

## طراحی سیستم کنترل بهینه‌ی تناسبی-انتگرال گیر- مشتق گیر برای راکتور تحقیقاتی تهران بر مبنای الگوریتم آموزش و یادگیری

میثم رفیعی<sup>۱</sup>، عطا الله ربیعی<sup>۱\*</sup>، کمال حداد<sup>۱</sup>

۱- دانشگاه شیراز، دانشکده مکانیک، گروه مهندسی هسته ای

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۲/۵

### چکیده

قلب راکتور در یک نیروگاه هسته‌ای دارای مخاطرات ایمنی و اهمیت اقتصادی است. از نظر کنترل راکتور، به‌کارگیری کنترل مطلوب برای قلب راکتور در یک نیروگاه هسته‌ای یک اقدام مهم در بهبود ایمنی و افزایش قابلیت اطمینان و در دسترس بودن آن است. ناتوانی یک نیروگاه هسته‌ای در کنترل مطلوب قلب راکتور می‌تواند منجر به هزینه‌های عملیاتی بیشتر یا کاهش ایمنی و قابلیت اطمینان نیروگاه شود. به طور کلی کنترل قلب راکتور شامل کنترل توان (یا درجه حرارت خنک کننده) و کنترل اختلاف توان محوری (یا توزیع توان) است. در این مطالعه از روش کنترل بهینه‌ی تناسبی-انتگرال گیر-مشتق گیر بر مبنای الگوریتم بهینه سازی آموزش و یادگیری استفاده شده است. معیار بهینه سازی مجموع انتگرال قدر مطلق خطای ردیابی توان قلب راکتور و میزان فراجش است. قلب راکتور بر مبنای مدل خطی شده مرتبه کسری سینتیک نقطه‌ای نوترون با در نظر گرفتن سه گروه نوترون تاخیری شبیه سازی شده است و شامل بازخوردهای سوخت، خنک کننده، ید و زینان است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که الگوریتم کنترل بهینه در نظر گرفته شده به آسانی در عمل به کار گرفته می‌شود، فراجش و نوسانات موجود در روش‌های تنظیمی موجود مانند روش زیگلر-نیکولز را کاهش می‌دهد، زمان نشست پاسخ سیستم را سریع تر کرده و در نتیجه باعث بهبود قابلیت اطمینان و ایمنی راکتور در پاسخ به حالات گذرای توانی و تغییرات بار می‌شود.

**واژه های کلیدی:** راکتور تحقیقاتی تهران، کنترل بهینه‌ی تناسبی-انتگرال گیر-مشتق گیر، معادلات خطی شده مرتبه کسری

سینتیک نقطه ای، انتگرال قدر مطلق خطا-الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری

### ۱. مقدمه

قلب راکتور در یک نیروگاه هسته‌ای بخش مهمی به عنوان منبع حرارتی و سوخت هسته‌ای رادیواکتیو است که دارای مخاطرات ایمنی و اهمیت اقتصادی است. اطمینان از عملکرد ایمن و موثر قلب راکتور، یک پیش شرط در توسعه‌ی نیروگاه‌های هسته‌ای است. از نظر کنترل راکتور، به‌کارگیری کنترل مطلوب برای قلب راکتور در یک نیروگاه هسته‌ای یک اقدام مهم در بهبود ایمنی و بازدهی قلب راکتور است. ناتوانی یک نیروگاه

امروزه نیروگاه‌های هسته‌ای نقش مهمی در فراهم کردن توان الکتریکی دارند. در این نوع نیروگاه‌ها انرژی اولیه به وسیله‌ی یک راکتور هسته‌ای فراهم می‌شود. یکی از مهمترین اهداف کنترلی در یک نیروگاه هسته‌ای افزایش میزان قابلیت اطمینان و در دسترس بودن نیروگاه و بهبود ایمنی و قابلیت دنبال کردن بار است [۱].

بازخورد حالت برای اصلاح سیگنال بار مرجع به منظور دستیابی به ورودی مرجع مطلوب استفاده شده است. روش کنترلی بر مبنای ساختار فیزیکی با یک مشاهده‌گر به وسیله‌ی Dong و همکاران [۱۲] برای طراحی سیستم‌های کنترلی سطح توان با بازخورد حالت یا خروجی به کار گرفته شده است. یک روش کنترل بهینه زمانی با پله‌های ریز و درشت به وسیله‌ی Park و همکاران [۱۳] برای ایجاد یک سیستم کنترل توان قلب بیان شده است.

سیستم کنترل دمای خنک‌کننده‌ی قلب به وسیله‌ی Ku و همکاران [۱۴] با استفاده از کنترل شبکه عصبی بازگشتی قطری طراحی شده است که شامل یک کنترلر عصبی و یک شناساگر عصبی است و این سیستم می‌تواند عملکرد دمای خنک‌کننده را بهبود بخشد.

کنترل‌کننده‌ی هوشمند جدید با بکارگیری یادگیری احساسی به وسیله‌ی Khorramabadi و همکاران [۱۵] برای کنترل توان قلب طراحی شده است که در آن یک سیستم هوشمند با دو ورودی که خطای توان و مشتق خطا است در نظر گرفته شده است.

Rojas-Ramirez و همکاران [۱۶] یک کنترل هوشمند فازی جدید پیشنهاد داده‌اند تا مسیر توان مطلوب راکتور را ردیابی کند، که در آن پارامترهای آزاد سیستم فازی با ایجاد یک برنامه بر مبنای تئوری لیاپانوف، تنظیم شده است.

Coban و همکاران [۱۷] یک کنترل‌کننده‌ی هوشمند فازی را برای قلب راکتور به کار گرفته‌اند تا مسیر توان مرجع را دنبال کند، که در آن الگوریتم ژنتیک برای بهینه کردن توابع عضویت و وزن‌ها اعمال شده است.

از آنجایی که یک راکتور هسته‌ای یک سیستم غیر خطی و پیچیده است که پارامترهای آن با سطح توان تغییر می‌کند، علی‌رغم وجود بسیاری از روش‌های کنترلی پیشنهاد شده برای کنترل توان راکتور هسته‌ای، به نظر می‌رسد که یک سیستم کنترلی ساده و دارای عملکرد مناسب هنوز مورد نیاز است.

متداول‌ترین روش کنترلی در کاربردهای صنعتی، کنترل‌کننده‌ی تناسبی-انتگرال‌گیر-مشتق‌گیر (PID) است. مزیت این کنترل‌کننده، ساختار ساده و سهولت به کارگیری در عمل است [۱۸-۱۹]. علاوه بر این گین‌های این کنترل‌کننده می‌تواند فقط بر مبنای خطای

هسته‌ای در کنترل مطلوب قلب راکتور می‌تواند منجر به هزینه‌های عملیاتی بیشتر یا کاهش ایمنی و قابلیت اطمینان نیروگاه شود.

