

# طراحی یک کنترل‌کننده تطبیقی افق پیش‌رونده مبتنی بر سیستم استنتاج فازی *TSK* برای یک سیستم دینامیکی غیرخطی

حسین الیاسی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۸/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۴/۱۶

## چکیده

در این مقاله، مراحل طراحی یک کنترل‌کننده تطبیقی افق پیش‌رونده چند مدلی برای یک سیستم دینامیکی غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته است. برای پیاده‌سازی این ساختار کنترلی از سیستم استنتاج فازی تاکاگی-سوگنو-کنگ *TSK* برای پیش‌بینی کردن رفتار سیستم دینامیکی روی یک افق پیش‌رونده استفاده شده است. در کنترل‌کننده پیشنهادی، بخش خطی مدل فازی *TSK* به عنوان یک مدل خطی برای پیاده‌سازی کنترل‌کننده افق پیش‌رونده چند مرحله‌ای برای محاسبه دنباله ورودی کنترلی بهینه مورد استفاده قرار می‌گیرد. تخمین پارامترهای این بخش از *TSK* برعهده یک قانون تطبیق بازگشتی برخط بوده و پارامترهای بخش تالی مدل *TSK* به صورت برون خط تعیین می‌گردند. برای تولید مدل فازی، فضای ورودی-خروجی به کمک خوشه‌بندی فازی تقسیم بندی می‌شود. هر خوشه یک ناحیه عملکردی از سیستم دینامیکی پیچیده را در فضای ورودی-خروجی نمایش می‌دهد. در استراتژی کنترلی پیشنهادی، فرض بر این است که متغیرهای استفاده شده در بخش تالی قواعد همان متغیرهای مورد استفاده در بخش پیرو قواعد هستند. (ادامه دارد)

عبارات و کلمات کلیدی: کنترل افق پیش‌رونده، سیستم استنتاج فازی تاکاگی-سوگنو-کنگ، قانون تطبیق، سیستم دینامیکی غیرخطی

Email(s): h\_eliasi@birjand.ac.irr.

۱۴۰۰ انجمن سیستم‌های فازی ایران

Mathematics Subject Classification (2010): 93C42

برای کنترل مناسب سیستم غیرخطی از یک مدل چندگانه روی افق پیش‌رونده استفاده می‌شود. به منظور ارزیابی استراتژی کنترلی پیشنهادی، ساختار کنترلی پیشنهادی برای کنترل توان یک راکتور هسته‌ای در مسئله تعقیب بار مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده عملکرد خوب ساختار کنترلی پیشنهادی است.

## ۱ مقدمه

اغلب فرآیندهای صنعتی دارای دینامیک غیرخطی بوده و مقید به یکسری قیود روی سیگنال کنترلی و متغیرهای حالت سیستم هستند. یکی از استراتژی‌های کنترلی کارآمد در کنترل این سیستم‌ها، کنترل افق پیش‌رونده<sup>۱</sup> می‌باشد [۱۰]. در این استراتژی کنترلی، از یک مدل دینامیکی برای پیش‌بینی کردن رفتار سیستم روی یک افق پیش‌روند استفاده می‌شود. سپس با در نظر گرفتن یک تابع هزینه و یکسری قیود روی متغیرهای حالت، سیگنال کنترلی و خروجی سیستم، قانون کنترلی به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که تابع هزینه در نظر گرفته شده روی افق پیش‌رونده کمینه شود. اغلب، مدل دینامیکی در نظر گرفته شده برای پیش‌بینی کردن رفتار سیستم، همان معادلات دینامیکی سیستم است. در حالی که مدل دینامیکی سیستم از پیچیدگی غیرخطی بالایی برخوردار باشد، ممکن است  $RHC$  عملکرد چندان مطلوبی نداشته باشد [۶]. در چنین مواردی، یک راه‌کار، استفاده از مدل‌های خطی چندگانه<sup>۲</sup> است. در این حالت مسئله  $RHC$  به شکل یک مسئله نامساوی ماتریسی خطی<sup>۳</sup> فرمول‌بندی می‌شود نتیجه حل این مسئله بدست آوردن یک ماتریس مثبت معین است که بتواند تمام قیود  $LMI$  های حاصل برای تمام مدل‌های محلی استخراج شده برای سیستم دینامیکی غیرخطی را برآورده سازد [۳، ۸، ۱۲]. در حالت کلی حل چنین مسئله‌ای ممکن است امکان‌پذیر نبوده و بدست آوردن چنین ماتریس در موارد زیادی که سیستم از درجه غیرخطی بالایی برخوردار است ممکن نخواهد بود. راه‌کار دیگر استفاده از یک مدل است که در حالت کلی غیرخطی بوده و به‌صورت

---

<sup>۱</sup> - Control Horizon Receding (RHC)  
<sup>۲</sup> Models Linear Multiple  
<sup>۳</sup> (LMI) Inequality Matrix Linear

