

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

حسین رضاییان^۱

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 (ATC(1) 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. 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 کننده‌ها به ازای تغییر شرایط قطار به روز گردند. نتایج شبیه‌سازیها که با نرم افزار MATLAB انجام گرفته، کاهش ۳۸ 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 شبیه‌سازی ها، اعتبار نتایج تایید گردیده است.

دریافت مقاله:

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۲۰

کلمات کلیدی: قطار هوشمند، کنترل فازی، کاهش مصرف انرژی، بهینه سازی

برداری از سیستم ATC در محور مشهد- تهران در سال ۳۱۳۱، امکان استفاده از سیستم بلاک میانی فراهم گردید که ظرفیت خطوط را تا دو برابر افزایش میدهد. 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.,

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 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

^۱ * پست الکترونیک نویسنده مسئول:

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

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 اویانگ (۲۰۰۳) به کنترل هوشمند ترکشن براساس کنترل PID فازی پیشبین و بهینه سازی برخط آن برای قطارهای مغناطیسی پرداختند. آنها جهت بهبود عملکرد روال کنترل سیستم عملکرد خودکار قطار (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 ۳۱/۶ درصدی مصرف انرژی، کاهش دقت توقف تا ۵ سانتیمتر و افزایش راحتی سفر تا ۶۳ درصد نسبت به روشهای کنترلی MPC ، $PID.F-PID$ و $M-F-PID$ شده است (Fan, K., & Ouyang, , Liu, Y., 2021).
Q. پپو و همکاران (۲۰۲۲) به طراحی بهینه منحنی سرعت و ارائه یک کنترل کننده PID فازی با هدف دستیابی به بهینه سازی 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 ۱ متروی پکن جمع آوری شده و نتایج پژوهش کاهش ۳۲/۴ درصدی مصرفی انرژی نسبت به حالت فعلی را نشان میدهد (PU, Q., et.al., 2020).
Dong, H., et.al., 2018).
چنگ و همکاران (۲۰۲۲)، به ارائه روشهای راهبری هوشمند براساس دانش کارشناسان و بهینهسازی برخط برای قطارهای پر سرعت 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 ($EOPD$)^۱ و برنامه ریزی راهبری برخط غیر دقیق ($IOPD$)^۲ 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 نسبت به کنترل کنندههای سنتی دارد. از طرفی $IOPD$ نسبت به $EOPD$ تغییر حالتهای حرکتی بیشتری داشته اما از نظر زمانبندی بهتر عمل کرده است (Cheng, R., et.al., 2017).
مدوا و همکاران (۲۰۲۳) 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 (۲۰۲۳)، با هدف کنترل سرعتقطار یک کنترل کننده فازی با استفاده از منطق ممدانی وفازیگر 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

سیستم حلقه بسته از روش لیپانوف اثبات گردیده و نتایج شبیهسازی عددی، کارایی مطلوب کنترل H_{∞} را نشان میدهد (Dong, H., et.al., 2018).
چنگ و همکاران (۲۰۲۲)، به ارائه روشهای راهبری هوشمند براساس دانش کارشناسان و بهینهسازی برخط برای قطارهای پر سرعت 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 ($EOPD$)^۱ و برنامه ریزی راهبری برخط غیر دقیق ($IOPD$)^۲ 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 نسبت به کنترل کنندههای سنتی دارد. از طرفی $IOPD$ نسبت به $EOPD$ تغییر حالتهای حرکتی بیشتری داشته اما از نظر زمانبندی بهتر عمل کرده است (Cheng, R., et.al., 2017).
مدوا و همکاران (۲۰۲۳) 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 (۲۰۲۳)، با هدف کنترل سرعتقطار یک کنترل کننده فازی با استفاده از منطق ممدانی وفازیگر 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., & Widianto, 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

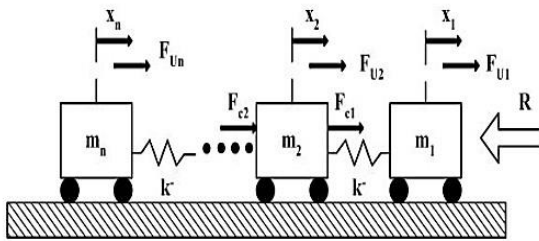
بعنوان کشنده رایج در قطارهای مسافری کشور در آن استفاده شده است. در آرایش یک قطار همواره نوع و تعداد کشندهها و واگنها بر وزن و درصد وزنی ترمز قطار تاثیر گذارند که دو عامل مهم در بحث کنترل (شتابگیری و ترمز) هستند. بنابراین در بحث کنترل یک قطار عدم قطعیت در متغیرها وجود دارد. به همین منظور یک کنترل کننده 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. مدلسازی

محرك یک قطار، لکوموتیو آن است و تمام تجهیزات کنترلی قطار بر روی لکوموتیو نصب میگردد. بنابراین ابتدا به

مدلسازی 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 ۳) نشان داده شده است (Wang, S. C., & Xia, X., 2003).



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

نیروی ترکشن F_{ui} ، نیروهای داخلی F_{ei} ، ضریب K چسبندگی x_i ، موقعیت m_i ، وزن R و نیروی مقاوم بر قطار هستند. نیروی مقاوم به دو بخش نیروی کشش آیرودینامیکی R_a و نیروی مقاوم غلطشی R_r تقسیمبندی میشود. معادلات حاکم بر روی یک لکوموتیو (۱) است: و با در نظر گرفتن نیروهای ترکشن و مقاوم بصورت رابطه)

$$m\ddot{x} = u - R = R^r + R^a = C_0 + C_v V + C_a V^2 \quad (3)$$

در معادله (۳)، m وزن لکوموتیو، \ddot{x} مشتق دوم ماتریس حالتها و V سرعت لکوموتیو هستند. بخش دوم معادله (۳)، معادله دیویس نامیده میشود که ضرایب آن یعنی C_0 ، C_v و C_a از تست باد حاصل میشوند (Wang, S. C., & Xia, X., 2003; Dong, H., 2018). با تعریف x بعنوان موقعیت و \dot{x} بعنوان سرعت در معادله (۳) داریم:

ذخیره شده و در نهایت بصورت فایل کد ATC صنعتی سیستم استخراج میگردد. در این مقاله از ATC شده تحت عنوان لاگ قطارهای مسافری مشهد- تهران با ATC اطلاعات لاگ

راهبران منتخب در بازهی ۰۵ تا ۰۱ مرداد ۳۴۲۰ 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 ۳۴۲ کیلومتر بر ساعت و حداکثر سرعت عبور از ایستگاه ۱۲ کیلومتر بر ساعت است. شکل) ۰ (منحنی سرعت طراحی شده را نشان میدهد.

