

بهبود سیستم کنترل پیش رانش قطار مغناطیسی مگلو با استفاده از کنترلر SMCPID

محمد اسفندیاری ٔ دانشگاه علم و صنعت، Mohammad.Esfandiari@gmail.com

چکیده – در این مقاله دینامیک و سیستم کنترل یک بوژی قطار مگلو ترنسرپید در تعلیق و پیشرانش مورد نظر قرار میگیرد. بـا اســتخراج معادلات نیروهای وارد بر بوژی شامل وزن و نیروهای الکترومغناطیسی، مدلسازی دینامیک غیرخطی یک بوژی با ۴ درجه آزادی انجام می⁻شود که شامل دینامیک تعلیق و پیشرانش میباشد. از دینامیک قطار در هدایت به منظور سادهسازی معادلات صرفنظر شده است. در این راســتا، بـا به شامل دینامیک تعلیق و پیشرانش میباشد. از دینامیک قطار در هدایت به منظور سادهسازی معادلات صرفنظر شده است. در این راســتا، بـا بین دستگاههای مختصات و روابط سینماتیکی و دینامیکی بین آنها مدلسازی دینامیکی استخراج میشود. سپس یک مدل دقیق از عملگرهای معناطیسی بوژی و موتور خطی مورد استفاده ارائه میشود. با استفاده از مدل بوژی، نمودار حلقـه بـاز سیســتم بررسـی مــیگـردد و یـک یـک معناطیسی بوژی و موتور خطی مورد استفاده ارائه میشود. با استفاده از مدل بوژی، نمودار حلقـه بـاز سیســتم بررسـی مــیگـردد و یـک یـک مناطیسی بوژی و موتور خطی مورد استفاده ارائه میشود. با استفاده از مدل بوژی، نمودار حلقـه بـاز سیســتم بررسـی مــیگـردد و یـک یـک معناطیسی بوژی و موتور خطی مورد استفاده ارائه میشود. با استفاده از مدل بوژی، نمودار حلقـه بـاز سیســتم بررسـی مــیگـردد و یـک یـک مـک منترل کننده ترکیبی*DIP* و مد لغزشی (*SMCPID*) مناسب جهت ردیـابی ورودی مرجــع مــوردنظر، حــذف اغتشـاش خـارجی و در حـالتی کـه سنسورهای اندازهگیری دارای نویز هستند مطرح میشود. در پروفیل سرعت سرعت قطار از صفر در طی ۹۲ ثانیه بـه ســرعت ۵۸۱ کیلـومتر بـر سنسرورهای اندازه گذیه ثابت مانده و سپس در ۱۶۷ ثانیه مجددا به مقدار صفر کاهش مییابد. درنهایت رفتـار سیسـتم و صـحت عملکـرد ساعت میرسد و برای ۵ ثانیه ثابت مانده و سپس در ۱۶۷ ثانیه مجددا به مقدار صفر کاهش مییابد. درنهایت رفتـار سیار میسـرد و مـحت عملکـرد مرفیر ماز میران می و مازی میران میران میران می میران در می ۹۲ ثانیه و مـحت مـمد که میابد. درنهایت رفتـار سیسـمد و مرای ۵ ثانیه ثابت مانده و سپس در ۱۶۷ ثانیه مجددا به مقدار صفر کاهش مییابد. درنهایت رفتـار سیسـمد و مـحت عملکـرد مراحت میران می میابد. درنهایت رفتـار میران دانه میران و مـحت معلکـرد میران مینه مینه مازی دسته مانه دان دانه مانده و سیس

کلمات کلیدی: قطار مگلو، مدلسازی وابسته تعلیق و پیشـرانش، ردیـابی ورودی مرجـع، سیسـتم ناپایـدار، حــذف اغتشـاش خـارجی، کنترلکننده SMCPID

