

## توسعه یک الگوریتم تولید مسیر زاویه‌ای مطلوب حلقه-بسته هوشمند برای یک ماهواره

مانا غنی‌فرا<sup>۱</sup>، میلاد کامزن<sup>۲\*</sup>، امیرعلی نیکخواه<sup>۳</sup>، جعفر روشنی‌یان<sup>۴</sup>، محمد تشنه‌لب<sup>۵</sup>  
 ۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، managhanifar@email.kntu.ac.ir  
 ۲- دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، milad.kamzan@email.kntu.ac.ir  
 ۳- دانشیار، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، nikkhah@kntu.ac.ir  
 ۴- استاد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، roshanian@kntu.ac.ir  
 ۵- استاد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، teshnehlab@eetd.kntu.ac.ir  
 \*نویسنده مخاطب

### چکیده

در این مقاله، یک الگوریتم جدید حلقه-بسته به منظور تولید مسیر مطلوب زاویه‌ای برای یک ماهواره مفروض به جهت نیل به مقدار نهایی مورد نظر ارائه گردیده است. الگوریتم مذکور بر پایه بهره‌گیری از توان یادگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی و نیز قابلیت‌های کدکننده‌های خودکار، قادر است با در دست داشتن مقادیر نهایی مطلوب از مسیر و نیز مقادیر لحظه‌ای متغیرهای وضعیت سیستم، بهترین مسیر نیل به نقاط نهایی مذکور را با توجه به رفتار دینامیکی سیستم و نیز توان کنترل از پیش تنظیم شده، تعیین نماید. این الگوریتم تولید مسیر هوشمند حلقه بسته، نه تنها می‌تواند در مقابله با اغتشاشات خارجی وارده به سیستم ضمن نشان دادن عملکرد تطبیقی پیشرفته و به صورت برخط، بهترین مسیر جایگزین را جهت نیل به هدف نهایی تولید کرده و سیستم را در کمترین زمان منطقی ممکن به مسیر اصلی بازگرداند، بلکه از سوی دیگر قادر است با عنایت به در داشتن خواص و توان کنترل‌کننده سیستم، از ایجاد فرامین کنترلی نامعقول از منظر دامنه تلاش و دیگر خواص نامطلوب کنترلی، جلوگیری بعمل آورد. نتایج حاصل از تشریح شبیه‌سازی‌های صورت پذیرفته در محیط نرم‌افزار MATLAB در حضور اغتشاشات خارجی پیش‌تعریف، دقت بالا و عملکرد مؤثر این الگوریتم هوشمند تولید مسیر زاویه‌ای را نمایش می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم هوشمند حلقه‌بسته تولید مسیر زاویه‌ای - مانور وضعیت ماهواره - تولید مسیر هوشمند - کدکننده‌های خودکار - شبکه‌های عصبی مصنوعی

### ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، توسعه الگوریتم‌های تولید مسیر مطلوب دارای خواص مشخص، میان نقاط ابتدایی و انتهایی مورد نظر طراح، دستخوش تغییرات فراوانی گردیده است. امروزه، توسعه الگوریتم‌های تولید مسیر در پژوهش‌های روز که توسعه طیف گسترده‌ای از پروژه‌ها و حوزه‌های عملی را پوشش می‌دهند [۱]، در دامنه وسیعی از تکنیک‌های تحلیلی و بهینه‌سازی الگوریتم‌های هوشمند، گسترده شدند. به عنوان مثال فرآیند تولید مسیر مطلوب برای یک روبات زمینی با فرض تعیین ضرایب چندجمله‌ای با بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، در [۲] طی شده است. در این مرجع، نتایج حاصل از اعمال هریک از تکنیک‌های بهینه‌سازی، شامل جستجوی کورکورانه (Blind search method)، الگوریتم تپه‌نوردی (Hill climbing method) و الگوریتم ژنتیک (Genetic algorithm) با یکدیگر مقایسه و نتایج حاصل، ارائه گردیده است. در [۳] پروسه تولید مسیر ایمن بهینه با بهره‌گیری از برنامه‌ریزی مربعی (Quadratic Programing) با قیود

خطی، برای یک گروه ۲۰ تایی از ربات‌ها، طی گردیده است. در این مرجع، برخلاف بسیاری از دیگر عناوین، مدل دینامیکی کامل هریک از ربات‌ها، جایگزین فرض مدل سینماتیکی برای این سیستم‌ها، گردیده است. اگرچه بسیاری از پژوهش‌های اخیر، حوزه کاری خود را به توسعه تکنیک‌های تولید مسیر برای ربات‌های غیرپرنده معطوف می‌کنند، لیکن ارائه الگوریتم‌های نوین تولید مسیر، با هدف بهره‌گیری در ربات‌های پرنده نظیر کوادروتورها نیز با سرعت بالایی دنبال می‌شود [۴]-[۷]. به طور مثال، مرجع [۸] به ارائه یک مدل توسعه مسیر برای یک کوادکوپتر به همراه یک بار آویخته با کابل از طریق برنامه‌ریزی درجه دوم خطی آمیخته با اعداد صحیح (Mixed Integer Quadratic Programing) می‌پردازد. در این راستا، مرجع مورد بحث به حل چالش‌های عدم برخورد هر سه قسم کوادروتور، کابل و بار به موانع شناخته شده و نیز امکان‌پذیری اجرای مانور با عنایت به حضور بار آویخته، پرداخته است. در مرجع [۹] به طراحی مسیرهای دینامیکی امکان‌پذیر و کنترل‌کننده‌هایی پرداخته می‌شود که بر مبنای قطعه‌بندی مسیر کلی، قادراند مانورهای تهاجمی و سنگین، مانند پرواز از میان شکاف‌های باریک عمودی و نشست روی سطوح وارونه را با دقت و تکرارپذیری بالا ممکن سازد. علاوه بر عناوین مزبور، مراجعی نظیر [۱۰] نیز به توسعه و ارائه راهکارهایی جهت تولید مسیرهای عملیاتی به منظور هدایت مناسب سیستم‌های پرنده بدون سرنشین، پرداخته‌اند. در حوزه تولید هوشمند و مبتنی بر یادگیری مسیر اما مراجعی نظیر [۱۱] به توسعه تکنیک‌های مبتنی بر یادگیری تقویتی (reinforcement learning) و یادگیری تقلیدی (imitation learning) جهت مدیریت بی‌درنگ، کارآمد و قابل اطمینان کوادکوپتر با تصمیم‌گیری آنلاین می‌پردازند. در این حوزه اما به رغم وجود مراجعی نظیر [۱۲] و [۱۳]، کمکان توسعه حوزه تولید مسیر برای ماهواره‌ها، تلاش بیشتری را از سوی محققین طلب می‌کند.