۳. کنترل کننده

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., 1102).

$$\begin{aligned} x &= x_1 \\ \dot{x} &= \dot{x}_1 = x_2 \\ \ddot{x} &= \dot{x}_2 = \frac{1}{m} F_u - (C_0 + C_v V + C_a V^2) \\ F_u &= u \end{aligned} \quad (۰)$$

ER24PC

دول ۱- پارامترهای لکوموتیو

پارامتر	مقدار	واحد
m	۲۶۱۴۳	kg
C ₀	۳/۲۶×۳۲ ^{-۰}	N/kg
C _v	۱/۱۵×۳۲ ^{-۴}	N.s/m.kg
C _a	۰/۱۵×۳۲ ^{-۵}	N.s ² /m ² .kg

لکوموتیو رایج برای قطارهای مسافری در ایران

ER24PC

(ایران رانر) میباشد که دارای حداکثر سرعت

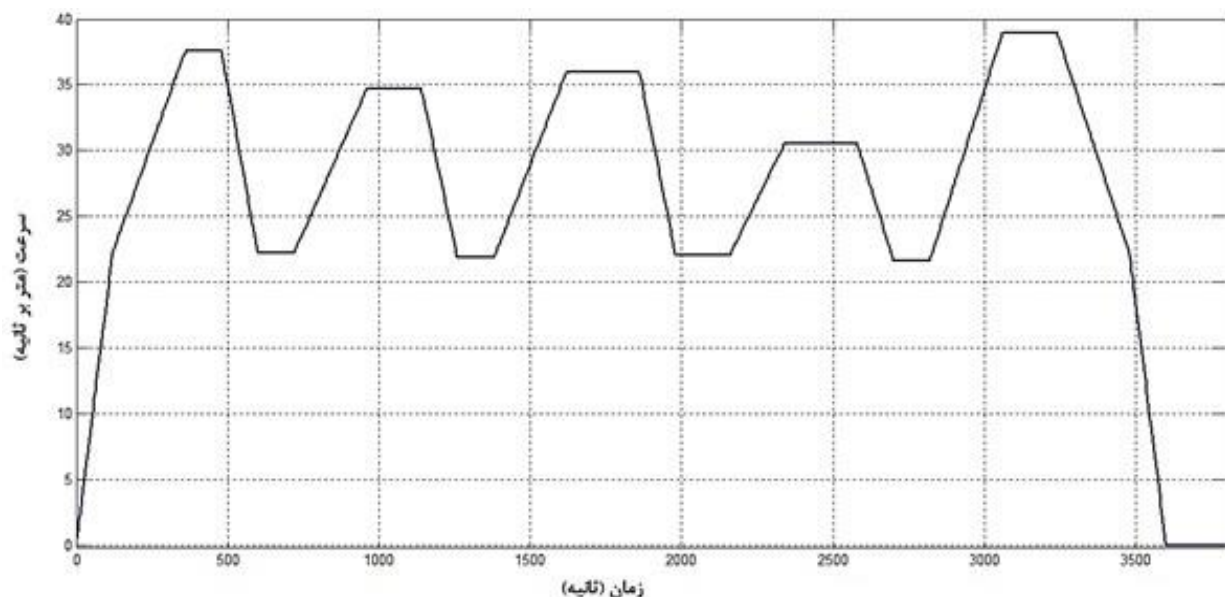
۳۶۲ کیلومتر بر ساعت و درصد وزنی ترمز ۳۵۲ است که از آزمایش ترمز راهآهن حاصل شده است. دادههای مورد نیاز اینلکوموتیو برای رابطی) ۰ (در جدول) ۳ آورده شده است

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 اقدام میکنند. به این ATC ارسال اطلاعات سرعت به سیستم ترتیب منحنی سرعتی ایجاد شده که در نقاط مختلفی به روز میگردد. اطلاعات لحظهای سرعت قطار در حافظهی رایانههای

شکل ۲- منحنی سرعت مطلوب قطار



در رابطهی ۱) معادله‌ی یک کنترل کننده PI را نشان میدهد که در آن سیگنال خطا و سیگنال کنترلی است (Dubey, V., Goud, H., & Sharma, P. C., 2022).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (1)$$

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 ۳۳۱۲ بر میگردد. اولین سیستم کنترل پیشرفته قطار که بصورت عملیاتی پیاده‌سازی گردید، برای متروی سن‌دای ژاپن به کمک منطق فازی در سال ۳۳۱۲ بود. سرعتگیری و ترمز گیری نرمو همچنین کاهش مصرف سوخت از جمله نتایج کنترل با

منطق فازی بود (Zhou, Y., Yang, X., & Mi, C., 2013).

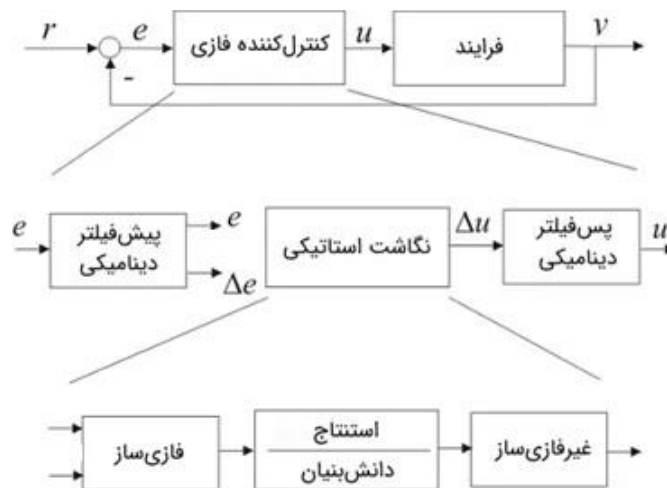
در این مقاله نیز فرآیند کنترل قطار به کمک منطق فازی انجام گرفته که شکل بلوکی آن در شکل ۱) نمایش داده شده

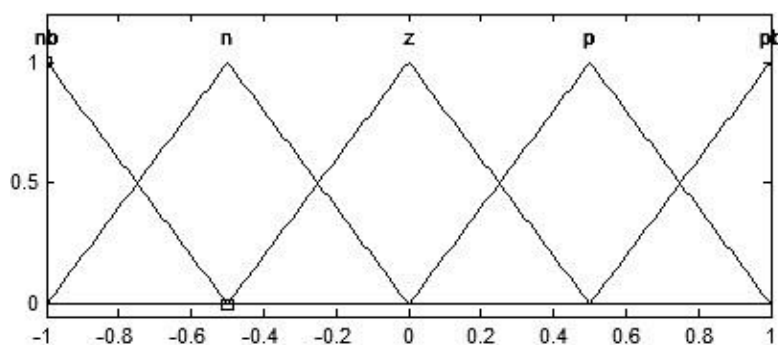
است. جهت سادگی محاسبات از فازیگر تکین، فازی‌دای میانگین مرکز، توابع عضویت مثلثی و موتور ممدانی حداقل استفاده شده است) (Belman-Flores, J. M., et.al., 2022).