۱– مقدمه

سیستم مگ لو با بهره گیری از میدان مغناطیسی که میان قطار و خط ایجاد می گردد، در فاصلهی اندکی از خط معلق مانده و با نیروی محرکهای که میتواند یک موتور جت یا همین میدان مغناطیسی ایجادشده باشد، در طول خط به پرواز درمیآید. در قطارهای مغناطیسی به دلیل عدم تماس فیزیکی میان قطار و خط، اصطکاک تماسی وجود ندارد و فناوری مگ لو نقطهی اشتراکی با خطوط ریلی معمولی نداشته و تأسیسات آن کاملاً باید بهطور مجزا طراحی و ساخته شوند. این قطارها با شکل خاص آیرودینامیک خود دارای سرعت بسیار بالایی میباشند.

در سالهای اخیر نیز مطالعات فراوانی در این زمینه صورت پذیرفته و محققان به دنبال روشهای مختلف مدلسازی دقیق تر مگلو هستند ([۱–۳]). در هیچ یک از مراجع مطرح شده به بررسی و کنترل سیستم پیشرانش و تعلیق به صورت همزمان پرداخته نشده است. تحقیقات گستردهای به منظور ارائهی یک کنترل کننده مناسب برای سیستم مگ لو ارائه شده است. در سالهای اخیر هم کنترل کنندههای مختلفی از قبیل کنترل مد لغزشی[۴]، کنترل تطبیقی[۵]، PID تنظیم شده با شبکه عصبی

[۶] مطرحشدهاند، در تمام تحقیات انجام شده معمولاً از پیشرانش در مدلسازی صرفنظر می شود و یا از یک دینامیک خطی سازی شده به منظور طراحی کنترل کننده استفاده می گردد. ردیابی یک پروفیل سرعت در راستای مسیر حرکت قطار و در حضور یک اغتشاش خارجی نیز به ندرت در مراجع مذکور مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

در این مقاله مدل یک قطار مگلو در پیشرانش و تعلیق استخراج می شود. در طی مراحل مدل سازی از قوانین فیزیکی و منطبق با واقعیت به منظور استخراج دقیق تر معادلات بهره گرفته شده است. با استفاده از کنترل کننده های ترکیبی مدلغزشی و PID به پایدار سازی سیستم مورد نظر پرداخته ایم. ردیابی یک پروفیل سرعت مناسب در راستای مسیر حرکت قطار و البته در حضور یک اغتشاش خارجی نیز مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. عملکرد کنترل کننده های مورد نظر از منظر تامین پایداری، ردیابی ورودیهای مرجع، حدف نویز و ورودیهای اغتشاشی مورد بررسی قرار گرفته و در هر مورد نمودار ورودیهای کنترلی به منظور بررسی میزان عملی بودن طراحی ترسیم و تحلیل شده است.



۲- تشريح مدل مساله

در این بخش دینامیک قطار مگلو را استخراج خواهیم پرداخت که شامل دینامیک قطار در تعلیق و پیشرانش می شود. شکل زیر پلتفرم کلی بوژی را نشان میدهد. در این شکل جابجایی مرکز جرم است. $f_{\rm C}$ ، $f_{\rm B}$ ، $f_{\rm A}$ است. عبروهایی هستند z_0 که توسط عملگرهای تعلیق به بوژی وارد می شوند. ترم های و C_D و C_D بیانگر مرکز جرم چهار بخش از یک بوژی C_C ، C_B ، C_A هستند و نیروهای کنترلی به این نقاط وارد می شوند. هر کدام از این نقاط به ترتیب دارای جابجایی. Z_C ،Z_B ،Z_A و Z_D خواهند بود. زاویههای رول heta و ییچ ϕ نیز مربوط به حرکت دورانی سیستم هستند. همچنین حرکت خطی سیستم در راستای محور x توسط یک موتور سنکرون ایجاد می شود. معمولا منابع موجود بخش تعليق و پيشرانش و يا تعليق و هدايت را جهت ساده سازی کنترل باهم در نظر میگیرند بنابراین جهت ساده سازی معادلات تمركز این رساله بر دینامیک وابسته پیشرانش و تعلیق و البته کنترل همزمان آنها استوار است و از دینامیک بوژی در راستای محور y صرف نظر شده است. به منظور کاهش هزینه ی سختافزار، مگنت جانبی در راستای y را با یک چرخ جایگزین کر دہاند [۷].



