



## کنترل بار مدل نقطه‌ای رآکتور هسته‌ای نوع PWR با استفاده از کنترلر تنظیم‌شده با الگوریتم DE

سیدمحمدحسین موسی‌کاظمی‌محمدی\*

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی: ۱۹۳۹۵-۴۶۹۷، تهران- ایران

\*Email: smh\_mousakazemi@pnu.ac.ir , mousakazemi@gmail.com

### مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۳/۲۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۸/۱۱

### چکیده

کنترل بار در یک رآکتور هسته‌ای به دلیل طبیعت دینامیک غیرخطی آن و وابستگی برخی از پارامترها به توان خروجی، حایز اهمیت است. کنترل‌کننده تناسبی-انتگرال‌گیر-مشتق‌گیر (PID) به عنوان یک انتخاب آسان، به صورت متداول برای یک کنترل مطمئن مورد توجه قرار دارد. در این پژوهش، چگالی نسبی نوترون در مدل سینتیک نقطه‌ای یک رآکتور آبی تحت فشار (PWR) توسط یک PID بهینه شده با الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) فراابتکاری کنترل می‌شود. از شاخص عملکرد انتگرال وزن شده زمانی قدرمطلق خطا (ITAE) برای بهینه‌سازی با این الگوریتم استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که سیستم کنترل بهینه‌شده توسط الگوریتم DE، کارایی و دقتی مناسب در پاسخ به یک تقاضای بار دارد.

**کلیدواژه‌ها:** رآکتور PWR، مدل سینتیک نقطه‌ای، الگوریتم DE، کنترل‌کننده PID

## Load control of the point model of a PWR-type nuclear reactor using a tuned controller with the DE algorithm

S.M.H. Mousakazemi\*

Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, Payame Noor University, P.O.Box: 19395-4697, Tehran - Iran

### Research Article

Received 19.6.2022, Accepted 2.11.2022

### Abstract

The load control of a nuclear reactor is important due to the nonlinear nature of its dynamics and the dependence of some parameters on the output power. the Proportional-Integral-Derivative controller (PID) is commonly regarded as an easy choice for reliable control. In this research, the relative neutron density in the point kinetics model of a Pressurized Water Reactor (PWR) is controlled by an optimized PID with the meta-heuristic Differential Evolution (DE) algorithm. The Integral of Time-Absolute Error (ITAE) performance index has been used for optimization with this algorithm. The simulation results show that the optimized control system with the DE algorithm has the appropriate efficiency and accuracy in response to power demand.

**Keywords:** PWR, Point kinetics model, DE algorithm, PID controller



## ۱. مقدمه

در حالی که، در استفاده از روش‌های تصادفی نظیر الگوریتم‌های فراابتکاری، می‌توان بدون خطی‌سازی از معادلات سینتیک در محیط سیمولینک متلب استفاده کرد و نتایج شبیه‌سازی را در بدنه الگوریتم استفاده نمود. یک الگوریتم فراابتکاری نیاز به فیزیک مسئله ندارد. این الگوریتم‌ها می‌توانند ضرایب PID را در هر دوره زمانی تولید نمایند و در فرایند بهینه‌سازی خود از خروجی شبیه‌سازی تنها در مقایسه نتایج و تصمیم‌سازی برای ادامه الگوریتم و تولید ضرایب جدید برای PID استفاده کنند. در نتیجه، نوع معادلات از نظر خطی بودن، غیرخطی بودن و یا تعداد آن‌ها در فرایند بهینه‌سازی اثرگذار نیست و هر سناریوی تغییر توان را می‌توان در سیمولینک به کار برد و نیاز به بازنویسی یا محاسبات نظری مجدد نیست. کارایی این روش در منابع [۶، ۷] نشان داده شده‌اند.

در این پژوهش، کنترل بهینه توان مدل سینتیک نقطه‌ای یک رآکتور هسته‌ای نوع PWR هدف‌گذاری شده است. کنترل‌کننده استاندارد PID توسط الگوریتم DE تنظیم می‌شود. خروجی با PID تنظیم شده به صورت تجربی مقایسه می‌شود.

در ادامه این بخش و در بخش ۲، ابزارها و روش کار معرفی می‌شوند. این بخش شامل مدل سینتیک نقطه‌ای رآکتور به همراه معادلات لازم، ساختار الگوریتم DE، معرفی کنترل‌کننده PID و معرفی مدل سیستم کنترل حلقه بسته مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی DE است. در بخش ۳ نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی‌ها همراه با مباحث مربوط ارائه شده است. در نهایت، بخش ۴ شامل نتیجه‌گیری از روند کار و کیفیت نتایج حاصل است.

## ۲. ابزار و روش‌ها

## ۲.۱ مدل دینامیکی رآکتور هسته‌ای

با توجه به معادله‌های استفاده شده (معادله‌های ۱ تا ۷)، مدل دیفرانسیلی مرتبه ۹ برای شبیه‌سازی غیرخطی در سیمولینک متلب استفاده می‌شود. قابل ذکر است که مرتبه مدل از تعداد مجهول‌های آن؛ یعنی پارامترهای دینامیکی نظیر چگالی نوترون، تعداد گروه‌های نپاهسته<sup>۸</sup> نوترون تأخیری، معادلات دمایی سوخت و خنک‌کننده، سموم نوترونی و معادله تغییر راکتیویته القایی خارجی تعیین می‌شود.

مطالعه درباره کنترل بار رآکتور قدرت هسته‌ای به دلیل طبیعت غیرخطی آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. استفاده از یک کنترل بهینه در مواجهه با این موضوع در پژوهش‌های بسیاری از محققان مورد بررسی قرار گرفته است. الگوریتم‌های فراابتکاری<sup>۱</sup> در این بین نقش مهمی را ایفا می‌نمایند. مطالعات گوناگونی در صنعت هسته‌ای با استفاده از این الگوریتم‌ها انجام پذیرفته است [۱-۷]. Coban شبکه‌های عصبی را با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک (GA)<sup>۲</sup> برای کنترل رآکتور تحقیقاتی هسته‌ای به کار برد [۸]. Can و Coban الگوریتم ژنتیک را برای استفاده در کنترل‌کننده فازی برای کنترل سطح توان یک رآکتور تحقیقاتی به کار بردند [۹]. در سال‌های اخیر، موسی کاظمی و همکاران در تحقیقات جداگانه‌ای، کنترل‌کننده تناسبی-انتگرال‌گیر- مشتق‌گیر (PID)<sup>۳</sup> را توسط الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)<sup>۴</sup> بهینه‌سازی کرده‌اند [۶، ۷]. نتایج کار آن‌ها بر دقت مناسب سیستم کنترل بهینه‌شده توسط این الگوریتم‌های فراابتکاری دلالت دارد. Maio و همکاران الگوریتم تکامل تفاضلی (DE)<sup>۵</sup> را برای تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان دینامیکی سیستم‌های هسته‌ای به کار برده‌اند [۱۰]. آن‌ها قابلیت این روش را با توجه به ژنراتور بخار دینامیکی یک نیروگاه هسته‌ای مورد تأیید قرار دادند. Phan و همکاران الگوریتم DE را برای بهینه‌سازی بارگذاری سوخت یک رآکتور تحقیقاتی ۵۰۰ کیلووات نوع استخری به کار بردند [۱۱]. نتایج کار آن‌ها کارایی بیشتری را از نظر قدرت جستجو و رویکرد بهینه‌سازی عمومی در مقابل الگوریتم ژنتیک نشان داد. Ding و همکاران نیز بهینه‌سازی الگوی بارگذاری سوخت قلب یک رآکتور هسته‌ای نوع آبی تحت فشار (PWR)<sup>۶</sup> را به وسیله الگوریتم DE انجام دادند [۱۲].

