

شبیه‌سازی سیستم اتوماتیک ترمز قطار جهت توقف دقیق در ایستگاه‌های متروی دارای درب محافظ سکو

مقاله علمی - پژوهشی

ستار یوسفی دیبازر، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
محمد علی صندیدزاده^{*}، دانشیار، دانشکده راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
فاطمه ملایی یزدان آباد علیا، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
^{*}پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sandidzadeh@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۵ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۰۵

صفحه ۲۴۰-۲۲۷

چکیده

در ایستگاه‌های متروی با تراکم مسافری بالا استفاده از درب‌های محافظ سکو یکی از بهترین راه‌های افزایش ایمنی مسافری حاضر در سکو است. جلوگیری از افتادن مسافر بر روی ریل و برخورد با قطار که یکی از رایج‌ترین مشکلات در ایستگاه‌های پر تراکم است و همچنین امکان افزایش سرعت قطار در ورود به ایستگاه و... با نصب درب‌های محافظ سکو برآورده می‌شود. در زمان ورود قطار به ایستگاه درب‌های قطار در مقابل درب‌های محافظ سکو قرار گرفته و پس از تشخیص صحت عملکرد ایست قطار در مقابل درب‌های محافظ سکو و باز شدن آن امکان تردد مسافری فراهم می‌گردد. با توجه به افزایش سرعت قطارها جهت طی مسیر با حداقل زمان ممکن افزایش دقت ترمز قطار در زمان توقف در مقابل درب‌های محافظ سکو در ایستگاه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. سیستم‌های مختلفی در دنیا جهت کنترل ترمز قطار در زمان ورود به ایستگاه‌های دارای درب محافظ قطار طراحی و اجرا شده که هر کدام به نوبه خود دارای نقاط ضعف و قوتی است. اما نقص عمده‌ای که در این سیستم‌ها مشاهده می‌شود عدم مقاومت به بروز اغتشاشات متنوع و تاثیر آن‌ها بر دقت ترمز قطار است. در این تحقیق طراحی الگوریتم ترمز با استفاده از کنترل پیش بین تطبیقی غیر خطی صورت پذیرفته تا این سیستم بتواند با تقریب مناسبی قطار را در ایستگاه به صورت اتوماتیک و با در نظر گرفتن تمامی شرایط محیطی و اغتشاشات احتمالی وارده متوقف نماید.

واژه‌های کلیدی: درب محافظ سکو، راهبری اتوماتیک قطار، کنترل پیش بین، کنترل اتوماتیک ترمز قطار

۱- مقدمه

لذا، در صورتیکه قطار دارای سیستم اتوماتیک حرکت باشد می‌بایست سیستم کنترل ترمز با حساسیت بیشتری طراحی و پیاده سازی گردد (Chen, Chen, Li, & Tang, 2013). مدل‌های به کاررفته در MPC^۱ معمولاً مدل‌هایی برای نشان دادن رفتار یک سیستم دینامیکی پیچیده هستند. الگوریتم کنترل پیش بین پیچیدگی سیستم را افزایش می‌دهد و برای کنترل سیستم‌های ساده که اغلب با کنترل‌کننده‌های PID به خوبی کنترل می‌شوند لازم نیست (Hou, Wang, Yin, & Tang, 2011). از مشخصه‌های دینامیکی رایجی که برای کنترل‌کننده‌های PID مشکل هستند می‌توان از تاخیرهای

سیستم اتوماتیک کنترل حرکت قطار (ATO^۱) و در دل آن سیستم کنترل ترمز دارای پیچیدگی‌ها و عدم قطعیت‌های بسیاری است که با توجه به حیاتی بودن آن بایستی روش‌های با قابلیت اطمینان بالا و با کمترین میزان خطا بر روی آن اجرا شود (Xiaohan & Hanlin, 2016). سیستم‌های اجرا شده در دنیا هر کدام دارای نواقص و محدودیت‌هایی است که با استفاده از نیروی انسانی خطاهای پیش آمده به نحوی جبران سازی می‌شود (Baek, 2009). برای استفاده از سیستم (PSD^۲) در ایستگاه‌های مترو، وجود سیستم کنترل قطار دقیق و بدون وابستگی به اغتشاشات از الزامات بهره برداری است.

توقف دقیق قطار باشد. در این تحقیق از کنترل پیش بین مدل غیرخطی تطبیقی برای این منظور استفاده شده است. دلیل استفاده از کنترل پیش بین غیرخطی این است که معادلات دینامیکی قطار غیرخطی بوده و می‌بایست بتوانیم قیده‌های فیزیکی حاکم بر سیستم را هنگام توقف اتوماتیک در الگوریتم خود در نظر بگیریم. همچنین برای جریان عدم قطعیت‌ها نیز کنترل پیش بین طراحی شده با استفاده از الگوریتم حداقل مربعات بازگشتی تطبیقی است (Zhang, n.d.).

برای دریافت داده جهت استفاده از الگوریتم دو روش را می‌توان در نظر گرفت:

۱. داده‌ها به صورت نقطه‌ای در زمان عبور از قطار از روی بالیزها^۴ ارسال شود.

۲. داده‌ها به صورت پیوسته به سیستم کنترلی ارسال گردد و در پروسه کنترل وارد شوند (Yan, 2017).

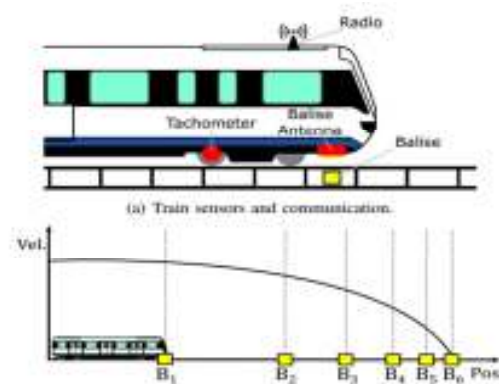
در صورتیکه حالت اول استفاده شود داده‌ی کمی در دسترس خواهد بود و نمی‌توان سیستم را نسبت به اغتشاشات مختلف کنترل نمود. ولی در حالت دوم نیز محدودیت ورود داده به قطار و همچنین صحت داده‌های وارد شده وجود دارد.