به طور کلی کنترل قلب راکتور شامل کنترل توان (یا درجه حرارت خنک‌کننده) و کنترل اختلاف توان محوری (یا توزیع توان) است. برای یک راکتور چیدمان مناسب سوخت و میله‌های کنترل به گونه‌ای انجام می‌شود که توزیع توان شعاعی راکتور مسطح می‌شود [۲].

کنترل توان راکتور قبلاً در شرایط عملیاتی بار پایه (base-load) استفاده می‌شده است. اما با افزایش سهم نیروگاه‌های هسته‌ای در تولید الکتریسیته به نظر می‌رسد که عملکرد تعقیب بار (load-following) راکتورهای هسته‌ای در آینده اجتناب‌ناپذیر است.

بنابراین برای بهبود عملکرد نیروگاه‌های هسته‌ای بررسی‌های زیادی در زمینه‌ی کنترل توان راکتور انجام شده است [۳-۷].

به طور کلی، اصل کنترل توان قلب راکتور به این شکل است که توان خروجی قلب راکتور با حرکت میله‌های کنترل در یک مقدار مرجع یا مطلوب تنظیم می‌شود.

در سال‌های اخیر کنترل‌کننده‌های مختلفی شامل روش شبکه عصبی، روش منطق فازی [۸] و سیستم‌های کنترل بهینه مقاوم [۹] برای کنترل توان راکتورهای هسته‌ای مورد استفاده قرار گرفته است.

بر مبنای بدست آوردن خطای توان بین توان مرجع و توان خروجی، کنترل‌کننده محرک‌ها مانند میله‌های کنترل را به کار می‌اندازد تا مسیر توان خروجی قلب راکتور، مسیر توان مرجع را در زمان واقعی دنبال کند [۱۰].

روش‌های کنترل توان برای قلب راکتور در نیروگاه‌های هسته‌ای عمدتاً شامل کنترل بازخورد حالت یا خروجی با یک مشاهده‌گر حالت، کنترل بهینه، کنترل هوشمند شبکه عصبی یا فازی، کنترل پیش‌بین مدل، کنترل مقاوم  $H_{\infty}$ ، کنترل مد لغزشی و کنترل مرتبه‌ی کسری است.

یک کنترل‌کننده‌ی بازخورد حالت به وسیله‌ی Edwards و همکاران [۱۱] برای تنظیم توان قلب راکتور به کار گرفته شده است، که در آن بخش کنترل بازخورد خروجی کلاسیک حفظ شده است و یک بخش

راکتور و میزان فراجهدش آن است. نتایج حاصل از آن با روش‌های تنظیمی موجود مانند روش زیگلر- نیکولز که یک روش متداول در تنظیم پارامترهای کنترلی است، مورد مقایسه قرار گرفته است.

## ۲. مدل قلب راکتور هسته ای

برای شبیه سازی قلب راکتور هسته‌ای، معادلات مرتبه کسری سینتیک نقطه‌ای با در نظر گرفتن سه گروه نوترون تاخیری استفاده شده است. معادلات بهنجار شده نسبت به یک شرایط تعادلی به صورت زیر است:

معادله‌ی ۱ دینامیک رفتار نوترون‌ها را توصیف می‌کند و شامل ترم‌هایی به فرم مشتق مرتبه کسری است. این معادله توجیه و تفسیر فیزیکی بهتری برای پدیده‌هایی را دارد که از نقطه نظر معادله‌ی پخش نوترون با فرضیات قانون فیک سازگار نیستند.

این پدیده‌ها تحت عنوان پدیده‌های پخش نابهنجار نوترون شناخته می‌شوند که بیشتر در نزدیکی میله‌های سوخت و میله‌های کنترل و یا نواحی مرزی که تغییرات شار نوترون زیاد است، رخ می‌دهند.

در این معادله  $\tau$  بیان کننده‌ی نرخ بازگشت سیستم به حالت تعادلی بعد از اعمال تغییرات شدید و محلی در شار نوترون است و  $\alpha$  مرتبه‌ی پخش نابهنجار نوترون را مشخص می‌کند. با کاهش مقدار  $\alpha$  میزان پخش نابهنجار نوترون افزایش می‌یابد (High subdiffusivity) و معادله‌ی ۱ مدل بهتری از رفتار نوترون‌ها در نواحی که تغییرات شار نوترون زیاد است، ارائه می‌دهد [۲۴].

$$\frac{d^{a+1} n_r(t)}{dt^{a+1}} = \left[ \frac{1-\beta}{\Lambda} - \frac{P_{NL}}{l} \right] \frac{d^a n_r(t)}{dt^a} + \frac{\alpha}{\Lambda} \frac{d \rho}{dt} \frac{d^{a-1} n_r(t)}{dt^{a-1}} - \frac{1}{\tau^a} \frac{dn_r(t)}{dt} + \frac{1}{\tau^a} \left( \frac{\rho_r(t) - \beta}{\Lambda} \right) n_r(t) + \sum_{i=1}^3 \frac{\beta_i}{\Lambda} \frac{d^a C_{ri}(t)}{dt^a} + \frac{1}{\tau^a} \sum_{i=1}^3 \frac{\beta_i}{\Lambda} C_{ri}(t) \quad (1)$$

معادله‌ی ۲ رفتار نیاسته‌ها را توصیف می‌کند. این معادله نشان می‌دهد که نرخ تغییرات نیاسته‌ها برابر اختلاف بین تولید و نابودی آن‌ها است.

$$\frac{dc_{ri}}{dt} = \lambda_i n_r(t) - \lambda_i c_{ri}(t), \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

ردیابی سیستم طراحی شود و مستقل از پارامترهای سیستم است.

به منظور حصول عملکرد مطلوب سیستم کنترل شده، فرایندهای تنظیمی باید برای گین‌های کنترل کننده‌ی PID لحاظ شود [۲۰-۲۲].

روش‌های تنظیمی کلاسیک مانند زیگلر-نیکولز (Ziegler-Nichols) عملکرد رضایت بخشی در حالات گذرای توانی و تغییرات بار شبکه ندارند. در سال‌های اخیر بهبود قابل توجهی در روش‌های تنظیمی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی حاصل شده است.

