

طراحی سیستم کنترل خودکار قطار متناسب با شرایط راه آهن ایران با استفاده از کنترل فازی پویا با رویکرد کاهش مصرف انرژی

نام و نام خانوادگی نویسنده اول^{۱*}، نویسنده دوم^۲ و نویسنده سوم^۳

چکیده

افزایش ترافیک خطوط ریلی و نیاز به سرعت‌های بالاتر، وظیفه راهبران قطار را بیش از پیش سنگین نموده است. عواملی از قبیل کاهش سوانح و افزایش ایمنی، رعایت معیارهای راحتی مسافر، بهینه‌سازی و مدیریت مصرف انرژی، سیستم کنترل و سیگنالینگ سنتی و مبتنی بر راهبر را وادار به حرکت به سمت سیستم‌های کنترل خودکار قطار I(ATC) نموده است. حدود یک دهه است که در کشور ما نیز ناوگان ریلی به سیستم ATC مجهز گردیده است. در این مقاله هدف طراحی یک سیستم ATC متناسب با شرایط راه آهن ایران با استفاده از منطق فازی است. به همین منظور، ابتدا با دید حل مساله بصورت ریاضی و شبیه‌سازی، مدل یک لکوموتیو با متغیرهای لکوموتیو ER24PC بیان گردیده است. اطلاعات سرعت قطارهای مسافری که در حد فاصل ایستگاه‌های مشهد تا کاشمر تردد دارند از طریق الگوی سیر راهبران منتخب استخراج شده تا راحتی سفر تضمین گردد. به منظور کنترل خودکار قطار که شامل سه مرحله شتاب‌گیری، خلاص و ترمزگیری است؛ کنترل کننده فازی پیشنهاد گردیده است. هدف این کنترل کننده ردیابی مطلوب منحنی سرعت و کاهش مصرف انرژی است که از این نظر کارایی آن با یک کنترل کننده مرسوم PI مقایسه گردیده است. به‌عنوان یک راهکار نوین، از متغیرهای جرم و درصد وزنی ترمز لکوموتیو بعنوان پس‌فیلتر فازی و همچنین ضرایب PI استفاده شد تا کنترل کننده‌ها به‌ازای تغییر شرایط قطار به‌روز گردند. نتایج شبیه‌سازی‌ها که با نرم‌افزار MATLAB انجام گرفته، کاهش ۸۳ درصدی مصرف انرژی و همچنین کارایی بهتر کنترل کننده فازی در مقابله با اغتشاش ورودی سیستم را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن یک منحنی سرعت دیگر از ایستگاه سرخس تا مرزداران و انجام مجدد شبیه‌سازی‌ها، اعتبار نتایج تایید گردیده است.

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۰۶

کلمات کلیدی: کنترل خودکار قطار، کنترل کننده فازی، لکوموتیو، مصرف انرژی

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۲۷

زیست محیطی آن‌ها از یک سو و استفاده از سیستم علائم الکتریکی به روز از سوی دیگر از دلایل این امر بوده‌اند. استفاده از سیستم بلاک خودکار در راه آهن جمهوری اسلامی ایران سبب افزایش ایمنی و ظرفیت خطوط گردید. اما با بهره برداری از سیستم ATC در محور مشهد-تهران در سال ۱۳۹۳، امکان استفاده از سیستم بلاک میانی فراهم گردید که ظرفیت خطوط را تا دو برابر افزایش می‌دهد.

۱-مقدمه

از دیرباز تا کنون مسئله حمل و نقل سریع و ایمن همواره مورد توجه افراد عادی، صاحبان صنایع و تجار بوده است. پیشرفت‌های اخیر در صنعت حمل و نقل ریلی سبب شده تا اقبال عمومی نسبت به این شیوه حمل و نقل افزایش یابد. بازسازی و نوسازی ناوگان ریلی و کاهش آلاینده‌گی

^۱ * پست الکترونیک نویسنده مسئول: saman.sanat91@gmail.com

۱. گروه مهندسی مکترونیک، واحد گناباد، دانشگاه آزاد اسلامی، گناباد، ایران

سیستم ATC با نظارت دقیق و دائمی بر سرعت قطار، در صورت افزایش سرعت به مقدار بیشتر از حد تعیین شده ابتدا با اخطار به راهبر و در صورت ادامه با بکارگیری ترمز سرعت را به حد مجاز کاهش می‌دهد یا منجر به توقف قطار در مواجهه با سیگنال قرمز می‌شود. به این ترتیب با وجود یک سیستم حفاظتی پشتیبان، سرعت سیر قطارها نیز افزایش یافت (Maharan Eneniering Co., 2006; Railway Research & Education Group, 2013). با توجه به اینکه سیستم ATC بر روی تنظیم حرکت قطار متمرکز است، در تحقیقات همواره از اهمیت بالایی برخوردار بوده است. لی، فن و اوینگ (۲۰۲۱) به کنترل هوشمند ترکشن براساس کنترل PID فازی پیش‌بین و بهینه‌سازی برخط آن برای قطارهای مغناطیسی پرداختند. آن‌ها جهت بهبود عملکرد روال کنترل سیستم عملکرد خودکار قطار 2(ATO) یک مدل PID فازی پیش‌بین ارائه کرده‌اند که ضرایب کنترل کننده از روش تندترین کاهش بصورت برخط اصلاح می‌گردد. نتایج پژوهش نشان داد که روش ارائه شده منجر به کاهش ۱۸/۶ درصدی مصرف انرژی، کاهش دقت توقف تا ۵ سانتی‌متر و افزایش راحتی سفر تا ۶۹ درصد نسبت به روش‌های کنترلی PID، F- PID، MPC، و M-F-PID شده است (Liu, Y., Fan, & Ouyang, Q., 2021). طراحی بهینه منحنی سرعت و ارائه یک کنترل کننده PID فازی با هدف دستیابی به بهینه‌سازی حداکثری حرکت قطار پرداختند. آن‌ها یک مدل غیر خطی از قطار ارائه داده و علاوه بر مساله تعقیب منحنی سرعت، سه عامل مصرف انرژی، دقت توقف و راحتی سفر را نیز مد نظر قرار دادند. داده‌های عددی از خط ۸ متروی پکن جمع‌آوری شده و نتایج پژوهش کاهش ۱۰/۴ درصدی مصرف انرژی نسبت به حالت فعلی را نشان می‌دهد (PU, Q., et.al., 2020). دنگ و همکاران (۲۰۱۸) از کنترل مرکب H_{∞} و آشفتگی مشاهده‌گر برای قطارهای پرسرعت با خطای محرک استفاده کردند. طبق پژوهش آن‌ها، براساس مدل جرم نقطه‌ای چندگانه، دینامیک قطارهای پرسرعت شامل

