

طراحی رؤیتگر مود لغزشی فازی تطبیقی غیر متمرکز برای سیستم‌های ابعاد وسیع با اتصالات ناشناخته در حضور اغتشاش توزیعی

بابک رنجبر^{۱*}، ابوالفضل رنجبر نوعی^۲، بهروز رضایی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۰۴ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۱۴	
واژگان کلیدی: رؤیتگر غیر متمرکز، تئوری فازی، رؤیتگر مود لغزشی، سیستم ابعاد وسیع، قوانین تطبیقی، تابع لیاپانوف.	در این مقاله، یک کلاس از سیستم‌های ابعاد وسیع دارای اغتشاش توزیعی همراه با اتصالات ناشناخته بین زیرسیستم‌ها مورد مطالعه قرار می‌گیرد. رؤیتگر مود لغزشی فازی تطبیقی غیرمتمرکز برای تخمین حالت‌ها با استفاده از خروجی هر زیرسیستم پیشنهاد شده است. در سیستم‌های ابعاد وسیع تحت مطالعه، فرض شده است تنها اطلاعات محدودی از اتصالات بین زیرسیستم‌ها در دسترس بوده، ماتریس اتصالات نامشخص است. از ترکیب رؤیتگر لیونبرگر و مود لغزشی برای تخمین حالت‌های غیر قابل اندازه‌گیری استفاده شده و برای مشاهده آثار اتصالات ناشناخته بین زیرسیستم‌ها، روش تطبیقی ارائه گردیده است که با قوانین تطبیقی، ماتریس اتصال بین زیرسیستم‌ها تخمین زده می‌شود. همچنین عامل لغزش توسط قوانین فازی به گونه‌ای طراحی شده که خطای همگرایی بین حالت واقعی و حالت تخمینی صفر گردیده، لرزش کاهش یابد. با کاندیدا کردن یک تابع لیاپانوف و انتخاب پارامترهای مناسب طراحی آنالیز همگرایی انجام و همگرایی خطای تخمین به سمت صفر تضمین می‌شود. در نهایت، برای نشان دادن عملکرد مطلوب رؤیتگر مود لغزشی فازی تطبیقی غیرمتمرکز پیشنهادی، مثالی عددی با یک سری شبیه‌سازی‌ها آورده شده است.

۱- مقدمه

سیستمی با ساختار غیرمتمرکز، دارای چند پایگاه فرمان است و برای بهبود عملکرد سیستم، پایگاه‌ها به‌طور هم‌زمان از طریق یک شبکه ارتباطی محلی با پروسه در تعامل هستند. در ساختار غیرمتمرکز، محدودیت‌ها با استفاده از اطلاعات محلی هر زیرسیستم برطرف می‌شود. در سال‌های اخیر ساختار غیرمتمرکز برای سیستم‌های ابعاد وسیع توجه بسیاری را به خود جلب کرده و موضوع بسیاری از طرح‌های پیشنهادی بوده است [۲-۷]. یک دلیل مهم استفاده از ساختار غیرمتمرکز این است که پایگاه فرمان هر زیرسیستم یکپارچه و محلی است و فقط از اطلاعات در دسترس هر زیرسیستم، استفاده کرده، نیازی به تبادل اطلاعات بین زیرسیستم‌ها ندارد [۸ و ۹]. در به‌کارگیری استراتژی کنترل

امروزه تحقیقات بسیاری روی سیستم‌های متصل در ابعاد وسیع مانند حمل‌ونقل، سیستم‌های قدرت، شبکه گازرسانی و شبکه برق انجام می‌گیرد. سیستم‌های ابعاد وسیع شامل چندین زیرسیستم است و زیرسیستم‌ها توسط اتصالاتی مانند خطوط انتقال به هم متصل شده‌اند [۱]. برای تحلیل سیستم ابعاد وسیع، نیاز به شناخت دقیق زیرسیستم‌ها و اتصالات بین آن‌هاست. ساختار متمرکز برای سیستم‌های ابعاد وسیع، نیازمند ابزاری است تا اطلاعات را از زیرسیستم‌ها دریافت کند که غالباً به‌دلیل پیچیدگی این سیستم‌ها امکان‌پذیر نیست. در ساختار متمرکز همیشه از یک پایگاه فرمان برای کل پروسه استفاده شده است، در حالی که

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: babak.r2012@yahoo.com

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲. استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۳. دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

ممکن است به دلیل پیچیدگی و اندازه سیستم‌ها کارآمد نباشد. این محدودیت‌ها باعث ایجاد انگیزه برای طراحی رؤیتگر غیرمتمرکز شده است. در بسیاری از موقعیت‌های عملی، اندازه‌گیری کامل حالت در هر زیرسیستم برای رؤیتگر غیرمتمرکز در دسترس نیست.

رؤیتگرهای غیرمتمرکز برای تخمین حالت هر زیرسیستم توسعه داده شده، به طوری که این رؤیتگرها تنها نیاز به خروجی زیرسیستم‌ها دارند [۲۴-۲۸]. تعدادی از نشریات فقط به مسئله تخمین حالت با استفاده از روش‌های غیرمتمرکز پرداخته‌اند. به علت دشواری بازسازی حالت برای سیستم ابعاد وسیع، تعاملات و اتصالات اجتناب‌ناپذیر از رسیدن خطای تخمین به مقدار صفر جلوگیری می‌کنند. مرجع [۲۹] درباره یک کلاس از سیستم‌های ابعاد وسیع متصل دارای اغتشاش با اتصالات مشخص و در دسترس بحث کرده که برای تخمین حالت‌های هر زیرسیستم، یک رؤیتگر مود لغزشی غیرمتمرکز ارائه کرده است. در مرجع [۳۰] رؤیتگر ساختار متغیر^۲ برای یک کلاس از سیستم‌های ابعاد وسیع دارای اتصال طراحی شده که اتصالات دارای عدم قطعیت هستند.