در این مطالعه از الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری (TLBO) استفاده شده است. این الگوریتم در سال ۲۰۱۱ توسط آقای Rao و همکاران پیشنهاد شد [۲۳]. الگوریتم آموزش و یادگیری مانند سایر الگوریتم‌های الهام گرفته از طبیعت، روشی مبتنی بر جمعیت است که از جمعیتی از راه‌حل‌ها برای پیشبرد به سمت راه‌حل کلی و عمومی استفاده می‌کند.

برای TLBO، جمعیت به شکل گروه یا کلاسی از یادگیرندگان در نظر گرفته می‌شود و موضوعات مختلفی به آن‌ها پیشنهاد می‌شود که به عنوان متغیرهای متفاوت طراحی از مسئله‌ی بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند و یک نتیجه از فرد یادگیرنده مشابه با مقدار برازندگی مسئله‌ی بهینه‌سازی است. متغیرهای طراحی در واقع پارامترهای لحاظ شده در تابع هدف مسئله‌ی بهینه‌سازی داده شده هستند و بهترین راه‌حل، بهترین مقدار از تابع هدف می‌باشد.

این الگوریتم بر اساس تاثیر یک معلم بر خروجی یادگیرندگان در یک کلاس است و دو مد اساسی از یادگیری را شرح می‌دهد: (۱) از طریق معلم (شناخته شده با عنوان فاز معلم) و (۲) از طریق فعل و انفعال با یادگیرندگان دیگر (فاز یادگیرنده).

همچنین قلب راکتور بر مبنای معادلات مرتبه‌ی کسری سینتیک نقطه‌ای نوترون با در نظر گرفتن سه گروه نوترون تاخیری شبیه‌سازی شده است و شامل بازخوردهای سوخت، خنک کننده، ید و زینان است. روش مورد استفاده برای کنترل توان راکتور، بهینه‌سازی پارامترهای کنترل کننده‌ی PID بر مبنای الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری با استفاده از مجموع انتگرال قدر مطلق خطای ردیابی توان قلب

مقادیر پارامترهای نوترونیک و ترموهیدرولیک با توجه به گزارش آنالیز ایمنی نهایی ( Final Safety Analysis Report) و شرایط کارکرد نرمال راکتور تحقیقاتی تهران استخراج شده است. رابطه‌ی توان راکتور با چگالی نسبی نوترون به صورت زیر بیان می‌شود:

$$P(t) = P_0 n_r(t) \quad (9)$$

با توجه به رابطه ۹ و رابطه بین توان راکتور و شار نوترون ( $\phi$ )، پارامتر ثابت B به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$P = E_r \Sigma_f \phi V \rightarrow \phi = \frac{P_0}{E_r \Sigma_f V} n_r \rightarrow B = \frac{P_0}{E_r \Sigma_f V} \quad (10)$$

در این رابطه،  $E_r$  انرژی آزاد شده به ازای هر شکافت و V حجم کلی راکتور است.

مقادیر پارامترهای نوترونیک و ترموهیدرولیک در پیوست ۲ نشان داده شده است.

برای بیان مدل خطی شده‌ی مرتبه‌ی کسری سینتیک نقطه‌ای نوترون، معادلات غیر خطی ۱ تا ۸ در نظر گرفته می‌شوند. این معادلات می‌توانند با در نظر گرفتن اختلالات کوچک حول نقطه‌ی عملیاتی تعادلی خطی سازی شوند. تابع تبدیل حلقه باز مرتبه‌ی کسری برای مدل خطی شده در حوزه‌ی لاپلاس بر حسب  $\alpha=0.8$ ،  $\alpha=0.5$  و  $\alpha=0.2$  به ترتیب در معادلات ۱۱، ۱۲ و ۱۳ نمایش داده شده است [۲۵].

معادله ۳ نرخ تغییرات دمای سوخت را نشان می‌دهد. در این معادله، ترم اول در سمت راست کسری از توان راکتور که در سوخت آزاد می‌شود را نشان می‌دهد و ترم دوم بیان‌کننده‌ی انتقال حرارت از سوخت به خنک‌کننده است.

$$\frac{dT_f}{dt} = \frac{1}{\mu_f} [f_f P_0 n_r(t) - \Omega (T_f - T_c)] \quad (3)$$

معادله‌ی ۴ نرخ تغییرات دمای خنک‌کننده‌ی خروجی از راکتور را نشان می‌دهد. ترم اول در سمت راست کسری از توان راکتور است که در خنک‌کننده آزاد می‌شود، ترم دوم حرارت انتقالی از سوخت به خنک‌کننده و ترم سوم بیان‌کننده‌ی حرارت برداشت شده از خنک‌کننده است.

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{1}{\mu_c} [(1-f_f) P_0 n_r(t) + \Omega (T_f - T_c) - M (T_c - T_c)] \quad (4)$$

معادله‌ی ۵ نرخ تغییرات زینان را نشان می‌دهد که در آن دو ترم اول نشان‌دهنده‌ی تولید زینان ناشی از شکافت و واپاشی ید و ترم سوم و چهارم بیان‌کننده‌ی نابودی زینان از طریق جذب نوترون و واپاشی زینان است.

$$\frac{dX}{dt} = \gamma_x \Sigma_f \phi + \lambda_f I - \sigma_x X \phi - \lambda_x X \quad (5)$$

معادله‌ی ۶ مربوط به نرخ تغییرات ید است که در آن ترم اول مربوط به تولید ید ناشی از شکافت و ترم دوم نابودی آن ناشی از واپاشی را نشان می‌دهد. معادله‌ی ۷ راکتیویته‌ی کل قلب راکتور را نشان می‌دهد که به ترتیب شامل راکتیویته‌های میله کنترل، سوخت، خنک‌کننده و زینان است.

$$\frac{dI}{dt} = \gamma_f \Sigma_f \phi - \lambda_f I \quad (6)$$

$$\rho = \rho_r + \alpha_f (T_f - T_{f0}) + \alpha_c (T_c - T_{c0}) - \left( \frac{\sigma_x}{\Sigma_f} \right) (X - X_0) \quad (7)$$

معادله‌ی ۸ نرخ تغییرات راکتیویته میله کنترل را نشان می‌دهد که برابر حاصل ضرب راکتیویته کل میله کنترل در سرعت حرکت میله‌ی کنترل است.

$$\frac{d\rho_r}{dt} = G_r Z_r \quad (8)$$

تعریف متغیرهای موجود در معادلات قبل در پیوست ۱ آورده شده است.

