

(علمی-پژوهشی)

کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل هوشمند برای اصلاح موقعیت یک ماهواره ارتفاع پایین

در این مقاله به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی و کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل و رگولاتور خطی مرتبه دوم به طراحی کنترلی برای اصلاح مدار و موقعیت ماهواره مدار پایین پرداخته شده است. در این روش، از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای یادگیری مدل خطی سیستم در مواجهه با اغتشاشات استفاده شده است. همچنین، به کمک مدل عصبی مصنوعی به دست آمده، پس از تخمین برخط مدل خطی سیستم در هر لحظه، کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل طراحی شده برای سیستم اصلاح شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها تأثیر قابل توجه استفاده از مدل برخط مبتنی بر یادگیری ماشین را در بهبود عملکرد کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: کنترل مدار، کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل، شبکه عصبی مصنوعی، ماهواره ارتفاع پایین، رگولاتور درجه دوم خطی

طه یاسینی^{۱*}، جعفر روشنی‌یان^{۱**} و
شاهین درویش‌پور^{۱***}

۱- دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، کدپستی: ۱۳۴۵۵۹۹۱۴۱

* دانش‌آموخته کارشناسی ارشد

** استادیار (نویسنده پاسخگو)، ایمیل:

roshanian@kntu.ac.ir

*** دانش‌آموخته کارشناسی ارشد

Model Predictive Control Based on Intelligent Model for Low Earth Orbit Satellite

In this paper, an orbit control algorithm is implemented for low earth orbit (LEO) satellites, using artificial neural networks (ANN), model-based predictive control (MPC), and linear quadratic regulator (LQR). As a self-tuning regulator structure, an ANN is used to learn the model of the satellite with external disturbances, after extracting a linear online model, based on ANN. Both LQR and MPC controllers are used to keep the satellite in its orbit.

Keywords: Orbit Control, Model Predictive Control, Neural Network, Low Earth Orbit, Linear Quadratic Regulator

T. Yasini^{1*}, J. Roshanian^{1**}, and
Sh. Darvishpour^{1***}

1- Department of Aerospace Engineering, Khajeh Nasir Toosi University of Technology, Postal Code: 1345599141, Tehran, IRAN

* M.Sc. Holder

** Assistant Professor
(Corresponding Author): Email:

roshanian@kntu.ac.ir

*** M.Sc. Holder

۱- مقدمه

ماهواره‌ها در مدارهای ارتفاع پایین تحت تأثیر نیروهای اغتشاشی قرار می‌گیرند که باعث می‌شود ماهواره از مداری که برای آن طراحی شده فاصله بگیرد [۱]. برای مقابله با این اغتشاشات، ماهواره‌های ارتفاع پایین مجهز به تراسترهای کنترلی برای جبران اغتشاشات و نگهداری ماهواره در مدار می‌باشند. برای آنکه ماهواره به اهداف مأموریتی خود برسد، باید به طور دقیق در مدار طراحی شده قرار بگیرد. وظیفه اصلی تراسترهای کنترلی جبران و حذف نیروهای اغتشاشی و نگهداری ماهواره در مدار اصلی است تا اهداف مأموریتی ماهواره به درستی انجام شوند [۲].

به طور کلی، مانورهای اصلاح مدار کوچک می‌باشند، اما به دلیل طول عمر ماهواره که چند سال است در مجموع سوخت زیادی مورد نیاز است. این مسئله اهمیت بهینه‌بودن مصرف سوخت را نمایان می‌کند. یکی دیگر از دلایل مصرف سوخت بهینه هزینه بالای پرتاب ماهواره به ازای جرم است [۲]. همچنین، با توجه به محدودیت‌های طراحی، جرم سوخت همراه ماهواره از یک مقدار مشخص نباید بیشتر شود. روش‌های مختلفی برای کنترل وضعیت و مدار ماهواره‌ها وجود دارد. غالب این مانورها به کمک تراسترهای گاز سرد، مغناطیسی، عملگرهای ترکیبی [۳] و جابجایی مرکز جرم [۴] انجام می‌شوند.

در گذشته، برای کنترل مدار ماهواره از دستورات ایستگاه زمینی استفاده می‌شد. بدین صورت که پس از محاسبه تغییر بردار مکان ماهواره نسبت به مدار مرجع یک سری محاسبات تحلیلی برای انجام مانور ماهواره صورت می‌گرفته و سپس به ماهواره دستور روشن شدن تراستر برای مدت مشخصی صادر می‌شده است [۵]. از معایب این روش می‌توان به خودکار نبودن کنترل مدار و بهینه نبودن آن اشاره کرد. بسیاری از ماهواره‌های کاربردی برای انجام مأموریت‌های مهم مانند سنجش از دور، آب و هوا، نجوم، نظامی و غیره در ارتفاعات پایین قرار می‌گیرند. همچنین، ایستگاه بین‌المللی فضایی نیز در این محدوده ارتفاعی قرار دارد [۶].

مطالعات مختلفی بر روی کنترل خودکار مدار ماهواره براساس خطی‌سازی معادلات حرکت ماهواره حول مدار مرجع انجام شده‌اند. اویشی^۱ و همکارانش با خطی‌سازی معادلات حرکت ماهواره حول مدار مرجع دایروی، یک کنترل‌کننده پیش‌بین مبتنی بر مدل برای کنترل همزمان موقعیت و وضعیت ماهواره‌های مدار GEO پیشنهاد داده‌اند [۷]. لیم^۲ و همکارانش با خطی‌سازی معادلات حرکت ماهواره‌ها نسبت به یکدیگر، یک

کنترل‌کننده پیش‌بین مقاوم جهت ماکزیمم کردن دقت حرکت ماهواره‌ها نسبت به یکدیگر طراحی کرده‌اند [۸]. توکلی و اسدیان با خطی‌سازی معادلات تغییراتی گاوس حول مدار مرجع یک کنترل‌کننده پیش‌بین جهت کمینه‌سازی مصرف سوخت طراحی کرده‌اند و برتری آن را نسبت به رگولاتور خطی مرتبه دوم نشان داده‌اند [۲]. پریئو و احمد^۳ از روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر معادلات خطی حرکت ماهواره حول مدار مرجع ارتفاع پایین، جهت جبران نیروی اغتشاشی پسای جو استفاده کرده‌اند [۹].

کنترل پیش‌بین یک استراتژی کنترلی بهینه است که با استفاده از پیش‌بینی آینده مدل دینامیکی سیستم، تابع هزینه در نظر گرفته شده برای سیستم را کمینه می‌کند [۷]. این کنترل قادر است به صورت همزمان چندین هدف کنترلی را با در نظر گرفتن قیود سخت بر روی ورودی و خروجی سیستم تحقق بخشد و بهینگی را تضمین کند [۲]. این روش کنترلی را می‌توان به صورت برخط^۴ پیاده‌سازی کرد. با توجه به محدودیت‌های سوخت ماهواره و همچنین قیودی که بر روی میزان نیروی تراست خروجی سیستم وجود دارد، کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل یک انتخاب مناسب برای کنترل خودکار مدار ماهواره است. از این کنترلر برای کنترل ماهواره از جمله ماهواره‌های با تراست پایین استفاده شده است [۱۰]. همچنین، این کنترلر به دلیل بهینه بودن برای تعیین مسیر برخط ماهواره‌ها با هدف اجتناب از موانع نیز به کار گرفته شده است [۱۱]. ضمن اینکه به منظور کنترل وضعیت ماهواره نیز این کنترلر در موارد متعددی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۲].

