

کنترل مد لغزشی فازی برای ردیابی پروفایل بهینه سرعت قطار با وجود نامعینی

مجتبی رادمهر^{۱*} و حسن زرآبادی پور^۲

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>با عنایت به اینکه عامل اصلی مصرف انرژی در قطار، سیستم کششی می‌باشد و مقدار نیروی مورد نیاز جهت حرکت قطار نیز رابطه مستقیم با سرعت آن دارد، بنابراین انتخاب پروفایل بهینه برای سرعت حرکت قطار در مسیر بین ایستگاه‌ها و طراحی کنترل‌کننده مناسب جهت ردیابی دقیق پروفایل بهینه سرعت قطار، می‌تواند تعیین‌کننده مقدار انرژی مصرفی باشد. کنترل یک قطار شامل عبارت‌های غیرخطی، نامعینی و اغتشاش‌های خارجی می‌باشد که باید در طراحی قانون‌های کنترلی مدنظر قرار گیرند. در این مقاله به ارائه یک استراتژی کنترلی برای ردیابی پروفایل بهینه سرعت قطار بر اساس کنترل مد لغزشی فازی می‌پردازیم. انگیزه اصلی استفاده از کنترل مد لغزشی در سیستم‌های غیرخطی، مقاوم بودن آن در مقابل نامعینی‌های پارامتری، دینامیک‌های مدل نشده، اغتشاشات خارجی و همچنین سادگی طراحی آن می‌باشد. با این وجود، بروز پدیده لرزش، مهمترین عامل محدودکننده برای استفاده از این روش کنترلی می‌باشد. در این مقاله برای حذف لرزش، از کنترل فازی جهت تخمین سیگنال کنترل دسترسی استفاده شده است و پایداری کل سیستم نیز بر اساس قضیه پایداری لیاپانوف تضمین می‌گردد. شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از مدل غیرخطی دینامیک قطار با وجود نامعینی و اغتشاش و مقایسه آن با کنترل مد لغزشی مرسوم، مؤثر بودن روش کنترل مد لغزشی فازی را در ردیابی پروفایل بهینه سرعت قطار نشان می‌دهد.</p>	<p>دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۳۱ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۲۹</p> <p>واژگان کلیدی: کنترل مد لغزشی، کنترل فازی، کنترل مد لغزشی فازی، لرزش، پروفایل سرعت قطار.</p>

۱-مقدمه

مطلوب باشد. همچنین، سیستم کنترلی باید قادر به حفظ عملکرد سیستم حلقه بسته با وجود اغتشاشات خارجی و نامعینی در مدل باشد. امروزه در برخی پژوهش‌ها، تکنیک‌های کنترل هوشمند نظیر سیستم تطبیقی عصبی فازی^۳ و کنترل فازی PID^۴ جهت مدل کردن دینامیک و کنترل قطار به کار گرفته شده [۳،۴]، و مسئله بهینه‌سازی برای ردیابی و کنترل قطار با وجود محدودیت‌های عملیاتی، مطالعه شده است [۵،۶]. شوای سو^۵ و همکاران [۷]، با ارائه یک مدل کنترل قطار و

کنترل بهینه قطارها به طوری که استفاده از منابع انرژی را حداقل کند، یکی از مسائل مهم در زمینه مهندسی راه آهن به شمار می‌رود. از این رو، پروفایل بهینه سرعت قطار با هدف حداقل کردن مصرف انرژی، تعیین می‌گردد [۱،۲]. با در اختیار داشتن پروفایل بهینه سرعت قطار، برنامه کنترلی را می‌توان توسعه داد. هدف سیستم کنترلی، هدایت مناسب قطار بر مبنای پروفایل بهینه سرعت است، به صورتی که خطای ردیابی را حداقل کرده و سرعت عملکرد آن نیز

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.radmehr2020@gmail.com

۱. فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی برق گرایش کنترل، دانشگاه دانش

البرز، قزوین

۲. دانشیار، مهندسی برق، دانشگاه امام خمینی (ره)، قزوین

³ Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)

⁴ Proportional Integral Derivative

⁵ Shuai Su

جایگزین شود [۱۵]. روش دیگر، یک کنترل نوع ماکزیمم-مینیمم را به وسیله‌ی تابع برداری واحد جایگزین می‌سازد [۱۶]. این روش‌ها، به هر حال، هیچ تضمینی راجع به همگرایی به مد لغزشی نداده و شامل تبدالی میان لرزش و مقاوم‌پذیری است. کنترل مد لغزشی پیوسته می‌تواند حالت سیستم را به صورت نمایی به یک مد لغزشی بدون لرزش برسد اما منجر به طراحی‌های محافظه‌کارانه می‌شود. لرزش را می‌توان بدون از دست دادن کارایی مقاوم کنترل‌کننده مد لغزشی کاهش داد و یا حذف نمود. یکی از این روش‌ها، ترکیب کنترل‌کننده مد لغزشی با منطق فازی است که مؤثر بودن آن اثبات گشته است [۱۷، ۱۸]. منطق فازی که نخستین بار توسط زاده پیشنهاد داد شد، اثبات شده است که یک ابزار نیرومند جهت کنترل پلنت‌های با پارامتر متغیر یا بدتعریف است و می‌تواند به خوبی با نایقینی‌های متعدد مواجهه شود [۱۹]. این مقاله، در مورد طراحی یک کنترل مد لغزشی فازی بحث می‌کند که تکنیک فازی را برای حذف لرزش و مقاوم‌پذیری سیستم در برابر نایقینی پارامترها، اغتشاش بار، و غیرخطی‌ها استفاده می‌کند. روش پیشنهاد شده، الگوریتم فازی را با تکنیک کنترل مقاوم جهت تضمین یک کارایی ردیابی مقاوم برای سیستم نامعین قطار ترکیب می‌کند. ثابت شده است که سیستم حلقه بسته در صورتی که تمامی سیگنال‌ها کراندار بوده و خروجی سیستم بتواند خروجی مرجع مطلوب را با وجود اغتشاشات و نایقینی‌های مدل‌سازی به طور مجانبی دنبال نماید، از نظر لیاپانوفی پایدار جامع است [۲۰].

در این مقاله، الگوریتم کنترلی مد لغزشی فازی^۵ پیشنهاد شده، جهت ردیابی پروفایل بهینه سرعت قطار به کار گرفته شده است. پدیده‌ی لرزش نیز با استفاده از یک کنترل فازی که با قانون کنترل دسترسی جایگزین شده است، حذف شده است. مزیت اصلی این روش آن است که رفتار مقاوم سیستم تضمین شده و همزمان کارایی سیستم از نظر حذف لرزش در مقایسه با تکنیک مشابه کنترل مد لغزشی بدون استفاده از کنترل فازی، افزایش می‌یابد و در مقایسه با سیستم‌هایی که از کنترل تطبیقی بهره برده‌اند، از پیچیدگی کمتری برخوردار بوده و با هزینه کمتر قابل پیاده‌سازی می‌باشد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی کنترل‌کننده

با معرفی نیروی کششی موثر و با تغییر استراتژی کنترل که شامل تغییر توالی کنترل و نقاط سوئیچینگ می‌باشد، میزان صرفه‌جویی در انرژی را محاسبه نموده‌اند. هونگبو^۱ و همکاران [۸]، یک روش کنترل بهینه چند مرحله‌ای برای کنترل چندین قطار و برنامه‌ریزی در خطوط راه آهن را جهت دستیابی به حداقل مصرف انرژی ارائه داده‌اند. در [۹]، از ترکیب کنترل مد لغزشی مرتبه دو و کنترل تطبیقی جهت کنترل قطار با هدف راحتی مسافری استفاده شده است. در [۱۰] از کنترل پیش‌بین و بر اساس داده‌های عملیاتی واقعی و مدل‌سازی خطی نیروی کششی و ترمز، برای ردیابی سرعت قطارهای سریع‌السیر استفاده شده است. در [۱۱]، رویکرد فازی تطبیقی بر اساس مجموعه پارتو برای ردیابی پروفایل سرعت در بهره‌برداری قطار با سرعت بالا پیشنهاد شده است.

در کل، سیستم‌های کنترلی مختلفی را می‌توان برای کنترل سرعت قطار مورد استفاده قرار داد. ساده‌ترین روش کنترلی، PID می‌باشد که با تنظیم پارامترهای آن می‌توان بسیاری از سیستم‌های غیرخطی را کنترل نمود [۱۲، ۱۳]. مهم‌ترین عیب کنترل‌کننده PID این است که به تغییرات محیطی و عدم قطعیتها در مدل حساس بوده و نمی‌تواند عملکرد خوبی را در این شرایط از خود بروز دهد. یکی از موثرترین روش‌های کنترل سیستم‌های غیرخطی، کنترل مد لغزشی^۲ می‌باشد که به عنوان یک کنترل‌کننده مقاوم، برای تحقق اهدافی چون، ردیابی مسیر مرجع، حفظ پایداری سیستم حلقه بسته و سرعت عملکرد بالا در مواجهه با عدم قطعیت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۴، ۱۵].