محلی خطی باشد. سیستم استنتاج فازی  $TSK$  <sup>۴</sup> چنین ویژگی را دارد. سیستم استنتاج فازی  $TSK$  در سال ۱۹۸۵ برای مدلسازی رفتار سیستم‌های دینامیکی و کنترل آنها معرفی شد [۵]. در این مدلسازی، سیستم غیرخطی به تعدادی زیرسیستم خطی تقسیم می‌شود. سپس با استفاده از منطق فازی، برای هر زیرسیستم یک مدل تجربی شبه‌خطی توسعه داده می‌شود. رفتار کلی سیستم غیرخطی، بوسیله یک مجموع وزن یافته از خروجی‌های خروجی‌های تمام سیستم‌های شبه‌خطی مشخص می‌شود. این سیستم برای تقریب زدن سیستم‌های غیرخطی حقیقی خیلی مفید است. این سیستم این قابلیت را دارد که یک الگوریتم  $RHC$  خطی را به یک رهیافت کنترلی غیرخطی تبدیل کند [۷، ۱۳، ۱۴]. از بخش خطی این مدل می‌توان به عنوان یک مدل خطی در مسئله  $RHC$  استفاده کرد. در [۶]، یک کنترل‌کننده پیش‌بین مبتنی بر مدل فازی برای سیستم‌های دینامیکی غیرخطی داری تاخیر طراحی شده است. در این روش از معادلات حالت سیستم برای تعیین بخش پیرو سیستم فازی  $TSK$  استفاده شده است و پارامترها ثابت در نظر گرفته شده است. مهمترین اشکال این ساختار کنترلی این است که با توجه به ثابت در نظر گرفته شدن پارامترهای بخش پیرو مدل  $TSK$ ، این ساختار کنترلی نمی‌تواند در مقابل تغییرات پارامترهای سیستم اصلی مقاوم بوده و تغییر در پارامترهای سیستم اصلی باعث انحراف عملکرد این کنترل‌کننده خواهد شد. در تحقیق دیگری از مدل فازی  $TSK$  به عنوان یک مدل پایه در طراحی کنترل‌کننده برای یک سیستم دیگ بخار-توربین استفاده شده است [۱۷]. در این استراتژی کنترلی، همچنان پارامترهای مدل  $TSK$  ثابت فرض شده‌اند. علاوه بر موارد اشاره شده از ترکیب سیستم استنتاج فازی و کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل برای کنترل کوره‌های احتراق زیست توده مقیاس کوچک [۲] و کنترل اتومبیل در جاده‌های تپه‌ای [۱] استفاده شده است. همچنین تحقیقاتی در زمینه پیاده‌سازی  $RHC$  بر پایه مدل‌های فازی بر مبنای  $KRR$  <sup>۵</sup> [۱۵، ۱۶] انجام شده است. عمده‌ترین عیب این روش‌ها عدم تطبیق پارامترها به منظور اصلاح مدل محلی و حجم محاسبات بالا می‌باشد. در این مقاله، از سیستم استنتاج فازی  $TSK$  برای تولید یک مدل محلی-خطی برای یک سیستم غیرخطی استفاده می‌شود. پارامترهای بخش پیرو این مدل به صورت برخط با الگوریتم تخمین پارامتر بازگشتی به نام حداقل مربع بازگشتی

طراحی یک کنترل کننده تطبیقی افق پیش‌رونده مبتنی بر سیستم استنتاج فازی — ۱۷۴

وزن یافته<sup>۶</sup> به روز می‌شوند [۱۱]. سپس از این مدل محلی-خطی برای استخراج یک قانون کنترلی  $RHC$  برای یک سیستم غیرخطی استفاده می‌شود. سایر بخش‌های مقاله به این صورت است که در بخش دو، سیستم فازی با مدل‌های محلی-خطی معرفی می‌شود. در بخش سه معرفی استراتژی کنترلی  $RHC$  پرداخته می‌شود. در بخش چهار، استراتژی کنترلی پیشنهادی روی یک سیستم غیرخطی که در اینجا یک راکتور هسته‌ای است، پیاده‌سازی می‌شود. نهایتاً در بخش ۵، مقاله جمع‌بندی و نتیجه‌گیری می‌شود.

## ۲ سیستم فازی $TSK$ با مدل‌های محلی خطی

مدل فازی  $TSK$ ، ابزاری قدرتمند در توصیف سیستم‌های پیچیده با درجه غیرخطی بالا است. ایده اصلی برای مدل‌سازی یک سیستم پیچیده با  $TSK$  این است که آن سیستم را می‌توان ترکیبی از تعدادی زیرسیستم در نظر گرفت که با یکدیگر اتصال داخلی دارند. هر کدام از این زیرسیستم‌ها می‌تواند یک سیستم خطی حول یک نقطه کاری مشخص یا یک سیستم غیرخطی با درجه پیچیدگی پایین‌تر نسبت به سیستم اصلی باشد. به منظور فرمول‌بندی مسئله، مدل سیستم پیچیده به شکل کلی زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$x(k+1) = f(x(k), u(k)), \quad (1)$$

$$y(k) = h(x(k), u(k)) \quad (2)$$

بطوریکه  $x(\cdot)$  بردار حالت سیستم،  $u(\cdot)$  ورودی سیستم و  $y(\cdot)$  خروجی سیستم است. با فرض اینکه فضای ورودی-حالت-خروجی سیستم پیچیده به ناحیه تقسیم‌بندی شود، سیستم فازی  $LLM - TSK$  به شکل زیر قابل توصیف است:

$$R_i : \text{IF } Q \text{ is } A_i \text{ THEN } \hat{y}_i(k+1) = \theta_i^T X$$