۲۰۲۲ (ورودیهای کنترلکننده فازی، خطا) e (و مشتق خطا \dot{e}) در نظر گرفته شده که در بازهی [۳- و ۳] نرمال گردیده‌اند. باتوجه به هدف کنترل سرعت، سیگنال خطا از جنس سرعت است. خروجی کنترل کننده سیگنالهای نرمال

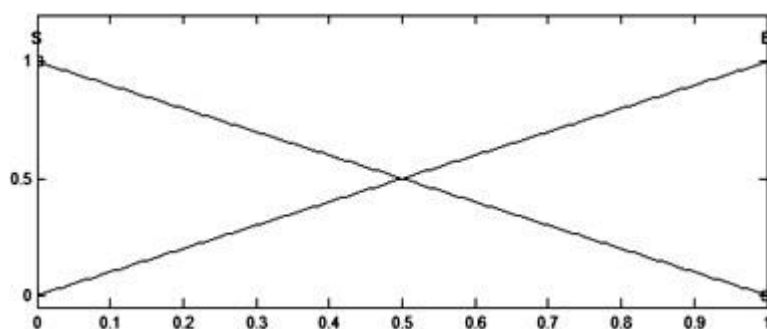
شدهی K_p و K_s به ترتیب برای کنترل خطا و انتگرال خطا هستند. پیش فیلتر کنترل کننده فازی، همان سیگنالهای خطا و مشتق خطای نرمال شده هستند. در پس فیلتر کنترل کننده فازی، جرم لکوموتیو بعنوان ضریب K_s و درصد وزنی ترمز بعنوان ضریب K_p بصورت تجربی انتخاب شده‌اند. مهم‌ترین مزیت این انتخاب آن است که چون در هنگام 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 ۰) نشان داده شده است.

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





شکل ۴- توابع عضویت



شکل ۵- توابع عضویت K_P و K_S

جدول ۲- پایگاه قواعد فازی

$e \setminus \dot{e}$	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

سیگنال گسسته n نقطه‌های $X(n)$, $1 \leq n \leq N$ بصورت

رابطه

(Huba, M., & Vrancic, D., (تعریف میشود) ۴)

:2022)

$$(X) = \sum_{n=2}^N |X(n) - X(n-1)| \quad (۴)$$

۴. شبیه سازی و نتایج

در این بخش عملکرد کننده‌های فازی و PI در بحث کنترل خودکار قطار از طریق شبیه‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌منظور مقایسه بهتر دامنه نوسانات سیگنال کنترلی در هر دو کنترل کننده، از معیار TV^0 استفاده شده است. TV یک

به منظور بررسی دقیقتر عملکرد کنترل کنندهها، شبیهسازها در ۱ حالت مختلف انجام شده است:

- **حالت اول:** منحنی سرعت کامل به سیستم اعمال شده است.
- **حالت دوم:** وزن قطار به ۳۰۲ تُن و درصد وزنی ترمز به ۳۲۲ تغییر میکند.
- **حالت سوم:** یک سیگنال نویز تصادفی با میانگین صفر و انحراف معیار ۰ به ورودی سیستم وارد شده است.

در تمامی حالتها، نمودار سرعت، شتاب و سیگنال کنترلی ترسیم شده و TV_{PI} سیگنالهای کنترلی محاسبه شدهاند.

باتوجه به نمودارهای شکل (۶-۱) میتوان دید که کنترل کننده فازی از نظر تعقیب منحنی سرعت، شتابگیری و سیگنال کنترلی بسیار نرم عمل کرده است. همچنین مقادیر $TV_{Fuzzy} = ۳۲۱۶۲۲$ و $TV_{PI} = ۳۲۲۲۳۲$ بدست آمده است که مشخص است تلاش کنترلی فازی ۱۲ 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 (۳) مبینیم که کنترل کننده فازی سعی کرده تغییرات شتاب را ملایمتر نماید.

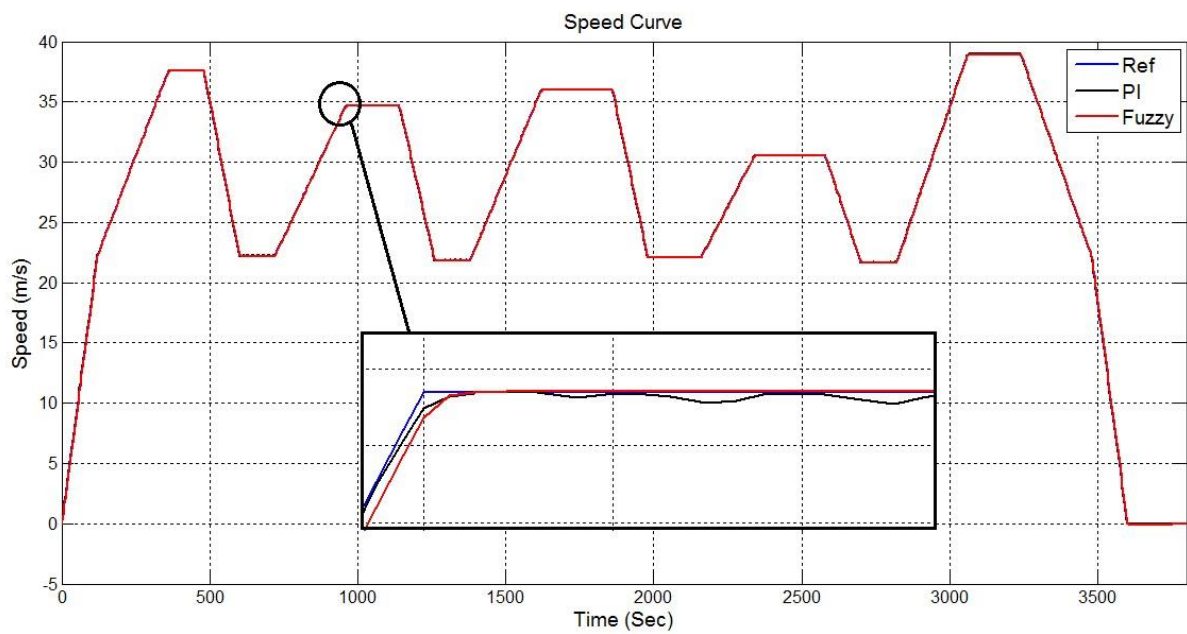
در حالت دوم مطابق شکلها (۳۲-۳۰)، منحنیهای سرعت و شتاب نسبت به حالت اول تغییر قابل ملاحظه‌ای نداشتند. اما همانطور که ملاحظه میشود، تلاش کنترلی بیشتری صورت گرفته است که مقادیر $TV_{Fuzzy} = ۰۲۱۲۲۲$ و $TV_{PI} = ۳۶۰۲۰۲۲$ گواه این موضوع هستند. باتوجه به افزایش جرم لازم است جهت شتابگیری نیروی بیشتری مصرف گردد. همچنین باتوجه به کاهش درصد ترمزی نیز برای توقف باید تلاش بیشتری صورت گیرد. در این حالت نیز کنترلر فازی ۱۱ درصد کمتر از PI انرژی مصرف کرده است.

در حالت سوم همانطور که از شکلها (۳۱-۳۵) ملاحظه میشود، منحنی سرعت بخوبی دنبال شده اما سیگنالهای کنترلی و شتاب از نویز تاثیر پذیرفتهاند. مقادیر $TV_{Fuzzy} = ۰۱۰۲۲۲$ و $TV_{PI} = ۱۲۲۳۱۲$ بدست آمدهاند که نشان میدهد تلاش کنترلکننده فازی نسبت به حالت اول حدود ۵۱ درصد افزایش داشته است که حاکی از عملکرد بهتر کنترل کننده فازی برای مقابله با نویز است.