ماهواره‌ها، رسته‌ای از سیستم‌های دینامیکی حساس با قابلیت‌های بی‌شمار محسوب می‌شوند. امروزه از ماهواره‌ها در کاربردهای وسیعی از جمله انتقال سیگنال‌های مخابراتی، تصویربرداری فضایی، مکان‌یابی و نیز بسیاری دیگر از حوزه‌های عملیاتی و پژوهشی، بهره‌برداری بعمل می‌آید. در حوزه تولید مسیر جهت کنترل مناسب این سیستم‌ها و ارائه مسیرهای زاویه‌ای جهت نیل مناسب به نقاط نهایی متغیرهای حالت، از هر شرط اولیة وجود الگوریتم‌های هوشمند نه تنها از یک سو می‌تواند کیفیت رفتاری متغیرهای وضعیت سیستم را در حضور اغتشاشات خارجی بهبود بخشد، بلکه از سوی دیگر می‌تواند تلاش‌های کنترلی مورد نیاز جهت نیل به اهداف از پیش تعیین شده را مدیریت کند. در بخش آتی از پژوهش پیش رو، یک مدل دینامیکی غیرخطی از سیستم ماهواره مورد بحث استخراج و مدل

معادلات نمایشگر سینماتیک دورانی سیستم را بر پایه زوایای اوپلر و نرخ‌های چرخش در دستگاه بدنی، نمایش می‌دهد.

$$\omega = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = A_\varphi A_\theta A_\psi \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + A_\varphi A_\theta \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + A_\varphi \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

در این معادلات،  $\omega = [p \ q \ r]^T$  نمایشگر نرخ‌های چرخش حول محورهای بدنی ماهواره نسبت به دستگاه مرجع است. با تکمیل عملیات ریاضی در این معادلات، شمای توسعه‌یافته این روابط به صورت دسته روابط (۵) ارائه می‌گردد.

$$\omega_{BR} = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} - \dot{\psi} S_\theta \\ \dot{\theta} C_\varphi + \dot{\psi} C_\theta S_\varphi \\ \dot{\psi} C_\theta C_\varphi - \dot{\theta} S_\varphi \end{bmatrix} \quad (5)$$

در نهایت و با حل معادلات فوق برای نرخ‌های تغییر زوایای اوپلر  $\dot{\Theta} = [\dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi}]^T$  قالب کامل مدل سینماتیک دورانی سیستم، به شکل رابطه (۶) استخراج می‌گردد.

$$\dot{\Theta} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p + (S_\varphi T_\theta)q + (C_\varphi T_\theta)r \\ C_\varphi q - S_\varphi r \\ (S_\varphi / C_\theta)q + (C_\varphi / C_\theta)r \end{bmatrix} \quad (6)$$

### ۲-۱- دینامیک دورانی

بر پایه بهره‌گیری از قانون دوم نیوتن و با در نظرگیری فرض ساده‌ساز ثبات اینرسی دورانی سیستم در طول شبیه‌سازی، معادله توصیف‌کننده گشتاوه‌های مؤثر بر مرکز جرم ماهواره، با استفاده رابطه (۷) توصیف شده است.

$$T = \dot{h}_I = \dot{h} + \dot{\omega} \times h \quad (7)$$

در رابطه فوق،  $T = [L \ M \ N]^T$  نمایش‌دهنده مجموع گشتاورهای خارجی وارده به ماهواره می‌باشد. همچنین دو عبارت  $\vec{h} = [h_x \ h_y \ h_z]^T$  معرف بردار اندازه حرکت زاویه‌ای سیستم به ترتیب در دستگاه‌های اینرسی و بدنی می‌باشند. از سوی دیگر، معادله بردار اندازه حرکت زاویه‌ای ماهواره در دستگاه بدنی، به شکل رابطه (۸) معرفی می‌گردد.

$$\vec{h} = \vec{I}\dot{\omega} = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

در این معادله  $\vec{I}$  معرف تانسور اینرسی سیستم ماهواره می‌باشد. همچنین با فرض وجود تقارن محوری در ساختار کلی سیستم (تقارن سیستم نسبت به محورهای  $x$ ،  $y$  و  $z$  بدنی)، معادله (۸) به شکل رابطه (۹) ساده‌سازی می‌شود.

$$\vec{h} = \vec{I}\dot{\omega} = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

با عنایت به مجموعه نکات مطرح شده در این بخش، در نهایت مدل توصیف‌کننده دینامیک دورانی غیرخطی سیستم ماهواره مورد بررسی، با عنایت به روابط (۷) و (۹) و به شکل دسته معادلات نمایش داده شده در رابطه (۱۰) استخراج می‌گردد.

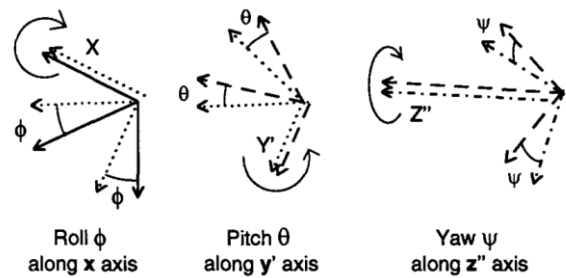
مذکور به جهت ادامه فرآیند شبیه‌سازی، خطی‌سازی می‌گردد. در سومین بخش مقاله، روابط و مقادیر مرتبط با کنترلرهای تعبیه شده جهت مدیریت عملکرد سیستم در سناریوی عملکردی معرفی خواهد شد. در بخش چهارم، عمده نوآوری‌های صورت پذیرفته در جهت ارائه یک الگوریتم هوشمند حلقه-بسته به منظور تولید یک مسیر زاویه‌ای میان نقاط اولیه و نهایی مفروض برای سیستم، تشریح و روابط مرتبط با این الگوریتم، استخراج خواهد شد. در نهایت، دو بخش پنجم و ششم این پژوهش، به ترتیب، به ارائه نتایج حاصل از اعمال الگوریتم پیشنهادی به ساختار کلی و بحث و نتیجه‌گیری در خصوص نتایج حاصل، اختصاص خواهد یافت.

### ۲- مدل‌سازی ریاضی سیستم

در بخش حاضر از گزارش پیش رو، معادلات توصیف‌کننده مدل ریاضیاتی سیستم، با استفاده از مکانیک نیوتنی و بر اساس استفاده از زوایای اوپلر، استخراج می‌گردد. این مدل شامل معادلات سینماتیک و دینامیک دورانی سیستم به انضمام معادلات توصیف‌کننده عملگرهای مفروض، می‌باشد.

#### ۱-۱- سینماتیک دورانی

با هدف مدل‌سازی رفتار دورانی سیستم ماهواره به جهت طراحی کنترلر و نیز تکمیل پیش‌نیازهای لازم جهت اجرای شبیه‌سازی‌های آتی، در این بخش به استخراج مدل سینماتیک دورانی سیستم مزبور، پرداخته می‌شود. از همین رو و به منظور استخراج مدل سینماتیک دورانی سیستم ماهواره، در گام نخست به معرفی ماتریس‌های چرخش میان دو دستگاه بدنی و قائم همراه سیستم بر پایه زوایای اوپلر (چنان که در شکل (۱) نمایش داده شده است) پرداخته می‌شود. در نتیجه و با فرض ترتیب چرخش  $\psi \rightarrow \theta \rightarrow \phi$  روابط (۱) تا (۳) شمای کلی این ماتریس‌های چرخش را نمایش می‌دهد.



