مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
مقاله کاربردی
جلد۱۶، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱، صفحه ۲۶-۱۵

کنترل سطح آب درام بویلر های نیروگاهی با استفاده از الگوریتم کنترل تطبیقی جدید با در نظر گرفتن کارایی حلقه کنترلی و افزایش طول عمرشیر کنترلی

(مطالعه موردی کنترل سطح آب درام *IP* نیروگاه سیکل ترکیبی قم)

محمدحسین هاشمی[۱]، کیوان زاهدی[۲]، محسن منتظری[۳]

[۱] فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی کنترل، گروه برق کنترل، دانشگاه شهید بهشتی،تهران، ایران mhasheme4@gmail.com

[۲] فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی کنترل، گروه برق کنترل، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران keyvanzahedi73@gmail.com

[۳] دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی برق کنترل، گروه برق کنترل، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران m_montazeri@sbu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۰۷ ویرایش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۲ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۶

چکیده: یکی از حلقه‌های‌کنترلی مهم درنیروگاه‌های‌حرارتی، حلقه‌کنترل سطح آب درام بویلر است. عدم عملکرد مطلوب این حلقه، باعث کاهش راندمان، آسیب احتمالی به تجهیزات و یا حتی بروز توقف اضطراری واحد می‌شود. از آنجایی که سطح آب درام بویلر با اعمال فرمان به یک شیر آب‌تغذیه کنترل می‌شود، فرمان کنترلی اعمال شده باید دارای حداقل نوسان باشد تا عمر شیرآب تغذیه در اثر استهلاک کم نشود. بدین منظور در این مقاله، یک الگوریتم کنترلی تطبیقی جدید ارائه می‌شود که علاوه بر کاهش استهلاک شیرکنترلی، همچنین اثر اغتشاش ناشی از تغییرات تقاضای بخار را کاهش داده و عوامل غیرخطی ترمودینامیکی درام بویلر به منظور حفظ سطح آب درام پیرامون مقدار مطلوب بهره‌بردار را در نظر گرفته و نسبت به تغییر پارمترهای مدل دینامیکی درام بویلر مقاوم باشد. به منظور ارزیابی کارایی الگوریتم ارائه شده در شرایط واقعی، این الگوریتم بر روی مدل دینامیکی سطح آب درامIP بویلر شماره۱۱ نیروگاه‌سیکل‌ترکیبی‌قم اجرا شده‌است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی این روش کنترلی و مقایسه آن با عملکرد کنترل‌کننده کلاسیک موجود نیروگاه، کنترل‌کننده مدلغزشی وکنترل‌کننده PID مرتبه کسری خود تنظیم در شرایط یکسان، نشان می‌دهد که روش ارائه شده از دو جنبه حفظ سطح آب درام حول نقطه‌تنظیم تحت شرایط مختلف وکاهش استهلاک شیر آب تغذیه دارای عملکرد بهتری است.

کلمات کلیدی: کنترل سطح آب درام، بویلر نیروگاهی، کارایی حلقه کنترل، طول عمر شیر کنترلی، الگوریتم کنترل تطبیقی.

Power plant boilers drum water level control using a new adaptive control algorithm by considering the control loop performance and increasing life cycle of its control valve (case study: Qom combined cycle power plant boiler IP drum water level control)

Mohammad Hossain Hashemi, Keyvan Zahedi, Mohsen Montazeri

Abstract: Drum water level control loop is one of the most important control loops in any steam power plant. In case of unacceptable performance of this loop, we have reduction of power plant efficiency, failure of equipment or maybe power plant shut down. Since in this loop, we use the feed water control valve as final control element, is very important to have minimum swing as possible in order to increase of the life cycle control valve. In this paper, to achieve this objective, a new adaptive control algorithm is proposed which have good life cycle control valve, to reduce the disturbance effect due to steam demand variation, to consider drum thermodynamic nonlinear characteristics and to robust to dynamical parameters variation. In order to evaluate the performance of proposed algorithm in real industrial situation, this algorithm is applied to Qom combined cycle power plant boiler No 11 drum water level dynamical model. The simulation results using this algorithm and power plant classical controller, sliding mode control, Auto-tune fraction order PID show the proposed algorithm regarding the life cycle of feed water control valve and control loop performance in different conditions has better performance compared to these algorithms.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.4.2.0]
[DOI: 10.61186/joc.16.4.15]

Keywords: Drum water level control, Power plant boiler, Control loop performance, Control valve lifetime, Adaptive control algorithm.

۱- مقدمه

بویلر یکی از تجهیزات اساسی نیروگاه‌های حرارتی است که نقش بسیار مهم تولید بخار دارد و عملکرد آن سبب تولید پیوسته انرژی و پاسخ به تقاضای شبکه برق است. یک بویلر نیروگاهی، با دریافت گرما ناشی از احتراق، آب را به بخار بسیار داغ[1] تبدیل کرده و آن را به توربین بخار ارسال می‌کند. هرچند میزان بخار مصرفی توربین به اقتضای تقاضای بار از سمت شبکه قدرت متغیر است اما با وجود این تغییرات متغیرهای خروجی بویلر نظیر فشار بخار، دمای بخار و سطح اب درام (مخزن) باید در مقادیر مطلوب خود باقی بمانند. در صورتی که هر کدام از متغیرهای خروجی بویلر از محدوده مجاز خارج شود؛ برداشت بخار قطع شده و توربین به صورت اضطراری از مدار تولید خارج می‌شود.

