessami, 2011). نتایج مطالعه انجام شده، منجر به صرفه‌جویی ۲,۶ درصدی در مصرف سوخت خودرو گردید. خیام و همکارانش از این رویکرد جهت بهینه‌سازی سیستم تهویه خودرو استفاده نمودند (Khayyam (et al.), 2011). نتایج ارایه شده، کارایی قابل توجهی از بکار بستن این روش در صنعت حمل و نقل جاده‌ای را نشان داد.

۳- طراحی کنترل‌کننده فازی آینده‌نگر قطار

جهت بهبود مصرف سوخت قطار، یک کنترل‌کننده فازی



شکل ۱. ساختار کلی کنترل‌کننده آینده‌نگر



شکل ۲. بخش آینده‌نگری

قانون ۸: اگر تغییر شیب منفی متوسط و شیب فعلی منفی است آنگاه تغییر توان ترمزی مثبت متوسط باشد.

قانون ۹: اگر تغییر شیب منفی بزرگ و شیب فعلی منفی است آنگاه تغییر توان ترمزی مثبت بزرگ باشد.

۴- مدل قطار

با توجه به اینکه شیب مسیر حرکت قطار به عنوان تابعی از موقعیت بیان می‌شود، معادله حرکت بر حسب متغیر مستقل x فرمول‌بندی می‌شود. با فرض جرم نقطه‌ای برای قطار می‌توان معادله دینامیکی حرکت قطار را مطابق معادله ۲ بیان نمود.

$$v \dot{v} = \frac{p}{v} - q - r(v) + g(x) \quad (2)$$

که در آن v سرعت حرکت قطار، p توان محرک به ازای واحد جرم، q نیروی ترمز به ازای واحد جرم، r نیروی مقاوم اصطکاک به ازای واحد جرم و g مولفه شتاب گرانش در جهت مسیر حرکت می‌باشد. توان محرک و نیروی ترمز دارای قیود حدی می‌باشند به عبارت دیگر $0 < p < P$ و $0 < q < Q$. P و Q ماکزیمم نیروی ترمز به ازای واحد جرم است. زمان سپری شده (t) ضمن طی مسافت X مطابق معادله ۳ محاسبه می‌شود.

$$t(x) = \int_0^x \frac{1}{v} dx \quad (3)$$

نیروی مقاوم حرکت قطار $r(v)$ بر اساس رابطه دیویس به صورت معادله (۴) در نظر گرفته می‌شود.

$$r(v) = a + bv + cv^2 \quad (4)$$

که در آن a و b و c ضرایب ثابتی هستند که به شکل دماغه قطار و ... بستگی دارند و به صورت تجربی به دست می‌آیند.

۵- تابع هزینه مساله بهینه‌سازی

حالت ایده آل در بهینه‌سازی سیر قطار، این است که سفر در کمترین زمان و با کمترین مقدار مصرف سوخت انجام شود، ولیکن این دو پارامتر عموماً عکس یکدیگر عمل می‌کنند. به عبارت دیگر کاهش مصرف سوخت ممکن است سبب افزایش زمان سفر شود. به منظور ارزیابی عملکرد روش‌های مختلف در بهینه‌سازی سیر قطار، عموماً سه تابع هزینه شامل تابع هزینه زمان، تابع هزینه مصرف سوخت و تابع هزینه ترکیب زمان و مصرف سوخت را می‌توان به کار گرفت. تابع هزینه زمان که همان مدت زمان سپری شده سفر می‌باشد و در معادله (۳) بیان

در پنجره آینده‌گری، مسیر به صورت مجموعه‌ای از نقاط گسسته فرض می‌شود که اطلاعات آنها در پایگاه اطلاعات مسیر موجود می‌باشد. اگر بازه اعمال فرامین کنترلی قبلی n_1 نمونه و طول پنجره آینده‌نگری n_2 نمونه در نظر گرفته شود، می‌توان شیب مسیر پیش‌رو را به صورت رابطه شماره ۱ بیان نمود.