شکل ۱ پلتفرم کلی بوژی و درجات آزادی آن با استفاده از روابط لاگرانـژ و براسـاس مرجع [۷] و پـس از نوشتن معادلات حرکت دورانی حـول محـور (0, acdumerry) فرم نهایی معادلات دینامیکی مگلو به صورت زیر استخراج می شود. $m_t z_0 + m_t g = F_z$; $I_x \ddot{\Theta} = T_{\Theta}$; $I_y \ddot{\Theta} = T_{\phi}$ nدر رابطهی فوق F_z نیروی خارجی در جهت محور z است. ترم $\frac{\Delta L}{\partial z_0}$ به معنای مشتق ترم لاگرانژ نسبت به z_0 و تـرم $\frac{\Delta L}{\partial z_0}$ به معنای مشتق ترم لاگرانژ نسبت به z_0 می باشـد. همچنـین mt رمان میباشد. IX و IY لختیهای دورانی حول محورهای X و Y هستند و آنها نیز متغیر با زماناند.

فرم کلی این معادلات حرکت سیستم به صورت زیر است.

 $m_t F_{lim} = M_{lim} \dot{x}_m + D_{lim} \dot{x}_m + F_l$ (٢) $c_l = M_{lim} \dot{x}_m + D_{lim} \dot{x}_m + F_l$ (٢) $c_l = M_{lim} \dot{x}_m - c_l$ متحرک، $m_{lim} \dot{x}_m - c_l$ $e_l = m_{lim} c_l c_l$ $i_l = m_{lim} c_l c_l$ $i_l = m_{lim} c_l$ $i_l = m_{lim} c_l$



شکل ۲ نمای شماتیک از روبروی قطار جهت استخراج گشتاور حول محور ۷ با محاسبه میزان جابجایی هر کدام از تعلیقها به شکل مشابه و به دست آوردن مقادیر نیروی خارجی در راستای محور z و همچنین مقادیر گشتاور خارجی حول محور x و ۷، فرم نهایی معادلات حرکت سیستم به شکل زیر خواهد شد:

 $m_t \ddot{z_0} + m_t g = F_z; \quad I_x \ddot{\theta} = T_{\theta}$ $I_y \ddot{\theta} = T_{\phi_0} - F_{\lim} Z_0 \cos(\theta)$ (٣) $F_{lim} = M_{lim} \ddot{x}_m + D_{lim} \dot{x}_m + F_l$ $c_t | ij the transform the transform the transform the transformation the transformation the transformation that the transformation the transformation that the transformation that the transformation the transformation that the transformation the transformation the transformation that the transformation the transformation the transformation the transformation the transformation that the transformation the$

۲-۲ نیروی الکترومغناطیسی تعلیق و هدایت

اندازه نیروهای هدایت در هر نقطه از ریل وابسته بـه فاصـله هوایی بین ریل و سطح هر مگنت dg، میزان جریان سیمپیچهای هر مگنت Ig و زاویه سطح مگنت با سطح ریل αg ست[۸].