الگوریتم طراحی شده از ترکیبی از دو روش فوق است. به این صورت که داده‌های سرعت و موقعیت از تجهیزات نصب شده بر روی قطار از قبیل تاکومتر به سیستم مخابره می‌شود و در زمان عبور قطار از روی بالیزها خطای موقعیت اندازه‌گیری شده اصلاح و الگوریتم کنترلی مقادیر را جایگزین مقادیر قبلی می‌کند و خروجی ترمز اصلاح می‌گردد. در این حالت می‌توان سیستم را به اغتشاشات وارد شده مقاوم نمود (Gang & Liu, 2012).

زمانی طولانی و دینامیک‌های مرتبه بالا نام برد (Xiangxian, Yue, & Hai, 2010). MPC با استفاده از اندازه‌گیری‌های فعلی از سیستم تحت کنترل و حالت دینامیکی فعلی فرایند، مدل‌های MPC و اهداف و محدودیت‌های متغیر فرایند، تغییرات آتی متغیرهای وابسته را محاسبه می‌کند. این تغییرات به گونه‌ای محاسبه می‌شوند که متغیرهای وابسته نزدیک به هدف بمانند و محدودیت‌ها روی متغیرهای وابسته و وابسته رعایت شود. معمولاً MPC تنها اولین تغییر در هر متغیر وابسته را برای اجرا می‌فرستد و محاسبه را برای تغییر بعدی تکرار می‌کند (Gang & Liu, 2012). با وجود آنکه بسیاری از فرایندهای واقعی خطی نیستند اغلب می‌توان آن‌ها را در بازه کوچکی خطی در نظر گرفت. روشهای MPC خطی در بیشتر کاربردها با مکانیسم فیدبک به کار می‌روند که خطاهای پیش‌بینی ناشی از عدم تطبیق بین مدل و فرایند را جبران می‌کند (Wang & Xu, 2014). در کنترل‌کننده‌های پیش بین که تنها از مدل‌های خطی تشکیل می‌شوند اصل برهم نهی (جمع آثار) جبر خطی امکان می‌دهد اثر تغییرات متغیرهای وابسته چندانکه برای پیش‌بینی پاسخ متغیر وابسته با هم جمع شوند. با این کار مسئله کنترلی به یک سری محاسبات جبری ماتریسی مستقیم ساده می‌شود که سریع و مقاوم هستند.

۲- فرایند کنترل ترمز قطار

مدل دینامیکی حرکت قطار دارای عدم قطعیت‌های زیادی بوده و سیستم کنترل اتوماتیک قطار باید علی‌رغم وجود عدم قطعیت‌ها و محدودیت‌های فیزیکی موجود در سیستم قادر به



شکل ۱. توقف قطار با استفاده از داده‌های ورودی از ۶ بالیز

۱. سرعت قطار نباید از حد بیشینه تجاوز نماید.
 ۲. میزان کاهش و افزایش شتاب بایستی در محدوده قابل اعمال توسط قطار باشد.
 منظور از شتاب افزایش نیروی تراکشن قطار و شتاب کاهش نیروی ترمزی اعمال شده بوسیله کفشک ترمز قطار است که اطلاعات لازم جهت موارد گفته شده از ناوگان خط ۲ قطار شهری مشهد استخراج شده و مورد استفاده قرار گرفته است.

همانطور که در شکل شماره ۱ نشان داده شده است هدف این است زمانی که قطار از نقطه شروع ترمز (بالیز اول) عبور کرد، شتاب قطار به نحوی تغییر پیدا کند که در نهایت قطار در نقطه توقف (آخرین بالیز) بایستد. همچنین کنترل کننده علاوه بر اینکه در مقابل عدم قطعیت‌ها (وزن قطار، شرایط جوی، خطای سنسور و ...) باید مقاوم باشد، قیدهایی فیزیکی حاکم بر پلانت را نیز رعایت کند (Chen, Chen, & Member, 2013). قیدهایی فیزیکی در نظر گرفته شده شامل موارد ۱ و ۲ است.

۲- مدل دینامیک قطار

جهت اعمال و بررسی کلیه المان‌های نامبرده شده مدل دینامیکی قطار را به صورت زیر فرض شده است (Froidh, 2019):

$$\dot{x} = v \quad (1)$$

$$\dot{v} = \frac{F(t)}{M(1+\gamma)} - (a+bv+cv^2) - g(x) \quad (2)$$

$$\text{Davis Formula : } R = av^2 + bv + \gamma \quad (3)$$

$$\alpha_{rain} = \frac{\alpha_o}{1+T_p s} e^{-T_d s} \quad (4)$$

جدول شماره ۱. پارامترهای قطار

پارامتر	مقدار
وزن قطار	۴۰۰ تن
حداکثر نیروی موتور تراکشن	۲۸۰ کیلو نیوتن
طول قطار	۲۲۰ متر
حداکثر نیروی ترمز	۴۰۰ کیلو نیوتن
a	۲,۰۹
b	۰/۰۳۹
c	۰/۰۰۰۶۷۵
g	۹/۸۱ متر بر ثانیه
ضریب حجم چرخشی γ	۰/۰۶

قطعیت هستند. مقادیر نامی این پارامترها که در جدول شماره ۱ نمایش داده شده بر اساس اطلاعات استخراج شده از خط ۲ قطار شهری مشهد است.