یکی از مهمترین کمیت‌هایی که در یک بویلر باید کنترل شود سطح آب درام است. کمیت سطح آب درام شاخص مهم برای تضمین ایمنی و پایداری عملکرد بویلرهای نیروگاهی می‌باشد. در صورتی که سطح آب درام کاهش یابد؛ آب کافی در داخل لوله های دیواره آبی قرار نداشته و ممکن است بر اثر افزایش دمای لوله‌ها خسارت‌های بسیار سنگینی از لحاظ فنی و مالی متوجه نیروگاه شود. همچنین اگر سطح آب درام افزایش یابد؛ جداسازی آب و بخار به درستی انجام نمی‌گیرد و موجب انتقال قطرات آب و ناخالصی‌هایی در سیستم بخار شده و به پره‌های توربین آسیب خواهد رساند. بنابراین حفظ سطح آب درام در محدوده مجاز برای افزایش کیفیت بخار خروجی از بویلر، کاهش فرسایش و خرابی تجهیزات و بهبود عملکرد سیستم مهم است[۱و۲] به طوری که ۳۰ درصد از توقف‌های اضطراری واحدهای نیروگاهی ناشی از عملکرد نامطلوب حلقه کنترل سطح آب درام می‌باشد[۳-۶].

دینامیک سطح آب درام دارای ویژگی‌های غیرخطی ناشی از ترمودینامیک حاکم بر آن و متغیر بودن با زمان در اثر استهلاک تجهیزات کاربردی از قبیل شیر کنترل است. همچنین در عمل کمیت سطح آب درام به علت بروز تغییرات زیاد و شدید درسیگنال تقاضای بخار از طرف توربین بخار (که ناشی از موارد متعدد مرتبط و غیر مرتبط به تغییر تقاضای بار در شبکه برق است) در معرض بروز اغتشاشات شدید قرار دارد. در حال حاضر از ساختار کنترلی آبشاری سه عنصره[2] با استفاده از سه کمیت سطح آب درام، دبی بخار و دبی آب تغذیه ورودی برای کنترل سطح آب درام به همراه کنترل کننده PID استفاده می‌شود که کارآیی مطلوبی ندارد[۷و۸]. در این ساختار کنترلی، از دبی آب تغذیه در پسخور[3] حلقه داخلی و اختلاف سطح در پسخور حلقه خارجی استفاده می‌شود و دبی بخار خروجی به عنوان پیشخور[4] در کنترل‌کننده استفاده می‌شود.

با ارائه یک مدلسازی ریاضی برای درام بویلر توسط آستروم و همکاران [۹] تحقیقات گسترده نظری و عملی پیرامون بهبود مشکلات مربوط به کنترل سطح آب درام بویلر آغاز شد. در سال‌های گذشته روش‌ها و الگوریتم های مختلف کنترلی جهت کنترل تغییرات سطح آب درام ارائه شده است که در ادامه برخی از موارد مهم آن باختصار بررسی می‌شود. در [۱۰] ابتدا تغییرات سطح آب درام مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و توسط معادلات دینامیکی مرتبه دوم مدلسازی صورت گرفته است. با استفاده از مدل بدست آمده ساختار کنترلی آبشاری سه عنصره و مجهز به رد اغتشاش فعال[5] (ADRC) طراحی شده است. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی، مشاهده می‌شود که اثرات نایقینی‌های مختلف در سیستم کاهش یافته است. از مزایای کنترل‌کننده ADRC می‌توان به دقت بالا و سرعت پاسخ بالا آن اشاره کرد. در [۱۱] برای طراحی کنترل‌کننده، ابتدا با توجه به محدوده عملیاتی بویلر یک مدل خطی که دارای پارامترهای متغیر می‌باشد توسعه داده شده است و این مدل توسط داده‌های میدانی اعتبار سنجی شده است. نهایتا طراحی کنترل‌کننده مقاوم QFT برای مدل مذکور انجام شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان دهنده عملکرد بهتر سیستم کنترل نسبت به ساختار کنترل‌کننده آبشاری سه عنصره مبتنی بر PID است. همچنین مشاهده می‌شود که با سیگنال کنترل مشابه می‌توان خطا حالت مانا را تا ۷۰٪ کاهش داد. در [۱۲] برای حل مشکلاتی از قبیل نایقینی غیرخطی سیستم همراه با تاخیرهای توزیع شده و اغتشاشات پارامتر های سیستم از کنترل تحمل پذیر خطا در حالت مد لغزشی تطبیقی استفاده می‌کنند. این روش می‌تواند عدم قطعیت و تاخیرهای توزیع شده را جبران کند. در [۱۳] از روش کنترل مد لغزشی استفاده شده است. تکنیک کنترل مد لغزشی مزایایی از قبیل سریع و مقاوم بودن پاسخ را دارا است. با در نظر گرفتن مزیت های روش کنترل مدلغزشی و رویتگر خطی فضای حالت توسعه یافته یک کنترل‌کننده مدلغزشی مبتنی بر رویتگر برای کنترل سطح آب درام ارائه می‌شود. نتایج نشان دهنده بالازدگی[6] کمتر، زمان نشست کمتر، توانایی رد اغتشاش بالا و مقاوم بودن سیستم کنترل می‌باشد.