$$\begin{aligned}
G_{ol}(s) &= \frac{\delta N_r(s)}{\delta Z_r(s)} \\
&= \frac{(7.961e + 51)s^7 + (5.531e + 51)s^6 + (3.251e + 50)s^5 + (5.802e + 48)s^4}{(3.802e + 46)s^{9.8} + (5.022e + 49)s^9 - (1.713e + 49)s^{8.8} + (7.996e + 51)s^8} \\
&\quad - (1.437e + 49)s^{7.8} + (2.303e + 51)s^7 - (9.015e + 47)s^{6.8} + (6.108e + 49)s^6 \\
&\quad + (2.922e + 45)s^{5.8} + (5.126e + 47)s^5 + (1.591e + 44)s^{4.8} + (1.23e + 45)s^4 \\
&\quad + (2.402e + 41)s^{3.8} + (4.224e + 41)s^3 + (1.435e + 37)s^{2.8} - (1.172e + 39)s^2 \\
&\quad + (2.181e + 32)s^{1.8} + (8.972e + 34)s
\end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
G_{ol}(s) &= \frac{\delta N_r(s)}{\delta Z_r(s)} \\
&= \frac{(7.961e + 51)s^7 + (5.531e + 51)s^6 + (3.251e + 50)s^5 + (5.802e + 48)s^4}{(5.628e + 47)s^{9.5} + (5.022e + 49)s^9 - (2.535e + 50)s^{8.3} + (7.996e + 51)s^8} \\
&\quad - (2.126e + 50)s^{7.5} + (2.303e + 51)s^7 - (1.334e + 49)s^{6.5} + (6.108e + 49)s^6 \\
&\quad - (1.572e + 47)s^{5.5} + (5.126e + 47)s^5 - (3.508e + 44)s^{4.5} + (1.23e + 45)s^4 \\
&\quad - (2.246e + 41)s^{3.5} + (4.224e + 41)s^3 - (1.286e + 37)s^{2.5} - (1.172e + 39)s^2 \\
&\quad - (1.925e + 32)s^{1.5} + (8.972e + 34)s
\end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
G_{ol}(s) &= \frac{\delta N_r(s)}{\delta Z_r(s)} \\
&= \frac{(1.99e + 49)s^7 + (1.383e + 49)s^6 + (8.127e + 47)s^5 + (1.451e + 46)s^4}{(2.083e + 46)s^{9.2} + (1.255e + 47)s^9 - (9.382e + 48)s^{8.2} + (1.999e + 49)s^8} \\
&\quad - (7.868e + 48)s^{7.2} + (5.759e + 48)s^7 - (4.938e + 47)s^{6.2} + (1.527e + 47)s^6 \\
&\quad - (6.317e + 45)s^{5.2} + (1.282e + 45)s^5 - (1.975e + 43)s^{4.2} + (3.075e + 42)s^4 \\
&\quad - (1.776e + 40)s^{3.2} + (1.056e + 39)s^3 - (1.039e + 36)s^{2.2} - (2.931e + 36)s^2 \\
&\quad - (1.568e + 31)s^{1.2} + (2.243e + 32)s
\end{aligned} \tag{13}$$

## ۱.۲ مسئله‌ی کنترل راکتور

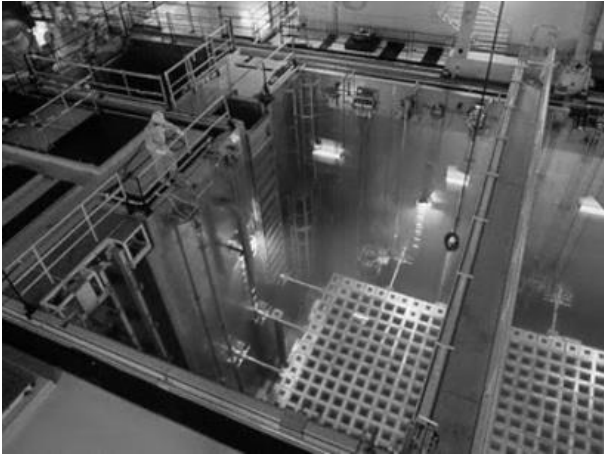
عملکرد پایه‌ای یک راکتور وابسته به فرآیند شکافت است. همین که جرم  $U^{235}$  بیشتر از جرم بحرانی می‌شود، فرآیند شکافت به صورت اتوماتیک آغاز می‌شود. شکافت به وسیله‌ی وارد کردن میله‌های کنترل که نوترون‌ها را جذب می‌کند کنترل می‌شود. راکتور تحقیقاتی تهران راکتوری با توان ۵ مگاوات است که در سال ۱۹۶۷ توسط ایالات متحده آمریکا در مرکز تحقیقات اتمی تهران در دانشگاه تهران ساخته شد. راکتور تحقیقاتی تهران از سال ۱۳۴۶ و در ابتدا با سوخت‌های صفحه‌ای با غنای بالا (بیش از ۹۰٪) مورد بهره‌برداری قرار گرفت.

در راستای برنامه‌های آژانس بین‌المللی انرژی اتمی برای کاهش غنای سوخت راکتورهای تحقیقاتی به دلیل نگرانی‌های موجود در مورد گسترش سلاح‌های هسته‌ای، سوخت راکتور تهران در سال ۱۳۷۲ به سوخت‌های صفحه‌ای U3O8-Al با غنای حدود ۲۰٪ تبدیل شد. برداشت حرارت از قلب راکتور تهران به وسیله‌ی جریان ناشی از گرانش آب استخر با آهنگ نامی ۵۰۰ متر مکعب بر ساعت از درون قلب، شبکه نگهدارنده قلب و پلنیوم به سمت تانک تأخیری صورت می‌گیرد. سپس آب از درون تانک تأخیری به درون مبدل حرارتی پمپ شده و پس از خنک شدن مجدداً به استخر بازگردانده می‌شود [۲۶].

این راکتور، یک راکتور از نوع استخری با کندکننده و خنک‌کننده آب است که برای مقاصد تحقیقاتی، آموزشی و تولید رادیویزوتوپ‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. قلب راکتور تهران حاوی دو نوع مجتمع سوخت صفحه‌ای استاندارد (SFE) و کنترلی (CFE) با غنای حدود ۲۰٪، محفظه‌های تابش‌دهی و گرافیت (به عنوان بازتابنده نوترون) است که در یک صفحه مشبک ۹×۶ قرار گرفته‌اند. مجتمع‌های سوخت صفحه‌ای استاندارد دارای ۱۹ صفحه‌ی سوخت هستند درحالی‌که مجتمع‌های سوخت کنترلی تنها دارای ۱۴ صفحه‌ی سوخت هستند تا فضای کافی برای ورود میله‌های کنترل فراهم شود. کنترل راکتور از طریق وارد یا خارج کردن چهار میله کنترل اصلی و یک میله کنترل تنظیمی که به ترتیب حاوی آلیاژ Ag-In-Cd و فولاد ضد زنگ هستند انجام می‌شود. بخش دیگری از کنترل نیز توسط ویژگی ذاتی

سیستم و منفی بودن ضرایب دمایی راکتیویته تامین می‌گردد [۲۷].