یادگیری به روش شبکه‌های عصبی مصنوعی روشی برای یادگیری از داده‌های موجود است. در این روش محدودیتی در نوع و تعداد ورودی و خروجی‌ها وجود نداشته و برخلاف روش‌های یادگیری عمیق به داده‌های زیادی نیز احتیاج نمی‌باشد. همچنین در بین روش‌های یادگیری ماشینی، شبکه‌های عصبی روشی مقاوم در برابر نویز و عدم قطعیت محسوب می‌شوند. شبکه‌های عصبی مصنوعی در نهایت به کمک ماتریس‌های وزنی به نسبت پیچیده‌ای رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌ها را تعیین می‌کنند [۱۳]. از شبکه‌های عصبی مصنوعی به سختی می‌توان به عنوان کنترلر استفاده کرد و تنها مطالعات محدودی بر روی استفاده آنها در پرنده‌های بدون سرنشین انجام شده است [۱۴-۱۶]. زیرا تنها در محدوده کوچک یادگیری شده با مقادیر ورودی و وضعیت‌های محدود قابل استفاده است و اثبات پایداری این نوع کنترل‌کننده‌ها نیز بسیار دشوار است [۱۷]. به همین

1. Weiss
2. Lim
3. Prieto and Ahmad
4. Online

مورد استفاده قرار گرفته است، به عنوان نمونه می‌توان وینک‌ویست^{۱۱} و همکارانش اشاره کرد که از شبکه‌های عصبی مقید به همراه لایه‌های بهینه‌سازی محدب در کنار کنترل پیش‌بین مدل استفاده کرده‌اند [۲۲]. کومار^{۱۲} و همکارانش نیز از تکنیک یادگیری عمیق در کنار کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل استفاده کرده‌اند. در روش آنها از داده‌های کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل برای آموزش شبکه‌های عصبی عمیق استفاده شده است تا در نهایت از مدل عصبی کنترل برای کنترل استفاده شود [۲۳]. لارینسزوک^{۱۳} ضمن بررسی مدل‌های مختلف یادگیری ماشین که قابلیت پیاده‌سازی روی کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل را دارند، بهترین مدل‌های ممکن جهت استخراج برخط مدل را پیشنهاد کرده است [۲۴].

در بخش ۲ این مقاله مدل‌سازی ریاضی حرکت ماهواره در مدار و خطی‌سازی معادلات آورده شده است. در بخش ۳ مسئله کنترل مدار ماهواره با در نظر گرفتن قیود و تابع هزینه فرمول‌بندی شده است و یک کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل و یک کنترلر رگولاتور خطی مرتبه دوم برای اهداف در نظر گرفته شده طراحی شده است. در بخش ۴ شبیه‌سازی و نتایج کنترل پیش‌بین و رگولاتور درجه دوم خطی نشان داده شده و در بخش ۵ نیز نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- مدل‌سازی ریاضی حرکت ماهواره در مدار

به صورت ساده، معادله حرکت ماهواره در دستگاه مختصات اینرسی زمین مرکز^{۱۴} به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود [۱، ۲۵].

$$\ddot{\vec{r}} = -\mu \frac{\vec{r}}{r^3} + \frac{1}{m} \vec{F} + \vec{a}_p \quad (1)$$

در رابطه (۱)، \vec{F} بردار نیروهای کنترلی وارد بر ماهواره توسط تراستر، \vec{a}_p بردار شتاب‌های اغتشاشی وارد بر ماهواره، \vec{r} بردار جابه‌جایی ماهواره از مرکز زمین، $r = |\vec{r}|$ فاصله ماهواره از مرکز زمین، μ ثابت جاذبه زمین و m جرم ماهواره است. بردار جابه‌جایی نسبی بین ماهواره و مدار مرجع به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود.

دلیل در اینجا به ایده استفاده از آنها برای شناسایی مدل سیستم در مواجهه با اغتشاشات و نامعینی‌ها پرداخته شده است.

مطالعات محدودی جهت استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی جهت یادگیری رفتار سیستم انجام شده است. آکسون و تون^{۱۵} از شبکه عصبی مصنوعی برای مدل‌سازی سیستم جهت به حداکثر رساندن عملکرد مطلوب یک سیستم استفاده کرده‌اند [۱۸]. پیچ^{۱۶} و همکارانش یک شبکه عصبی مصنوعی ارائه داده‌اند که با استفاده از داده‌های تجربی به توسعه مدل‌های غیرخطی کمک خواهد کرد و با استفاده از کنترل پیش‌بین به کنترل فرآیندها و اصلاح آن‌ها می‌پردازد [۱۹]. رانکوویچ^{۱۷} و همکارانش با استفاده از شبکه عصبی فازی مدل غیرخطی یک سیستم ناشناخته^{۱۸} را جهت کنترل با استفاده از روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل محاسبه کرده‌اند [۲۰].

در این پژوهش، از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای یادگیری دینامیک ماهواره و اغتشاشات وارد بر آن و استفاده از مدل یادگیری شده برای تقویت کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل استفاده شده است. همان‌طور که گفته شد مدل به دست آمده از روش یادگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی مدلی بر مبنای ماتریس‌های وزنی به نسبت پیچیده است. این در حالی است که نیاز به مدل خطی یا غیرخطی سیستم برای طراحی کنترلر به روش پیش‌بین مدل یا رگولاتور خطی مرتبه دوم می‌باشد. برای حل این مشکل از روش خطی‌سازی برخط یا بازخطی‌سازی^{۱۹} استفاده می‌کنیم. این روش در سال ۲۰۱۰ توسط هنریکسن و پولسن^{۱۰} ارائه شد [۲۱]. در این روش در هر لحظه مدلی خطی برای سیستم استخراج شده و از این مدل برای طراحی کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل و رگولاتور خطی مرتبه دوم استفاده می‌شود. سپس، در لحظه بعد مجدد مدل دیگری استخراج می‌شود. در این پژوهش روش هنریکسن با اصلاحات کوچکی برای به دست آوردن مدل خطی از مدل یادگیری شده توسط شبکه عصبی استفاده شده است. به منظور ایجاد امکان مقایسه، این روش بر روی کنترلر رگولاتور خطی مرتبه دوم نیز پیاده‌سازی شده است. استفاده از مدل برخط سیستم برای طراحی کنترلر همان‌طور که در بخش‌های آتی مشاهده خواهد شد، توانسته است عملکرد کنترلر را به صورت قابل قبولی افزایش دهد. این رویکرد به طرق مختلفی توسط محققین دیگری

