

مقاوم سازی سیستم شناور مغناطیسی با استفاده از کنترل کننده خطی ساز فیدبک گام به عقب با روتگر اغتشاش غیر خطی

حمید نوری سولا^{۱*}، بهار احمدی^۱، عسکر عزیزی^۱، امیر ریخته گر غیاثی^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۱۶	در این مقاله مساله ردیابی موقعیت یک سیستم مغناطیسی شناور در حضور نامعینی ها و اغتشاشات خروجی وارد شده بر سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. دینامیک سیستم معرفی شده به وسیله معادلات دیفرانسیلی غیرخطی درجه سه بیان می شود و تنها پارامتر قابل اندازه گیری برای کنترل سیستم، موقعیت آن می باشد. بدین منظور از یک کنترل کننده غیرخطی ترکیبی که از ترکیب دو کنترل کننده خطی سازی فیدبک و روش گام به عقب تشکیل شده و در نهایت روش مقاوم جدیدی ارائه شده است. تکنیک خطی سازی فیدبک، روشی برای خطی کردن سیستم با تبدیل مختصات و تکنیک گام به عقب، روشی برای غیرخطی است. کنترل کننده طراحی شده در مقابل بعضی از نامعینی های سیستمی مقاوم است اما با این وجود برای بهبود عملکرد آن در مقابل نامعینی های دیگر از ساختار مشاهده گر اغتشاش غیرخطی، که با کنترل کننده ادغام شده، استفاده شده است. مشاهده گر اغتشاش غیرخطی توانایی خوبی در تخمین اغتشاشات خارجی دارد که این ویژگی در این مقاله برای نامعینی ها نیز به کار رفته است. نتایج به دست آمده از شبیه سازی ها حاکی از این است که کنترل کننده طراحی شده برای سیستم مغناطیس شناور، توانایی ردیابی با خطای کم و حذف اغتشاشات و نامعینی ها را در حد مطلوبی دارا می باشد.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۲۱	
واژگان کلیدی: مشاهده گر اغتشاش غیرخطی، خطی سازی فیدبک، روش گام به عقب، نامعینی، اغتشاشات خارجی.	

۱- مقدمه

معرفی این سیستم با استفاده از دینامیک های درجه بالا باعث شده است که طراحی کنترل کننده برای آن چالشی برای مهندسان کنترل باشد، بنابراین طراحی روشی موثر برای کنترل متغیرها به منظور ردیابی موقعیت اهمیت فراوانی دارد. مساله اصلی در ردیابی موقعیت عملکرد مناسب کنترل کننده ها در حضور نامعینی ها و اغتشاشات خارجی می باشد. کنترل کننده غیرخطی مد لغزشی [۱-۳] و روش های

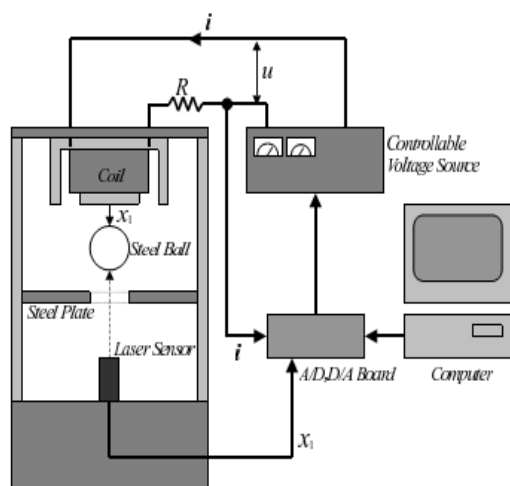
مغناطیس شناور در زمینه های مختلفی مورد استفاده قرار می گیرد. شماتیک این سیستم در شکل ۱ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود این سیستم براساس میدان گرانشی زمین و یک آهنربای الکتریکی که بر گلوله فولادی نیروی جاذبه وارد می کند، کار می کند. ذات این سیستم به علت دینامیک های الکترومکانیکی آن غیرخطی می باشد و حلقه باز آن به علت نیروی طبیعی ناپایدار است.

*. پست الکترونیک نویسنده مسئول: hamidnourisola@yahoo.com

۱. کارشناس ارشد، مهندسی برق - کنترل، دانشگاه تبریز

۲. هیئت علمی دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز

دارد، استفاده شده است. در [۱۴] از روش خطی‌سازی فیدبک که براساس روند طراحی تکنیک گام به عقب انجام شده، برای مقاوم‌سازی در مقابل نامعینی‌های پارامتری استفاده شده است که باعث پیچیدگی کنترلی می‌شود. در [۱۵] تکنیک کنترل سطح دینامیک با تکنیک گام به عقب به‌منظور کاهش خطای مدل‌سازی ناشی از نامعینی‌های پارامتری، ادغام شده است که در آن هدف ردیابی موقعیت مرجع می‌باشد. در [۱۶] از ساختار گام به عقب به‌ویژه به‌صورت مشاهده‌گر تطبیقی گام به عقب در شرایطی که همه حالت‌ها در دسترس نیستند استفاده شده است. در [۱۷] الگوریتم گام به عقب به همراه کنترل مد‌لغزشی طراحی شده است بطوری که می‌توان گفت، کنترل‌کننده مد‌لغزشی برای ردیابی موقعیت به روش گام به عقب استفاده می‌شود. در [۱۸] نیز کنترل‌کننده گام به عقب با تکنیک‌های مقاوم و مشاهده‌گر اغتشاش ترکیب شده است.



شکل ۱- شماتیک سیستم شناور مغناطیسی [۱]

همان‌طور که اشاره شد، برای مشاهده اغتشاشات موجود در سیستم که به‌صورت خطای مدل‌سازی بیان شده، از روابط مشاهده‌گر خطی استفاده شده است. در این مقاله علی‌رغم معرفی روش جدید برای ردیابی و مقاوم‌سازی، از ساختار مشاهده‌گر اغتشاش غیرخطی [۱۹-۲۱] برای تخمین اغتشاشات خروجی و نامعینی‌ها استفاده شده است.