در [۱۴] برای حل مشکلاتی از قبیل نایقینی غیرخطی سیستم همراه با تاخیرهای توزیع شده و اغتشاشات پارامتر های سیستم از کنترل تحمل پذیری خطا در حالت مد لغزشی تطبیقی استفاده می‌کنند. این روش می‌تواند نایقینی و تاخیر های توزیع شده را جبران کند. در [۱۵] از ساختار ANFIS جهت مدل‌سازی رفتار درام IP نیروگاه سیکل ترکیبی قم استفاده شده است و از داده های تجربی جهت اعتبار سنجی مدل استفاده شده است. سپس از یک کنترل‌کننده PID خود تنظیم مبتنی بر شبکه مصنوعی پس انتشار خطا جهت کنترل تغییرات سطح آب درام استفاده شده است. نتایج حاصله از این روش با کنترل‌کننده PID معمولی مورد استفاده در نیروگاه

[1] Super heat
[2] Cascade-Three Elements
[3] Feed-back
[4] Feed-Forward
[5] Active Disturbance Rejection Control
[6] Overshoot

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.4.2.0]
[DOI: 10.61186/joc.16.4.15]

قم مورد مقایسه قرار گرفته است که نتایج نشان دهنده بالازدگی و زمان نشست کمتر و عملکرد بهتر این کنترل‌کننده نسبت به کنترل‌کننده PI معمولی می‌باشد. از کنترل‌کننده LADRC مبتنی بر GCC[1] در [۱۶] استفاده می‌شود که نتایج شبیه‌سازی نشان دهنده توانایی بالای رد اغتشاشات بصورت بلادرنگ توسط این کنترل‌کننده می‌باشد. در [۱۷] بیان شده است که شدن نوسانات فرکانس قطعات مکانیکی اعم از شیرهای کنترلی سبب کاهش طول عمر قطعات مکانیکی و کاهش عمر آنها می شود. در [۱۸] برای اولین بار علاوه بر توانایی نگهداشتن سطح آب درام پیرامون مقدار تعیین شده، استهلاک شیرکنترل آب تغذیه نیز مطرح شد. راهکار ارائه شده در پژوهش مذکور بدین شرح است ابتدا یک تابع هزینه تعریف شد که با کمینه شدن آن کنترل سطح آب درام و کاهش استهلاک شیر کنترل آب تغذیه به طور همزمان تضمین می‌شود. پس از آن با استفاده از روش نوآورانه دینامیک تطبیقگر، مقادیر ضریب تناسبی PID های آبشاری سه عنصره به صورت برخط به گونه‌ای تنظیم می‌شود که در هر زمان تابع هزینه تعریف شده با خواص یاد شده به سمت کمینه شدن برود. بدین ترتیب علاوه بر حفظ سطح پیرامون نقطه کار مطلوب، استهلاک شیر کنترل آب تغذیه نیز کمینه می‌شود. در [۱۹] چندروش کنترلی برای کنترل سطح آب درام یک واحد سیکل ترکیبی ارائه شده و با هم مقایسه می‌شود. این روش‌ها شامل روش کنترل فازی تنظیم شونده با الگوریتم کلونی زنبور عسل، تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده PID آبشاری سه عنصره با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور عسل و تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده PID مرتبه کسری آبشاری سه عنصره با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور عسل است. پس از تنظیم پارامترها متناسب با مدل و شبیه‌سازی این نتیجه بدست می‌آید که روش مبتنی بر تنظیم پارامترهای PID مرتبه کسری تنظیم شونده با الگوریتم کلونی زنبور عسل دارای عملکرد بهتری است.

در این مقاله سعی شده است که تا با بهبود رویکرد ارائه شده در [۱۸] و همچنین استفاده کردن از دستاوردهای [۱۹]، کنترل سطح و کاهش استهلاک شیر کنترل آب تغذیه به طور موثرتر نسبت به دستاوردهای قبلی ارتقا داده شود. در این مقاله ابتدا با استفاده از مدل ریاضی ارائه شده در [۹]، سطح آب درام IP بویلر شماره ۱۱ نیروگاه سیکل ترکیبی قم مدلسازی می‌شود. پس از آن با استفاده از داده های موجود نیروگاه اعتبار سنجی مدل بدست آمده صورت می‌گیرد. پس از آن کنترل‌کننده جدیدی مبتنی بر PID مرتبه کسری آبشاری سه عنصره و ماتریس تطبیقگر (ماتریس تطبیقگر یک روش تطبیقی جدید در این مقاله است) ارائه می‌شود به قسمی‌که با تغییر مقدار ضریب تناسبی PID مرتبه کسری حلقه بیرونی تابع هزینه تعریف شده مطابق با [۱۸] در جهت کمینه شدن پیش برود. با کمینه شدن این تابع هزینه می‌توان تضمین کرد که اهداف کنترلی یعنی حفظ سطح و کاهش استهلاک شیر محقق می‌شود. نهایتا با انجام شبیه‌سازی چهار کنترل‌کننده که عبارت‌اند از کنترل‌کننده ارائه شده در این مقاله، کنترل‌کننده PID مرتبه کسری [۱۹]، کنترل‌کننده مد لغزشی و کنترل‌کننده PID نیروگاه قم برروی مدل بدست آمده سطح درام IP بویلر شماره ۱۱ نیروگاه قم اعمال می‌شود و کارایی این کنترل‌کننده ها از نظر حفظ سطح آب درام در محدوده مجاز و استهلاک شیر کنترل آب تغذیه بررسی و مقایسه می‌شوند.