در بیشتر تحقیقات، رؤیتگرها وظیفه تخمین برخی از حالت‌های سیستم ابعاد وسیع توسط حالت‌های در دسترس و اتصالات شناخته‌شده سیستم دارند؛ اما در سیستم‌های عملی ابعاد وسیع، اطلاعات محدودی از اتصالات بین زیرسیستم‌ها به علت پیچیدگی سیستم‌ها وجود دارد. این امر تخمین حالت زیرسیستم‌ها را دچار مشکل کرده، به تخمین اتصالات بین زیرسیستم‌ها نیاز است. در سیستم‌های مورد مطالعه فرض شده مدل هر زیرسیستم موجود است، اما اتصالات بین زیرسیستم‌ها ناشناخته است و فقط برخی حالت‌ها (خروجی هر زیرسیستم) در دسترس هستند.

در این مقاله، علاوه بر ناشناخته بودن اتصالات و در دسترس نبودن تمام حالت‌های هر زیرسیستم که در [۳۱] بررسی شده، اغتشاش کران‌دار با کران نامشخص به هر زیرسیستم اعمال شده که کران اغتشاش توسط روابط تطبیقی تخمین زده شده و همچنین برای حذف لرزش، از قوانین فازی استفاده شده است. به طور خلاصه، دستاوردهای اصلی این مقاله به شرح زیر است:

غیرمتمرکز، دسترسی به تمام حالت‌های هر زیرسیستم نیاز است که در عمل ممکن نیست. بنابراین به دلیل در دسترس نبودن همه حالت‌ها و هزینه‌بر بودن اندازه‌گیری آن‌ها نیاز به طراحی رؤیتگر برای بازسازی برخی از حالت‌های هر زیرسیستم است.

اولین رؤیتگر در سال ۱۹۶۴ توسط لیونبرگر با هدف صفر کردن خطای بین خروجی واقعی سیستم و خروجی تخمین زده سیستم ارائه شد [۱۰]. بعدها بسیاری از رؤیتگرها با استفاده از این رویکرد، توسعه پیدا کرد تا خطای همگرایی بین حالت واقعی و حالت تخمین‌زده شده صفر گردد [۱۱-۱۵]. با این حال، هنگام ناشناخته بودن برخی از پارامترهای مدل، تخمین مشکل می‌شود [۱۶]. در سال‌های اخیر، طراحان بسیاری به طراحی رؤیتگر تطبیقی پرداخته‌اند که در این تحقیقات، هدف از طراحی رؤیتگر تطبیقی، قرار دادن پارامترها در محدوده معین برای کم کردن خطای همگرایی است. برای رسیدن به این مهم، پارامترها با نرم^۱ محدود فرض می‌شوند تا متعاقباً تخمین زده شوند [۱۷]. اخیراً رؤیتگرهایی توسط نویسندگانی در [۱۸ و ۱۹] پیشنهاد شده که پارامترها کران‌دار و محدود به یک مقدار خاص هستند.

تکنیک مود لغزشی با توجه به ویژگی‌های مهم آن، دارای قابلیت‌هایی از جمله اطمینان بالا در مقابل عدم قطعیت در پارامترهای سیستم برای طراحی رؤیتگر است [۲۰ و ۲۱]. مهم‌ترین مشکل روش مود لغزشی، پدیده لرزش است که اگر عدم قطعیت سیستم‌ها بزرگ باشد، روش مود لغزشی نیاز به افزایش سوئیچینگ زیاد با یک لایه مرزی ضخیم‌تر دارد که این امر باعث لرزش بیشتر می‌شود. برای مقابله با این مشکل، روش‌های مختلفی ارائه شده که یکی از آن‌ها استفاده از منطق فازی برای مقابله با عملکرد تابع علامت است [۲۲]. نظریه مجموعه فازی در سال ۱۹۶۵ توسط لطفی عسگرزاده در دانشگاه برکلی آمریکا عرضه شد. نظریه مجموعه‌های فازی، نظریه‌ای برای اقدام در شرایط عدم اطمینان بوده، قادر است بسیاری از مفاهیم و متغیرها و سیستم‌هایی را که غیردقیق و مبهم هستند، صورت ریاضی ببخشد و زمینه را برای استدلال، استنتاج، کنترل و تصمیم‌گیری در شرایط عدم اطمینان فراهم آورد [۲۳]. طراحی رؤیتگر حالت متمرکز برای سیستم‌های ابعاد وسیع

² Variable structure observers

¹ norm

B_i ماتریس ورودی کنترلی و C_i خروجی زیرسیستم \dot{x}_i ، مشخص و معین هستند. همچنین $f_i(x_i, t)$ اغتشاش توزیعی اعمال شده به زیرسیستم \dot{x}_i و A_{ij} اتصال ناشناخته از زیرسیستم \dot{x}_i به زیرسیستم \dot{x}_j است. ضمناً فرض می شود زوج (A_i, C_i) کاملاً رؤیت پذیر است.

فرض ۱: اغتشاش توزیعی $f_i(x_i, t)$ اعمال شده به زیرسیستم \dot{x}_i کران دار و محدود به مقدار نامشخص ρ_i است.

$$\|f_i(x_i, t)\| \leq \rho_i \quad i=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

فرض ۲: ماتریس اتصالات A_{ij} به صورت زیر تعریف می شود:

$$A_{ij} = B_i H_{ij} \quad (3)$$

که B_i ماتریس ورودی و H_{ij} ماتریس ناشناخته است.

۳- طراحی رؤیتگر مود لغزشی فازی تطبیقی غیرمتمرکز

در این بخش، برای تخمین حالت های سیستم ابعاد وسیع (۱) با اتصالات ناشناخته A_{ij} و اعمال اغتشاش توزیعی $f_i(x_i, t)$ به هر زیرسیستم، رؤیتگر مود لغزشی فازی تطبیقی غیرمتمرکز طراحی می شود. با فرض رؤیت پذیر بودن هر زیرسیستم و برقرار بودن فرض ۱ و ۲، به منظور طراحی رؤیتگر پیشنهادی، ابتدا سطح لغزش مناسب برای هر زیرسیستم انتخاب و به کمک قوانین تطبیقی ماتریس اتصالات ناشناخته H_{ij} ($A_{ij} = B_i H_{ij}$ طبق فرض ۲) تخمین زده می شود و آثار اغتشاش در حالت های تخمینی توسط قوانین فازی مشاهده می گردد. سپس تضمین می شود که حالت های هر زیرسیستم به سمت سطح لغزش میل می کنند. بردار تخمین حالت های $\hat{x}_i(t)$ با $x_i(t)$ نمایش داده شده است. اختلاف بین حالت هر زیرسیستم و تخمین آن به صورت زیر تعریف می شود:

$$e_i(t) = x_i(t) - \hat{x}_i(t) \quad (4)$$

سطح لغزش برای هر زیرسیستم به صورت رابطه (۵) تعریف می شود:

$$s_i(t) = y_i(t) - \hat{y}_i(t) = C_i e_i(t) \quad (5)$$

که $y_i(t)$ ، $\hat{y}_i(t)$ و $s_i(t)$ به ترتیب خروجی، تخمینی توسط رؤیتگر و سطح لغزش زیرسیستم \dot{x}_i هستند. سطح لغزش کلی به صورت زیر تعریف می شود:

- اتصالات ناشناخته به عنوان عدم قطعیت در سیستم های متصل ابعاد وسیع در نظر گرفته شده است.
- روش پیشنهادی نیازی به در دسترس بودن همه حالت های سیستم ندارد.
- رؤیتگر غیرمتمرکز پیشنهادی، سازگار برای تخمین حالت هر زیرسیستم با استفاده از خروجی هر زیرسیستم در حضور اتصالات ناشناخته است.
- منطق فازی سبب کاهش لرزش ناشی از رؤیتگر مود لغزشی است.
- نامشخص بودن کران اغتشاش توزیعی و تخمین کران توسط روابط تطبیقی.

بخش های مختلف این مقاله برای ارائه طرح پیشنهادی به شرح زیر است:

در بخش ۲ معادله سیستم ابعاد وسیع خطی ارائه شده است. طراحی رؤیتگر مود لغزشی فازی تطبیقی غیرمتمرکز در بخش ۳ آورده شده که حالت های هر زیرسیستم توسط رؤیتگر لیونبرگر و مود لغزشی تخمین زده شده و از یک رؤیتگر تطبیقی برای تخمین اتصالات بین زیرسیستم ها استفاده گردیده است. همچنین برای کاهش لرزش ناشی از رؤیتگر مود لغزشی، منطق فازی ارائه شده است. تضمین همگرایی خطا به صفر با انتخاب تابع لیاپانوف و پارامترهای مناسب طراحی در بخش ۴ ارائه گردیده است. در بخش ۵، طرح پیشنهادی روی یک مثال عددی شبیه سازی شده و نتیجه گیری طرح پیشنهادی در بخش ۶ آورده شده است.

۲- بیان مسئله

یک کلاس از سیستم های خطی ابعاد وسیع تشکیل شده از N زیرسیستم با اغتشاش توزیعی را در نظر بگیرید که زیرسیستم \dot{x}_i به شرح زیر است:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i u_i(t) \\ \quad + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N A_{ij} y_j(t) + B_i f_i(x_i, t) \\ y_i(t) = C_i x_i(t) \quad i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (1)$$

که $u_i(t) \in R^{m_i}$ ، $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN}]^T \in R^{n_i}$ و $y_i(t) \in R^{r_i}$ به ترتیب متغیرهای حالت، ورودی کنترلی و خروجی زیرسیستم \dot{x}_i هستند. A_i ماتریس متغیر حالت،

همچنین $R_i(t) = k_{fs_i} G_{fs_i}$ که k_{fs_i} ضریب و G_{fs_i} خروجی کنترل‌کننده فازی است که توسط s_i (سطح لغزش) و \dot{s}_i (مشتق سطح لغزش) نرمالیزه شده تعیین می‌شود. فرم کلی قواعد فازی با در نظر گرفتن دو ورودی s_i و \dot{s}_i و خروجی G_{fs_i} به صورت (۹) است [۲۳، ۳۲ و ۳۳].

R^i : If s_i is A^i and \dot{s}_i is B^i Then

$$G_{fs_i} \text{ is } C_i \quad (9)$$

که در آن، A^i مجموعه فازی متغیر ورودی s_i در قانون نام، B^i مجموعه فازی متغیر ورودی \dot{s}_i در قانون نام و C_i مجموعه فازی متغیر خروجی G_{fs_i} در قانون نام است. در شکل ۱ توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی نشان داده شده است. هر مجموعه فازی به هفت بخش تقسیم شده که این هفت بخش عبارت‌اند از: بزرگ مثبت (PB)، متوسط مثبت (PM)، کوچک مثبت (PS)، صفر (ZE)، کوچک منفی (NS)، متوسط منفی (NM) و بزرگ منفی (NB). قواعد استفاده شده در جدول ۱ آورده شده است.

ماتریس \hat{H}_{ij} تخمین ماتریس ناشناخته اتصالات بین زیرسیستم‌ها (H_{ij})، از رابطه تطبیقی (۱۰) و $\hat{\rho}_i$ تخمین کران از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود که $\Gamma_{H_{ij}}$ و Γ_{ρ_i} پارامترهای افزایش سرعت همگرایی تخمین است.