 ${}^{B}f_{Guid} = \left| f\left(\alpha_{g}, d_{g}, I_{g} \right) \right|^{B} \vec{y}$ $\alpha_{g} = \cos\left(\vec{y} \cdot r \kappa \vec{y} \right)$ که در آن ${}^{B}r_{R}$ ماتریس تبدیل از ریـل بـه بـوژی و ${}^{\alpha}_{g}$ زاویـه بـین محور پیچ دستگاه بوژی ${}^{T}r_{g}$ (که عمود بر سـطح مگنت هدایت اسـت) و محور پـیچ ریـل \vec{y}' (که عمود بر سـطح مگنت هدایت اسـت) و محور پـیچ ریـل \vec{y}' در دسـتگاه بـوژی، می باشد (\vec{y}' عمود بر سطح جانبی است). البته جهت این نیروها از مرکز مگنت به مرکز تصویر سطح مگنت بر روی سطح ریل در هماننـد از مرکز مگنت به مرکز تصویر سطح مگنت با روی سطح ریل در مگنتها از ریـل است. بـرای مگنتهای تعلیـق نیـز هماننـد مگنتها از ریـل است. بـرای مگنتها بابر است با:



 $\begin{vmatrix} B \vec{f}_{Susp} \end{vmatrix} = \lvert f(\alpha_m, d_m, I_m) \end{vmatrix}$ $\alpha_m = \cos^{-1} \begin{pmatrix} B \vec{z} \cdot r & \vec{z} \end{pmatrix}$ کـه در آن am زاویـه بــین محـور یـاو دســتگاه بــوژی $B \vec{z} = [\mathbf{v} \quad \mathbf{v} \quad \mathbf{l}]^T$ (که عمود بر سطح مگنـت تعلیـق اسـت) و محور یاو ریل $\mathbf{\bar{z}}^{r}$ در دستگاه بوژی، میباشد ($\mathbf{\bar{z}}^{r}$ عمود بر سطح تحتانی ریل است). همچنین داریم:

 ${}^{s}p_{BORG_{x}} = {}^{s}p_{rORG_{x}}$, ${}^{s}p_{rORG_{y}} = 0$, ${}^{s}p_{rORG_{z}} = 0$ $\phi_{r} = 0$, $\theta_{r} = 0$, $\psi_{r} = 0$

۲-۳ مدلسازی مغناطیسی بخش تعلیق بوژی

در قطار مگلو ترنسرپید از نیروهای جاذبه برای شناوری (تعلیق) بوژی استفاده می شود. هر بوژی دارای ۲۰ عملگر مغناطیسی (هر طرف ۱۰ عدد) جهت انجام تعلیق هوایی می باشد؛ که از این ۲۰ عدد، از ۶ جفت (۱۲ عدد) برای تعلیق و از بقیه به عنوان پشتیبان و ذخیره استفاده می شود. با اعمال جریان به مگنتها (۱۱ تا ۱۵)، یک نیروی الکترومغناطیسی بین مگنت تعلیق بوژی و قسمت تحتانی ریل که شامل یک نوار فولادی در دو طرف ریل است، تولید خواهد شد (شکل زیر).

نوار فولادی زیر مسیر هدایت	
سیم پیچ من <u>م</u> ی به به من معاملی معاملی می بیچ مکنت تعلیق شار مغناطیسی ناشی از جریان سیم پیچ	

اعمال جریان I به سیمپیچ دارای هسته باعث ایجاد شار مغناطیسی حلقه بسته φ در طول هسته خواهد نمود. این شار مغناطیسی به نوبهی خود نیروی الکترومغناطیسی را تولید خواهد نمود که باعث جذب صفحه فلزی مقابل خود خواهد شد. . از روابط الکترومغناطیس و مبتنی بر مدار معادل مغناطیسی مقدار نیروی هر لبه عملگر هدایت Fg به دست میآید.

$$F_{g} = \frac{1}{2\mu_{0}} \int B_{i}^{2} dA_{gap} = \frac{-(IN)^{2} (\frac{y_{1} + y_{2}}{\mu_{0}A_{gap}})^{2}}{6R_{g}\mu_{0}A_{gap} (\frac{y_{1} + y_{2}}{\mu_{0}A_{gap}} + R_{r} + R_{b})^{3}}$$
new distribution of the second state of the second st