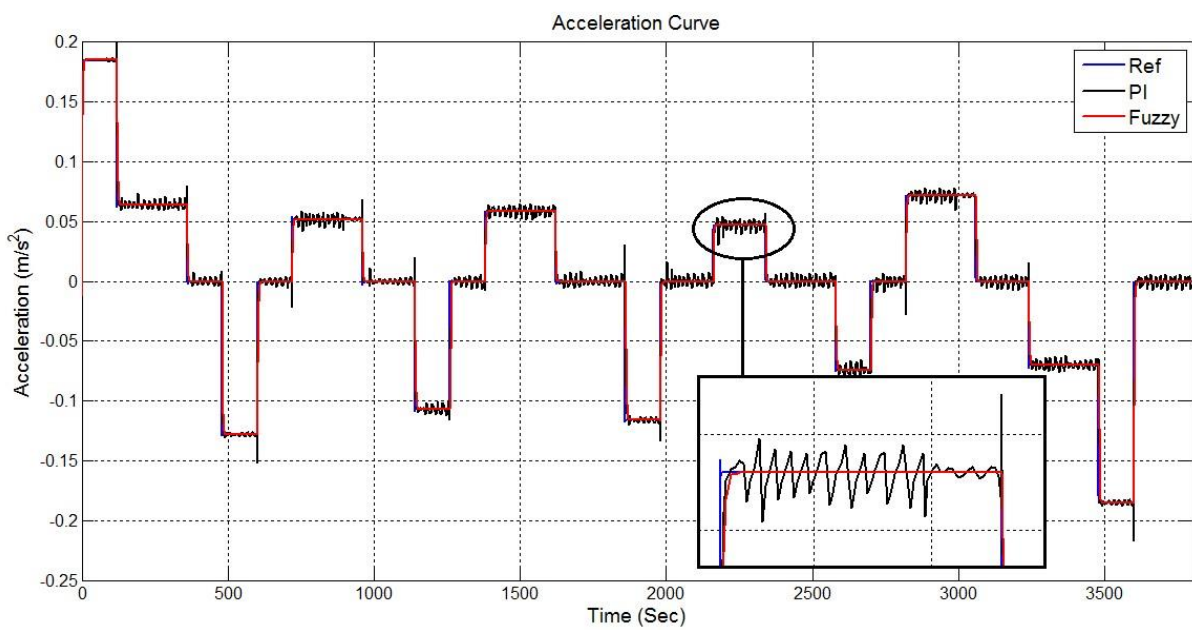
به منظور اعتبارسنجی نتایج، مطابق شکل (۳۶) یک منحنی سرعت متفاوت از حد فاصل ایستگاه سرخس تا مرزداران در نظر گرفته شده است. قطار از ایستگاه سرخس حرکت کرده و با عبور از ایستگاه گنبدلی و رباط شرف، جهت مبادله مامور در ایستگاه مرزداران متوقف میگردد. بدلیل شرایط خاص این مسیر، حداکثر سرعت سیر قطارهای مسافری کمتر از ۳۲۲ کیلومتر بر ساعت میباشد.

شبیه سازی به ازای متغیرهای حالت اول انجام گردیده است. مطابق شکلها (۳۲-۳۱) در حالت جدید نیز، منحنی سرعت بخوبی دنبال شده و کنترل کننده فازی دارای عملکرد نرم در شتاب و تلاش کنترلی است. مقادیر $TV_{Fuzzy} = ۱۴۵۳۴$ و $TV_{PI} = ۴۴۳۴۶۲$ حاصل شدهاند که نشان میدهد کنترل کننده فازی حدود ۳۰ درصد کمتر از PI انرژی مصرف کرده است.

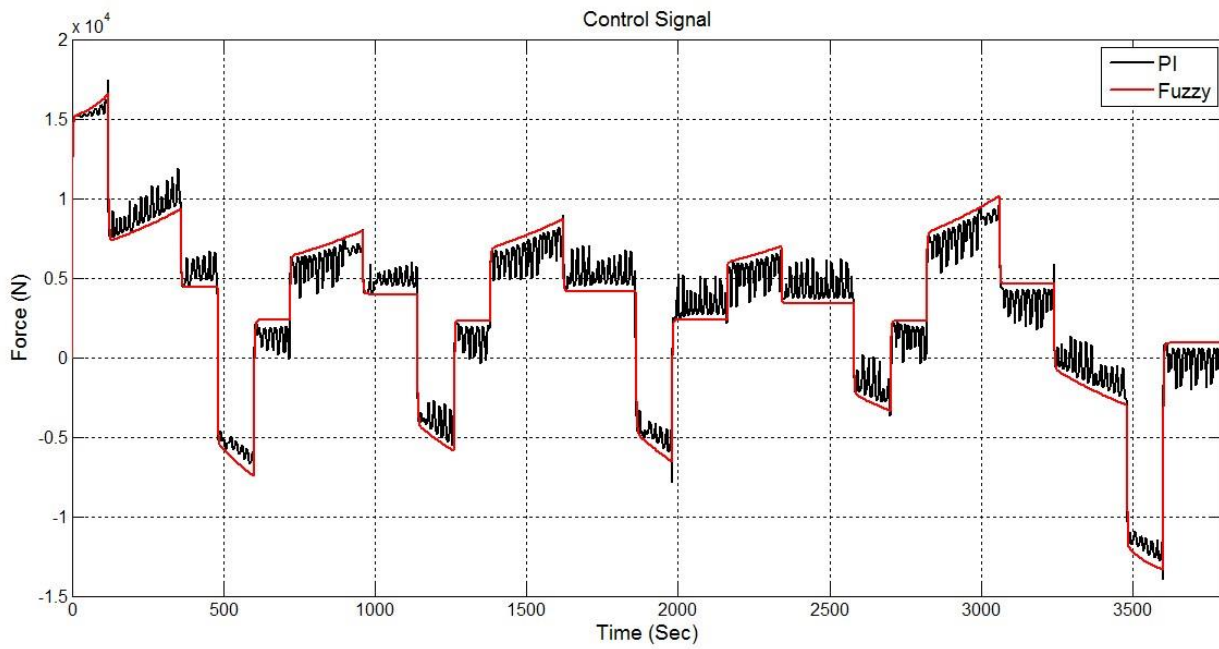
در شبیه سازی های انجام شده با توجه به اینکه اثر وزن بار، شیب مسیر، وزن مسافر و... در نظر گرفته نشده است بنابراین استفاده از فازی نوع ۲ با توجه به در نظر گرفته شدن عدم قطعیت مفید به نظر می رسد و می توان در مطالعات بعدی از مدل فازی نوع ۲ استفاده کرد. همچنین با بهینه سازی توابع عضویت و انتخاب بهینه پارامترها با روش های شبکه عصبی یا الگوریتم های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک و PSO می توان چترینگ را کاهش داد.