شکل ۱ شمای کلی زوایای اوپلر [۱۴].

$$A_\varphi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_\varphi & S_\varphi \\ 0 & -S_\varphi & C_\varphi \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$A_\theta = \begin{bmatrix} C_\theta & 0 & -S_\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ S_\theta & 0 & C_\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A_\psi = \begin{bmatrix} C_\psi & S_\psi & 0 \\ -S_\psi & C_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

در معادلات فوق،  $\Theta = [\varphi \ \theta \ \psi]^T$  نمایشگر زوایای اوپلر می‌باشد. با عنایت به این ماتریس‌ها و فرض ترتیب چرخش عنوان شده، رابطه (۴)

در این معادلات نیز،  $J_a$  معرف ماتریس ژاکوبین سیستم نسبت به متغیر  $a$  بوده و  $x_0=0^{6 \times 1}$  و  $u_0=0^{3 \times 1}$  نمایشگر نقطه کار خطی سازی می باشند. همچنین عبارت  $f$  که نمایشگر کلیه معادلات غیر خطی سیستم می باشد، با عنایت به رابطه (۱۶) تعیین می گردد.

$$f = [\dot{\theta} \quad \dot{\omega}]^T \quad (16)$$

شایان ذکر است با توجه به اعمال فرض قابل اندازه گیری بودن کلیه متغیرهای وضعیت، ماتریس خروجی از نمایش فضای حالت سیستم به صورت  $C=I^{6 \times 6}$  تعیین گردیده است.

### ۳- کنترل سیستم

با هدف مدیریت سیستم در نیل به اهداف از پیش تعیین شده مبنی بر تعقیب مسیر تطبیقی تولیدی توسط الگوریتم تولید مسیر هوشمند و نیز با توجه به اینرسی ذاتی سیستم و فرض عدم وجود اغتشاشات بزرگ مداری، در این پژوهش، از سه کنترلر تناسبی-مشتقی (PD) جهت کنترل سیستم، استفاده شده است. روابط (۱۷) تا (۱۹)، معادلات مفسر این قوانین کنترلی را نمایش می دهند.

$$\gamma_{c,\varphi}(k) = k_{p,\varphi}(\varphi_d(k) - \varphi(k)) + k_{d,\varphi}(\dot{\varphi}_d(k) - \dot{\varphi}(k)) \quad (17)$$

$$\gamma_{c,\theta}(k) = k_{p,\theta}(\theta_d(k) - \theta(k)) + k_{d,\theta}(\dot{\theta}_d(k) - \dot{\theta}(k)) \quad (18)$$

$$\gamma_{c,\psi}(k) = k_{p,\psi}(\psi_d(k) - \psi(k)) + k_{d,\psi}(\dot{\psi}_d(k) - \dot{\psi}(k)) \quad (19)$$

در معادلات فوق، عبارت  $\Theta_d = [\varphi_d \quad \theta_d \quad \psi_d]^T$  نمایشگر مسیر زاویه‌ای مطلوب تولیدی توسط الگوریتم هوشمند تولید مسیر بوده و دو عبارت  $k_{p,\theta}$  و نیز  $k_{d,\theta}$  به ترتیب نشان دهنده ضرایب بخش‌های تناسبی و مشتقی از کنترلر PD مزبور می باشند. جدول ۱، مقادیر عددی مشخصات مکانیکی و نیز ضرایب کنترلی تنظیم شده برای سیستم را نمایش می دهد.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی و ضرایب کنترلی سیستم ماهواره

پارامتر	مقدار عددی	یکا
$I_{xx}$	۱۰	$\text{Kg.m}^2$
$I_{yy}$	۱۰	$\text{Kg.m}^2$
$I_{zz}$	۱۰	$\text{Kg.m}^2$
$k_p = [k_{p,\varphi} \quad k_{p,\theta} \quad k_{p,\psi}]$	[ ۴۱۷ ۴۱۷ ۴۱۷ ]	~
$k_d = [k_{d,\varphi} \quad k_{d,\theta} \quad k_{d,\psi}]$	[ ۳۰۷ ۳۰۷ ۳۰۷ ]	~

### ۴- توسعه الگوریتم هوشمند تولید مسیر

چنان که پیش تر ذکر شد، هدف اصلی این پژوهش، ارائه، شبیه سازی رفتار و بررسی عملکرد یک الگوریتم برخط هوشمند تولید مسیر زاویه‌ای در پروسه کنترل و شبیه سازی عملکرد یک ماهواره است که به صورت حلقه-بسته در دیگرام بلوکی سیستم قرار می گیرد. این الگوریتم پیشنهادی تولید مسیر زاویه‌ای که از تلفیق یک کدکننده خودکار با یک شبکه عصبی دولایه تشکیل گردیده است، قادر است با در دست داشتن مقادیر لحظه‌ای خروجی و دیگر متغیرهای وضعیت سیستم، به انضمام نقاط نهایی مورد نظر طراح سناریوی کنترلی، بهترین مسیر را جهت نیل سیستم به مقادیر نهایی مزبور، به صورت برخط و با توجه به توان کنترلی سیستم، تولید نماید. شکل (۲) شمای کیفی این دیگرام بلوکی را در حضور هر سه جزء سیستم، کنترلر و الگوریتم هوشمند تولید مسیر، نمایش می دهد.

$$\dot{\omega} = \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (qr(I_{yy}-I_{zz})/I_{xx}) + (L/I_{xx}) \\ (pr(I_{zz}-I_{xx})/I_{yy}) + (M/I_{yy}) \\ (qp(I_{xx}-I_{yy})/I_{zz}) + (N/I_{zz}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

در این پژوهش، با هدف انتقال فرامین کنترلی صادره از سوی کنترل کننده هر کانال به دینامیک سیستم و با صرف نظر از دینامیک عملگرها (در نقش تراستر سیستم ماهواره)، از معادله (۱۱) بعنوان معادلات گشتاورهای وارده به سیستم، استفاده شده است.

$$T = [L \quad M \quad N]^T = d\gamma_c \quad (11)$$

در این معادله،  $\gamma_c = [\gamma_{c,\varphi} \quad \gamma_{c,\theta} \quad \gamma_{c,\psi}]^T$  معرف گشتاور کنترلی وارده به سیستم و  $d$  نمایشگر بازوی مؤثر این گشتاور می باشد.

### ۳-۱- خطی سازی سیستم

در این بخش حاضر، معادلات کلی غیر خطی سیستم با هدف تکمیل مباحث مرتبط با طراحی کنترلر و نیز شبیه سازی رفتار سیستم حلقه-بسته در حضور الگوریتم هوشمند تولید مسیر، خطی سازی می گردد. روابط (۱۲) و (۱۳) معادلات فضای حالت خطی سیستم را نمایش می دهند.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (12)$$

$$y = Cx \quad (13)$$

در این دسته از معادلات، عبارات  $x^{6 \times 1} = [\varphi \quad \theta \quad \psi \quad p \quad q \quad r]^T$  و  $u^{3 \times 1} = [\gamma_{c,\varphi} \quad \gamma_{c,\theta} \quad \gamma_{c,\psi}]^T$  نمایشگر متغیرهای وضعیت سیستم و بردار تلاش‌های کنترلی بوده و سه ماتریس ثابت با زمان  $A$ ،  $B$  و  $C$  به ترتیب نمایانگر ماتریس‌های سیستم، ورودی و خروجی می باشند. در این معادلات، درایه‌های دو ماتریس  $A$ ،  $B$  با عنایت به روابط (۱۴) و (۱۵) استخراج می گردد.