اولین قدم در طراحی کنترل مد لغزشی، انتخاب یک سطح لغزشی است که کارایی مطلوب حلقه بسته را در فضای متغیر حالت مدل نماید. در گام دوم، طراحی یک قانون کنترلی ضربه‌ای است که مسیرهای حالت سیستم به سمت سطح لغزشی حرکت کرده و روی آن باقی بماند. با این وجود، بروز پدیده لرزش^۳ مهم‌ترین عامل محدودکننده برای استفاده از این روش کنترلی می‌باشد. روش‌های متعددی برای کاهش لرزش ارائه شده است. یکی از این روش‌ها، یک لایه‌ی مرزی را اطراف سطح سوئیچینگ^۴ قرار می‌دهد تا کنترل رله به وسیله‌ی یک تابع اشباع‌سازی

⁴ Switching Surface

⁵ Fuzzy Sliding Mode Control(FSMC)

¹ Hongbo Ye

² Sliding Mode Control(SMC)

³ Chattering

اضافه کردن یک جمله دیگر تحت عنوان حد مجاز دوار^۳ به جرم قطار عملی کرد [۲۲]:

$$M_{eff} = M_t(1 + \lambda_w) + M_l \quad (۳)$$

در این رابطه M_t جرم خالص و λ_w حد مجاز دوار می باشد که یک مقدار ثابت بوده و معمولاً کمتر از ۰/۲ است [۲۴]. M_l نیز جرم بار یا مسافر می باشد که در این مقاله به عنوان نامعینی در طراحی کنترل کننده در نظر گرفته خواهد شد.

به طور خلاصه، معادله عمومی حرکت یک وسیله نقلیه با معادله موسوم به معادله لومونوسوف^۴ شناخته می شود که به صورت زیر بیان می شود [۲۲]:

$$M_{eff} \frac{d^2x}{dt^2} = TE - \left(A + B \frac{dx}{dt} C \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \right) - Mg \sin(\alpha) \quad (۴)$$

در اینجا TE نیروی کششی و A، B و C ثابت های معادله (۲) یا ضرایب دیویس هستند و $Mg \sin(\alpha)$ نشان دهنده اثر شیب مسیر است. α برای یک مسیر سربالایی مثبت و برای یک سرپایینی منفی و همچنین برای یک مسیر صاف، صفر خواهد بود. با توجه به معادله (۴) شتاب a بر حسب سرعت v می تواند به صورت معادله (۵) بیان شود [۲۲]:

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{TE}{M_{eff}} - \left(\frac{A}{M_{eff}} + \frac{B}{M_{eff}} v + \frac{C}{M_{eff}} v^2 \right) - \frac{M}{M_{eff}} g \sin(\alpha) \quad (۵)$$

با توجه به مطالب ذکر شده، معادلات حالت حاکم بر قطار را می توان به صورت زیر فرمول بندی کرد [۲۵]:

$$\begin{cases} \dot{x} = v & (۶) \\ \dot{v} = \frac{1}{M_{eff}} (\mu_t f_t(v) - \mu_b b_b(v)) \\ \quad - \frac{1}{M_{eff}} w_0(v) - \frac{1}{M_{eff}} g(x) + d(t) \end{cases}$$

$$w_0(v) = A + Bv + Cv^2 \quad (۷)$$

$$g(x) = Mg \sin(\alpha) \quad (۸)$$

مد لغزشی فازی با کنترل کننده مد لغزشی مرسوم، کارایی بهتر کنترل کننده پیشنهاد شده را نشان می دهد.

ادامه این مقاله از قسمت های زیر تشکیل شده است: بخش ۲ مشخصات مدل دینامیکی یک قطار را ارائه می دهد، بخش ۳ مشخصات یک کنترل کننده مد لغزشی را معرفی می کند، بخش ۴ به ارائه ی کنترل کننده مد لغزشی فازی می پردازد، بخش ۵ به نتایج شبیه سازی پرداخته و در آخر، بخش ۶ نتایج کارها را خلاصه می کند.

۲- توصیف مدل دینامیکی قطار

انرژی در سیستم تراکشن راه آهن برای شتاب گیری، غلبه بر تلفات توان الکتریکی و مکانیکی و برای حرکت جرم قطار به سمت جلو در برابر نیروهای اصطکاکی به کار گرفته می شود [۲۱].

معادله اولیه حرکت قطار بر مبنای قانون دوم نیوتن استوار است [۲۲]:

$$M_{eff} \frac{d^2x}{dt^2} = TE - R - Mg \sin(\alpha) \quad (۱)$$

در این رابطه M_{eff} جرم مؤثر وسیله نقلیه، M جرم وسیله نقلیه، g شتاب گرانشی زمین، R مقاومت وسیله نقلیه در برابر حرکت، TE نیروی کششی^۱، x مسافت فعلی وسیله نقلیه و α زاویه بین شیب مسیر و خط عمود می باشد.

مانند هر وسیله نقلیه دیگر، حرکت قطار نیز با تعدادی نیروی مقاومتی مخالفت می کند. نسخه ساده شده از مقاومت کلی روی یک مسیر هم تراز می تواند به صورت رابطه (۲) بیان شود. در این معادله، از ثابت ها شامل اثر جرم و افزایش مقاومت ناشی از انحنای مسیر چشم پوشی شده- است [۲۳]:

$$R = A + Bv + Cv^2 \quad (۲)$$

در این رابطه، v سرعت وسیله نقلیه بر حسب m/s و ضرایب A (kN)، B (kNs/m) و C (kNs^2/m^2) دارای مقادیر ثابت هستند که به عنوان ضرایب دیویس^۲ نیز شناخته می شوند. به دلیل اینکه قطار علاوه بر اجزای ثابت، شامل اجزای گردان نیز می باشد که روی جرم مؤثر قطار تأثیر می گذارد، اینرسی دورانی اجزای گردان قطار را نیز باید به منظور بالا بردن دقت محاسبات در نظر گرفت. این کار را می توان با

³ Rotary Allowance

⁴ Lomonossov

¹ Tractive Effort

² Davis

در حالت کلی، برای دینامیک قطار در رابطه (۱۱)، سطح لغزش را به صورت زیر می‌توان تعریف کرد [۱۵]:

$$s(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e(t) \quad (۱۳)$$

که در آن n درجه نسبی سیستم می‌باشد. با توجه به اینکه درجه نسبی مدل دینامیکی قطار مرتبه ۱ می‌باشد، بر اساس رابطه (۱۳)، سطح لغزش به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$s(t) = e(t) \quad (۱۴)$$

در رابطه فوق $e(t) = v(t) - v_d(t)$ ، خطای ردیابی پروفایل بهینه سرعت قطار می‌باشد که در آن $v_d(t)$ ، سرعت مطلوب پروفایل بهینه سرعت قطار می‌باشد. هدف قانون کنترل مد لغزشی این است که خطای ردیابی $e(t)$ را وادار کند تا به سطح لغزش رسیده و سپس در طول سطح لغزشی حرکت کند تا به مبدا برسد. بنابراین احتیاج داریم که سطح لغزشی پایدار باشد، این بدان معناست که $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ شده و خطا به صورت مجانبی از بین می‌رود. با مشتق‌گیری از سطح لغزشی نسبت به زمان و استفاده از (۱۱) داریم:

$$\dot{s}(t) = \dot{e}(t) = \dot{v}(t) - \dot{v}_d(t) = \hat{f}(v, t) + \hat{b}u(t) + d(t) - \dot{v}_d(t) \quad (۱۵)$$

سیگنال کنترل را به عنوان پاسخ $\dot{s}(t) = 0$ بدون لحاظ کردن ناپیچینی و اغتشاش ($d(t) = 0$)، برای رسیدن به کارایی مطلوب تحت مدل نامی، محاسبه نموده و به آن سیگنال کنترل معادل^۱ گفته و با $u_{eq}(t)$ نمایش می‌دهیم:

$$u_{eq}(t) = \frac{1}{\hat{b}} \left(-\hat{f}(v, t) + \dot{v}_d(t) \right) \quad (۱۶)$$

که در آن $\hat{b} = (b_{min} b_{max})^{\frac{1}{2}}$ می‌باشد [۱۵]. به هرحال، در صورتی که آشفتگی‌های پیش‌بینی نشده از تغییرات پارامترها یا اغتشاش خارجی رخ دهد، سیگنال کنترل معادل نمی‌تواند کارایی کنترل‌کننده مورد نظر را تضمین نماید. بنابراین جهت ارضاء شرط رسیدن یعنی $|\dot{s}| < -\eta$ به صورتی که $\eta > 0$ می‌باشد، قانون کنترل دسترسی به صورت زیر تعریف می‌گردد [۱۵]:

که در آن v و x به ترتیب سرعت و موقعیت قطار هستند. $w_0(v)$ ، $f_t(v)$ و $g(x)$ به ترتیب معرف نیروی محرکه رو به جلو، مقاومت اساسی، مقاومت شیب و نیروی ترمزگیری در هر واحد جرم قطار هستند. μ_b و μ_t نیز بیانگر متغیرهای کشش و ترمزگیری بوده و در محدوده زیر قرار دارند:

$$0 \leq \mu_t \leq 1, \quad 0 \leq \mu_b \leq 1 \quad (۹)$$

M_{eff} نیز جرم مؤثر قطار می‌باشد که مهمترین عامل نامعینی در قطار بوده و در هر سفر با تغییر تعداد مسافری و توشه‌های آنها تغییر می‌نماید. در این فرمول نیروی طولی وارد بر جرم قطار (ناشی از تونل) و انحنای مسیر نیز به عنوان اغتشاش، $d(t)$ ، در نظر گرفته شده‌است.