دنباله‌ای از واکنش‌های متصل به یکدیگر است که در پس آن‌ها مقاومت حرکت، خطاهای محرک و آشفتگی‌های چندگانه می‌بایست در نظر گرفته شوند. به‌عنوان نتیجه کار، پایداری سیستم حلقه بسته از روش لیاپانوف اثبات گردیده و نتایج شبیه‌سازی عددی، کارایی مطلوب کنترل H_{∞} را نشان می‌دهد (Dong, H., et.al., 2018). چنگ و همکاران (۲۰۱۷)، به ارائه روش‌های راهبری هوشمند براساس دانش کارشناسان و بهینه‌سازی برخط برای قطارهای پرسرعت پرداخته‌اند. این پژوهش چند هدف شامل ایمنی، زمان‌بندی، مصرف انرژی و راحتی سفر را مد نظر قرار داده است. در ابتدا داده‌های مربوط به حرکت قطار با مشورت راهبران خبره دریافت شده است. در ادامه دو روش بهینه‌سازی شامل برنامه‌ریزی راهبری برخط دقیق 3(EOPD) و برنامه ریزی راهبری برخط غیر دقیق 4(IOPD) بکار گرفته شده و از روش گرادیان نزولی برای به روز رسانی خروجی کنترل کننده استفاده شده است. داده‌های مورد نیاز پژوهش از راه آهن پرسرعت پکن-شانگهای برداشت شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داده است که EOPD و IOPD بخصوص در حوزه‌های مصرف انرژی و راحتی سفر عملکرد بهتری نسب به کنترل کننده‌های سنتی دارد. از طرفی IOPD نسب به EOPD تغییر حالت‌های حرکتی بیشتری داشته اما از نظر زمان‌بندی بهتر عمل کرده است (Cheng, R., et.al., 2017). مدوا و همکاران (۲۰۱۶)، در مقاله‌ای به توضیح عملکرد خودکار قطار با استفاده از منطق فازی پرداختند. آن‌ها بدون استفاده از مدل قطار تنها به ارائه قوانین فازی پرداختند. متغیرهای وزن، سرعت، جهت حرکت و مسافت بعنوان ورودی‌های کنترل کننده و گشتاور و میزان ترمز بعنوان خروجی در نظر گرفته شده‌اند (Madhava, M., et.al., 2016). یوتومو و همکاران (۲۰۱۵)، با هدف کنترل سرعت قطار یک کنترل کننده فازی با استفاده از منطق مددانی و فازی‌گر میانگین مرکز ارائه کردند. آن‌ها یک مدل خطی با تابع تبدیل برای سیستم قطار در نظر گرفتند و با نظر گرفتن چهار متغیر زمان صعود، زمان سقوط، زمان

نشست و خطای حالت ماندگار عملکرد کنترل کننده را بررسی کردند (Utomo, R. D., & Widiyanto, E. D., 2015).

سیستم ATC که در حال حاضر در راه آهن ایران استفاده می‌شود تنها در ترمزگیری دارای عمل مداخله‌ای است. در این صورت عمل شتابگیری و تغییرات سرعت در بازه‌ی مجاز ATC بر عهده راهبر است. از آنجا که مسئله راحتی سفر و کاهش مصرف انرژی از جمله دغدغه‌های تحقیقات موجود بر روی سیستم کنترل خودکار قطار است، در این مقاله با در نظر گرفتن نحوه هدایت قطار توسط راهبران منتخب قطارهای مسافری در حد فاصل ایستگاه‌های مشهد

تا کاشمر، منحنی سرعتی با اولویت راحتی سفر طراحی شده است. سپس یک مدل غیرخطی از لکوموتیو معرفی شده که داده‌های لکوموتیو ER24PC بعنوان کشنده رایج در قطارهای مسافری کشور در آن استفاده شده است. در آرایش یک قطار همواره نوع و تعداد کشنده‌ها و واگن‌ها بر وزن و درصد وزنی ترمز قطار تاثیر گذارند که دو عامل مهم در بحث کنترل (شتابگیری و ترمز) هستند. بنابراین در بحث کنترل یک قطار عدم قطعیت در متغیرها وجود دارد. به همین منظور یک کنترل کننده فازی برای هدایت خودکار قطار طراحی گردیده که ضرایب فیلتر دینامیکی

خروجی آن جرم و درصد وزنی ترمز لحاظ شده‌اند. از آنجا که در سیستم ATC این دو بعنوان داده‌های ورودی در ابتدای حرکت تعریف می‌شوند، در واقع خروجی کنترل کننده بدون پیچیده کردن و افزایش هزینه طراحی، بر حسب شرایط قطار به روز می‌شوند.