Rgap=z/(Agapμ0)=2819900z است. بنابراین نسبت مقاومت شکاف هوایی به مجموع مقاومت مگنت تعلیق بوژی و ریل برابر است با:

$$\frac{R_{gap}}{R_m} = 3265z \rightarrow if \qquad z > 0.003 \Longrightarrow R_{gap} \approx 10Rm$$

برای z های بیشتر از سه میلیمتر مقدار این نسبت حـدوداً Rgap≈10Rm خواهد بود. بنابراین میتوان با تقریـب مناسـب از مجموع مقـدار مقاومـت مغناطیسـی ریـل و بـوژی Rm در برابـر مقاومت مغناطیسی هوا Rgapصرفنظر نمود.

مشخصات مغناطیسی عملگر تعلیق ترنسرپید به شرح زیر میباشد:hp=5026*10⁻⁶ ؛Ng=300 ؛Rb=5503.8 ؛Rr=3131.6 Agap=0.02822m²;µ0=4π*10⁻⁷.

Fsi نيروى تعليق i امين عملگر تعليق است.

۴-۲ مدلسازی مغناطیسی نیروی پیشران

موتور استاتور خطی طویل در سیستم مگلو ترنسرپید برای هر دو سیستم فشار به سمت جلو و ترمز گیری به طور همزمان مورد استفاده قرار می گیرد. در حین حرکت آهنربا در طول ریل، قطب اصلی سیم پیچی مولد خطبی به شار متغیر مغناطیسی اتصال یافته که این امر سبب القای ولتاژ و شارژ باتریها می-گردد. این فرآیند از سرعت ۱۵ کیلومتر بر ساعت شروعشده و تا زمانی که اتـلاف انـرژی در سیسـتمهـای شـناور مغناطیسـی در سرعت ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت جبران شود، ادامه پیدا میکند یک موتور القایی سه فاز به کمک متغییرهای حالت مختلف مدل می شود که در آن ها ولتاژهای استاتور و بار خارجی (تورک مقاوم) ورودی های سیستم و گشتاور مغناطیسی و سرعت زاویهای روتور،خروجی هستند. بردار فضای حالت بدین صورت است: $X = \begin{bmatrix} i_{-s} & i_{-r} & i_{-m} & \underline{\lambda}_s & \underline{\lambda}'_r & \underline{\lambda}_m \end{bmatrix}^T$ است: فضای حالت سیستم است و درایه های آن به ترتیب عبارتند از: جريان استاتور،جريان رتور،جريان شكاف هوايي،شار استاتور،شار رتور و شار شکاف هوایی.در یک موتور القایی از یک منبع تغذیـه



در $\frac{h}{\pi}$ ضریب می شود به سرعت خطی تبدیل شده و جهت نوشتن معادله حرکت خطی مورد استفاده قرار می گیرد. با جایگذاری روابط عبارت نهایی زیر برای نیروی پیشران به دست می آید: $F_{lim} = \frac{3 \pi}{2 \tau_p} \frac{P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qr} i_{ds})$ با داشتن این نیرو و طبق قانون دوم نیوتون معادلهی با داشتن این نیرو و طبق قانون دوم نیوتون معادلهی $F_{lim} = k_f (\lambda_{dr} i_{qs} - \lambda_{qr} i_{ds}) = M_{lim} \ddot{x}_m + D_{lim} \dot{x}_m + F_L$ در این روابط، $M_{lim} = C_1$

وسیسکوزیته و $k_{
m f}$ ثابت نیرویی میباشند. $i_{
m lim}$ جریان ورودی و کنترلی سیستم است.

۳- پیاده سازی کنترلکننده SMCPID

شکل زیر ساختار کنترلی را در کنار مدل استخراجی برای قطار مگلو نشان میدهد. در استراتژی طراحی کنترل کننده پیشنهادی به سنسورهایی جهت اندازه گیری پارامترهای فضای حالت نیاز داریم که خود دارای نویز در اندازه گیری هستند. شایان ذکر است برای تولید خطای اندازه گیری حسگرها می توان از نویز سفید گوسی استفاده نمود.