با در نظر گرفتن تأثیرات نیروی کشش و ترمزگیری مدل دینامیکی قطار به صورت زیر:

$$u(t) = \mu_t f_t(v) - \mu_b b_b(v) \quad (۱۰)$$

و با فرض اینکه شیب مسیر حرکت قطار صفر می‌باشد ($g(x) = 0$)، دینامیک قطار در رابطه (۶) به صورت زیر خواهد شد:

$$\dot{v}(t) = f(v, t) + bu(t) + d(t) \quad (۱۱)$$

که در آن $f(v, t) = -\frac{1}{M_{eff}} \cdot w_0(v)$ دارای نامعینی کراندار بوده به صورتی که $|f - \hat{f}| \leq F$ بوده و مقدار \hat{f} و F معلوم می‌باشد. $u(t)$ سیگنال کنترل می‌باشد که معادل با رابطه (۱۰) می‌باشد. $b = \frac{1}{M_{eff}}$ به عنوان ضریب سیگنال کنترل دارای نامعینی کراندار، به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$0 \leq b_{min} \leq b \leq b_{max} \quad (۱۲)$$

که در آن b_{min} و b_{max} معلوم می‌باشند. $d(t)$ نیز به عنوان اغتشاش خارجی می‌باشد که کراندار بوده و به صورت $|d(t)| \leq D$ تعریف می‌گردد و D به عنوان کران بالای اغتشاش معلوم می‌باشد.

۳- کنترل مد لغزشی

می‌دانیم که مهمترین و سخت‌ترین مرحله‌ی طراحی کنترل مد لغزشی، ساخت سطح لغزشی $s(t)$ است که انتظار می‌رود به کارایی و خصوصیات کنترلی مطلوب پاسخ دهد.

¹ Equivalent Control

با ساده‌سازی (۲۳) به رابطه زیر می‌رسیم:

$$\dot{V} = s \left((f - b\hat{b}^{-1}\hat{f}) + (b\hat{b}^{-1} - 1)\dot{v}_d - b\hat{b}^{-1}k\text{sgn}(s) + d(t) \right) \leq -\eta|s| \quad (24)$$

f را به صورت $f = \hat{f} + (f - \hat{f})$ می‌توان نوشت به صورتی که $|f - \hat{f}| \leq F$:

$$\dot{V} = s(f - \hat{f} + (1 - b\hat{b}^{-1})\hat{f} + (b\hat{b}^{-1} - 1)\dot{v}_d - b\hat{b}^{-1}k\text{sgn}(s) + d(t)) \leq -\eta|s| \quad (25)$$

تابع علامت را می‌توان به صورت $\text{sgn}(s) = \frac{|s|}{s}$ نوشت. با ساده‌سازی رابطه (۲۵) به رابطه زیر می‌رسیم:

$$\dot{V} = s \left(f - \hat{f} + (b\hat{b}^{-1} - 1)(-\hat{f} + \dot{v}_d) - b\hat{b}^{-1}k \frac{|s|}{s} + d(t) \right) \leq -\eta|s| \quad (26)$$

$$\dot{V} = |s| |f - \hat{f}| + |s| |b\hat{b}^{-1} - 1| |-\hat{f} + \dot{v}_d| - b\hat{b}^{-1}k |s| + |d(t)| |s| - \eta|s| \quad (27)$$

با استفاده از (۱۹) می‌توان نوشت $|b\hat{b}^{-1} - 1| \leq 1 - \beta^{-1}$ ساده‌سازی رابطه (۲۷) داریم:

$$\dot{V} = F + (1 - \beta^{-1})|-\hat{f} + \dot{v}_d| - \beta^{-1} + D \leq -\eta \quad (28)$$

با توجه به این که k, F, η, D, β مثبت می‌باشند، در صورتی که k برابر با رابطه (۲۹) باشد، $\dot{V} \leq 0$ گردیده و پایداری لیپانوف برقرار می‌گردد و این بدان معناست که قانون کنترل دسترسی منجر به یک سیستم کنترل مد لغزشی پایدار می‌شود.

$$u_r(t) = -\frac{1}{b}k \text{sgn}(s) \quad (17)$$

که در آن جهت برآورده شدن شرط لغزش، k به صورت زیر به دست می‌آید [۱۵]:

$$k \geq \beta(F + \eta + D) + (\beta - 1)|-\hat{f} + \dot{v}_d| \quad (18)$$

که در آن F کران بالای نامعینی و D کران بالای اغتشاش خارجی بوده و β به صورت زیر می‌باشد [۱۵]:

$$\beta^{-1} \leq \frac{\hat{b}}{b} \leq \beta \quad (19)$$

$$\beta = \left(\frac{b_{max}}{b_{min}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

در نهایت، کنترل مد لغزشی از مجموع دو رابطه (۱۶) و (۱۷) تشکیل شده و به صورت زیر بیان می‌گردد [۱۵]:

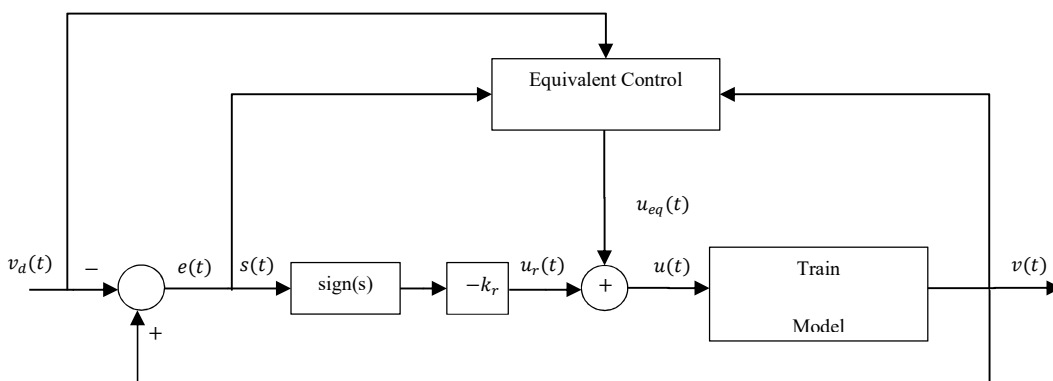
$$u(t) = u_{eq} + u_r = \frac{1}{b} \left(-\hat{f} + \dot{v}_d(t)k \text{sgn}(s) \right) \quad (21)$$

بلوک دیاگرام کنترل کننده مد لغزشی مورد استفاده در این مقاله، در شکل (۱)، نشان داده شده است. جهت اثبات پایداری، تابع لیپانوف را به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$V = \frac{1}{2}s^2 \quad (22)$$

با مشتق‌گیری از V و جایگذاری $\dot{s}(t)$ و $u(t)$ در آن خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} = s(f(v, t) + bu(t) + d(t) - \dot{v}_d(t)) \\ &\leq -\eta|s| \\ &= s \left(f(v, t) + b \left(\frac{1}{b} (-\hat{f}(v, t) + \dot{v}_d(t) - k \text{sgn}(s)) \right) + d(t) - \dot{v}_d(t) \right) \leq -\eta|s| \quad (23) \end{aligned}$$



شکل ۱: بلوک دیاگرام کنترل مد لغزشی در محیط سیمولینک

کنترل فازی معمولاً به دو صورت رویکرد غیر مستقیم و رویکرد مستقیم در مد لغزشی استفاده می‌شود. در رویکرد غیر مستقیم، سیستم فازی نقش کنترلی بر عهده نداشته و به طور مستقیم در حلقه کنترل وارد نمی‌شود. در [۲۹] از یک فیلتر پایین‌گذر به منظور حذف نوسانات فرکانس بالای سیگنال ورودی کنترل استفاده می‌شود. در این حالت، وظیفه سیستم فازی، تنظیم پارامترهای این فیلتر می‌باشد به نحوی که لرزش به طور کامل حذف شود. در [۳۰] وظیفه سیستم فازی، تعیین ضخامت لایه مرزی است به گونه‌ای که لرزش حذف شود. در [۲۰، ۳۱] جهت کاهش لرزش، بهره تابع سوئیچینگ به صورت فازی تعیین می‌گردد. در رویکرد مستقیم، از سیستم فازی در نقش یک کنترل‌کننده فازی، به منظور پیاده‌سازی ایده کنترل مد لغزشی استفاده می‌شود [۳۲]. به عنوان مثال، می‌توان تابع اشباع را که به صورت مستقیم در کنترل لایه مرزی استفاده می‌شود، تقریب زده و همزمان پارامترهای آن را طوری تنظیم کرد که لرزش نیز کاهش یافته و یا حذف شود. بلوک دیاگرام کنترل‌کننده مد لغزشی فازی مورد استفاده در این مقاله، در شکل (۲)، نشان داده شده است.