در کار حاضر، با استفاده از ساختار یک کنترل‌کننده غیرخطی ترکیبی، که از ترکیب دو کنترل‌کننده

مختلف تطبیقی [۴-۶] و یا ترکیبی از این کنترل‌کننده‌ها به‌منظور ردیابی با خطای کم مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ولی کنترل‌کننده مد‌لغزشی به‌علت انرژی کنترلی زیاد و کنترل تطبیقی به علت عملکرد گذرای نامطلوب باعث شده است که روش‌های کنترلی دیگری با ساختار مناسب‌تری مورد بررسی قرار گیرند. در [۷] روش مقاوم تطبیقی کنترل‌کننده فیدبک- خروجی برای ردیابی موقعیت مغناطیس شناور پیشنهاد شده است که در آن کنترل-کننده با روند تطبیقی و با استفاده از K - فیلتر طراحی می‌شود. مشکل این کنترل‌کننده حالت گذرای آن می‌باشد. در [۸-۹] ساختار مقاوم کنترل‌کننده فیدبک خروجی به وسیله K - فیلتر استفاده شده است با این تفاوت که به‌جای تکنیک‌های تطبیقی، مشاهده‌گر اغتشاش بکار برده شده است. در حالی که ساختار این کنترل‌کننده ساده می‌باشد و برای نامعینی‌های پیوسته مناسب است، با این وجود برای تغییرات سریع نمی‌تواند جواب‌گو باشد. در [۱۰] یک کنترل‌کننده مقاوم دینامیکی مد‌لغزشی با استفاده از RENN، که در واقع نوع جدیدی از کنترل مد‌لغزشی PID می‌باشد، برای کاهش نوسانات خروجی طراحی گردیده است. در بسیاری از مقالات ساختارهای کنترلی متفاوتی مانند کنترل مد‌لغزشی [۱۱-۱۲]، فیدبک خروجی [۱۳] و تکنیک گام به عقب [۱۴-۱۸] برای کنترل موقعیت مغناطیس شناور به‌کار رفته است. در [۱۱] روش کنترل‌کننده مد‌لغزشی انتگرالی برای ردیابی موقعیت ارائه شده است. در این روش ابتدا با استفاده از خطی‌سازی فیدبک تقریب خطی از دینامیک غیرخطی برای سیستم بیان شده و سپس مد‌لغزشی برای مقاوم‌سازی و پایداری سیستم به آن اضافه شده است. در [۱۲] از کنترل‌کننده مد‌لغزشی با HEKF ترکیب شده، برای حذف اثرات نامعینی استفاده شده است. در این روش از HEKF به‌منظور مقاوم‌سازی مغناطیس شناور استفاده شده است. در [۱۳] ردیابی موقعیت سیستم با فیدبک خروجی صورت گرفته و با استفاده از ویژگی اتصال سری گام به عقب برای از بین بردن نامعینی از مشاهده‌گر اغتشاش خطی، که ساختار ساده

سیم پیچ (سلف) و گلوله فولادی تعیین می شوند. مقدار پارامترهای فیزیکی معرفی شده برای سیستم در جدول ۱ آورده شده اند.

جدول ۱- مقادیر پارامترهای فیزیکی سیستم شناور مغناطیسی [۱۶ و ۱۵]

واحد (یکا)	مقادیر	پارامتر
[kg]	۰/۵۴	M
[m/s ²]	۹/۸	g
[m]	۰/۰۰۷۸۹	X_{∞}
[Hm]	۰/۰۰۱۵۹۹	Q
[H]	۰/۸۰۵۲	L_{∞}
[Ω]	۱۱/۵۹	R

با تعریف بردار حالت $x = [x_1, x_2, x_3]^T = [\dot{x}, \ddot{x}, i]^T$ معادلات فضای حالت سیستم به صورت زیر خواهد بود.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \alpha(x) \\ \dot{x}_3 &= \beta(x) + \gamma(x)u \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن

$$\begin{aligned} \alpha(x) &= g - \frac{Qx_3^2}{2M(X_{\infty} + x_1)^2} \\ \beta(x) &= \frac{x_3 \{Qx_2 - R(X_{\infty} + x_1)^2\}}{Q(X_{\infty} + x_1) + L_{\infty}(X_{\infty} + x_1)^2} \\ \gamma(x) &= \frac{X_{\infty} + x_1}{Q + L_{\infty}(X_{\infty} + x_1)} \end{aligned}$$

۳- معرفی خطی سازی براساس روش گام به

عقب و طراحی آن برای سیستم شناور

مغناطیسی

مرجع [۱۹] یک روش خطی سازی فیدبک، براساس تکنیک گام به عقب ارائه کرده است که معادلات غیرخطی سیستم را با پروسه گام به عقب به فرم خطی تبدیل می کند. در صورتی که معادلات حالت سیستم غیرخطی به صورت رابطه (۴) در نظر گرفته شود.

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= f_i(x_1, x_2, \dots, x_i) \\ &+ g_i(x_1, x_2, \dots, x_i)x_{i+1} \\ \dot{x}_n &= f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) + g_n(x_1, x_2, \dots, x_n)u \end{aligned} \quad (4)$$

خطی سازی فیدبک و روش گام به عقب تشکیل شده، روش مقاوم جدیدی برای کنترل موقعیت مغناطیسی شناور پیشنهاد شده است. برای افزایش مقاوم سازی عملکرد سیستم مغناطیس شناور از مشاهده گر اغتشاش غیرخطی در ساختار این کنترل کننده استفاده شده است. افزودن این مشاهده گر در ساختار این سیستم باعث ردیابی بهتر و عملکرد مناسب تر سیستم شده است.