ساختار کلی راکتور تحقیقاتی تهران در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: راکتور تحقیقاتی تهران

## ۲/۲ طراحی سیستم کنترل بهینه‌ی تناسبی-انتگرال-گیر-مشتق‌گیر

در این پژوهش یک کنترل کننده ی تناسبی-انتگرال-گیر-مشتق‌گیر (کنترل کننده ی PID) برای کنترل ردیابی تغییرات توان خروجی نسبت به یک ورودی مرجع به کار گرفته شده است. این ساختار کنترلی یک مکانیزم بازخورد حلقه کنترل است که به طور گسترده در سیستم های کنترل صنعتی اجرا می شود. یک کنترل کننده ی PID مرتباً یک مقدار خطای  $e(t)$  را به عنوان تفاوت بین یک نقطه تنظیمی مطلوب (Set-Point) و یک متغیر فرآیند اندازه گیری شده (Process Variable) محاسبه می کند و تصحیحی را بر اساس ترم های تناسب، انتگرال و مشتق انجام می دهد که نام کنترل کننده نیز از این ترم ها اقتباس شده است. تابع کنترلی کلی می تواند به شرح زیر باشد:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t') dt' + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (14)$$

که در حوزه ی لاپلاس به فرم زیر نمایش داده می شود:

$x$ : برداری است که شامل اعداد تصادفی بین صفر و یک است.

$\mu_{new}$ : بهترین عضو جمعیت که به عنوان معلم انتخاب می شود.

$T_f$ : ضریب آموزش، یک مجموعه می باشد که دارای دو عضو یک و دو است. یک عضو از مجموعه به صورت تصادفی انتخاب می شود.

۱: یادگیری عادی و معمولی

۲: یادگیری سرعت بیشتری پیدا می کند.

▪ پاسخ هایی که بهتر باشند (مقادیر کمتر تابع هزینه) جایگزین پاسخ های قدیمی می شوند.

▪ مرحله ی یادگیری

برای هر پاسخ مانند  $X_i$ ، یک پاسخ دیگر  $X_j$  به صورت تصادفی انتخاب می کنیم.

اگر  $X_j$  بهتر باشد:

$$X_i^{new} = X_i + \bar{r} (X_j - X_i)$$

اگر  $X_i$  بهتر باشد:

$$X_i^{new} = X_i + \bar{r} (X_i - X_j)$$

منظور از پاسخ یک فرد از جامعه ی آماری می باشد.

▪ پاسخ هایی که بهتر باشند جایگزین پاسخ های قدیمی می شوند (تکرار مرحله).

▪ شرایط خاتمه بررسی می شود (در اینجا تعداد تکرار)، در صورت برآورده نشدن شرایط، اجرای الگوریتم از مرحله ی ۲ ادامه می یابد و در غیر این صورت الگوریتم خاتمه می یابد.

تابع هزینه ی در نظر گرفته شده در مطالعه ی حاضر مجموع انتگرال قدر مطلق خطای ردیابی تغییرات توان قلب راکتور و میزان فراجاهش آن است. شاخص عملکرد انتگرال قدر مطلق خطا (IAE) به شکل زیر محاسبه می شود:

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (17)$$

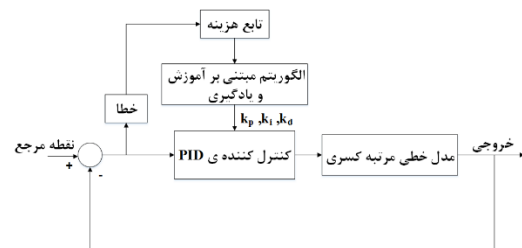
که در آن:

$$e(t) = \delta n_{rd}(t) - \delta n_r(t) \quad (18)$$

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \quad (15)$$

$k_p$ ،  $k_i$  و  $k_d$  به ترتیب ضرایب تناسبی، انتگرال گیر و مشتق گیر این کنترل کننده هستند.

برای حصول پاسخ مطلوب از سیستم کنترلی، تنظیم ضرایب بهینه ی  $k_p$ ،  $k_i$  و  $k_d$  با استفاده از الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری انجام شده است. یکی از مهم ترین ویژگی های این الگوریتم، عدم وابستگی به پارامترها است. چرا که این الگوریتم، کمترین تعداد پارامتر ممکن را دارد و از این نظر، می تواند یک امتیاز ویژه را داشته باشد. بلوک دیاگرام کنترل کننده ی PID مبتنی بر الگوریتم آموزش و یادگیری در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. بلوک دیاگرام کنترل کننده ی PID مبتنی بر الگوریتم آموزش و یادگیری

مرحل الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری به شرح زیر است:

▪ آماده سازی: تنظیم مقادیر پارامترها و تولید جمعیت اولیه که مشخصه ی هر عضو جمعیت مقادیر پارامترهای  $k_p$ ،  $k_i$  و  $k_d$  است.

▪ محاسبه ی میانگین اعضای جمعیت برای هر پارامتر به طور مجزا

▪ انتخاب بهترین عضو جمعیت به عنوان معلم

▪ مرحله ی آموزش (وارد فاز معلم می شویم)

بهترین عضو جمعیت (کمترین مقدار تابع هزینه) را شناسایی می کنیم، که افراد را به سمت خودش جذب می کند.

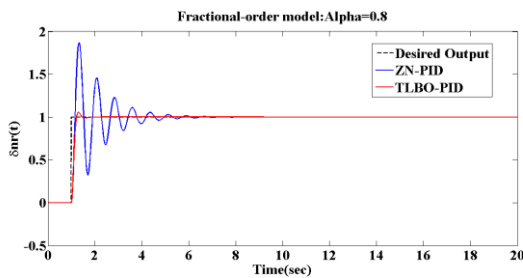
(۱۶)

$$X_i^{new} = X_i + \bar{r} (\mu_{new} - T_f \mu), \quad T_f \in \{1, 2\} \quad (16)$$

ی PID طبق روشی که در قسمت قبل توضیح داده شد، تنظیم می‌شوند.