5. Åkesson and Toivonen

6. Piche

7. Ranković

8. Unknown

9. Re-Linearization

10. Henriksen and Poulsen

11. Winqvist

12. Kumar

13. Lawryńczuk

14. Earth Centered Inertial Frame

در رابطه (۳)، x بردار حالت ماهواره، u بردار کنترل اعمالی بر ماهواره و $f(x(t), u(t))$ دینامیک غیرخطی حرکت ماهواره در مدار است. با فرض خطی بودن سیستم و ثابت بودن بردار کنترل در یک گام زمانی خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \underline{x}_{k+1} &= x_k + \int_{t_k}^{t_{k+1}} [Ax(t) + Bu(t)] dt \\ &+ \int_{t_k}^{t_{k+1}} \delta dt \\ &= \underline{A}x(t) + \underline{B}u(t) + \underline{\delta} \end{aligned} \quad (4)$$

δ اغتشاشات خارجی را نمایش می‌دهد و برابر است با:

$$\begin{bmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ 0 & I \end{bmatrix} = \text{expm}(\Delta t \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & I \end{bmatrix}) \quad (5)$$

$$\underline{\delta} = \Delta t \delta$$

در این رابطه، expm تابع نمایی ماتریس است. بدین ترتیب ماتریس‌های A و B روزرسانی خواهند شد و داریم [۲۱]:

$$\underline{A} = \left(I + \frac{\Delta t}{n} A \right) \underline{A} \quad \underline{B} = \left(I + \frac{\Delta t}{n} A \right) \underline{B} + \frac{\Delta t}{n} B \quad (6)$$

با توسعه روش هنریکسن، با توجه به ثابت بودن ماتریس A ، B از رابطه (۷) محاسبه خواهد شد:

$$X_{k+1} = X_k + \tau(A X_k + B U_k) + X_d \quad (7)$$

در رابطه (۷)، τ گام زمانی کوچکی در نظر گرفته شده است و رابطه بصورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\begin{aligned} X_{k+1} &= X_k + \tau(A X_k + B U_k) + A' X_k \\ &= X_k + A_e X_k + B U_k \end{aligned} \quad (8)$$

که در این رابطه، A' برابر X_d/X_k در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب می‌توان دینامیک سیستم و اغتشاشات وارد بر آن را به صورت معادل A_e در نظر گرفت. بنابراین، ماتریس A ماهواره (که اغتشاشات نیز در آن در نظر گرفته شده‌اند) در هر لحظه قابل محاسبه خواهد بود و داریم:

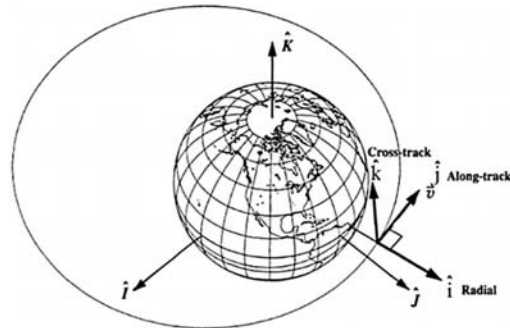
$$A_{e,k+1} = \frac{X_{k+1} - X_k - B U_k}{X_k} \quad (9)$$

بدین ترتیب در هر لحظه به کمک مدل یادگیری شده و به کمک شبکه عصبی، ماتریس A مجموعه سیستم و اغتشاشات در هر لحظه و وضعیت سیستم در n گام زمانی پیش رو تخمین زده می‌شود. از این تخمین‌ها برای طراحی کنترل به کمک پیش‌بین مدل و رگولاتور خطی مرتبه دوم استفاده خواهد شد.

از رابطه (۹) به تنهایی می‌توان در کنترل پیش‌بین مدل و رگولاتور خطی مرتبه دوم استفاده کرد. بدین ترتیب که در هر لحظه به جای استفاده از شبکه عصبی برای پیش‌بینی مدل، از خروجی اندازه‌گیری شده ماهواره استفاده شده و در هر لحظه مدل خطی را به دست آورد. این روش به خصوص در سیستم‌های غیرخطی به خوبی عمل می‌کند. استفاده از شبکه عصبی هرچند وابسته به تعداد و نوع داده‌های یادگیری است اما با توجه به اینکه

$$\delta \vec{r} = \delta x \hat{i} + \delta y \hat{j} + \delta z \hat{k} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، δx ، δy و δz مولفه‌های بردار مکان ماهواره نسبت به مدار مرجع و \hat{i} ، \hat{j} و \hat{k} بردارهای یک‌ه در دستگاه مختصات هیل هستند. در دستگاه مختصات هیل محور Y در جهت بردار سرعت ماهواره، محور X در جهت بردار جابه‌جایی از مرکز زمین و محور Z در جهت اندازه حرکت زاویه‌ای ماهواره (عمود بر صفحه مداری) می‌باشند. دستگاه مختصات هیل (ijk) و دستگاه مختصات اینرسی (IJK) زمین مرکز در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱): دستگاه مختصات اینرسی زمین مرکز و دستگاه هیل [۱].

۲-۱- استخراج مدل خطی به کمک یادگیری ماشین

یادگیری به روش شبکه‌های عصبی مصنوعی روشی کلی برای یادگیری از داده‌های موجود است. در این روش محدودیتی در نوع و تعداد ورودی و خروجی‌ها وجود ندارد و برخلاف روش‌های یادگیری عمیق به داده‌های زیادی احتیاج نیست. همچنین در بین روش‌های یادگیری ماشین، شبکه‌های عصبی روشی مقاوم در برابر نویز محسوب می‌شوند. شبکه‌های عصبی مصنوعی در نهایت به کمک ماتریس‌های وزنی به نسبت پیچیده‌ای رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌ها را تعیین می‌کنند [۱۳].

دینامیک حرکت ماهواره در مدار در نزدیکی مدار مرجع به صورت خطی در نظر گرفته می‌شود. هدف در این پژوهش این است که با توجه به داده‌های ورودی و خروجی ماهواره و بدون در نظر گرفتن مدل دینامیکی سیستم، با استفاده از روش هوشمند یادگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی، دینامیک خطی رفتار ماهواره در حضور اغتشاشات برای طراحی کنترلر محاسبه شود. طبق روش هنریکسن، بردار حالت به صورت رابطه (۳) قابل محاسبه خواهد بود.

$$x_{k+1} = x_k + \int_{t_k}^{t_{k+1}} \underbrace{f(x(t), u(t))}_{f(x_k, u_k)} dt \quad (3)$$

برای تحقق اهداف بیان شده، یک کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل و یک کنترل رگولاتور خطی مرتبه دوم طراحی شده‌اند. روش کنترل پیش‌بین بهینگی را با در نظر گرفتن عملکرد^{۱۵} و قیود وارد بر سیستم تضمین می‌کند. کنترل پیش‌بین با حل مسئله کنترل بهینه و پیش‌بینی آینده سیگنال کنترلی را تولید می‌کند که این فرآیند با در نظر گرفتن تابع هزینه و قیودی که بر روی ورودی و حالت سیستم است در هر گام زمانی انجام می‌پذیرد. بدین صورت که در هر گام زمانی دنباله‌ای از ورودی‌های کنترل را برای لحظه‌های آینده سیستم محاسبه می‌کند و با استفاده از روش افق کاهنده فقط جمله اول را به عنوان ورودی به سیستم اعمال می‌نماید. پس از اندازه‌گیری خروجی و خطای بین سیستم و حالت مطلوب در گام زمانی بعدی این فرآیند تکرار خواهد شد تا میزان خطا به صفر یا مقدار قابل قبولی برسد [۲۶]. با خطی در نظر گرفتن معادلات و تابع هزینه به صورت مربعی، کنترل پیش‌بین به صورت یک مسئله مربعی فرمول‌بندی خواهد شد که حجم محاسبات کمی را برای پیاده‌سازی به صورت برخط^{۱۶} دارد [۷]. این کنترلر قادر است فرضیاتی که در طراحی آن در نظر گرفته نشده را جبران کند و اختلاف بین مدل اصلی و مدل ریاضی در نظر گرفته شده برای طراحی کنترلر را از بین ببرد.