ساختار مقاله به این صورت است که در بخش دوم به معرفی روابط دینامیکی سیستم مغناطیس شناور پرداخته می شود. در بخش سوم خطی سازی به روش گام به عقب و نحوه طراحی آن برای سیستم مغناطیس شناور بیان شده است. در بخش چهارم مشاهده گر اغتشاش غیرخطی معرفی شده و برای سیستم طراحی می شود. در بخش پنجم نحوه ادغام کنترل کننده و مشاهده گر توضیح داده شده است. در بخش ششم نتایج حاصل از شبیه سازی ها آورده شده است. نتیجه گیری حاصل در بخش هفتم بیان می شود.

۲- معرفی مدل دینامیکی سیستم شناور

مغناطیسی

سیستم شناور مغناطیسی یک سیستم الکترومکانیکی است و لذا دینامیک این سیستم که در رابطه (۱) آورده شده است، غیرخطی می باشد. این سیستم یک وسیله مناسب برای پیاده سازی کنترل کننده فیدبک با کارایی بالا به منظور کنترل المان شناور شده می باشد.

$$M\ddot{x} = Mg + \frac{1}{2}i^2 \frac{\partial L}{\partial x} \quad (1)$$

$$u = Ri + \frac{d}{dt}(Li)$$

که در آن اندوکتانس به صورت رابطه زیر می باشد.

$$L(x) = \frac{Q}{X_{\infty} + x} + L_{\infty} \quad (2)$$

به طوری که در روابط فوق، x فاصله هوایی (موقعیت عمودی) گلوله فولادی؛ g شتاب گرانشی زمین؛ M جرم گلوله فولادی؛ R مقاومت الکتریکی؛ u ولتاژ اعمالی به سیستم به عنوان ورودی کنترل؛ L_{∞} ، Q و X_{∞} ثابت های مثبتی هستند که با توجه به مشخصات هسته مغناطیسی،

مغناطیسی طراحی می‌شود که مراحل طراحی به‌صورت مراحل اشاره شده می‌باشد.

متغیر $z_1 = x_1 - x_d$ را تعریف کرده و از آن مشتق گرفته می‌شود.

$$\dot{z}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_d = \dot{x}_2 - \dot{x}_d \quad (11)$$

مرحله اول: با تعریف $\zeta_1 = z_1$ رابطه (۱۲) را خواهیم داشت.

$$\dot{\zeta}_1 = \dot{z}_1 \rightarrow \dot{\zeta}_1 = \underbrace{\dot{x}_2 - \dot{x}_d + \lambda_1 \zeta_1}_{\zeta_2} - \lambda_1 \zeta_1 \quad (12)$$

و با تعریف $\zeta_2 = \dot{x}_2 - \dot{x}_d + \lambda_1 \zeta_1$ ، رابطه (۱۳) حاصل می‌شود.

$$\dot{\zeta}_1 = -\lambda_1 \zeta_1 + \zeta_2 \quad (13)$$

مرحله دوم: در این مرحله با مشتق‌گیری از معادله ζ_2 رابطه (۱۴) به‌دست می‌آید.

$$\begin{aligned} \dot{\zeta}_2 &= \dot{x}_2 - \ddot{x}_d + \lambda_1 \dot{\zeta}_1 \\ &= \underbrace{\alpha(x) - \ddot{x}_d + \lambda_1(x_2 - \dot{x}_d) + \lambda_2 \zeta_2}_{\zeta_3} - \lambda_2 \zeta_2 \end{aligned} \quad (14)$$

و با تعریف $\zeta_3 = \alpha(x) - \ddot{x}_d + \lambda_1(x_2 - \dot{x}_d) + \lambda_2 \zeta_2$ رابطه (۱۵) به‌دست می‌آید.

$$\dot{\zeta}_2 = -\lambda_2 \zeta_2 + \zeta_3 \quad (15)$$

مرحله سوم: در این مرحله نیز با مشتق‌گیری از معادله ζ_3 رابطه (۱۶) را خواهیم داشت.

$$\begin{aligned} \dot{\zeta}_3 &= \frac{a}{-x_3 Q \beta(x)} - \frac{b}{x_3 Q \gamma(x)} - \frac{c}{M(x_\infty + x_1)^2} - \frac{d}{M(x_\infty + x_1)^4} u \\ &\quad + \frac{e}{M(x_\infty + x_1)^3} - \ddot{x}_d - \lambda_1(\alpha(x) - \ddot{x}_d) \\ &\quad + \zeta_3 \lambda_3 - \zeta_3 \lambda_3 + \lambda_2(\alpha(x) - \ddot{x}_d + \lambda_1(x_2 - \dot{x}_d)) \end{aligned} \quad (16)$$

در نهایت قانون کنترلی به‌صورت رابطه (۱۷) انتخاب می‌گردد.

$$u = \frac{1}{b} \left[a + c - \ddot{x}_d + \lambda_1(\alpha(x) - \ddot{x}_d) + \lambda_3 \zeta_3 + M \right] \quad (17)$$

در این صورت معادله $\dot{\zeta}_3$ از رابطه (۱۸) به‌دست خواهد آمد.

$$\dot{\zeta}_3 = -\lambda_3 \zeta_3 \quad (18)$$

به طوری که وقتی $x_i \rightarrow 0$ در این صورت

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_i) \rightarrow 0 \text{ در شرایطی که } x_i \in R, \\ g_i(x_1, x_2, \dots, x_i) \neq 0 \text{ و } i \in \{1, \dots, n\}$$

بردارهای حالت X_i و Φ_i به‌صورت رابطه (۵) در نظر گرفته می‌شوند.