که در آن x موقعیت، v سرعت، F نیروی ترمز و $a, b, c, g(x)$ نیز پارامترهای برگرفته از فرمول دیویس ۵ هستند که مربوط به انواع اصطکاک‌های موجود در ریل است و بدلیل تغییرات جوی در اطراف ریل قطار این پارامترها دارای عدم

۳- اغتشاشات و نویز سیستم

طراحی در نظر گرفت (Lu, Guo, Dong, & Ma, 2015):

$$u(t) = F(t) \quad (5)$$

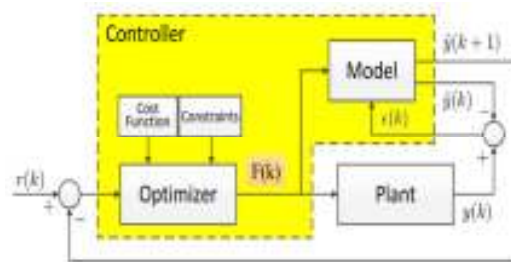
$$\Delta a = 0.2 \sin(0.005t) \quad (6)$$

$$\Delta b = 0.004 \sin(0.005t) \quad (7)$$

$$\Delta c = 0.000067 \sin(0.005t) \quad (8)$$

$$\Delta M = i(t) \quad i \in [0, \delta] \quad (9)$$

با توجه به بررسی‌های انجام شده می‌توان اثر اغتشاشات وارده به قطار از قبیل وزن و اصطکاک چرخ با ریل و شرایط جوی و رطوبت و آب و هوا را به صورت زیر در پارامترهای



شکل ۲. ساختار سیستم کنترل اتوماتیک ترمز

قطار از زمان بعدی تمام مراحل بالا دوباره تکرار می‌شود (Gang & Liu, 2012). بدلیل دقیق نبودن سنسورهای داخل قطار که برای اندازه‌گیری محلی و پیوسته سرعت و موقعیت استفاده می‌شوند، از بالیزها استفاده می‌شود. تعداد محدودی بالیز در نظر می‌گیریم و فرض می‌کنیم که توسط آن موقعیت و سرعت قطار بصورت دقیق اندازه‌گیری شود سپس از این اندازه‌گیری‌ها برای کالیبره کردن سنسورهای خود قطار استفاده می‌شود. برای ساده‌تر شدن الگوریتم کنترلی فرض می‌کنیم که هنگام عبور از بالیز، موقعیت اندازه‌گیری شده توسط سنسورهای قطار با موقعیت دریافت شده از بالیز جایگزین شود. مثلاً ممکن است قطار به دلیل لغزیدن و ... موقعیت خود را نسبت به نقطه توقف هدف ۱۰۰ متر نشان دهد ولی بالیز موقعیت دقیق نسبت به نقطه توقف هدف را ۸۰ متر نشان دهد. در این صورت ۸۰ متر که موقعیت صحیح است به عنوان شرایط اولیه متغیرهای حالت قطار در لحظه عبور از بالیز در نظر گرفته می‌شود.

همچنین وزن قطار در ایستگاه‌های مختلف متغیر است. بر اساس این مدل و به منظور کنترل اتوماتیک توقف قطار در نقطه هدف، سیستم حلقه بسته با کنترل پیش بین مدل غیرخطی تطبیقی بصورت شکل شماره ۲ طراحی می‌شود (Yin, Chen, Tang, Zhu, & Zhu, 2016). در این ساختار $y(k)$ متغیرهای حالت واقعی، $\hat{y}(k)$ متغیرهای حالت تخمینی از مدل پلانت و $r(k)$ سیگنال حالت مرجع است. یعنی در شکل ۲ فرض می‌شود که مبدا مختصات معادلات دینامیکی همان نقطه شروع ترمز باشد و هدف این است که قطار با سرعت صفر در موقعیت ترمز هدف قرار گیرد. $e(k)$ خطای بین مدل واقعی پلانت و بلوک مدل است. از این سیگنال خطا با استفاده از الگوریتم RLS^1 برای جبران عدم قطعیت‌ها استفاده می‌شود. در گام بعدی، پس از بروزرسانی مدل پلانت در قسمت کنترل کننده پیش بینی حالت‌های آینده سیستم انجام می‌شود و با در نظر گرفتن یک تابع هزینه مناسب و قیدهایی حاکم بر پلانت واقعی بهینه سازی انجام می‌شود. خروجی بهینه ساز نیروی ترمز F در زمان k است. بعد از اعمال این نیرو به

۴- طراحی تخمینگر حداقل مربعات بازگشتی

به اینکه عدم قطعیت فقط در معادله حالت دوم وجود دارد، این معادله را بصورت زیر می‌نویسیم تا بصورت فرم استاندارد رگرسیون خطی دربیاید:

$$-v(t) = \begin{bmatrix} a+g & b & c & \frac{1}{M(1+\gamma)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ v \\ v^2 \\ -F(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

در معادله ۱۱ بردار رگرسور، θ بردار پارامتر و $y(t)$ نیز بردار خروجی مدل رگرسیون خطی است. حال با داشتن دنباله سیگنال‌های $y(t)$ و $y(t)$ از طریق تخمینگر حداقل مربعات بازگشتی یا RLS، بردار پارامتر θ تخمین زده می‌شود.

پارامترهای مدل دینامیکی قطار دارای عدم قطعیت زیادی هستند. برای جبران عدم قطعیت از الگوریتم حداقل مربعات بازگشتی استفاده می‌شود (Wang & Xu, 2014). با توجه

در معادله بالا بردار $[a+g \ b \ c]$ مجهول و دارای عدم قطعیت است ولی بقیه سیگنال‌ها مشخص و قابل اندازه‌گیری هستند. معادله بالا را با استفاده از تقریب اولر برای مشتق گیر بصورت زیر بازنویسی می‌کنیم.

$$\theta^T = \begin{bmatrix} a+g & b & c & \frac{1}{M(1+\gamma)} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\varphi(t) = \begin{bmatrix} 1 \\ v \\ v^2 \\ -F(t) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$y(t) = -\frac{v(t+1) - v(t)}{T_s} \quad (13)$$

$$y(t) = \theta^T \varphi(t) \quad (14)$$

$$\theta^T(t) = \theta^T(t-1) + K(t)(y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1)) \quad (15)$$

$$K(t) = p(t-1)\varphi(t)(1 + \varphi^T(t)p(t-1)\varphi(t))^{-1} \quad (16)$$

$$p(t) = (1 - K(t)\varphi^T(t))p(t-1) \quad (17)$$

$$\hat{\theta}(0) = 0_{n \times 1} \quad (18)$$

$$p(0) = 1000 \times I_{n \times 1} \quad (19)$$

پلانت پایه‌ریزی شده‌اند. بنابراین در ابتدا به گسسته سازی دینامیک پلانت می‌پردازیم. معادله دینامیکی پلانت با تعریف متغیر حالت Z و بردار f بصورت زیر بازنویسی می‌شود.