در روش‌های تحلیلی، معادلات سینتیک رآکتور خطی‌سازی می‌شوند. در استفاده از روش‌های نظری و تحلیلی، باید از ورودی پله واحد استفاده کرد. در حالی که، خروجی رآکتور هسته‌ای که همان ورودی حلقه بسته مدل دینامیکی است، یک تابع شیب‌دار<sup>۷</sup> است. از طرفی، روش‌های نظری و خطی‌سازی زمان‌بر و دارای خطاهای تقریب هستند. هم‌چنین، اعمال سناریوهای مختلف تغییر توان نیاز به محاسبات مجدد دارد.

1. Meta-Heuristic Algorithms
2. Genetic Algorithm
3. Proportional-Integral-Derivative
4. Particle Swarm Optimization
5. Differential Evolution
6. Pressurized Water Reactor
7. Ramp



۴.۱.۲ راکتیویته میله کنترل  
معادله راکتیویته القایی ناشی از حرکت میله کنترل به صورت  
زیر است [۱۴، ۱۵]:

$$\frac{d\rho_r}{dt} = G_r Z_r \quad (7)$$

۵.۱.۲ راکتیویته القایی کل  
راکتیویته القایی کل شامل راکتیویته ناشی از میله کنترل،  
بازخوردهای زینان، دمای خنک‌کننده و دمای سوخت است  
[۱۴، ۱۵]:

$$\rho = \delta\rho_r + \alpha_f(T_f - T_{f0}) + \alpha_c(T_c - T_{c0}) - \alpha_X(X - X_0) \quad (8)$$

معادله‌های (۱ تا ۸) به طور مستقیم برای هر عضو تولید شده  
در الگوریتم DE (بخش ۲.۲) در سیمولینک متلب و در قالب  
یک بلاک استفاده می‌شوند. با توجه به ضرایب PID تولید شده  
در هر دوره تکرار الگوریتم DE (بخش ۲.۲) و ورودی مدل  
دینامیکی (تقاضای بار مورد نظر)، فرایند بهینه‌سازی و استفاده  
مجدد از این بلاک معادلات دینامیکی در سیمولینک دنبال  
می‌شود. در هر ارزیابی اعضای جمعیت هدف توسط تابع هدف،  
این بلاک سیمولینک فراخوانده می‌شود و خروجی شبیه‌سازی  
برای استفاده به عنوان شاخص عملکرد در محاسبه تابع هدف و  
تصمیم‌گیری به بدنه الگوریتم DE وارد می‌شود.

#### ۲.۲ الگوریتم تکامل تفاضلی (DE)

الگوریتم DE در سال ۱۹۹۰ میلادی توسط Storn و Price  
معرفی شد [۱۶، ۱۷]. همان‌طور که می‌دانیم، یکی از معایب  
الگوریتم ژنتیک نداشتن جستجوی محلی<sup>۳</sup> است. در الگوریتم  
ژنتیک و در عملگر انتخاب<sup>۴</sup>، یک والد با توجه به شایستگی که  
دارد شانس انتخاب شدن دارد. در حالی که، در الگوریتم DE  
همه جواب‌ها شانس انتخاب شدن دارند؛ یعنی پس از اعمال  
جهش<sup>۵</sup> و تقاطع<sup>۶</sup>، پاسخ جدید با مقدار قبلی مقایسه شده و در  
صورت بهتر بودن جایگزین آن می‌شود.  
در الگوریتم DE عملگر تقاطع پس از جهش اعمال می‌شود.  
هم‌چنین، طول گام جهش از فاصله اعضای فعلی تعیین می‌شود  
و تابع توزیع خاصی نیست.

در این پژوهش از مدل سینتیک نقطه‌ای همراه با  
بازخوردهای<sup>۱</sup> دمای سوخت، دمای خنک‌کننده و سم نوترونی  
زینان استفاده شده است.

#### ۱.۱.۲ مدل نوترونی

مدل نوترونی براساس مدل سینتیک نقطه‌ای با سه گروه  
نپاهسته نوترون تأخیری به صورت زیر استفاده شده است [۱۳].  
بدیهی است در مدل نسبی، توان نسبی با چگالی نسبی نوترون  
برابر است.

$$\frac{dn_r}{dt} = \frac{\rho - \beta}{l} n_r + \sum_{i=1}^r \frac{\beta_i}{l} c_{ri} \quad (1)$$

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

#### ۲.۱.۲ مدل زینان و ید

برخی از سموم نوترون حرارتی سطح مقطع جذب نسبتاً بالایی  
دارند که باید در نظر گرفته شوند. زینان-۱۳۵ مهم‌ترین سم  
نوترون حرارتی است که به صورت مستقیم از شکافت اورانیم و  
هم‌چنین به صورت غیرمستقیم از واپاشی ید-۱۳۵ تولید  
می‌شود؛ بنابراین غلظت زینان به غلظت ید بستگی دارد.  
معادله‌های تغییرات غلظت ید و زینان به صورت زیر مدل  
می‌شوند [۱۳]:

$$\frac{dX}{dt} = (\lambda_X \Sigma_f - \sigma_X X) \Phi - \lambda_X X + \lambda_I I \quad (3)$$

$$\frac{dI}{dt} = \gamma_I \Sigma_f \Phi - \lambda_I I \quad (4)$$

#### ۳.۱.۲ مدل دمای سوخت و دمای خنک‌کننده

معادله‌های تغییرات دمای سوخت و دمای خنک‌کننده به شکل  
مدل یکپارچه<sup>۲</sup> به صورت زیر مدل می‌شوند [۱۴، ۱۵]:

$$\frac{dT_f}{dt} = \frac{f_f P_0}{\mu_f} n_r + \frac{\Omega}{\mu_f} (T_f - T_c) \quad (5)$$