$$\hat{H}_{ij}^T = y_j(t) s_i^T(t) C_i \Gamma_{H_{ij}} \quad (10)$$

$i, j = 1, 2, \dots, N \quad i \neq j$

$$\hat{\rho}_i^T = B_i \|s_i\| \Gamma_{\rho_i} \quad (11)$$

$i, j = 1, 2, \dots, N \quad i \neq j$

$$S_i(t) = [s_1(t) \dots s_N(t)]^T \quad (6)$$

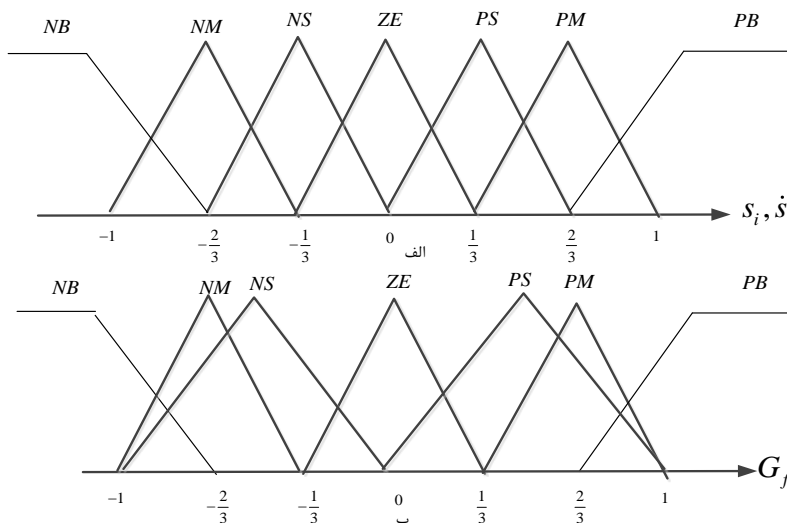
در ادامه، رُویتگر مود لغزشی فازی تطبیقی غیرمتمرکز برای تخمین حالت‌های زیرسیستم (۱) طراحی شده که به خطای بین خروج سیستم و خروجی رُویت‌شده، روابط تطبیقی و عامل لغزش $R_i(t)$ محاسبه شده توسط قوانین فازی بستگی دارد.

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_i(t) = A_i \hat{x}_i(t) + B_i u_i(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N B_i \hat{H}_{ij} y_j(t) \\ \quad + L_i (y_i(t) - \hat{y}_i(t)) + B_i \hat{\rho}_i - B_i R_i(t) \\ \hat{y}_i(t) = C_i \hat{x}_i(t) \quad i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (7)$$

که $L_i \in \mathbb{R}^{n_i \times r_i}$ بهره رُویتگر زیرسیستم نام، \hat{H}_{ij} تخمین ماتریس ناشناخته اتصالات توسط قوانین تطبیقی و $R_i(t)$ عامل لغزش محاسبه شده توسط قوانین فازی است تا خطای همگرایی حالت به سمت صفر میل کند. مشتق زمانی خطای همگرایی $e_i(t)$ به صورت (۸) تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{e}_i(t) &= (A_i - L_i C_i) e_i(t) \\ &+ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N B_i \tilde{H}_{ij} y_j(t) \\ &+ B_i f_i(x_i, t) - B_i \hat{\rho}_i + B_i R_i(t) \end{aligned} \quad (8)$$

که $\tilde{H}_{ij} = H_{ij} - \hat{H}_{ij}$ خطای بین مقدار واقعی (H_{ij}) و مقدار تخمینی (\hat{H}_{ij}) ماتریس اتصالات و $\tilde{\rho}_i = \rho_i - \hat{\rho}_i$ خطای بین کران اغتشاش و کران تخمینی اغتشاش است.



شکل ۱- توابع عضویت متغیرهای ورودی-خروجی [۲۳]: الف) تابع عضویت ورودی‌های s_i, \dot{s}_i ، ب) تابع عضویت خروجی G_{fs_i}

جدول ۱- پایگاه قواعد فازی [۲۲]

G_{fs_i}	$s_i(t)$							
		PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
$\dot{s}_i(t)$	PB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
	PM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
	PS	NB	NM	NM	NS	ZE	PS	PM
	ZE	NM	NS	NS	ZE	PS	PM	PB
	NS	NS	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
	NB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

با مشتق گیری از تابع لیاپانوف داریم:

$$\dot{V}(t) = \sum_{i=1}^N (s_i^T \dot{s}_i + \text{trace} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \dot{H}_{ij}^T \Gamma_{H_{ij}} \tilde{H}_{ij} + \dot{\rho}_i^T \Gamma_{\rho_i} \tilde{\rho}_i) \quad (15)$$

با جای گذاری (۸) در (۱۵) و از آنجا که $\dot{H}_{ij} = 0$ داریم:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \sum_{i=1}^N (s_i^T (C_i((A_i - L_i C_i) e_i(t) \\ & + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N B_j \tilde{H}_{ij} y_j(t) \\ & + B_i f_i(x_i, t) - B_i \hat{\rho}_i + B_i R_i(t)) \\ & - \text{trace} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \dot{H}_{ij}^T \Gamma_{H_{ij}} \tilde{H}_{ij} - \dot{\rho}_i^T \Gamma_{\rho_i} \tilde{\rho}_i) \end{aligned} \quad (16)$$

از لم ۱ نتیجه می شود:

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N s_i^T C_i B_j \tilde{H}_{ij} y_j = \text{trace} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N y_j s_i^T C_i B_j \tilde{H}_{ij} \quad (17)$$

با جای گذاری معادله (۱۷) در معادله (۱۶) و ساده سازی، داریم:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & \sum_{i=1}^N \{-\lambda_{\min}(Q_i) \|s_i\|^2 \\ & + B_i \tilde{\rho}_i \|s_i\| + B_i R_i(t) - \dot{\rho}_i^T \Gamma_{\rho_i} \tilde{\rho}_i\} \end{aligned} \quad (18)$$

که $\lambda_{\min}(Q_i)$ کوچک ترین مقدار ویژه Q_i است [۲۹]. با استفاده از خواص نرم ماتریس ($\|AB\| \leq \|A\| \|B\|$) و جای گذاری (۱۱) در (۱۸) داریم:

۴- آنالیز همگرایی

در قضیه ۱ تضمین می شود که توسط طرح رویتگر مود لغزشی فازی تطبیقی غیرمتمرکز پیشنهادی، خطای همگرایی سیستم ابعاد وسیع (۱) با اتصالات ناشناخته و اغتشاش توزیعی، به صفر میل می کند.

قضیه ۱: اگر فرض رویت پذیری هر زیرسیستم برای سیستم ابعاد وسیع (۱) درای اغتشاش توزیعی و اتصالات ناشناخته برقرار باشد، با انتخاب تابع لیاپانوف (۱۴)، تخمین حالت های زیرسیستم توسط رویتگر (۷) تضمین می شود که فازی (جدول ۱)، L_i بهره رویتگر، \hat{H}_{ij} تخمین آثار زیرسیستم λ_m بر زیرسیستم نام توسط روابط تطبیقی (۱۰) و $\hat{\rho}_i$ (۱۱) تخمین کران اغتشاش است.