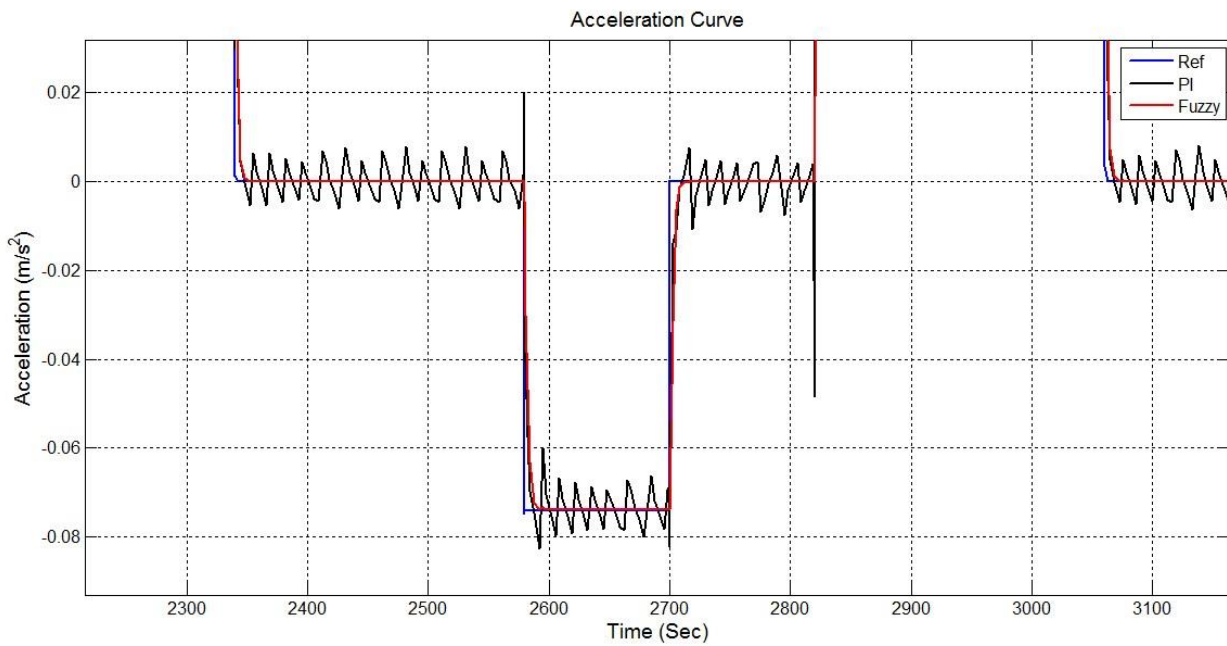
شکل ۶- منحنیهای سرعت مرجع، فازی و PI در حالت اول



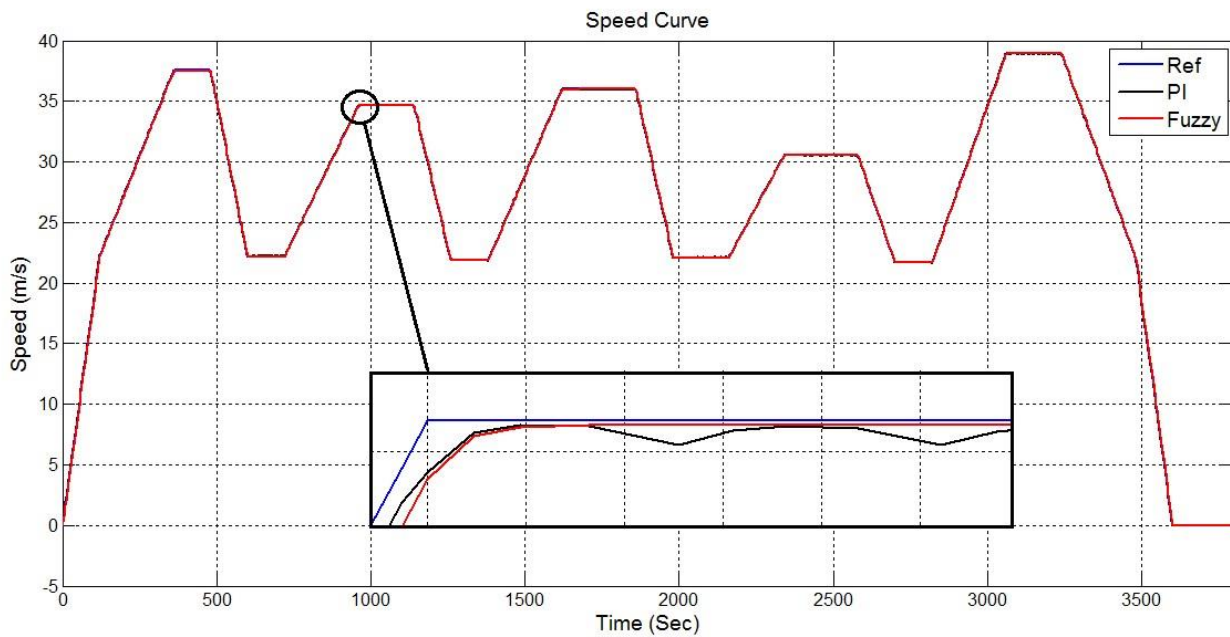
شکل ۷- منحنیهای شتاب مرجع، فازی و PI در حالت اول



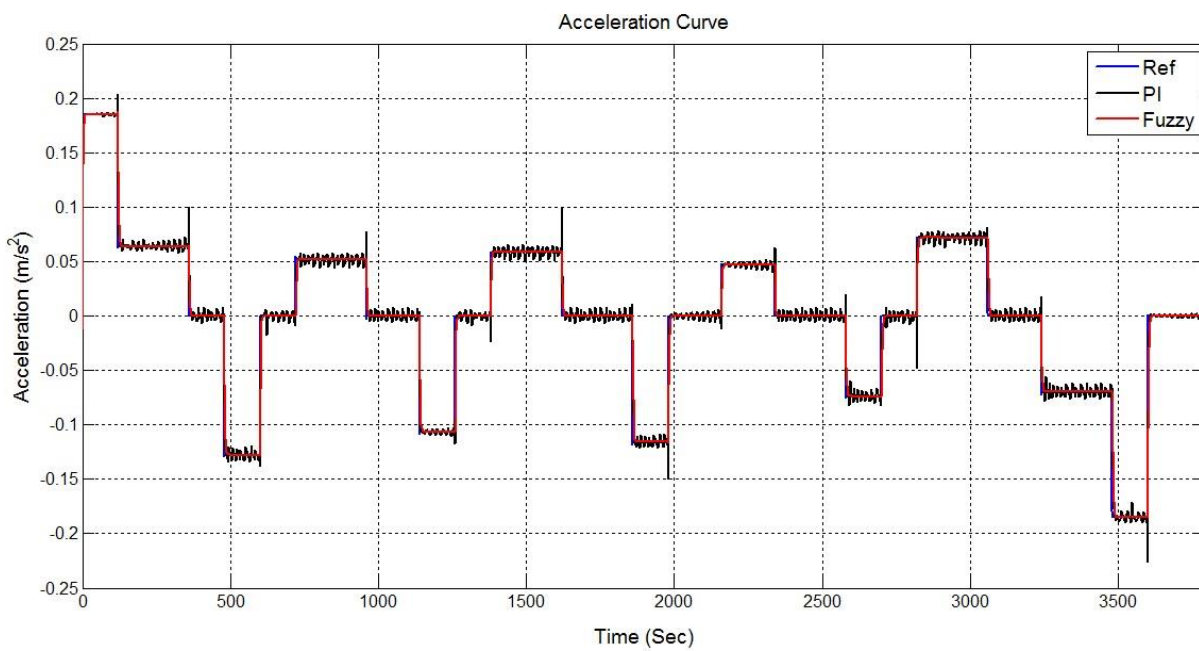
شکل ۸- سیگنالهای کنترلی فازی و PI در حالت اول