از بردار پارامترهای تخمینی $\hat{\theta}(t)$ در مراحل بعدی برای محاسبه سیگنال کنترلی در کنترل پیش بین مدل استفاده می‌شود. اغلب کنترل کننده‌های پیش بین بر اساس مدل گسسته

$$z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ v(t) \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$u(t) = F(t) \quad (21)$$

$$f_0(u(t), z(t)) = \begin{bmatrix} z_2 \\ \frac{u(t)}{M(1+\gamma)} - (a+bz_2+cz_2^2) - g(z_1) \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\dot{z}(t) = f_0(u(t), z(t)) \quad (23)$$

حال برای گسسته‌سازی معادله مرتبه اول بالا از تقریب اویلر استفاده می‌شود:

$$\frac{z(t+1) - z(t)}{T_s} = f_0(u(t), z(t)) \quad (24)$$

سپس با ساده‌سازی معادله بالا، معادله گسسته زیر بدست می‌آید:

$$z(t+1) = z(t) + T_s f_0(u(t), z(t)) \quad (25)$$

زمان نمونه برداری است. در نهایت معادله گسسته با تعریف f بصورت زیر ساده سازی می‌شود:

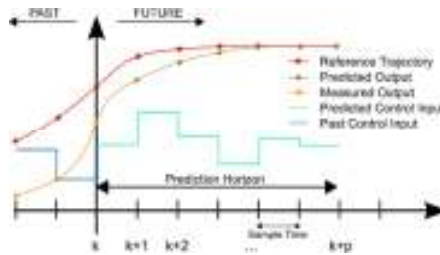
$$z(t+1) = f(u(t), z(t)) \quad (26)$$

البته در مدل بالا از پارامترهای تخمینی که قبل از اجرای MPC توسط RLS تعیین می‌شود، استفاده می‌شود. پس تعریف دقیق تر مدل گسسته بصورت زیر است. ولی برای سادگی نوشتن در ادامه از همان نتاسیون بالا استفاده می‌شود.

$$z(t+1) = f(u(t), z(t), \hat{\theta}(t)) \quad (26)$$

$\hat{\theta}(t)$ تخمین پارامترهای مدل در نمونه زمانی t ام است.

استراتژی کنترل پیش بین مدل در شکل زیر نمایش داده شده است.



شکل ۳. استراتژی کنترل پیش بین

به گذشته است و توسط سنسورها ثبت شده‌اند)، حال بر اساس مدلی که از پلانت پیش بینی حالت‌ها و خروجی‌های پلانت در یک بازه زمانی محدود در آینده (افق پیش‌بینی یا همان

فرض کنید که در نمونه زمانی t ام قرار داریم و تمام اطلاعات سیستم از قبیل ورودی‌ها، خروجی‌ها، اغتشاشات و عدم قطعیت‌ها تا این زمان وجود دارد (چون این اطلاعات مربوط

نظریه فاکتور راحتی مسافری لحاظ شده است. برای تعیین سیگنال‌های ورودی آینده، یک تابع هزینه که بصورت مجموع مربعات خطای ردیابی در طول افق پیش بینی و مجموع مربعات سیگنال ورودی در طول افق کنترل است، تعریف می‌شود و از طریق بهینه سازی تابع هزینه سیگنال‌های ورودی آینده بدست می‌آید. سپس نمونه اولیه از سیگنال ورودی آینده به پلانیت اعمال می‌شود و برای نمونه زمانی بعدی تمام مراحل قبل تکرار می‌شود. فرض می‌کنیم که افق پیش بین و افق کنترل یکسان و برابر p باشد. حال سیگنال‌های ورودی در آینده بصورت بردار زیر تعریف می‌شود.

$$U^T = [u(t) \ u(t+1) \ \dots \ u(t+p-2) \ u(t+p-1)] \quad (27)$$

حالت‌های سیستم در طول افق پیش بین بصورت زیر بدست می‌آیند:

$$z(t+1) = f(u(t), z(t)) \quad (28)$$

$$\min_x f(x) \text{ such that}$$

$$z(t+3) = f(u(t+2), z(t+2)) = f(u(t+2), f(u(t+1), f(u(t), z(t)))) \quad (29)$$

به همین ترتیب پیش بینی تا گام آخر انجام می‌شود و در گام از پیش بینی‌های قبلی برای پیش بینی جدید استفاده می‌شود.

$$z(t+p) = f(u(t+p-1), z(t+p-1)) \quad (30)$$

در نهایت به این نتیجه می‌رسیم که تمام پیش بینی‌ها تابع متغیر حالت در زمان t یعنی $z(t)$ و سیگنال‌های ورودی آینده یعنی $u(t)$ تا $u(t+p-1)$ است. پس کل پیش بینی‌های بالا را می‌توان به فرم ماتریسی زیر نوشت:

$$Z^T = [z(t+1) \ z(t+2) \ \dots \ z(t+p-1) \ z(t+p)] \quad (31)$$

$$Z^T = F_p(u(t), U^T) \quad (32)$$

Z بردار حالت‌های پیش بینی شده و F_p نیز یک تابع غیرخطی برداری از حالت در زمان t و ورودی‌های آینده است و بر اساس معادلات پیش بینی حالت‌ها بدست می‌آید.

مثلا سطر اول آن $f(u(t), z(t))$ و سطر دوم آن $f(u(t+1), f(u(t), z(t)))$ است.