$$(1) \quad \text{شیب مسیر پیش‌رو} = \frac{\sum_{k=n_1}^{n_1+n_2} (\text{اطلاعات نمونه برداری شده})}{n_2}$$

بخش دوم الگوریتم کنترل فازی آینده‌نگر، کنترل‌کننده فازی است. این بخش در واقع نقش تصمیم‌گیرنده را در الگوریتم کنترلی برعهده دارد. اطلاعات استخراج شده شیب و فراز مسیر پیش‌رو به کنترل‌کننده فازی وارد می‌شود که در آن بر مبنای قوانین فازی حاصل از تجربه مشخص، در خصوص تغییرات سرعت (و یا در حقیقت برای توان محرک و ترمز) تصمیم‌گیری می‌شود. تجربیات عملی یک راننده قطار در قالب دو گزاره کلی مبنای استخراج پایگاه قوانین فازی قرار گرفت. تجربه راننده در کاهش سرعت، طی یک مسیر سربالایی به عنوان گزاره اول و افزایش سرعت در مسیر سرپایینی به عنوان گزاره دوم در نظر گرفته شد.

کنترل‌کننده فازی طراحی شده دارای دو متغیر ورودی شامل شیب (فراز) فعلی و تغییرات آن و دو متغیر خروجی شامل توان محرک و توان ترمز می‌باشد. برای متغیرها از پنج تابع عضویت مثلثی شکل استفاده شد که عبارتند از: منفی بزرگ (nb)، منفی متوسط (nm)، صفر ($zero$)، مثبت متوسط (pm) و مثبت بزرگ (pb). پایگاه قوانین فازی در ادامه بیان شده است.

قانون ۱: اگر تغییر شیب صفر است آنگاه تغییر توان محرک صفر و تغییر توان ترمزی صفر باشد.

قانون ۲: اگر تغییر شیب مثبت متوسط و شیب فعلی مثبت است آنگاه تغییر توان محرک مثبت متوسط باشد.

قانون ۳: اگر تغییر شیب مثبت بزرگ و شیب فعلی مثبت است آنگاه تغییر توان محرک مثبت بزرگ باشد.

قانون ۴: اگر تغییر شیب مثبت متوسط و شیب فعلی منفی است آنگاه تغییر توان ترمزی منفی متوسط باشد.

قانون ۵: اگر تغییر شیب مثبت بزرگ و شیب فعلی منفی است آنگاه تغییر توان ترمزی منفی بزرگ باشد.

قانون ۶: اگر تغییر شیب منفی متوسط و شیب فعلی مثبت است آنگاه تغییر توان محرک منفی متوسط باشد.

قانون ۷: اگر تغییر شیب منفی بزرگ و شیب فعلی مثبت است آنگاه تغییر توان محرک منفی بزرگ باشد.

پارامتر ۲۰۰ برابر و سپس ۱۷ واحد افزایش یافته است. در ابتدا رفتار یک راننده قطار با یک کنترل کننده PID که قصد حفظ سرعت 20m/s را دارد شبیه سازی شد. پروفیل سرعت بدست آمده مطابق **Error! Reference source not found.** (با علائم +) می باشد و مقادیر سه تابع هزینه آن عبارتند از $t=322.4$ و $J_f=236.3$ و $J=0.7953$.

در گام بعد کنترل کننده فازی آینده نگر شبیه سازی شد. یک پنجره آینده نگری به طول ۱۰۰ متر ($n_2=10$) در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که شروع پنجره آینده نگری نیز در فاصله ۱۰۰ متری ($n_1=10$) از نقطه فعلی قطار لحاظ گردید. نتایج شبیه سازی با کنترل کننده فازی آینده نگر در **Error! Reference source not found.** و به صورت خط چین نشان داده شده است و مقادیر تابع هزینه عبارتند از $t=322.1$ و $J_f=231.7$ و $J=0.7163$. مشاهده می شود که با استفاده از رویکرد آینده نگر هر سه تابع هزینه نسبت به راننده عادی بهبود داشته است.