نتایج حاصل از این روش با روش زیگلر-نیکولز (Ziegler-Nichols tuning method) که یک روش تجربی برای بدست آوردن ضرایب PID به کمک سیستم حلقه بسته است، مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی و پارامترهای کنترل کننده برای حالت  $\alpha=0.8$  در شکل ۳ و جدول ۲ نشان داده شده است.

شکل ۳ نشان می‌دهد که در این حالت با اعمال روش کنترل بهینه‌ی مبتنی بر آموزش و یادگیری، تغییرات توان خروجی، تغییرات توان خروچی، تغییرات توان مطلوب را با دقت بالایی دنبال می‌کند و دارای فراجاهش و زمان نشست (زمان مورد نیاز برای آن که پاسخ سیستم به محدوده‌ی ۲ درصد مقدار نهایی رسیده و باقی بماند) خیلی کمتری در مقایسه با روش زیگلر-نیکولز است.



شکل ۳. تغییرات توان نسبی راکتور برای حالت  $\alpha=0.8$

جدول ۲. نتایج شبیه سازی برای حالت  $\alpha=0.8$

پارامتر	الگوریتم زیگلر- نیکولز	الگوریتم TLBO
$k_p$	۵۹,۴	۴,۷۸۲۵
$k_i$	۱۸۷,۶۷۷۷	۰,۱۲۷۲
$k_d$	۴,۷۰۰۰۲۵	۱۰
فراجاهش (درصد)	۸۷	۵,۶
زمان نشست (ثانیه)	۳,۹۲۶۳	۰,۳۹۷۹
تعداد دفعات ارزیابی تابع هزینه	-	۱۲۲۰۰
کمترین مقدار تابع هزینه	-	۲۰۰۱,۹

شکل ۴ و جدول ۳ نتایج شبیه سازی و پارامترهای کنترل کننده مربوط به حالت  $\alpha=0.5$  را نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۴ در این حالت نیز ردیابی تغییرات توان مطلوب با اعمال الگوریتم بهینه سازی، دقت خیلی بالاتر

در معادله ی ۱۸،  $\delta n_{rd}$  و  $\delta n_r$  به ترتیب تغییرات توان مطلوب و واقعی برای قلب راکتور است. بنابراین تابع هزینه کلی به شکل زیر نشان داده می‌شود:

جدول ۱۰-۱

$$J(\theta) = w_1 \cdot IAE + w_2 \cdot M_p \quad (19)$$

$$\theta = [k_p, k_i, k_d]$$

در معادله ی ۱۹،  $w_1$  و  $w_2$  ضرایب وزنی هستند که با سعی و خطا و به صورت تجربی انتخاب می‌شوند و  $M_p$  مقدار فراجاهش تغییرات توان واقعی است. مقادیر پارامترهای الگوریتم بهینه سازی مطابق جدول ۱ انتخاب شده است.

جدول ۱. مقادیر پارامترهای الگوریتم بهینه سازی TLBO

پارامتر	مقدار
تعداد تکرار	۳۰
تعداد اعضای جمعیت	۲۰۰
$w_1$	۱۰۰
$w_2$	۱۰

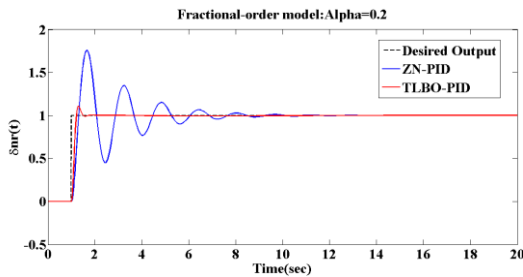
### ۳. نتایج شبیه سازی

در این بخش مدل مرتبه کسری سینتیک نقطه ای شرح داده شده برای راکتور با استفاده از نرم افزار سیمولینک متلب شبیه سازی شده است تا عملکرد ساختار کنترلی پیشنهادی ارزیابی شود.

هدف از شبیه سازی‌ها دنبال کردن الگوی تغییر توان مطلوب ارائه شده (الگوی پله) توسط تغییر توان خروجی راکتور است. این مدل با استفاده از توابع نوشته شده در متلب با الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری کوپل شده است.

حالت گذاری توانی در نظر گرفته شده به شکل ورودی پله و برای سه مقدار مختلف مرتبه ی پخش نابهنجار ( $\alpha$ ) اعمال شده است. پارامترهای بهینه ی کنترل کننده





شکل ۵. تغییرات توان نسبی راکتور برای حالت  $\alpha=0.2$

#### ۴. نتیجه گیری

در این مقاله از روش کنترل بهینه‌ی تناسبی-انتگرال گیر- مشتق گیر بر مبنای الگوریتم بهینه سازی آموزش و یادگیری به منظور ردیابی تغییرات توان مطلوب برای راکتور تحقیقاتی تهران استفاده شد.

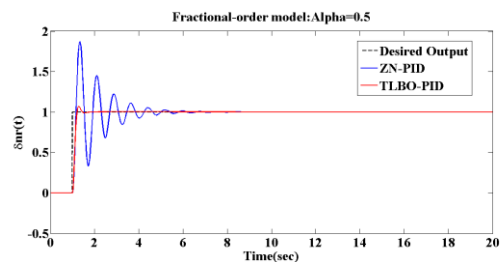
تابع هزینه به فرم مجموع انتگرال قدر مطلق خطای ردیابی توان قلب راکتور و میزان فراجشش آن در نظر گرفته شد. قلب راکتور بر مبنای مدل خطی شده مرتبه کسری سینتیک نقطه‌ای نوترون با در نظر گرفتن سه گروه نوترون تاخیری و برای سه مقدار مختلف مرتبه‌ی پخش نابهنجار شبیه سازی شد و شامل بازخوردهای سوخت، خنک کننده، ید و زینان بود.

با کاهش مقدار مرتبه‌ی پخش نابهنجار رفتار و ترابرد نوترون در نواحی که تغییرات شار نوترون زیاد است (مانند نزدیکی میله های سوخت، میله های کنترل و یا نواحی مرزی) بهتر مدل سازی و شبیه سازی می شود.

نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که الگوریتم کنترل بهینه در نظر گرفته شده به آسانی در عمل به کار گرفته می‌شود، فراجشش و نوسانات موجود در روش‌های تنظیمی موجود مانند روش زیگلر- نیکولز را به میزان زیادی کاهش می دهد، زمان نشست پاسخ سیستم را سریع تر کرده و در نتیجه باعث بهبود قابلیت اطمینان و ایمنی راکتور در پاسخ به حالات گذرای توانی و تغییرات بار می‌شود.