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{(1 - f_f) P_0}{\mu_c} n_r + \frac{\Omega}{\mu_c} (T_f - T_c) - \frac{M}{\mu_c} (T_c - T_e) \quad (6)$$

3. Local Search

4. Selection

5. Mutation

6. Crossover

Journal of Nuclear Science and Technology

Vol. 44 (4), Serial Number 105, 2023, P 28-37

1. Feedback

2. Lumped



۱.۲.۲ الگوریتم

الف) تولید جمعیت اولیه

جمعیت اولیه ( $n_p$ ) با استفاده از توزیع یکنواخت و به صورت تصادفی به شکل  $x_{i,G}, i=1,2,\dots,n_p$  برای هر نسل ( $G$ ) ایجاد می‌شود. استفاده از این نوع توزیع موجب می‌شود که اعضای جمعیت به صورت یکسان در فضا توزیع شوند و در مراحل الگوریتم به یکدیگر نزدیک شوند تا به جواب بهینه برسیم. اعضای جمعیت همان ۳ ضریب کنترل کننده PID هستند؛ یعنی هر عضو جمعیت که به صورت تصادفی ایجاد می‌شود شامل ضرایب PID است. در نتیجه، تنها ارتباط الگوریتم DE با فیزیک مسأله همین ضرایب هستند و معادلات (۱ تا ۸) به صورت مستقیم در بدنه الگوریتم DE نقشی ندارند؛ یعنی تنها نتایج خروجی مورد نظر سیمولینک متلب برای محاسبه تابع هدف که در بخش ۲.۲.۲ توضیح داده خواهد شد، در فرایند بهینه‌سازی تأثیر می‌گذارد. چهار عضو از جمعیت به صورت تصادفی انتخاب شده که یکی به عنوان عضو هدف و سه عضو دیگر بردارهای سه‌گانه را تشکیل می‌دهند.

ب) جهش

یکی از نکات مهم در این الگوریتم مقدار ضریب مقیاس است. در صورتی که این ضریب کوچک باشد، با توجه به کم شدن طول گام‌ها در عملگر جهش، زمان جستجو بیشتر می‌شود. ولی اگر این ضریب بزرگ باشد، باعث صرف نظر شدن جواب‌های مناسب می‌شود. در این مرحله، تفاضل بردار دوم و سوم در ضریب مقیاس ( $F$ ) ضرب شده و با بردار اول جمع می‌شود. بدین ترتیب بردار جهش یافته ( $V_{i,G+1}$ ) به دست می‌آید [۱۶].

$$V_{i,G+1} = x_{r1,G} + F \times (x_{r2,G} - x_{r3,G}) \quad (9)$$

پ) تقاطع

یک عدد تصادفی بین صفر و یک تولید و با میزان نرخ تقاطع مقایسه می‌شود. در صورتی که این عدد از میزان نرخ تقاطع کم‌تر باشد، عضو مورد نظر از بردار جهش یافته برداشته می‌شود. با تکرار این امر، تمام عناصر یک عضو از بردار جهش یافته یا مقادیر اولیه خود (بدون جهش) انتخاب می‌شوند [۱۶].

$$u_{ji,G+1} = \begin{cases} V_{ji,G+1} & \text{if } rand(j) \leq Cr \text{ or } j = randb() \\ x_{ji,G} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

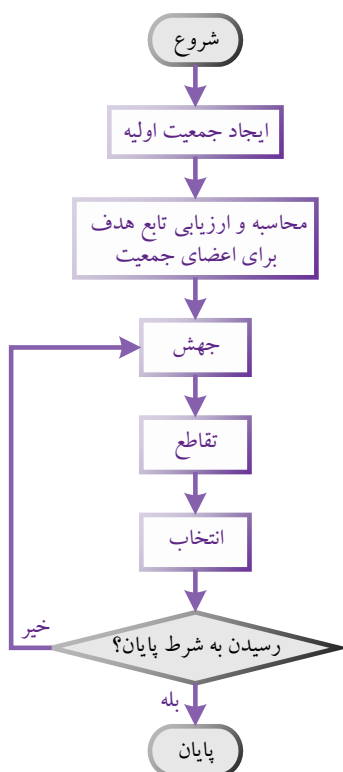
ت) انتخاب

یک بردار مقیاس تولید و با بردار اولیه مقایسه می‌شود و اگر دارای هزینه (مقدار تابع هدف) کم‌تری باشد جایگزین ماتریس قبلی می‌شود. این روند برای همه اعضای جمعیت پیاده می‌شود [۱۶].

$$x_{ji,G+1} = \begin{cases} u_{ji,G+1} & \text{if } f(u_{ji,G+1}) \leq f(x_{ji,G}) \\ x_{ji,G} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

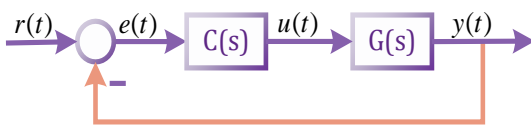
در تکرارهای بعدی حلقه، این روند ادامه می‌یابد تا شرایط خاتمه حلقه حاصل شود. شکل ۱ فلوچارت این الگوریتم را نشان می‌دهد.

معیار پایان حلقه تعداد مشخصی از تکرار حلقه الگوریتم در نظر گرفته شده است. یکی از معیارهای صحت و اعتبار پاسخ الگوریتم‌های فراابتکاری در یک مسأله، همگرایی تابع هدف است. در واقع، یک شرط فیزیکی که در تابع هدف تعریف می‌شود، شرط اتمام حلقه است. با این توضیح که این تابع هدف باید در تکرارهایی ثابت بماند و به همگرایی برسد تا عملاً شرط فیزیکی مسأله برآورده شود و پاسخ نزدیک به بهینه حاصل شود.

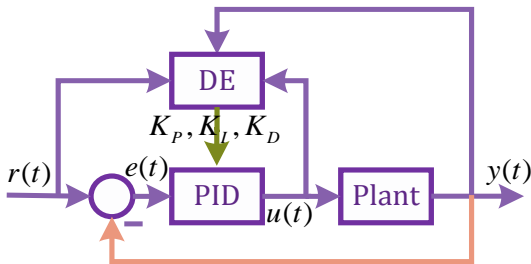


شکل ۱. فلوچارت الگوریتم DE





شکل ۲. سیستم کلاسیک PID؛ C(s): کنترل‌کننده، G(s): مدل سیستم.



شکل ۳. سیستم کنترل پیشنهادی مبتنی بر بهینه‌سازی الگوریتم DE.