سیگنال Predicted Output در شکل ۳ بصورت یک تابع از ورودی‌های آینده در یک بازه محدود (افق کنترل) به دست می‌آوریم. هدف این است که سیگنال‌های ورودی آینده را به نحوی انتخاب کنیم که حالت‌های پیش بینی به حالت‌های مرجع (سیگنال Reference Trajectory در شکل ۳) نزدیک شود. همچنین سیگنال ورودی باید قیدهای فیزیکی حاکم بر پلانیت را نیز برآورده کند زیرا مطابق جدول ۱ حداکثر و حداقل دامنه سیگنال ورودی ۲۸۰ و ۴۰۰- کیلونیوتن است و اگر سیگنال ورودی خارج از بازه مذکور قرار گیرد عملی نخواهد شد. علاوه بر این محدوده مجاز تغییرات با در

تابع هزینه

حالت‌های سیستم به مبدا مختصات است یعنی در حالت ماندگار حالت‌ها باید برابر صفر شوند که بدین معنی است در موقعیت صفر سرعت نیز صفر است. بنابراین، تابع هزینه بصورتی انتخاب می‌شود که نقطه مینیمم مطلق آن همان مبدا مختصات باشد:

$$Cost = \sum_{i=1}^{i=p} |z(t+i)|^2 \quad (33)$$

در تابع هزینه بالا دامنه سیگنال ورودی لحاظ نشده است و ممکن است دامنه آن بالاتر از حدود مجاز قرار گیرد. به همین دلیل ترم دیگری نیز به تابع هزینه اضافه می‌کنیم.

$$Cost = \sum_{i=1}^{i=p} |z(t+i)|^2 + \sum_{j=0}^{j=p-1} |u(t+j)|^2 \quad (34)$$

ترم دوم در واقع بیانگر انرژی سیگنال ورودی است. حال تابع هزینه بالا، بر اساس معادلات پیش بینی انجام شده و بردار سیگنال ورودی در آینده بصورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$Cost = Z^T Z + U^T U \quad (35)$$

که حال می‌توان برای پیش بینی‌های مختلف نیز وزن‌های متفاوتی لحاظ کرد. در این پروژه ماتریس‌های وزنی را برابر ماتریس همانی فرض می‌کنیم.

$$Cost = Z^T QZ + U^T RU \quad (36)$$

پس مسئله کنترل پیش بین مدل بصورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \text{minimize :} & \quad Z^T QZ + U^T RU \\ \text{subject to :} & \quad U \in [U_{min} \ U_{max}] \end{aligned} \quad (37)$$

مرجع را با Z_r تعریف می‌کنیم و اغلب بصورت تابع تبدیلی تعریف می‌شود که در زمان مناسب و با حرکتی که باعث رنجش مسافری نشود، به سمت صفر حرکت کند. پروفایل مرجع را می‌توان به فرم فضای حالت استاندارد مرتبه دوم زیر تعریف کرد (البته می‌توان از هر تابع تبدیلی دیگری نیز استفاده کرد فقط باید این شرط را داشته باشد که متغیر حالت دومی مشتق متغیر حالت اولی باشد).

اما یک نکته پنهان در معادلات بالا زمان است. طبیعتاً در سیستم حلقه بسته با تابع هزینه بالا ممکن است قطار در زمان خیلی کوتاهی به مبدا مختصات برسد (یعنی سرعت قطار خیلی زیاد شود). این عملکرد مورد تایید نبوده و حس نامطلوبی را در مسافری قطار ایجاد خواهد کرد. برای رفع این مشکل پروفایل مرجعی را تعریف می‌کنیم که قطار با حرکتی شبیه پروفایل مرجع به سمت مبدا مختصات حرکت کند. پروفایل

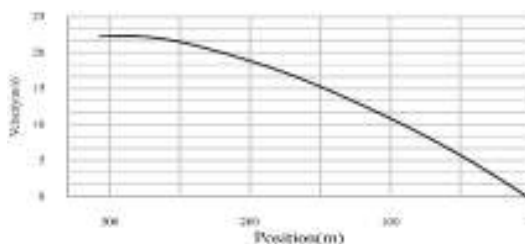
$$\dot{z}_r(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\alpha\omega_n \end{bmatrix} z_r \quad (38)$$

در مدل بالا α ضریب میرایی و ω_n فرکانس نوسانات نامیرا است و با تنظیم این دو پارامتر می‌توان پروفایل‌های مرجع دلخواهی را طراحی کرد. بنابراین، باید تابع هزینه بصورتی اصلاح شود که قطار پروفایل مرجع را دنبال کند.

$$\begin{aligned} \text{minimize : } & (Z - Z_r)^T Q (Z - Z_r) + U^T R U \\ \text{subject to : } & U \in [U_{min} \ U_{max}] \end{aligned} \quad (39)$$

و باید بصورت مستقیم به بهینه سازی تابع هزینه پردازیم. یکی از معروف‌ترین ابزارها برای حل مسائل بهینه سازی غیرخطی مقید در نرم افزار متلب تابع **Fmincon** است. این تابع در حالت کلی مسئله بهینه سازی زیر را حل می‌کند.

Z_r متغیرهای حالت مرجع در طول افق پیش بین است که با توجه به مشخص بودن دینامیک مرجع این پارامتر معلوم است. حال با توجه اینکه Z یک تابع کاملا غیرخطی بر حسب U است نمی‌توان از فرم‌های متعارف کنترل پیش بین استفاده کرد



شکل ۴. موقعیت قطار بر حسب سرعت

$$\text{Min } f(x) \text{ such that } \begin{cases} c(x) \leq 0 \\ \text{ceq}(x) = 0 \\ A x \leq b \\ A_{eq} x = b_{eq} \\ lb \leq x \leq ub \end{cases} \quad (40)$$

بهینه سازی **Fmincon** با مسئله بهینه سازی کنترل پیش بین مدل، مجهولات فرم استاندارد تعیین و سپس بهینه سازی انجام می‌شود. پروفایل مرجع مطابق شکل ۴ و معادله خطای سنسور قطار نیز مطابق فرمول زیر تغییر می‌کند.

$$x_{row}(t) = x_{real}(t) + 2 \times (1 - e^{-t/\tau}) \quad (41)$$

توجه به تجربیات عملی به دست آمده در نگهداری و تعمیرات ناوگان مترو در نظر گرفته شده است.