۲- مدل سازی

محرک یک قطار، لکوموتیو آن است و تمام تجهیزات کنترلی قطار بر روی لکوموتیو نصب می‌گردد. بنابراین ابتدا به مدل سازی ریاضی یک لکوموتیو می‌پردازیم. با استفاده از قانون دوم نیوتون، مجموع نیروهای وارد بر یک جسم، متناسب با جرم و شتاب آن جسم است. بر روی یک قطار در حال حرکت، مجموعه‌ای از نیروهای طولی، عرضی، جانبی و چرخشی وارد می‌گردد. نیروی غالب بر قطار در یک خط نسبتاً صاف، نیروی طولی است که در شکل (۱) نشان داده شده است (Wang, S. C., & Xia, X., 2003; Dong, H., 2018). Fui (2003) نیروی ترکشن، Fei نیروهای داخلی، K-

ضریب چسبندگی، xi موقعیت، mi وزن و R نیروی مقاوم بر قطار هستند. نیروی مقاوم به دو بخش نیروی کشش آیرودینامیکی Ra و نیروی مقاوم غلطشی Rr تقسیم‌بندی می‌شود. معادلات حاکم بر روی یک لکوموتیو و با در نظر گرفتن نیروهای ترکشن و مقاوم بصورت رابطه (۱) است:

$$m\ddot{x} = F_u - mR \quad (1)$$

$$R = R_r + R_a = C_0 + C_v V + C_a V^2$$

در معادله (۱)، m وزن لکوموتیو، x مشتق دوم ماتریس حالت‌ها و V سرعت لکوموتیو هستند. بخش دوم معادله (۱)، معادله دیویس نامیده می‌شود که ضرایب آن یعنی C0، Cv و Ca از تست باد حاصل می‌شوند (Wang, S. C., & Xia, X., 2003; Dong, H., 2018).

موقعیت و x2 بعنوان سرعت در معادله‌ی (۱) داریم:

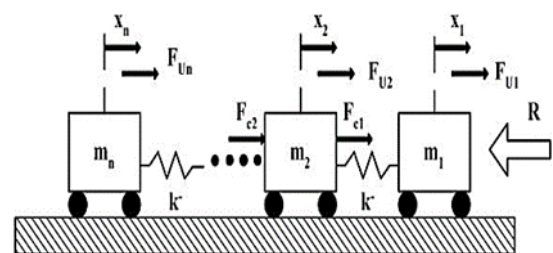
$$\dot{x} = x_1 \quad (2)$$

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\ddot{x}_2 = \frac{1}{m} F_u - (C_0 + C_v V + C_a V^2)$$

$$F_u = u$$

پارامتر	مقدار	واحد
m	۷۶۸۴۱	kg
C ₀	۱/۷۶x ^{-۱۰}	N/kg
C _v	۳/۳۵x ^{-۱۰}	N.s/m.kg



شکل ۱- نیروهای غالب بر قطار در یک خط نسبتاً صاف

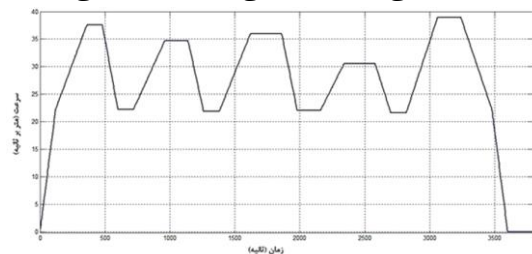
اگر بخواهیم بصورت ساده به سیستم ATC قطار نگاه کنیم، می‌توان آن را مشابه یک کنترل کننده PI قرار داد که هر لحظه با دریافت سرعت مطلوب و مقایسه آن با سرعت فعلی (سیگنال خطا) کنترلر عمل می‌کند. در سیستم سرعت سنجی ATC، با توجه به مشخص بودن قطر چرخ لکوموتیو می‌توان به اطلاعات موقعیت مکانی (انتگرال خطا) نیز در هر لحظه دسترسی داشت (Maharan Eneniering Co., 2011). در کنترل کننده PI از بهره‌ی تناسبی (Kp) برای ایجاد پایداری و تعیین سرعت پاسخ‌دهی و از بهره‌ی انتگرالی (Ki) برای کاهش خطای حالت ماندگار استفاده می‌شود. رابطه‌ی (۳) معادله‌ی یک کنترل کننده PI را نشان می‌دهد که در آن e(t) سیگنال خطا و u(t) سیگنال کنترلی است (Dubey, V., Goud, H., & Sharma, P., 2022).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (3)$$

اما برای کنترل یک قطار باید مواردی از جمله راحتی سفر با جلوگیری از تغییرات ناگهانی شتاب‌گیری و ترمز و همچنین کاهش انرژی مصرفی نیز مد نظر قرار گیرد. استفاده از فناوری‌های کنترل پیشرفته برای قطار به اواخر ۱۹۸۰ بر می‌گردد. اولین سیستم کنترل پیشرفته قطار که بصورت عملیاتی پیاده‌سازی گردید، برای متروی سندای ژاپن به کمک منطق فازی در سال ۱۹۸۷ بود. سرعت‌گیری و ترمز‌گیری نرم و همچنین کاهش مصرف سوخت از جمله نتایج کنترل با منطق فازی بود (Zhou, Y., Yang, X., & Mi, C., 2013).