بطوریکه

$$\begin{aligned} Q^T &= [y(k), y(k-1), \dots, y(k-n_a+1), u(k), u(k-1), \dots, u(k-n_b)] \\ X^T &= [y(k), y(k-1), \dots, y(k-n_a+1), u(k), u(k-1), \dots, u(k-n_b), 1] \\ \theta_i^T &= [a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,n_a}, b_{i,1}, b_{i,2}, \dots, b_{i,n_b}, c_i] \end{aligned} \quad (3)$$

$y(\cdot)$  و  $u(\cdot)$  به ترتیب خروجی سیستم پیچیده و ورودی آن در هر نمونه زمانی و  $\hat{y}_i(\cdot)$  خروجی قاعده  $i$  ام است.  $A_i$  مجموعه فازی مربوط به  $i$  امین قاعده و  $\theta_i^T$  بردار پارامترهای  $i$  ام زیرسیستم است. خروجی سیستم فازی  $LLM - TSK$  به شکل محاسبه می‌شود:

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^P \omega_i(X) y_i(X) \quad (4)$$

بطوریکه  $\omega_i(X)$  شدت تحریک نرمال شده

$i$  امین قاعده است و به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\omega_i(X) = \frac{\lambda_i(X)}{\sum_{i=1}^P \lambda_i(X)} \quad (5)$$

به این ترتیب با استفاده از نمایش ورودی-خروجی سیستم  $LLM - TSK$  ، خروجی سیستم فازی به شکل زیر قابل بیان است:

$$\begin{aligned} \hat{y}(k+1) &= \sum_{j=1}^{n_a} \bar{a}_j(k) y(k-j+1) \\ &+ \sum_{j=1}^{n_b} \bar{b}_j(k) u(k-j+1) + \bar{c}(k) \end{aligned}$$

بطوریکه

$$\begin{aligned}\bar{a}_j(k) &= \sum_{i=1}^P \omega_i(X) a_{i,j} \\ \bar{b}_j(k) &= \sum_{i=1}^P \omega_i(X) b_{i,j} \\ \bar{c}(k) &= \sum_{i=1}^P \omega_i(X) c_i\end{aligned}$$

با ساختار در نظر گرفته شده برای  $LLM - TSK$ ، هر مدل خطی در هر قاعده یک  $ARX$  خواهد بود. در اینجا فرض بر این است که تمام مدل‌های خطی محلی درجه یکسانی  $(n_a, n_b)$  دارند.

## ۱.۲ پیکربندی $LLM - TSK$

برای تولید مدل فازی  $LLM - TSK$  لازم است فضای ورودی-خروجی تقسیم‌بندی شود. برای این تقسیم‌بندی می‌توان از خوشه‌بندی فازی کمک گرفت. در خوشه‌بندی فازی [۱۰]، هر خوشه یک ناحیه عملکردی از سیستم دینامیکی پیچیده را در فضای ورودی-خروجی نمایش می‌دهد. خوشه‌بندی فازی، تعداد قواعد و شکل توابع عضویت به‌کار گرفته شده در بخش تالی [۱۱] را تعیین می‌کند. برای تعیین پارامترهای مدل‌های خطی محلی به کار رفته در بخش پیرو [۱۲] قواعد از یک الگوریتم استاندارد کمترین مربعات استفاده می‌شود. در استراتژی کنترلی پیشنهادی، فرض بر این است که متغیرهای استفاده شده در بخش تالی قواعد همان متغیرهای مورد استفاده در بخش پیرو قواعد هستند. برای تعیین پارامترهای مدل‌های خطی محلی از  $N$  مجموعه داده استفاده می‌شود. با فرض اینکه مقدار ثابت هر مدل خطی محلی  $(c_i)$  برابر صفر باشد، هر کدام از مجموعه‌های داده به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned}X_i &= [y_i(k), y_i(k-1), \dots, y_i(k-n_a+1), u_i(k), u_i(k-1), \dots, \\ &u_i(k-n_b), y_i(k+1)], \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (6)\end{aligned}$$

در ادامه به منظور اینکه بتوان با کمک یک الگوریتم کمترین مربعات، پارامترهای مدل‌های خطی محلی را تعیین کرد، ماتریس‌های قطری  $W_i$ ,  $i = 1, \dots, p$  هر کدام با بعد  $N \times N$  تعریف می‌شود.