۲- مدلسازی سطح آب درام بویلرنیروگاه سیکل ترکیبی قم

در این بخش، ابتدا مدلسازی سطح آب درام بویلر با استفاده از روش ارائه شده در [۹] توسعه داده می‌شود. در واقع ابتدا به قوانین فیزیکی مدلسازی پرداخته شده و نهایتا مدل ریاضی حاکم بر سطح آب درام بویلر بدست می‌آید. پس از آن پارامترهای مربوط به درام بویلر شماره ۱۱ نیروگاه قم ارائه شده و در مدلسازی جایگزین می‌شود. درپایان، پس از بدست آمدن مدل ریاضی حاکم بر سطح آب درام، این مدل با استفاده از داده‌های اخذ شده از آن نیروگاه صحت سنجی می‌شود.

۲-۱ مدلسازی

مطابق [۹] یکی از مدل های کارآمد ارائه شده برای سطح آب درام بویلر مورد استفاده در نیروگاه‌ها، مدلی است که توسط بل و آستروم ارائه شده است. این مدل یک مدل غیر خطی است که بر اساس اصول و قوانین فیزیکی بدست می‌آید. این مدل دارای سه متغیر حالت می‌باشد. همچنین پارامترهای فیزیکی بکار رفته در این مدل به راحتی از داده‌های مربوط به ساختار بویلر قابل استخراج می‌باشد. علت استفاده از این روش برای مدلسازی مورد استفاده در این مقاله این است که این مدل در سایر پژوهش های پیشین مورد استفاده قرار گرفته و نتایج صحت سنجی آن رضایت بخش بوده است.

معادلات زیر، مدل ارائه شده برای سطح آب درام بویلر است.

$$
\begin{aligned}
& e_{11}\frac{dV_{wt}}{dt}+e_{12}\frac{dp}{dt}=q_f-q_s \\
& e_{21}\frac{dV_{wt}}{dt}+e_{22}\frac{dp}{dt}=Q+q_f\,h_f-q_s h_s \\
& e_{32}\frac{dp}{dt}+e_{33}\frac{d\alpha_r}{dt}=Q-\alpha_r\,h_c\,q_{\mathrm{dc}} \\
& e_{42}\frac{dp}{dt}+e_{43}\frac{d\alpha_r}{dt}+e_{44}\frac{dV_{sd}}{dt} \\
& \qquad =\frac{\rho_s}{T_d}(V_{sd}^{\cdot}-V_{sd}) \\
& \qquad +\frac{h_f-h_w}{h_c}q_f \\
& V_{st}=V_t-V_{wt} \\
& V_{wd}=V_{wt}-V_{dc}-(1-\alpha_v)V_r \\
& V_{swd}=V_{wd}+V_{sd} \\
& L=p_1\,V_{swd}^7+p_2\,V_{swd}^6+p_3\,V_{swd}^5 \\
& \qquad +p_4\,V_{swd}^4+p_5\,V_{swd}^3 \\
& \qquad +p_6\,V_{swd}^2+p_7\,V_{swd}+p_8
\end{aligned}
\tag{۱}
$$

کمیت های مدلسازی (۱) مطابق با جدول ۱ توصیف می‌شود. پارامترهای e خود توابع غیرخطی هستند که تابعی از مشخصات آب و

[1] Gray Correlation Compensation

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.4.2.0]
[DOI: 10.61186/joc.16.4.15]

بخار و مشخصات بویلر هستند. این مقادیر برای بویلر شماره ۱۱ نیروگاه سیکل ترکیبی قم در جدول ۲ آمده است. همچنین ضرایب p تابعی از هندسه بویلر است که منظور تبدیل حجم آب به سطح برازش شده است. این مقادیر نیز در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین باید توجه شود که توابع کمیت‌های ترمودینامیکی نظیر آنتالپی ویژه بخار و آب و سایر موارد در جدول ۲ بر اساس برازش منحنی بر روی نمودار این کمیت ها بدست آمده است.

