

## (علمی-پژوهشی)

کنترل غیر متمرکز آرایش‌بندی رهبر-پیرو برای سیستم‌های چند  
عاملی غیر خطی غیر وابسته به روش تطبیقی مود لغزشی فازی

یژمان منوچهری<sup>۱\*</sup>، رضا قاسمی<sup>۲\*\*</sup> و  
علیرضا طلوعی<sup>۳\*\*\*</sup>

۱- گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد  
دماوند، تهران، ایران.

۲- گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی،  
دانشگاه قم، قم، ایران، کدپستی: ۳۷۱۶۱۴۶۶۱۱.

۳- دانشکده فناوری های نوین و مهندسی  
هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

\* دانشجوی دکتری

\*\* دانشیار (نویسنده پاسخگو)، ایمیل:

r.ghasemi@qom.ac.ir

\*\*\* دانشیار

با توجه به کاربرد وسیع روش‌های سیستم‌های چند عاملی در علوم مهندسی از قبیل کنترل و رباتیک و به دلیل اینکه اکثر سیستم‌های موجود در طبیعت و صنعت، ماهیت غیرخطی غیر وابسته دارند، طراحی کنترل‌کننده و بررسی پایداری آن‌ها دارای اهمیت خاصی می‌باشد. در بسیاری از مسائل عملی علم کنترل، متغیر و نامعلوم بودن برخی از پارامترهای فرآیند مورد بررسی و عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات محدود، طراحی کنترل‌کننده را با مشکلاتی عدیده‌ای مواجه می‌کند. در این مقاله طراحی کنترل‌کننده مود لغزشی فازی برای سیستم‌های چند عاملی غیر خطی به صورت محلی و با استفاده از اطلاعات عامل‌های همسایه انجام گرفته و گراف مربوطه دارای درخت پوشا می‌باشد. در ضمن در طراحی کنترل‌کننده، از سیستم‌های فازی به عنوان تقریب‌گر عمومی برای تقریب ورودی کنترل سیستم غیرخطی استفاده شده است. پارامترهای سیستم فازی به گونه‌ای تنظیم شده که خطای ردیابی سیگنال مرجع هر عامل و پایداری از نوع محدود غایی یکنواخت سیستم حلقه بسته تضمین شود. غیر وابسته بودن عامل‌های سیستم چند عاملی، نامعلوم بودن دینامیک عامل‌ها، همگرایی خطای ردیابی و خطای فرمیشن به سمت صفر و استفاده از سیستم‌های فازی به عنوان تخمین‌گر عمومی از مزیت‌های روش ارائه شده از در این مقاله می‌باشد. در نهایت، در شبیه‌سازی‌های انجام شده بر روی کوادروتور تحقق آرایش‌بندی رهبر-پیرو برای ماموریت مورد نظر صورت گرفته و با توجه به معیارهای تعیین شده، خطای مورد نظر قابل قبول می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آرایش‌بندی رهبر-پیرو، سیستم‌های چند عاملی، سیستم غیر خطی غیر وابسته، کنترل تطبیقی-لغزشی، پایداری لیاپانوف

## Distributed Intelligent Adaptive Sliding Mode Formation Protocol Design for Non- affine Nonlinear Multi-Agent Systems with UAV Application

*Due to the variability and uncertainty of some process parameters under investigation and limited uncertainties and confusions, the controller design faces problems. the controller is performed locally using the information of neighboring agents and the corresponding graph has a spanning tree. fuzzy systems are used as a general approximator and the parameters of the fuzzy system are adjusted in such a way that the tracking error of each agent and the stability of the uniform ultimately bounded of the closed-loop system are guaranteed. 1- considering the nonlinear non-affine of multi-agent system, 2- The unknown dynamics of the agents, 3- The convergence of the tracking error and the formation error to zero, 4- The use of fuzzy systems as a general estimator, are the main advantages of the presented method. Finally, in the simulations performed on the quadrotor, the leader-follower formation for the desired mission is realized, and according to the set criteria, the proposed methodology is satisfactory.*

**Keywords:** Leader Follower Formation, Multi-Agent System, Nonlinear System, Adaptive Sliding Mode, Lyapunov Stability

P. Manouchehri<sup>1\*</sup>, R. Ghasemi<sup>2\*\*</sup>, and  
A. Toloui<sup>3\*\*\*</sup>

1- Damavand Branch, Islamic Azad  
University, Damavand, IRAN

2- Group of Electrical Engineering,  
Technical and Engineering Faculty,  
Qom University, Postal Code:  
3716146611, Qom, IRAN

3- Faculty of New Technologies and  
Aerospace Engineering, Shahid  
Beheshti University, Tehran, IRAN

\* Ph. D. Student

\*\* Associate Professor  
(Corresponding Author): Email:  
r.ghasemi@qom.ac.ir

\*\*\* Associate Professor

## ۱- مقدمه

نماد	توضیح
$x$	موقعیت در راستای محور $x$
$y$	موقعیت در راستای محور $y$
$z$	موقعیت در راستای محور $z$
$m$	جرم کوادروتور
$I_{xx}$	ممان اینرسی محور $x$
$I_{yy}$	ممان اینرسی محور $y$
$d$	ضریب نیروی درگ
$b$	ضریب نیروی تراست
$\varphi$	زاویه رول
$\theta$	زاویه پیچ
$\psi$	زاویه یا
$U1$	نیروی کلی رو به بالا
$U2$	گشتاور پیچ
$U3$	گشتاور رول
$J_{Tp}$	ممان اینرسی محور روتور
$l$	طول بازو
$G$	گراف
$V$	راس
$E$	یال
$A$	ماتریس مجاورت
$D$	درجه ماتریس
$L$	لاپلاسیان
$I_{zz}$	ممان اینرسی محور $z$

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر آرایش‌بندی سیستم‌های چند عاملی به دلیل کاربردهای گسترده آن از قبیل پرواز آرایش‌بندی پهپاد، شبکه حسگر بی سیم و آرایش‌بندی کوادروتور مورد توجه زیادی قرار گرفته است. اطلاعات ضعیف از پارامترهای عامل و تعامل بین عامل‌ها، یکی از مشکلات اصلی برای رسیدن به آرایش‌بندی می‌باشد. به دلیل پیکربندی قابل تنظیم کنترل تطبیقی فازی و استفاده از دانش افراد متخصص در فرآیند روش کنترل کننده، کنترل تطبیقی فازی محققان زیادی را مجذوب کنترل‌کننده‌های مناسب برای سیستم‌های غیرخطی به طور انحصاری برای سیستم چند عاملی کرده است. سیستم‌های فازی تاگاکاکی سوگنو برای مدلسازی سیستم‌های غیرخطی وابسته استفاده شده و در نتیجه کنترل کننده‌های تاگاکاکی سوگنو با پایداری تضمین شده در مراجع [۱، ۲] توسعه یافته‌اند. طراحی