همچنین برای اینکه بتوان خروجی سیستم LLM-TSK برای هر مجموعه داده را به شکل یک رگرسیون خطی نمایش داد،

ماتریس  $\tilde{X}$  به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\tilde{X} = [W_1, W_2 \dots, W_P] X_e \quad (۷)$$

بطوریکه  $X_e$  ماتریسی است که سطر  $i$  ام آن مجموعه داده  $X_i$  است. به این ترتیب، پارامترهای مدل‌های خطی محلی مدل  $LLM - TSK$  در بردار  $\tilde{\theta}$  با بُعد  $pn \times 1$  به شکل زیر گروه‌بندی می‌شود:

$$\tilde{\theta} = [\theta_1^T, \theta_2^T, \dots, \theta_P^T]^T \quad (۸)$$

$n$  تعداد رگرسورهای هر کدام از مدل‌های خطی محلی است و

$$\theta_i^T = [a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,n_b}, b_{i,1}, b_{i,2}, \dots, b_{i,n_b}]^T, i = 1, \dots, P \quad (۹)$$

است. حال می‌توان خروجی سیستم  $LLM - TSK$  را به فرم  $\hat{y} = \tilde{X}\tilde{\theta} + \varepsilon$  نوشت بطوریکه  $\varepsilon$  خطای مدلسازی است. بردار  $\tilde{\theta}$  را می‌توان بوسیله روش کمترین مربعات به شکل زیر تعیین کرد:

$$\tilde{\theta} = [\tilde{X}^T \tilde{X}]^{-1} \tilde{X}^T Y$$

بطوریکه  $Y$ ، بردار خروجی سیستم برای  $N$  مجموعه داده است.

## ۲.۲ تطبیق برخط مدل LLM-TSK

به منظور اینکه مدل استفاده شده برای استخراج قانون کنترلی از دقت بالایی برخوردار باشد، لازم است پارامترهای مدل به شکل برخط تنظیم شود. برای تطبیق برخط پارامترهای مدل، از مدل بدست آمده در بخش قبل استفاده می‌شود. از آنجائیکه خوشه‌بندی بر اساس فضای ورودی- خروجی انجام شده است، پارامترهای بخش تالی قواعد ثابت در نظر گرفته شده و فقط پارامترهای مدل‌های خطی محلی به‌روز می‌شود. خروجی سیستم LLM-TSK به شکل زیر قابل بیان است:

$$\hat{y}(k+1) = \tilde{X}_a \tilde{\theta}(k) + e(k) \quad (10)$$

بطوریکه  $e(k)$  مقدار خطای بین خروجی سیستم و خروجی مدل است. بردار پارامترها به‌صورت

$$\tilde{\theta}(k) = [\theta_1^T, \theta_2^T, \dots, \theta_p^T]^T$$

و بردار رگرسور به‌صورت زیر است:

$$\tilde{X}_a(k) = [w_1 X(k), w_2 X(k), \dots, w_p X(k)]$$

در رابطه بالا،  $w_i$  شدت تحریک نرمال شده امین قاعده بوده و  $X(k)$  به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$X(k) = [y(k), y(k-1), \dots, y(k-n_a+1), u(k-1), \dots, u(k-n_b)]$$

با کمینه کردن تابع هزینه زیر، بردار پارامترهای  $\tilde{\theta}(k)$  تخمین زده می‌شود:

$$J(k) = \sum_{j=0}^k \lambda^{k-j} e^2(j)$$



در اینجا  $\lambda$  یک عدد مثبت کوچکتر از ۱ است که ضریب فراموشی نامیده می‌شود. در حقیقت، این فاکتور، نحوه تأثیرگذاری خطای پیش‌بینی زمان حال و گذشته بر روی تخمین پارامترهای مدل را نشان می‌دهد. جهت تخمین پارامترهای مدل با هدف کمینه‌سازی تابع هزینه بیان‌شده از یک الگوریتم کمترین مربعات بازگشتی به شکل وزن‌دار استفاده می‌شود. در این الگوریتم، مقادیر جدید بردار پارامترها به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned}\tilde{\theta}(k) &= \tilde{\theta}(k-1) + Q_a(k)X_a(k-1)[y(k) - X_a(k-1)\tilde{\theta}(k-1)], \\ Q_a(k) &= \frac{1}{\lambda} \left[ Q_a(k-1) - \frac{Q_a(k-1)X_a(k-1)X_a^T(k-1)Q_a(k-1)}{\lambda + X_a(k-1)Q_a(k-1)X_a^T(k-1)} \right].\end{aligned}$$

در این رابطه  $Q_a$  ماتریس تنظیم است. مقدار اولیه  $\tilde{\theta}(0)$  برابر مقدار بدست آمده برای  $\tilde{\theta}(0)$  در بخش شناسایی برون خط در نظر گرفته شده و

$$Q_a(0) = (X_a^T X_a)^{-1}$$

در نظر گرفته می‌شود. بکارگرفتن الگوریتم WRLS یک تطبیق متوازن برای پارامترهای مدل فازی بر اساس وضعیت کنونی سیستم و مدل بدست آمده از مرحل شناسایی برون خط را فراهم می‌سازد.