۳-۱- طراحی کنترلر پیش‌بین

با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند، ماتریس A که دینامیک ماهواره در نزدیکی مدار مرجع را نشان می‌دهد، محاسبه خواهد شد. سپس، با استفاده از رابطه (۱۰) که دینامیک خطی ماهواره در هر گام زمانی است یک کنترلر مبتنی بر پیش‌بینی مدل طراحی می‌شود. کنترلر پیش‌بین طراحی شده برای اعمال ورودی کنترل در همان گام زمانی است و با توجه به تغییر ماتریس A در گام زمانی بعدی، کنترلر پیش‌بین برای ماتریس جدید طراحی خواهد شد.

$$\begin{aligned} \dot{\vec{X}} &= A\vec{X} + B\vec{U} \\ \vec{Y} &= C\vec{X} \end{aligned} \quad (10)$$

بردار ورودی کنترلی به صورت رابطه (۱۱) خواهد بود.

$$\vec{U} = [F_x \ F_y \ F_z]^T \quad (11)$$

جهت پیاده‌سازی کنترل پیش‌بین معادلات سیستم باید به صورت گسسته بیان شوند. معادلات دینامیکی گسسته سیستم در گام زمانی Δt به صورت رابطه (۱۲) است.

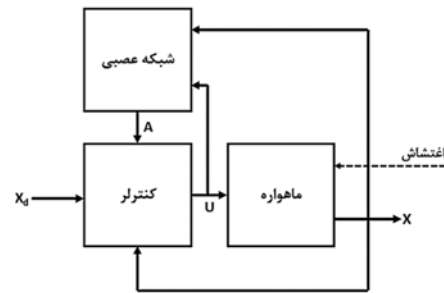
$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \quad (12)$$

در مقایسه با کنترلر مبتنی بر مدل ثابت خطی (از پیش محاسبه شده) علاوه بر دینامیک سیستم، دینامیک اغتشاشات را نیز در مدل تولیدی در نظر می‌گیرد، خواهد توانست نتایج بهتری را به دست آورد. برای یادگیری مدل سیستم و اغتشاشات وارد بر آن، وضعیت سیستم در هر لحظه و ورودی اعمال شده به آن به عنوان ورودی شبکه عصبی مصنوعی و وضعیت سیستم در لحظه بعد به عنوان خروجی شبکه عصبی در نظر گرفته شده‌اند (شکل ۲).



شکل (۲): ورودی و خروجی شبکه عصبی مورد استفاده.

به منظور دستیابی به نتیجه بهتر برای یادگیری دینامیک سیستم توسط هوش مصنوعی، داده‌های کنترل رگولاتور مرتبه دوم به عنوان اولین سری داده‌ها توسط شبکه عصبی فراگرفته شده‌اند. سپس، مدل دینامیکی سیستم حذف و به جای آن این مدل یادگیری شده قرار گرفته است. این مدل در هر گام زمانی با داده‌های به دست آمده از کنترلر و ماهواره به صورت برخط به روز می‌شود تا دقیق‌ترین تخمین از مدل واقعی ماهواره و اغتشاشات وارد بر آن به دست آید (شکل ۳).



شکل (۳): شماتیک کنترلر طراحی شده به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی.

۳-۳ طراحی کنترلر

هدف از طراحی کنترلر مدار ماهواره ارتفاع پایین عبارتست از:

- بازگرداندن ماهواره به مدار اصلی همراه با مصرف سوخت بهینه و
- کاهش اثر اغتشاشات مداری و نگاهداشتن ماهواره در مدار اصلی با بیشترین دقت ممکن.

15. Performance

16. Online

(علمی-پژوهشی)

طه یاسینی، جعفر روشنی‌یان و شاهین درویش‌پور

در رابطه (۱۶)، Q و R ماتریس‌های وزنی برای تنظیم پارامترهای تابع هزینه هستند. قیود حاکم بر سیستم شامل حداکثر نیروی کنترلی اعمالی از طرف پیشران‌های ماهواره می‌باشند. این قیود به صورت رابطه (۱۷) در نظر گرفته می‌شوند.

$$\begin{aligned} F_{x_{min}} < F_x < F_{x_{max}} \\ F_{y_{min}} < F_y < F_{y_{max}} \\ F_{z_{min}} < F_z < F_{z_{max}} \end{aligned} \quad (17)$$

در نهایت مسئله کنترل پیش‌بین که در هرگام زمانی $k > 0$ مسئله کنترل بهینه افق محدود را حل می‌کند. با در نظر گرفتن قیود موجود روی کنترل و خروجی، سیستم به صورت رابطه (۱۸) در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{aligned} \min \sum_{k=0}^{N_p-1} x_k^T Q x_k + u_k^T R u_k \\ \text{st: } x_{k+1} = A x_k + B u_k + B_d a_{p,k} \\ F_{x_{min}} < F_x < F_{x_{max}} \\ F_{y_{min}} < F_y < F_{y_{max}} \\ F_{z_{min}} < F_z < F_{z_{max}} \end{aligned} \quad (18)$$

در رابطه (۱۸)، N_p افق کنترل پیش‌بین است که تعداد پیش‌بینی‌های انجام شده از آینده سیستم و اغتشاشات را نشان می‌دهد. Q و R ماتریس‌های مربعی وزنی برای خروجی و کنترل سیستم می‌باشند که با تنظیم این ماتریس‌ها دقت کنترلی افزایش و میزان مصرف انرژی کاهش می‌یابند.

۳-۲- کنترل رگولاتور مرتبه دوم

جهت مقایسه عملکرد کنترل پیش‌بین، یک کنترلر رگولاتور مرتبه دوم در نظر گرفته شده است. تابع هزینه در نظر گرفته شده برای رگولاتور مرتبه دوم به صورت رابطه (۱۹) است.

$$J = \sum_{n=0}^{\infty} (x_n^T Q x_n + u_n^T R u_n) \quad (19)$$

با حل معادله ریکاتی برای تابع هزینه افق نامحدود در رابطه (۱۹)، ورودی کنترلی اعمالی با حل معادله جبری رابطه (۲۰) بدست خواهد آمد.

$$\begin{aligned} A^T P A - P - (A^T P B)(B^T P B \\ + R)^{-1}(B^T P A) \\ + Q = 0, \\ K = (B^T P B + R)^{-1} B^T P A, \\ u = -Kx, \end{aligned} \quad (20)$$

در رابطه (۱۲)، x_k بردار حالت سیستم در گام زمانی $k > 0$ و u_k بردار کنترل در گام زمانی $k > 0$ هستند. همچنین، معادلات گسسته خروجی سیستم به صورت رابطه (۱۳) بیان می‌شوند.