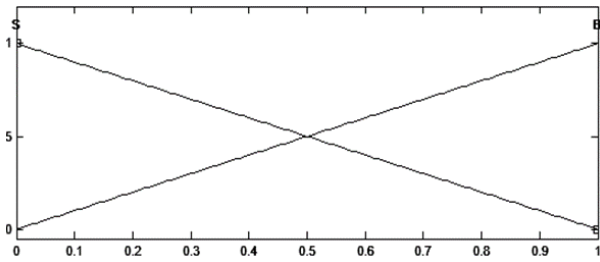
در این مقاله نیز فرآیند کنترل قطار به کمک منطق فازی انجام گرفته که شکل بلوکی آن در شکل (۳) نمایش داده شده است. جهت سادگی محاسبات از فازی‌گر تکین، فازی‌زدای میانگین مرکز، توابع عضویت مثلثی و موتور ممدانی حداقل استفاده شده است (Belman-Flores, J., M., et.al., 2022). ورودی‌های کنترل کننده فازی، خطا (e) مشتق خطا (de) در نظر گرفته شده که در بازه‌ی [۱

لکوموتیو رایج برای قطارهای مسافری در ایران ER24PC (ایران رانر) می‌باشد که دارای حداکثر سرعت ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت و درصد وزنی ترمز ۱۵۰ است که از آزمایش ترمز راه‌آهن حاصل شده است. داده‌های مورد نیاز این لکوموتیو برای رابطه‌ی (۲) در جدول (۱) آورده شده است (Mousavi, A., Markazi, A. H., & Masoudi, S., 2017). سیستم علائم الکتریکی در هر لحظه با دریافت مسیری که اپراتور گرفته و همچنین وضعیت المان‌های محوطه نسبت به ارسال اطلاعات سرعت به سیستم ATC اقدام می‌کند. به این ترتیب منحنی سرعتی ایجاد شده که در نقاط مختلفی به روز می‌گردد. اطلاعات لحظه‌ای سرعت قطار در حافظه‌ی رایانه‌های صنعتی سیستم ATC ذخیره شده و در نهایت بصورت فایل کد شده تحت عنوان لاگ ATC استخراج می‌گردد. در این مقاله از اطلاعات لاگ ATC قطارهای مسافری مشهد- تهران با راهبران منتخب در بازه‌ی ۲۵ تا ۲۸ مرداد ۱۴۰۲ جهت دریافت منحنی سرعت استفاده شده است. مسیر مورد مطالعه از ایستگاه مشهد تا کاشمر (بعنوان مرز بین دو ناحیه خراسان و شرق) است. فرض شده که قطار از ایستگاه مشهد حرکت کرده و با گذر از ایستگاه‌های سلام، فریمان، تربت و ابومسلم در ایستگاه کاشمر متوقف می‌گردد. حداکثر سرعت مجاز قطارهای مسافری در این محور ۱۴۰ کیلومتر بر ساعت و حداکثر سرعت عبور از ایستگاه ۸۰ کیلومتر بر ساعت است. شکل (۲) منحنی سرعت طراحی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲- منحنی سرعت در نظر گرفته شده برای قطار

۳- کنترل کننده



شکل ۵- توابع عضویت KS و KP بعنوان خروجی سیستم فازی

$e \setminus e'$	NB	N	Z	P	PB
NB	B	B	B	B	B
N	B	B	S	B	B
Z	B	S	S	S	B
P	B	B	S	B	B
PB	B	B	B	B	B

جدول ۲- پایگاه قواعد فازی

۴- شبیه‌سازی و نتایج

در این بخش عملکرد کننده‌های فازی و PI در بحث کنترل خودکار قطار از طریق شبیه‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور مقایسه بهتر دامنه نوسانات سیگنال کنترلی در هر دو کنترل کننده، از معیار TV_5 استفاده شده است. TV یک سیگنال گسسته n نقطه‌ای $X(n), 1 \leq n \leq N$ بصورت رابطه (۴) تعریف می‌شود (Huba, M., & Vrancic, D., 2022):

$$TV(X) = \sum_{n=2}^N |X(n) - X(n-1)| \quad (4)$$

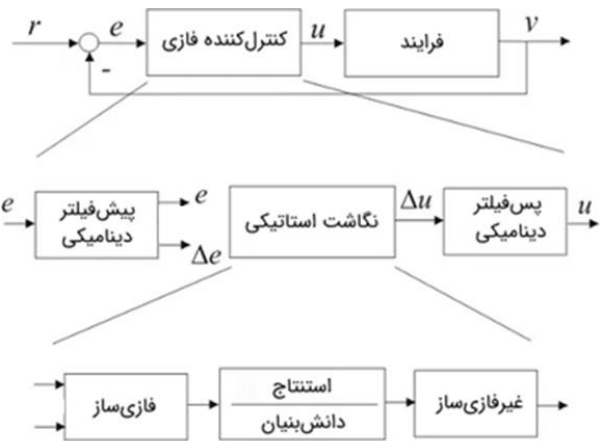
به منظور بررسی دقیق‌تر عملکرد کنترل کننده‌ها، شبیه‌سازی‌ها در ۳ حالت مختلف انجام شده است:

حالت اول: منحنی سرعت کامل به سیستم اعمال شده است.