$$B = J_u = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{u=u_0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \frac{\partial f_2}{\partial u_1} & \frac{\partial f_3}{\partial u_1} & \frac{\partial f_4}{\partial u_1} & \frac{\partial f_5}{\partial u_1} & \frac{\partial f_6}{\partial u_1} \\ \frac{\partial f_1}{\partial u_2} & \frac{\partial f_2}{\partial u_2} & \frac{\partial f_3}{\partial u_2} & \frac{\partial f_4}{\partial u_2} & \frac{\partial f_5}{\partial u_2} & \frac{\partial f_6}{\partial u_2} \\ \frac{\partial f_1}{\partial u_3} & \frac{\partial f_2}{\partial u_3} & \frac{\partial f_3}{\partial u_3} & \frac{\partial f_4}{\partial u_3} & \frac{\partial f_5}{\partial u_3} & \frac{\partial f_6}{\partial u_3} \end{bmatrix}^T \quad (14)$$

$$A = J_x = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \frac{\partial f_1}{\partial x_4} & \frac{\partial f_1}{\partial x_5} & \frac{\partial f_1}{\partial x_6} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \frac{\partial f_2}{\partial x_4} & \frac{\partial f_2}{\partial x_5} & \frac{\partial f_2}{\partial x_6} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} & \frac{\partial f_3}{\partial x_4} & \frac{\partial f_3}{\partial x_5} & \frac{\partial f_3}{\partial x_6} \\ \frac{\partial f_4}{\partial x_1} & \frac{\partial f_4}{\partial x_2} & \frac{\partial f_4}{\partial x_3} & \frac{\partial f_4}{\partial x_4} & \frac{\partial f_4}{\partial x_5} & \frac{\partial f_4}{\partial x_6} \\ \frac{\partial f_5}{\partial x_1} & \frac{\partial f_5}{\partial x_2} & \frac{\partial f_5}{\partial x_3} & \frac{\partial f_5}{\partial x_4} & \frac{\partial f_5}{\partial x_5} & \frac{\partial f_5}{\partial x_6} \\ \frac{\partial f_6}{\partial x_1} & \frac{\partial f_6}{\partial x_2} & \frac{\partial f_6}{\partial x_3} & \frac{\partial f_6}{\partial x_4} & \frac{\partial f_6}{\partial x_5} & \frac{\partial f_6}{\partial x_6} \end{bmatrix} \quad (15)$$

در این معادلات،  $e_{mlp}(k)$  و  $E_{mlp}(k)$ ، به ترتیب نمایانگر مقدار خطای بخش شبکه عصبی دولایه و تابع هزینه این شبکه در  $k$ امین گام حل می‌باشند. همچنین، روابط (۲۷) و (۲۸) مقادیر خطا و نیز تابع هزینه بخش کدکننده خودکار ساختار پیشنهادی را نمایش می‌دهند.

$$e_{encoder}(k) = \widehat{input}(k) - input(k) \quad (27)$$

$$E_{encoder}(k) = \frac{1}{2} e_{encoder}^2(k) \quad (28)$$

به بیان مشابه، در این معادلات نیز  $e_{encoder}(k)$ ،  $\widehat{input}(k)$  و  $E_{encoder}(k)$ ، به ترتیب نشانگر مقدار خطای بخش کدکننده خودکار، خروجی کدکننده و تابع هزینه کدکننده خودکار، همگی در  $k$ امین گام حل می‌باشند. همچنین در این معادلات، عبارت  $input(k)$  معرف ورودی کدکننده خودکار است که به صورت رابطه (۲۹) انتخاب گردیده است.

$$input = [\tilde{\Theta}_d(k) - \Theta(k), \tilde{\Theta}_d(k) - \Theta_d, \dots, \dots, \Theta_0, \Theta_d, \tilde{\Theta}_d(k), \tilde{\Theta}_d(k), \Theta(k), \dot{\Theta}(k)] \quad (29)$$

با توجه به تعاریف ارائه شده، روابط (۳۰) و (۳۱) معادلات مرتبط با تعریف بخش‌های کدکننده و کدگشا از الگوریتم کدکننده خودکار ساختار را نمایش می‌دهند.

$$net_e(k) = w_e(k) \times input^T(k) \quad (30)$$

w.r.t.  $h_1(k) = \text{logsig}(g_e(k).net_e(k))$

$$net_d(k) = w_d(k).h_1(k) \quad (31)$$

w.r.t.  $\widehat{input}(k) = \text{logsig}(g_d(k).net_d(k))$

در این روابط،  $w_d(k)$ ،  $w_e(k)$ ،  $net_d(k)$ ،  $net_e(k)$  و  $h_1(k)$  به ترتیب معرف عبارات شبکه و اوزان یادگیری در در لایه‌های کدکننده و کدگشا و نیز خروجی لایه کدکننده، می‌باشند. همچنین دو عبارت  $g_e(k)$  و  $g_d(k)$  شیب توابع فعال‌ساز در بخش‌های کدکننده و کدگشا هستند که با هدف افزایش انعطاف‌پذیری ساختار، به صورت آموزش‌پذیر در نظر گرفته شده‌اند. با عنایت به روابط و نکات فوق، روابط (۳۲) تا (۳۵) معادلات مرتبط با آموزش اوزان و نیز شیب توابع فعال‌ساز را نشان می‌دهند.

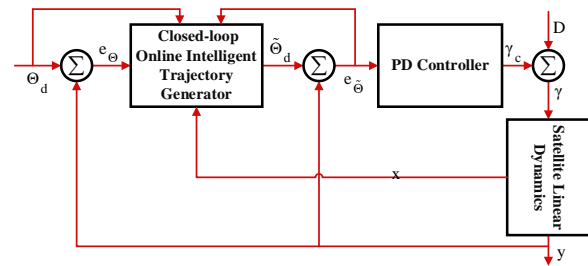
$$\Delta w_d = -\eta_{ae} \frac{\partial E(k)}{\partial e(k)} \frac{\partial \widehat{input}(k)}{\partial net_d(k)} \frac{\partial net_d(k)}{\partial w_d(k)} \quad (32)$$

$$\Delta g_d = -\eta_{ac,gd} \frac{\partial E(k)}{\partial e(k)} \frac{\partial \widehat{input}(k)}{\partial net_d(k)} \frac{\partial net_d(k)}{\partial g_d(k)} \quad (33)$$

$$\Delta w_e = -\eta_{ae} \frac{\partial E(k)}{\partial e(k)} \frac{\partial \widehat{input}(k)}{\partial net_e(k)} \frac{\partial net_e(k)}{\partial h_1(k)} \frac{\partial h_1(k)}{\partial w_e(k)} \quad (34)$$

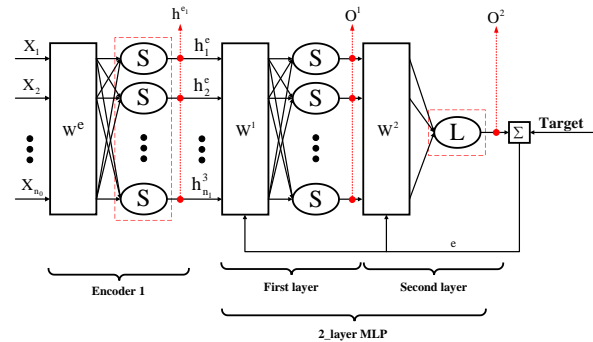
$$\Delta g_e = -\eta_{ac,ge} \frac{\partial E(k)}{\partial e(k)} \frac{\partial \widehat{input}(k)}{\partial net_e(k)} \frac{\partial net_e(k)}{\partial h_1(k)} \frac{\partial h_1(k)}{\partial g_e(k)} \quad (35)$$

که در آن  $\eta_{AE}$  معرف نرخ آموزش در لایه‌های کدکننده و کدگشا می‌باشد. در ادامه، روابط (۳۶) و (۳۷) معادلات مرتبط با تعریف هریک از دولایه شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده در ساختار پیشنهادی را نمایش می‌دهند.