$$y_k = C_k x_k \quad (13)$$

با در نظر گرفتن شرایط اولیه برای سیستم در گام k ، آینده حالت‌های سیستم برای N_p گام پیش‌بینی خواهد شد که N_p افق پیش‌بینی نامیده می‌شود. براساس معادلات فضای حالت گسسته (رابطه ۱۲)، پیش‌بینی حالت سیستم به صورت رابطه (۱۴) محاسبه خواهد شد.

$$\begin{aligned} x(k+1|k) &= Ax(k) + B\Delta u(k) \\ x(k+2|k) &= A^2x(k) + AB\Delta u(k) \\ &\quad + B\Delta u(k+1) \\ &\vdots \\ x(k+N_p|k) &= A^{N_p}x(k) \\ &\quad + A^{N_p-1}B\Delta u(k) + \dots \\ &\quad + A^{N_p-N_c}B\Delta u(k) \\ &\quad + N_c - 1 \end{aligned} \quad (14)$$

با توجه به روابط (۱۳) و (۱۴) پیش‌بینی خروجی سیستم به صورت رابطه (۱۵) خواهد بود.

$$\begin{aligned} Y &= [y(k+1|k) \quad \dots \quad y(k+N_p|k)] \\ Y &= Fx(k) + \phi\Delta u(k) \\ F &= \begin{bmatrix} CA \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix} \\ \phi &= \begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ CA^{N_p-1}B & CA^{N_p-2}B & \dots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

در رابطه (۱۵)، N_c افق کنترل نامیده می‌شود که بیانگر این است که سیستم با اعمال N_c ورودی کنترلی به مرجع اصلی در N_p گام خواهد رسید.

کنترل پیش‌بین با حل مسئله بهینه‌سازی افق محدود، ورودی‌های کنترلی را جهت اعمال به سیستم محاسبه خواهد کرد. تابع هزینه در نظر گرفته شده از نوع مربعی و به صورت رابطه (۱۶) است که شامل ترم‌های ورودی کنترلی و خروجی سیستم می‌باشد. بدین صورت که علاوه بر کمینه‌کردن مصرف سوخت، دقت دنبال کردن مسیر مرجع افزایش یابد و خطای به وجود آمده توسط نیروهای اغتشاشی نیز جبران شود.

$$J = \sum_{k=0}^{N_p-1} y_k^T Q y_k + u_k^T R u_k \quad (16)$$

که ماتریس‌های Q و R وزن‌های حالت و کنترل سیستم و ماتریس‌های A و B از رابطه (۱۰) که رفتار دینامیکی سیستم را نشان می‌دهد. ماتریس P ماتریس مجهول معادله ریکاتی است که با حل معادله (۲۰) کنترل اعمالی بدست خواهد آمد.

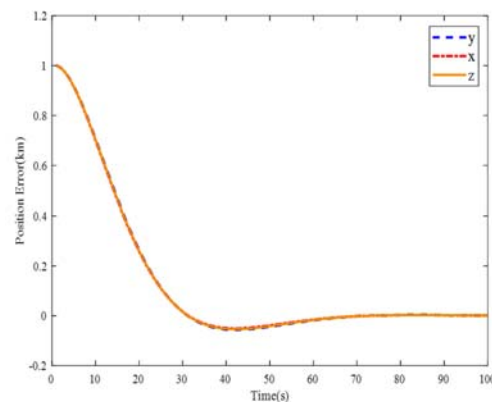
۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، عملکرد کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل و رگولاتور خطی مرتبه دوم در کاهش اغتشاشات و حفظ ماهواره بر روی مدار مرجع به کمک مدل هوشمند، مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات مدار مرجع ارتفاع پایین جهت پیاده‌سازی کنترل مدار در جدول ۱ نشان داده شده است.

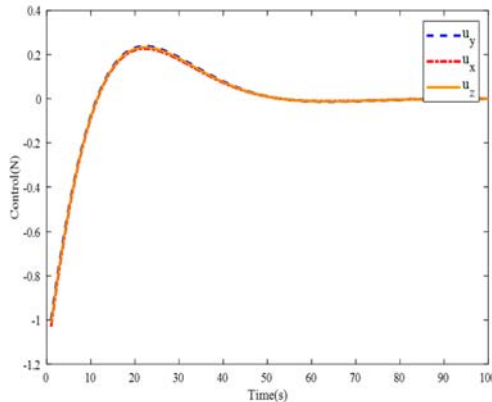
جدول (۱): المان‌های مداری مدار مرجع.

زاویه صعود حقیقی گره صعود	۷۵ درجه
ارتفاع مدار	۵۰۰ کیلومتر
شیب مدار	۹۷ درجه
آرگومان نقطه حضيض مداری	۵۵ درجه

در ابتدا اصلاح و حفظ موقعیت ماهواره با استفاده از روش کنترل رگولاتور خطی مرتبه دوم انجام شده است تا به کمک آن عملکرد شبکه عصبی مورد بررسی و مقایسه قرار گیرد. در حالت اول فرض شده است که به میزان ۱ کیلومتر انحراف از مدار مرجع وجود دارد. ماتریس‌های Q و R جهت استفاده در کنترل به صورت ماتریس‌های قطری همانی در نظر گرفته شده‌اند. در شکل ۴ و شکل ۵ خطای بین موقعیت ماهواره و مدار مرجع و ورودی کنترلی اعمالی در هر سه راستای مختصات توسط کنترل رگولاتور خطی مرتبه دوم نشان داده شده‌اند.



شکل (۴): خطای بین مدار مرجع و موقعیت ماهواره در روش رگولاتور خطی مرتبه دوم براساس مدل خطی.



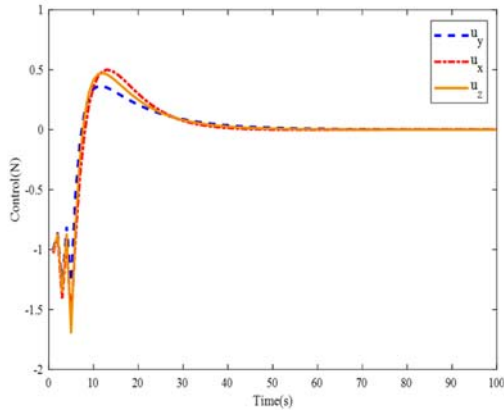
شکل (۵): نسبت توان پمپ اکسیدکننده و سوخت به توان نامی در فشار محفظه و نسبت دبی‌های مختلف.

با استفاده از مدل یادگیری شده توسط شبکه عصبی مصنوعی در هر گام زمانی کنترل رگولاتور خطی مرتبه دوم طراحی شده است. در این مرحله در هر گام زمانی با توجه به دینامیک تخمین زده شده توسط شبکه عصبی مصنوعی یک کنترلر طراحی شده و برای یک گام زمانی به سیستم اعمال خواهد شد. سپس، با استفاده از مقادیر ورودی و خروجی، شبکه عصبی مصنوعی مجدد آموزش داده شده و یک دینامیک جدید برای سیستم طراحی خواهد کرد و این روند تا رسیدن ماهواره به مدار مرجع ادامه خواهد یافت. شکل‌های ۷-۶ خطای بین ماهواره و مدار مرجع و ورودی کنترلی اعمالی در راستای سه محور مختصات توسط کنترل رگولاتور خطی مرتبه دوم براساس مدل خطی فراگرفته شده توسط شبکه عصبی را نشان می‌دهند. ملاحظه می‌شود که ضمن حذف فراجهدش در کنترل طراحی شده توسط مدل خطی، زمان نشست نیز از ۷۰ به حدود ۵۵ ثانیه رسیده است، در حالی که کنترل اعمال شده همانند مدل خطی از ۱- تا ۰/۲ نیوتون بوده است.