جدول ۱ : پارامترها و زیروندهای مدل درام بویلر

پارامتر	زیروند
V :حجم	s :بخار
ρ :چگالی ویژه	w :آب
P :فشار	f :آب تغذیه
h :آنتالپی ویژه	t :مجموع
T :دما	dc :دانکامر
t :زمان	r :رایزر
q :نرخ انتقال جرم	
Q :گرما ورودی	
αr :کیفیت بخار	
αv :نرخ تغییرات حجم بخار	
mt :مجموع جرم فلزات درام و تیوب ها	

جدول ۲ : روابط حاکم بر پارامتر e_{ij} از مدل

پارامتر	رابطه غیر خطی حاکم
e_{11}	$\rho_w - \rho_s$
e_{12}	$V_{st}\frac{d\rho_s}{dp} + V_{wt}\frac{d\rho_w}{dp}$
e_{21}	$h_w\rho_w - h_s\rho_s$
e_{22x}	$-V_t + m_t C_p \frac{dT_s}{dp}$
e_{22}	$V_{st} + (h_s\frac{d\rho_s}{dp} + \rho_s\frac{dh_s}{dp}) + V_{wt}(h_w\frac{d\rho_w}{dp} + \rho_w\frac{dh_w}{dp}) + e_{22x}$
e_{3w}	$\left(\rho_w\frac{dh_w}{dp} - \alpha_r h_c\frac{dr_w}{dp}\right)(1-\alpha_v)V_r$
e_{3x}	$(\rho_s + (\rho_w - \rho_s)\alpha_r)h_s V_r\frac{d\alpha_v}{dp} - V_r + m_r C_p\frac{dT_s}{dp}$
e_{32}	$\left((1-\alpha_r)\,h_c\frac{d\rho_s}{dp} + \rho_s\frac{dh_s}{dp}\right)\alpha_v V_r e_{3w} + e_{3x}$
e_{33}	$(\rho_s + (\rho_w - \rho_s)\alpha_r)h_c V_r\frac{d\alpha_v}{d\alpha_r}$
e_{42y}	$(1+\beta)\alpha_r V_r$
e_{42x}	$e_{42y}\left((1-\alpha_v)\frac{d\rho_w}{dp} + \alpha_v\frac{d\rho_s}{dp} + (r_s - r_w)\frac{d\alpha_v}{dp}\right) + V_{sd}\frac{d\rho_s}{dp}$
e_{42}	$\frac{\rho_s V_{sd}\frac{dh_s}{dp} + \rho_w V_{wd}\frac{dh_w}{dp} - V_{sd} + m_d C_p\frac{dT_s}{dp}}{hc} + e_{42x}$
e_{43}	$(1+\beta)(\alpha_r V_r(\rho_s - \rho_w)\frac{d\alpha_v}{d\alpha_r})$
e_{44}	ρ_s

جدول۳ : مقادیر عددی مربوط به پارامتر p مدل بویلر

پارامتر	عدد
p_1	۱.۵۸۶×۱۰$^{-۷}$
p_2	۸.۹۳۷×۱۰$^{-۷}$
p_3	۰.۰۰۰۲۰۴۱
p_4	−۰.۰۰۲۴۲۴
p_5	۰.۰۱۶۱۳
p_6	−۰.۰۶۱۴۶
p_7	۰.۰۲۰۸۹
p_8	−۰.۷۴۶۹

۲-۲ صحت سنجی مدل

به منظور صحت سنجی مدل بدست آمده ابتدا مدل ریاضی بدست آمده در نرم‌افزار متلب محیط سیمولینک پیاده‌سازی می‌شود. سپس داده های ورودی مدل مربوط به یک زمان خاص نیروگاه به این مدل اعمال می‌شود و پس از آن، داده سطح آب درام خروجی مدل با داده سطح آب درام واقعی آن زمان نیروگاه مقایسه می‌شود. هرچه میزان اختلاف (در بدترین شرایط پیش آمده برای نیروگاه) کمتر باشد بدان معنی خواهد بود که مدلسازی انجام شده مناسب تر خواهد بود. در این مقاله به منظور بررسی کارایی مدل شاخص میانگین درصد خطا در نظر گرفته شده است.

در شکل ۱ دو نمودار مربوط به سطح واقعی آب درام که به داده های تاریخ ۹۵/۱۱/۱۹ بویلر IP شماره ۱۱ نیروگاه قم مربوط است و سطح آب حاصل از خروجی مدلسازی درام آمده است.. داده ها به گونه ای است که از ثانیه صفر تا حدود ثانیه ۴۲۰۰۰ وضعیت حالت مانای سیستم بخار نیروگاه است. از حدود ثانیه ۴۲۰۰۰ تا ۶۱۰۰۰ به علت بروز اغتشاش و تغییرات در تقاضای بخار، تغییرات در وضعیت سطح مشاهده می‌شود که این تغییرات نهایتا سبب افت شدید سطح درام بویلر می‌شود. در این زمان مدارهای حفاظتی عمل کرده و واحد بخار مربوط از مدار خارج شد. از زمان حدودثانیه ۶۲۰۰۰ تا حدود ثانیه ۷۰۰۰۰ واحد بخار مذکور مجددا در سرویس قرار گرفت. در شکل ۱ مشاهده می‌شود که به جز قسمت مربوط

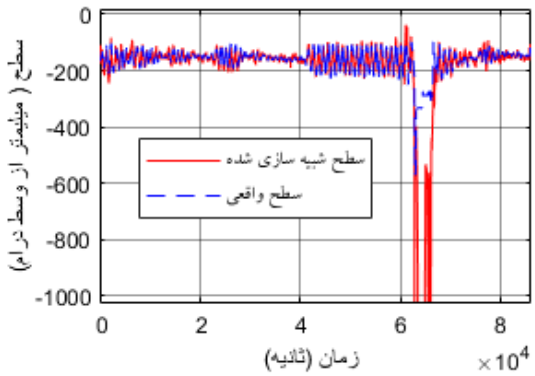
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.4.2.0]
[DOI: 10.61186/joc.16.4.15]

به راه اندازی مجدد واحد بخار، داده های سایر قسمت‌ها حاصل از خروجی مدل از نظر مقداری به مقادیر واقعی نزدیک هستند.