$$\Phi_i = [\zeta_1 \dots \zeta_i]^T, X_i = [x_1 \dots x_i]^T, i = 1 \sim n \quad (5)$$

با فرض $\zeta_1 = x_1$ و انجام محاسبات ریاضی لازم، ζ_i و مشتق آن به‌صورت روابط زیر به‌دست می‌آیند.

$$\dot{\zeta}_n = \phi_{n-1}(\Phi_{n-1})x_n + a_{n-1}(\Phi_{n-1}) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{\zeta}_n &= -\lambda_n \zeta_n + \lambda_n \zeta_n + \phi_n(\Phi_n) + \phi_n(\Phi_n)u \\ &\quad + \frac{\partial a_{n-1}(\Phi_{n-1})}{\partial \zeta_{j-1}} (\lambda_{j-1} \zeta_{j-1} + \zeta_j) + \sum_{j=2}^i \left(\frac{\partial \phi_{n-1}(\Phi_{n-1})}{\partial \zeta_{j-1}} x_n \right) \end{aligned} \quad (7)$$

بنابراین $a_n(\Phi_n)$ و مشتق ζ_n مشابه روابط مراحل قبل به‌صورت روابط (۸) و (۹) حاصل می‌شوند.

$$\begin{aligned} a_n(\Phi_n) &= \lambda_n \zeta_n + \phi_n(\Phi_n) \\ &\quad + \frac{\partial a_{n-1}(\Phi_{n-1})}{\partial \zeta_{j-1}} (\lambda_{j-1} \zeta_{j-1} + \zeta_j) \\ &\quad + \sum_{j=2}^i \left(\frac{\partial \phi_{n-1}(\Phi_{n-1})}{\partial \zeta_{j-1}} x_n \right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\dot{\zeta}_n = -\lambda_n \zeta_n + a_n(\Phi_n) + \phi_n(\Phi_n)u \quad (9)$$

در نهایت چنانچه ورودی کنترل $u = -a_n(\Phi_n)/\phi_n(\Phi_n)$ انتخاب شود، سیستم حلقه بسته به‌صورت رابطه (۱۰) به‌دست می‌آید.

$$\begin{bmatrix} \dot{\zeta}_1 \\ \dot{\zeta}_2 \\ \vdots \\ \dot{\zeta}_{n-1} \\ \dot{\zeta}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda_1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda_2 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -\lambda_{n-1} & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -\lambda_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \\ \vdots \\ \zeta_{n-1} \\ \zeta_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

از معادله بالا واضح است که اگر مقادیر $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n > 0$ انتخاب شوند، سیستم (۱۰) پایدار سراسری بوده و این تضمینی است برای اینکه مقادیر $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n$ به‌صورت نمایی به صفر همگرا شوند. در ادامه با استفاده از روش خطی‌سازی فیدبک، کنترل‌کننده برای سیستم شناور

معادلات فضای حالت سیستم همراه با نامعینی به صورت رابطه (۲۳) است.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \alpha(x) \\ \beta(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \gamma(x) \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} \quad (23)$$

پارامترهای طراحی ماتریس L باید به گونه ای انتخاب شوند که معادله (۲۴) برقرار باشد.

$$\dot{e} + Lhe = 0 \Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \dot{e}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_1 & 0 & 0 \\ 0 & l_2 & 0 \\ 0 & 0 & l_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = 0 \quad (24)$$

که با انتخاب مقادیر $l_1 = l_2 = l_3 = 15 \Rightarrow P_1 = 15x_1$ ، $P_2 = 15x_2$ ، $P_3 = 15x_3$ شرط اشاره شده محقق می شود و همچنین معادلات مشاهده گر اغتشاش غیرخطی به صورت روابط (۲۵) و (۲۶) خواهد بود.

$$\begin{bmatrix} \hat{d}_1 \\ \hat{d}_2 \\ \hat{d}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 15x_1 \\ 15x_2 \\ 15x_3 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -15z_1 \\ -15z_2 \\ -15z_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 15 & 0 & 0 \\ 0 & 15 & 0 \\ 0 & 0 & 15 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} 15x_1 \\ 15x_2 \\ 15x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_2 \\ \alpha(x) \\ \beta(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \gamma(x) \end{bmatrix} u \right) \quad (26)$$

۵- ترکیب روش خطی سازی فیدبک مقاوم

با NDO

در بخش ۳ روش خطی سازی فیدبک با روش گام به عقب بیان شد. اما عیب این روش مقاوم نبودن آن در برابر نامعینی های دینامیکی و اثرپذیری از نامعینی ها و اغتشاشات ناخواسته است. این عیب در نتایج شبیه سازی ها در شکل ۳ نشان داده شده است. در این بخش از روش NDO یا همان مشاهده گر اغتشاش غیرخطی برای مقاوم ساختن سیستم حلقه بسته استفاده شده است.

بنابراین سه معادله به دست آمده از مراحل بالا به صورت رابطه (۱۹) خواهند بود.

$$\begin{aligned} \dot{\zeta}_1 &= -\lambda_1 \zeta_1 + \zeta_2 \\ \dot{\zeta}_2 &= -\lambda_2 \zeta_2 + \zeta_3 \\ \dot{\zeta}_3 &= -\lambda_3 \zeta_3 \end{aligned} \quad (19)$$

سرانجام با تعریف مقادیر مثبت و مناسب λ ، مقادیر ζ به سمت صفر میل کرده و هدف طراحی محقق می شود.

۴- مشاهده گر اغتشاش غیرخطی (NDO)

و طراحی آن برای سیستم مغناطیس

شناور

کنترل کننده به دست آمده باید روی مدل واقعی که در معرض اغتشاش و نامعینی ناشی از پارامترهای سیستم قرار دارد، پیاده شود. در [۲۰ و ۲۱] از یک مشاهده گر اغتشاش غیرخطی، برای تخمین نامعینی و اغتشاش استفاده شده است.