کنترل‌کننده آرایش‌بندی برای سیستم‌های چند عاملی نامتجانس خطی در حضور اغتشاش در مرجع [۳] پیشنهاد شده است. در مرجع [۴] رضا قاسمی روش کنترل‌کننده تطبیقی مود لغزشی فازی را برای سیستم‌های مقیاس بزرگ غیر خطی بهم پیوسته توسعه داد. مسئله اجماع در دو حالت بدون رهبر و همچنین رهبر-پیرو به طور جامع برای سیستم‌های چند عاملی مرتبه اول و مرتبه دوم در مراجع [۵-۷] بهبود یافته است. طراحی پروتکل اجماع مرتبه بالا برای سیستم‌های چند عاملی غیرخطی وابسته بسط داده شده است [۸]. روش برگشت به عقب تطبیقی هوشمند، برای سیستم بازخورد سختگیرانه غیرخطی در مراجع [۹، ۱۰] بررسی شده است. روش تکانه‌ای از پروتکل اجماع برای سیستم چند عاملی غیرخطی در مرجع [۱۱] بدست آمده است. کنترل‌کننده رهبر-پیرو برای برای تک انتگرالگیر با تأخیر زمانی در مرجع [۱۲] تعیین شده است. روش تطبیقی فازی مبتنی بر رویکرد بهره بالا در مرجع [۵] برای سیستم چند عاملی مرتبه دوم نامتجانس و بدون تضمین پایداری، طراحی شده است. رویکرد بر پایه کنترل‌کننده اجماع تطبیقی برگشت به عقب برای سیستم چند عاملی غیرخطی وابسته در مرجع [۱۳] مورد بحث قرار گرفته است. کنترل‌کننده مود لغزشی تطبیقی فازی برای سیستم چند عاملی غیرخطی وابسته در مرجع [۱۴] توسعه داده شده است. روش اجماع تطبیقی-عصبی برای سیستم چند عاملی با بازخورد سخت غیرخطی وابسته در مرجع [۱۵] پیشنهاد شده است. در مراجع ذکر شده، فرض بر این است که بهره‌کنترلی برای همه عامل‌ها ثابت و برابر با ۱ می‌باشد. [۱۶] کنترل‌کننده برگشت به عقب تطبیقی فازی برای یک کلاس از سیستم‌های غیرخطی وابسته در مرجع [۱۷] بر اساس رویکرد بهره بالا مورد بحث قرار گرفته است. پروتکل تطبیقی عصبی در مرجع [۱۸] برای سیستم غیرخطی وابسته با تأخیر زمانی پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۹]، طراحی سیستم فازی تاگاکاکی سوگنو مبتنی بر رویکرد برای سیستم صنعتی برنامه ریزی شده است. در مرجع [۲۰] سیستم را بصورت غیرخطی غیر وابسته در نظر گرفته که در این مقاله تابع را معلوم در نظر گرفته و با فرض اضافه کردن یک بردار ثابت نامعلوم بعنوان خطای مدلسازی به تابع، مسئله را مورد بررسی قرار داده و عیبی که این مقاله دارد این است که اغتشاش را در نظر نگرفته است. در مراجع [۲۱، ۲۲] یک روش خطی سازی بازخورد برای ربات‌های متحرک غیر هولونومیک با استفاده از رویکرد رهبر پیرو بر اساس سرعت مطلق رهبر به عنوان ورودی خارجی برای کنترل‌کننده آرایش‌بندی، برنامه ریزی شده است. آرایش‌بندی رهبر-پیرو از چند ربات بر اساس

$$\begin{cases} \dot{z}_i = Az_i + B(f_i(x_i, u_i) + d_i(t)) \\ y_i = C_i^T z_i \end{cases} \quad i=1,2,\dots,N \quad (1)$$

$z_i$  متغیر حالت  $i$  امین عامل و  $N$  تعداد عامل‌ها است. لازم به ذکر است متغیرهای حالت تمامی عامل‌ها در دسترس می‌باشد و  $u_i \in \square$  به عنوان ورودی کنترلی و  $y_i \in \square$  به عنوان خروجی عامل  $i$  ام در نظر گرفته می‌شود.  $f_i(x_i, u_i)$  تابع غیر خطی هموار و نامعلوم،  $d_i(t)$  اغتشاشات خارجی محدود می‌باشند که ماتریس  $A$  و بردار  $B$  به صورت زیر تعریف می‌شود. هدف از طراحی کنترل آرایش، محدود ماندن سیگنال‌های موجود در سیستم حلقه بسته، به علاوه رساندن عامل‌ها به یک آرایش از پیش تعیین شده می‌باشد.

**فرض ۱:** بدون از دست رفتن عمومیت روش فرض می‌شود که تابع هموار  $f_i(x_i, u_i)$  رابطه زیر را ارضا می‌کند.

$$\begin{aligned} f_{iu}(x_i, u_i) \square \frac{\partial f(x_i, u_i)}{\partial u_i} \geq f_{\min} > 0 \quad \forall (x_i, u_i) \in \square^n \times \square \\ \frac{df_{iu}(x_i, u_i)}{dt} \geq f_{\min} \end{aligned} \quad (2)$$

که  $f_{\min} \in \square$  و  $f_{\min} \in \square$  مقادیری معلوم و ثابت می‌باشند. لازم به ذکر است که تمامی طراحی‌های این بخش می‌تواند برای حالت  $f_{iu}(x_i, u_i) \leq f_{\min} < 0$  نیز تکرار شود.

**فرض ۲:** اغتشاشات خارجی ذکر شده در رابطه (۲)، در رابطه زیر صدق می‌کند.

$$\|d_i(t)\|_{\infty} \leq d_{\max} \quad (3)$$

$d_{\max}$  مقداری معلوم می‌باشد.

**فرض ۳:** عامل‌های ذکر شده در رابطه (۲) کنترل پذیر و رویت پذیر می‌باشد.

**فرض ۴:** گراف مدنظر بین عامل‌ها یک طرفه در نظر گرفته می‌شود. در ضمن فرض می‌شود گراف دارای درخت پوشا می‌باشد.

فرم بسته سیستم چند عاملی مذکور در رابطه (۲) به صورت زیر قابل بیان می‌باشد.

$$\begin{cases} \dot{Z} = (I_N \otimes A)Z + (I_N \otimes B)(f_i(x_i, u_i) + d_i(t)) \\ Y = (I_N \otimes C_i^T)Z \end{cases} \quad (4)$$

که در این رابطه  $Z = [z_1 \quad z_2 \quad \dots \quad z_N]^T \in \square^N$  بردار متغیر حالت، سیستم کلی چندعاملی می‌باشد.

در راستای کنترل آرایش‌بندی سیستم چند عاملی مذکور در رابطه (۲)، خطای آرایش‌بندی به صورت رابطه (۵) قابل بیان است.

$$e_i = k_p(x_0 - x_i - \Delta_i) + \gamma k_v(v_0 - v_i) + c \sum_{j \in N_i} a_{ij}((x_j - \Delta_j - x_i + \Delta_i) - \gamma(v_j - v_i)) \quad (5)$$

خطی سازی بازخورد در مرجع [۲۳] برای جلوگیری از برخورد به موانع متحرک که در آن‌ها سرعت زاویه‌ای رهبر محدود است، دستیابی شده است. طراحی پروتکل مهار برای سیستم‌های چند عاملی خطی نامتجانس مرتبه بالا در حضور عدم قطعیت محدود، تاخیر ورودی کنترل در مرجع [۲۴] ارائه شده است. کنترل‌کننده آرایش‌بندی مود لغزشی مشتق شده است که در آن سرعت ربات در مرجع [۲۱] هموار نیست. در مرجع [۲۵] یک کنترل‌کننده مود لغزشی را برای آرایش‌بندی چند ربات پیشنهاد داده است که در آن شتاب و سرعت مطلق رهبر قابل دسترسی است. یک کنترل‌کننده مود لغزشی مرتبه دوم در مراجع [۲۶، ۲۷] ارائه شده است تا یک شکل هندسی تعیین شده را تشکیل دهد. مرجع [۲۸] یک کنترل‌کننده تطبیقی مقاوم را برای حفظ شکل‌گیری ربات‌های متحرک با توجه به عدم قطعیت پارامتری بررسی کرده است. یک کنترل‌کننده آرایش‌بندی مقاوم توزیع شده در مرجع [۲۹] برای مطالعه پرواز فضایی با ۶ درجه آزادی در مدار زمین ارائه شده است. در مرجع [۳۰] طراحی کنترل مود لغزشی فرایپیش‌زمان محدود برای کنترل فضا پیما مورد بررسی قرار گرفته شده است. طراحی کنترل تطبیقی فازی برای حمل بار توسط چند پهپاد در مرجع [۳۱] توسط نویسندگان مورد بررسی قرار گرفته شده است.

در مراجع [۳۲، ۳۳] طراحی کنترل مود لغزشی تطبیقی و کنترل تطبیقی مبتنی بر شبکه عصبی برای آرایش‌بندی رهبر-پیرو چند ماهواره مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در مرجع [۳۴] طراحی کنترل‌کننده تطبیقی فازی مود لغزشی برای کنترل آرایش‌بندی چند فضا پیما طراحی شده است. مرجع [۳۵] طراحی قانون هدایت مود لغزشی مرتبه دوم تطبیقی طراحی و پایداری سیستم حلقه بسته در زمان محدود به اثبات رسیده است.

در این مقاله طراحی کنترل‌کننده فازی تطبیقی مقاوم برای سیستم‌های غیر خطی مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است کنترل‌کننده مورد نظر دارای خصوصیت‌های می‌باشد که عبارتند از: (۱) مقاومت در مقابل اغتشاشات خارجی، (۲) محدودیت سیگنال‌ها در سیستم حلقه بسته و (۳) همگرایی خطای ردیابی به صفر تضمین می‌شود.