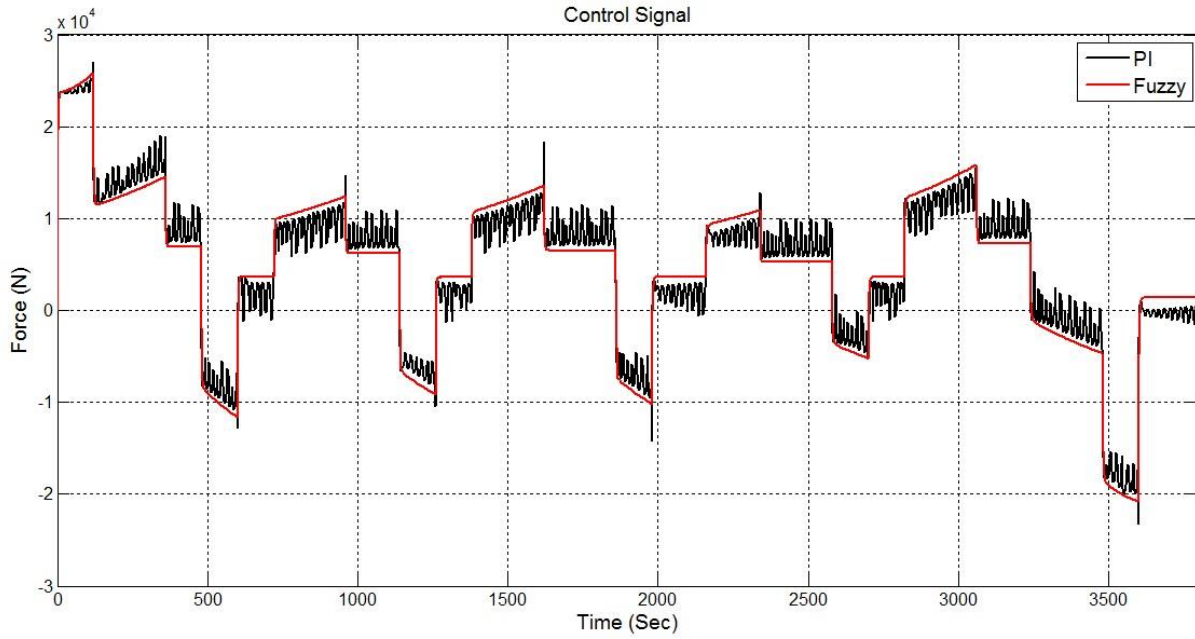
شکل ۹- عملکرد نرم کنترل کننده فازی در تغییرات شتاب



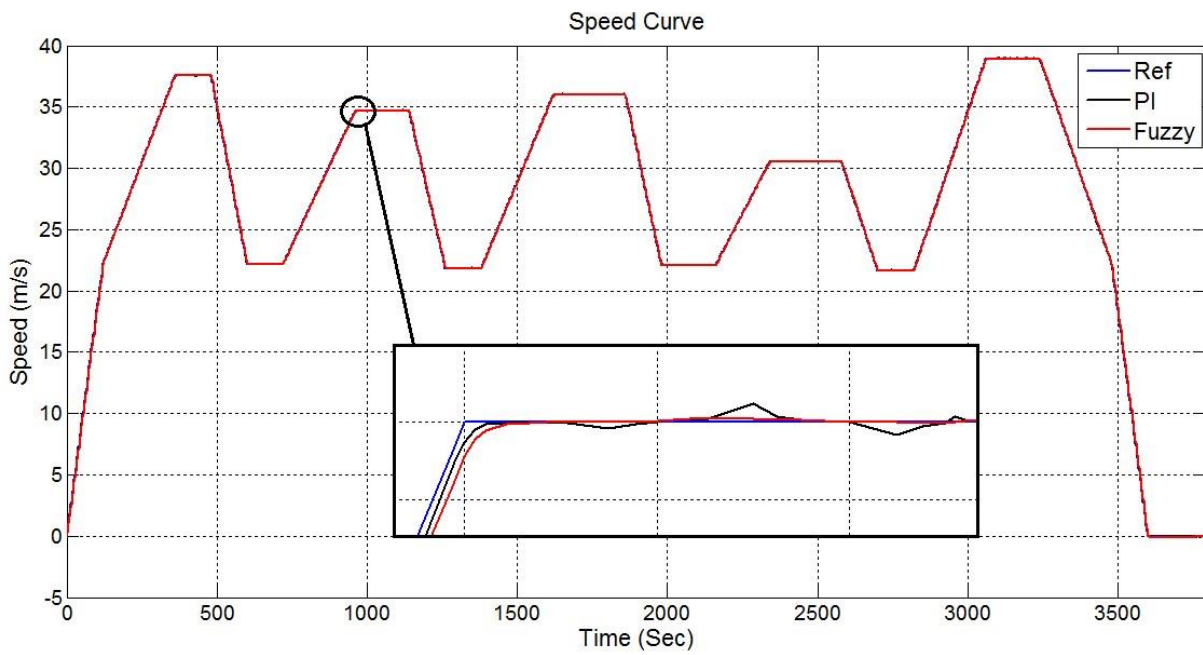
شکل ۱۱- منحنیهای سرعت مرجع، فازی و PI در حالت دوم



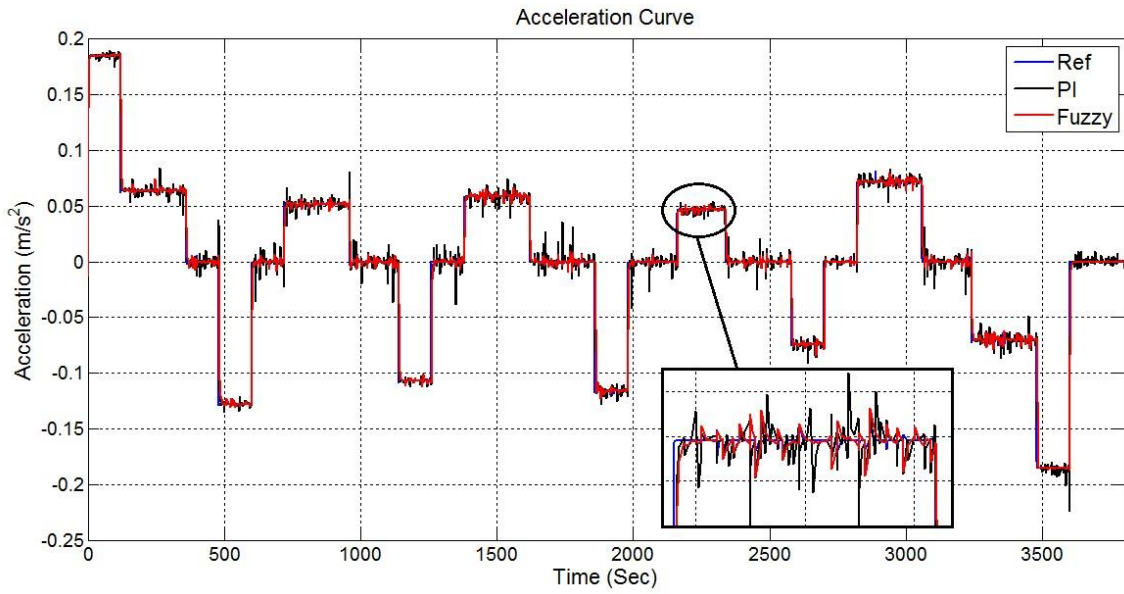
شکل ۱۱- منحنیهای شتاب مرجع، فازی و PI در حالت دوم