معادلات دینامیکی سیستم مطابق رابطه (۲۰) فرض شده است. در این صورت مقدار تخمین زده شده توسط مشاهده گر غیرخطی اغتشاش، طبق رابطه (۲۱) به دست می آید. به طوری که تابع غیرخطی $p(x)$ باید به گونه ای طراحی شود که در رابطه (۲۲)، e که خطای مشاهده گر است، به سمت صفر میل کند.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u + h(x)d \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \hat{d} &= z + p(x) \\ \dot{z} &= -L(x)h(x)z \\ &\quad -L(x)(h(x)p(x) + f(x) + g(x)u) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} L(x) &= \partial p(x) / \partial x \\ \dot{e} + L(x)h(x)e &= 0 \end{aligned} \quad (22)$$

به طوری که d پارامتری است که توسط مشاهده گر غیرخطی اغتشاش، تخمین زده می شود که در اینجا می تواند نامعینی و یا اغتشاش باشد. \hat{d} مقدار تخمین زده شده پارامتر d است.

و با تعریف ζ_3 به صورت نشان داده شده در رابطه (۳۲)، رابطه (۳۳) را خواهیم داشت.

$$\dot{\zeta}_2 = -\lambda_2 \zeta_2 + \zeta_3 \quad (33)$$

مرحله سوم: در این مرحله نیز با مشتق‌گیری از معادله ζ_3 ، رابطه (۳۴) حاصل می‌شود.

$$\begin{aligned} \dot{\zeta}_3 = & \frac{\overbrace{-x_3 Q(\beta(x) + d_3)}^a}{m(x_\infty + x_1)^2} - \frac{\overbrace{x_3 Q \gamma(x)}^b}{m(x_\infty + x_1)^2} u \\ & + \frac{\overbrace{Q x_3^2 (x_2 + d_1)}^c}{m(x_\infty + x_1)^3} - \ddot{x}_d + \dot{d}_2 + \ddot{d}_1 \quad (34) \\ & + \lambda_2 (\alpha(x) + d_2 + \dot{d}_1 + \ddot{x}_d + \lambda_1 (x_2 + d_1 - \dot{x}_d)) \\ & + \zeta_3 \lambda_3 - \zeta_3 \lambda_3 + \lambda_1 (\alpha(x) + d_2 + \dot{d}_1 - \ddot{x}_d) \end{aligned}$$

و در نهایت قانون کنترلی به صورت رابطه (۳۵) به دست می‌آید.

$$U = \frac{1}{b} \left[\begin{aligned} & a + c - \ddot{x}_d + \dot{d}_2 + \ddot{d}_1 + \lambda_1 (\alpha(x) + d_2 + \dot{d}_1 - \ddot{x}_2) + \\ & \lambda_2 (\alpha(x) + d_2 - \ddot{x}_d + \dot{d}_1 + \lambda_1 (x_2 + d_1 - \dot{x}_d)) + \lambda_3 \zeta_3 \end{aligned} \right] \quad (35)$$

در این صورت معادله $\dot{\zeta}_3$ به صورت رابطه (۳۶) خواهد بود.

$$\dot{\zeta}_3 = -\lambda_3 \zeta_3 \quad (36)$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود نامعینی‌ها و اغتشاشات تخمین زده شده توسط مشاهده‌گر، در معادله ورودی کنترل لحاظ شده‌اند.

۶- نتایج شبیه‌سازی

عملکرد سیستم با کنترل‌کننده خطی سازی فیدبک به روش گام به عقب در شکل ۲ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، عملکرد کنترل‌کننده در ردیابی ورودی موج مربعی و بدون اعمال نامعینی مطلوب می‌باشد. سرعت پاسخ‌دهی و همگرایی کنترل‌کننده طراحی شده نیز قابل قبول می‌باشد. این کنترل‌کننده در برابر نامعینی‌های پارامتری دارای پاسخ مقاومی می‌باشد. در شکل به صورت واضح مشخص شده است.

سیستم غیرخطی همراه با نامعینی را به صورت رابطه (۲۷) در نظر می‌گیریم که \dot{d}_i ها اغتشاشات وارد شده به سیستم هستند.

$$\begin{aligned} \dot{x}_i = & f_i(x_1, x_2, \dots, x_i) + g_i(x_1, x_2, \dots, x_i) x_{i+1} \\ & + d_i, \quad (i \in \{1, \dots, n-1\}) \quad (27) \\ \dot{x}_n = & f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) + g_n(x_1, x_2, \dots, x_n) u + d_n \end{aligned}$$

در هر مرحله از طراحی کنترل‌کننده، اغتشاشات و نامعینی‌ها به صورت \dot{d}_i به سیستم اضافه شده و در ورودی کنترل، این مقادیر ظاهر می‌شوند. اگر از مشاهده‌گر غیرخطی اغتشاش برای تخمین آن‌ها استفاده شود و مقادیر تخمین زده شده در اختیار کنترل‌کننده قرار داده شوند، کنترل‌کننده اثر اغتشاشات و نامعینی‌ها را تضعیف کرده و سیستم در برابر این نامعینی‌ها مقاوم می‌شود. در صورتی که معادلات سیستم همراه با اغتشاشات و نامعینی‌ها را برای سیستم مغناطیسی شناور طبق رابطه (۲۸) در نظر بگیریم مراحل طراحی کنترل‌کننده به صورت زیر خواهد بود.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 = & x_2 + d_1 \\ \dot{x}_2 = & \alpha(x) + d_2 \\ \dot{x}_3 = & \beta(x) + \gamma(x)u + d_3 \end{aligned} \quad (28)$$

به صورت رابطه (۲۹) تعریف و از آن مشتق گرفته می‌شود.

$$z_1 = x_1 - x_d \rightarrow \dot{z}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_d = x_2 + d_1 - \dot{x}_d \quad (29)$$

مرحله اول: با تعریف $\zeta_1 = z_1$ رابطه (۳۰) حاصل می‌شود.