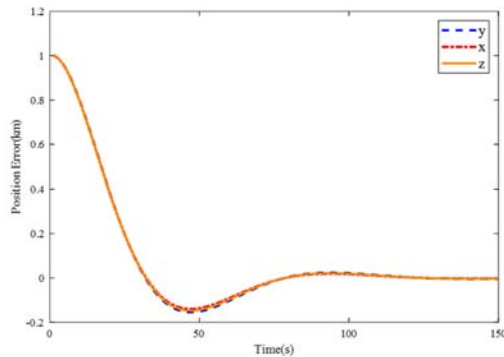
در گام بعدی با اضافه کردن اغتشاشات و نامعینی به سیستم میزان مقاوم بودن کنترلر طراحی شده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از شبکه عصبی مصنوعی جهت یادگیری دینامیک سیستم باعث شده است که رفتار سیستم جدید نیز به خوبی تخمین زده شود و کنترلر به خوبی ماهواره را بر روی مدار نامی قرار دهد. شکل‌های ۹-۸ خطای بین ماهواره و مدار مرجع و ورودی‌های کنترلی را با در نظر گرفتن اغتشاشات و نامعینی نشان می‌دهند.

برای بررسی بیشتر، با استفاده از روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل نیز مأموریت اصلاح و حفظ موقعیت ماهواره بر روی مدار انجام خواهیم داد. ابتدا فرض شده است که ماهواره تحت تأثیر اغتشاشات از مدار خارج شده و با استفاده از کنترل پیش‌بین به مدار اصلی برگردانده خواهد شد. قید در نظر گرفته شده بر روی ورودی

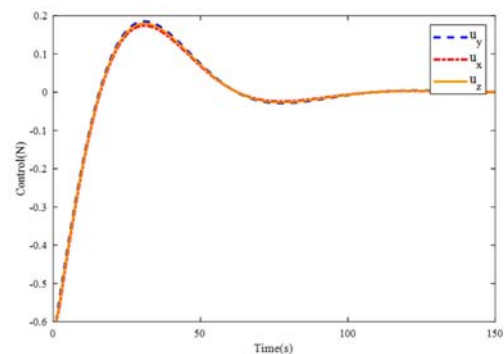
(علمی-پژوهشی)
طه یاسینی، جعفر روشنی یان و شاهین درویش پور



شکل (۹): کنترل اعمالی در روش رگولاتور خطی مرتبه دوم براساس مدل یادگیری شده به کمک شبکه عصبی در حضور اغتشاشات و نامعینی.



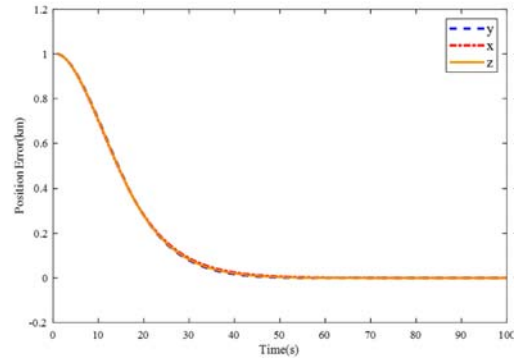
شکل (۱۰): خطای بین مدار مرجع و ماهواره در روش کنترل پیش بین مبتنی بر مدل براساس مدل خطی.



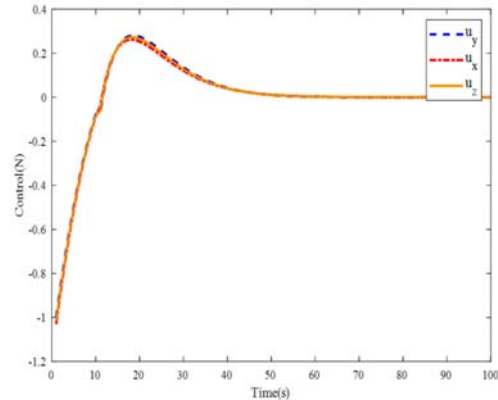
شکل (۱۱): کنترل اعمالی در روش کنترل پیش بین مبتنی بر مدل براساس مدل خطی.

کنترل پیش بین مبتنی بر مدل با قیود در نظر گرفته شده، حدود ۲۰۰ متر فراجهدش داشته و زمان نشست آن نیز حدود ۱۳۰ ثانیه بوده است. در گام بعدی با استفاده از یادگیری دینامیک سیستم توسط شبکه عصبی مصنوعی، دینامیک خطی ماهواره در هر گام زمانی محاسبه و با استفاده از روش کنترل پیش بین مبتنی بر مدل در هر گام زمانی یک کنترلر طراحی خواهد شد. شکل های ۱۲-۱۳ خطای بین ماهواره و مدار مرجع و کنترل

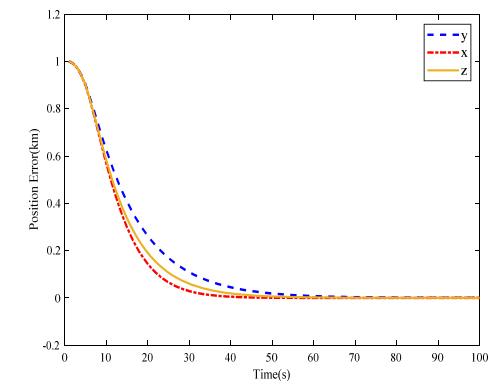
سیستم شامل حداکثر نیروی پیشران تولید که $0/6$ نیوتن در نظر گرفته شده است. ماتریس های Q و R همانند کنترل رگولاتور درجه دوم در نظر گرفته شده اند. شکل های ۱۱-۱۰ خطای بین ماهواره و مدار مرجع و کنترل اعمالی توسط تراستر را نشان می دهند. از آنجاکه قید حداکثر نیرو در مسئله بهینه سازی وجود داشت با توجه به ورودی کنترل واضح است که این کنترلر به خوبی توانسته این قید را رعایت کند و ماهواره را به مدار بازگرداند و بر روی مدار نگه دارد.



شکل (۶): خطای بین مدار مرجع و ماهواره در روش رگولاتور خطی مرتبه دوم براساس مدل یادگیری شده به کمک شبکه عصبی.

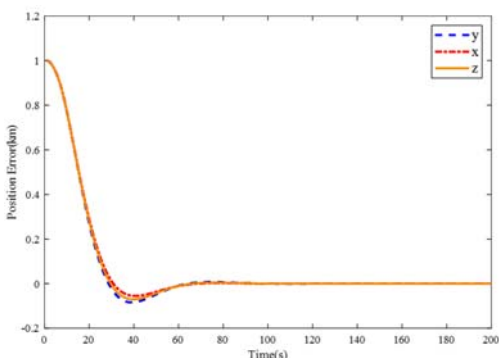


شکل (۷): کنترل اعمالی در روش رگولاتور خطی مرتبه دوم براساس مدل یادگیری شده به کمک شبکه عصبی.