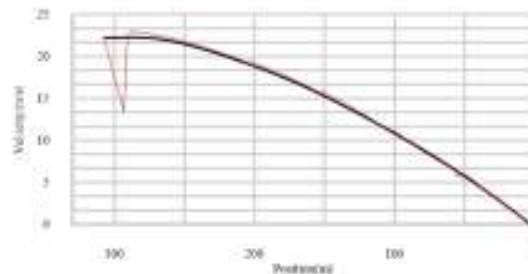
در این مسئله بهینه سازی، C و Ceq شامل قیدهای نامساوی و مساوی غیرخطی؛ b_{eq} , A_{eq} , B , A نیز شامل قیدهای نامساوی و مساوی خطی است و lb و ub نیز محدوده متغیر تصمیم را مشخص می‌کند. با تطابق فرم استاندارد تابع

به عبارت دیگر خطای موقعیت سنسور موقعیت قطار از یک موقعیت شاخص مکانی (بالیز) تا موقعیت بعدی بصورت نمایی حداکثر به اندازه ۲ متر افزایش پیدا می‌کند. این مقدار با

نمودار حرکت قطار بر اساس مدل دینامیک

در قسمت پردازش است. با توجه به اینکه در شروع پروسه فعالیت سیستم به دلیل اعمال تاخیر از زمان ارسال فرمان ترمز تا زمان شروع ترمزگیری توسط عملگر مکانیکی قطار در الگوریتم طراحی، در لحظات اولیه سیستم بدون فیدبک بوده و پرشی که در ابتدای نمودار قرمز رنگ مشاهده می‌شود به همین دلیل است. سپس رفته رفته خطاهای تاکومتر و لغزش چرخ و همچنین رطوبت روی ریل به سیستم وارد شده و در مسافت اندازه گیری شده بوسیله تاکومتر قطار (که به واسطه تعداد دوران فلنج قطار مسافت را اندازه گیری می‌کند)، به سیستم اعمال می‌شود و در ادامه در نقطه عبور از بالیز این خطای مسافت طی شده توسط قطار اصلاح می‌شود و بنابراین شتاب ترمزی که خروجی الگوریتم است با توجه به نسبت سرعت بر موقعیت جدید قطار اصلاح شده و اعمال می‌گردد. با توجه به اینکه در قطار عملگر ترمز با مقداری تاخیر پس از دریافت فرمان ترمز عمل می‌کند. لذا، در کل پروسه این مطلب نیز در نظر گرفته شده است. بنابراین بایستی کنترل کننده ما تاخیر و عقب افتادگی ارسال فرمان تا زمان اجرای آن توسط ترمز قطار را نیز جبران نماید. روند ذکر شده در زمان عبور قطار از روی یک بالیز تا بالیز بعدی تکرار می‌شود.

نمودار حرکت قطار از زمان شروع ترمز تا توقف کامل در شرایط ایده آل و بدون حضور عوامل موثر برای ایجاد خطا به صورت شکل ۴ است. باید توجه کرد که در این شرایط قطار دقیقاً در نقطه مد نظر توقف خواهد نمود. اما در شرایط واقعی و تحت تاثیر عوامل مختلف میزان خطای فاصله توقف از نقطه مورد نظر متفاوت از حالت ایده آل خواهد بود. همانطور که در شکل ۴ دیده می‌شود زمانیکه که سرعت قطار به صفر می‌رسد فاصله از نقطه توقف مورد نظر همزمان صفر شده و در حالت ایده آل قطار در نقطه از پیش تعیین شده در ایستگاه متوقف می‌گردد. برای نشان دادن نحوه تحقق عملکرد سیستم، نمودار ترمز قطار را بر حسب موقعیت و سرعت در شکل ۵ نمایش داده شده است. خروجی سیستم در حضور عوامل اغتشاش و به رنگ قرمز و بدون حضور اغتشاش به رنگ مشکی نشان داده شده است. در شکل بالا که نشان دهنده سرعت بر حسب موقعیت قطار است، خط مشکی رنگ نمایش دهنده حرکت برنامه ریزی شده قطار از زمان ترمزگیری تا زمان توقف در نقطه مورد نظر ایستگاه و در حالت ایده آل و بدون بروز اغتشاش است. نمودار قرمز رنگ نشان دهنده سرعت قطار نسبت به موقعیتی که در آن قرار دارد است. این نمودار بر پایه اطلاعات دریافت شده از تمامی سنسورها (تاکومتر و بالیزو ..)

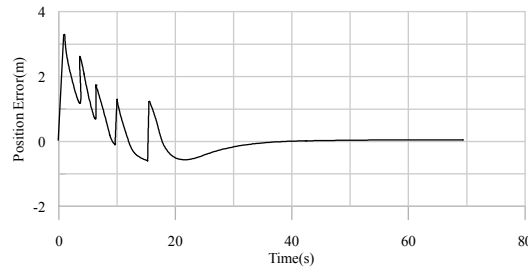


شکل ۵. نمودار موقعیت قطار بر حسب زمان

خطای تعقیب موقعیت قطار

تا بالیز بعدی که حدود ۱۰۰ متر است این خطا که تحت تاثیر عوامل مختلف به وجود می‌آید افزایش یافته و در نهایت با رسیدن قطار به بالیز بعدی خطای اندازه گیری تجهیزات خود قطار اصلاح شده و موقعیت جدید جایگزین موقعیت قبل در الگوریتم ترمزی می‌گردد.