شکل ۱۲- سیگنالهای کنترلی فازی و PI در حالت دوم

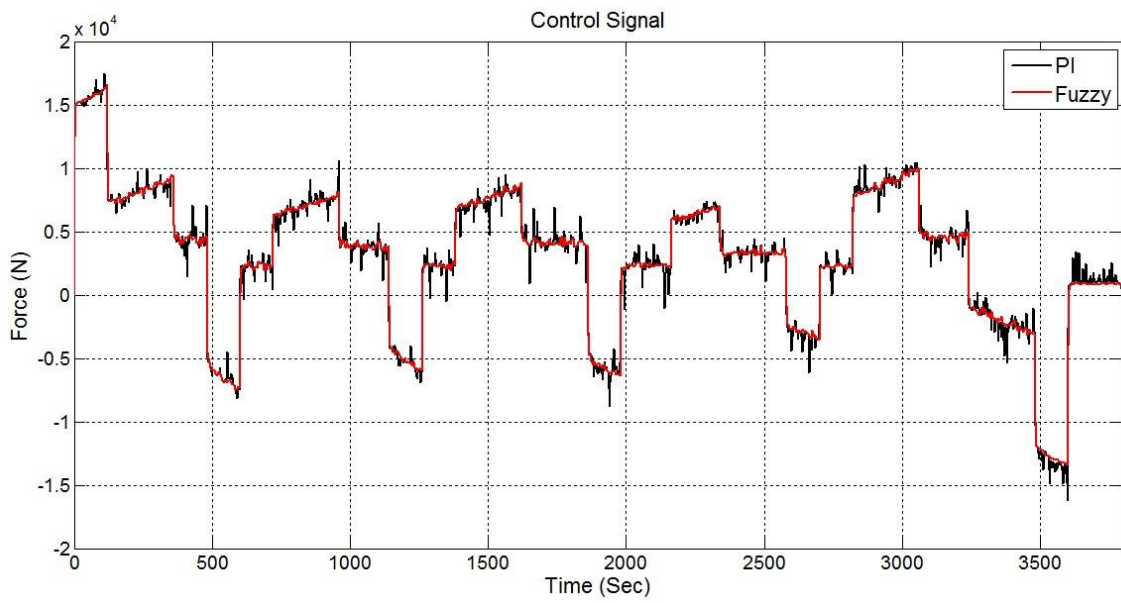


شکل ۱۳- منحنیهای سرعت مرجع، فازی و PI در حالت سوم

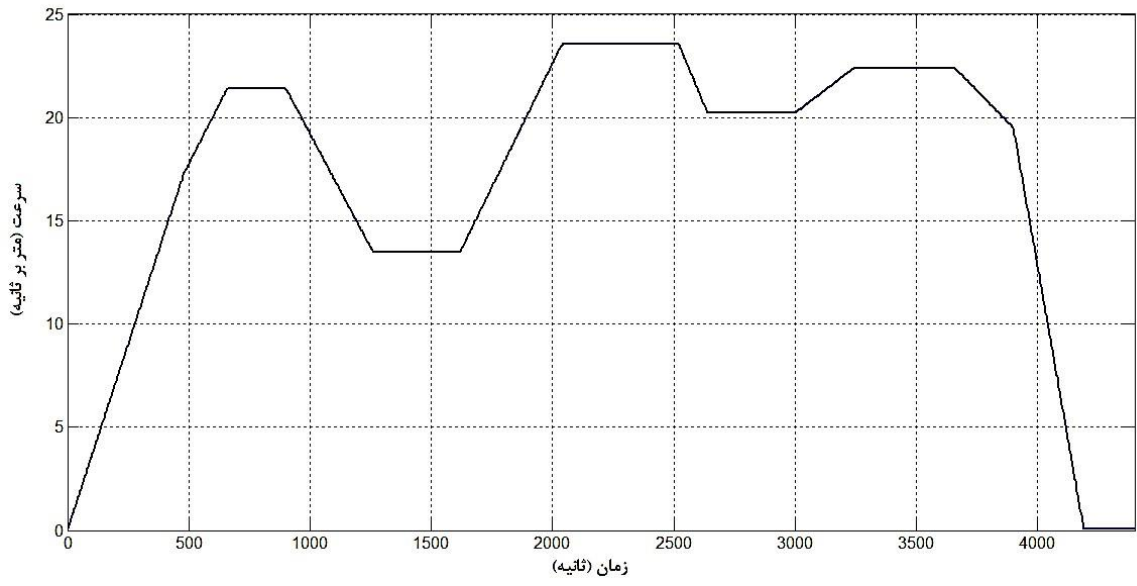


11

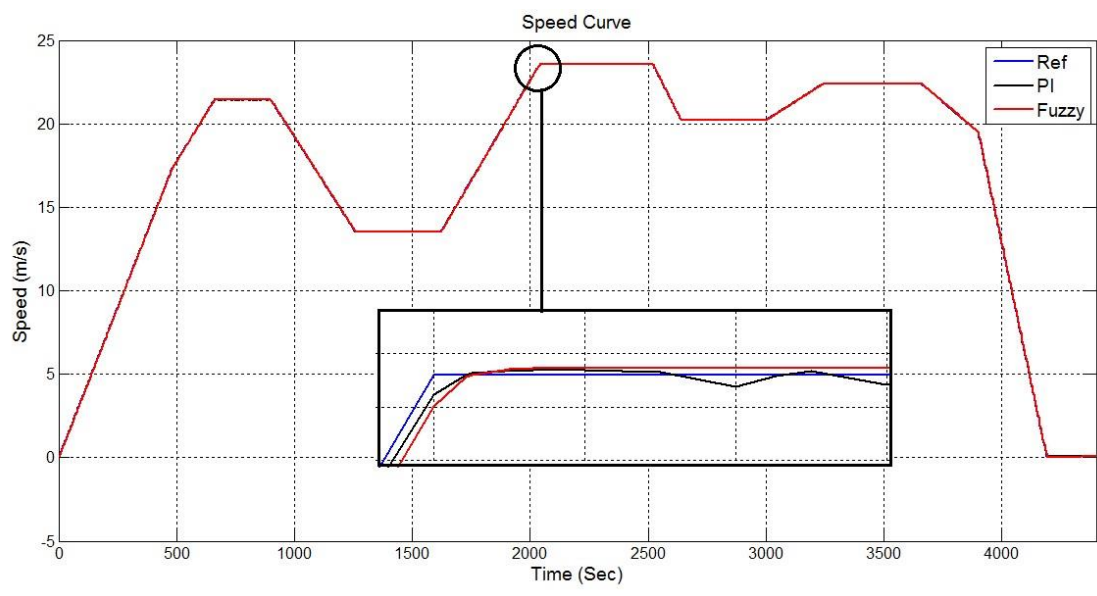
شکل ۱۴- منحنیهای شتاب مرجع، فازی و **PI** در حالت سوم