لم ۱: از خواص اثر^۱ برای دو بردار a, b داریم: (رابطه 10.21 صفحه ۲۹۶ از مرجع [۳۴])

$$a^T b = \text{trace}(ba^T) \quad (12)$$

لم ۲: ماتریس مثبت معین^۲ Q_i به صورت زیر وجود دارد:

$$C_i (A_i - L_i C_i) C_i^+ = -Q_i \quad (13)$$

که $C_i^+ = C_i^T (C_i C_i^T)^{-1}$ معکوس راست ماتریس^۳ C_i است [۲۹].

اثبات قضیه ۱: تابع لیاپانوف $V(t)$ به صورت (۱۴) انتخاب شده است.

$$\begin{aligned} V(t) = & \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} s_i^T s_i + \\ & \frac{1}{2} \text{trace} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \tilde{H}_{ij}^T \Gamma_{H_{ij}} \tilde{H}_{ij} + \frac{1}{2} \tilde{\rho}_i^T \Gamma_{\rho_i} \tilde{\rho}_i \end{aligned} \quad (14)$$

³ Right inverse

⁴ Minimum positive eigenvalue of Q_i

¹ trace

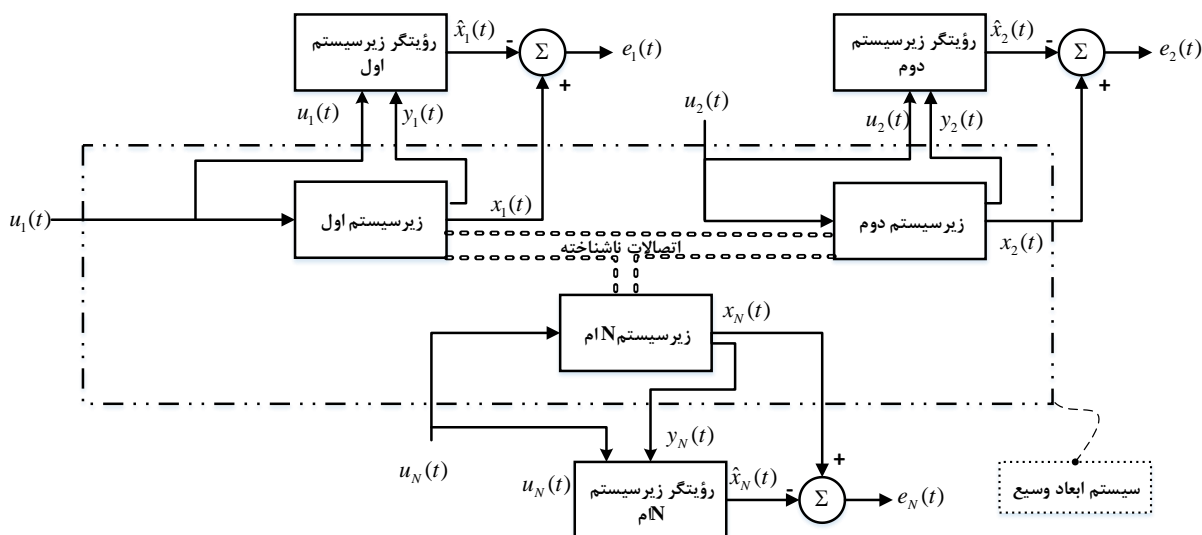
² Positive definite matrix

$$\dot{V}(t) \leq \sum_{i=1}^N \{-\lambda_{\min}(Q_i) \|s_i\|^2 - \|B_i\| (k_{fs_i}) \|s_i\|\} \quad (19)$$

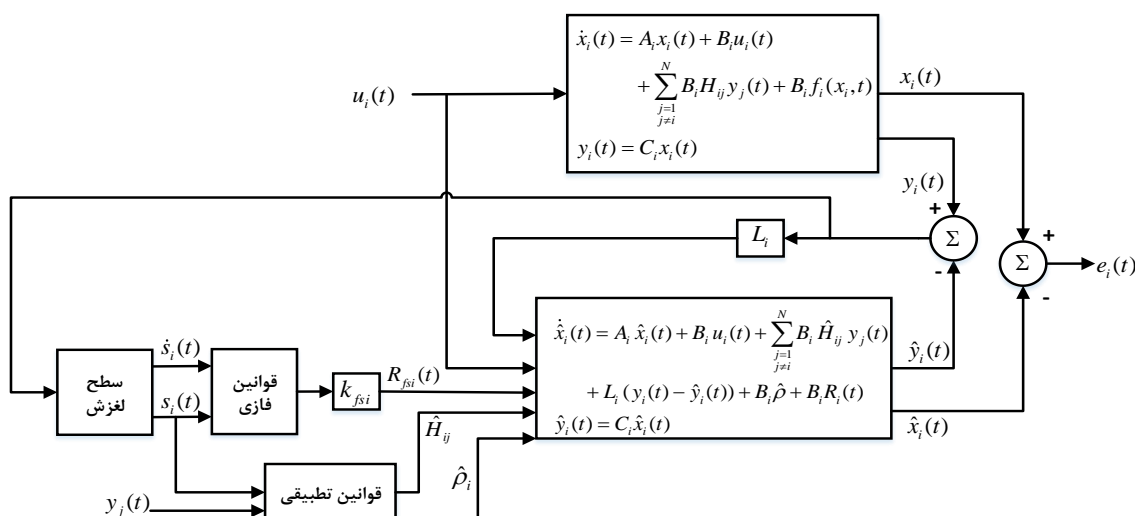
که با انتخاب $k_{fs_i} > 0, (i=1,2,\dots,N)$ ، $\dot{V}(t) < 0$ شده،
 صفر شدن خطای همگرایی تضمین می‌شود.
 در الگوریتم ۱ مراحل طراحی رُویتگر پیشنهادی ارائه شده است.