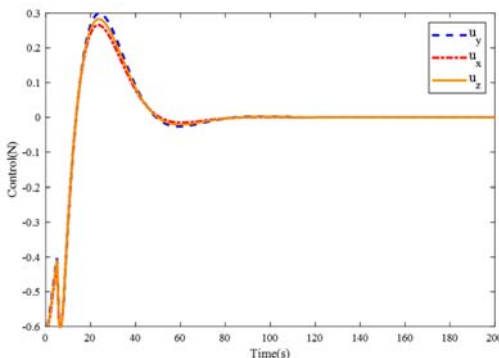


شکل (۸): خطای بین مدار مرجع و ماهواره در روش رگولاتور خطی مرتبه دوم براساس مدل یادگیری شده به کمک شبکه عصبی در حضور اغتشاشات و نامعینی.

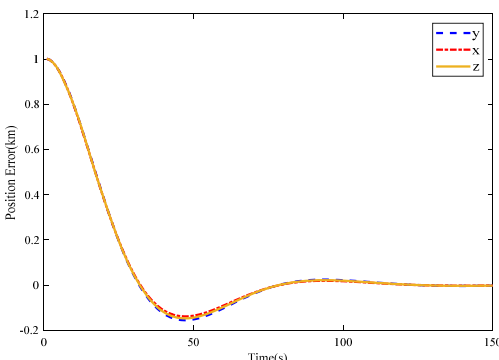
سیستم را کنترل کند. برای مقایسه می‌توانیم عملکرد کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل خطی را در حضور اغتشاشات و نامعینی‌های مشابه را در شکل ۱۶ بررسی کنیم. ملاحظه می‌شود که در کنترلر مبتنی بر مدل به دست آمده از شبکه عصبی ضمن بهبود ۱۰۰ متری در فراجش، زمان نشست نیز به مدت ۷۰ ثانیه کاهش یافته است که هر دو بهبود ۱۰۰ درصدی را نشان می‌دهند.



شکل (۱۴): خطای بین مدار مرجع و ماهواره در روش کنترل پیش‌بین و مدل یادگیری شده به کمک شبکه عصبی در حضور اغتشاشات و نامعینی.



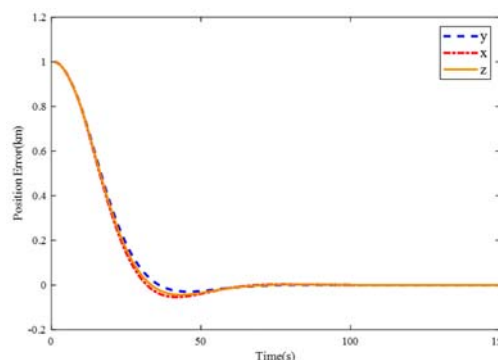
شکل (۱۵): کنترل اعمالی در روش کنترل پیش‌بین و مدل یادگیری شده به کمک شبکه عصبی در حضور اغتشاشات و نامعینی.



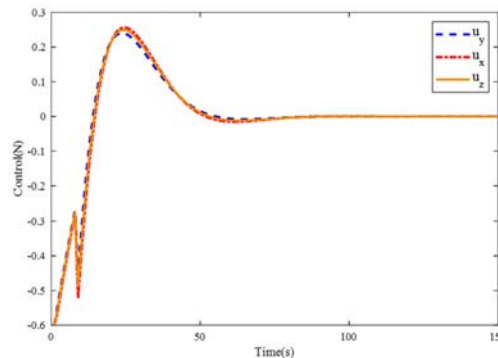
شکل (۱۶): خطای بین مدار مرجع و موقعیت ماهواره در روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل براساس مدل خطی در حضور اغتشاشات و نامعینی.

اعمالی توسط پیش‌بران ماهواره در سیستم یادگیری شده توسط شبکه عصبی مصنوعی را نشان می‌دهند.

کنترل طراحی شده بر مبنای مدل به دست آمده از شبکه عصبی، فراجش حداکثری نزدیک به ۵۰ متر داشته که تقریباً ۲۵ درصد کنترل طراحی شده بر مبنای مدل خطی است. از نظر زمان نشست نیز نزدیک به ۴۰ درصد بهبود در عملکرد سیستم حاصل شده است و ماهواره در زمان تقریبی ۷۵ ثانیه به مدار نامی خود بازگشته است، درحالی‌که از نظر تلاش کنترلی نیز تغییر چندانی قابل توجهی مشاهده نمی‌شود. این در حالی است که با افزایش داده‌های یادگیری انتظار می‌رود عملکرد شبکه عصبی بیش از این نیز بهبود یابد.



شکل (۱۷): خطای بین مدار مرجع و ماهواره در روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل و مدل یادگیری شده به کمک شبکه عصبی.



شکل (۱۸): کنترل اعمالی در کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل و مدل یادگیری شده به کمک شبکه عصبی.

در اینجا با اضافه کردن اغتشاشات و نامعینی به سیستم میزان مقاوم بودن شبکه عصبی مصنوعی در کنار کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل را بررسی خواهیم کرد. شکل‌های ۱۴-۱۵ خطای بین موقعیت ماهواره و مدار مرجع و کنترل اعمالی توسط پیش‌بران در حضور اغتشاشات و نامعینی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است شبکه عصبی به خوبی توانسته مدل سیستم را شناسایی کرده و کنترلر قادر است با عملکرد بسیار مناسبی

کنترلی نیز نسبت به کنترلرهای مشابه مانند رگولاتور خطی مرتبه دوم برتری داشته باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی اقدام به یادگیری دینامیک حاکم بر ماهواره‌ای ارتفاع پایین و اغتشاشات وارد به صورت برخط (آنلاین) کردیم. مدل به دست آمده به کمک یادگیری ماشین به خوبی توانست در محدوده عملیات مدل خطی مناسبی از پرنده به دست دهد. نتایج حاصل از پیاده‌سازی کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل و رگولاتور مرتبه دوم خطی براساس این مدل یادگیری شده نتایج بسیار مناسبی را نشان می‌دهند. در مقایسه با مدل خطی‌سازی شده، کنترل مبتنی بر مدل یادگیری شده فراجش و زمان نشست کمتری داشته و در مواجهه با نامعینی در سیستم نیز به خوبی توانست با نامعینی‌های موجود مقابله و با خطای کمی سیستم را کنترل کند. نتایج بررسی‌های این مقاله نشان می‌دهد استفاده از مدل هوشمند در کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل نسبت به استفاده از همین مدل در رگولاتور خطی مرتبه دوم تأثیر بیشتری خواهد داشت.