مطابق با آنچه که در فرایند الگوریتم DE در بخش ۲.۲ بیان شد، اعضای جمعیت شامل ضرایب تولیدی PID هستند که به سیمولینک متلب ارسال می‌شوند تا در یک ناحیه (بازه زمانی) از تقاضای بار مطلوب، شبیه‌سازی دینامیکی انجام شود. خروجی این شبیه‌سازی که از معادلات دینامیکی بخش ۱.۲ حاصل می‌شود، در انتهای آن بازه زمانی در محاسبه تابع هدف (در این جا ITAE) استفاده می‌شود. مقدار این تابع هدف در فرایند تعیین شایستگی و ارزیابی اعضای جمعیت (اولیه، جهش یافته یا متقاطع) در داخل الگوریتم (بخش ۲.۲) به کار گرفته می‌شود تا با تکرار این فرایند در دوره‌های بعدی حلقه الگوریتم، به بهترین مقدار تابع هدف (در این جا هزینه) برسیم. اعضای بهترین عضو جمعیت بهترین ضرایب PID برای آن ناحیه بار خروجی هستند.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۱.۳ تقاضای بار حالت ۱

برای یک تقاضای بار (تغییر چگالی نسبی نوترون مطلوب)  $100\% \leftarrow 40\% \leftarrow 100\%$  با تغییرات شیب  $\pm 10\%$  در دقیقه بهینه‌سازی ضرایب PID انجام شده است. این خط سیر بار، به ۴ ناحیه تقسیم‌بندی شده است و این بهینه‌سازی‌ها برای نواحی بعد از ناحیه پایای اولیه (۱۰۰ درصد توان نامی) انجام گرفته است. برای هر یک از این نواحی، یک دسته جداگانه از ضرایب بهینه‌شده برای PID به دست می‌آید. نتایج تحلیلی حاصل از شبیه‌سازی‌ها برای هر ناحیه در جدول ۱ آورده شده است. در نتایج هر ناحیه مشاهده می‌شود که اندازه فراجش‌ها<sup>۲</sup> یا فروجش‌ها<sup>۳</sup> از مرتبه بسیار پایین  $10^{-5}$  هستند. خطاهای حالت

در این پژوهش، معیار پایان حلقه، تعداد مشخصی تکرار (۱۵۰ تکرار) است. این رقم براساس تکرار شبیه‌سازی و نتایج خروجی در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است، در یک مدل مشخص، با اولین شبیه‌سازی حدود این تکرار مشخص می‌شود و در سناریوهای مختلف تغییر بار خروجی برای بهینه‌سازی ضرایب PID، می‌توان از همین تعداد تکرار استفاده کرد.

#### ۲.۲.۲ تابع هدف (هزینه)

به معیاری برای یافتن بهترین عضو داخل جمعیت نیاز است. وظیفه این ارزیابی برعهده تابع هدف (در این جا هزینه) است. در این پژوهش، از انتگرال وزن شده زمانی قدرمطلق خطا (ITAE)<sup>۱</sup> استفاده شده است. معادله (۱۲) این شاخص عملکرد را معرفی می‌کند [۱۸].

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (12)$$

که  $t$  زمان و  $e(t)$  خطای بین خروجی و سیگنال مرجع هستند.

#### ۲.۳ کنترل‌کننده PID

PID کنترل‌کننده‌ای ساده است و در بسیاری از صنایع استفاده می‌شود. تابع زمانی خروجی این کنترل‌کننده به صورت زیر است [۱۹]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (13)$$

که  $K_p, K_I, K_D \in R$  به ترتیب ضرایب تناسبی، انتگرال‌گیر و مشتق‌گیر؛ و  $u(t)$  خروجی کنترل‌کننده (سیگنال کنترلی) هستند.

سیستم استاندارد کنترل حلقه‌بسته PID به شکل ۲ است.

#### ۲.۴ سیستم کنترل مبتنی بر بهینه‌سازی الگوریتم (DE-PID)

کد متنی الگوریتم DE مطابق با شکل ۳ به سیستم کنترل PID اضافه می‌شود. بخش DE بهترین ضرایب PID را در هر فاز توان (بازه زمانی) بهینه می‌کند. این بهینه‌سازی با توجه به پارامترهای لازم برای تابع هدف الگوریتم، نظیر خروجی سیستم، سیگنال کنترلی و سیگنال مطلوب انجام می‌پذیرد.

2. Overshoot

3. Undershoot



نشان می‌دهد. دقت مناسب، کم‌ترین خطا و کم‌ترین جهش در نواحی حالت پایا (نواحی ۲ و ۴) به خوبی نشان داده شده است. شکل ۵ تغییرات تابع هدف (هزینه) برحسب تکرارها را نشان می‌دهد. همگرایی شاخص عملکرد ITAE در تمام نواحی به خوبی نشان داده شده است. این همگرایی دقت و صحت الگوریتم DE را نشان می‌دهد. هم‌چنین انتخاب تعداد تکرار برای شرط اختتام حلقه را تأیید می‌نماید.

پایا در هر ناحیه از مرتبه بسیار پایین  $10^{-8}$  یا  $10^{-10}$  هستند. هم‌چنین، تابع هزینه (ITAE) در تمام نواحی در مرتبه صدم قرار دارد. این نتایج کارایی مناسب الگوریتم DE در بهینه‌سازی ضرایب PID در کنترل بار یک رآکتور هسته‌ای از نوع PWR را نشان می‌دهد.

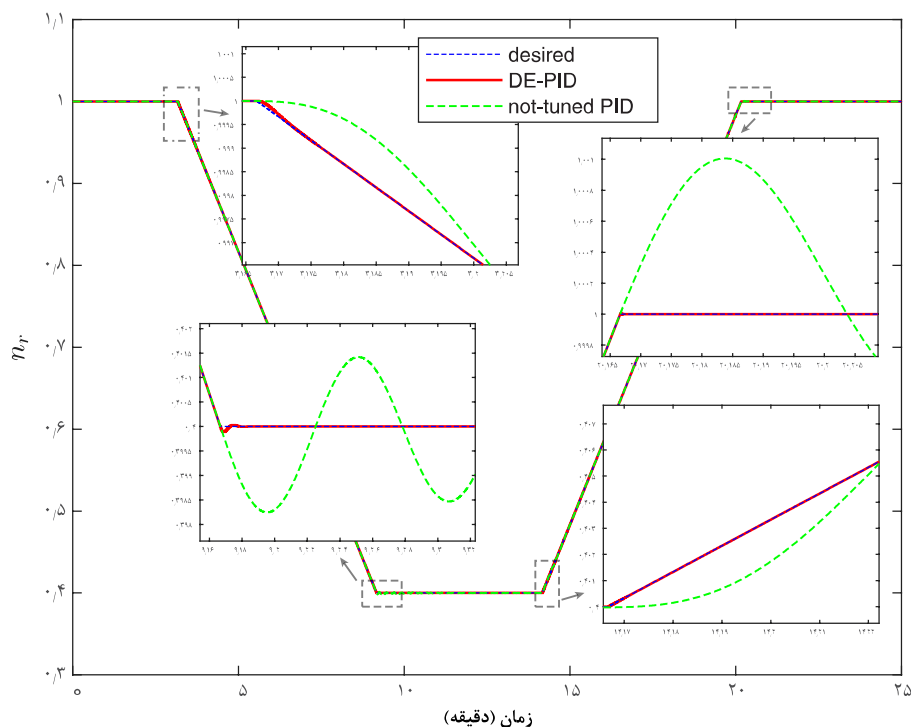
شکل ۴ نتایج شبیه‌سازی برای سیستم کنترل پیشنهادی و سیستم کنترل تنظیم شده تجربی (با عنوان not-tuned) را