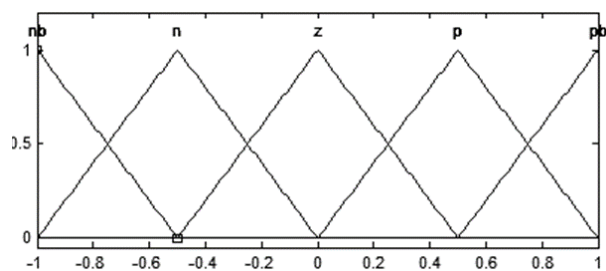
حالت دوم: وزن قطار به ۱۲۰ تن و درصد وزنی ترمز به ۱۰۰ تغییر می‌کند.

حالت سوم: یک سیگنال نویز تصادفی با میانگین صفر و انحراف معیار ۲ به ورودی سیستم وارد شده است. در تمامی حالت‌ها، نمودار سرعت، شتاب و سیگنال کنترلی ترسیم شده و TV سیگنال‌های کنترلی محاسبه شده‌اند.

و ۱-] نرمال گردیده‌اند. باتوجه به هدف کنترل سرعت، سیگنال خطا از جنس سرعت است. خروجی کنترل کننده سیگنال‌های نرمال شده‌ی KS و KP به ترتیب برای کنترل خطا و انتگرال خطا هستند. پیش فیلتر کنترل کننده فازی، همان سیگنال‌های خطا و مشتق خطای نرمال شده هستند. در پس فیلتر کنترل کننده فازی، جرم لکوموتیو بعنوان ضریب KS و درصد وزنی ترمز بعنوان ضریب KP بصورت تجربی انتخاب شده‌اند. مهم‌ترین مزیت این انتخاب آن است که چون در هنگام روشن کردن سیستم ATC متغیرهای وزن و درصد وزنی ترمز وارد می‌شوند، براساس شرایط قطار ضرایب کنترل کننده به‌روز می‌گردد. این دو متغیر بعنوان ضرایب کننده‌ی PI نیز استفاده شده‌اند. توابع عضویت سیستم فازی در شکل (۴) و (۵) و پایگاه قواعد در جدول (۲) نشان داده شده است.

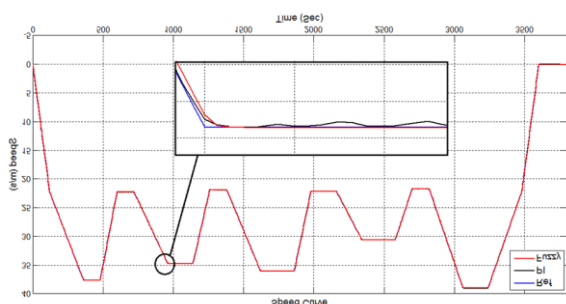


شکل ۳- بلوک دیاگرام فرآیند کنترل قطار با استفاده از منطق فازی

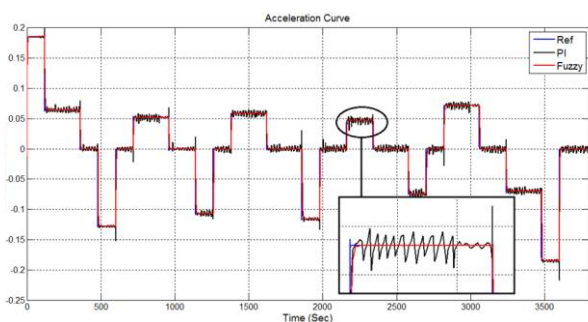


شکل ۴- توابع عضویت e و e' بعنوان ورودی سیستم فازی

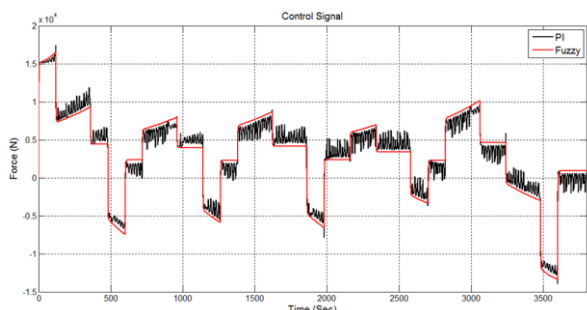
شبه‌سازی به ازای متغیرهای حالت اول انجام گردیده است. مطابق شکل‌های (۱۷-۱۸) در حالت جدید نیز، منحنی سرعت بخوبی دنبال شده و کنترل کننده فازی دارای عملکرد نرم در شتاب و تلاش کنترلی است. مقادیر $TVPI = 34514$ و $TVFuzzy = 441460$ حاصل شده‌اند که نشان می‌دهد کنترل کننده فازی حدود ۹۲ درصد کمتر از PI انرژی مصرف کرده است.



شکل ۶- منحنی‌های سرعت مرجع، فازی و PI در حالت اول



شکل ۷- منحنی‌های شتاب مرجع، فازی و PI در حالت اول



شکل ۸- سیگنال‌های کنترلی فازی و PI در حالت اول

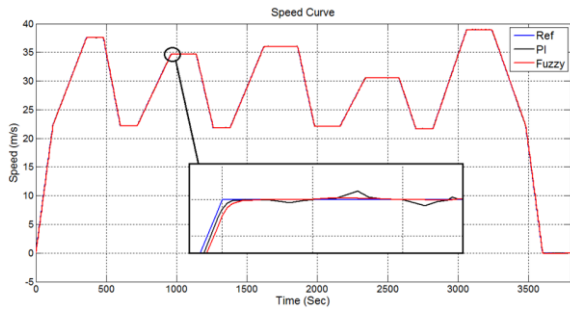
باتوجه به نمودارهای شکل (۶-۸) می‌توان دید که کنترل کننده فازی از نظر تعقیب منحنی سرعت، شتاب‌گیری و سیگنال کنترلی بسیار نرم عمل کرده است. همچنین مقادیر $TVPI = 900010$ و $TVFuzzy = 178670$ بدست آمده است که مشخص است تلاش کنترلی فازی ۸۰ درصد کمتر از PI است.

