

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: 1394/08/06 – پذیرش: 1395/02/15

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 قابل‌قبولی را بدست می‌دهند، و لیکن 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 کارگرفته شده است. یک کنترل‌کننده فازی با در نظر گرفتن شیب مسیر پیش‌رو، برای تغییرات سرعت تصمیم‌گیری می‌نماید. بدین ترتیب یک منحنی تغییرات نزدیک به منحنی تغییرات سرعت بهینه به دست 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 2/7 درصد کاهش خواهد یافت.

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

1- مقدمه

موضوع نشان می‌دهد که تاثیر عملکرد راننده 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 آینده‌نگر¹ 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

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 پرمصرف‌ترین صنایع در این زمینه حائز اهمیت است. با توجه به سهم عمده حمل و نقل ریلی در جابجایی 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

مقایسه و عملکرد الگوریتم پیشنهادی با تنظیم پارامترهای پنجره آینده‌نگری بهینه‌سازی شده است.

2- 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 13 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 (Howlett & Cheng, 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

از مشخصات مسیر داخل این پنجره میانگین گرفته می‌شود. این مقادیر میانگین بیانگر مشخصات مسیر پیش‌رو خواهد بود. شروع پنجره آینده‌نگری در فاصله مشخصی از مکان فعلی وسیله‌نقلیه 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-الکترونیک و نشان دادن اهمیت اقتصادی آن دانست. این الگوریتم نه تنها 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 وسیله‌نقلیه 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

3- طراحی کنترل‌کننده فازی آینده‌نگر قطار

جهت بهبود مصرف سوخت قطار، یک کنترل‌کننده فازی آینده‌نگر طراحی شد. مطابق آنچه که در شکل 1 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.

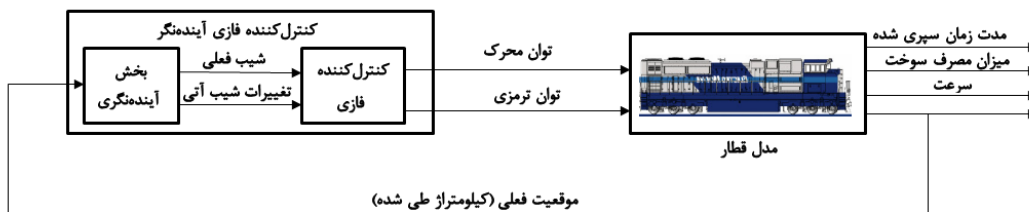
در بخش آینده‌نگری (شکل 2)، پایگاه اطلاعات شیب و فراز مسیر بایستی در اختیار باشد. این پایگاه اطلاعات در مسیرهای ریلی، به صورت مجموعه اطلاعات کیلومترآژ شروع و پایان هر قطعه همراه با شیب یا فراز مختص آن ارایه می‌شود. وظیفه بخش آینده‌نگری، استخراج شیب مسیر پیش‌رو بر اساس موقعیت فعلی می‌باشد. مطابق شکل 2 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.

ماکزیمم جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی در خطوط مترو مورد استفاده قرار گرفت (Khmelnitsky, 2000).

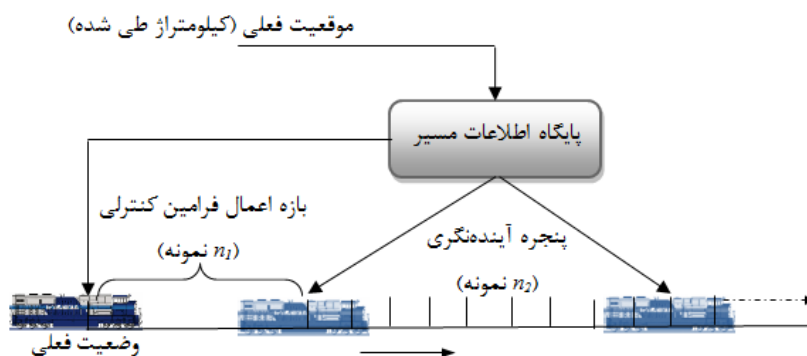
روش آینده‌نگر به عنوان یک ابزار موثر در کاهش مصرف سوخت کامیون توسط هلسترم استفاده شد که در آن از برنامه‌ریزی پویا در حل مساله بهینه‌سازی استفاده نمود (Hellström et al., 2009).