جدول ۱. نتایج تحلیلی شبیه‌سازی‌ها

پارامترها	ناحیه ۱	ناحیه ۲	ناحیه ۳	ناحیه ۴
بازه زمانی (ثانیه)	۵۵۰-۱۹۰	۸۵۰-۵۵۰	۱۲۱۰-۸۵۰	۱۵۰۰-۱۲۱۰
اندازه فراجهش / فروجهش*	$8,22 \times 10^{-5}$	$11,09 \times 10^{-5}$	$1,47 \times 10^{-5}$	$0,2 \times 10^{-5}$
زمان نشست (ثانیه)	○	○	○	○
زمان صعود (ثانیه)	○	○	○	○
خطای حالت پایا**	$10,26 \times 10^{-8}$	$1,81 \times 10^{-10}$	$0,95 \times 10^{-8}$	$0,22 \times 10^{-10}$
بهترین هزینه (ITAE)	۰,۰۱۶۱۷۸	۰,۰۲۳۲۶۲	۰,۰۱۴۷۹۹	۰,۰۰۴۱۸

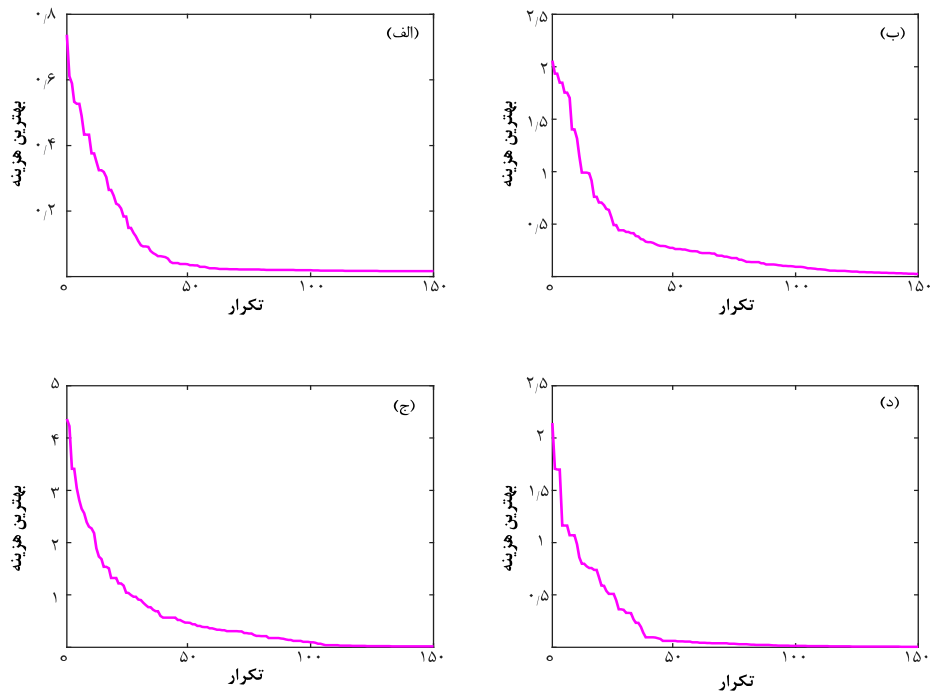
\* در حالت شیب: بیش‌ترین انحراف از سیگنال مطلوب

\*\* در حالت شیب: خطا در آخرین لحظه

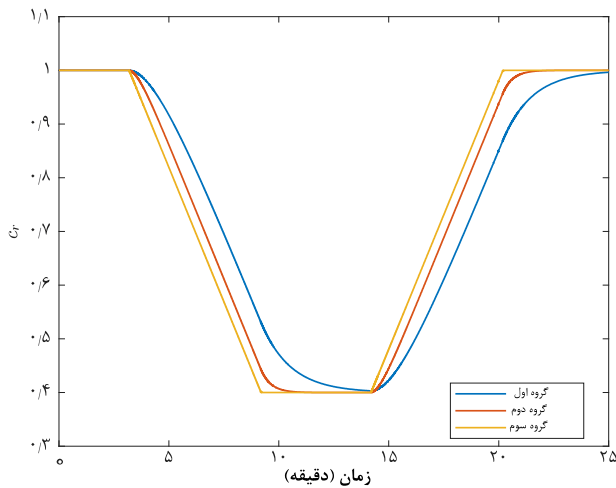


شکل ۴. چگالی نسبی نوترون برای سیستم بهینه‌شده توسط DE و تنظیم شده تجربی، برحسب دقیقه، در حالت ۱.

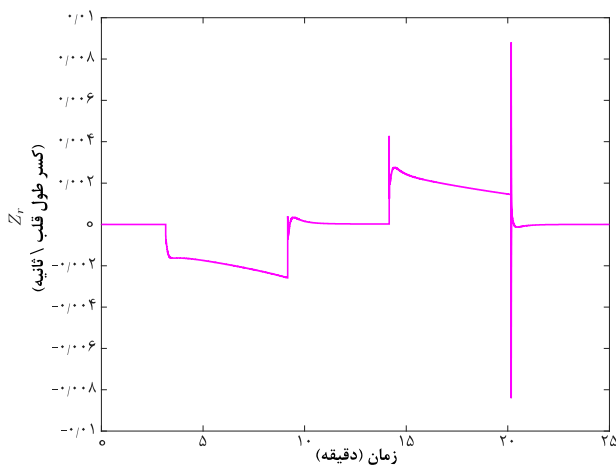




شکل ۵. منحنی تابع هدف بر حسب تکرارها در (الف) ناحیه ۱، (ب) ناحیه ۲، (ج) ناحیه ۳ و (د) ناحیه ۴.



شکل ۶. تغییرات چگالی نسبی نیاهسته نوترون تأخیری.



شکل ۷. تغییرات سرعت میله کنترل.