### ۳ کنترل افق پیش‌رونده

در استراتژی کنترلی افق پیش‌رونده، مقادیر متغیر کنترلی با کمینه‌سازی یک تابع هزینه روی یک افق پیش‌رونده، تعیین می‌گردند. به‌طور معمول این تابع هزینه از دو بخش تشکیل شده است: ۱- مجموع مربعات خطای بین خروجی سیستم و مقدار مرجع، ۲- مجموع مربعات تلاش کنترلی. این استراتژی کنترلی نیازمند یک مدل برای پیش‌بینی کردن رفتار سیستم روی این افق پیش‌رونده است. این مدل می‌تواند یک مدل خطی-محلی یا یک مدل غیرخطی از سیستم دینامیکی باشد. در استراتژی کنترلی پیشنهادی، از مدل LLM-TSK استخراج‌شده در بخش قبل به عنوان یک پیش‌بینی‌کننده خطی-محلی روی یک افق پیش‌بینی استفاده می‌شود. با کمینه‌سازی تابع هزینه اشاره‌شده، یک دنباله

طراحی یک کنترل کننده تطبیقی افق پیش‌رونده مبتنی بر سیستم استنتاج فازی — ۱۸۰

از متغیرهای کنترلی روی افق کنترل حاصل می‌شود. از این دنباله کنترلی، اولین جزء به سیستم اعمال شده و سایر اجزا بدست آمده کنار گذاشته می‌شوند. سپس افق پیش‌بینی و افق کنترل یک گام به جلو حرکت داده شده و مجدداً بهینه‌سازی انجام می‌شود. شکل کلی تابع هزینه، مربعی بوده و به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$J = \sum_{i=1}^N q_i [\hat{y}(k+ik) - d(k+i)]^2 + \sum_{i=1}^M r_i \Delta u^2(k+i-1)$$

در این رابطه،  $N$  افق پیش‌گویی،  $M$  افق کنترل،  $\hat{y}(\cdot)$  خروجی پیش‌بینی شده،  $d(\cdot)$  سیگنال مرجع و  $\Delta u$  اختلاف بین دو نمونه متوالی از متغیر کنترلی روی افق کنترل است. همانطور که در بخش ۲، اشاره شده، بخش پیرو مدل LLM-TSK را می‌توان به عنوان یک مدل خطی از سیستم در نظر گرفت. می‌توان از این مدل خطی برای پیش‌بینی کردن رفتار سیستم روی افق پیش‌بینی استفاده کرد. به این ترتیب یک مجموعه  $N$  تایی از خروجی‌های پیش‌بینی شده سیستم روی افق پیش‌بینی به شکل زیر قابل توصیف است:

$$\hat{Y} = \bar{G}\Delta U + F$$

به طوری که:

$$\begin{aligned} \hat{Y} &= [\hat{y}(k+1|k), \hat{y}(k+2|k), \dots, \hat{y}(k+N|k)]^T \\ \Delta U &= [\Delta u(k), \Delta u(k+1), \dots, \Delta u(k+M-1)]^T \end{aligned}$$

$F$  بردار پاسخ آزاد سیستم روی افق پیش‌بینی است. اجزاء ماتریس  $\bar{G}$  ضرایب پاسخ ضربه مدل خطی استخراج شده از LLM-TSK است و به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\bar{G} = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \dots & 0 \\ g_1 & g_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N-1} & g_{N-2} & \dots & g_{N-M} \end{bmatrix}$$

از آنجائیکه در این استراتژی، افق پیش‌بینی محدود در نظر گرفته شده است، به منظور تضمین پایداری یک قید محدودکننده به انتهای افق پیش‌بینی اضافه می‌شود. این قید باعث می‌شود که بعد از افق پیش‌بینی، خروجی پیش‌بینی شده سیستم به اندازه چند نمونه دقیقاً بر مقدار مرجع منطبق شود:

$$\hat{y}(k+N+i) = d(k+N+i), i = 1, \dots, m$$

$$\Delta u(k+M+j) = 0, j \geq 0$$

به منظور لحاظ کردن این قید، باید خروجی پیش‌بینی شده سیستم برای  $m$  نمونه بعد از افق پیش‌بینی نیز محاسبه شوند. بردار این خروجی‌ها به شکل زیر قابل بیان هستند:

$$\hat{Y}_f = \bar{G}_f \Delta U + F_f$$

به‌طوری‌که،

$$\hat{Y} = [\hat{y}(k+N+1|k), \dots, \hat{y}(k+N+m|k)]^T$$

$$F_f = [f_{N+1}, f_{N+2}, \dots, f_{N+m}]^T$$

$$\bar{G}_f = \begin{bmatrix} g_N & g_{N-1} & \dots & g_{N-M+1} \\ g_{N+1} & g_N & \dots & g_{N-M+2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N+m-1} & g_{N+m-2} & \dots & g_{N-M+m} \end{bmatrix}$$