شکل ۲- دیاگرام بلوکی ساختار تجمیعی حلقه-بسته

لازم به ذکر است، در این ساختار پیشنهادی، بخش کدکننده خودکار، ویژگی‌های کاربردی و جدیدی را با بهره‌گیری از متغیرهای سیستم و نقاط نهایی به نحوی تولید می‌کند که بخش بعد، یعنی شبکه عصبی مصنوعی دو لایه بتواند متغیرهای یک مسیر پیش‌فرض تعبیه شده در این ساختار را، بر پایه خواص مطرح شده، به بهترین شکل ممکن، تعیین نماید. شکل (۳) شمای کیفی ساختار شبکه عصبی هوشمند مذکور را نمایش می‌دهد.



شکل ۳- شمای کیفی ساختار شبکه عصبی هوشمند تولید مسیر

با در نظرگیری نکات مطرح شده در این بخش، رابطه (۲۰) فرم پارامتریک معادله مسیر پیش تعریف انتخابی را نمایش می‌دهد.

$$\Theta_d(k) = a(k) (\tanh(b(k)t + c(k))) + d(k) \quad (20)$$

که در آن،  $t = k.dt$  معرف زمان شبیه‌سازی و چهار عبارت  $a$ ،  $b$ ،  $c$  و  $d$  معرف مقادیر لحظه‌ای پارامترهای مسیر، می‌باشد. در ادامه، روابط اصلی مفسر تعریف و نحوه کارکرد این الگوریتم پیشنهادی، تشریح می‌گردد. بدین منظور، با معرفی متغیرهای مورد استفاده مطابق روابط (۲۳) تا (۲۴):

$$y_p = \Theta(k) \quad (21)$$

$$y_f = \Theta_f \quad (22)$$

$$y_d(k) = \Theta_d(k) \quad (23)$$

$$\dot{y}_d(k) = \dot{\Theta}_d(k) \quad (24)$$

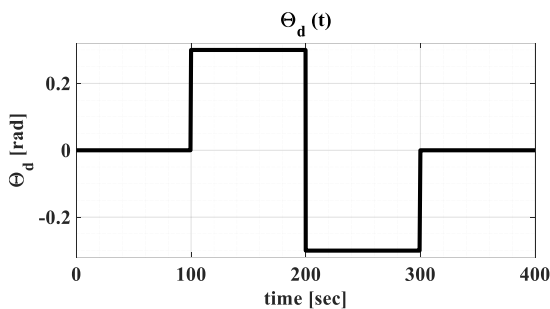
که در آن‌ها عبارات  $y_p$ ،  $\Theta_d(k)$ ،  $\dot{\Theta}_d(k)$ ،  $y_d(k)$ ،  $\Theta_d(k)$ ،  $y_f$ ،  $\Theta_d, f$ ،  $y_p$  به ترتیب معرف زوایای اوپلر سیستم، مقادیر خروجی نهایی سیستم، مقدار نهایی مطلوب زوایا، خروجی سیستم در گام  $k$ ام، مقدار مطلوب در گام  $k$ ام و مشتقات خروجی و مسیر مطلوب در این گام می‌باشد، مقادیر خطا و تابع هزینه بخش شبکه عصبی دولایه از ساختار پیشنهادی، مطابق روابط (۲۵) و (۲۶) معین می‌گردد.

$$e_{mlp}(k) = y_f - y_p(k) \quad (25)$$

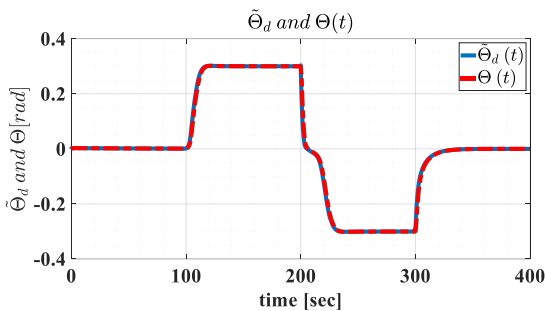
$$E_{mlp}(k) = \frac{1}{2} e_{mlp}^2(k) \quad (26)$$

۵- شبیه‌سازی رفتار سیستم حلقه-بسته

در بخش حاضر از این مقاله، نمودارهای حاصل از اعمال ساختار هوشمند حلقه-بسته تولید مسیر به سیستم در طول ۴۰۰ ثانیه سناریوی عملکردی و در دو حالت حضور یا عدم حضور یک اغتشاش خارجی، نمایش داده می‌شود. شکل (۳) شمای کلی نقاط نهایی مطلوب را برای هر یک از زوایای اوپلر و شکل (۴) نمودار مسیر زاویه‌ای تولیدی توسط الگوریتم پیشنهادی را به همراه مسیر حقیقی طی شده توسط سیستم (به صورت مشترک برای هر سه کانال)، نمایش می‌دهد

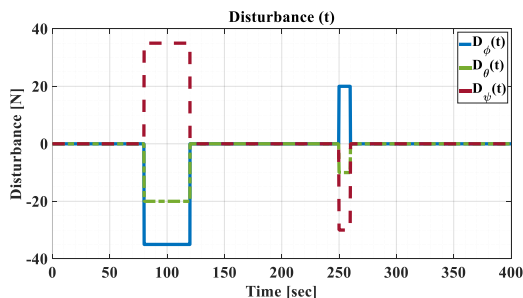


شکل ۳- مقدار مشترک نهایی زوایای اوپلر مطلوب در طول شبیه‌سازی



شکل ۴- نمودار تغییرات زمانی مسیر زاویه‌ای پیشنهادی و زوایای اوپلر سیستم

شکل (۵)، نمودار تغییرات زمانی یک اغتشاش خارجی بزرگ را که با هدف سنجش عملکرد حلقه-بسته الگوریتم تولید مسیر در طول شبیه‌سازی به سیستم وارد گردیده است، نمایش می‌دهد.