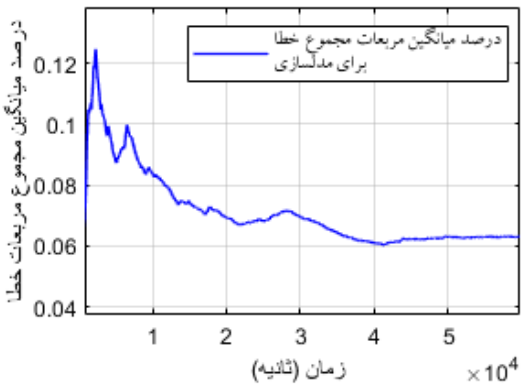
شاخص میانگین درصد خطا مطابق با معادله زیر اندازه گرفته می‌شود. با توجه به آن که در ثانیه صفر شبیه‌سازی مقدار انتگرال صفر هست لذا مشکلی برای صفر شدن مخرج کسر وجود نخواهد داشت.

$$ep(t) = \frac{100}{t}\int_0^t \frac{|L_{sim}(t) - L_{real}(t)|}{|L_{real}(t)|}dt \qquad (۲)$$

بر اساس شاخص داده شده در (۲) برای داده های نمودار شکل ۱، در نمودار شکل ۲ قابل مشاهده است. همانطوریکه دیده می‌شود با توجه به مقادیر اولیه داده های مدلسازی که مبین شرایط اولیه می‌باشد و قطعا در مدلسازی لحاظ نشده است این خطا در ابتدا مقداری برابر با ۰.۷ درصد دارد که در لحظات اولیه شبیه‌سازی (ثانیه ۳۸۷۲) این مقدار تا ۱.۲۵ درصد هم می‌رسد. اما با گذشت شبیه‌سازی اثر مقادیر اولیه کاهش پیدا کرده است و تا قبل از خاموشی اضطراری نیروگاه به مقدار ۰.۶۲ درصد می‌رسد که مقداری قابل قبولی برای شبیه‌سازی خواهد بود.



شکل ۱ : داده سطح واقعی آب درام (آبی رنگ) و داده خروجی مدلسازی سطح آب درام (قرمز رنگ)



شکل ۲ : نمودار میانگین درصد خطا سطح آب درام مدلسازی شده

۳- طراحی کنترل‌کننده

در این بخش طراحی الگوریتم کنترلی پیشنهادی صورت می گیرد. در ابتدا اهداف کنترلی شرح داده شده و نتیجتاً تابع هزینه‌ای معرفی خواهد شد که با کمینه شدن آن کنترل سطح به طور مطلوب و با رعایت الزامات انجام خواهد شد. پس از آن ساختار کنترل‌کننده بررسی شده و هر یک از اجزای آن شرح داده می‌شوند. در پایان تحقق تطبیقگر صورت گرفته و پایداری آن ارزیابی می‌شود.

۳-۱ بررسی اهداف کنترلی

با توجه به نظر اغلب بهره‌برداران واحد های بخار نیروگاهی، کنترل سطح مطلوب درام به گونه‌ای خواهد بود که سیستم کنترلی فرمان سریع کنترلی را در زمان تغییرات شدید بار و تغییرات شدید سطح به شیر آب تغذیه اعمال کند تا سطح در بازه مجاز خود باقی بماند. همچنین در حالت مانا و عدم حضور اغتشاش فرمان کنترلی نباید دارای تغییرات شدید باشد زیرا که به دنبال خود کاهش عمر تجهیز (شیر آب تغذیه) را خواهد داشت. چرا که یکی از عوامل موثر در کاهش عمر شیر کنترلی در واحدهای بخار نیروگاهی، اعمال فرمان های کنترلی با دامنه و فرکانس بالا است[۱۷].