شکل ۶ تغییرات چگالی نسبی نیاهسته نوترون‌های تأخیری را در مدل سینتیک نقطه‌ای نشان می‌دهد. این تغییرات به خوبی تغییرات و پروفایل چگالی نسبی نوترون را دنبال می‌کنند. شکل ۷ تغییرات سرعت میله کنترل را نشان می‌دهد. دامنه این تغییرات کم است و بدون نیاز به اعمال کنترل اضافی یا محدودیت سخت‌افزاری، به خوبی می‌تواند به سخت‌افزار کنترلی اعمال شود.

شکل ۸ تغییرات راکتیویته القایی ناشی از حرکت میله‌های کنترلی و کنترل‌پذیری قلب توسط آن‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به ارزش مجموعه میله کنترلی در مدل رآکتور این پژوهش ( $14/5 \times 10^{-3} \delta k/k$ )، همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، مقادیر دامنه راکتیویته القایی لازم برای ردگیری بار خروجی برای نواحی فروجهش و فراجاهش (ناحیه ۲ و ۴) به ترتیب  $10^{-3} \delta k/k$  و  $24/39 \times 10^{-5} \delta k/k$  هستند. این مقادیر نشان می‌دهند که این مجموعه میله کنترلی به خوبی می‌تواند رآکتور را در شدیدترین حالت تغییر بار، کنترل نماید.

شکل ۹ تغییرات راکتیویته کل را نشان می‌دهد که در حالت‌های پایا به صفر میل پیدا کرده است. هم‌چنین متناسب با نیاز به تغییر سطح بار، این راکتیویته تغییر کرده است. شکل ۱۰ تغییرات دمایی سوخت را نشان می‌دهد که پروفایلی شبیه تغییر چگالی نسبی نوترون دارد. این شکل به خوبی کنترل‌پذیری و پایداری دمایی سوخت در کل خط سیر بار خروجی را نشان می‌دهد.

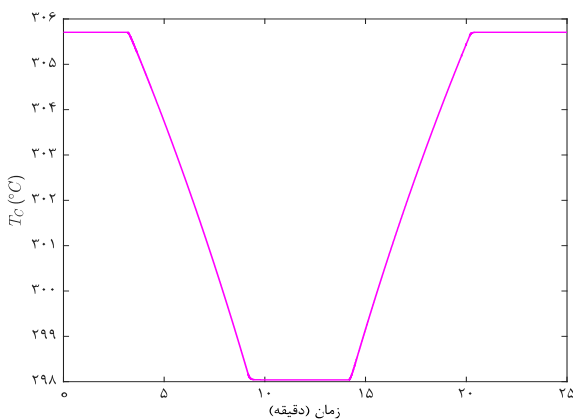


شکل ۱۲ تغییرات غلظت زینان را نشان می‌دهد. توان در نواحی ۱ و ۲ به ترتیب کاهش و سپس ثابت می‌شود. با توجه به معادله (۳) و ثوابت واپاشی و نرخ تولید ید و زینان، افزایش زینان بر کاهش آن غلبه می‌نماید که در این شکل نشان داده شده است. همچنین با افزایش توان در ناحیه ۳ این افزایش غلظت زینان ادامه می‌یابد. اما در ناحیه ۴ که توان ثابت می‌شود، تعادلی بین تولید و مصرف زینان برقرار می‌شود و غلظت زینان به یک تعادل نسبی می‌رسد.

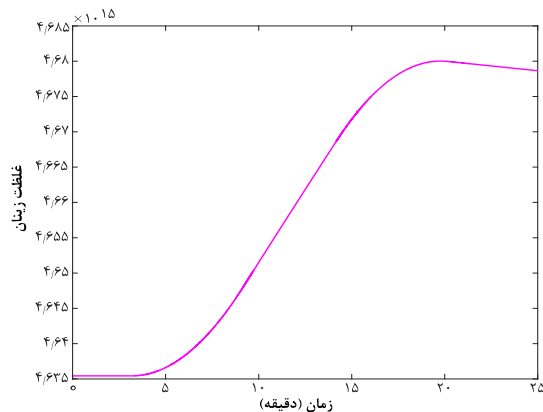
### ۳.۲ تقاضای بار حالت ۲

برای نشان دادن توانایی الگوریتم DE در تعیین ضرایب بهینه PID که منجر به خروجی پایدار در نواحی تغییر بار می‌شود، یک تقاضای بار دیگر (تغییر چگالی نسبی نوترون)  $1.00 \rightarrow 0.60 \rightarrow 1.00$  با تغییرات شیب  $\pm 8\%$  در دقیقه در نظر قرار گرفته می‌شود.

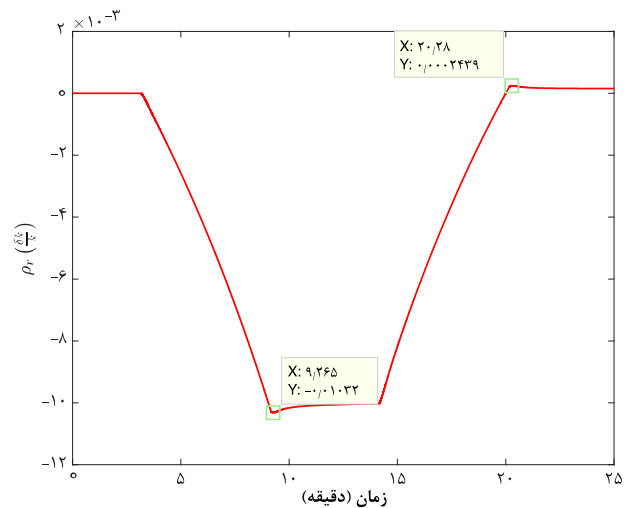
نتیجه سیستم کنترلی DE-PID برای این خط سیر بار، در شکل ۱۳ نشان داده شده است. این شکل به خوبی پایداری خروجی سیستم کنترلی در نواحی مختلف تغییر بار را نشان می‌دهد. این نتیجه قابل انتظار است؛ زیرا همان‌گونه که قبلاً بیان شد، الگوریتم‌های فراابتکاری در تکرارهای حلقه خود بهترین پاسخ (کم‌ترین هزینه) برای تابع هدف را گزینش می‌کنند. این بدان معنی است که پایداری بیش‌تر منجر به کم‌تر شدن مقدار تابع هزینه (ITAE) می‌شود.