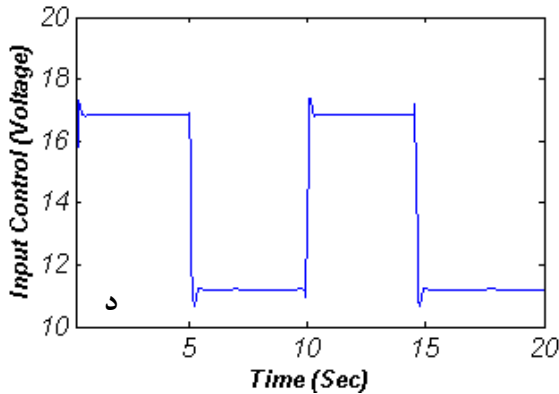
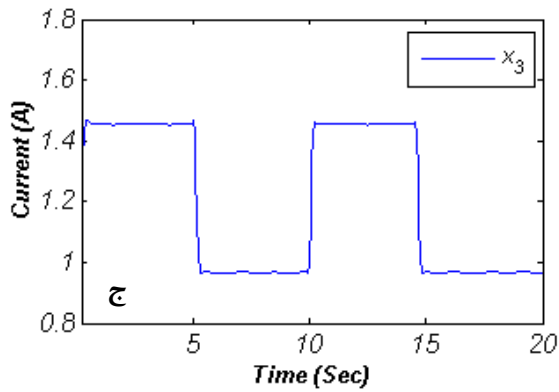
$$\dot{\zeta}_1 = \dot{z}_1 = \underbrace{x_2 + d_1 - \dot{x}_d}_{\zeta_2} + \lambda_1 \zeta_1 - \lambda_1 \zeta_1 \quad (30)$$

و با تعریف $\zeta_2 = x_2 + d_1 - \dot{x}_d + \lambda_1 \zeta_1$ خواهیم داشت.

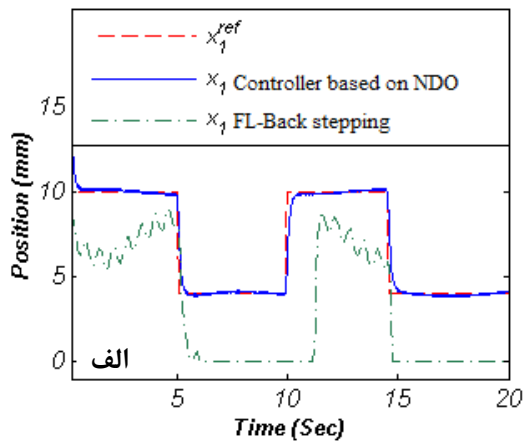
$$\dot{\zeta}_1 = -\lambda_1 \zeta_1 + \zeta_2 \quad (31)$$

مرحله دوم: در این مرحله با مشتق‌گیری از معادله ζ_2 ، رابطه (۳۲) حاصل می‌شود.

$$\begin{aligned} \dot{\zeta}_2 = & \dot{x}_2 + \dot{d}_1 - \ddot{x}_d + \lambda_1 \dot{\zeta}_1 \\ = & \underbrace{\alpha(x) + d_2 + \dot{d}_1 - \ddot{x}_d + \lambda_1 (x_2 + d_1 - \dot{x}_d)}_{\zeta_3} + \lambda_2 \zeta_2 \\ & - \lambda_2 \zeta_2 \end{aligned} \quad (32)$$

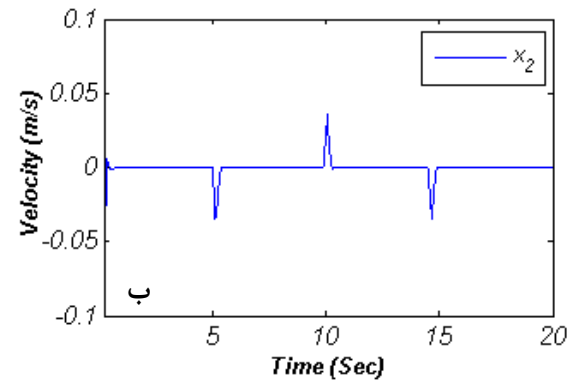
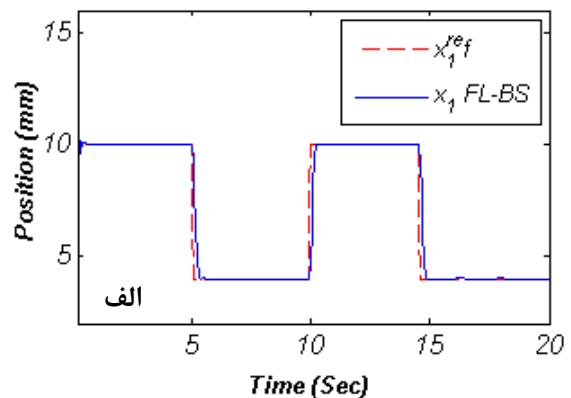


شکل ۲- نتایج روش خطی سازی با روش گام به عقب در شرایط بدون نامعینی؛ (الف) ردیابی ورودی مرجع پله‌ای متغیر حالت x_1 ، (ب) سرعت حرکت گلوله فولادی (متغیر حالت x_2)، (ج) جریان (متغیر حالت x_3)، (د) ورودی کنترلی