شکل ۴: نموداری از ارتباط اجزا و کنترل کننده[۷]

ملزومات سیستم کنترل شده می بایست به شرح زیر باشد: پروفیل سرعت مورد نظر با کمترین میزان خطا دنبال شود؛ ارتفاع واگن از سطح ریل به مقدار مطلوب ۸ میلی متر برسد؛زمانی که واگن به ارتفاع مناسب از سطح ریل می رسد کمتر از یک ثانیه باشد؛ سطح جریان سیم پیچ های تعلیق و پیشران قابل قبول و دسترس باشند؛ میزان نیروی عمودی که به واگن وارد می شود نسبت به وزن واگن منطقی بوده و بتوان آن را در عمل تولید کرد ؛سیستم نسبت به ورودی اغتشاشی مقاوم باشد. به این معنی که ورودی اغتشاشی کمترین تاثیر منفی را بر روی سایر ملزومات کنترلی بگزارد. سیستم موردنظر حرکت بوژی غیرخطی و ناپایدار است و کنترل کننده موردنظر باید شرایط لازم با ولتاژ مشخص استفاده می شود تا جریان در سیم پیچهای موتور ایجاد شده و در نتیجه به واسطه خاصیت آهنربایی ایجاد شده، روتور دوران کند. مبتنی بر مدار معادل مغناطیسی موتور و پس از نوشتن روابط KVL مداری خواهیم داشت $i_{qs} = -\left(\frac{r_s}{\sigma l_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma t_r}\right)i_{qs} - \frac{n_p l_m \pi}{\sigma l_s l_r h}v_e \lambda_{dr} + \frac{l_m}{\sigma l_s l_r t_r}\lambda_{qr} + \frac{v_{qs}}{\sigma l_s}$ i_{ds} $= -\left(\frac{r_s}{\sigma l_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma t_r}\right)i_{ds} + \frac{l_m}{\sigma l_s l_r h}v_e \lambda_{dr} + \frac{n_p l_m \pi}{\sigma l_s l_r h}v_e \lambda_{qr} + \frac{v_{ds}}{\sigma l_s}$ $\dot{\lambda}_{qr} = (l_m/t_r)i_{qs} + n_p(\pi/h)v_e \lambda_{dr} - (1/t_r)\lambda_{qr}$ $\dot{\lambda}_{dr} = (l_m/t_r)i_{ds} - (1/t_r)\lambda_{dr} - n_p(\pi/h)v_e \lambda_{qr}$ $V_{c. r(l)}$ این منظور ترم میزان توان ورودی بـه موتور بـه موتور بـه $v_{c. r(l)}$ این منظور ترم میزان توان ورودی بـه موتور r_{rs} بـه $P_{in} = 1.5(v_{dr}i_{dr} + v_{qr}i_{qr} + v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs})$ $d \lambda_{o} \lambda_{oslevic}$

نتایج را به صورت سه عبارت مجزا مینویسیم:

$$P_{in} = 1.5(v_{dr}i_{dr} + v_{qr}i_{qr} + v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs})$$

$$= 1.5(r_s(i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + p\left[\frac{L_r}{2}(i_{dr}^2 + i_{qr}^2) + \frac{L_s}{2}(i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + L_m\left\{(i_{dr}^2 + i_{qr}^2) + \frac{L_s}{2}(i_{ds}^2 + i_{qs}^2)\right] + L_m\left\{(i_{dr} + i_{ds})^2 + (i_{qr} + i_{qs})^2\right\}\right] + [w_r L_m(i_{qr}i_{ds} - i_{dr}i_{qs})])$$

$$= 0$$

$$p\left[\frac{L_r}{2}(i_{dr}^2 + i_{qr}^2) + v_{qs}(i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + L_m\left\{(i_{dr}^2 + i_{qs}^2) + 1_{ds}(i_{dr}^2 + i_{qs}^2) + L_m\left(i_{dr}i_{ds} - i_{dr}i_{qs})\right)\right]\right]$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

$$= 0$$

در حالت کلی نیروی پیشران مستقیماً از pm و بـه صـورت زیر محاسبه میشود:

$$pm=F_{lim}.rac{2w_rh}{\pi p}=F_{lim}.rac{w_m}{\pi}h$$
در این رابطه، w_m سرعت زاویه ای مکانیکی است و وقتـی