باقیمانده مقاله به شرح زیر تنظیم شده است. بخش ۲ مقدمات و بیان مسئله را ارائه می‌دهد. طراحی کنترل‌کننده‌های تطبیقی مود لغزشی فازی در بخش ۳ پیشنهاد شده است. بخش ۴ نتایج شبیه سازی کنترل‌کننده پیشنهادی را ارائه می‌دهد و در بخش ۵ جمع‌بندی بیان شده است.

## ۲- بیان مسئله

سیستم چند عاملی غیرخطی غیر وابسته زیر را در نظر بگیرید:

(علمی-پژوهشی)

بژمان منوچهری، رضا قاسمی و علیرضا طلوعی

با توجه به فرض ۲ و قضیه ۱ و این موضوع که سیگنال  $v$  به صورت صریح به ورودی کنترل  $u$  وابسته نمی‌باشد و نامعادله زیر را می‌توان نتیجه گرفت.

$$\frac{\partial(f_i(\mathbf{x}_i, u_i) - v_i)}{\partial u_i} = \frac{\partial f_i(\mathbf{x}_i, u_i)}{\partial u_i} > 0 \quad (13)$$

با توجه به قضیه ۱ واضح است که معادله  $f_i(\mathbf{x}_i, u_i) - v_i = 0$  نسبت به ورودی کنترلی  $u_i$  به ازای  $(\mathbf{x}_i, v_i)$  های اختیاری، به صورت محلی قابل حل است. در نتیجه، ورودی کنترلی ایده‌آل  $\mathbf{u}_i^*(\mathbf{x}_i, v_i) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}$  معادله زیر را ارضا می‌کند [۱].

$$f_i(\mathbf{x}_i, u_i^*) - v_i = 0 \quad (14)$$

با توجه به قضیه مقدار میانی، مقداری برای  $\lambda$  در محدوده  $(0, 1)$  به گونه ای موجود است که می‌توان تابع غیر خطی  $f_i(\mathbf{x}_i, u_i)$  را حول  $u_i^*$  به صورت رابطه (۱۵) بیان نمود.

$$f_i(\mathbf{x}_i, u_i) = f_i(\mathbf{x}_i, u_i^*) + (u_i - u_i^*) f_{u_i} \\ = f(\mathbf{x}_i, u_i^*) + e_u f_{u_i} \quad (15)$$

که در رابطه فوق  $f_{u_i} = \frac{\partial f_i(\mathbf{x}_i, u_i)}{\partial u_i} |_{u_i = u_i^*}$  و  $f_{u_i} = \lambda u_i + (1 - \lambda) u_i^*$  برقرار می‌باشد. با توجه به معادله خطای آرایش به صورت زیر قابل بیان است:

$$\dot{E} = (I_N \otimes k_z - cL \otimes BK)(I_N \otimes A) \tilde{Z} \\ + (I_N \otimes k_z - cL \otimes BK)(I_N \otimes B) \\ (f_i(x_i^*, u_i) - v_i + e_u f_{u_i} + d_i(t) + v_i) \\ + (I_N \otimes k_z - cL \otimes BK)(I_N \otimes B') r_d \quad (16)$$

با توجه به معادله (۱۵)، معادله (۱۶) به صورت زیر قابل بیان است.

$$\dot{E} = (I_N \otimes k_z - cL \otimes BK)(I_N \otimes A) \tilde{Z} \\ + (I_N \otimes k_z - cL \otimes BK)(I_N \otimes B) \\ (e_u f_{u_i} + d_i(t) + v_i) \\ + (I_N \otimes k_z - cL \otimes BK)(I_N \otimes B') r_d \quad (17)$$

ورودی کنترلی ایده‌آل مذکور در رابطه (۱۷) به صورت زیر پیشنهاد می‌شود.

$$u_i^* = f_i(\underline{\Omega}_i) \quad (18)$$

در این رابطه،  $\underline{\Omega}_i = [x_i, v_i]^T$  در ضمن تقریب  $f_i(\underline{\Omega}_i)$  با استفاده از سیستم‌های فازی به صورت  $w_i(\underline{\Omega}_i) = \theta^* w_i(\underline{\Omega}) + \varepsilon$  و  $\theta^*$  به ترتیب بیانگر پارامترها و تابع پایه فازی و  $\varepsilon$  خطای تقریب زنی می‌باشد و فرضیات  $|\varepsilon| \leq \varepsilon_{\max}$  و  $\varepsilon_{\max} > 0$  را ارضا می‌کند. پارامترهای  $\theta^*$  با استفاده از بهینه سازی زیر بدست می‌آید.

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} [\sup | \theta^T w_i(\underline{z}_i) - f_i(\underline{z}_i) | ] \quad (19)$$

که در این رابطه،  $e_i$  خطای عامل  $i$  ام،  $x_0$  موقعیت مکانی عامل رهبر،  $v_0$  سرعت عامل رهبر،  $\Delta_i$  اختلاف موقعیت مکانی عامل  $i$  ام نسبت به عامل رهبر و  $N_i$  همسایگی عامل  $i$  ام می‌باشد. با استفاده از ریاضیات کرونکر و با انجام یکسری عملیات ریاضی، فرم بسته خطای سیستم چند عاملی مذکور در رابطه (۵) به صورت زیر قابل بیان است:

$$E = (I_N \otimes k_z - cL \otimes BK) \tilde{Z} \quad (6)$$

که در این رابطه،  $E = [e_1 \ e_2 \ \dots \ e_N]^T$  بردار خطای سیستم چند عاملی،  $k_z = [k_p \ k_v]^T$  و  $L$  ماتریس لاپلاسن می‌باشد و  $\tilde{Z}$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tilde{Z}_i = \begin{bmatrix} x_0 - x_i - \Delta_i \\ v_0 - v_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

با تعریف  $Z_{i0} = [x_0 \ v_0]^T$  و  $Z_{id} = [\Delta_i \ 0]^T$  رابطه (۷) به صورت زیر قابل بیان است.

$$\tilde{Z}_i = Z_{i0} - Z_i + Z_{id} \quad (8)$$

که دینامیک  $Z_0$  و  $Z_d$  به صورت رابطه زیر قابل بیان است.

$$\begin{cases} \dot{Z}_d = (I_N \otimes A) Z_d + (I_N \otimes B') r_d \\ \dot{Z}_0 = (I_N \otimes A) Z_0 \\ Y_0 = (I_N \otimes C^T) Z_0 \end{cases} \quad (9)$$

با مشتق گیری از رابطه (۸) به فرم بسته خواهیم داشت و داریم:

$$\dot{\tilde{Z}} = \dot{Z}_0 - \dot{Z}_i + \dot{Z}_d \quad (10)$$

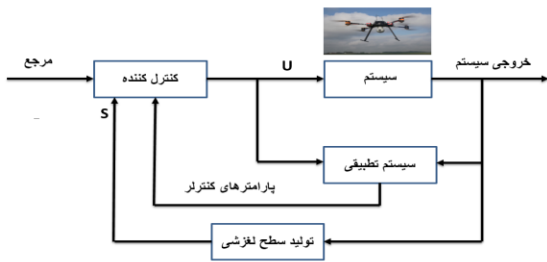
با استفاده از روابط (۹) و (۴)، رابطه (۱۱) به صورت زیر قابل بیان است.

$$\dot{\tilde{Z}} = (I_N \otimes A) Z_0 - (I_N \otimes A) Z \\ + (I_N \otimes B)(f_i(x_i, u_i) + d_i(t)) \\ + (I_N \otimes A) Z_d + (I_N \otimes B') r_d \quad (11)$$

با توجه به معادله (۶) دینامیک خطای آرایش به صورت زیر قابل بیان است:

$$\dot{E} = (I_N \otimes k_z - cL \otimes BK)(I_N \otimes A) \tilde{Z} \\ + (I_N \otimes k_z - cL \otimes BK)(I_N \otimes B) \\ (f_i(x_i, u_i) + d_i(t) + v_i - v_i) \\ + (I_N \otimes k_z - cL \otimes BK)(I_N \otimes B') r_d \quad (12)$$

**قضیه ۱:** فرض کنید  $\square^n \times \square \rightarrow \square$  به  $f_i(\mathbf{x}_i, u_i)$  ازای  $(\mathbf{x}_i, u_i) \in \square^n \times \square$  مشتق پذیر پیوسته است و مقدار ثابتی مانند  $d$  چنان وجود دارد که  $\frac{\partial f_i(\mathbf{x}_i, u_i)}{\partial u_i} > d > 0, \forall (\mathbf{x}_i, u_i) \in \square^n \times \square$  پیوسته‌های مانند  $u_i^* = u_i(\mathbf{x}_i)$  به گونه‌ای وجود دارد که  $f_i(\mathbf{x}_i, u_i^*) = 0$  [۱۰].