علیرغم اینکه منحنی سرعت با شتاب ثابت در نظر گرفته شده و منحنی به اصطلاح در محل‌های تغییرات شتاب تیز است، اما مطابق شکل (۹) می‌بینیم که کنترل کننده فازی سعی کرده تغییرات شتاب را ملایم‌تر نماید.

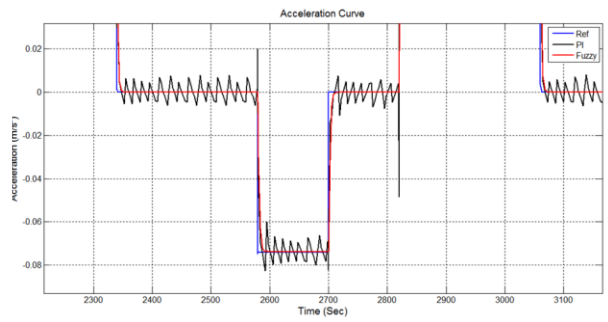
در حالت دوم مطابق شکل‌های (۱۰-۱۲)، منحنی‌های سرعت و شتاب نسبت به حالت اول تغییر قابل ملاحظه‌ای نداشته‌اند. اما همانطور که ملاحظه می‌شود، تلاش کنترلی بیشتری صورت گرفته است که مقادیر $TVPI = 278700$ و $TVFuzzy = 1627200$ گواه این موضوع هستند. باتوجه به افزایش جرم لازم است جهت شتاب‌گیری نیروی بیشتری مصرف گردد. همچنین باتوجه به کاهش درصد ترمزی نیز برای توقف باید تلاش بیشتری صورت گیرد. در این حالت نیز کنترلر فازی ۸۳ درصد کمتر از PI انرژی مصرف کرده است.

در حالت سوم همانطور که از شکل‌های (۱۳-۱۵) ملاحظه می‌شود، منحنی سرعت بخوبی دنبال شده اما سیگنال‌های کنترلی و شتاب از نویز تاثیر پذیرفته‌اند. مقادیر $TVPI = 282070$ و $TVFuzzy = 807980$ بدست آمده‌اند که نشان می‌دهد تلاش کنترل کننده فازی نسبت به حالت اول حدود ۵۸ درصد افزایش داشته است که حاکی از عملکرد بهتر کنترل کننده فازی برای مقابله با نویز است.

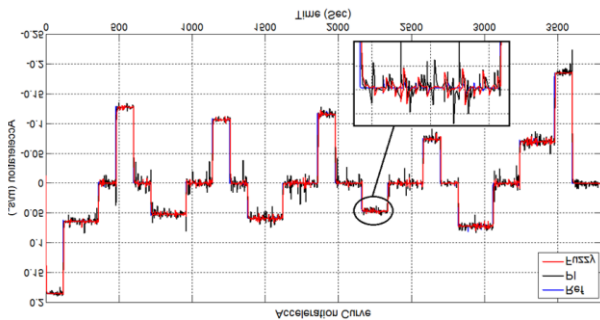
به منظور اعتبارسنجی نتایج، مطابق شکل (۱۶) یک منحنی سرعت متفاوت از حد فاصل ایستگاه سرخس تا مرزداران در نظر گرفته شده است. قطار از ایستگاه سرخس حرکت کرده و با عبور از ایستگاه گنبدلی و رباط شرف، جهت مبادله مامور در ایستگاه مرزداران متوقف می‌گردد. بدلیل شرایط خاص این مسیر، حداکثر سرعت سیر قطارهای مسافری کمتر از ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت می‌باشد.



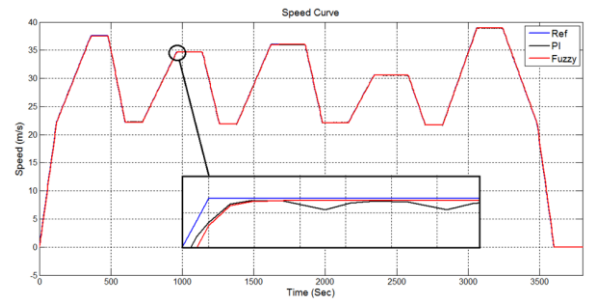
شکل ۱۳- منحنی‌های سرعت مرجع، فازی و PI در حالت سوم



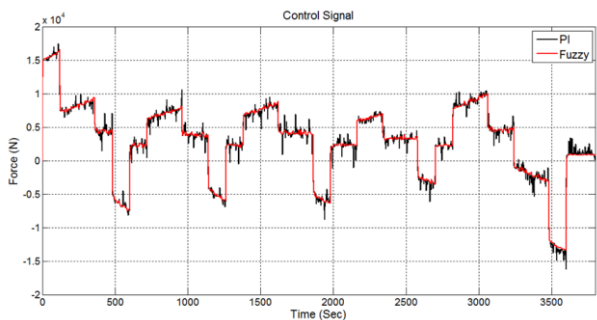
شکل ۹- عملکرد نرم کنترل کننده فازی در تغییرات شتاب