همان‌گونه که در [۲۰، ۲۷]، ذکر شده است، در این مقاله نیز، جهت حذف مسئله لرزش، یک موتور استنتاج فازی برای فاز دسترسی و روش کنترل مد لغزشی فازی پیشنهاد شده است. مزیت اصلی این روش آن است که رفتار مقاوم سیستم تضمین می‌شود. مزیت دوم شیوهی پیشنهاد شده آن است که کارایی سیستم از نظر حذف لرزش در مقایسه با تکنیک مشابه کنترل مد لغزشی بدون استفاده از کنترل فازی، افزایش می‌یابد [۲۷].

$$\Rightarrow k \geq \beta(F + \eta + D) + (\beta - 1)|-\hat{f} + \dot{v}_d| \quad (29)$$

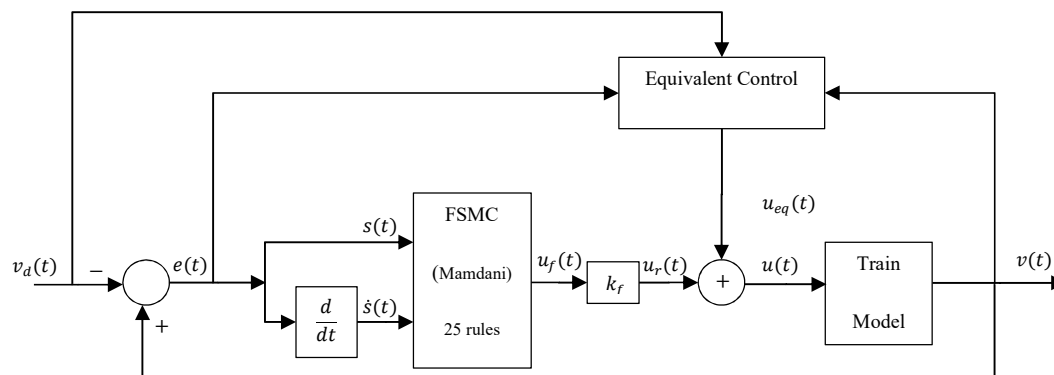
به طور معمول، سیگنال کنترل دسترسی یا $u_r(t)$ مطابق زیر داده می‌شود [۲۶]:

$$u_r(t) = -k_r \operatorname{sgn}[s(t)] \quad (30)$$

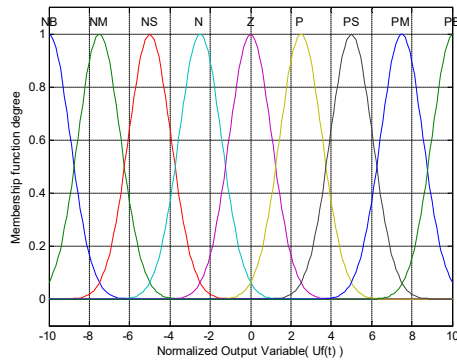
که k_r بهره کنترل دسترسی که وابسته به کران بالای نایقینی‌ها است را نشان می‌دهد و $\operatorname{sgn}[\cdot]$ یک تابع علامت است. مسئله اصلی که هنوز پابرجاست و جزء عیوب اصلی کنترل مد لغزشی است، پدیده نامطلوب لرزش در کلیه سیگنالهای کنترلی و سطح لغزش $s(t)$ می‌باشد که ناشی از وجود تابع علامت قانون کنترل دسترسی می‌باشد. لرزش در سیگنالهای کنترلی ممکن است دینامیک‌های ناپایدار سیستم را تحریک نماید و باعث ناپایداری سیستم گردد. در این مقاله، برای از بین بردن لرزش، از کنترل فازی جهت محاسبه قانون کنترل دسترسی، $u_r(t)$ ، کنترل مد لغزشی استفاده خواهد شد.

۴- کنترل مد لغزشی فازی

در حال حاضر، کنترل فازی جایگزین بسیاری از تکنولوژی‌های معمول شده است [۲۷]. یکی از مشخصه‌های اصلی منطق فازی، قابلیت آن در بیان مقادیر مبهم در ذهن انسان است. بنابراین، هنگامی که مدل ریاضی پروسه وجود ندارد، یا وجود دارد اما دارای نایقینی است، کنترل فازی یک راه جایگزین برای مقابله با پروسه‌ی ناشناخته است [۲۸]. با توجه به اینکه تعداد بالای قوانین فازی برای سیستم‌های مرتبه‌ی بالا، آنالیز را پیچیده می‌کند، توجه بیشتری به کنترل مد لغزشی فازی شده است [۲۰، ۲۷].

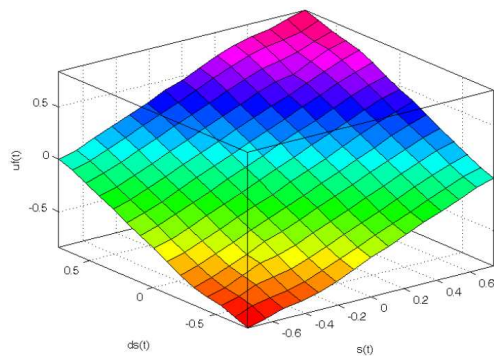


شکل ۲- بلوک دیاگرام کنترل مد لغزشی فازی در محیط سیمولینک



شکل ۴- توابع عضویت متغیر زبانی خروجی $u_f(t)$

سطح کنترل فازی خروجی $u_f(t)$ در شکل (۵)، نشان داده شده است:



شکل ۵- سطح کنترل فازی خروجی $u_f(t)$

قوانین فازی به صورتی استخراج شده اند که پایداری سیستم برآورده شده و شامل روابط ورودی-خروجی می باشد که استراتژی کنترلی را تعریف می نمایند. این قوانین فازی زبانی به صورت ابتکاری به صورت زیر تعریف می شوند [۳۳]:

$$R^l: IF s(t) \text{ is } A_1^l \text{ and } \dot{s}(t) \text{ is } A_2^l \\ THEN u_f(t) \text{ is } B^l \quad (33)$$

که A_1^l و A_2^l برچسب مجموعه های فازی ورودی هستند B^l برچسب مجموعه های فازی خروجی است و $l = 1, 2, \dots, m$ نشان دهنده تعداد قوانین اگر- آنگاه فازی است. به خاطر مفهوم فازی، عملیات اشتراک به صورت مینیمم گیری انجام پذیرفته است، و از غیر فازی سازی میانگین مراکز استفاده شده است. قوانین فازی در جدول ۱ آمده است. تعداد قوانین فازی ۲۵ قانون می باشند، ولی با توجه به اینکه تعداد ۹ تابع عضویت برای خروجی در نظر گرفته شده است، سطح لغزش هموارتر شده و در بار محاسباتی یکسان، نسبت به زمانی که از ۵ تابع عضویت در خروجی استفاده می شود، خروجی $u_f(t)$ از دقت بالاتری

در شیوهی کنترل مد لغزشی فازی پیشنهادی در شکل (۲)، کنترل فازی دارای دو ورودی شامل سطح لغزش، $s(t)$ و مشتق سطح لغزش، $\dot{s}(t)$ ، بوده و همچنین دارای یک خروجی u_{fuzzy} است و در آن، روش استنتاج فازی ممدانی به کار رفته است.

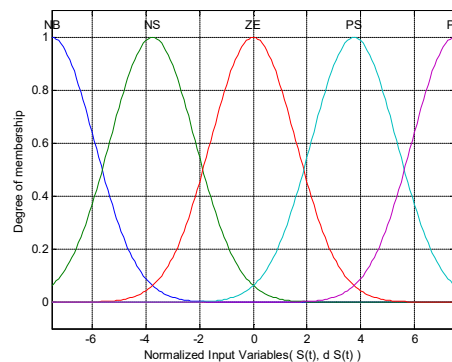
در کنترل کننده مد لغزشی فازی قانون کنترل دسترسی $u_r(t)$ به صورت زیر انتخاب می شود [۲۰]:

$$u_r(t) = k_f u_f(t) \quad (31)$$

که در آن k_f فاکتور نرمالیزه سازی متغیر خروجی و $u_f(t)$ خروجی FMSC است که بر اساس ورودی های $s(t)$ و $\dot{s}(t)$ محاسبه می شود. قوانین کنترل فازی را می توان به عنوان یک نگاهت از متغیرهای زبانی ورودی $s(t)$ و $\dot{s}(t)$ به متغیر زبانی خروجی $u_f(t)$ مطابق زیر نمایش داد [۲۰]:

$$u_f(t) = FSMC(\dot{s}(t), s(t)) \quad (32)$$

که در آن $FSMC(\dot{s}(t), s(t))$ ، مشخصه های عملکردی نمودارهای تصمیم زبانی فازی را نشان می دهد. توابع عضویت متغیرهای زبانی ورودی $s(t)$ و $\dot{s}(t)$ در شکل (۳)، نشان داده شده است:



شکل ۳- توابع عضویت متغیرهای زبانی ورودی $s(t)$ و $\dot{s}(t)$

این توابع به پنج قسمت فازی تقسیم شده اند که عبارتند از NB (منفی بزرگ)، NS (منفی کوچک)، Z (صفر)، PS (مثبت کوچک)، PB (مثبت بزرگ). توابع عضویت متغیر زبانی خروجی $u_f(t)$ در شکل (۴)، نشان داده شده است.