شکل (۱): دیاگرام سیستم حلقه بسته.

**قضیه ۲:** سیستم غیر خطی چندعاملی رابطه (۲) ارضا کننده فرض ۲، ۳ و گراف ارتباطی فرض ۴ را در نظر بگیرید که اغتشاشات خارجی فرض ۲ را نیز ارضا می‌کنند. سطح لغزش رابطه (۲۵) را در نظر بگیرید آنگاه خطاهای آرایش‌بندی مربوط به دینامیک خطای ذکر شده در معادلات (۲۴) با اعمال کنترل کننده ذکر شده در رابطه (۲۰) که ورودی معادل و رسیدن به سطح لغزش ذکر شده در معادلات (۲۱) و (۲۲) محدود یکنواخت غایی باقی می‌ماند و در ضمن تمامی سیگنال‌های سیستم حلقه بسته نیز محدود می‌مانند.

**اثبات:** جهت تحلیل پایداری و بررسی آرایش‌بندی به معرفی تابع لیاپانوف در این حوزه می‌پردازیم و در نهایت ورودی‌های کنترلی و پارامترهای آن بر این اساس تعیین می‌شوند. در این راستا، تابع لیاپانوف زیر پیشنهاد می‌شود [۳۳]:

$$V = \frac{1}{2f_{u_s}} s^2 + \frac{1}{2\gamma_1} \tilde{\theta}^T \tilde{\theta} + \frac{1}{2\gamma_2} \tilde{\varepsilon}^T \tilde{\varepsilon} + \frac{1}{2\gamma_3} \tilde{v}_i^T \tilde{v}_i \quad (26)$$

از معادله (۲۶) نسبت به زمان مشتق می‌گیریم.

$$\dot{V} = \frac{1}{f_{u_s}} s \dot{s} - \frac{\dot{f}_{u_s}}{f_{u_s}^2} s^2 + \frac{1}{2\gamma_1} \dot{\tilde{\theta}}^T \tilde{\theta} + \frac{1}{2\gamma_2} \dot{\tilde{\varepsilon}}^T \tilde{\varepsilon} + \frac{1}{2\gamma_3} \dot{\tilde{v}}_i^T \tilde{v}_i \leq -\eta |s| \quad (27)$$

با استفاده از رابطه (۶) و (۲۴) رابطه (۲۷) به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$\dot{V} = \frac{1}{f_{u_s}} s \left( \Lambda^T \xi A' \tilde{Z} + \Lambda^T \xi B' r_d + \Lambda^T \xi B' (e_u f_{u_d} + d_i(t) + v_i) \right) - \frac{\dot{f}_{u_s}}{f_{u_s}^2} s^2 + \frac{1}{2\gamma_1} \dot{\tilde{\theta}}^T \tilde{\theta} + \frac{1}{2\gamma_2} \dot{\tilde{\varepsilon}}^T \tilde{\varepsilon} + \frac{1}{2\gamma_3} \dot{\tilde{v}}_i^T \tilde{v}_i \leq -\eta |s| \quad (28)$$

کنترل کننده مذکور در روابط (۲۱) و (۲۲) در رابطه (۲۹) اعمال می‌شود.

$$\dot{V} = \frac{1}{f_{u_s}} s (\Lambda^T \xi A' \tilde{Z} + \Lambda^T \xi B' r_d + \Lambda^T \xi B' ((\tilde{\theta}^T w_i(\underline{z})) - \varepsilon + (\Lambda^T \xi B')^+ \left( -\frac{\|\Lambda^T \xi B'\|}{f_{\min}} \text{sign}(s) \hat{v}_i + \Lambda^T \xi B' \hat{\varepsilon} \right) - k \text{sign}(s) (f_{u_d} + d_i(t) + v_i)) - \frac{\dot{f}_{u_s}}{f_{u_s}^2} s^2 + \frac{1}{2\gamma_1} \dot{\tilde{\theta}}^T \tilde{\theta} + \frac{1}{2\gamma_2} \dot{\tilde{\varepsilon}}^T \tilde{\varepsilon} + \frac{1}{2\gamma_3} \dot{\tilde{v}}_i^T \tilde{v}_i \leq -\eta |s| \quad (29)$$

که در این رابطه،  $\theta$  تخمین  $\theta^*$  می‌باشد. با توجه به اینکه در عمل  $u_i^*$  قابل دسترس و محاسبه نمی‌باشد، از  $u_i$  به عنوان تخمینی از  $u_i^*$  در معادلات استفاده می‌شود که  $u_i$  به صورت معادله ذیل تعریف می‌شود [۳۳].

$$u = \theta^T w_i(\underline{z}_i) + u_{ieq} + u_{ir} \quad (20)$$

که در آن،  $\theta^T w_i(\underline{z}_i)$  تخمینی از کنترل کننده ایده‌آل و  $u_{ieq}$  تقریبی از کنترل معادل می‌باشد. در رابطه (۲۰)  $u_{ieq}$  به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$u_{ieq} = (\Lambda^T \xi B')^+ \left( -\frac{\|\Lambda^T \xi B'\|}{f_{\min}} \text{sign}(s) \hat{v}_i + \Lambda^T \xi B' \hat{\varepsilon} \right) \quad (21)$$

در این رابطه،  $\hat{v}_i$  تخمین  $v_i$  و  $\hat{\varepsilon}$  تخمین  $\varepsilon$  می‌باشند. در ضمن  $u_{ir}$  کنترل رسانده می‌باشد که در زیر آمده است.

$$u_{ir} = -k \text{sign}(s) \quad (22)$$

لازم به ذکر است پارامترهای ورودی کنترل با استفاده از قوانین تطبیق زیر بروز رسانی می‌شوند.

$$\begin{cases} \dot{\theta}_i = \gamma_1 w_i(\underline{z}_i) B'^T \xi^T \Lambda s \\ \dot{\hat{\varepsilon}} = -\gamma_1 s \Lambda^T \xi B' \\ \dot{\hat{v}}_i = \frac{\gamma_3 |s|}{f_{\min}} |\Lambda^T \xi B'| \end{cases} \quad (23)$$

که در آن،  $\gamma_3 > 0, \gamma_2 > 0, \gamma_1 > 0$  پارامترهای ثابت می‌باشند. بردار خطای  $\tilde{\theta}_i$  به فرم  $\tilde{\theta}_i = \theta_i - \theta_i^*$  تعریف می‌شود و می‌توان با استفاده از معادله (۲۰) خطای ردیابی سیستم در رابطه (۱۷) به فرم زیر قابل بیان است.

$$\begin{aligned} \dot{E} = & \underbrace{(I_N \otimes k_z - cL \otimes BK)}_{\xi} \underbrace{(I_N \otimes A)}_A \tilde{Z} \\ & + \underbrace{(I_N \otimes k_z - cL \otimes BK)}_{\xi} \underbrace{(I_N \otimes B)}_B (e_u f_{u_d} + d_i(t) + v_i) \\ & + \underbrace{(I_N \otimes k_z - cL \otimes BK)}_{\xi} \underbrace{(I_N \otimes B')}_B r_d \end{aligned} \quad (24)$$

### ۳- طراحی کنترل کننده تطبیقی مود لغزشی فازی

در راستای طراحی کنترل کننده مود لغزشی برای سیستم ذکر شده در رابطه (۱۷)، سطح لغزش به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۲].

$$s = \Lambda^T E \quad (24)$$

که  $\Lambda = [\lambda_1 \ \lambda_2 \ \dots \ \lambda_N]^T$  می‌باشد. در شکل ۱ بلوک دیاگرام سیستم حلقه بسته نشان داده شده است.