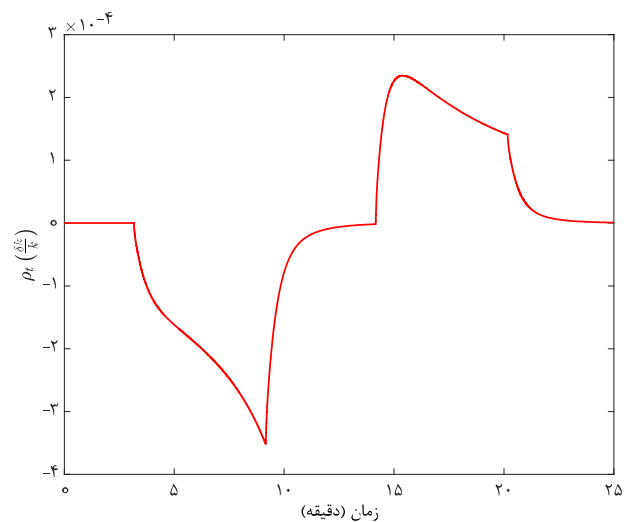
شکل ۱۱. تغییرات دمای خنک‌کننده.



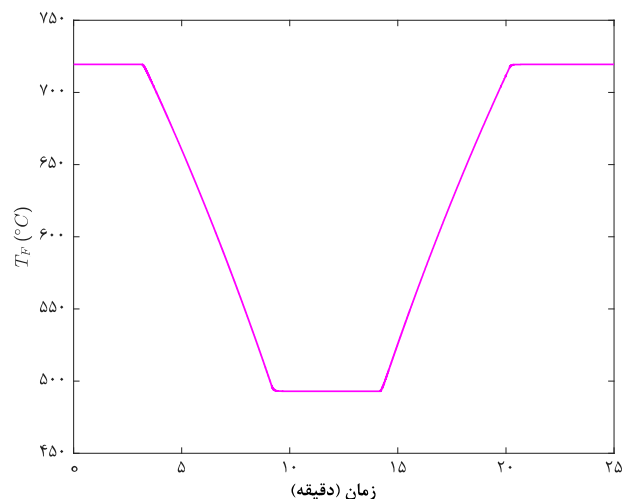
شکل ۱۲. تغییرات غلظت زینان.



شکل ۸. تغییرات راکتیویته میله کنترل.



شکل ۹. تغییرات راکتیویته کل.



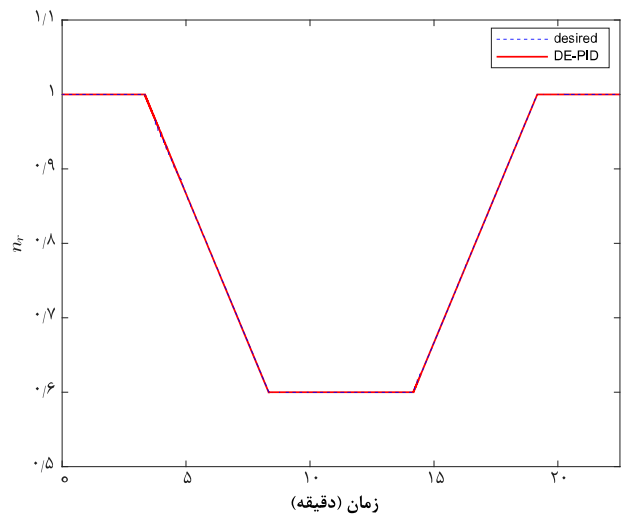
شکل ۱۰. تغییرات دمای سوخت.

شکل ۱۱ تغییرات دمای خنک‌کننده را نشان می‌دهد که پروفایلی شبیه تغییر چگالی نسبی نوترون دارد. این شکل نیز کنترل‌پذیری و پایداری دمای خنک‌کننده در این گذر زمانی را نشان می‌دهد.





فیزیک مسأله ندارند. روش‌های نظری مرسوم نیاز به ساده‌سازی و خطی‌سازی معادلات غیرخطی دارند که این امر منجر به کاهش دقت و حتی اعتبار نتایج می‌شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که این الگوریتم با ساختار تصادفی خود، با کم‌ترین هزینه از نظر محاسبات و زمان به پاسخ نزدیک به بهینه خواهد رسید. همچنین، در این بهینه‌سازی از شاخص عملکرد ITAE برای تضمین کیفیت نتایج خروجی استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که این تابع هزینه به همگرایی و کم‌ترین مقدار خود رسیده است. همچنین، در تغییر فازهای مختلف تغییر بار خروجی، جهش‌ها و خطاهای حالت پایایی بسیار کمی به دست آمده است. پایداری خروجی در هر دو سناریوی تغییر بار خروجی حاصل شده است و این به دلیل ماهیت ساختار الگوریتم‌های فراابتکاری و گزینش بهترین پاسخ از میان انبوه پاسخ‌های مختلف است که بهترین (کم‌ترین هزینه) و پایدارترین آن انتخاب می‌شود. PID بهینه شده به خوبی تقاضای بار مورد نظر به‌ویژه در تغییرات لحظه‌ای خروجی را توسط میله‌های کنترل مهار می‌کند و نیاز به اعمال کنترل اضافی یا محدودیت سخت‌افزاری نیست. این نتایج دقت و کارایی این الگوریتم در کنترل بهینه این نوع از مسایل کنترل تقاضای بار، با بهترین عملکرد کنترلی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. چگالی نسبی نوترون برای سیستم بهینه‌شده توسط DE بر حسب دقیقه، در حالت ۲.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، الگوریتم فراابتکاری تکامل تفاضلی برای تنظیم ضرایب کنترل‌کننده PID پیشنهاد شد. هدف این تنظیم، کنترل توان یک رآکتور هسته‌ای آبی تحت فشار براساس مدل سینتیک نقطه‌ای و سه گروه نیاهسته نوترون تأخیری بوده است. ملاحظه می‌شود که الگوریتم‌های فراابتکاری نیاز به دانش