این توابع به نه قسمت فازی تقسیم شده اند که عبارتند از NB (منفی بزرگ)، NM (منفی متوسط)، NS (منفی کوچک)، N (منفی)، Z (صفر)، P (مثبت)، PS (مثبت کوچک)، PM (مثبت متوسط)، PB (مثبت بزرگ).

با جایگذاری قانون کنترل $u(t)$ از معادله (۳۴)، معادله (۳۹) به صورت زیر درمی آید:

$$\dot{V} = s \left[\hat{f}(v, t) + \hat{b} \left(u_{eq}(t) + u_r(t) \right) + L(t) - \dot{v}_d(t) \right] \leq -\eta |s| \quad (40)$$

با جایگذاری قانون کنترل معادل $u_{eq}(t)$ از معادله (۱۶)، معادله (۴۰) به صورت زیر درمی آید:

$$\dot{V} = s \left[\hat{f}(v, t) + \hat{b} \left(\frac{1}{\hat{b}} (-\hat{f}(v, t) + \dot{v}_d(t) - k_r \operatorname{sgn}[s(t)]) \right) + L(t) - \dot{v}_d(t) \right] \leq -\eta |s| \quad (41)$$

ساده سازی معادله (۴۱) نتیجه می دهد:

$$\dot{V} = s \dot{s} = s [L(t) - k_r \operatorname{sgn}[s(t)]] = s [L(t) - K_f \operatorname{FSMC}(s(t), \dot{s}(t))] \leq -\eta |s| \quad (42)$$

مجموعه های فازی خروجی روی بازه $(-1, 1)$ نرمالیزه می شوند، آنگاه $1 \leq |u_f = \operatorname{FSMC}(s(t), \dot{s}(t))|$ و

$$|s(t)| |u_f(t)| = |s(t)| |\operatorname{FSMC}(s(t), \dot{s}(t))| \leq |s(t)|$$

بنابراین از معادله (۴۲) خواهیم داشت:

$$\dot{V} = s \dot{s} = |L(t)| |s| - K_f |s| = \{|L(t)| - K_f\} |s| \leq -\eta |s| \quad (43)$$

بنابراین در صورتی که $K_f \geq |L(t)| + \eta$ اختیار شود، می توان چنین استنباط کرد که شرط دسترس $\dot{V} = s \dot{s} < 0$ همواره برآورده می شود. در نتیجه سیستم حلقه بسته پایدار مجانبی بوده و خطای مسیر حالت به سطح لغزشی $s(t) = 0$ همگرا می شود.

۵- نتایج شبیه سازی

کنترل کننده مد لغزشی فازی پیشنهاد شده برای کنترل یک قطار با مشخصات ذکر شده در جدول ۲ تست شده است. تمامی شبیه سازی ها نیز با استفاده از نرم افزار متلب R2013a به دست آمده اند.

ورودی مطلوب $v_d(t)$ که باید توسط کنترل کننده ردیابی شود، در بلوک سیگنال مرجع ساخته می شود. در این تحقیق، ورودی مطلوب همان پروفایل بهینه سرعت قطار می باشد که به صورت رابطه (۴۴) در نظر گرفته شده و در شکل (۶)، قابل مشاهده می باشد:

برخوردار شده و در کل، تخمین بهتری از قانون دسترسی $u_r(t)$ به دست آمده است.

جدول ۱- قوانین فازی طبق متغیرهای زبانی ورودی $s(t)$ و خروجی $u_f(t)$.

s \ \dot{s}	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NM	NS	N	Z
NS	NM	NS	N	Z	P
Z	NS	N	Z	P	PS
PS	N	Z	P	PS	PM
PE	Z	P	PS	PM	PB

قانون FSMC را می توان به صورت زیر نمایش داد [۳۰]:

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_r(t) = u_{eq}(t) + k_f u_f(t) = u_{eq}(t) + k_f \operatorname{FSMC}(s(t), \dot{s}(t)) \quad (34)$$

سیستم قطار نشان داده شده با معادله (۱۱)، به وسیله $u(t)$ در (۳۴) کنترل شده است، که در آن، بخش کنترل معادل $u_{eq}(t)$ در (۱۶) آمده است. پایداری این سیستم با استفاده از تابع لیاپانوف انتخاب شده مطابق زیر اثبات می شود:

$$V(t) = \frac{1}{2} s^2(t) \quad (35)$$

$$\dot{V}(t) = s(t) \dot{s}(t) \leq -\eta |s| \quad (36)$$

معادله (۱۱) را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\dot{v} = (\hat{f} + \Delta f)(v, t) + (\hat{b} + \Delta b)u(t) + d(t) \quad (37)$$

به صورتی که Δf و Δb نامعینی های سیستم بوده ولی دارای کران بالای مشخص می باشند به صورتی که $\Delta f_l \leq \Delta f \leq \Delta f_h$ و $|\Delta b| \leq \Delta b_h$ بوده و زیر نویس - های h و l مقادیر بالا و پایین نامعینی را نشان می دهند. $d(t)$ نیز اغتشاش خارجی بوده که دارای کران بالای معین می باشد $|d(t)| \leq D$.

معادله (۳۷) را به صورت زیر می توان باز نویسی کرد:

$$\dot{v} = \hat{f}(v, t) + \hat{b}u(t) + L(t) \quad (38)$$

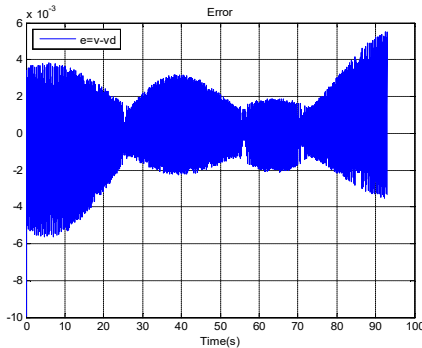
که در آن \hat{f} و \hat{b} میانگین مقادیر نامعین f و b بوده و $L(t) = \Delta f + \Delta b + d(t)$ می باشد.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s \dot{s} = s [\dot{v}(t) - \dot{v}_d(t)] \\ &= s [\hat{f}(v, t) + \hat{b}u(t) + L(t) - \dot{v}_d(t)] \\ &\leq -\eta |s| \end{aligned} \quad (39)$$

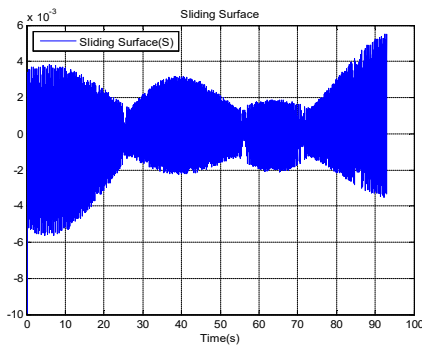
جدول ۲- مشخصات قطار شبیه‌سازی شده [۳۴]

مقدار	پارامتر
۹۰ ثانیه	زمان کل سیر قطار
۱۵۰۰ متر	مسافت کل سیر قطار
۸۰ ساعت	حداکثر سرعت قطار (کیلومتر بر ساعت)
۴۰۳ کیلو نیوتن	حداکثر نیروی کشش (شتاب گیری)
۳۸۰- کیلو نیوتن	حداقل نیروی کشش (ترمزگیری)
۱۰ کیلو نیوتن	حداکثر نیروی کشش برای خلاصی
۷ کیلو متر بر ساعت	حداکثر سرعت قطار برای ترمز احیاکنندگی
۳۰۵ تن	جرم کلی قطار
$a_{rr} = 8547, b = 64.2, c = 2.2452$	پارامترهای مقاومت چرخشی (دیویس)

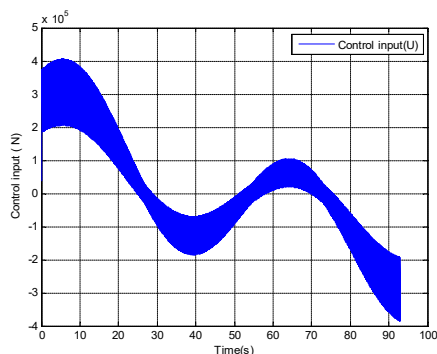
با در نظر گرفتن سطح لغزش به صورت $s(t) = e(t)$ مقادیر ثابت به صورت $\eta = 0.1$ ، ثابت‌های دیویس به صورت $a_{rr} = 8547, b = 64.2, c = 2.2452$ ، وزن نامی قطار به صورت $m = 252500 \text{ kg}$ و ورودی مطلوب به صورت رابطه (۴۴)، کنترل کننده مد لغزشی شکل (۱)، را بدون در نظر گرفتن نامعینی و اغتشاش، بر روی دینامیک قطار پیاده‌سازی می‌کنیم. نتایج شبیه‌سازی‌ها در شکل‌های (۷) تا (۱۰) نشان داده شده‌است:



شکل ۸- سیگنال خطا $e(t) = v(t) - v_d(t)$ در کنترل مد لغزشی بدون حضور نامعینی و اغتشاش