الگوریتم ۱: مراحل طراحی رُویتگر مود لغزشی فازی تطبیقی غیرمترکز برای کلاسی از سیستم‌های متصل خطی با اتصالات ناشناخته در حضور اغتشاش.
هدف: صفر شدن خطای همگرایی، تخمین اغتشاش و کاهش لرزش برای سیستم‌های متصل که آثار بین

زیرسیستم‌ها نامعین است.
مفروضات: هر زیرسیستم رُویت پذیر بوده، هیچ اطلاعاتی از اتصالات بین زیرسیستم‌ها در اختیار نیست و اغتشاش خارجی وارد شده به هر زیرسیستم کران‌دار و محدود (طبق فرض ۱) است.
گام ۱: تعیین بهره رُویتگر L_i برای هر زیرسیستم.
گام ۲: تعیین سطح لغزش (δ) توسط معادله خطا (۴).
گام ۳: تخمین اتصالات بین زیرسیستم‌ها توسط قوانین تطبیقی (۱۰).
گام ۴: محاسبه $G_i(t)$ توسط منطق فازی.
گام ۵: انتخاب k_{fs_i} برای هر زیرسیستم به گونه‌ای که $k_{fs_i} > 0$.



شکل ۲ بلوک دیاگرام طرح رُویتگر مود لغزشی فازی تطبیقی غیرمترکز برای سیستم ابعاد وسیع (۱)



شکل ۳- جزئیات طراحی رُویتگر پیشنهادی برای تخمین زیرسیستم i ام

برای هر زیرسیستم انتخاب شده و برای شبیه‌سازی، ورودی کنترلی صفر در نظر گرفته شده است.

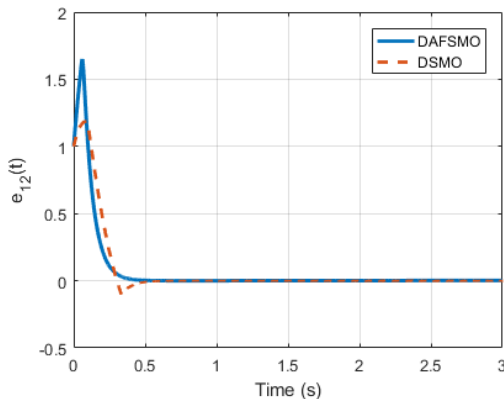
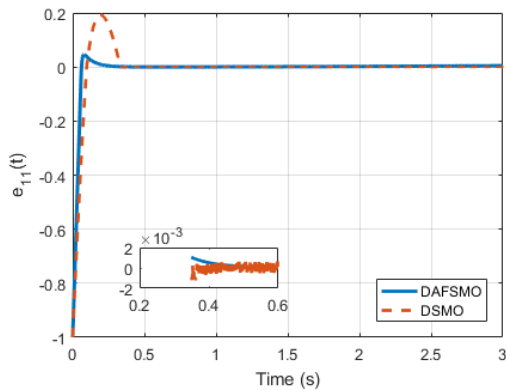
با بررسی (A_1, C_1) و (A_2, C_2) رؤیت‌پذیری هر دو زیرسیستم را می‌توان نتیجه گرفت. گین‌های رؤیتگر پیشنهادی (۷) برای سیستم ابعاد وسیع با زیرسیستم‌های (۲۰) و (۲۱) در (۲۳) انتخاب شده است.

$$L_1 = [2 \ 0]^T \quad (23)$$

$$L_2 = [2 \ 0]^T$$

که با انتخاب L_1 و L_2 مقادیر ویژه ماتریس‌های $A_1 - L_1 C_1$ و $A_2 - L_2 C_2$ به ترتیب $\lambda = \{-1, -4\}$ و $\lambda = \{-1, -3\}$ هستند.

برای تضمین صفر شدن خطای همگرایی، مقادیر $k_{fs_i} = 2$ ($i = 1, 2$) انتخاب شده‌اند.



شکل ۴- خطای همگرایی زیرسیستم اول $(e_1(t))$

برای مقایسه، روش رؤیتگر مود لغزشی غیرمتمرکز [۲۹] با فرض اتصالات شناخته‌شده و مشخص بودن کران اغتشاش برای سیستم ابعاد وسیع طراحی شده است. در شکل ۴ زمانی خطای همگرایی $e_{11}(t)$ و $e_{12}(t)$ برای زیرسیستم اول و در شکل ۵ خطای همگرایی $e_{21}(t)$ و $e_{22}(t)$ برای زیرسیستم دوم مشاهده می‌شود. از شکل ۴ و شکل ۵

بلوک دیاگرام کلی طرح پیشنهادی رؤیتگر غیرمتمرکز در شکل ۲ نشان داده شده است. y_i خروجی، x_i متغیر حالت، \hat{x}_i تخمین متغیر حالت و e_i خطای همگرایی زیرسیستم نام ($i=1,2,\dots,N$) است. جزئیات طراحی رؤیتگر پیشنهادی برای زیرسیستم نام در شکل ۳ آورده شده است. شکل ۲ و شکل ۳ ماهیت غیرمتمرکز بودن طرح پیشنهادی را نشان می‌دهند.

۵- مثال عددی

در این بخش، برای نشان دادن اثربخشی روش پیشنهادی، یک مثال عددی با دو زیرسیستم در نظر گرفته شده که معادلات فضای حالت و خروجی برای زیرسیستم اول و زیرسیستم دوم به ترتیب در (۲۰) و (۲۱) آورده شده است.

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = \begin{bmatrix} -1 & 5 \\ 0 & -4 \end{bmatrix} x_1(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} u_1(t) \\ \quad + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 2 & 0 \end{bmatrix} x_2(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} f_1(x_i, t), \\ y_1(t) = [1 \ 0] x_1(t) \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_2(t) = \begin{bmatrix} -1 & 3 \\ 0 & -3 \end{bmatrix} x_2(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} u_2(t) \\ \quad + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} x_1(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} f_2(x_i, t), \\ y_2(t) = [1 \ 0] x_2(t) \end{cases} \quad (21)$$

که $x_1(t) = \begin{bmatrix} x_{11}(t) \\ x_{12}(t) \end{bmatrix}$ و $x_2(t) = \begin{bmatrix} x_{21}(t) \\ x_{22}(t) \end{bmatrix}$ است.