## (علمی-پژوهشی)

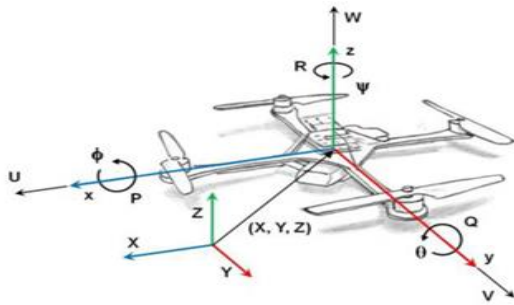
پژمان منوچهری، رضا قاسمی و علیرضا طلوعی

کنترلی می‌باشد که برای حذف این نوسانات و پایداری عامل‌ها و همگرایی خطای ردیابی به سمت همسایگی صفر، نکته زیر می‌تواند در نظر گرفته شود.

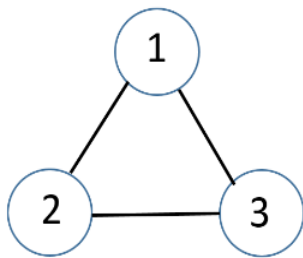
**نکته:** از مشکلات عمده روش ارائه شده وجود نوسانات ناخواسته در ورودی کنترلی می‌باشد که برای حذف این نوسانات در سیستم حلقه بسته از تابع  $\tanh(. / \varepsilon)$  یا  $\text{sat}(. / \varepsilon)$  بجای  $\text{sign}(.)$  استفاده می‌شود.

## ۴- شبیه‌سازی کوادروتور

به منظور بررسی کنترل‌کننده پیشنهادی، روش پیشنهادی بر روی سه کوادروتور در قالب سیستم‌های چند عاملی اعمال می‌شود. قاب E<sup>x</sup> و قاب B کوادروتور در شکل ۲ نشان داده شده است. توپولوژی MAS در شکل ۳ ارائه شده است. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده سیستم دارای سه عامل (کوادروتور) می‌باشد.



شکل (۲): دیاگرام سیستم حلقه بسته.



شکل (۳): دیاگرام ارتباطی بین عامل‌ها.

هر کوادروتور شامل دو سیستم مختصات، یکی سیستم مختصات مطلق (مختصات جهانی) به عنوان قاب زمین ثابت (E) و دیگری بعنوان مختصات محلی یا متصل به جسم (B) است. لازم به ذکر است که زاویه‌های رول، پیچ و یاو و سرعت زاویه‌ای در قاب ثابت زمین (E) بیان شده و شتاب‌های خطی در قاب ثابت بدنه (B) ارائه شده‌اند. دینامیک غیرخطی کوادروتور ذکر شده در شکل ۲ بصورت زیر در نظر گرفته شده است [۲۸]:

رابطه (۲۹) به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \frac{1}{f_{u_z}} \tilde{Z}^T \xi^T \Lambda \Lambda^T \xi A' \tilde{Z} + \frac{1}{f_{u_z}} \tilde{Z}^T \xi^T \Lambda \Lambda^T \xi B'' r_d \\ & + s \Lambda^T \xi B' \tilde{\theta}_i^T w_i(\underline{z}) + s \Lambda^T \xi B' \tilde{\varepsilon} - s k \text{sign}(s) \\ & - \frac{1}{f_{\min}} s \Lambda^T \xi B' (\Lambda^T \xi B')^+ \|\Lambda^T \xi B'\| \text{sign}(s) \tilde{v}_i \\ & + \frac{1}{f_{u_z}} \tilde{Z}^T \xi^T \Lambda d_i(t) + \frac{1}{f_{u_z}} \tilde{Z}^T \xi^T \Lambda v_i - s \Lambda^T \xi B' \varepsilon \\ & - \frac{\dot{f}_{u_z}}{f_{u_z}^2} s^2 + \frac{1}{2\gamma_1} \dot{\theta}^T \tilde{\theta} + \frac{1}{2\gamma_2} \dot{\varepsilon}^T \tilde{\varepsilon} + \frac{1}{2\gamma_3} \dot{v}_i^T \tilde{v}_i \leq -\eta |s| \end{aligned} \quad (30)$$

رابطه (۳۰) با استفاده از ریاضیات نرم به صورت زیر قابل بیان است:

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & \frac{1}{f_{\min}} \lambda_{\max}(\xi^T \Lambda \Lambda^T \xi A') \|\tilde{Z}\| \\ & + \frac{1}{f_{\min}} \|\xi^T \Lambda \Lambda^T \xi B''\| \|r_d\| \|\tilde{Z}\| - s \Lambda^T \xi B' \tilde{\theta}_i^T w_i(\underline{z}) \\ & - \frac{|s|}{f_{\min}} \|\Lambda^T \xi B'\| \tilde{v}_i + s \Lambda^T \xi B' \tilde{\varepsilon} - k |s| + \frac{1}{f_{\min}} |s| d_{\max} \\ & - \frac{\dot{f}_{u_z}}{f_{u_z}^2} s^2 + \frac{1}{2\gamma_1} \dot{\theta}^T \tilde{\theta} + \frac{1}{2\gamma_2} \dot{\varepsilon}^T \tilde{\varepsilon} + \frac{1}{2\gamma_3} \dot{v}_i^T \tilde{v}_i \leq -\eta |s| \end{aligned} \quad (31)$$

با فاکتورگیری از خطای پارامترها، رابطه (۳۱) به صورت زیر قابل بازنویسی می‌باشد:

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & - \left( \frac{\dot{f}_{u_z}}{f_{\min}^2} \lambda_{\min}(\xi^T \Lambda \Lambda^T \xi) \right) \|\tilde{Z}\|^2 \\ & + \frac{1}{f_{\min}} \|\xi^T \Lambda \Lambda^T \xi B''\| \|r_d\| \|\tilde{Z}\| - k |s| \\ & + \frac{1}{f_{\min}} \|\tilde{Z}^T \xi^T \Lambda\| d_{\max} + \left( \frac{1}{2\gamma_1} \dot{\theta}^T - s \Lambda^T \xi B' w_i^T(\underline{z}) \right) \tilde{\theta}_i \\ & + \left( -\frac{|s|}{f_{\min}} \|\Lambda^T \xi B'\| + \frac{1}{2\gamma_3} \dot{v}_i^T \right) \tilde{v}_i + \left( s \Lambda^T \xi B' + \frac{1}{2\gamma_2} \dot{\varepsilon}^T \right) \tilde{\varepsilon} \\ & \leq -\eta |s| \end{aligned} \quad (32)$$

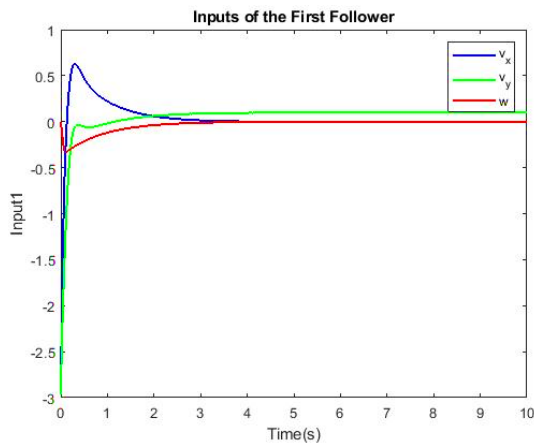
با اعمال رابطه (۳۲) و انتخاب مناسب  $k$  در رابطه فوق، سیستم حلقه بسته در ناحیه بسته زیر پایدار از نوع محدود یکنواخت غایی می‌ماند.

$$\Omega = \left\{ \|\tilde{Z}\| \geq - \frac{\|\xi^T \Lambda \Lambda^T \xi B''\| \|r_d\|}{\left( \frac{\dot{f}_{u_z}}{f_{\min}^2} \lambda_{\min}(\xi^T \Lambda \Lambda^T \xi) \right) - \lambda_{\max}(\xi^T \Lambda \Lambda^T \xi A')} \right\} \quad (33)$$

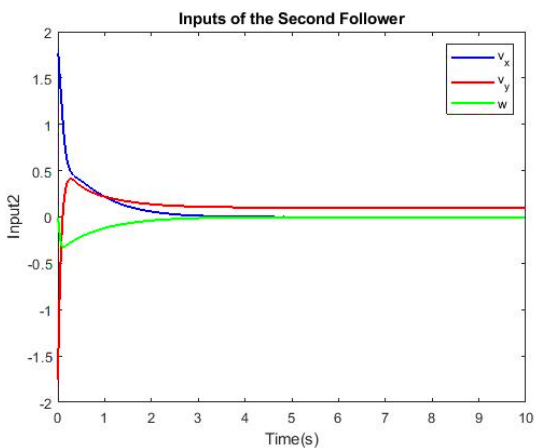
با در نظر گرفتن رابطه (۳۳) اثبات قضیه به پایان می‌رسد. یکی از مشکلات عمده این روش وجود نوسانات ناخواسته در ورودی

رهبر به صفر در شکل‌های ۷ و ۸، نشان از عملکرد کنترل مود لغزشی ارائه شده می‌باشد.