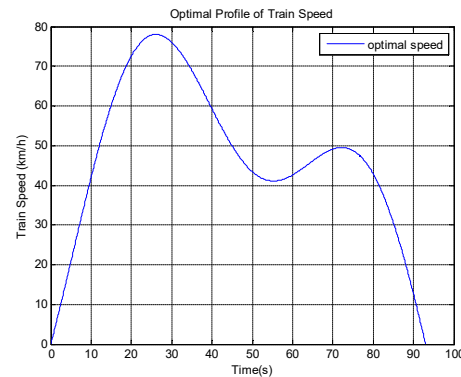
شکل ۹- سطح لغزش $s(t)$ در کنترل مد لغزشی بدون حضور نامعینی و اغتشاش



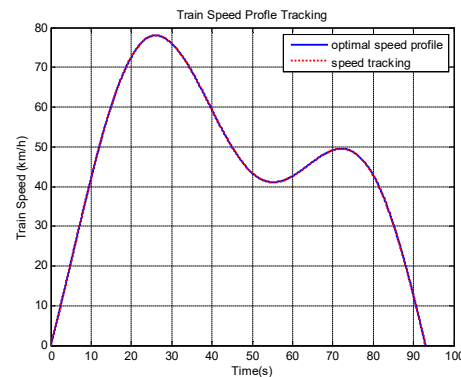
شکل ۱۰- سیگنال $u(t)$ در کنترل مد لغزشی بدون حضور نامعینی و اغتشاش

$$f(x) = a_1 \cdot \sin(b_1 \cdot x + c_1) + a_2 \cdot \sin(b_2 \cdot x + c_2) + d \quad (44)$$

$a_1 = 66.558, b_1 = 0.03295,$
 $c_1 = 0.19477509$
 $a_2 = 21.77, b_2 = 0.10525195, c_2 = -0.686$
 $d = 0.9081385$

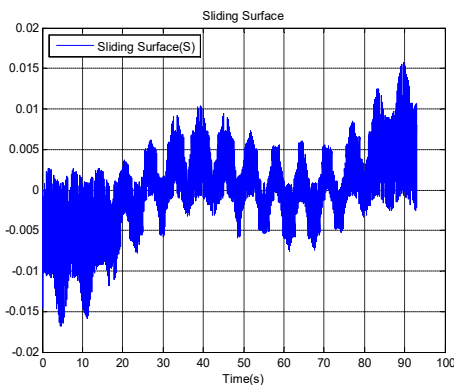


شکل ۶- پروفایل بهینه سرعت قطار (ورودی مطلوب)

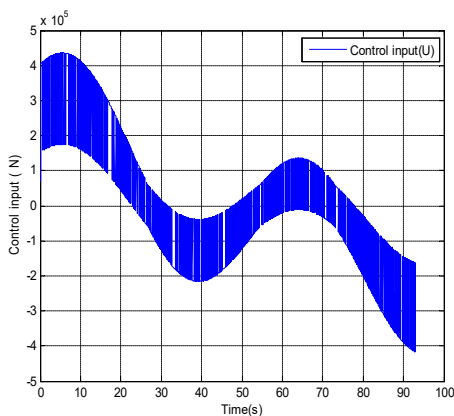


شکل ۷- ردیابی سیگنال مطلوب $v_d(t)$ در کنترل مد لغزشی بدون حضور نامعینی و اغتشاش

در هنگام اعمال اغتشاش به دینامیک قطار، کران اغتشاش $D = 0.1$ را باید به کنترل‌کننده اضافه نمود. نتایج شبیه‌سازی‌ها در شکل‌های (۱۱) تا (۱۴) نشان داده شده‌است:



شکل ۱۳- سطح لغزش $S(t)$ در کنترل مد لغزشی با ۲۰٪ نامعینی در وزن قطار به همراه اغتشاش

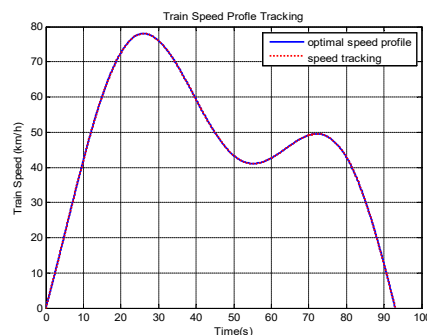


شکل ۱۴- سیگنال کنترلی $u(t)$ در کنترل مد لغزشی با ۲۰٪ نامعینی در وزن قطار به همراه اغتشاش

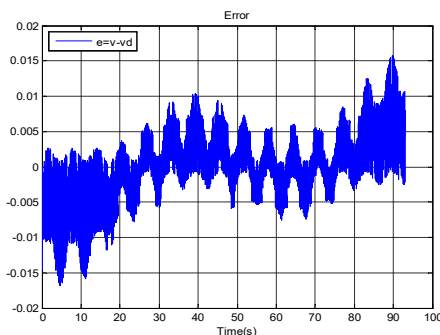
همان‌گونه که در شکل‌های بالا ملاحظه می‌فرمایید، با اعمال همزمان ۲۰٪ نامعینی در وزن قطار به همراه اعمال اغتشاش خارجی $d(t) = 0.1 \sin(t)$ به دینامیک قطار، ردیابی سیگنال مطلوب $v_d(t)$ به خوبی انجام شده‌است. خطا نسبت به زمانی که اغتشاش خارجی اعمال نشده بود افزایش یافته‌است، اما دامنه خطای حالت ماندگار از $\pm 0.0168 \text{ km/h}$ فراتر نرفته است. این مسئله مقاوم بودن کنترل مد لغزشی در برابر نامعینی‌ها و اغتشاشات را نشان می‌دهد.

مسئله اصلی که هنوز پابرجاست و مهمترین ایراد کنترل مد لغزشی می‌باشد، لرزش موجود در کلیه سیگنال‌ها اعم از سیگنال ردیابی، سیگنال کنترل $u(t)$ ، سطح لغزش $S(t)$

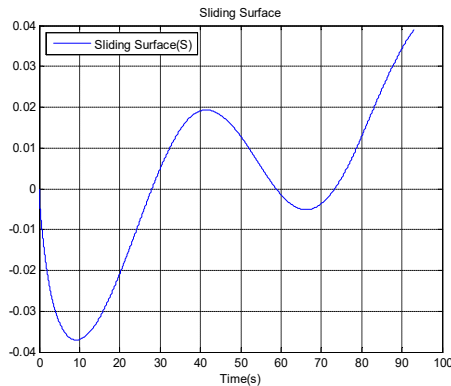
همان‌گونه که ملاحظه می‌فرمایید، سیگنال مطلوب $v_d(t)$ که همان پروفایل بهینه سرعت قطار می‌باشد به خوبی ردیابی شده‌است و میزان خطای ماندگار نیز از محدوده $\pm 5.6 \times 10^{-3} \text{ km/h}$ فراتر نرفته‌است. محدودیت ماکزیمم سرعت که ۸۰ کیلومتر بر ساعت می‌باشد رعایت شده‌است و میزان سیگنال $u(t)$ نیز از مقدار ماکزیمم گشتاور قطار که ۴۰۳ کیلو نیوتن می‌باشد فراتر نرفته‌است. همچنین دامنه نوسانات لرزش سیگنال سطح لغزش $S(t)$ نیز حول نقطه صفر می‌باشد. ولی مشکل اصلی کنترل‌کننده مد لغزشی که همان لرزش می‌باشد، در همه سیگنال‌ها اعم از سیگنال ردیابی، سیگنال $u(t)$ ، سیگنال خطا و سیگنال سطح لغزش S قابل مشاهده می‌باشد. در ادامه ۲۰٪ نامعینی در وزن قطار را به سیستم مدل شده، اعمال می‌نماییم به طوریکه وزن قطار که شامل بار و مسافر نیز می‌باشد، به ۳۰۵۰۰ کیلوگرم که ماکزیمم وزن مجاز قطار می‌باشد، افزایش می‌یابد. همچنین اغتشاش خارجی $d(t) = 0.1 \sin(t)$ را نیز به دینامیک قطار اعمال می‌نماییم، این اغتشاش متغیر با زمان بوده و می‌تواند نیروی مقاوم باد، شیب مسیر، مقاومت انحنای مسیر و یا مقاومت تونل باشد.