اغتشاش توزیعی برای هر زیرسیستم انتخاب شده به صورت زیر است:

$$f_1(x_i, t) = 0.15 \sin(x_{12}) + 0.04 [\text{sign}(\sin(2t)) + 1], \quad (22)$$

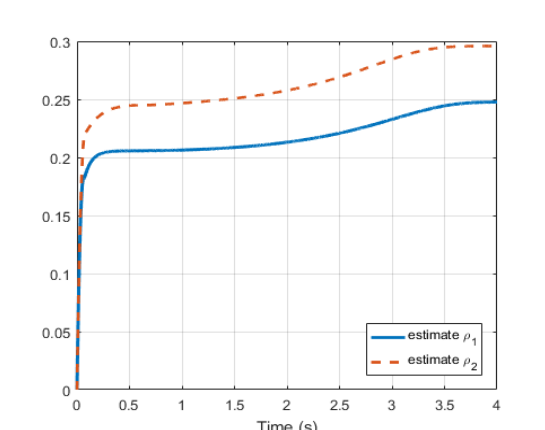
$$f_2(x_i, t) = 0.2 \sin(x_{21}) - 0.1 \cos(x_{22}) + 0.04 [\text{sign}(\sin(2t)) + 1]$$

مقادیر اولیه به صورت

$$[x_{11}(0) \ x_{12}(0)]^T = [-1 \ 1]^T$$

$$[x_{21}(0) \ x_{22}(0)]^T = [1 \ -1]^T$$

و

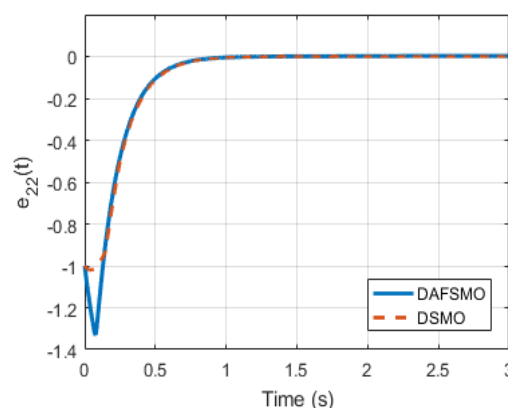
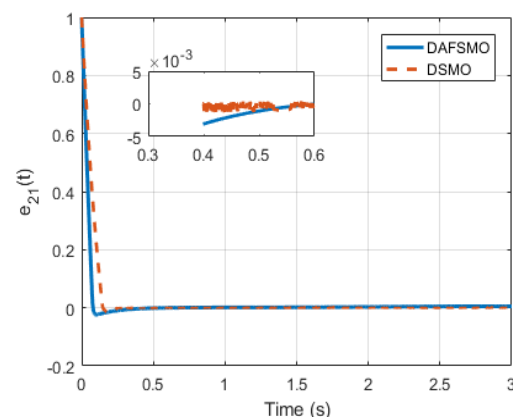


شکل ۶- تخمین کران اغتشاش اعمال شده به هر زیرسیستم

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، طراحی رباتگر مود لغزشی فازی تطبیقی غیرمتمرکز برای تخمین حالت‌های سیستم‌های ابعاد وسیع ارائه شد. با استفاده از اطلاعات خروجی و ترکیب رباتگر لیونبرگر و مود لغزشی فازی به تخمین حالت‌های غیرقابل اندازه‌گیری پرداخته شد. همچنین توسط روابط تطبیقی آثار اتصالات بین زیرسیستم‌ها که نامشخص و نامعین بوده، به هر زیرسیستم اعمال گردید و در نهایت کران اغتشاش توسط روابط تطبیقی تخمین زده شد. با انتخاب یک تابع لیاپانوف مناسب و پارامترهای طراحی رباتگر، ثابت گردید که خطای همگرایی به صورت مجانبی به سمت صفر میل می‌کند. نتایج شبیه‌سازی و مقایسه با روش مود لغزشی غیرمتمرکز با فرض شناخته بودن اتصالات [۲۹] نشان داد روش پیشنهادی برای صفر کردن خطای همگرایی با استفاده از اطلاعات خروجی هر زیرسیستم که دارای اغتشاش با کران نامشخص و اتصالات ناشناخته بین زیرسیستم‌ها بوده، کارآمد و مؤثر است.

مشاهده می‌شود حالت‌های تخمینی، حالت‌های سیستم را دنبال کرده، خطای همگرایی مجانبی به صفر میل می‌کند. از مقایسه روش پیشنهادی با روش مود لغزشی غیرمتمرکز [۲۹] نتیجه می‌شود که روش پیشنهادی با فرض ناشناخته بودن اتصالات و نامشخص بودن کران اغتشاش، عملکرد مطلوبی دارد و اثر لرزش را حذف می‌کند. در شکل (۶) تخمین کران اغتشاش ($\hat{\rho}_1$ و $\hat{\rho}_2$) اعمال شده به هر زیرسیستم مشاهده می‌شود.



شکل ۵- خطای همگرایی زیرسیستم دوم ($e_2(t)$)

مراجع

- [1] T. Bian, Y. Jiang and Z.-P. Jiang, "Decentralized adaptive optimal control of large-scale systems with application to power systems", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62(4), 2014, pp. 2439-2447.
- [2] M.H. Soliman, and M.F. Hassan, "Resilient guaranteed cost control of a power system", Journal of advanced research, 5(3), 2014, pp. 377-385.
- [3] V.N. Phat, N.T. Thanh and H. Trinh, "Full-Order observer design for nonlinear complex large-scale systems with unknown time-varying delayed interactions", Complexity, 21(2), 2015, pp. 123-133.
- [4] V. Phat, N. Thanh and H. Trinh, "New results on H_∞ filtering for nonlinear large-scale systems with interconnected time-varying delays", Optimal Control Applications and Methods, 37(5), 2016, pp. 948-964.
- [5] S. Sui, S. Tong and C.P. Chen, "Finite-time filter decentralized control for nonstrict-feedback nonlinear large-scale systems", IEEE Transactions on Fuzzy systems, 26(6), 2018, pp. 3289-3300.
- [6] Y. Li, K. Sun and S. Tong, "Adaptive fuzzy robust fault-tolerant optimal control for nonlinear large-scale systems". IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 26(5), 2018, pp. 2899-2914.