شکل ۵- نمودار تغییرات زمانی اغتشاشات خارجی وارده به سیستم

در ادامه و با عنایت به دو شکل (۳) و (۵)، شکل (۶) نمودار زمانی تغییرات مسیر زاویه‌ای پیشنهادی توسط الگوریتم تولید مسیر را در حضور اغتشاشات وارده به سیستم جهت نیل به مقادیر نهایی مطلوب، نمایش می‌دهد.

$$\begin{aligned} \text{net}_1(k) &= w_1(k) \times h_1(k) \\ \text{w.r.t. } o_1(k) &= \text{tansig}(g_1(k) \cdot \text{net}_1(k)) \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \text{net}_2(k) &= w_2(k) \times o_1(k) \\ o_2(k) &= g_2(k) \cdot \text{net}_2(k) \end{aligned} \quad (37)$$

در این روابط نیز،  $\text{net}_1(k)$ ،  $\text{net}_2(k)$ ،  $w_1(k)$ ،  $w_2(k)$  و  $o_1(k)$  و  $o_2(k)$  به ترتیب معرف عبارات شبکه و اوزان یادگیری و نیز خروجی لایه‌ها در لایه‌های اول و دوم می‌باشند. مشابه بخش قبل، دو عبارت  $g_1(k)$  و  $g_2(k)$  معرف شیب توابع فعال‌ساز در هر یک از لایه‌ها هستند که با هدف بهبود عملکرد ساختار، به صورت آموزش‌پذیر در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به تعاریف ارائه شده در خصوص لایه‌های این شبکه، روابط (۳۸) تا (۴۱) معادلات مرتبط با آموزش اوزان و نیز شیب توابع فعال‌ساز را نشان می‌دهند.

$$\Delta w_2 = -\eta_{\text{mlp}} \frac{\partial E(k)}{\partial e(k)} \frac{\partial e(k)}{\partial y(k)} \frac{\partial y(k)}{\partial \Theta(k)} \frac{\partial \Theta(k)}{\partial \tilde{\Theta}_d(k)} \frac{\partial \tilde{\Theta}_d(k)}{\partial o_2(k)} \frac{\partial o_2(k)}{\partial w_2(k)} \quad (38)$$

$$\Delta g_2 = -\eta_{\text{mlp},g_2} \frac{\partial E(k)}{\partial e(k)} \frac{\partial e(k)}{\partial y(k)} \frac{\partial y(k)}{\partial \Theta(k)} \frac{\partial \Theta(k)}{\partial \tilde{\Theta}_d(k)} \frac{\partial \tilde{\Theta}_d(k)}{\partial o_2(k)} \frac{\partial o_2(k)}{\partial g_2(k)} \quad (39)$$

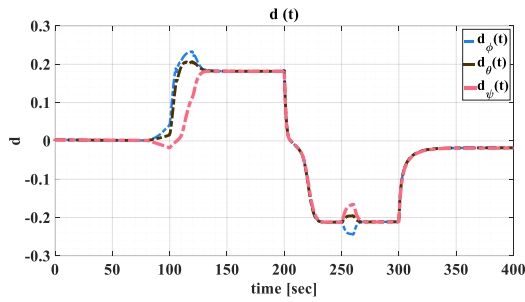
$$\Delta w_1 = -\eta_{\text{mlp}} \frac{\partial E(k)}{\partial e(k)} \frac{\partial e(k)}{\partial y(k)} \frac{\partial y(k)}{\partial \Theta(k)} \frac{\partial \Theta(k)}{\partial \tilde{\Theta}_d(k)} \frac{\partial \tilde{\Theta}_d(k)}{\partial o_2(k)} \frac{\partial o_2(k)}{\partial \text{net}_2(k)} \frac{\partial \text{net}_2(k)}{\partial o_1(k)} \frac{\partial o_1(k)}{\partial w_1(k)} \quad (40)$$

$$\Delta g_1 = -\eta_{\text{mlp},g_1} \frac{\partial E(k)}{\partial e(k)} \frac{\partial e(k)}{\partial y(k)} \frac{\partial y(k)}{\partial \Theta(k)} \frac{\partial \Theta(k)}{\partial \tilde{\Theta}_d(k)} \frac{\partial \tilde{\Theta}_d(k)}{\partial o_2(k)} \frac{\partial o_2(k)}{\partial \text{net}_2(k)} \frac{\partial \text{net}_2(k)}{\partial o_1(k)} \frac{\partial o_1(k)}{\partial g_1(k)} \quad (41)$$

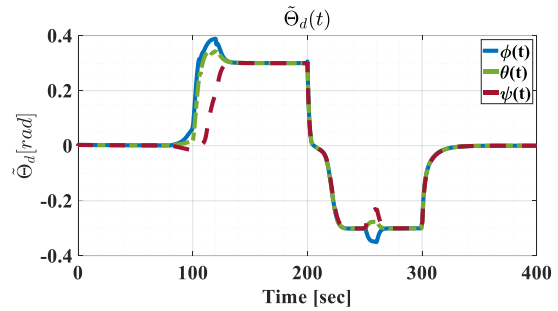
در این روابط  $\eta_{\text{mlp}}$  نمایشگر نرخ آموزش شبکه می‌باشد. جدول ۲، مقادیر عددی تنظیمات اولیه بخش‌های کدکننده و نیز شبکه عصبی مصنوعی دولایه از ساختار هوشمند پیشنهادی را نمایش می‌دهد.

جدول ۲- تنظیمات اولیه ساختار هوشمند تولید مسیر

بخش کدکننده خودکار	
پارامتر	مقدار عددی
num of neurons	۶
Max epochs	۲۰۰
$\eta_{ae}$	۰.۱
$\eta_{ae,s}$	۰.۰۰۵
$\eta_{ae,q}$	۰.۰۰۵
بخش شبکه عصبی دولایه	
پارامتر	مقدار عددی
num of neurons	[۱۰ ۴]
Max epochs	۱۰۰
$\eta_{\text{mlp}}$	$3.0441 \times 10^{-8}$
$\eta_{\text{mlp},g}$	$8.0109 \times 10^{-10}$
$\eta_{\text{mlp},f}$	$8.0109 \times 10^{-10}$



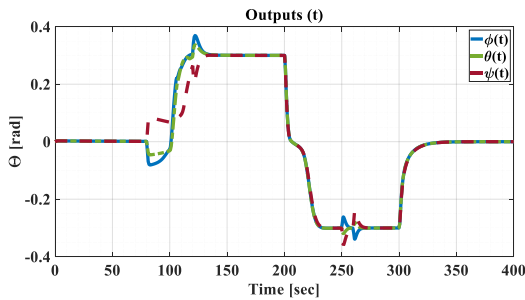
شکل ۱۰- نمودار تغییرات زمانی پارامتر  $d(t)$



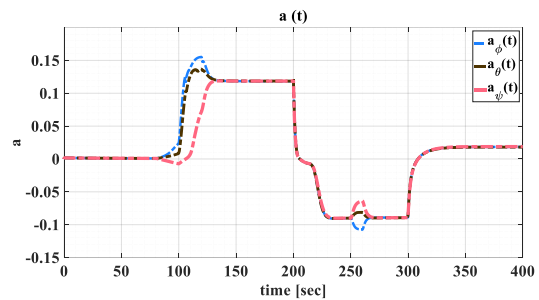
شکل ۶- نمودار تغییرات زمانی مسیر زاویه‌ای مطلوب  $(\Theta_d(t))$

در ادامه، شکل (۱۱) نمودار تغییرات زمانی زوایای اویلر سیستم و نیز شکل (۱۲) نمودار تغییرات زمانی نرخ‌های چرخش سیستم را در فرآیند شبیه‌سازی تعقیب مسیر مطلوب پیشنهادی در حضور اغتشاش نمایش داده شده در شکل (۵)، نمایش می‌دهد.