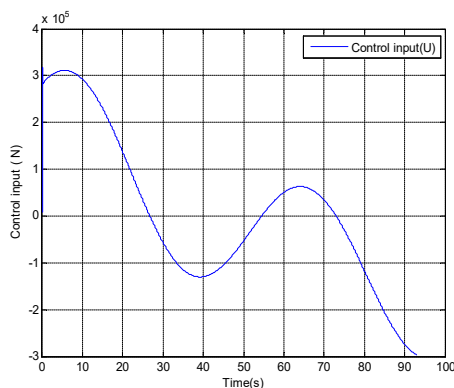
شکل ۱۱- ردیابی سیگنال مطلوب $v_d(t)$ در کنترل مد لغزشی با ۲۰٪ نامعینی در وزن قطار به همراه اغتشاش



شکل ۱۲- سیگنال خطا $e(t) = v(t) - v_d(t)$ در کنترل مد لغزشی با ۲۰٪ نامعینی در وزن قطار به همراه اغتشاش



شکل ۱۷- سطح لغزش $s(t)$ در کنترل مد لغزشی فازی بدون حضور نامعینی و اغتشاش



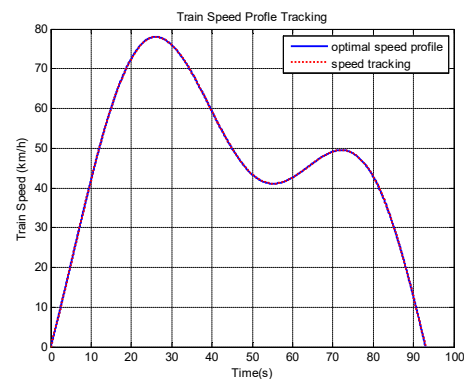
شکل ۱۸- سیگنال کنترلی $u(t)$ در کنترل مد لغزشی فازی بدون حضور نامعینی و اغتشاش

همان‌طور که در شکل‌های فوق ملاحظه می‌فرمایید با کنترل‌کننده مد لغزشی فازی، سیگنال مطلوب $v_d(t)$ که همان سرعت مطلوب پروفایل بهینه سرعت قطار می‌باشد، به خوبی ردیابی شده است. سیگنال خطا نسبت به کنترل مد لغزشی بدون حضور نامعینی و اغتشاش افزایش یافته است که با تنظیم دقیق پارامترهای توابع عضویت، می‌توان خطا را کاهش داد. ولی مهم‌ترین نتیجه‌ای که به دست آمده است، این است که لرزش به طور کامل حذف و هدف از استفاده کنترل‌کننده مد لغزشی فازی برآورده شده است. در ادامه، برای اثبات اینکه کنترل مد لغزشی فازی در برابر نامعینی‌ها و اغتشاشات خارجی نیز مقاوم می‌باشد، شبیه‌سازی را در حضور نامعینی و اغتشاش انجام می‌دهیم. برای این کار، به صورت همزمان 20% نامعینی در وزن قطار و اغتشاش خارجی $d(t) = 0.1 \sin(t)$ را به دینامیک قطار اعمال می‌نماییم. نتایج شبیه‌سازی‌ها در شکل‌های (۱۹) تا (۲۲) نشان داده شده است:

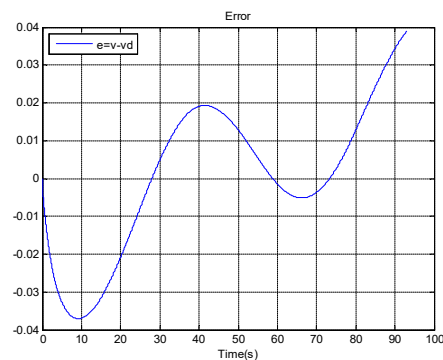
و سیگنال خطا $e(t)$ می‌باشد. در بخش بعد برای از بین بردن لرزش، از کنترل فازی به همراه کنترل مد لغزشی استفاده خواهد شد.

با در نظر گرفتن سطح لغزش به صورت $s(t) = e(t)$ ، مقادیر ثابت به صورت $\eta = 0.1$ ، ثابت های دیویس به صورت $a_{rr} = 8547$ ، $b = 64.2$ ، $c = 2.2452$ ، وزن نامی قطار به صورت $m = 252500 \text{ kg}$ و ورودی مطلوب به صورت رابطه (۴۴)، کنترل‌کننده مد لغزشی فازی نشان داده شده در شکل (۲) را بدون در نظر گرفتن نامعینی و اغتشاش، بر روی دینامیک قطار پیاده‌سازی می‌کنیم. برای دریافت بهترین نتیجه در شبیه‌سازی‌ها، توابع عضویت ورودی $s(t)$ و $\dot{s}(t)$ را مطابق با شکل (۳) در بازه $[-0.75, 0.75]$ و تابع عضویت خروجی $u_f(t)$ را مطابق با شکل (۴) در بازه $[-1, 1]$ قرار می‌دهیم. ضریب k_f نیز برابر با $k_f = 1$ ، قرار داده می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی‌ها در شکل‌های (۱۵) تا (۱۸) نشان داده شده است:



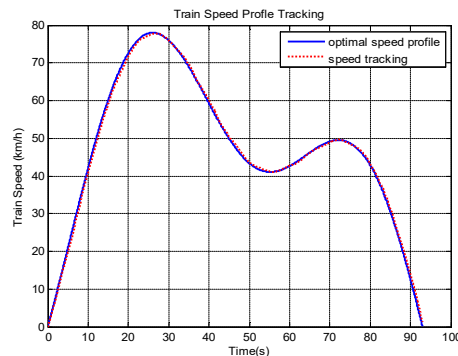
شکل ۱۵- ردیابی سیگنال مطلوب $v_d(t)$ در کنترل مد لغزشی فازی بدون حضور نامعینی و اغتشاش



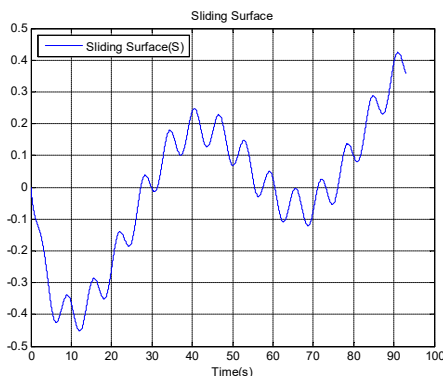
شکل ۱۶- سیگنال خطا $e(t) = v(t) - v_d(t)$ در کنترل مد لغزشی فازی بدون حضور نامعینی و اغتشاش

در سیگنالهای ردیابی و کنترل می‌باشد را نیز حذف نموده است.

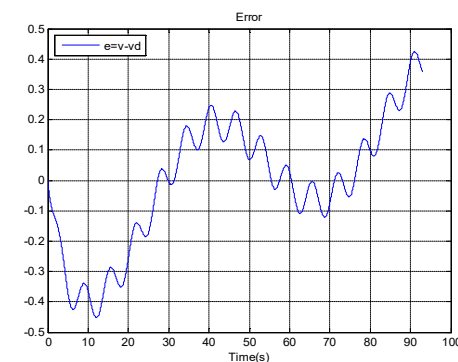
در جدول ۳ مقادیر خطای حالت ماندگار و سیگنال کنترلی $u(t)$ در دو حالت، بدون حضور نامعینی و اغتشاش و همچنین با اعمال ۲۰٪ نامعینی در وزن قطار به همراه اغتشاش، درج شده است.



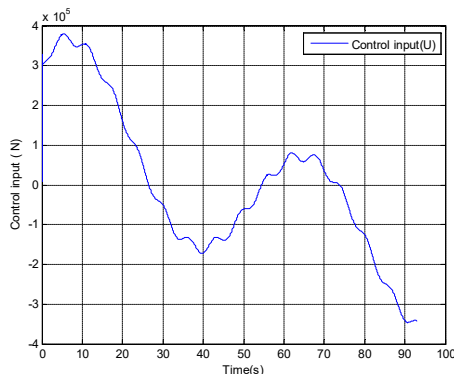
شکل ۱۹- ردیابی سیگنال مطلوب $v_d(t)$ در کنترل مد لغزشی فازی با ۲۰٪ نامعینی در وزن قطار به همراه اغتشاش



شکل ۲۱- سطح لغزش $S(t)$ در کنترل مد لغزشی فازی با ۲۰٪ نامعینی در وزن قطار به همراه اغتشاش



شکل ۲۰- سیگنال خطا $e(t) = v(t) - v_d(t)$ در کنترل مد لغزشی فازی با ۲۰٪ نامعینی در وزن قطار به همراه اغتشاش



شکل ۲۲: سیگنال کنترلی $u(t)$ در کنترل مد لغزشی فازی با ۲۰٪ نامعینی در وزن قطار به همراه اغتشاش

نتایج حاصل نشان دهنده این موضوع می‌باشند که کنترل‌کننده مد لغزشی فازی در حضور نامعینی و اغتشاش نیز، ورودی مطلوب را به خوبی ردیابی نموده و لرزش را نیز به طور کامل حذف می‌نماید و به عنوان یک کنترل‌کننده قدرتمند، علاوه بر داشتن مزایای مقاوم بودن کنترل مد لغزشی، ایراد اصلی کنترل مد لغزشی که همان وجود لرزش

جدول ۳- مقادیر خطای حالت ماندگار و سیگنال کنترلی کنترل‌کننده‌ها در دو حالت اصلی شبیه سازی

خطای حالت ماندگار و سیگنال کنترلی کنترل‌کننده	بدون حضور نامعینی و اغتشاش		اعمال ۲۰٪ نامعینی در وزن قطار به همراه اغتشاش	
	حداکثر سیگنال کنترلی $u(t)$ بر حسب نیوتن (N)	حداکثر سیگنال کنترلی $u(t)$ بر حسب نیوتن (N)	حداکثر سیگنال کنترلی $u(t)$ بر حسب نیوتن (N)	حداکثر سیگنال کنترلی $u(t)$ بر حسب نیوتن (N)
کنترل‌کننده مد لغزشی	$\pm 0.0056 \text{ km/h}$	$4.06 \cdot 10^5 \text{ (N)}$	$\pm 0.0168 \text{ km/h}$	$4.36 \cdot 10^5 \text{ (N)}$
کنترل‌کننده مد لغزشی فازی	$\pm 0.039 \text{ km/h}$	$3.12 \cdot 10^5 \text{ (N)}$	$\pm 0.45 \text{ km/h}$	$3.8 \cdot 10^5 \text{ (N)}$

طور موفقیت‌آمیزی برای کنترل حرکت قطار به کار گرفته شده‌است را توصیف کرده است. کنترل مد لغزشی فازی مقاوم بدون لرزش پیشنهادی، مزیت‌های فراوانی در کاربردهای عملی دارد. این کنترل‌کننده، مزیت مقاوم بودن را از کنترل مد لغزشی و حذف لرزش را از کنترل فازی می‌گیرد.