لذا با توجه موارد ذکر شده تابع هزینه زیر پیشنهاد می‌شود.

$$J = \frac{1}{2}e^2 + \frac{1}{2}\alpha \dot{c_v}^2 \qquad (۳)$$

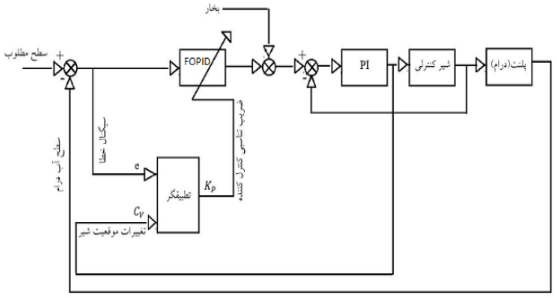
در (۳) مقدار e برابر با اختلاف سطح فعلی از مقدار سطح مطلوب، مقدار $\dot{C_v}$ برابر با مشتق فرمان کنترلی اعمال شده به آب تغذیه و α برابر با ضریب وزن دهی اهمیت نوسانات شیر نسبت به اختلاف سطح است. واضح است که با کمینه شدن مقدار تابع هزینه پیشنهادی، مقادیر خطای سطح و آهنگ تغییرات شیر همزمان کاهش پیدا خواهند کرد. با توجه به آنکه هدف بهینه کردن شاخص فوق می‌باشد لذا می‌توان گفت کنترل‌کننده پیشنهادی علاوه بر حفظ سطح آب درام، سبب کاهش استهلاک شیر آب تغذیه نیز خواهد شد.

۳-۲ بررسی ساختار سیستم کنترلی

ساختار کنترلی ارائه شده در این مقاله بر اساس [۱۸] می‌باشد. اما به منظور ارتقا و بهبود عملکرد آن در مقایسه با کنترل‌کننده‌های جدید ارائه شده بخش‌هایی از آن اصلاح شده است. مطابق شکل ۳، کنترل‌کننده ارائه شده در این مقاله ساختار کنترلی مورد استفاده آبشاری سه عنصره است. در حلقه داخلی کنترل‌کننده PI برای کنترل میزان باز شدن شیرآب تغذیه به مقداری که دبی مطلوب آب را تامین کند قرار دارد. حلقه خارجی نیز یک کنترل‌کننده PID مرتبه کسری است که وظیفه دارد میزان دبی آب

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.4.2.0]
[DOI: 10.61186/joc.16.4.15]

تغذیه ورودی به درام را به گونه‌ای تغییر دهد که سطح آب درام مبتنی بر تابع هزینه (۳) حول نقطه تنظیم آن حفظ شود.



شکل ۳: ساختار سیستم کنترل پیشنهادی سطح آب درام

با توجه به اهمیت حلقه کنترل سطح در روند کنترل سطح آب درام و همچنین بروز عوامل غیرخطی موثر در تغییرات سطح درام مانند پدیده سطح کاذب[۱]، ضریب تناسبی کنترل‌کننده حلقه کنترل سطح به صورت تطبیقی در جهت کمینه کردن تابع هزینه (۳) به صورت برخط توسط بلوک تطبیقگر تعیین می‌شود. در واقع بلوک تطبیقگر با دریافت سیگنال خطا و فرمان کنترلی اعمال شده به شیر آب تغذیه، ضریب P مناسب را برای حلقه کنترل سطح محاسبه کرده و به آن اعمال می‌کند.

۳-۳ تحقق تطبیقگر

به منظور تحقق تطبیقگر سیستم کنترلی با استفاده از تابع هزینه (۳) تابع لیاپانوف زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$V = J \qquad (۴)$$

از آنجا که هدف طراحی این تطبیقگر کمینه‌کردن تابع هزینه (۳) با استفاده از پارامتر های قابل تنظیم می‌باشد لذا شرط کافی برای تحقق این امر نزولی اکید بودن تابع لیاپانوف (۴) است. از طرفی تابع هزینه (۳) با توجه به ساختار کنترلی در نظر گرفته شده برای هر وضعیت از سیستم تابعی از ضرایب PID مرتبه کسری حلقه کنترل سطح و مقدار سطح تعیین شده توسط بهره بردار است چرا که با تغییر این مقادیر می‌توان به طور مستقیم مقدار خطا و مشتق فرمان کنترلی بر شیر آب تغذیه را تغییر داد.

با توجه به مطالبی که به آن اشاره شد شرط نزولی اکید بودن تابع لیاپانوف (۴) برقرار بودن نامساوی زیر می‌باشد.

$$\dot{V} = \frac{\partial V}{\partial K_p}\dot{K_p} + \frac{\partial V}{\partial K_I}\dot{K_I} + \frac{\partial V}{\partial K_D}(\dot{K_D}) + \frac{\partial V}{\partial S}\dot{S} < 0 \qquad for\ V \neq 0 \qquad (۵)$$