و نوسانات خیلی کمتری در مقایسه با روش زیگلر- نیکولز دارد.

خروجی های شبیه سازی شده و پارامترهای کنترل کننده برای حالت  $\alpha=0.2$  در شکل ۵ و جدول ۴ نشان داده شده است. این مدل توجیه و تفسیر بهتری از حرکت نوترون در جاهایی دارد که تغییرات محلی شار نوترون بسیار زیاد است. با توجه به شکل در این حالت نیز مشابه دو حالت قبل ردیابی تغییرات توان مرجع در هنگام اعمال روش بهینه‌ی موجود با نوسانات خیلی کمتر و زمان نشست خیلی کوچکتری در قیاس با روش زیگلر- نیکولز همراه است.



شکل ۴. تغییرات توان نسبی راکتور برای حالت  $\alpha=0.5$

#### جدول ۳. نتایج شبیه سازی برای حالت $\alpha=0.5$

پارامتر	الگوریتم زیگلر- نیکولز	الگوریتم TLBO
$k_p$	۵۴۶	۵,۳۱۸۶
$k_i$	۱۷۰,۰۹۳۵	۰,۱۶۰۷
$k_d$	۴,۳۸۱۶	۹,۹۹۷۹
فراجشش (درصد)	۸۶,۹۵	۷,۰۳
زمان نشست (ثانیه)	۳,۹۹۹۱	۰,۳۸۴۶
تعداد دفعات ارزیابی تابع هزینه	-	۱۲۲۰۰
کمترین مقدار تابع هزینه	-	۱۹۶۴,۷

جدول ۴. نتایج شبیه سازی برای حالت  $\alpha=0.2$ 

پیوست ۱: تعریف متغیرها		جدول ۴. نتایج شبیه سازی برای حالت $\alpha=0.2$		
متغیر	تعریف	الگوریتم زیگلر- نیکولز	الگوریتم TLBO	پارامتر
$n_r$	چگالی نوترون نسبت به چگالی تعادلی اولیه	۶۶۶	۱,۸۱۷	$k_p$
$c_r$	چگالی نسبی گروه نپاهسته	۱۰,۷۲۴۶	۰,۰۰۲۹	$k_i$
$\rho$	راکتیویته	۱,۰۳۴	۴,۱۴۷۶	$k_d$
$\lambda$	طول عمر موثر نوترون آبی (s)	۷۶,۰۲	۱۰,۷۸	فراجش (درصد)
$\beta$	ثابت واپاشی نپاهسته ( $s^{-1}$ )	۶,۵۵۸۶	۰,۴۵۴۴	زمان نشست (ثانیه)
$\mu_f$	کسر کل نوترون تاخیری	-	۱۲۲۰۰	تعداد دفعات
$\Omega$	ظرفیت حرارتی کل سوخت ( $MW.s/^\circ C$ )	-	۱۹۷۹,۴	ارزیابی تابع هزینه
$\rho_r$	ضریب انتقال حرارت بین سوخت و خنک کننده ( $MW/^\circ C$ )	-	-	کمترین مقدار
$G_r$	راکتیویته ناشی از حرکت میله کنترل	-	-	تابع هزینه
$\alpha_c$	ارزش کل راکتیویته میله کنترل	-	-	-
$T_{c0}$	ضریب راکتیویته دمائی خنک کننده ( $\Delta K/K/^\circ C$ )	-	-	-
$\lambda_x$	دمای متوسط ابتدایی حالت ماندگار خنک کننده	-	-	-
$\gamma_x$	ثابت واپاشی زینان ( $s^{-1}$ )	-	-	-
$\tau$	بهره زینان	-	-	-
$T_f$	زمان به آرامش رسیدن	-	-	-
$T_l$	دمای متوسط سوخت راکتور ( $^\circ C$ )	-	-	-
$T_e$	دمای آب خروجی از راکتور ( $^\circ C$ )	-	-	-
$T_c$	دمای آب ورودی به راکتور ( $^\circ C$ )	-	-	-
$f_f$	دمای متوسط خنک کننده راکتور ( $^\circ C$ )	-	-	-
$P_0$	کسر توان آزاد شده راکتور در سوخت	-	-	-
$\mu_c$	توان تعادلی اولیه (MW)	-	-	-
$M$	ظرفیت حرارتی کل خنک کننده راکتور ( $MW.s/^\circ C$ )	-	-	-
$Z_r$	دبی جریان جرمی ضربدر ظرفیت حرارتی خنک کننده ( $MW/^\circ C$ )	-	-	-
$\alpha_f$	ورودی کنترلی، سرعت میله کنترل	-	-	-
$T_{f0}$	ضریب راکتیویته دمائی سوخت ( $\Delta K/K/^\circ C$ )	-	-	-
$\sigma_x$	دمای ابتدایی حالت ماندگار سوخت	-	-	-
$\lambda_l$	سطح مقطع جذب میکروسکوپی زینان ( $cm^2$ )	-	-	-
$\gamma_l$	ثابت واپاشی ید ( $s^{-1}$ )	-	-	-
$\beta_i$	بهره ید	-	-	-
	کسر نوترون تاخیری گروه i	-	-	-

and Sustainable Energy Reviews 60(2016) 116–128.

3. Edwards RM, Lee KY, Schultz M. State feedback assisted classical control: an incremental approach to control modernization of existing and future nuclear reactors and power plants. Nuclear technology. 1990;92(2):167-85.

4. Ben-Abdenour A, Edwards RM, Lee KY. LQG/LTR robust control of nuclear reactors with improved temperature performance. IEEE Transactions on Nuclear Science. 1992;39(6):2286-94.

5. Park MG, Cho NZ. Time-optimal control of nuclear reactor power with adaptive proportional-integral-feedforward gains. IEEE Transactions on Nuclear Science. 1993;40(3):266-70.

6. Khorramabadi SS, Boroushaki M, Lucas C. Emotional learning based intelligent controller for a PWR nuclear reactor core during load following operation. Annals of Nuclear Energy. 2008;35(11):2051-8.

7. Etchepareborda A, Lolich J. Research reactor power controller design using an output feedback nonlinear receding horizon control method. Nuclear engineering and design. 2007;237(3):268-76.

8. Akin HL, Altin, V., . Rule based fuzzy logic controller for a PWR-type nuclear power plant. IEEE Trans Nucl Sci 38 (2), 883–890. 1991.

9. Liu C, Peng, J.F., Zhao, F.Y., Li, C., . Design and optimization of fuzzy-PID controller for the nuclear reactor power control. Nucl Eng Des 239 (11), 2311–2316. 2009.