۷- آنالیز حساسیت پارامترهای بخش

آینده نگری

در گام بعد سعی شد تا ساختار داخلی کنترل آینده نگر یعنی دو پارامتر طول پنجره آینده نگری (n_2) و فاصله شروع پنجره تا نقطه فعلی (n_1) بهینه شود. با بررسی اولیه می توان چنین تحلیل کرد که هرچه سرعت لحظه ای حرکت بیشتر باشد، بایستی n_1 بزرگتر باشد و پنجره آینده نگری در فاصله بیشتری از موقعیت فعلی شروع شود تا فرامین کنترلی قبلی بر پنجره آینده نگری تاثیرگذار نباشد و بتوان ادعا کرد که تاثیر تصمیم کنترلی جدید در نقاط اولیه پنجره آشکار خواهد شد. همچنین هرچه واریانس اطلاعات نمونه های پنجره آینده نگری بیشتر باشد، بایستی n_2 کوچکتر در نظر گرفته شود زیرا اگر پراکندگی اطلاعات نقاط پنجره زیاد باشد، میانگین این اطلاعات نمی تواند به خوبی بیانگر مشخصات نقاط اولیه پنجره (که قرار است کنترل کننده فازی برای آنها تصمیم گیری نماید) باشد. در واقع هر دو پارامتر n_1 و n_2 بایستی به طور دینامیک و بر اساس سرعت لحظه ای و واریانس اطلاعات پنجره آینده نگری تغییر نمایند. در مثال مورد بررسی این دو پارامتر در یک بازه مشخص تغییر داده شدند و بهترین مقادیر آنها که تابع هزینه کمتری ایجاد می کردند انتخاب شدند. نتایج مطالعه اولیه در بررسی تغییرات این پارامترها در

شده است. جهت بیان تابع هزینه مصرف سوخت، چنین فرض می شود که نرخ مصرف سوخت با کار انجام شده برای حرکت قطار متناسب است. تابع هزینه مصرف سوخت $J_f(X)$ را می توان مطابق معادله ۵ بیان نمود.

$$J_f(X) = \int_0^X \frac{p}{v} dx \quad (5)$$

اگر مدت زمان ثابتی برای سفر در نظر گرفته شود، استراتژی حفظ سرعت ثابت، کمترین مقدار انرژی و به تبع آن کمترین مقدار سوخت را مصرف می کند، لذا در تابع هزینه ترکیبی، اختلاف کار انجام شده و اختلاف زمان طی مسیر توسط استراتژی پیشنهادی و استراتژی سرعت ثابت فرضی V جریمه می شود (Howlett, Pudney, Vu, 2009). به عبارت دیگر در تابع هزینه ترکیبی J مطابق معادله ۶، هم مدت زمان و هم مصرف سوخت لحاظ شده است.

$$J(v) = \psi(v) \left[\Delta t - \frac{\Delta x}{V} \right] + \int_0^X [r(v) - r(V)] dx$$

که در آن $\psi(v) = v^2 \cdot \dot{r}(v)$ و $\Delta x = X$ و $\Delta t = t(X) - t(0)$ می باشد.