میزان اختلاف بوجود آمده بین موقعیت قطار و پروفیل طراحی حرکت قطار در شکل ۶ نمایش داده شده است. با توجه به اینکه این خطا در شبیه سازی به صورت دستی وارد شده است، تلاش بر این بوده که مقدار آن در محدوده مقدار واقعی در نظر گرفته شود. مقدار خطای اندازه گیری شده در محدوده زیر ۲ متر است. در حقیقت در فاصله بین یک بالیز



شکل ۶. مقدار خطای تعقیب موقعیت قطار

آمده بین پروفایل طراحی و حرکت واقعی قطار نمایش داده شده است. در زمان عبور از بالیز اول مقدار خطا زیاد بوده که تا بالیز بعدی روند کاهشی را دارد.

در سیستم طراحی شده برای افزایش دقت می بایست قطار پروفایل طراحی شده موقعیت را دنبال کند و نسبت به آن وضعیت خود را اصلاح کند. در شکل ۶ مقدار خطای بوجود

شاخص‌های کیفیت عملکرد سیستم اتوماتیک ترمز

الگوریتم‌های مختلف، می‌تواند معیار خوبی برای سنجش تحقق پذیری طراحی صورت گرفته شده نیز باشد که این مورد به نوبه خود در حمل و نقل ریلی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است.

جهت بررسی کیفیت عملکرد سیستم ترمز قطار شاخص‌هایی از جمله میانگین خطا و قابلیت اطمینان و ... با توجه به داده‌های به دست آمده از خروجی سیستم تعریف شده است. این شاخص‌ها علاوه بر امکان ایجاد مقایسه بین

میانگین خطاهای توقف

آن شرایط در شبیه سازی بصورت مرحله به مرحله انجام شده است.

میانگین خطای توقف \bar{e} با توجه به یک دوره شبیه سازی با اعمال شرایط متغیر به صورت زیر محاسبه می شود. تغییر در تمامی شرایط اولیه از حالت صفر تا حداکثر مقدار تاثیر گذاری

$$\bar{e} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m e_i \quad (42)$$

$$\bar{e} = 0.866 \text{ m} = 8.66 \text{ cm}$$

به دست آمده از آن نیز دقیق تر است. e_i نمایش دهنده مقدار خطا در مرتبه i ام است. در اینجا برای دقیق تر بودن مقدار میانگین خطا $m = 200$ در نظر گرفته شده است.

در فرمول فوق \bar{e} نمایش دهنده مقدار میانگین خطا است و هر چقدر به صفر نزدیک تر باشد نشان دهنده کارایی بهتر الگوریتم در شرایط وجود اغتشاش بوده و m تعداد دفعات تکرار سیکل است که هر چقدر مقدار m بیشتر باشد تقریب

شاخص قابلیت اطمینان

می‌گیرند. مقدار حداکثر انحراف از نقطه توقف مجاز در این مقاله ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. شاخص قابلیت اطمینان را می‌توان از طریق رابطه زیر محاسبه نمود.

تعداد دفعاتی که سیستم کنترل وظیفه خود را به درستی انجام می‌دهد شاخص قابلیت اطمینان تعریف می‌شود. به عبارتی دیگر تعداد دفعاتی که مقدار خطا در محدوده مجاز است را نسبت به کل دفعات تکرار شاخص قابلیت اطمینان در نظر

$$p_r = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m p_i \times 100 \quad (۴۳)$$

$$p_r = 99.91 \%$$

دفعات تکرار ۲۰۰ مرتبه در نظر گرفته شده است تا بتوان معیار خوبی برای تحقق الگوریتم طراحی شده در نظر گرفت. مقدار p_r قابل قبول جهت تحقق پذیری سیستم بالای ۹۹/۵٪ است. افزایش افق پیش بین و کاهش زمان نمونه برداری پاسخ به دست آمده را دقیق تر و به واقعیت نزدیک تر می کند.

در فرمول فوق p_i نشان دهنده موفقیت و یا عدم موفقیت و مقدار آن ۰ و ۱ است که مقدار ۰ برای عدم موفقیت و مقدار ۱ برای موفقیت در تنظیم فاصله توقف است. p_r مقدار درصد کلی امکان موفقیت سیستم طراحی شده را نشان می دهد. m تعداد دفعات تکرار این الگوریتم را نشان می دهد. تعداد

میانگین مطلق خطای توقف

در مساله سیستم کنترل اتوماتیک ترمز قطار خطای توقف در هر بار شبیه سازی به صورت e_i نشان داده می شود. اگر شبیه سازی را m مرتبه تکرار کنیم، خطای توقف به صورت استاتیک را می توان از فرمول زیر به دست آورد. $(i=1.2....m)e_i$

$$MAE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |e_i| \quad (۴۴)$$

MAE نمایش دهنده میانگین عملکرد یک الگوریتم است. پایین بودن MAE نشان دهنده خوب بودن عملکرد الگوریتم است. اندیس e_m نشان دهنده حداکثر مقدار خطای توقف است به صورت زیر تعریف می شود:

$$e_m = \max |e_i| \quad (۴۵)$$

اگر مقدار e_m کمتر از ۳۰ سانتی متر باشد الگوریتم عملکرد خوبی برای توقف اتوماتیک قطار دارد. در شبیه سازی صورت گرفته این شاخص زیر ۱۵ سانتی متر است.

۵- نتیجه گیری

صورت گرفته بر روی مقالات ارایه شده در زمینه ترمز ایمن و هوشمند و بدون دخالت نیروی انسانی، روش های آنالیز و پیاده سازی شده در شرایط واقعی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به مطالب ذکر شده سیستمی بر مبنای مدل کنترل پیش بین مورد استفاده قرار گرفت و با شبیه سازی شرایط فیزیکی واقعی حاکم بر خط ۲ مترو مشهد شبیه سازی و نمونه برداری صورت پذیرفت و خروجی های مد نظر استخراج گردید. سپس بر اساس الگوریتم کنترل پیش بین بر روی مدل دینامیکی قطار و با در نظر گیری شرایط واقعی و ایجاد تعدی اغتشاشات بر روی آن شبیه سازی شد. نتایج بدست آمده مورد تحلیل قرار گرفته و نمودارهای خروجی برحسب پارامتر خطای موقعیت