سوار و پیاده شدن مسافران را میتوان با یک اغتشاش پله با دامنهای حدوداً بهاندازه تغییر ۱۰ درصد نیروی وزن بوژی (معادل ۹۳۳ نیوتون) مدلسازی نمود. این امر تداعی کننده این است که یک فرد ۹۳ کیلوگرمی سوار بوژی میشود و یا از آن پیاده می گردد. برای این موضوع ورودی نیروی اغتشاش در راستای محور عمودیz اعمال می گردد. فرض بر این است که تغییرات وزن در زمانی که واگن بیشترین سرعت (۵۸۱ km/h) را دارد صورت می گیرد. شکل ۸ ورودی سرعت خطی مطلوب را در کنار نمودار سرعت خروجی سیستم نشان میده. همانطور که مشاهده میشود اغتشاش در نیروی وزن سبب ایجاد تغییرات ملموسی در ردیابی سرعت خطی مطلوب نشده است.



شکل ۸ مقایسه ردیابی سرعت به هنگام تغییرات نیروی وزن. در شکل زیر تغییرات فاصلهی هوایی بوژی از سطح ریل که باید مقدار مطلوب ۸ میلی متر باشد در حین شبیهسازی نشان دادهشده است. مطابق این شکل کنترل کننده SMCPID به خوبی توانسته اغتشاش وراده را حذف کند و سیستم حلقه بسته ناپایدار نشده است ولی باید میزان ورودیهای کنترلی که همان سطح جریان سیم پیچها هستند را بررسی کنیم. لام tanh (³ در ایـن روابـط K_a ، K_D ، K_I ، K_P و φ ثابـت هسـتند و جهـت رسیدن به مشخصات موردنظر طراح تنظیم میشوند. ۳- تحلیل نتایج

در این بخش به تحلیل نتایج شبیه سازی در نرم افزار سیمولینک متلب پرداخته می شود.به طور خلاصه مشخصات فیزیکی سیستم به صورت زیر می باشد: جرم: 933kg؛ اینرسی حول محور X ۲۹۰، اینرسی حول محور Y ۲۰۹، اینرسی حول محور Z ۵۵، طول واگن Y متر و عرض آن ۲٫۳ متر می باشد. میزان راتفاعی که قطار در آن معلق می ماند برابر ۸ میلی متر در نظر گرفته شده است و برای زوایای $\varphi \in \theta$ مقدار مطلوب صفر درجه منظور شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی سیستم حلقه بسته در ردیابی ورودی های مرجع در ۰ شکل ۵ و ۶ به ترتیب برای ارتفاع بوژی از سطح ریل و سرعت حرکت خطی بوژی آورده شده اند. همانطور که نتایج نشان می دهند علی رغم نویز اندازه گیری رفتار سیستم در ردیابی ورودی های مرجع بسیار