۶- پیاده سازی الگوریتم پیشنهادی

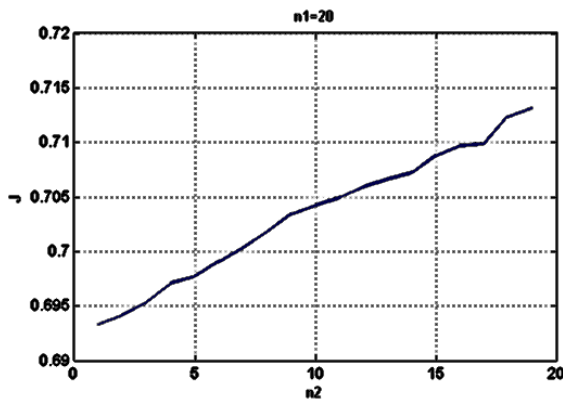
به منظور سنجش اعتبار الگوریتم توسعه داده شده، رفتار یک قطار که با سرعت ثابت $V=20$ m/s از یک قسمت شیب دار و سربالایی عبور می کند در نظر گرفته شد. ضرایب ثابت در معادله نیروی مقاوم $r(v)$ عبارتند از $a=0.00675$ و $b=0$ و $c=0.00005$ و ماکزیمم توان محرک $P=3$ در نظر گرفته شده است. شیب قطعه مسیر مورد بررسی به صورت شش قسمت با شیب ثابت می باشد. قسمت اول مسیر بین $x_0=2000$ تا $x_1=5000$ با $g_0=-0.0075$ و قسمت دوم مسیر بین $x_1=5000$ تا $x_2=5600$ با $g_1=-0.022$ و قسمت سوم مسیر بین $x_2=5600$ تا $x_3=6000$ با $g_2=-0.027$ و قسمت چهارم مسیر بین $x_3=6000$ تا $x_4=6500$ با $g_3=-0.015$ و قسمت پنجم مسیر بین $x_4=6500$ تا $x_5=6800$ با $g_4=-0.02$ و قسمت ششم بین $x_5=6800$ تا $x_6=8200$ با $g_5=-0.009$ می باشد. مسیر به صورت مجموعه نقاطی با فاصله $dx=10$ گسسته سازی شده است. در شکل ۵ نمودار g که بیانگر تغییرات شیب و فراز مسیر می باشد (با علائم \diamond) نشان داده شده است. محور افقی بیانگر کیلوکتراژ طی شده مسیر x می باشد. به علت کوچک بودن مقادیر g و برای نمایش همزمان با نمودارهای سرعت، این

شکل ۳ و شکل ۴ نشان داده شده است. در بررسی انجام شده n_1 و n_2 هر دو از ۲ تا ۲۰ تغییر داده شد که در انتها بهترین پارامترها $n_1=20$ و $n_2=2$ به دست آمد. نتایج شبیه‌سازی با کنترل‌کننده فازی آینده‌نگر بهینه در ۰ به صورت خط ساده و بدون علامت نشان داده شده است و مقادیر تابع هزینه در حالت بهینه عبارتند از $t=321.8$ و $J=0.6933$ و $J_f=230$.

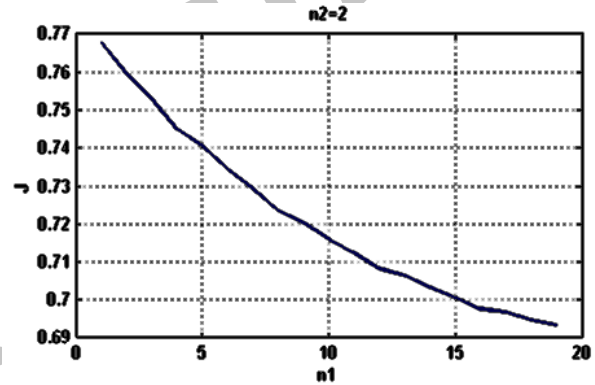
با مقایسه منحنی‌های تغییر سرعت در شکل ۵ مشاهده می‌شود که کنترل‌کننده‌های فازی آینده‌نگر قبل از افزایش فرازاها سرعت را افزایش و قبل از شیب سرعت را کاهش داده‌اند و در مقایسه با کنترل‌کننده PID توانسته‌اند در مواجهه با افزایش شیب و فرازاها، تاثیر آنها در تغییرات سرعت را مدیریت نمایند.