#### فهرست علائم و اختصارات

$\gamma_X$ نرخ تولید زینان در هر شکافت	$P_0$ توان رآکتور در حالت تعادل اولیه، MW
$\gamma_I$ نرخ تولید ید در هر شکافت	$n_r$ توان نسبت به حالت تعادل اولیه، $P/P_0$
$\lambda_X$ ثابت واپاشی زینان، $s^{-1}$	$c$ چگالی نیاهسته (Precursor)، $cm^{-3}$
$\lambda_I$ ثابت واپاشی ید، $s^{-1}$	$c_0$ چگالی نیاهسته در حالت تعادل اولیه، $cm^{-3}$
$\Sigma_f$ سطح مقطع ماکروسکوپی شکافت نوترون حرارتی، $cm^{-1}$	$c_r$ چگالی نیاهسته نسبت به چگالی نیاهسته در حالت تعادل اولیه، $c/c_0$
$\sigma_X$ سطح مقطع میکروسکوپی جذب نوترون حرارتی زینان، $cm^2$	$X$ چگالی زینان، $cm^{-3}$
$G$ انرژی حرارتی کاربردی حاصل از هر شکافت $^{235}U$ ، $MW \cdot s$	$I$ چگالی ید، $cm^{-3}$
$G_r$ راکتیویته کل میله کنترل، $\delta k/k$	$T_f$ دمای متوسط سوخت، $^{\circ}C$
$V$ حجم قلب، $cm^3$	$T_{f0}$ دمای متوسط سوخت در حالت تعادل اولیه، $^{\circ}C$
$f_f$ کسر توان جذب شده از رآکتور در سوخت	$T_c$ دمای متوسط خنک‌کننده، $(T_e + T_f)/2$ ، $^{\circ}C$
$\mu_f$ ظرفیت گرمایی کل سوخت، $MW \cdot s/^{\circ}C$	$T_{c0}$ دمای متوسط خنک‌کننده در حالت تعادل اولیه، $^{\circ}C$
$\mu_c$ ظرفیت گرمایی کل خنک‌کننده، $MW \cdot s/^{\circ}C$	$T_e$ دمای خنک‌کننده ورودی، $^{\circ}C$
$M$ دبی جرمی ظرفیت گرمایی، $MW/^{\circ}C$	$T_f$ دمای خنک‌کننده خروجی، $^{\circ}C$
$\Omega$ ضریب انتقال حرارت بین سوخت و خنک‌کننده، $MW/^{\circ}C$	$\rho$ راکتیویته کل، $\delta k/k$
$\alpha_f$ ضریب دمایی سوخت، $(\delta k/k)/^{\circ}C$	$\delta\rho_r$ راکتیویته خارجی ناشی از حرکت میله‌های کنترل، $\delta k/k$
$\alpha_c$ ضریب دمایی خنک‌کننده، $(\delta k/k)/^{\circ}C$	$\beta_i$ کسر نوترون تأخیری مؤثر گروه $i$ -ام
$\alpha_X$ ضریب زینان $(\delta k/k) \cdot cm^2$ ، $(\alpha_X = \sigma_X/\Sigma_f)$	$\beta$ کسر نوترون تأخیری مؤثر، $\beta = \sum_{i=1}^r \beta_i$
$\Phi$ شار نوترون $(P_0 n_r / G \Sigma_f V)$ ، $cm^{-3} \cdot s^{-1}$	$l$ زمان عمر تولید نوترون، s
	$\lambda_i$ ثابت واپاشی نیاهسته نوترون تأخیری گروه $i$ -ام، $s^{-1}$

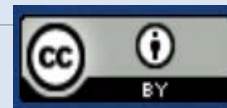


## مراجع

1. CMNA Pereira, CMF Lapa, *Coarse-grained parallel genetic algorithm applied to a nuclear reactor core design optimization problem*, *Ann Nucl Energy*, **30**, 555–565 (2003).
2. C.M.F. Lapa, C.M.N.A. Pereira, A. Mol AC de, *Maximization of a nuclear system availability through maintenance scheduling optimization using a genetic algorithm*, *Nucl Eng Des*, **196**, 219–231 (2000).
3. De Moura Meneses AA, Machado MD, Schirru R, *Particle swarm optimization applied to the nuclear reload problem of a pressurized water reactor*, *Prog Nucl Energy*, **51**, 319–326 (2009).
4. D. Babazadeh, M. Boroushaki, C. Lucas, *Optimization of fuel core loading pattern design in a VVER nuclear power reactors using Particle Swarm Optimization (PSO)*, *Ann Nucl Energy*, **36**, 923–930 (2009).
5. Pereira CMNA, Lapa CMF, Mol ACA, Da Luz AF, *A particle swarm optimization (PSO) approach for non-periodic preventive maintenance scheduling programming*, *Prog Nucl Energy*, **52**, 710-714 (2010).
6. S.M.H. Mousakazemi, N. Ayoobian, G.R. Ansarifar, *Control of the pressurized water nuclear reactors power using optimized proportional–integral–derivative controller with particle swarm optimization algorithm*, *Nucl Eng Technol. Elsevier*, **50**, 877–885 (2018).
7. S.M.H. Mousakazemi, N. Ayoobian, G.R. Ansarifar, *Control of the reactor core power in PWR using optimized PID controller with the real-coded GA*, *Ann Nucl Energy*, Pergamon, **118**, 107–121 (2018).
8. R. RCoban, *Computational intelligence-based trajectory scheduling for control of nuclear research reactors*, *Prog Nucl Energy*, Elsevier, **52**, 415-424 (2010).
9. R. Coban, B. Can, *A trajectory tracking genetic fuzzy logic controller for nuclear research reactors*, *Energy Convers Manag*, Elsevier, **51**, 587–593 (2010).
10. F. Di Maio, S. Baronchelli, M. Vagnoli, E. Zio, *Determination of prime implicants by differential evolution for the dynamic reliability analysis of non-coherent nuclear systems*, *Ann Nucl Energy*, **102**, 91–105 (2017).
11. G.T.T. Phan, et al, *Application of differential evolution algorithm for fuel loading optimization of the DNRR research reactor*, *Nucl Eng Des*, **362**, 110582 (2020).
12. G. Sun, et al, *Loading pattern optimization method based on discrete differential evolution*, *Trans Am Nucl Soc*, **121**, 1518–1520 (2019).
13. D.L. Hetrick, *Dynamics of Nuclear Reactors*, *American Nuclear Society*, La Grange Park, (1993).
14. S.S. Khorramabadi, M. Boroushaki, C. Lucas, *Emotional learning based intelligent controller for a PWR nuclear reactor core during load following operation*, *Ann Nucl Energy*, **35**, 2051-2058 (2008).
15. S.M.H. Mousakazemi, *Control of a PWR nuclear reactor core power using scheduled PID controller with GA, based on two-point kinetics model and adaptive disturbance rejection system*, *Ann Nucl Energy*, Pergamon, **129**, 487–502 (2019).
16. R. Storn, *On the usage of differential evolution for function optimization*, *Bienn Conf North Am Fuzzy Inf Process Soc - NAFIPS*. 519-523 (1996).
17. R. Storn, K. Price, *Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces*, *J Glob Optim*, **11**, 341–59 (1997).
18. F.G. Martins, *Tuning PID controllers using the ITAE criterion*, *Int J Eng Educ*, **21**, 867–873 (2005).
19. K.J. Astrom, T. Hägglund, *Advanced PID control*. *IEEE Control Syst. ISA-The Instrumentation, Systems and Automation Society*, (2006).

## COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

سیدمحمدحسین موسی کاظمی محمدی (۱۴۰۲)، کنترل بار مدل نقطه‌ای رآکتور هسته‌ای نوع PWR با استفاده از کنترلر تنظیم‌شده با الگوریتم DE، ۱۰۵، ۲۸-۳۷

DOI: 10.24200/nst.2022.1146.1753

Url: [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1516.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1516.html)