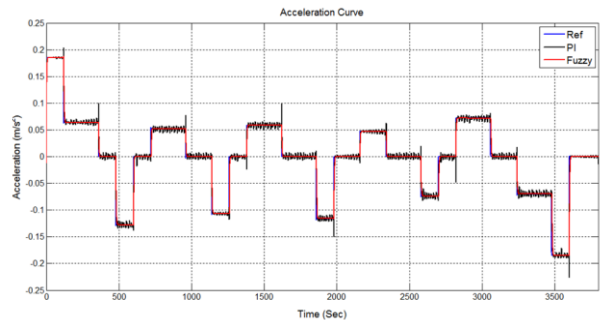
شکل ۱۴- منحنی‌های شتاب مرجع، فازی و PI در حالت سوم



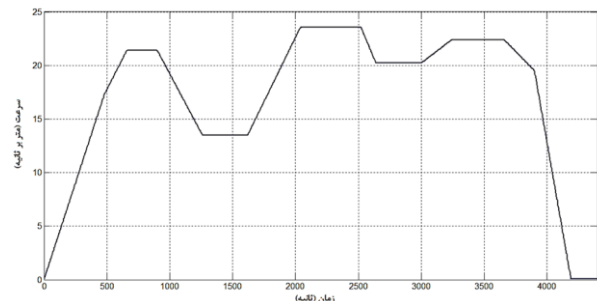
شکل ۱۰- منحنی‌های سرعت مرجع، فازی و PI در حالت دوم



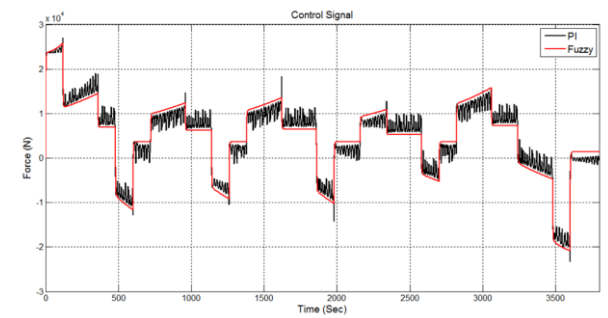
شکل ۱۵- سیگنال‌های کنترلی فازی و PI در حالت سوم



شکل ۱۱- منحنی‌های شتاب مرجع، فازی و PI در حالت دوم



شکل ۱۶- منحنی سرعت جدید برای مسیر سرخس تا مرزداران



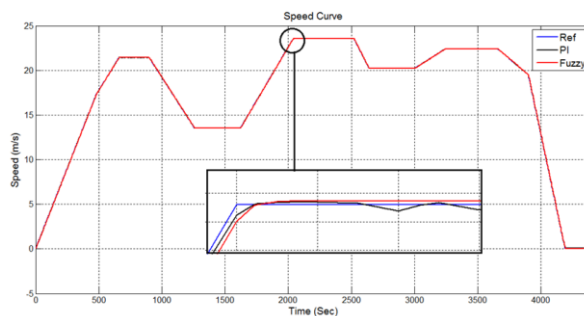
شکل ۱۲- سیگنال‌های کنترلی فازی و PI در حالت دوم

۴- نتیجه گیری

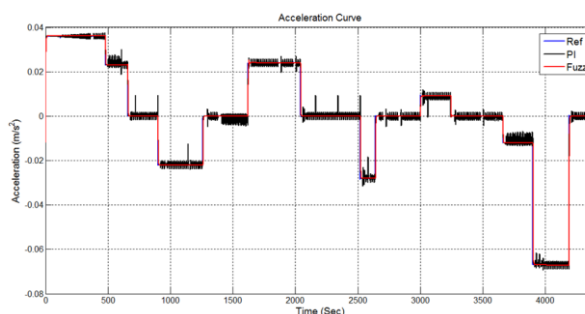
در این مقاله هدف طراحی یک سیستم کنترل خودکار برای قطار بود. به همین منظور معادلات دینامیکی یک لکوموتیو ER24PC استخراج گردید و یک منحنی سرعت تعاملی برای آن معرفی شد. با توجه به وجود عدم قطعیت در متغیرهای وزن و درصد وزنی ترمز لکوموتیو به سراغ کنترل کننده فازی برای کنترل سیستم رفتیم. کنترل کننده فازی طراحی شده که از موتور استنتاج ممدانی حداقل استفاده می کند در سه حالت مختلف شبیه سازی و نتایج آن با یک کنترل کننده PI مقایسه گردید. به عنوان یک راهکار نوین، از متغیرهای جرم و درصد وزنی ترمز لکوموتیو بعنوان پس فیلتر فازی و همچنین ضرایب PI استفاده شد تا کنترل کننده ها به ازای تغییر شرایط قطار به روز گردند. نتایج نشان دادند که کنترل کننده فازی علاوه بر عکس العمل نرم با سرعت مطلوب در تغییرات شتاب، منحنی سرعت پیشنهادی را به خوبی دنبال می کند. کنترل کننده فازی با استفاده از فاکتور TV در مقایسه با کنترل کننده PI تا ۸۳ درصد انرژی کمتری مصرف می نماید که عدد قابل توجهی می باشد. همچنین، کنترل کننده فازی در مقابله با یک نویز تصادفی ورودی به سیستم تلاش بیشتری کرده است.