جدول ۱. پارامترها و توابع هزینه سه رویکرد

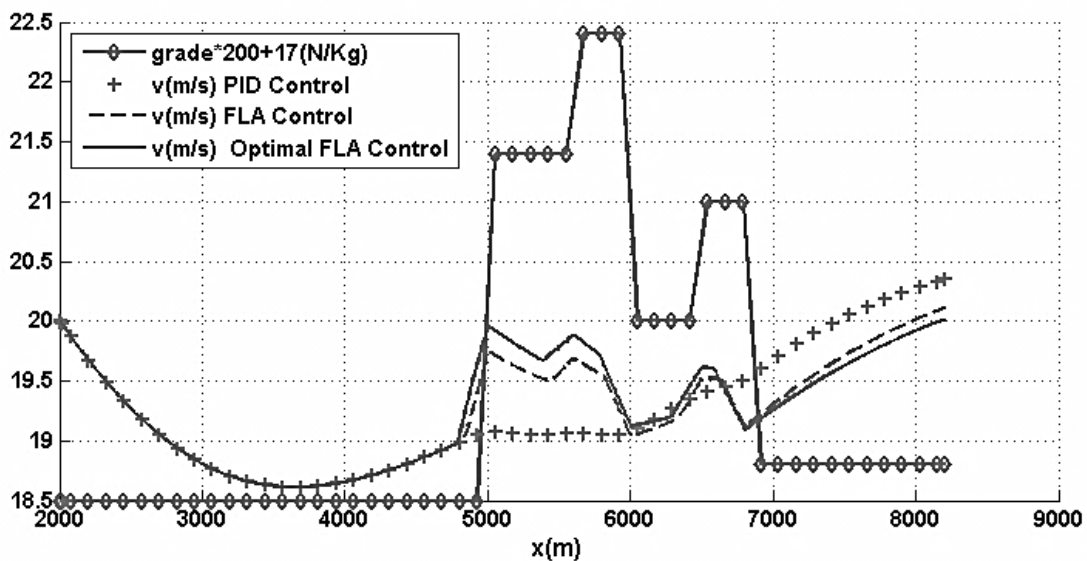
| J | J_f | t | n_2 | n_1 | |
|--------|-------|-------|-------|-------|----------------------------|
| ۰.۷۹۵۳ | ۲۳۶.۳ | ۳۲۲.۴ | - | - | راننده عادی |
| ۰.۷۱۷ | ۲۳۱.۷ | ۳۲۲.۱ | ۱۰ | ۱۰ | کنترل فازی آینده‌نگر |
| ۰.۶۹۳۳ | ۲۳۰ | ۳۲۱.۸ | ۲ | ۲۰ | کنترل فازی آینده‌نگر بهینه |



شکل ۴. تغییرات تابع هزینه بر حسب n_2 در حالیکه n_1 ثابت است.



شکل ۳. تغییرات تابع هزینه بر حسب n_1 در حالیکه n_2 ثابت است.



شکل ۵. نتایج شبیه‌سازی کنترل آینده‌نگر بهینه

نیست.

۸- ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی

با توجه به انتظار اولیه و مطابق نتایج به دست آمده، مشاهده می شود که با استفاده از کنترل آینده نگر می توان زمان سفر و میزان مصرف سوخت را کاهش داد. اما برای تحلیل اقتصادی و اهمیت میزان کاهش مصرف سوخت در این رویکرد، می توان توابع هزینه را به مقادیر کمی حجم سوخت تبدیل کرد. طبق (Krug, 2006) میزان مصرف سوخت یک لکوموتیو مدل SD/GP40-2 در دنده های مختلف مطابق جدول ۲ است.