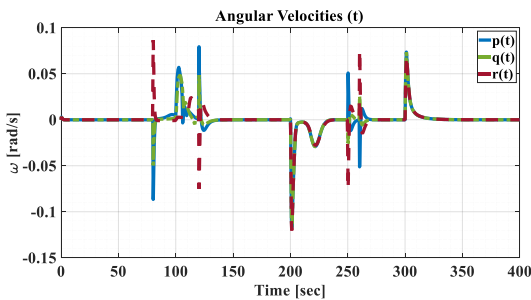
با عنایت به رابطه (۲۰) و حضور تعداد چهار پارامتر در معادله مسیر مطلوب، شکل‌های (۷) تا (۱۰) نمودار تغییرات زمانی هر یک از این پارامترها (منجر به تولید مسیر مطلوب در شکل (۶) را در حضور اغتشاش وارده به سیستم، نمایش می‌دهد.



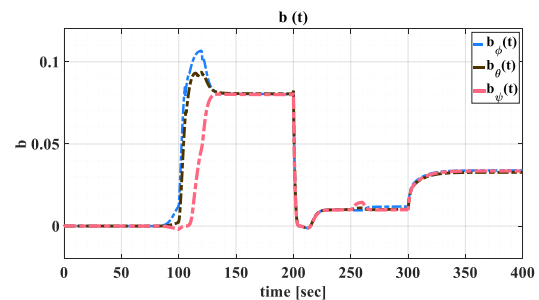
شکل ۱۱- نمودار تغییرات زمانی زوایای اویلر سیستم  $(\Theta(k))$



شکل ۷- نمودار تغییرات زمانی پارامتر  $a(t)$

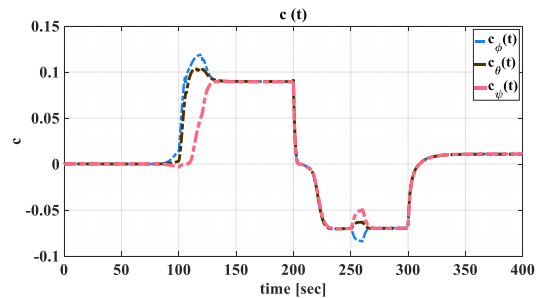


شکل ۱۲- نمودار تغییرات زمانی نرخ‌های چرخش سیستم  $(\omega(k))$

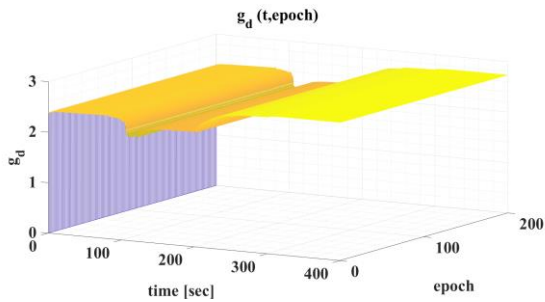


شکل ۸- نمودار تغییرات زمانی پارامتر  $b(t)$

چنان که پیش‌تر ذکر شد، یکی از خواص حائز اهمیت ساختار تولید مسیر پیشنهادی مورد بحث در این پژوهش، دارا بودن توان تولید مسیر سازگار با توان کنترلی سیستم حلقه-بسته توسط این الگوریتم به نحوی است که مسیر پیشنهادی اعمالی، سبب تولید ورودی‌های کنترلی نامعقول و بزرگ از سوی کنترل‌کننده سیستم (که معادلات آن پیش‌تر مورد بحث واقع شد) نگردد. با عنایت به این مهم، شکل (۱۳) نمودار تغییرات زمانی هر یک از نیروهای کنترلی وارده به کانال‌های سه‌گانه سیستم (کانال‌های غلت، فراز و سمت) را نمایش می‌دهد.

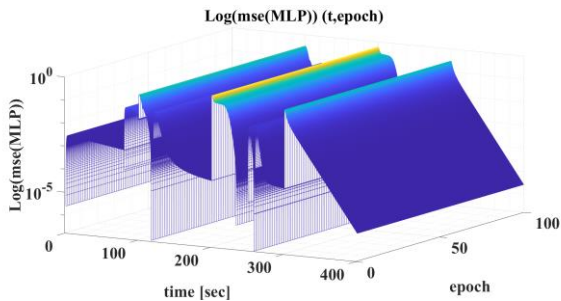


شکل ۹- نمودار تغییرات زمانی پارامتر  $c(t)$



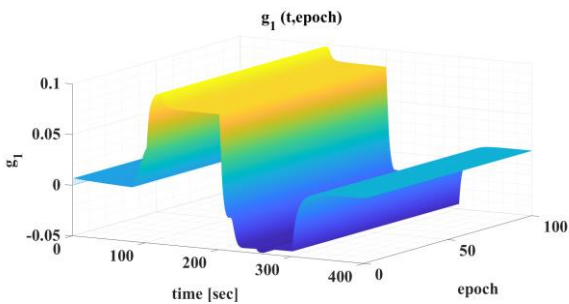
شکل ۱۶- نمودار تغییرات میانگین شیب توابع فعال ساز در لایه کدگشا کانال  $\varphi$

به صورت مشابه، شکل (۱۷) نمودار تغییرات نرم خطای بخش شبکه عصبی دولایه ساختار را در فضای لگاریتمی نمایش می دهد.

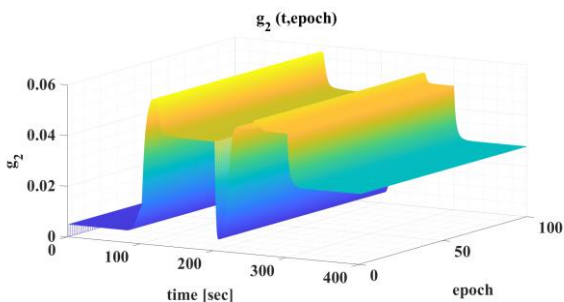


شکل ۱۷- نمودار تغییرات نرم خطای شبکه عصبی دولایه در فضای لگاریتمی کانال  $\varphi$

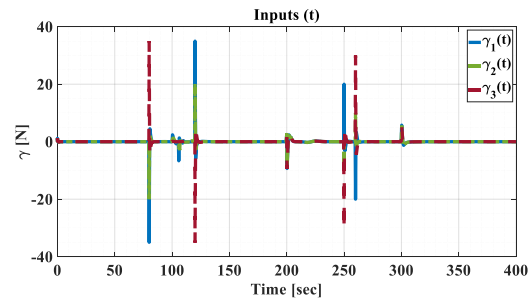
در پایان نیز دو شکل (۱۸) و (۱۹) نمودارهای تغییرات میانگین شیب توابع فعال ساز هر یک از دو لایه شبکه را نشان می دهد.