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 خودروهای سواری هیبرید استفاده شد (Ganji, Kouzani, Hessami, 2011). نتایج مطالعه انجام شده، منجر به صرفه‌جویی 2.6 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.



شکل 1. ساختار کلی کنترل‌کننده آینده‌نگر



شکل 2. بخش آینده‌نگری

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 1 بیان نمود.

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

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 متخصص، 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 1: اگر تغییر شیب صفر است آنگاه تغییر توان محرک صفر و تغییر توان ترمزی صفر باشد.

قانون 2: اگر تغییر شیب مثبت متوسط و شیب فعلی مثبت است آنگاه تغییر توان محرک مثبت متوسط باشد.

قانون 3: اگر تغییر شیب مثبت بزرگ و شیب فعلی مثبت است آنگاه تغییر توان محرک مثبت بزرگ باشد.

قانون 4: اگر تغییر شیب مثبت متوسط و شیب فعلی منفی است آنگاه تغییر توان ترمزی منفی متوسط باشد.

قانون 5: اگر تغییر شیب مثبت بزرگ و شیب فعلی منفی است آنگاه تغییر توان ترمزی منفی بزرگ باشد.

قانون 6: اگر تغییر شیب منفی متوسط و شیب فعلی مثبت است آنگاه تغییر توان محرک منفی متوسط باشد.

قانون 7: اگر تغییر شیب منفی بزرگ و شیب فعلی مثبت است آنگاه تغییر توان محرک منفی بزرگ باشد.

قانون 8: اگر تغییر شیب منفی متوسط و شیب فعلی منفی است آنگاه تغییر توان ترمزی مثبت متوسط باشد.

قانون 9: اگر تغییر شیب منفی بزرگ و شیب فعلی منفی است آنگاه تغییر توان ترمزی مثبت بزرگ باشد.

4- 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 2 بیان نمود.

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

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 ماکزیمم توان محرک به ازای واحد جرم و Q ماکزیمم نیروی ترمز به ازای واحد جرم است. زمان سپری شده (t) ضمن طی مسافت X مطابق معادله 3 محاسبه می‌شود.

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

نیروی مقاوم حرکت قطار $r(v)$ بر اساس رابطه دیویس به صورت معادله (4) در نظر گرفته می‌شود.

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

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.

5- 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 مصرف‌سوخت و تابع هزینه ترکیب زمان و مصرف‌سوخت را می‌توان به‌کار گرفت. تابع هزینه زمان که همان مدت زمان سپری شده سفر می‌باشد و در معادله (3) بیان شده است. جهت بیان تابع هزینه مصرف‌سوخت، چنین فرض می‌شود که نرخ مصرف سوخت با کار انجام شده برای حرکت قطار متناسب است. تابع هزینه مصرف سوخت $J_f(X)$ را می‌توان مطابق معادله 5 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 می‌کند، لذا در تابع هزینه ترکیبی، اختلاف کار انجام شده و اختلاف زمان طی مسیر توسط استراتژی پیشنهادی و استراتژی سرعت ثابت فرضی V جریمه می‌شود (Howlett, Pudney, Vu, 2009). به عبارت دیگر در تابع هزینه ترکیبی J مطابق معادله 6، هم مدت‌زمان 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 $\Delta t = t(X) - t(0)$ می‌باشد.

6- پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی

به منظور سنجش اعتبار الگوریتم توسعه داده شده، رفتار یک قطار که با سرعت ثابت $V=20 \text{ m/s}$ از یک قسمت شیب‌دار و سربالایی عبور می‌کند 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 می‌باشد. 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 $x_4=6500$

در ابتدا رفتار یک راننده قطار با یک کنترل‌کننده PID که قصد حفظ سرعت 20 m/s را دارد شبیه‌سازی شد. پروفیل سرعت بدست آمده مطابق **Error! Reference source not found.** (با علائم +) می‌باشد و مقادیر سه تابع هزینه آن عبارتند از $J=0.7953$ و $J_f=236.3$ و $t=322.4$.