موقعیت رهبر و پیروان در راستای محور X در شکل ۹ نشان داده شده است. موقعیت رهبر و پیروان در راستای محور Y در شکل ۱۰ نشان داده شده است. موقعیت رهبر و پیروان در راستای محور Z در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بر مبنای شکل‌های ۹-۱۱، که آرایش‌بندی مثلی از پیش تعیین شده قابل حصول است. با زوایای عامل‌های رهبر و پیرو در شکل ۹ نشان داده شده است. زوایای رول، یاو و پیچ مربوط به رهبر و دو پیرو در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ ارائه شده است و عملکرد مناسب این روش را نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های ۱۷-۱۵ که بیانگر سرعت زوایای رهبر و پیروان می‌باشد از محدود ماندن این سیگنال‌ها بر اساس قضیه ۲ می‌باشد. همانطور که در شکل‌ها نشان داده شده است، دستیابی به آرایش‌بندی، همگرایی سطح لغزشی به همسایگی صفر، همگرایی خطای ردیابی به همسایگی صفر و پایداری سیستم حلقه بسته قابل حصول بوده و کنترل‌کننده عملکرد مناسبی از خود نشان داده است.



شکل (۵): ورودی‌های کنترل‌کننده عامل اول.



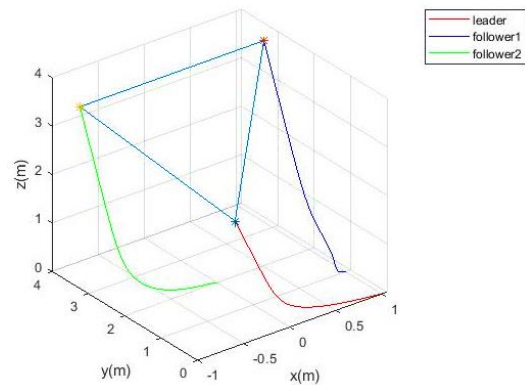
شکل (۶): ورودی‌های کنترل‌کننده عامل دوم.

$$\begin{cases} \dot{X} = (\sin \psi \sin \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi) \frac{U_1}{m} \\ \dot{Y} = (-\cos \psi \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi) \frac{U_1}{m} \\ \dot{Z} = -g + (\cos \theta \cos \phi) \frac{U_1}{m} \\ \dot{\phi} = \frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} \dot{\theta} \psi - \frac{J_{yp}}{I_{xx}} \dot{\theta} \Omega + \frac{U_2}{I_{xx}} \\ \dot{\theta} = \frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} \dot{\phi} \psi + \frac{J_{zp}}{I_{yy}} \dot{\phi} \Omega + \frac{U_3}{I_{yy}} \\ \dot{\psi} = \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \dot{\phi} \dot{\theta} + \frac{U_4}{I_{zz}} \end{cases} \quad (34)$$

بردار موقعیت خطی و زوایای کوادروتور در قاب زمین است و بردار حاوی سرعت‌های خطی و زوایای موجود در قاب بدنه را نشان می‌دهد. بردار ورودی بردار کنترل می‌باشد. در جدول ۱ مقادیر پارامترهای مربوطه بیان شده است. در شکل ۴ شکل‌گیری مسیر رهبر و پیروان نشان داده شده است.

جدول (۱): مقدار پارامترها.

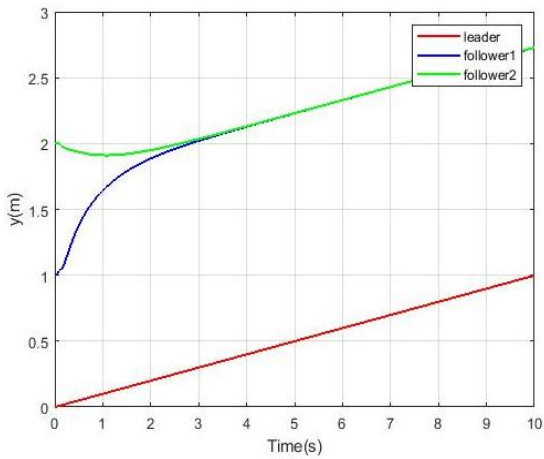
Parameters value	
$g = 9.81$	$J_{TP} = 6 \times 10^{-5}$
$m = 3.2$	$l = 0.2$
$I_{xx} = 11 \times 10^{-2}$	$I_{yy} = 19 \times 10^{-2}$
$I_{zz} = 1.3 \times 10^{-2}$	



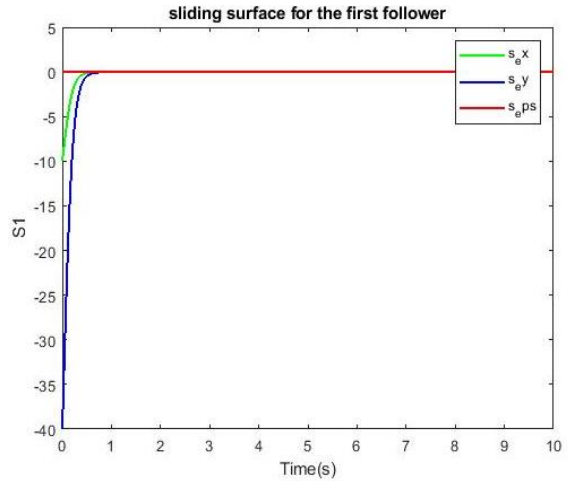
شکل (۴): شکل‌گیری مسیر MAS در هوابیما x-y-z.

با عنایت به اینکه هدف رسیدن عامل‌ها به یک آرایش از پیش تعیین شده و دنبال کردن رهبر می‌باشد. از شکل ۴ پرواضح است که ردیابی و آرایش‌بندی به خوبی صورت گرفته است. ورودی‌های کنترل‌کننده اولین عامل در شکل ۵ نشان داده شده است. ورودی‌های کنترل‌کننده عامل دوم در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های ۵ و ۶، پرواضح است که ورودی‌های کنترلی قابل قبول و محدود می‌باشند. سطح لغزش اولین پیرو در شکل ۷ نشان داده شده است. سطح لغزش دومین پیرو در شکل ۸ نشان داده شده است. همگرایی سطح لغزش پیروها و

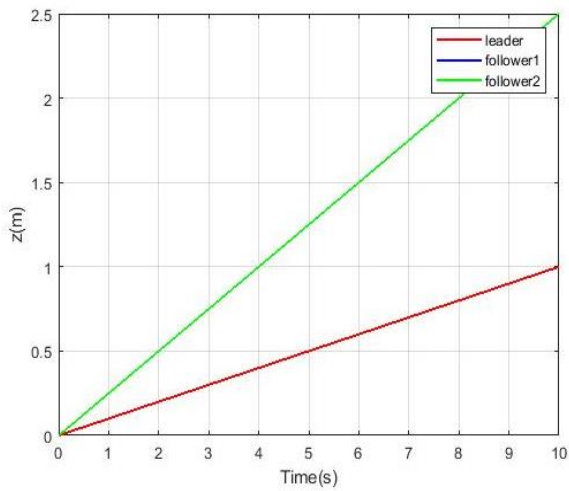
(علمی-پژوهشی)  
پژمان منوچهری، رضا قاسمی و علیرضا طلوعی



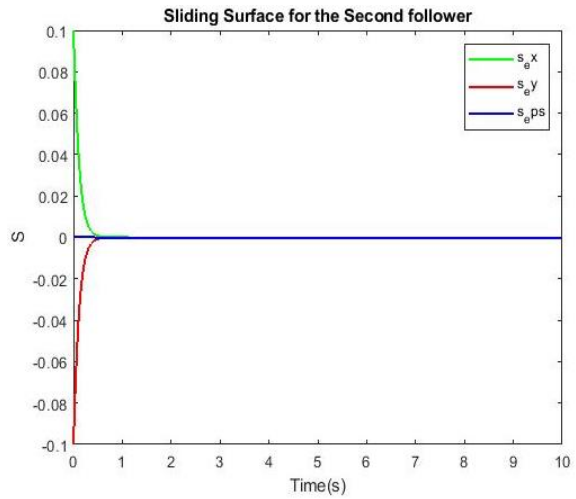
شکل (۱۰): موقعیت رهبر و پیروان در راستای محور Y.