شکل ۱۸- نمودار تغییرات میانگین شیب توابع فعال ساز در لایه نخست شبکه عصبی کانال  $\varphi$

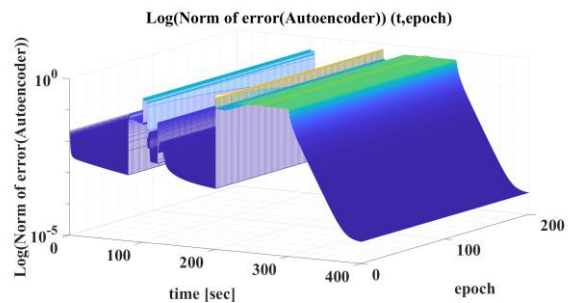


شکل ۱۹- نمودار تغییرات میانگین شیب توابع فعال ساز در لایه دوم شبکه عصبی کانال  $\varphi$



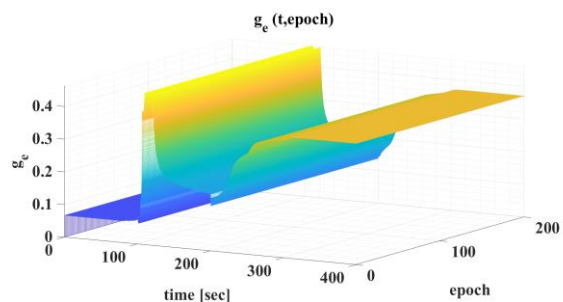
شکل ۱۳- نمودار تغییرات ورودی های کنترلی وارده به سیستم  $\tau(k)$

با توجه به توضیحات ارائه شده و از بررسی شکل های (۱۱) و (۱۳)، مشخص است الگوریتم پیشنهادی تولید مسیر، توانسته است سیستم مورد بررسی را حتی در شرایط وجود اغتشاشات نسبتاً بزرگ، به صورت حلقه-بسته و با رعایت کشتش کنترلی سیستم، به سمت نقاط نهایی موردنظر (زوایای پایانی)، سوق دهد. در ادامه، نمودارهای مرتبط با یادگیری در ساختار پیشنهادی، به صورتی توابعی از زمان و تکرار، نمایش داده می شود. شایان ذکر است با هدف جلوگیری از افزایش غیر ضروری حجم مقاله، در ادامه تنها نمودارهای مرتبط با یادگیری در کانال غلت سیستم  $(\varphi)$  نمایش شده اند. در این راستا، شکل (۱۴) نمودار تغییرات نرم خطا را در بخش کدکننده از ساختار، در فضای لگاریتمی، نمایش می دهد.



شکل ۱۴- نمودار تغییرات نرم خطای کدکننده خودکار در فضای لگاریتمی کانال  $\varphi$

همچنین دو شکل (۱۵) و (۱۶) نمودار تغییرات میانگین شیب توابع فعال ساز را به ترتیب برای لایه های کدکننده و کدگشا از بخش کدکننده خودکار، نشان می دهد.



شکل ۱۵- نمودار تغییرات میانگین شیب توابع فعال ساز در لایه کدکننده کانال  $\varphi$

- Bhattacharya, S., Taylor, C. J., & Kumar, V. (2017). Planning dynamically feasible trajectories for quadrotors using safe flight corridors in 3-d complex environments. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2(3), 1688-1695.
- [10] Mellinger, D., & Kumar, V. (2011, May). Minimum snap trajectory generation and control for quadrotors. In 2011 IEEE international conference on robotics and automation (pp. 2520-2525). IEEE.
- [11] Hua, H., & Fang, Y. (2022). A Novel Learning-Based Trajectory Generation Strategy for a Quadrotor. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*.
- [12] Guo, C., Kidono, K., & Ogawa, M. (2016, June). Learning-based trajectory generation for intelligent vehicles in urban environment. In 2016 IEEE intelligent vehicles symposium (iv) (pp. 1236-1241). IEEE.
- [13] Ahmad, R., Tichadou, S., & Hascoet, J. Y. (2013). 3D safe and intelligent trajectory generation for multi-axis machine tools using machine vision. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 26(4), 365-385.
- [14] Sidi, M. J. (1997). *Spacecraft dynamics and control: a practical engineering approach* (Vol. 7). Cambridge university press.

#### ۶- جمع بندی و نتیجه گیری

در پژوهش پیش رو، فرآیند توسعه یک الگوریتم تولید مسیر هوشمند حلقه-بسته، جهت تولید مسیر زاویه‌ای مطلوب در نیل به مقادیر نهایی پیش‌بینی شده برای یک ماهواره، مورد بررسی واقع شد. این الگوریتم هوشمند، با بهره‌گیری از توان پردازشی کدکننده‌های خودکار در تولید ویژگی‌های جدید بر پایه مقدار لحظه‌ای کلیه متغیرهای قابل اندازه‌گیری و نیز با استفاده از توان یادگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی، می‌کوشد پارامترهای تعریف شده در یک معادله غیرخطی پیش‌فرض را به نحوی تعیین نماید که سیستم کنترل شده مورد بررسی (ماهواره) با عنایت به توان کنترلی و نیز ضوابط مفسر دینامیک خود، طی بهترین ترکیب از این پارامترها، به سمت مقدار دقیق نهایی تعریف شده، حرکت نماید. در پایان، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های صورت پذیرفته در محیط نرم‌افزار MATLAB از صحت عملکرد و نیز توان بالای پردازشی حتی در حضور اغتشاشات خارجی وارده به سیستم، حکایت دارد.

#### ۷- مراجع

- [1] Schneider, V., & Holzapfel, F. (2018). Modular trajectory generation test platform for real flight systems. In *Advances in Aerospace Guidance, Navigation and Control* (pp. 185-202). Springer, Cham.
- [2] Marquez, V. Y. H., Cruz, R. S. N., Zannatha, J. M. I., & Ramirez, C. E. (2018, September). Optimal trajectories generation for autonomous navigation tasks in mobile robots. In *2018 15th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)* (pp. 1-6). IEEE.
- [3] Tang, S., & Kumar, V. (2016, October). Safe and complete trajectory generation for robot teams with higher-order dynamics. In 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (pp. 1894-1901). IEEE.
- [4] Tang, S., & Kumar, V. (2015, May). Mixed integer quadratic program trajectory generation for a quadrotor with a cable-suspended payload. In 2015 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA) (pp. 2216-2222). IEEE.
- [5] Mellinger, D., Michael, N., & Kumar, V. (2012). Trajectory generation and control for precise aggressive maneuvers with quadrotors. *The International Journal of Robotics Research*, 31(5), 664-674.
- [6] Gao, F., Wu, W., Lin, Y., & Shen, S. (2018, May). Online safe trajectory generation for quadrotors using fast marching method and bernstein basis polynomial. In 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (pp. 344-351). IEEE.
- [7] Richter, C., Bry, A., & Roy, N. (2016). Polynomial trajectory planning for aggressive quadrotor flight in dense indoor environments. In *Robotics research* (pp. 649-666). Springer, Cham.
- [8] Mueller, M. W., Hehn, M., & D'Andrea, R. (2015). A computationally efficient motion primitive for quadrocopter trajectory generation. *IEEE transactions on robotics*, 31(6), 1294-1310.
- [9] Liu, S., Watterson, M., Mohta, K., Sun, K.,