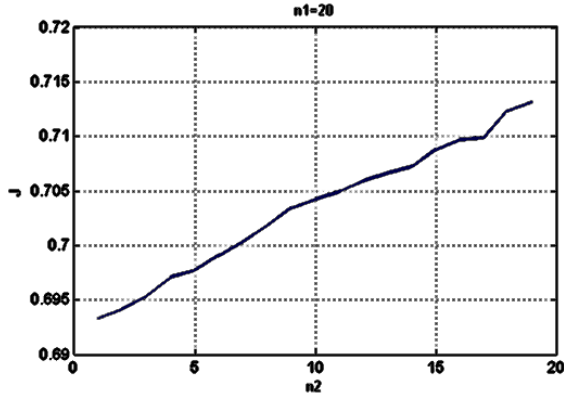
در گام بعد کنترل‌کننده فازی آینده‌نگر شبیه‌سازی شد. یک پنجره آینده‌نگری به طول 100 متر ($n_2=10$) در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که شروع پنجره آینده‌نگری نیز در فاصله 100 متری ($n_1=10$) از نقطه فعلی قطار لحاظ گردید. نتایج شبیه‌سازی با کنترل‌کننده فازی آینده‌نگر در **Error! Reference source not found.** 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 می‌شود که با استفاده از رویکرد آینده‌نگر هر سه تابع هزینه نسبت به راننده عادی بهبود داشته است.

7- آنالیز حساسیت پارامترهای بخش آینده‌نگری

در گام بعد سعی شد تا ساختار داخلی کنترل آینده‌نگر یعنی دو پارامتر طول پنجره آینده‌نگری (n_2) و فاصله شروع پنجره تا نقطه فعلی (n_1) بهینه شود. با بررسی اولیه می‌توان چنین تحلیل کرد که هرچه سرعت لحظه‌ای حرکت بیشتر باشد، بایستی n_1 بزرگتر باشد و پنجره آینده‌نگری در فاصله بیشتری از موقعیت فعلی شروع شود تا فرامین کنترلی قبلی بر پنجره آینده‌نگری تأثیرگذار نباشد و بتوان ادعا کرد که تأثیر تصمیم کنترلی جدید در نقاط اولیه پنجره آشکار خواهد شد. همچنین هرچه واریانس اطلاعات نمونه‌های پنجره آینده‌نگری بیشتر باشد، بایستی n_2 کوچکتر در نظر گرفته شود زیرا اگر پراکندگی اطلاعات نقاط

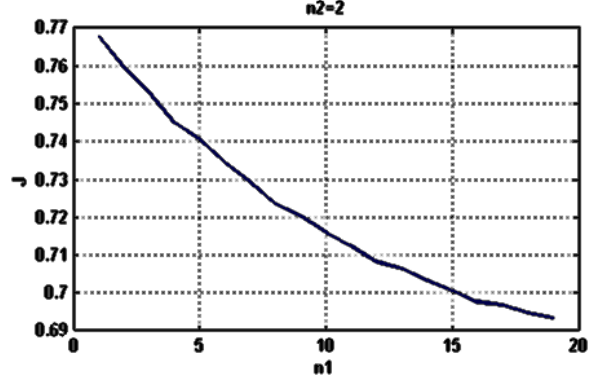
مطالعه اولیه در بررسی تغییرات این پارامترها در شکل 3 و شکل 4 نشان داده شده است.

در بررسی انجام شده n_1 و n_2 هر دو از 2 تا 20 تغییر داده شد که در انتها بهترین پارامترها $n_1=20$ و $n_2=2$ به دست آمد. نتایج شبیه سازی با کنترل کننده فازی آینده نگر بهینه در شکل 5 به صورت خط ساده و بدون علامت نشان داده شده است و مقادیر تابع هزینه در حالت بهینه عبارتند از $t=321.8$ و $J_f=230$ و $J=0.6933$.