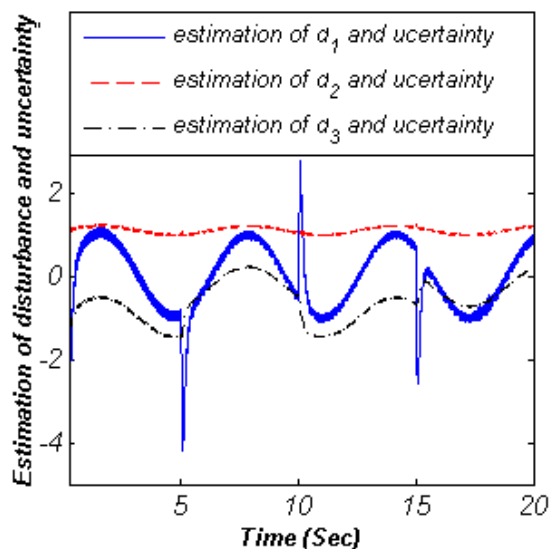
اغتشاشات d_1, d_2, d_3 به صورت سینوسی در حضور نامعینی‌های ۱۰٪ لحاظ شده است. نتایج شبیه‌سازی در این حالت در شکل ۳ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود کنترل‌کننده خطی‌سازی براساس پروسه گام به عقب عملکرد ضعیفی در مقابله با اغتشاشات خروجی دارد، که به هیچ وجه مطلوب نمی‌باشد. از طرف دیگر، در این شکل کنترل‌کننده ترکیب شده با NDO (روش ارایه شده در این مقاله) نیز در حضور اغتشاشات و نامعینی‌های اعمال شده به سیستم آورده شده است که نسبت به خطی‌سازی گام به عقب طراحی شده، عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد. در واقع این نامعینی‌ها در ورودی کنترل اعمال شده و باعث جبران اثر این عوامل می‌شوند. اغتشاشات وارد شده به سیستم به صورت روابط (۳۷) در نظر گرفته شده‌اند.

$$\begin{aligned} d_1 &= 2 \sin(t) & (mm) \\ d_2 &= 0.1 \sin(t) & (m/s) \\ d_3 &= 0.5 \sin(t) + 1 & (A) \end{aligned} \quad (37)$$



گردد. انتخاب بهینه پارامترهای عنوان شده نتیجه مناسبی بر کاهش چترینگ و در نتیجه ردیابی خواهد داشت.

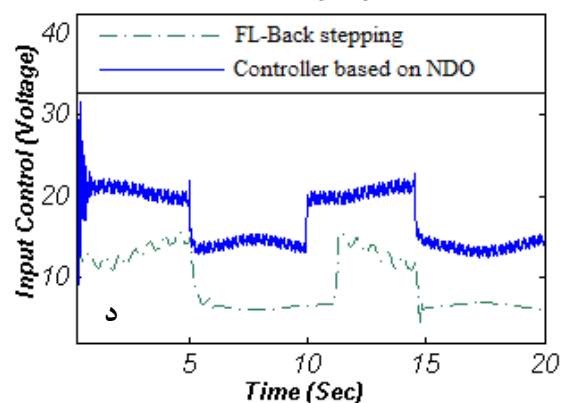
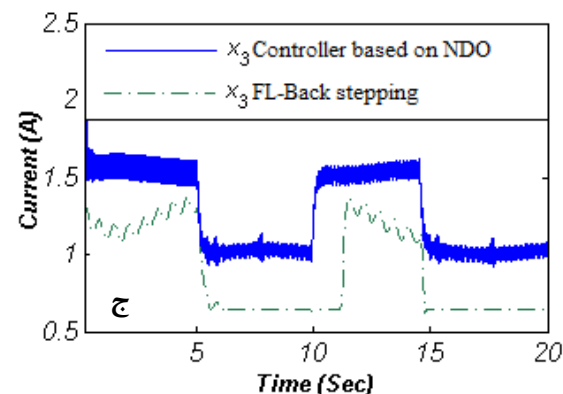
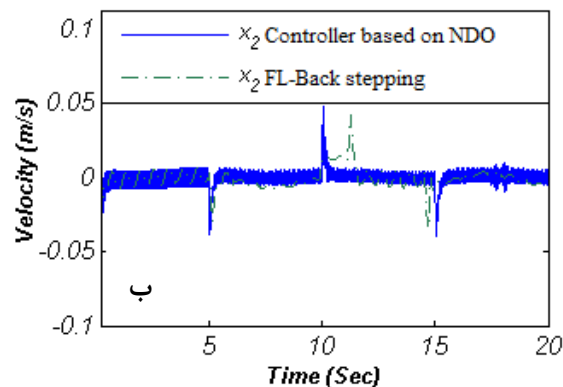
در نهایت در شکل ۴ اغتشاشات $\hat{d}_1, \hat{d}_2, \hat{d}_3$ و نامعینی‌های اضافه شده به سیستم که توسط مشاهده‌گر اغتشاش غیرخطی تخمین زده شده در ورودی کنترلی اثر گذاشته، نشان داده شده است.