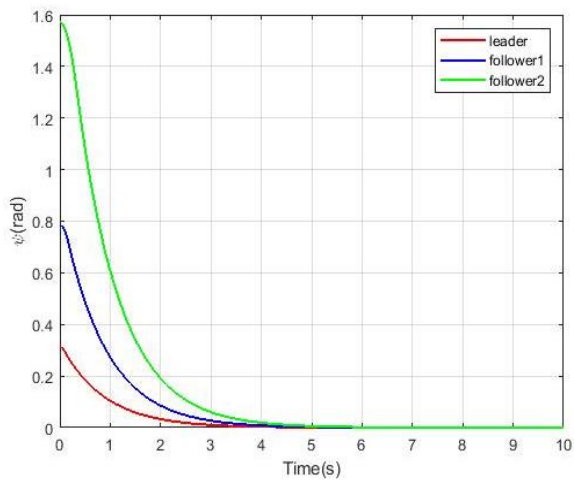
شکل (۷): سطح لغزش پیرو اول.



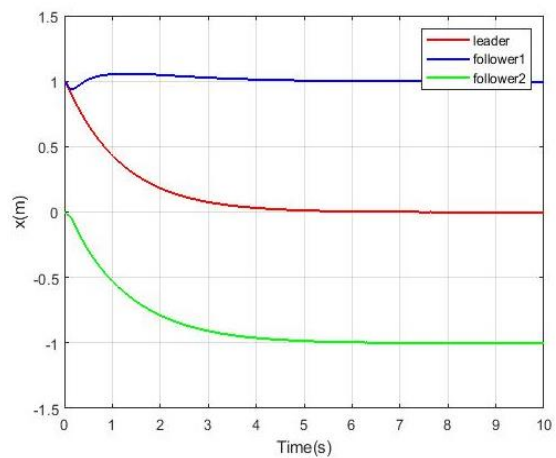
شکل (۱۱): موقعیت رهبر و پیروان در راستای محور Z.



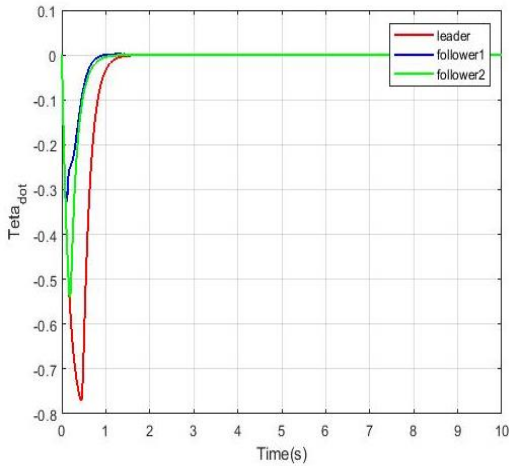
شکل (۸): سطح لغزش پیرو دوم.



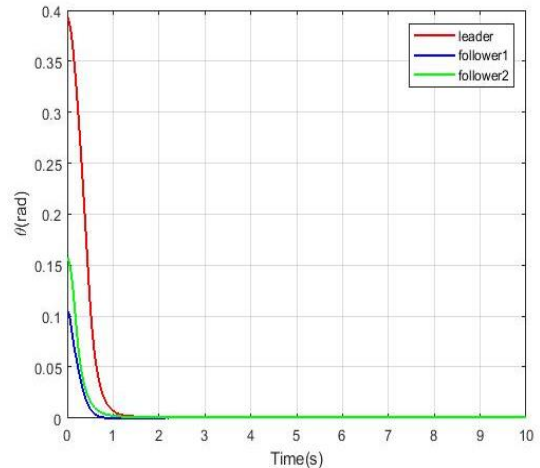
شکل (۱۲): زاویه یا مربوط به عامل‌های رهبر و پیرو.



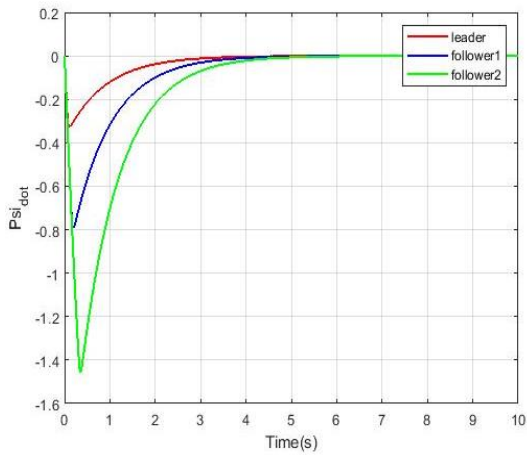
شکل (۹): موقعیت رهبر و پیروان در راستای محور X.



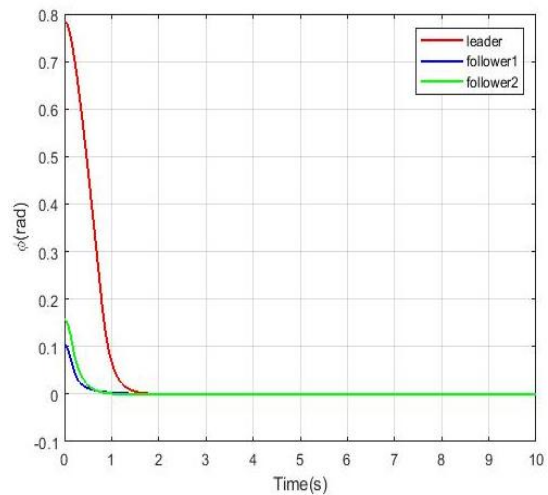
شکل (۱۶): سرعت زاویه پیچ مربوط به عامل‌های رهبر و پیرو.



شکل (۱۳): زاویه پیچ مربوط به عامل‌های رهبر و پیرو.



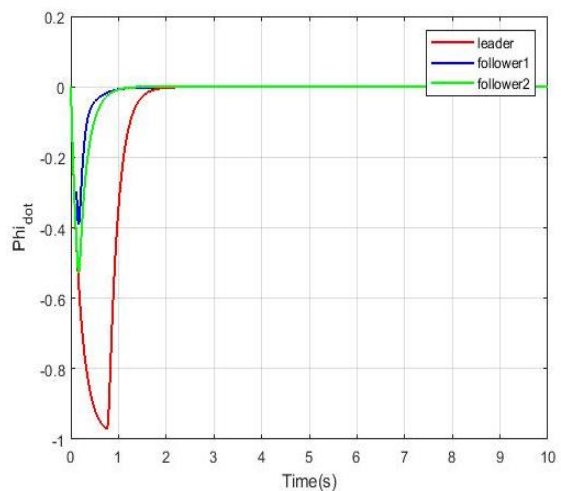
شکل (۱۷): سرعت زاویه یا مربوط به عامل‌های رهبر و پیرو.



شکل (۱۴): زاویه رول مربوط به عامل‌های رهبر و پیرو.

### ۶- نتیجه گیری

نتول آرایش غیرمتمرکز برای یک کلاس از سیستم‌های چند عامل غیرخطی غیروابسته تحت توپولوژی ثابت در نظر گرفته شده است. فرض بر این است که توابع سیستم همه نامعین می‌باشد. برای مواجهه با عدم قطعیت‌ها و توابع نامعین عامل‌ها، کنترل‌کننده مود لغزشی تطبیقی فازی برای این کلاس خاصی از سیستم‌های چندعاملی بدست آمده است. مزایای اصلی روش ارائه شده عبارتند از: ۱- پایداری UUB (محدود یکنواخت غایی) برای سیستم‌های غیر خطی غیر وابسته با دینامیک نامعلوم، ۲- مقاوم بودن کنترل‌کننده نسبت به عدم قطعیت‌های توابع غیر خطی عامل‌ها، ۳- مقاوم بودن نسبت به خطای تقریب‌زنی و اغتشاشات خارجی محدود و ۴- محدود ماندن سیگنال‌های داخلی سیستم حلقه بسته.



شکل (۱۵): سرعت زاویه رول مربوط به عامل‌های رهبر و پیرو.