براساس خلاصه نتایج که در جدول ۲ آورده شده است، با وجود اینکه کنترلر رگولاتور خطی مرتبه دوم از نظر زمان نشست و بیشترین فراجش از کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل نتایج بهتری از خود نشان داده است، اما استفاده از مدل برخط به دست آمده از طریق یادگیری ماشین در ترکیب با کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل عملکرد بهتری نسبت به تمام کنترلرهای دیگر از خود نشان داده است. استفاده از این روش در ترکیب با رگولاتور خطی مرتبه دوم، با وجود اینکه این کنترلر به تنهایی عملکرد بهتری از خود نشان داده است نتوانسته بهبود قابل توجه یا حداقل به اندازه کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل از خود نشان دهد. این بهبود هرچند در زمان نشست دیده می‌شود اما از نظر فراجش ترکیب این روش با کنترلر رگولاتور خطی مرتبه دوم نتایج بهتری خواهد داشت. دلیل این امر را می‌توان در تلاش بیشتر کنترلی در رگولاتور خطی مرتبه دوم جست که نزدیک به ۲ تا ۳ برابر کنترلر مبتنی بر مدل است. کنترلر مبتنی بر مدل ضمن اینکه امکان رعایت قیود کنترلی را به ما می‌دهد در ترکیب با مدل هوشمند می‌تواند در بهبود عملکرد کنترلر از نظر پارامترهای

جدول (۲): مقایسه نتایج کنترلرهای مختلف.

کنترلر/پارامترها	زمان نشست	بیشترین فراجش	حد پایین کنترل	حد بالای کنترل
رگولاتور خطی مرتبه دوم-بدون اغتشاش	۸۰	۰/۰۹	-۱	۰/۲
رگولاتور خطی مرتبه دوم هوشمند-بدون اغتشاش	۶۰	۰	-۱	۰/۳
رگولاتور خطی مرتبه دوم هوشمند-در حضور اغتشاش	۷۰	۰	-۱/۵	۰/۵
کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل-بدون اغتشاش	۱۴۰	۰/۱۸	-۰/۶	۰/۱۹
کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل-در حضور اغتشاش	۱۵۰	۰/۱۸	-۰/۶	۰/۲
کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل هوشمند-در حضور اغتشاش	۵۰	۰/۱	-۰/۶	۰/۳

مراجع

- [1] Melton, R.G., "Fundamentals of Astrodynamics and Applications", *J. Guid. Control. Dyn.*, Vol. 21, No. 4, pp. 672–672, 1998.
- [2] Tavakoli M.M. and Assadian, N., "Model Predictive Orbit Control of a Low Earth Orbit Satellite Using Gauss's Variational Equations", *Proc. Inst. Mech. Eng. Part G J. Aerosp. Eng.*, Vol. 228, No. 13, pp. 2385–2398, 2014.
- [3] Giri, D.K., "Attitude Control of Satellites Actuated by Hybrid Actuators", *The 2019 International Conference on Mechatronics, Robotics and Systems Engineering (MoRSE)*, Bali, Indonesia, 2019.
- [4] Darvishpoor, S., Roshanian, J., and Tayefi, M., "A Novel Concept of Vtol BI-Rotor Uav Based on Moving Mass Control", *Aerosp. Sci. Technol.*, Vol. 107, pp. 106238, 2020.
- [5] Ahmed P.S. and Guang-Qian, X., "Autonomous Orbit Control With Position and Velocity Feedback, Using Modern Control Theory", US-0319161, 1997.
- [6] Tavakkoli, M.M., "Model Predictive Orbit Control of a LEO Satellite Using Gauss's Variational Equations", Ms.c. Thesis, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, 1997 (In Persian).
- [7] Weiss, A., Kalabić, U.V., and Di Cairano, S., "Station Keeping and Momentum Management of Low-Thrust Satellites Using MPC", *Aerosp. Sci. Technol.*, Vol. 76, pp. 229–241, 2018.
- [8] Lim, Y. Jung, Y., and Bang, H., "Robust Model Predictive Control for Satellite Formation Keeping With Eccentricity/Inclination Vector Separation", *Adv. Sp. Res.*, Vol. 61, No. 10, pp. 2661–2672, 2018.
- [9] Prieto, D. and Ahmad, Z., "A Drag Free Control, Based on Model Predictive Technics", *Proc. Am. Control Conf.*, Vol. 3, pp. 1527–1532, 2005.
- [10] Caverly, R.J., Di Cairano, S., and Weiss, A., "Electric Satellite Station Keeping, Attitude Control, and Momentum Management by MPC", *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, Early Access Article, 2020.
- [11] Hu, Q., Xie, J., and Wang, C., "Dynamic Path Planning and Trajectory Tracking Using MPC for Satellite with Collision Avoidance", *ISA Trans.*, Vol. 84, pp. 128–141, 2019.
- [12] Yu, J., Yingchun, Z., and Jing, J., "Nonlinear MPC for Attitude System of Miniature Satellite Using Multiple MEMS Actuators", *The 10th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Beijing, China, 2012.
- [13] Mitchell, T.M., *Machine learning*, McGraw Hill, New York, 1997.
- [14] Darvishpoor, S., Roshanian, J., Raissi, A., and Hassanalian, M., "Configurations, Flight Mechanisms, and Applications of Unmanned Aerial Systems: A Review", *Prog. Aerosp. Sci.*, Vol. 121, p. 100694, 2020.
- [15] Darvishpoor, S. and J. Roshanian, "A Survey on Unmanned Aerial Vehicles : Scheme Approach", *The 18th International Conference of Iranian Aerospace Society*, 2020.
- [16] Darvishpoor, S. and Roshanian, J., "Design and Implementation of an Entirely Machine Learning Based Controller for an Unmanned Quadrotor", *The 17th International Conference Iranian Aerospace Societ*, Tehran, Iran, 2018.
- [17] Darvishpoor, S. and Roshanian, J., "Design and Implementation of a Comprehensive Controller Based Entirely on Machine Learning for an Unmanned Four-seater", *The 17th International Conference Iranian Aerospace Societ*, Tehran, Iran, 2018.
- [18] Åkesson, B.M. and Toivonen, H.T., "A Neural Network Model Predictive Controller", *J. Process Control*, Vol. 16, No. 9, pp. 937–946, 2006.
- [19] Piche, S., Keeler, J., Martin, G., Boe, G., Johnson, D., and Gerules, M., "Neural Network Based Model Predictive Control", *NIPS Conference*, Denver, Colorado, USA, , 1999.
- [20] Ranković, V. Radulović, J. Grujović, N., and Divac, D., "Neural Network Model Predictive Control of Nonlinear Systems Using Genetic Algorithms", *Int. J. Comput. Commun. Control*, Vol. 7, No. 3, pp. 540–549, 2012.
- [21] Henriksen, L.C. and Poulsen, N.K., "An Online Re-Linearization Scheme Suited For Model Predictive and Linear Quadratic Control", Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, IMM-Technical Report-2010-13, 2010.
- [22] Winqvist, R. Venkitaraman, A., and Wahlberg, B., "On Training and Evaluation of Neural Network Approaches for Model Predictive Control", *arXiv:2005.04112*, 2020.
- [23] Pon Kumar, S.S., Tulsyan, A., Gopaluni, B., and Loewen, P., "A Deep Learning Architecture for Predictive Control", *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 51, No. 18, pp. 512–517, 2018.
- [24] Ławryńczuk, M., "Neural Networks in Model Predictive Control", *Stud. Comput. Intell.*, Vol. 252, pp. 31–63, 2009.
- [25] Curtis, H.D. *Orbital Mechanics for Engineering Students*, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 2014.
- [26] Camacho, E.F. and (Carlos) Bordons, C., *Model Predictive Control*, Springer, New York, 2007.