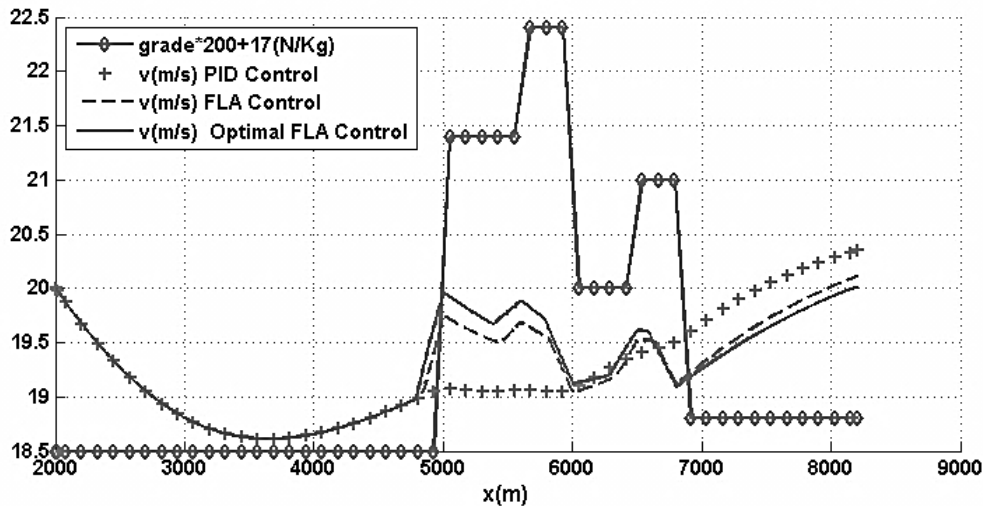


شکل 4. تغییرات تابع هزینه بر حسب n_2 در حالیکه n_1 ثابت است.

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 نگر 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



شکل 3. تغییرات تابع هزینه بر حسب n_1 در حالیکه n_2 ثابت است.



شکل 5. نتایج شبیه سازی کنترل آینده نگر بهینه

آینده نگر بهینه توانسته است در فاصله بهینه ای تا نقطه شروع تغییرات شیب، اقدام به افزایش یا کاهش سرعت نماید. پارامترهای n_1 و n_2 و توابع هزینه سه رویکرد در جدول 1 مرور شده است. مشاهده می شود که کنترل فازی آینده نگر بهینه به لحاظ زمان سفر و میزان مصرف سوخت نسبت به دو رویکرد دیگر برتری دارد.

با مقایسه منحنی های تغییر سرعت در شکل 5 مشاهده می شود که کنترل کننده های فازی آینده نگر قبل از افزایش فرازاها سرعت را افزایش و قبل از شیب سرعت را کاهش داده اند و در مقایسه با کنترل کننده PID توانسته اند در مواجهه با افزایش شیب و فرازاها، تاثیر آنها در تغییرات سرعت را مدیریت نمایند. کنترل کننده فازی

جدول 1. پارامترها و توابع هزینه سه رویکرد

J	J_f	t	n_2	n_1	
0.7953	236.3	322.4	-	-	راننده عادی
0.717	231.7	322.1	10	10	کنترل فازی آینده‌نگر
0.6933	230	321.8	2	20	کنترل فازی آینده‌نگر بهینه

8- ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی

با توجه به انتظار اولیه و مطابق نتایج به‌دست آمده، مشاهده می‌شود که با استفاده از کنترل آینده‌نگر می‌توان زمان سفر و میزان مصرف سوخت را کاهش داد. اما برای تحلیل اقتصادی و اهمیت میزان کاهش مصرف سوخت در این رویکرد، می‌توان توابع هزینه را به مقادیر کمی حجم سوخت تبدیل کرد. طبق (Krug, 2006) میزان مصرف سوخت یک لکوموتیو مدل SD/GP40-2 در دنده‌های مختلف مطابق **Error! Reference source not found.** است.

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

دنده	1	2	3	4	5	6	7	8
سرعت) (km/h)	11.6	22.5	39.5	58.7	78.9	95.3	112	132
مصرف سوخت) (gallon/h)	9.3	25.4	44.1	60.5	79.7	100.2	133	164.4

کنترل آینده‌نگر در حالت بهینه خود در این مثال توانسته است تابع هزینه مصرف سوخت J_f را از 236.3 به 230 کاهش داده و به عبارت دیگر 2.7 درصد آن را کاهش دهد. طبق اطلاعات 6 کیلومتری و سرعت 20 متر بر ثانیه با یک راننده عادی، دارای مصرف سوخت معادل 26 لیتر می‌باشد که با استفاده از رویکرد پیشنهادی می‌توان در هر 100 کیلومتر، 11.7 لیتر مصرف را کاهش داد. مطابق با اطلاعات حمل و نقل و انرژی کشور در سال 1385، مصرف انرژی بخش حمل و نقل ریلی معادل 1.87 میلیون بشکه نفت خام می‌باشد (مهدی‌نژاد، 1385) که 2.7 درصد