- [7] C. Liu et al., "Integral reinforcement learning based decentralized optimal tracking control of unknown nonlinear large-scale interconnected systems with constrained-input", *Neurocomputing*, 323, 2019, pp. 1-11.
- [8] N. Hovakimyan et al., "Coordinated decentralized adaptive output feedback control of interconnected systems", *IEEE Transactions on Neural Networks*, 16(1), 2005, pp. 185-194.
- [9] S.N. Huang, K.K. Tan and T.H. Lee, "A decentralized control of interconnected systems using neural networks", *IEEE Transactions on Neural Networks*, 13(6), 2002, pp. 1554-1557.
- [10] D.G. Luenberger, "Observing the state of a linear system", *IEEE transactions on military electronics*, 8(2), 1964, pp. 74-80.
- [11] M. Mohamed et al., "Robust sliding-mode observers for large-scale systems with application to a multimachine power system", *IET Control Theory & Applications*, 11(8), 2016, pp. 1307-1315.
- [12] W. Han et al., " L_∞ observer for uncertain linear systems", *Asian Journal of Control*, 21(1), 2019, pp. 632-638.
- [13] Y.W. Wang et al., "Generalized extended state observer based control for networked interconnected systems with delays" *Asian Journal of Control*, 20(3), 2018, pp. 1253-1262.
- [۱۴] حمید نوری سولا، بهار احمدی، عسکر عزیزی و امیر ریخته‌گر غیائی، «مقاوم‌سازی سیستم‌های شناور مغناطیسی با استفاده از کنترل کننده خطی‌ساز فیدبک گام به عقب با ریتگر اغتشاش غیرخطی»، *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۵، شماره ۴۹، تابستان ۱۳۹۶، صفحه ۲۹-۳۸.
- [۱۵] عبدالله عباسی و سمانه سادات آقاعمو، «طراحی کنترل تطبیقی L_1 برای پایدارسازی سیستم‌های آشوبناک با وجود نامعینی در مدل»، *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۶، شماره ۵۲، بهار ۱۳۹۷، صفحه ۱۷۱-۱۸۱.
- [16] G. Besançon, "Remarks on nonlinear adaptive observer design", *Systems & control letters*, 41(4), 2000, pp. 271-280.
- [17] R. Marine, G.L. Santosuosso and P. Tomei, "Robust adaptive observers for nonlinear systems with bounded disturbances", *IEEE Transactions on automatic control*, 46(6), 2001, pp. 967-972.
- [18] Y. Liu, "Robust adaptive observer for nonlinear systems with unmodeled dynamics", *Automatica*, 45(8), 2009, pp. 1891-1895.
- [19] L. Yu, G. Zheng and D. Boutat, "Adaptive observer for simultaneous state and parameter estimations for an output depending normal form", *Asian Journal of Control*, 19(1), 2017, pp. 356-361.
- [20] X.-G. Yan and C. Edwards, "Fault estimation for single output nonlinear systems using an adaptive sliding mode estimator", *IET Control Theory & Applications*, 2(10), 2008, pp. 841-850.
- [21] V. Utkin, J. Guldner and J. Shi, *Sliding mode control in electro-mechanical systems*, CRC press, 2009.
- [22] H.-T. Yau and C.-L. Chen, "Chattering-free fuzzy sliding-mode control strategy for uncertain chaotic systems", *Chaos, Solitons & Fractals*, 30(3), 2006, p. 709-718.
- [۲۳] روح‌الله مقصودی، یعقوب حیدری و بهزاد مشیری، «یک تحلیل مقایسه‌ای از الگوریتم‌های هوش جمعی کلونی زنبور مصنوعی و بهینه‌سازی گروهی ذرات در طراحی یک کنترل‌کننده PID فازی کسری و پیاده‌سازی آن بر روی موتور DC»، *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۲، شماره ۳۹، صفحه ۱۱-۲۳.
- [24] Z.-P. Jiang, "Decentralized and adaptive nonlinear tracking of large-scale systems via output feedback", *IEEE Transactions on Automatic control*, 45(11), 2000, pp. 2122-2128.
- [25] K.S. Narendra and N.O. Oleng, "Exact output tracking in decentralized adaptive control systems", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 47(2), 2002, pp. 390-395.
- [26] M. Aldeen and J. Marsh, "Decentralised observer-based control scheme for interconnected dynamical systems with unknown inputs", *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 146(5), 1999, pp. 349-358.
- [27] S.S. Stanković, D.M. Stipanović and D.D. Šiljak, "Decentralized dynamic output feedback for robust stabilization of a class of nonlinear interconnected systems", *Automatica*, 43(5), 2007, pp. 861-867.
- [28] A. Tlili and N.B. Braiek, "Systematic linear matrix inequality conditions to design a robust decentralised observer-based optimal control for interconnected systems", *IET Control Theory & Applications*, 6(18), 2012, pp. 2737-2747.

[29] W.J. Liu, "Decentralized Observer Design for a Class of Nonlinear Uncertain Large Scale Systems with Lumped Perturbations", *Asian Journal of Control*, 2016.

[30] M. Mohamed et al., "Variable structure observers for nonlinear interconnected systems", in *Advances in Variable Structure Systems and Sliding Mode Control—Theory and Applications*, 2018, Springer, pp. 195-221.

[31] B. Ranjbar, A. Ranjbar Noiey and B. Rezaie, "Adaptive sliding mode observer-based decentralized control design for linear systems with unknown interconnections", *Journal of Vibration and Control*, 2020, p. 1077546320925359.

[۳۲] حسین ناهید تیتکانلو، عباس کرامتی و رکسانا فکری، «مدل‌سازی عدم قطعیت در فرایند ارزیابی عملکرد کارکنان مبتنی بر تئوری شواهد و تئوری فازی»، *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۵، شماره ۵۱، تابستان ۱۳۹۶، صفحه ۴۱۱-۴۳۲.

[۳۳] حمید کوهساری، امیر نجفی، حمید علی‌الهی و محمد آدم‌پیرا، «بررسی عوامل مؤثر بر عملیات تراکم دینامیکی در خاک‌های دانه‌ای مبتنی بر روش فازی»، *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۳، شماره ۴۳، زمستان ۱۳۹۴، صفحه ۱۴۳-۱۵۸.

[34] P.A. Ioannou and J. Sun, *Robust adaptive control*, Courier Corporation, 2012.