شکل ۱۵- سیگنالهای کنترلی فازی و **PI** در حالت سوم

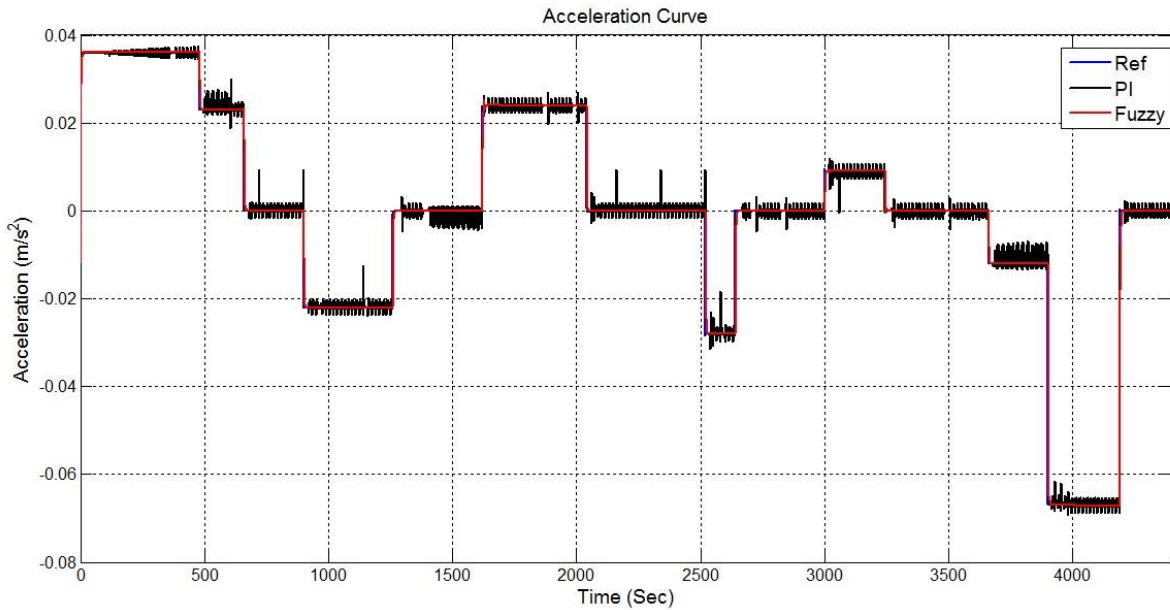


شکل ۱۶- منحنی سرعت جدید برای مسیر سرخس تا مرزداران

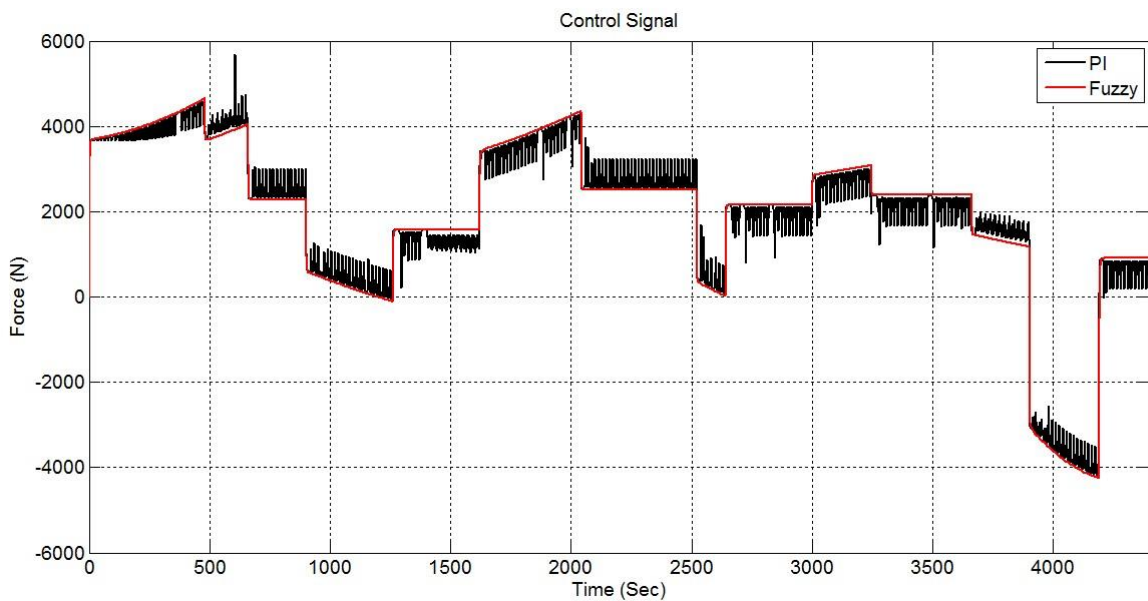


شکل

۱۷- منحنیهای سرعت مرجع، فازی و **PI** برای مسیر سرخس تا مرزداران



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



شکل ۱۸- سیگنالهای کنترلی فازی و PI برای مسیر سرخس تا مرزداران

کنترلکننده فازی برای کنترل سیستم رفتیم. کنترل کننده فازی طراحی شده که از موتور استنتاج ممدانی حداقل استفاده میکند در سه حالت مختلف شیبسازی و نتایج آن با یک کنترلکننده PI مقایسه گردید. بهعنوان یک راهکار نوین، از متغیرهای جرم و درصد وزنی ترمز لکوموتیو بعنوان پس فیلتر فازی و همچنین ضرایب PI استفاده شد تا کنترلکنندهها به ازای تغییر شرایط قطار بهروز گردند. نتایج نشان دادند که کنترل کننده فازی علاوه بر عکسالعمل نرم با سرعت مطلوب

۵. 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. باتوجه به وجود عدم قطعیت در متغیرهای وزن و درصد وزنی ترمز لکوموتیو به سراغ

در تغییرات شتاب، منحنی سرعت پیشنهادی را به خوبی دنبال میکند. کنترل کننده فازی با استفاده از فاکتور TV در مقایسه با کنترل کننده PI تا ۱۱ درصد انرژی کمتری مصرف مینماید که عدد قابل توجهی میباشد. همچنین، کنترل کننده فازی در مقابله با یک نویز تصادفی ورودی به سیستم تلاش بیشتری کرده است.

۶. بینوشتها

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

مراجع:

- Belman-Flores, J. M., RodríguezValderrama, 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

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 has 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.