شکل ۵: تغییرات z0 بر حسب زمان



PID (SMCPID) به منظور تأمین مشخصات مطلوب طراحی و در شبیه سازی ها مورد ارزیابی قرار گرفتد. نتایج حاصله نشان می دهد که کنترلر SMCPID طراحی شده دارای مقاومت به عدم قطعیت بسیار بالایی است و چنانچه در شبیه سازی ها نشان داده شد می تواند تا +۵۰ درصد اغتشاش در نیروی وزن را بدون تغییر ملموسی در عملکرد سیستم حلقه بسته حذف کند. سرعت ریابی توسط این روش کنترلی بالاتر است و تفاوت چندانی در میزان سیگنال کنترلی مورد نیاز با روش مد لغزشی ندارد. کنترل کننده فیرخطی مد لغزشی از حوزه پایداری بیشتری برخوردار است ولی همچنان نیاز داریم. فرایند طراحی کنترل کننده ای پایین گذر نیاز داریم. فرایند طراحی کنترل کننده ای پایین گذر تعریف سطح لغزش به صورت یک کنترل کننده و همین طور است و همگرایی جوابها، ردیابی ورودی مرجع و همین طور حذف ورودی های اغتشاشی سریع تر صورت می گیرد.

مراجع

- B. H. Yim, H.S. Hana, N.J. Lee and Y.J. Kima, "Prediction of ride quality of a Maglev vehicle using a full vehicle multi-body dynamic model," Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, p. 18, Sep 2009.
- [2] B. H. Yim, H. S. Hana, N. J. Lee, Y. C. Hur and S. S. Kim, "Effects of the guideway's vibrational characteristics on the dynamics of a Maglev vehicle," Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, p. 18, Jan 2009.
- [3] X. Jin, J. Wang, Y. Cao and X. Du, "Numerical Simulation of High-Speed Maglev Vehicle-Guideway-Tunnel-Soil System," International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics, p. 16, March 2012.
- [4] W. Rong-Jong, C. Kun-Lun, and L. Jeng-Dao, "On-Line Supervisory Control Design for Maglev Transportation System via Total Sliding-Mode Approach and Particle Swarm Optimization," Automatic Control, IEEE Transactions on, vol. 55, pp. 1544-1559, 2010.
- [5] L. T. Teng, P. H. Shieh and F. J. Lin, "Intelligent Adaptive Backstepping Control System for Magnetic Levitation Apparatus," IEEE Transaction on Magnetics, vol. 43, p. 10, May 2009.
- [6] X. Y. Xinye and Y. G. Bo, "Study on Suspension Rigidity Control of Electromagnetic Suspension System Based on NN-PID," presented at the World Congress on Intelligent Control and Automation, China, 2008.
- [7] J. H. Lever, "Technical assessment of maglev system concepts," US Army Corps of Engineers, 1998
- [8] HOLKAR, K. S.; WAGHMARE, L. M. Sliding Mode Control with Predictive PID Sliding Surface for Improved Performance. International Journal of Computer Applications, 2013.



نمودار تغییرات سطح جریان برای سیمپیچهای تعلیق و پیشران به ترتیب درشکل ۱۰ و شکل ۱۱ آورده شدهاند. دقت داریـم کـه چون در طی شبیهسازی گشتاور اغتشاشی حول محور γ نـداریم لذا هر چهار سیم پیچ تعلیق دارای نمودار تغییرات جریان یکسانی هستند. بررسی نمودار تغییرات جریان نشان میدهد کـه با توجـه بـه وزن سیستم و نویزهای در نظر گرفتـه شـده در خروجی، مقادیر بهدست آمده برای جریان ها کـاملا قابـل انتظار هستند و عملکرد کنترل کننده مد لغزشی ترکیبی طراحـیشـده بسیار مناسب است.



شکل ۱۱ تغییرات جریان سیم پیچ موتور سنکرون

۵- نتیجه گیری

در این مقاله دینامیک و سیستم کنترل یک بوژی قطار مگلو ترنسرپید در تعلیق و پیشرانش مورد نظر قرار میگیرد. با استخراج معادلات نیروهای وارد بر بوژی شامل وزن و نیروهای الکترومغناطیسی، مدل سازی دینامیک غیرخطی یک بوژی با ۴ درجه آزادی انجام می شود که شامل دینامیک تعلیق و پیشرانش می باشد. در این مقاله یک کنترل کننده ترکیبی مد لغزشی و