10. Ansarifar G, Rafiei M. Higher order sliding mode controller design for a research nuclear reactor considering the effect of xenon concentration during load following operation. Annals of Nuclear Energy. 2015;75:728-35.

11. RM E. Robust optimal control of nuclear reactors. Pennsylvania State University. 1991.

12. Dong Z HX, Zhang LJ. Output-feedback load-following control of nuclear reactors based on a dissipative high gain filter. Nucl Eng Des 2011;241(12):4783–93. 2011.

13. Park MG CN. Time-optimal control of nuclear reactor power with adaptive proportional-integral-feedforward gains. IEEE Trans Nucl Sci 1993;40(3):266–70.

پیوست ۲. مقادیر پارامترهای نوترونیکی و ترموهیدرولیک

مقدار	پارامتر
۰,۰۰۶۵	$\beta$
۰,۰۰۰۰۴۱	$\Lambda$
۰,۰۹۵	$f_f$
-۲e-۵	$\alpha_f$
-۶e-۵	$\alpha_c$
۵	$P_0$
۰,۵۷۹۲	$\Omega$
۰,۰۰۶۵	$G_f$
۱۴۰۰۱۰,۰۳۹	$V$
۰,۰۰۰۲۱	$\beta_1$
۰,۰۰۲۲۵	$\beta_2$
۰,۰۰۴۰۴	$\beta_3$
۰,۰۱۲۴	$\lambda_1$
۰,۰۳۶۹	$\lambda_2$
۰,۶۳۲	$\lambda_3$
۰,۲, ۰,۵, ۰,۸	$\alpha$
۲,۰۱۷۷e+۱۵	$X_0$
۲۰۰	$E_f$
۴۹,۲۴۵۵	$\mu_f$
۱۹۷۶,۶۱۸	$\mu_c$
۶۵	$T_{f0}$
۴۳	$T_{c0}$
۳,۰۳۱	$M$
۳۳,۲۳۳e+۱۵	$B$
۰,۳۳۵۸	$\Sigma_f$
۱,۲۵۶e-۴	$\tau$
۰,۹۷۵	$\rho_{NL}$

## مراجع

1. S.H.Qaiser AIB, Masood Iqbal, R.Samar, J.Qadir. Model validation and higher order sliding mode controller design for a research reactor. Annals of nuclear energy 36(2009) 37-45. 2008.
2. X. W. Gang Li BL, Xiu Li , Bo Zhang , Yu Zou. Modeling and control of nuclear reactor cores for electricity generation: A review of advanced technologies. Renewable

- Progress in Nuclear Energy. 2019;117:103081.
26. AEOI. Safety Analysis Report for the Tehran Research Reactor (LEU), Tehran-Iran. 2001.
27. Torabi M, Lashkari A, Masoudi SF, Bagheri S. Neutronic analysis of control rod effect on safety parameters in Tehran Research Reactor. Nuclear Engineering and Technology. 2018.
14. Ku CC LK, Edwards RM. Improved nuclear reactor temperature control using diagonal recurrent neural networks. IEEE Trans Nucl Sci 1992;39 (6):2298–308.
15. Khorramabadi SS BM, Lucas C. Emotional learning based intelligent controller for a PWR nuclear reactor core during load following operation. Ann Nucl Energy 2008;35(11):2051–8.
16. Rojas-Ramírez E B-RJ, Ríos AS. A stable adaptive fuzzy control scheme for tracking an optimal power profile in a research nuclear reactor. Ann Nucl Energy 2013;58:238–45.
17. Coban R CB. A trajectory tracking genetic fuzzy logic controller for nuclear research reactors. Energy Convers Manag 2010;51(3):587–93.
18. Bennett S. The past of PID controllers. Annual Reviews in Control. 2001;25:43-53.
19. Araki M. PID control. Control Systems, Robotics and Automation: System Analysis and Control: Classical Approaches II, Unbehauen, H. EOLSS Publishers Co. Ltd., Oxford, UK; 2009.
20. Zhuang M, Atherton D, editors. Automatic tuning of optimum PID controllers. IEE Proceedings D (Control Theory and Applications); 1993: IET.
21. Ho WK, Hang CC, Cao LS. Tuning of PID controllers based on gain and phase margin specifications. Automatica. 1995;31(3):497-502.
22. Cominos P, Munro N. PID controllers: recent tuning methods and design to specification. IEE Proceedings-Control Theory and Applications. 2002;149(1):46-53.
23. Rao RV, Savsani VJ, Vakharia D. Teaching-learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems. Computer-Aided Design. 2011;43(3):303-15.
24. Espinosa-Paredes G, Polo-Labarrios M-A, Espinosa-Martinez E-G, del Valle-Gallegos E. Fractional neutron point kinetics equations for nuclear reactor dynamics. Annals of Nuclear Energy. 2011;38(2-3):307-30.
25. Rafiei M, Ansarifar G, Hadad K, Mohammadi M. Stability analysis of linear FNPk model considering reactivity feedback effects for a research nuclear reactor.



## Design of an optimized PID control system for Tehran research reactor based on TLBO algorithm

Meysam Rafiei<sup>1</sup>, Ataollah Rabiee<sup>1\*</sup>, Kamal Haddad<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Shiraz University

Received: 13 - 04 - 2020

Accepted: 15 - 06 - 2021

---

### Abstract

The reactor core in a nuclear power plant has safety and economic significance. In terms of reactor control, using optimal control for reactor core in a nuclear power plant is an important step in improving safety and increasing its reliability and availability. The failure of a nuclear power plant in the desired control of the reactor core can lead to more operational costs or reduce the safety and reliability of the plant. In general, the reactor core control contains the power (or coolant temperature) control and axial power difference (power distribution) control of the core. In this paper, for the first time, an optimized PID controller is used in power maneuvering transients for the Tehran research reactor. PID controller gains are optimized (tuned) by Teaching-learning-based optimization (TLBO) method according to the minimization of a cost function. This function is based on the sum of the integral of absolute error (IAE) and overshoot. The reactor core is simulated based on the linearized fractional neutron point kinetics (FNPK) equations. The model obtains temperature feedbacks from lumped fuel and coolant. Xenon concentration changes are also considered. Simulation results indicate that the optimized control method is easy to implement and eliminates the overshoot and fluctuations, which is common in conventional control methods such as the Ziegler-Nichols tuning method. It has a faster response to load changes in power maneuvering transients. Therefore, improves the reliability and safety of the reactor.

**Keywords:** Tehran research reactor, Optimized PID controller, Linearized fractional neutron point kinetics, Integral of absolute error, TLBO algorithm

---