۶. پی نوشتها

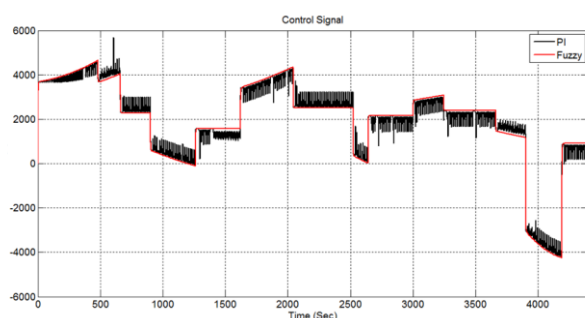
1. Automatic Train Control
2. Automatic Train Operation
3. Exact Online Programming Driving
4. Inexact Online Programming Driving
5. Total Variation



شکل ۱۷- منحنی های سرعت مرجع، فازی و PI برای مسیر سرخس تا مرزداران



شکل ۱۸- منحنی های شتاب مرجع، فازی و PI برای مسیر سرخس تا مرزداران



شکل ۱۹- سیگنال های کنترلی فازی و PI برای مسیر سرخس تا مرزداران

مراجع

- Belman-Flores, J. M., Rodríguez Valderrama, D. A., Ledesma, S., García-Pabón, J. J., Hernández, D., & Pardo-Cely, D. M. (2022). A review on applications of fuzzy logic control for refrigeration systems. *Applied Sciences*, 12(3), 1302.
- Cheng, R., Chen, D., Cheng, B., & Zheng, S. (2017). Intelligent driving methods based on expert knowledge and online optimization for high-speed trains. *Expert Systems with Applications*, 87, 228-932
- Dong, H., Lin, X., Yao, X., Bai, W., &

- Ning, B. (2018). Composite Disturbance Observer Based Control and H_∞ Control for High Speed Trains with Actuator Faults. *Asian Journal of Control*, 20(2), 735-745.
- Dubey, V., Goud, H., & Sharma, P. C. (2022). Role of PID control techniques in process control system: a review. *Data Engineering for Smart Systems: Proceedings of SSIC 2022*, 659-670.
 - Huba, M., & Vrancic, D. (2022). Tuning of PID control for the double integrator plus dead time model by modified real dominant pole and performance portrait methods. *Mathematics*, 10(6), 971.
 - Liu, Y., Fan, K., & Ouyang, Q. (2021). Intelligent traction control method based on model predictive fuzzy PID control and online optimization for permanent magnetic maglev trains. *IEEE Access*, 9, 29032.64092
 - Madhava, M., Meghana, N., Supriya, M., & Naval Gund, S. S. (2016). Automatic Train Control System Using Fuzzy Logic Controller. *Bonfring International Journal of Research in Communication Engineering*, 6, 56-16
 - Maharan Eneniering Co. (2006). Mashad-Bafgh Electrical Interlocking System, 1-26 (in persian)
 - Maharan Eneniering Co. (2011). Automatic Train Control System, 1-35 (in persian)
 - Mousavi, A., Markazi, A. H., & Masoudi, S. (2017). Adaptive fuzzy sliding-mode control of wheel slide protection device for ER24PC locomotive. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 14, 20192045.
 - Pu, Q., Zhu, X., Liu, J., Cai, D., Fu, G., Wei, D., & Zhang, R. (2020). Integrated optimal design of speed profile and fuzzy PID controller for train with multifactor consideration. *IEEE Access*, 8, 152146-152160.
 - Railway Research & Education Group (2013). A review on Railway Signalling Systems, 1-59 (in persian)
 - Utomo, R. D., & Widiyanto, E. D. (2015, October). Control system of train speed based on fuzzy logic controller. In *2015 2nd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)* (pp. 256261). IEEE.
 - Wang, S. C., & Xia, X. (2003). Mathematical modelling of heavy-ore load train equipped with electronically control pneumatic brake, *Department of Electrical, Electronic and Computer Engineering*, University of Pretoria.
 - Zhou, Y., Yang, X., & Mi, C. (2013). Model predictive control for highspeed train with automatic trajectory configuration and tractive force optimization. *CMES Comput. Model. Eng. Sci*, 90(6), 415-734

Designing an automatic train control system suitable for Iranian railway – conditions using fuzzy control with an approach to reducing energy consumption

Hossein Rezaeian¹

ABSTRACT

The increase of railway traffic and the need for higher speeds have burdened the task of train drivers more than before. Factors such as reducing accidents, increasing safety and passenger comfort, optimizing and managing energy consumption, have forced the traditional and driver-based control and signalling system to move towards Automatic Train Control (ATC) systems. In our country, the locomotives have been equipped with ATC system for about a decade. In this thesis, the aim is to design an ATC system suitable for the conditions of Iranian railways using fuzzy logic. For this purpose, the model of a locomotive with ER24PC locomotive parameters has been described to solve the problem mathematically and with simulating. The speed profile of passenger trains with top drivers that traveling on the Mashhad-Kashmar route was extracted through ATC system logs to satisfy the passenger comfort. Fuzzy controller is proposed in order to automatically control the train, which includes three stages of acceleration, deceleration and braking. The goals of this controller is to track the desired speed profile and reduce energy consumption, and its performance has been compared with a classical PI controller. As an innovative solution for updating the controllers according to train condition changes, the locomotive's mass and brake weighted percentage were used as fuzzy output filter and PI coefficients. The results of the simulations that performed with MATLAB software shown an 83% reduction in energy consumption and also a better performance of the fuzzy controller in dealing with the system's input noise. By considering another speed profile from Sarkhes station to Marzdaran, the validity of the results has been confirmed.

Keywords: Automatic Train Control, Fuzzy controller, Locomotive, Energy Consumption