جدول ۲. میزان مصرف سوخت لکوموتیو مدل SD/GP40-2

| دنده | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ |
|----------------------|------|------|------|------|------|-------|----|-------|
| سرعت (km/h) | ۱۱،۰ | ۲۲،۰ | ۳۹،۰ | ۵۸،۰ | ۷۸،۰ | ۹۵،۳ | ۱۱ | ۱۳۲ |
| مصرف سوخت (gallon/h) | ۹،۳ | ۲۵،۰ | ۲۴،۰ | ۶۰،۰ | ۷۹،۰ | ۱۰۰،۰ | ۱۳ | ۱۶۴،۰ |

۹- نتیجه گیری

در این مطالعه، یک کنترل کننده فازی آینده نگر به عنوان یک طرح جدید در مدیریت انرژی و وسایل نقلیه، جهت بهبود مصرف سوخت قطار دیزل-الکترونیک طراحی گردید. در این رویکرد با توجه به شیب و فراز آتی در توپوگرافی مسیر پیش روی قطار، تصمیمات کنترلی پیش بینی کننده ای اتخاذ گردید. با توجه به نتایج شبیه سازی عددی مشخص گردید که استفاده از رویکرد کنترل فازی آینده نگر می تواند در کاهش زمان سفر و همچنین کاهش مصرف سوخت موثر باشد. با آنالیز حساسیت بخش آینده نگری و تنظیم پارامترهای آن ۲،۷ درصد صرفه جویی در مصرف سوخت به دست آمد. در نهایت اهمیت استفاده از این رویکرد، از جنبه های اقتصادی و بهره وری و زیست محیطی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ارزیابی اقتصادی نشان داد که در صورت بکار بستن رویکرد کنترل فازی آینده نگر، می توان ۱۷۶۷ میلیارد تومان در سال در هزینه مصرف سوخت صرفه جویی نمود.

کنترل آینده نگر در حالت بهینه خود در این مثال توانسته است تابع هزینه مصرف سوخت r را از ۲۳۶،۳ به ۲۳۰ کاهش داده و به عبارت دیگر ۲،۷ درصد آن را کاهش دهد. طبق اطلاعات جدول ۲ این قطار با طی مسیر ۶ کیلومتری و سرعت ۲۰ متر بر ثانیه با یک راننده عادی، دارای مصرف سوخت معادل ۲۶ لیتر می باشد که با استفاده از رویکرد پیشنهادی می توان در هر ۱۰۰ کیلومتر، ۱۱،۷ لیتر مصرف را کاهش داد. مطابق با اطلاعات حمل و نقل و انرژی کشور در سال ۱۳۸۵، مصرف انرژی بخش حمل و نقل ریلی معادل ۱۸۷ میلیون بشکه نفت خام می باشد (مهدی نژاد، ۱۳۸۵) که ۲،۷ درصد صرفه جویی در آن معادل ۱۷۶۷ میلیارد تومان در سال می باشد. این نکته نیز قابل ذکر است که رویکرد ارایه شده در این مطالعه برای وسایل نقلیه سنگین در مسیرهای جاده ای نیز قابل تعمیم بوده و به این ترتیب به لحاظ اقتصادی می تواند نقش مهمی در کاهش هزینه ها داشته باشد. از طرف دیگر رویکرد آینده نگر به کاهش زمان سفر نیز انجامید و از این جنبه نیز می تواند کمک شایانی به افزایش بهره وری حمل و نقل داشته باشد. سومین جنبه اهمیت استفاده از رویکرد کنترل آینده نگر را می توان کاهش آلایندگی های زیست محیطی دانست که اهمیت این موضوع نیز در شرایط کنونی جهان و چالش های مربوط به لایه اوزن بر کسی پوشیده

۱۰- سپاسگزاری

از گروه پژوهشی خودرو و وسایل ریلی دانشگاه صنعتی اصفهان برای حمایت از این تحقیق قدردانی می شود.