در این حالت، تابع هزینه بیان شده به شکل زیر قابل بازنویسی است:

$$J = (\bar{G}\Delta U + F - D)^T Q (\bar{G}\Delta U + F - D) + \Delta U^T R \Delta U$$

در این رابطه،  $D$  بردار مقدار مرجع روی افق پیش‌بینی است. لازم به ذکر است که ماتریس‌های  $\bar{G}$  و  $\bar{G}_f$  را می‌توان به صورت بازگشتی محاسبه کرد. با مشتق‌گیری از رابطه فوق نسبت به  $\Delta U$  و مساوی صفر قرار دادن آن، دنباله متغیرهای کنترلی بهینه از رابطه

زیر حاصل خواهد شد:

$$\Delta U = (\bar{G}^T Q \bar{G} + R)^{-1} [\bar{G}^T Q (D - F) + \bar{G}_f^T (\bar{G}_f^T (\bar{G}^T Q \bar{G} + R)^{-1} \bar{G}_f^T)^{-1} \\ \times (D_f - F_f - \bar{G}_f (\bar{G}^T Q \bar{G} + R)^{-1} \bar{G}^T Q (D - F))]^{-1}$$

به‌طوریکه:

$$D_f = [d(k + N + 1), \dots, d(k + N + m)]$$

در استراتژی کنترلی پیش‌بین مبتنی بر افق پیش‌رونده مرسوم، از یک مدل خطی برای پیش‌بینی رفتار سیستم روی کل افق پیش‌بینی استفاده می‌شود. این موضوع برای سیستم‌های غیرخطی ممکن است باعث انحراف قابل توجه رفتار پیش‌بینی شده از رفتار واقعی سیستم روی افق پیش‌بینی شده و در نتیجه عملکرد سیستم را به شکل قابل توجهی تحت تأثیر قرار دهد. به منظور برطرف کردن این مشکل می‌توان از یک دنباله از مدل‌های خطی در امتداد افق پیش‌بینی استفاده کرد.

در ادامه یک الگوریتم برای نحوه ایجاد این دنباله از مدل‌های خطی ارائه شده است:

- ۱- محاسبه دنباله سیگنال کنترلی روی افق پیش‌بینی با استفاده از مدل خطی محلی بدست آمده از مدل  $TSK$  در لحظه  $k - 1$
- ۲- بدست آوردن مدل خطی محلی  $M(k)$  در لحظه  $k$  با استفاده از  $(u(k), y(k))$
- ۳- استفاده از  $M(k)$  برای محاسبه دنباله کنترلی  $U$  روی کل افق پیش‌بینی
- ۴- استفاده از  $u(k)$  برای محاسبه  $y(k + 1)$
- ۵- ایجاد مدل خطی محلی  $M(k + 1)$  با استفاده از  $(u(k + 1), y(k + 1))$
- ۶- استفاده از  $M(k)$  و  $M(k + 1)$  برای محاسبه دنباله کنترلی جدید روی کل افق پیش‌بینی

۷- استفاده از  $u(k)$  و  $u(k + 1)$  برای محاسبه  $y(k + 2)$

۸- ایجاد مدل خطی محلی  $M(k + 2)$  با استفاده از  $(u(k + 2), y(k + 2))$

۹- استفاده از  $M(k), M(k + 1), M(k + 2)$

برای محاسبه دنباله کنترلی جدید روی کل افق پیش‌بینی مراحل ۷ تا ۹ را برای  $i = k + 3, \dots, k + N + m - 1$  تکرار می‌کنیم. سپس با استفاده از مدل‌های  $M(k)$

تا  $(k + N + m - 1)$  دنباله کنترلی نهایی را استخراج می‌کنیم. اولین عنصر از این دنباله را به سیستم اعمال کرده و برای گام بعدی، مجدداً الگوریتم را تکرار می‌کنیم. در این حالت، تابع هزینه  $J$  و ماتریس‌های  $\bar{G}$  و  $\bar{G}_f$  به صورت زیر تغییر می‌کنند:

$$J = (\bar{G}\Delta U + F - D)^T Q (\bar{G}\Delta U + F - D) + U^T R U$$

$$\bar{G} = \begin{bmatrix} g_{1,1} & \circ & \cdots & \circ \\ g_{2,1} & g_{2,2} & \cdots & \circ \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N,1} & g_{N,2} & \cdots & g_{N,M} \end{bmatrix}$$

$$\bar{G}_f = \begin{bmatrix} g_{N+1,1} & g_{N+1,2} & \cdots & g_{N+1,M} \\ g_{N+2,1} & g_{N+2,2} & \cdots & g_{N+2,M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N+m,1} & g_{N+m,2} & \cdots & g_{N+m,M} \end{bmatrix}$$

به‌طوری‌که،

$$g_{i,j} = \sum_{k=1}^i a_{i,k} g_{i-k,j} + b_{i,i-j}, \quad i = 1, \dots, N + m, \quad (11)$$

$$j = 1, \dots, M$$

از آنجائیکه، تابع هزینه به جای  $\Delta U$  بر حسب  $U$  کمینه می‌شود، سیگنال کنترلی پس از افق کنترل برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.