در روش پیشنهاد شده، پدیده‌ی لرزش که عموماً در کنترل مد لغزشی معمول اتفاق می‌افتد، بدون از دست دادن مقاوم‌پذیری سیستم حذف شده‌است که می‌تواند موفقیتی در حوزه‌ی کنترل حرکت قطار که در آن دینامیک‌ها به وسیله‌ی معادلات دیفرانسیلی کوپل شده، متغیر با زمان و غیرخطی بیان شده‌است، محسوب گردد.

همان‌گونه که در جدول ۳ ملاحظه می‌فرمایید، سیگنال کنترلی $u(t)$ در کنترل‌کننده مد لغزشی فازی نسبت به حالت مشابه در کنترل مد لغزشی مرسوم کاهش یافته است ولی خطای حالت ماندگار افزایش یافته است که با تنظیم دقیق پارامترهای توابع عضویت و یا با افزایش تعداد توابع عضویت و قوانین فازی، می‌توان خطا را به مقدار دلخواه کاهش داد، ولی با توجه به اینکه خطای حالت ماندگار در کنترل مد لغزشی فازی با حضور نامعینی و اغتشاش حداکثر $\pm 0.45 \text{ km/h}$ بوده، قابل قبول می‌باشد و نیازی به تغییر تعداد توابع عضویت ورودی و خروجی و قوانین فازی نمی‌باشد.

۶- نتیجه گیری

مقاله حاضر توسعه‌ی یک کنترل مد لغزشی فازی را که به

مراجع

- [1] M. Miyatake, and H. Ko, "Optimization of train speed profile for minimum energy consumption", IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol. 5, No. 3, April 2010, pp. 263-269.
- [2] Z. Xiao, Z. Zhao, Q. Wang, P. Sun, and X. Feng, "Speed Trajectory Optimization For a High-Speed Train ", WIT Transactions on The Built Environment, Vol. 199, 2020, pp. 261-272.
- [3] H. Yang, Y. Fu, and D. Wang, "Multi-ANFIS Model Based Synchronous Tracking Control of High-Speed Electric Multiple Unit", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 26, No. 3, June 2018, pp. 1472-1484.
- [4] Q. Pu, X. Zhu, J. Liu, D. Cai, G. Fu, D. Wei, J. Sun, and R. Zhang, "Integrated Optimal Design of Speed Profile and Fuzzy PID Controller for Train With Multifactor Consideration", IEEE Access, Vol. 8, August 2020, pp. 152146-152160.
- [5] P. Wang, and R. M. P. Goverde, "Multi-train trajectory optimization for energy-efficient timetabling", European Journal of Operational Research, Vol. 272, No. 2, January 2019, pp. 621-635.
- [۶] سجاد صدر، داود عرب خابوری و مصطفی نمازی، "مدل سازی سیستم کنترل سرعت قطار الکتریکی با لحاظ لغزش چرخ بر روی ریل"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۴، شماره ۴۷، زمستان ۱۳۹۵، صفحه ۲۵۵-۲۶۶.
- [7] S. Su, T. Tang, and X. Li, "Driving strategy optimization for trains in subway systems", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 232, No. 2, February 2018, pp. 369-383.
- [8] H. Ye, and R. Liu, "A multiphase optimal control method for multi-train control and scheduling on railway lines", Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 93, No. 1, November 2016, pp. 377-393.
- [9] M. Ganesan, D. Ezhilarasi, and J. Benni, "Second-order sliding mode controller with model reference adaptation for automatic train operation", Vehicle System Dynamics, Vol. 55, No. 11, June 2017, pp. 1764-1786.
- [10] T. Sun, and L. He, "Implicit Generalized Predictive Control Method For High-Speed Train", Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1861(012111).
- [11] W. ShangGuan, J. Wang, Z. Sheng, X-X. Yu, B. G. Cai, and J. Wang, "Adaptive Fuzzy Planning of Optimal Speed Profiles for High-Speed Train Operation on the Basis of a Pareto Set", Transportation Research Record Vol. 2546, No. 1, January 2016, pp. 103-111.
- [12] C. Xiangxian, Z. Yue and H. Hai, "Train Speed Control Algorithm Based on PID Controller and Single-Neuron PID Controller," 2010 Second WRI Global Congress on Intelligent Systems, 2010, pp. 107-110.

[۱۳] روح اله مقصودی، یعقوب حیدری و بهزاد مشیری، "یک تحلیل مقایسه‌ای از الگوریتم‌های هوش جمعی کلونی زنبور مصنوعی و بهینه‌سازی گروهی ذرات در طراحی یک کنترل‌کننده PID فازی کسری و پیاده‌سازی آن بر روی موتور DC"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۱، شماره ۳۵، زمستان ۱۳۹۲، صفحه ۱۱-۲۳.

[14] V. I. Utkin, "Sliding Modes and Their Application to Variable Structure Systems", MIR Publishing Inc, Moscow, 1978.

[15] J. J. E. Slotine, and W. Li, "Applied Nonlinear Control ", New Jersey: Prentice Hall, 1991.

[16] S. K. Spurgeon, "Choice of discontinuous control component for robust sliding mode performance", International Journal of Control, Vol. 53, No. 1, 1991, pp. 163-179.

[17] S. Y. Wang, C. M. Hong, C. C. Liu, and W. T. Yang, "Design of a static reactive power compensator using fuzzy sliding mode control", International Journal of Control, Vol. 63, No. 2, 1996, pp. 393-412.

[18] Y.S. Lu, and J.S. Chen, "A self-organizing fuzzy sliding-mode controller design for a class of nonlinear servo systems", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 41, No. 5, October 1994, pp. 492-502.

[19] L. A. Zadeh, " Fuzzy sets", Information and Control, Vol. 8, No. 3, 1965, pp. 338-353.

[20] H. T. Yau, and C. L. Chen, "Chattering-free fuzzy sliding-mode control strategy for uncertain chaotic systems", Chaos, Solitons and Fractals, Vol. 30, No. 3, November 2006, pp. 709-718.

[21] L. Guzzella, and A. Sciarretta, "Vehicle Propulsion Systems, Introduction to Modeling and Optimization", Springer Berlin Heidelberg, second edition, 2007.

[22] H. Douglas, P. Weston, D. Kirkwood, S. Hillmansen, and C. Roberts, "Method for validating the train motion equations used for passenger rail vehicle simulation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineer", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 231, No. 4, 2017, pp. 455-469.

[23] B. P. Rochard, and F. Schmid, "A review of methods to measure and calculate train resistances", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 214, No. 4, 2000, pp. 185-199.

[24] C. J. Goodman, "Basic physics of traction and train performance calculations", MSc programme in railway systems engineering, University of Sheffield, 1995.

[25] Q. Y. Wang, P. Wu, Z. C. Liang, and X. Y. Feng, "The hierarchical real-time control of high speed trains for automatic train operation", Computers in Railways, Vol. 135, No. 1, 2014, pp. 17-36.

[26] W. Gao, and J. C. Hung, "Variable structure control of nonlinear system: A new approach", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 40, No. 3, 1993, pp. 45-55.

[27] M. Roopaei, and M. Zolghadri Jahromi, "Chattering-free fuzzy sliding mode control in MIMO uncertain systems", Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications, Vol. 71, No. 10, 2009, pp. 4430-4437.

[۲۸] علی دهقانی فیلی ابادی و غلامرضا حسامیان، "یک روش پیشنهادی برای رتبه بندی فازی در تصمیم گیری چند شاخصه چند دوره ای در محیط فازی نوع-۲"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۹، زمستان ۱۳۹۸، صفحه ۴۷-۶۵.

[29] Y. R. Hwang and M. Tomizuka, "Fuzzy smoothing algorithms for variable structure systems", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 2, No. 4, Nov. 1994, pp. 277-284.

[30] K. Erbatur, O. Kaynak, A. Sabanovic, and I. Rudas, "Fuzzy adaptive sliding mode control of a direct drive robot", Robotics and Autonomous Systems, Vol. 19, No. 2, 1996, pp. 215-227.

[31] C. Y. Liang, and S. W. Tan, "A New Approach to Chattering Reduction in the Sliding Mode Controls", Second International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC 2007), 2007, pp. 334-334.

[32] J. S. R. Jang, C. T. Sun, and E. Mizutani, "Neuro-fuzzy and soft computing: a computational approach to learning and machine intelligence", Prentice Hall, 1997.

[33] L. X. Wang, "A Course in Fuzzy Systems and Control", Prentice-Hall, Upper Saddle River, 1997.

[34] P. Gkortzas, "Study on optimal train movement for minimum energy consumption", Master thesis work, malardalen University, Sweden, 2013.