صرفه‌جویی در آن معادل 1767 میلیارد تومان در سال می‌باشد. این نکته نیز قابل ذکر است که رویکرد ارائه شده در این مطالعه برای وسایل نقلیه سنگین در مسیرهای جاده‌ای نیز قابل تعمیم بوده و به این ترتیب به لحاظ اقتصادی می‌تواند نقش مهمی در کاهش هزینه‌ها داشته باشد. از طرف دیگر رویکرد آینده‌نگر به کاهش زمان سفر نیز انجامید و از این جنبه نیز می‌تواند کمک شایانی به افزایش بهره‌وری حمل و نقل داشته باشد. سومین جنبه اهمیت استفاده از رویکرد کنترل آینده‌نگر را می‌توان کاهش آلایندگی‌های زیست محیطی دانست که اهمیت این موضوع نیز در شرایط کنونی جهان و چالش‌های مربوط به لایه اوزن بر کسی پوشیده نیست.

9- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک کنترل‌کننده فازی آینده‌نگر به عنوان یک طرح جدید در مدیریت انرژی وسایل نقلیه، جهت بهبود مصرف سوخت قطار دیزل-الکترونیک طراحی گردید. در این رویکرد با توجه به شیب و فراز آتی در توپوگرافی مسیر پیش‌روی قطار، تصمیمات کنترلی پیش‌بینی‌کننده‌ای اتخاذ گردید. با توجه به نتایج شبیه‌سازی عددی مشخص گردید که استفاده از رویکرد کنترل فازی آینده‌نگر می‌تواند در کاهش زمان سفر و همچنین کاهش مصرف سوخت موثر باشد. با آنالیز حساسیت بخش آینده‌نگری و تنظیم پارامترهای آن 2.7 درصد صرفه‌جویی در مصرف سوخت به‌دست آمد. در نهایت اهمیت استفاده از این رویکرد، از جنبه‌های اقتصادی و بهره‌وری و زیست‌محیطی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ارزیابی اقتصادی نشان داد که در صورت بکار بستن رویکرد کنترل فازی آینده‌نگر، می‌توان 1767 میلیارد تومان در سال در هزینه مصرف سوخت صرفه‌جویی نمود.

10- سپاسگزاری

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

11- پانویس

1-Look ahead control

- 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”, 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/rrfacts/fueluse.htm.
- هانسن، الف.، (2008) "مدیریت ترافیک و بهره‌برداری راه‌آهن" ترجمه: محمدزاد، س.، یلداشخان، م.، پژوهشکده حمل و نقل، ص 117-128.
- مهدی نژاد، م. (1385) "اطلاعات حمل و نقل و انرژی کشور سال 1385"، شرکت بهینه سازی مصرف سوخت، ص 8-2.
- 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.
- 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.
- Khmelnitsky. 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

Fuel Consumption Optimization for a Diesel-Electric Locomotive Using Fuzzy Look-Ahead Control

*M. Saadat, Ph.D. student, Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of
Technology, Isfahan, Iran.*

*M. Esfahanian, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Isfahan University
of Technology, Isfahan, Iran.*

*S. Behbahani, Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of
Technology, Isfahan, Iran.*

E-mail: msaadat@mecheng.iut.ac.ir

ABSTRACT

Diesel-electric locomotives are one of the foremost elements of transportation systems and they consume significant portion of transportation fuel usage. One of the effective parameters in fuel consumption of these vehicles is acceleration and braking strategy according to train speed profile. Although the available numerical methods for calculating the optimal speed profiles present acceptable results, the use of these methods in the calculation is too time-consuming. To reduce the computation time, using fuzzy logic as an efficient method has been suggested. In this paper, a fuzzy look-ahead control approach is implemented to optimize fuel consumption of diesel-electric locomotives. A fuzzy controller will decide the speed changing by considering the gradient of the path ahead. Hence, a speed profile close to optimal speed profile will be achieved. Furthermore, the performance of control algorithm has been improved by a sensitivity analysis of look-ahead controller parameters. The simulation results of developed algorithm show that at least 2.7 percents reduction in fuel consumption of diesel-electric locomotives can be achieved.

Keywords: Fuel Consumption, Diesel-Electric Locomotive, Fuzzy look-ahead Control

¹*Look ahead control*