#### ۴ مثال: کنترل سطح توان یک راکتور هسته‌ای

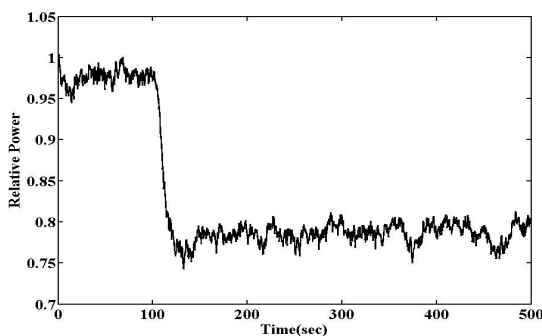
در این بخش، به منظور ارزیابی عملکرد استراتژی کنترلی پیشنهادی، این استراتژی برای مسئله کنترل سطح توان یک راکتور هسته‌ای بکار گرفته می‌شود.

طراحی یک کنترل کننده تطبیقی افق پیش‌رونده مبتنی بر سیستم استنتاج فازی — ۱۸۴

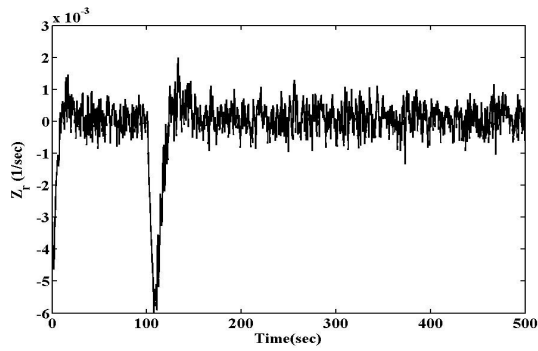
یک راکتور هسته‌ای، سیستمی با درجه غیرخطی بالا و پیچیده است. متغیرهای مهم در این سیستم دینامیکی، سطح توان نرمالیزه شده، درجه حرارت میله سوخت، درجه حرارت خنک‌کننده و سرعت حرکت میله کنترل است [۹].

جهت اعمال استراتژی پیشنهادی به مسئله کنترل سطح توان، زمان نمونه برداری از سیستم غیرخطی برابر ۰/۰۵ ثانیه در نظر گرفته شده است. تعداد ورودی‌های هر مدل خطی استفاده شده در LLM-TSK ۷ عدد است که ۳ تا از ورودی‌ها مربوط به ورودی کنترل در لحظات  $K - T$ ،  $K - 2T$ ،  $K - 3T$  و بقیه مربوط به خروجی‌های سیستم در لحظات  $K - T$ ،  $K - 2T$ ،  $K - 3T$  و  $K - 4T$  است. تعداد قواعد فازی، ۱۰۴ عدد و روش مورد استفاده برای شناسایی، روش خوشه‌سازی کاهشی می‌باشد.

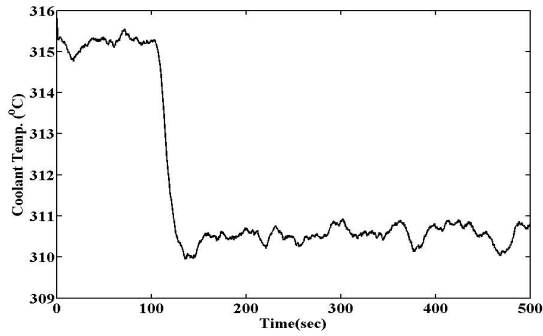
در شکل‌های ۱ تا ۴، به ترتیب، تغییرات سطح توان نرمال‌شده از ۱ به ۰/۸، تغییرات سرعت میله کنترل (ورودی سیستم)، تغییرات دمای خنک‌کننده و تغییرات دمای میله سوخت نشان داده شده است. همانطور که از این شکل‌ها مشخص است. استراتژی کنترلی پیشنهادی عملکرد قابل قبولی را از خود نشان داده است.