۱۱- پانویس

1-Look ahead control

۱۲- مراجع

- هانسن، الف، (۲۰۰۸) "مدیریت ترافیک و بهره برداری راه آهن" ترجمه: محمدزاد، س.، یلداشخان، م.، پژوهشکده حمل و نقل، ص ۱۱۷-۱۲۸.
- مهدی نژاد، م. (۱۳۸۵) "اطلاعات حمل و نقل و انرژی کشور سال ۱۳۸۵"، شرکت بهینه سازی مصرف سوخت، ص ۸-۲.
- Howlett. P (1990) "An optimal strategy for the control of a train", J. Australian Math. Soc., Ser. B, vol. 31, no. 4, pp. 454-471.
- Cheng. J, Howlett. P (1992) "Application of critical velocities to the minimization of fuel consumption in the control of trains", Automatica, vol. 28, no. 1, pp. 165-169.

- Automatica, vol. 45, pp. 2692-2698.
- Hellström. E, Ivarsson. M, Åslund. J, Nielsen. L (2009) "Look-ahead control for heavy trucks to minimize trip time and fuel consumption", Control Engineering Practice, vol.17, no.2, pp. 245-254.
 - Ganji. B, Kouzani. A (2010) "A Study on look-ahead control and energy management strategies in hybrid electric vehicles" 2010 8th IEEE International Conference on Control and Automation Xiamen, China.
 - Hellström. E, Åslund. J, Nielsen. L (2010) "Design of an efficient algorithm for fuel-optimal look-ahead control", Control Engineering Practice, vol. 18, pp. 1318-1327.
 - Sahlholm.P, Johansson.P (2010) "Road grade estimation for look-ahead vehicle control using multiple measurement runs", Control Engineering Practice, vol. 18, pp. 1328-1341.
 - Ganji. B, Kouzani. A, Hessami. M (2011) "Backward modeling and look-ahead fuzzy energy management controller for a parallel hybrid vehicle", Control and Intelligent Systems, Vol. 39, No. 3.
 - Khayyam. H, Nahavandi. S, Hu. E, Kouzani. A, Chonka. A, Abawajy. J, Marano. V, Davis. S (2011) "Intelligent energy management control of vehicle air conditioning via look-ahead System", Applied Thermal Engineering, vol. 31, pp. 3147-3160.
 - Krug. A (2006) "Railroad Facts and Figures", Website:
www.alkrug.vcn.com/trfacts/fueluse.htm.
 - Pudney. P, Howlett. P (1994) "Optimal driving strategies for a train journey with speed limits", J. Australian Math. Soc., Ser. B, vol. 36, no. 1, pp. 38-49.
 - Howlett.P, Milroy.I, Pudney.P (1994) "Energy-efficient train control", Control Engineering Practice, vol.2, no.2, pp. 193_200.
 - Howlett. P, Pudney. P (1995) "Energy-efficient train control", In Advances in industrial control. London: Springer.
 - Howlett. P (1996) "Optimal strategies for the control of a train". Automatic, vol.32, no.4 pp. 519_532.
 - Howlett. P, Cheng. J (1997) "Optimal driving strategies for a train on a track with continuously varying gradient", The ANZIAM Journal, vol. 38, pp. 388-410.
 - Cheng. J, Davydova. Y, Howlett. P, Pudney. P (1999) "Optimal driving strategies for a train journey with non-zero track gradient and speed limits", IMA Journal of Management Mathematics, vol. 10, pp. 89-115.
 - Howlett. P (2000) "The optimal control of a train", Annals of Operations Research, vol. 98, pp. 65_87.
 - Khmel'nitsky. E (2000), "On an optimal control problem of train operation", IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 45, no.7, pp. 1257-1266.
 - Howlett. P, Leizarowitz. A (2001) "Optimal strategies for vehicle control problems with finite control sets", Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems, B: Applications & Algorithms, vol. 8, pp. 41-69.
 - Liu. R., Golovitcher. I. (2003) "Energy-efficient operation of rail vehicles", Transportation Research Part A: Policy and Practice, vol. 37, pp. 917-932.
 - Howlett. P, Pudney. P, Vu. X (2009) "Local energy minimization in optimal train control",