## ۸- مراجع

- [1] G. Feng, S.-G. Cao, and N. W. Rees, "Stable adaptive control of fuzzy dynamic systems," *Fuzzy Sets Systems*, vol. 131, no. 2, pp. 217-224, 2002.
- [2] G. Feng, "An approach to adaptive control of fuzzy dynamic systems," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 268-275, 2002.
- [3] D. W. Djamari, "Scalable formation of heterogeneous agents considering unknown disturbances," *Asian Journal of Control*, vol. 23, no. 4, pp. 1631-1642, 2021.
- [4] R. Ghasemi, "Designing observer based variable structure controller for large scale nonlinear systems," *IAES International Journal of Artificial Intelligence*, vol. 2, no. 3, p. 125, 2013.
- [5] C. P. Chen, G.-X. Wen, Y.-J. Liu, and F.-Y. Wang, "Adaptive consensus control for a class of nonlinear multiagent time-delay systems using neural networks," *IEEE Transactions on Neural Networks Learning Systems*, vol. 25, no. 6, pp. 1217-1226, 2014.
- [6] R. Olfati-Saber and R. M. Murray, "Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays," *IEEE Transactions on automatic control*, vol. 49, no. 9, pp. 1520-1533, 2004.
- [7] R. Ghasemi, "Adaptive state tracking controller for multi-input multi-output non-affine nonlinear systems," *International Journal of Computer Electrical Engineering*, vol. 3, no. 3, p. 426, 2011.
- [8] H. Zhang and F. L. Lewis, "Adaptive cooperative tracking control of higher-order nonlinear systems with unknown dynamics," *Automatica*, vol. 48, no. 7, pp. 1432-1439, 2012.
- [9] C. P. Chen, Y.-J. Liu, and G.-X. Wen, "Fuzzy neural network-based adaptive control for a class of uncertain nonlinear stochastic systems," *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 44, no. 5, pp. 583-593, 2013.
- [10] X. Wang, T. Li, C. P. Chen, and B. Lin, "Adaptive robust control based on single neural network approximation for a class of uncertain strict-feedback discrete-time nonlinear systems," *Neurocomputing*, vol. 138, pp. 325-331, 2014.
- [11] D. Li, J. Ma, H. Zhu, and M. Sun, "The consensus of multi-agent systems with uncertainties and randomly occurring nonlinearities via impulsive control," *International Journal of Control, Automation Systems*, vol. 14, no. 4, pp. 1005-1011, 2016.
- [12] S. Djaidja and Q. Wu, "Leader-following consensus of single-integrator multi-agent systems under noisy and delayed communication," *International Journal of Control, Automation Systems*, vol. 14, no. 2, pp. 357-366, 2016.
- [13] C. P. Chen, C.-E. Ren, and T. Du, "Fuzzy observed-based adaptive consensus tracking control for second-order multiagent systems with heterogeneous nonlinear dynamics," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 24, no. 4, pp. 906-915, 2015.
- [14] C. P. Chen, G.-X. Wen, Y.-J. Liu, and Z. Liu, "Observer-based adaptive backstepping consensus tracking control for high-order nonlinear semi-strict-feedback multiagent systems," *IEEE transactions on cybernetics*, vol. 46, no. 7, pp. 1591-1601, 2015.
- [15] Q. Shen, P. Shi, and Y. Shi, "Distributed adaptive fuzzy control for nonlinear multiagent systems via sliding mode observers," *IEEE transactions on cybernetics*, vol. 46, no. 12, pp. 3086-3097, 2015.
- [16] G. Wang, C. Wang, L. Li, and Q. Du, "Distributed adaptive consensus tracking control of higher-order nonlinear strict-feedback multi-agent systems using neural networks," *Neurocomputing*, vol. 214, pp. 269-279, 2016.
- [17] T. Wang, Y. Zhang, J. Qiu, and H. Gao, "Adaptive fuzzy backstepping control for a class of nonlinear systems with sampled and delayed measurements," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 23, no. 2, pp. 302-312, 2014.
- [18] T. Wang, J. Qiu, and H. Gao, "Adaptive neural control of stochastic nonlinear time-delay systems with multiple constraints," *IEEE Transactions on Systems, Man, Cybernetics: Systems*, vol. 47, no. 8, pp. 1875-1883, 2016.
- [19] T. Wang, J. Qiu, H. Gao, C. J. I. T. o. S. Wang, Man,, and C. Systems, "Network-based fuzzy control for nonlinear industrial processes with predictive compensation strategy," *IEEE Transactions on Systems, Man, Cybernetics: Systems*, vol. 47, no. 8, pp. 2137-2147, 2016.
- [20] C. Ahn, H. Kim, and Y. Kim, "Adaptive sliding mode control for non-affine nonlinear vehicle systems," in *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, 2007, p. 6506.
- [21] J. Ghommam, H. Mehrjerdi, and M. Saad, "Robust formation control without velocity measurement of the leader robot," *Control Engineering Practice*, vol. 21, no. 8, pp. 1143-1156, 2013.
- [22] G. W. Gamage, G. K. Mann, and R. G. Gosine, "Formation control of multiple nonholonomic mobile robots via dynamic feedback linearization," in *2009 International Conference on Advanced Robotics*, 2009, pp. 1-6: IEEE.
- [23] Y. Tian-Tian, L. Zhi-Yuan, C. Hong, and P. Run, "Formation control and obstacle avoidance for multiple mobile robots," *Acta Automatica Sinica*, vol. 34, no. 5, pp. 588-593, 2008.
- [24] M. Parsa and M. Danesh, "Containment control of high-order multi-agent systems with heterogeneous uncertainties, dynamic leaders, and time delay," *Asian Journal of Control*, vol. 23, no. 2, pp. 799-810, 2021.
- [25] M. Defoort, T. Floquet, A. Kokosy, and W. Perruquetti, "Sliding-mode formation control for cooperative autonomous mobile robots," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 11, pp. 3944-3953, 2008.
- [26] J. Ghommam, M. S. Mahmoud, and M. Saad, "Robust cooperative control for a group of mobile robots with quantized information exchange," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 350, no. 8, pp. 2291-2321, 2013.
- [27] Y.-H. Chang, C.-Y. Yang, W.-S. Chan, C.-W. Chang, and C.-W. Tao, "Leader-following formation control of multi-robot systems with adaptive fuzzy terminal sliding-mode controller," in *2013 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*, 2013, pp. 45-50: IEEE.
- [28] A. Guillet, R. Lenain, B. Thuilot, and P. Martinet, "Adaptable robot formation control: Adaptive and predictive formation control of autonomous vehicles," *IEEE Robotics Automation Magazine*, vol. 21, no. 1, pp. 28-39, 2014.

- [29] B. Shasti, A. Alasty, and N. Assadian, "Robust distributed control of spacecraft formation flying with adaptive network topology," *Acta Astronautica*, vol. 136, pp. 281-296, 2017.
- [30] M. A. V. Shahbahrami, A. Alikhani, "Attitude and Vibration Control of a Flexible Spacecraft using Hybrid Adaptive Super-Twisting Non-singular Terminal Sliding Mode Control," *Journal of Space Science and Technology*, vol. Online publishing.
- [31] N. D. V. Nekoukar, "Fuzzy Adaptive Control of Unmanned Aerial Vehicle for Carrying Time-Varying Cargo on Predefined Path," *Journal of Contro*, vol. 14, 2020.
- [32] P. Manouchehri, R. Ghasemi, A. Toloee, and F. Mohammadi, "Distributed neural observer-based formation strategy of non-affine nonlinear multi-agent systems with unknown dynamics," *Journal of Circuits, Systems Computers*, vol. 30, no. 05, p. 2130005, 2021.
- [33] J. Bae and Y. Kim, "Adaptive controller design for spacecraft formation flying using sliding mode controller and neural networks," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 349, no. 2, pp. 578-603, 2012.
- [34] W. Xin, Z. Shasha, and Z. Xingwang, "Adaptive fuzzy sliding mode controller for attitude coordinated control in spacecraft formation," *GSTF Journal on Aviation Technology*, vol. 1, no. 2, pp. 1-7, 2015.
- [35] V. Behnamgol, A. Vali, and A. Mohammadi, "Lyapunov-based Adaptive Smooth Second-order Sliding Mode Guidance Law with Proving Finite Time Stability," *Journal of Space Science Technology*, vol. 11, no. 2, pp. 33-39, 2018.