در این تحقیق نحوه عملکرد سیستم ترمز قطار در ایستگاه های دارای درب محافظ سکو مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به لزوم عملکرد ترمز قطار با دقت بسیار بالا و همچنین محدودیت های فیزیکی سیستم ترمز قطار، نیازمند سیستم کنترلی توانمندی هستیم که با توجه به مخاطرات احتمالی در سیستم ترمز و یا شرایط محیطی حرکت قطار که موثر در فرایند ترمز گیری است، سیستم ترمز عملکرد خود را به خوبی حفظ نماید و از کارایی مورد قبولی برخوردار باشد. از طرفی دقت محل توقف قطار از اهمیت بالایی برخوردار است و برای تامین این مورد می بایست سیستم طراحی شده از حساسیت و قابلیت اعتماد بالایی برخوردار باشد. با بررسی های

اعتماد و تحقق پذیری بالایی نیز برخوردار است. هرچند شبیه سازی صورت گرفته بر پایه اطلاعات و سیستم ناوگان خط ۲ قطار شهری مشهد است، اما امکان بازبینی جهت استفاده در تمامی سیستم های مترویی بر پایه سیگنالینگ ETCS را دارا بوده و انعطاف پذیری لازم را دارد.

مورد بررسی قرار گرفت. پس از بررسی صحت عملکرد مورد نیاز سیستم شاخص های بررسی کیفیت و تحقق پذیری سیستم بصورت جداگانه محاسبه گردید. پس از بررسی نتایج مشاهده شد که طراحی صورت پذیرفته قابلیت استفاده جهت تنظیم دقیق نقطه توقف را در محدوده استاندارد داشته و از ضریب

۶- پی نوشت ها

1. Automatic Train Operation
2. Platform Screen Door
3. Model Predictive Control
4. Balise
5. Davis Equation
6. Recursive Least Square

۷- مراجع

-Lu, X., Guo, Q., Dong, H., & Ma, B., (2015), "The research and application of NMPC in automatic train operation. WSEAS Transactions on Systems and Control, 10, pp.228-236.

-Wang, L. S., & Xu, H. Z., (2014), "Nonlinear Model Predictive Control for Automatic Train Operation with Actuator Saturation and Speed Limit", Applied Mechanics and Materials, 678, pp.377-381.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/am.m.678.377>.

-Xiangxian, C., Yue, Z., & Hai, H., (2010), "Train Speed Control Algorithm Based on PID Controller and Single-Neuron PID Controller", 2010 Second WRI Global Congress on Intelligent Systems, 1, pp.107-110.
<https://doi.org/10.1109/GCIS.2010.41>.

-Xiaohan, L., & Hanlin, S., (2016), "Research Status of Automatic Train Operation for Metro, (Jimec)", pp.320-324.

-Yan, H. S. J., (2017), "Optimal Control of Rail Transportation Associated Automatic Train Operation Based on Fuzzy Control Algorithm and PID Algorithm".

-Yin, J., Chen, D., Tang, T., Zhu, L., & Zhu, W., (2016), "Balise arrangement optimization for train station parking via expert knowledge and genetic algorithm", 40, pp.8513-8529.
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.04.015>.

-Zhang, Y. C. . L. M. Y., (n.d.), "Application of fuzzy predictive control technology in automatic train operation".

-Baek, J. H., (2009), "The study on train separation control & safety braking model technology using balise for conventional lines", INTELEC, International Telecommunications Energy Conference (Proceedings).
<https://doi.org/10.1109/INTLEEC.2009.5352009>

-Chen, D., Chen, R., Li, Y., & Tang, T., (2013), "Online learning algorithms for train automatic stop control using precise location data of balises", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 14(3), pp.1526-1535.
<https://doi.org/10.1109/TITS.2013.2265171>.

-Chen, D., Chen, R., & Member, S., (2013), "Online Learning Algorithms for Train Automatic Stop Control Using Precise Location Data of Balises", 14(3), pp.1526-1535.

-Froidh, M. A. O., (2019), "Impact on urban form by the localization of railway stations", Evidence from Sweden.

-Gang, Y., & Liu, M., (2012), "NMPC applied to operation of high-speed train", Proceedings of 2nd International Conference on Computer Science and Network Technology, ICCSNT 2012, pp. 1005-1008.
<https://doi.org/10.1109/ICCSNT.2012.6526096>.

-Hou, Z., Wang, Y., Yin, C., & Tang, T. (2011), "Terminal iterative learning control based station stop control of a train. International Journal of Control", 84(7), pp.1263-1274.
<https://doi.org/10.1080/00207179.2011.569030>

Simulation of Automatic Braking System for Accurate Train Stopping in Metro Stations with Platform Screen Doors

*Sattar Yousefi Dibazar, M.Sc., Grad., Department of Railway,
Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*Mohamad Ali Sandidzadeh, Associate Professor, Department of Railway,
Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

*Fatemeh Mollaie Yazdanabad Olia, M.Sc., Grad., Department of Railway,
Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.*

E-mail: sandidzadeh@iust.ac.ir

Received: July 2022- Accepted: November 2022

ABSTRACT

In subway stations with high passenger traffic, using Platform Screen Doors (PSD) is one of the best ways to increase the safety of passengers on the platform. Preventing the passenger from falling on the rails and colliding with the train, which is one of the most common problems in crowded stations, and also the possibility of increasing the speed of the train at the entrance to the station, etc., is met by installing PSD. When the train enters the station, the train doors are placed in front of the PSD and after determining the correct operation of the train station in front of the PSD, the doors are allowed to open. Due to the increase in the speed of trains along the route with the least possible time, increasing the accuracy of train braking when stopping in front of the PSD at the station is of particular importance. Various systems in the world have been designed and implemented to control train brakes when entering stations with train door guards, each of which in turn has strengths and weaknesses. However, the main disadvantage observed in these systems is the lack of resistance to various disturbances and their effect on the braking accuracy of the train. Appropriate stop of the train at the station automatically, taking into account all environmental conditions and possible disturbances.

Keywords: Platform Screen Door, Automatic Train Operation, Precision Control, Automatic Train Control