شکل ۴- اغتشاشات و نامعینی‌های تخمین زده شده توسط NDO

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک کنترل‌کننده ترکیبی جدید که متشکل از ترکیب روش خطی‌سازی فیدبک و روش گام به عقب است طراحی شده و برای مقاوم کردن سیستم کنترلی طراحی شده، از یک مشاهده‌گر اغتشاش غیرخطی به صورت ترکیبی با آن، استفاده شد. این مشاهده‌گر برای تخمین نامعینی‌های ناشی از تغییر پارامترها و اغتشاشات وارد شده به سیستم، استفاده شد. روش طراحی با این روش در دو مرحله به طور جداگانه، طراحی کنترل‌کننده و ترکیب مشاهده‌گر با کنترل‌کننده طراحی شده انجام گردید. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها نشان داد که کنترل‌کننده مقاوم جدید عملکرد مناسبی در مقابله با نامعینی‌ها و اغتشاشات وارد بر سیستم دارد. نتایج نیز نشان داد که کنترل‌کننده مقاوم جدید عملکرد خیلی مطلوب‌تر و بهتری



شکل ۳- نتایج روش خطی‌سازی گام به عقب و کنترل‌کننده غیرخطی ترکیبی با NDO در شرایط همراه با نامعینی و اغتشاش خارجی؛ (الف) ردیابی ورودی مرجع پله‌ای متغیر حالت x_1 ، (ب) سرعت حرکت گلوله فولادی (متغیر حالت x_2)، (ج) جریان (متغیر حالت x_3)، (د) ورودی کنترلی

همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود میزان چترینگ در ورودی کنترلی زیاد می‌باشد. چترینگ موجود در قانون کنترلی مربوط به اندازه انتخابی پارامترهای $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ می‌باشد. با انتخاب مناسب این پارامترها می‌توان میزان چترینگ موجود را به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. این بحث می‌تواند با معرفی تابع هزینه مناسب، بهینه‌سازی

نسبت کنترل کننده طراحی شده، در تضعیف اغتشاشات و نامعینی‌ها دارد.

۸- مراجع

- [1] Cho. D., Kato. Y., and Spilman. D.(1993), "Sliding mode and classical control for magnetic levitation systems," IEEE Control Systems, vol. 13, no. 1, pp. 43-48
- [2] Yeh T.J., Chung. Y. J., Youcef-Toumi. K.(2001), "Sliding mode control of magnetic bearing systems," Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 123, no. 3, pp. 353-362
- [3] Yang, J., Li, S., and Yu, X.(2013), "Sliding-Mode Control for Systems With Mismatched Uncertainties via a Disturbance Observer," IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 60, no. 1, pp. 160-169
- [4] Annaswamy. A. M., Thanomsat. C., Mehta. N., Loh. A.P.(1998), "Applications of adaptive controllers to systems with nonlinear parameterization," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 120, no. 2, pp. 477-487
- [5] Yang Z.J., Tateishi. M.(2001), "Adaptive robust nonlinear control of a magnetic levitation system," Automatica, vol. 37, no. 7, pp. 1125-1131
- [6] Hajimani, M., Dashti, Z. A. S., Gholami, M., Jafari, M., Shoorehdeli, M. A.(2014), "Neural Adaptive Controller for Magnetic levitation System," IEEE Iranian Conference on Intelligent System (ICIS), pp. 1-6
- [7] Yang. Z. J., Kunitoshi. K., Kanae. S. and Wada. K.(2008), "Adaptive Robust Output-Feedback Control of a Magnetic Levitation System by K-Filter Approach," IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 55, no. 1, pp. 390-399
- [8] Yang. Z. J., Fukushima. Y., Kanae. S., and Wada. K.(2009), "Robust non-linear output-feedback control of a magnetic levitation system by k-filter approach," IET Control Theory and Application, vol. 3, no. 7, pp. 852-864
- [9] Yang. Z. J.(2010), "Robust output-feedback control of a magnetic levitation system," International Conference on Modeling, Identification and Control (ICMIC), pp. 219-224, Okayama, Japan
- [10] Lin, F. J., Chen, S. Y., & Shyu, K. K.(2009), "Robust dynamic sliding-mode control using adaptive RENN for magnetic levitation system.," IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 20, no. 6, pp. 938-951
- [11] Shieh, H. J., Siao, J. H., & Liu, Y. C.(2010), "A robust optimal sliding-mode control approach for magnetic levitation systems," Asian Journal of Control, vol. 12, no.4, pp. 480-487
- [12] Moghaddam, E. T., & Ganji, J.(2011), "Sliding Mode Control of Magnetic Levitation Systems Using Hybrid Extended Kalman Filter," Energy Science and Technology, vol. 2, no. 2, pp. 35-42
- [13] Yang, Z. J., Hara, S., Kanae, S., & Wada, K.(2011), "Robust output feedback control of a class of nonlinear systems using a disturbance observer," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 19, no.2, pp. 256-268
- [14] Yang, Z. J., and Minashima, M.(2001), "Robust nonlinear control of a feedback linearizable voltage-controlled magnetic levitation system," Transactions -Institute of Electrical Engineers of Japan, vol. 121, no. 7, pp. 1203-1211
- [15] Yang, Z. J., Miyazaki, K., Kanae, S. and Wada, K.(2004), "Robust Position Control of a Magnetic Levitation System via Dynamic Surface Control Technique," IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 51, no. 1, pp. 26-34
- [16] Mahmoud, N. I.(2003), "A backstepping design of a control system for a magnetic levitation system," Doctoral dissertation Linköping

- [17] Meena. N., Sharma, B.B.(2014), "Backstepping Algorithm with Sliding Mode Control for Magnetic Levitation System," International Journal of Emerging Trends in Electrical and Electronics, vol. 10, no. 3, pp. 39-43
- [18] Yang. Z. J., Tsubakihara. H., Kanae. S., Wada. K.(2007), Chun-Yi Su, "Robust Nonlinear Control of a Voltage-Controlled Magnetic Levitation System with Disturbance Observer," IEEE International Conference on Control Application, pp. 747-752
- [19] Li. W., and Lin P. W. Q.(2009), "The Feedback Linearization Based on Backstepping Technique," International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems (ICIS), vol. 2, pp. 282-286
- [20] Chen. W. H., Balance. D. J. and Gawthrop. P. J.(2000), "A nonlinear disturbance observer for robotic manipulators," IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 47, no. 4, pp. 932-938
- [21] Chen. W. H.(2004), "Disturbance Observer Based Control for Nonlinear Systems," IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, vol. 9, no. 4, pp. 706-710