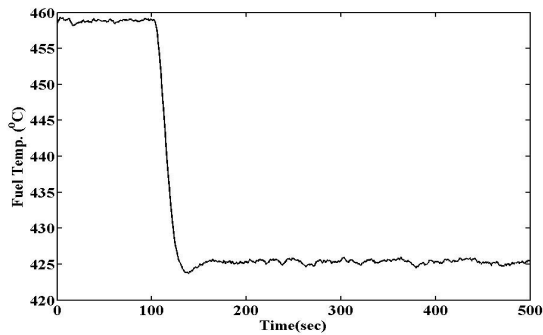
شکل ۱: تغییرات توان



شکل ۲: تغییرات سرعت میله کنترل



شکل ۳: تغییرات دمای خنک‌کننده



شکل ۴: تغییرات دمای میله سوخت

## ۵ نتیجه‌گیری

در این مقاله یک کنترل‌کننده افق پیش‌رونده مبتنی بر TSK برای یک سیستم دینامیکی پیچیده ارائه شده است. در این استراتژی کنترلی در هر نمونه زمانی، به کمک مدل TSK پایه‌ریزی شده برای سیستم دینامیکی، یک مدل خطی محلی از سیستم استخراج می‌شود. بر اساس مدل استخراج‌شده، یک کنترل‌کننده افق پیش‌رونده چندمرحله‌ای برای استخراج دنباله کنترلی بهینه روی افق کنترل، طراحی می‌گردد. بعد از استخراج دنباله کنترلی بهینه، اولین جزء این دنباله به سیستم اعمال شده و در نمونه زمانی بعدی همین فرآیند تکرار می‌شود. جهت ارزیابی عملکرد استراتژی کنترلی پیشنهادی، این استراتژی به مسئله کنترل توان در یک راکتور هسته‌ای اعمال گردیده است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول استراتژی کنترلی پیشنهادی است.

## مراجع

- [1] Bakibillah, A.S.M., Kamal, M.A.S., Tan, C.P., Hayakawa, T. and Imura, J.I., Fuzzy-tuned model predictive control for dynamic eco-driving on hilly roads, Applied Soft Computing, vol. 99, pp. 106875, 2021.
- [2] Böhler, L., Krail, J., Görtler, G. and Kozek, M., Fuzzy model predictive control for small-scale biomass combustion furnaces, Applied Energy, vol. 276, pp. 115339, 2020.
- [3] Boulkaibet, I., Belarbi, K., Bououden, B., Marwala, T. and Chadli, M., A new T-S fuzzy model predictive control for nonlinear processes, Expert Systems with Applications, vol. 88, pp. 132–151, 2017.
- [4] Boulkaibet, I., Belarbi, K., Bououden, S., Chadli, M., and Marwala, T., An adaptive fuzzy predictive control of nonlinear processes based on multi-Kernel least squares support vector regression, Applied Soft Computing, vol. 73, pp. 572-590, 2018.



- [5] Boulkaibet, I., Belarbi, K., Bououden, S., Marwala, T. and Chadli, M., "A new T-S fuzzy model predictive control for nonlinear processes", *Expert Systems with Applications*, vol. 88, pp. 132-151, 2017.
- [6] Bououden, S., Boulkaibet, I., Aboudi, A. and Chadli, M., *Robust Fuzzy Model Predictive Control with time delays for Nonlinear Systems*, *Procedia Computer Science*, vol. 186, pp.109-119, 2021.
- [7] Bououden, S., Chadli, M., Filali, S. and El Hajjaji, A., *Fuzzy Model Based Multivariable Predictive Control of a Variable Speed Wind Turbine: LMI approach*, *Renewable Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 434-439, 2012.
- [8] Bououden, S., Chadli, M. and Karimi, H.R., *Control of Uncertain Highly Nonlinear Biological Process Based on Takagi-Sugeno Fuzzy Models*, *Signal Processing*, vol. 108, pp. 195-205, 2015.
- [9] Eliasi, H., Menhaj, M. B., Davilu, H., "Robust nonlinear model predictive control for a PWR nuclear power plant", *Progress in Nuclear Energy*, vol. 54, no. 1, pp. 177-185, 2012.
- [10] Fele, F., De Paola, A., Angeli, D. and Strbac, G., "A framework for receding horizon control in infinite horizon aggregative games", *Annual Reviews in Control*, vol. 45, pp. 191-204, 2018.
- [11] Isermann, R., Matko, D. and Lachmann, K.H., *Adaptive control systems*, Prentice-Hall, Inc. 1992.
- [12] Jeong, S.C. and Park, P.G., *Constrained MPC Algorithm for Uncertain Time-Varying Systems with State-Delay*, *IEEE Transaction on Automatic Control*, vol. 50, no. 2, pp. 257-263, 2005.

- [13] Mahmoud, M. S., Xia, Y. and Zhang, S., Robust Packet-Based Nonlinear Fuzzy Networked Control Systems, *Journal of the Franklin Institute*, vol. 356, no. 3, pp. 1502–1521, 2019.
- [14] Makni, S., Robust observer-based Fault Tolerant Tracking Control for T-S uncertain systems subject to sensor and actuator faults, *ISA Transactions*, vol. 88, pp. 1–11, 2019.
- [15] Takagi, T. and Sugeno, M., Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control, *IEEE Trans. Syst. Man Cyber*, vol. 15, pp. 116–132, 1985.
- [16] Tanaskovic, M., Fagiano, L., Smith, R. and Morari, M., “Adaptive receding horizon control for constrained MIMO systems”, *Automatica*, vol. 50, no. 12, pp. 3019-3029, 2014.
- [17] Zhu, J., Nonlinear dynamic investigation and anti-bifurcation control of a boiler-turbine unit via dual-mode fuzzy model predictive control strategy, *Journal of the Franklin Institute*, 2021. (In Press)