در نامساوی (۵) K_I ضریب انتگرال‌گیر، K_D ضریب مشتق‌گیر و K_P ضریب تناسبی کنترل‌کننده PID مرتبه کسری حلقه کنترل سطح و S مقدار نقطه تنظیم سطح آب درام می‌باشد. از آنجایی که نقطه تنظیم سطح متغیر با زمان نیست و گاها به صورت پله ای توسط بهره بردار تغییر می‌کند؛ لذا مشتق تغییرات سطح مطلوب نسبت به زمان برابر با صفر خواهد بود. همچنین به منظور صفر شدن خطای سطح در حالت ماندگار، مقدار ضریب انتگرال‌گیر PID حلقه کنترل مذکور مقدار مثبت و ثابت در نظر گرفته می‌شود. هرچند از نظر ریاضیاتی تابع لیاپانوف معرفی شده به علت مربعی بودن آن دارای یک کمینه سراسری در مبدا است؛ اما با توجه به دینامیک سیستم، تغییرات مقدار خطا نسبت به زمان الزاما روند نزولی و یا صعودی اکید ندارد (الزاما یکنوا نیست). با توجه به برقراری این گزاره ریاضی که ترکیب یک تابع غیریکنوا با یک تابع یکنوا تولید یک تابع غیریکنوا می‌کند؛ پس اگر مقدار خطا به عنوان ورودی با تابع لیاپانوف ترکیب شود تابع لیاپانوف مذکور الزاما یک تابع یکنوا در زمان نیست و الزامی ندارد که مشتق آن نسبت به زمان فقط دارای یک ریشه در مبدا یا مینیمم سراسری باشد. لذا برای جلوگیری از ماندن سیستم در چنین حالت‌هایی که ممکن است رخ بدهد لازم است تا ضریب انتگرال‌گیر کنترل‌کننده مقداری بزرگتر از صفر داشته باشد تا در صورت بروز این سکون و صفر نشدن خطا ورودی فرمان کنترلی در اثر تجمع خطا تغییر کند و سیستم ساکن نماند. با توجه به درجات آزادی می‌توان مقدار ضریب مشتق‌گیر PID مرتبه کسری حلقه کنترل سطح پیرامون یک مقدار ثابت و معین تنظیم کرد و لذا همواره ثابت است. بنابراین شرط برقراری نامساوی (۵) معادل با شرط برقراری عبارات زیر است.

$$\dot{V} = \frac{\partial V}{\partial K_p}\dot{K_p} < 0 \qquad (۶)$$

$$\dot{K_p} = -\gamma\frac{\partial V}{\partial K_p} \qquad (۷)$$

$$\dot{V} = -\gamma(\frac{\partial V}{\partial K_p})^2 < 0 \qquad (۸)$$

$$\lim_{t\to\infty}\gamma = \varepsilon > 0\,, \quad \lim_{t\to\infty}\left(\frac{\partial V}{\partial K_p}\right) = 0 \qquad (۹)$$

چون در تعیین مقدار $\dot{K_p}$ می‌توان آزادانه عمل کرد لذا در نامساوی (۶) با فرض برقراری تساوی (۷) می‌توان نامساوی (۸) را معادل با نامساوی (۵) در نظر گرفت. از طرفی می‌توان گفت در صورت برقراری روابط (۹) ناتساوی (۸) برقرار خواهد بود. لذا برقراری روابط (۹) می‌تواند نزولی اکید بودن تابع لیاپانوف را تضمین کند. بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که با برقراری شرایط یاد شده در روابط (۹) بر روی ضریب تناسبی PID، کمینه شدن مقدار تابع لیاپانوف و به تبع آن تابع هزینه در نظر گرفته شده تضمین می‌شود.

از آنجایی که مقدار K_P نقش کلیدی در صحت و سرعت همگرایی تابع لیاپانوف (۴) به سمت صفر دارد لذا لازم است تا در هر زمان مقدار مناسب آن تعیین شود. لازم به ذکر است که اگر مقدار K_P کمتر از مقدار مطلوب باشد همگرایی بسیار کند انجام می‌شود و گاها همگرایی صورت

[۱] Swell and Shrink

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.4.2.0]
[DOI: 10.61186/joc.16.4.15]

نخواهد گرفت و اگر مقدار K_P بیش از مقدار مطلوب باشد سیستم دچار نوسان در مبدا و گاها واگرایی خواهد شد. لذا در این مقاله روشی ارائه خواهد شد تا در هر زمان مقدار مناسب K_P به صورت بر خط تعیین شود. با توجه به تساوی (۷) و مشتق گرفتن نسبت به زمان از آن می‌توان تساوی زیر را در نظر گرفت.

$$\ddot{K}_P = -\dot{\gamma}\left(\frac{\partial J}{\partial K_P}\right) - \gamma \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial J}{\partial K_P}\right) \qquad (۱۰)$$

از آنجا که مطابق روابط (۹) برای همگرایی تابع لیاپانوف به سمت مبدا مقدار مانای γ باید به عدد مثبتی همچون ε همگرا شود و همچنین مقدار نهایی $\frac{\partial J}{\partial K_P}$ به صفر همگرا شود لذا لازم است که در رابطه (۱۰) مبدا $(K_P, \gamma, \dot{\gamma})$ از $(0, 0, 0)$ به $(\varepsilon, 0, 0)$ انتقال پیدا کند. لذا با اعمال تغییر متغیر $\tilde{\gamma}=\gamma-\varepsilon$ رابطه (۱۰) به فرم رابطه زیر تبدیل می‌شود.

$$\ddot{K}_P = -\dot{\tilde{\gamma}}\left(\frac{\partial J}{\partial K_P}\right) - \tilde{\gamma}\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial J}{\partial K_P}\right) - \varepsilon\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial J}{\partial K_P}\right) \qquad (۱۱)$$

می‌توان رابطه (۱۱) را به فرم تساوی ماتریسی زیر نوشت.

$$\begin{bmatrix}\ddot{K}_P\\ \dot{\tilde{\gamma}}\\ \ddot{\tilde{\gamma}}\end{bmatrix} = A\begin{bmatrix}\dot{K}_p\\ \tilde{\gamma}\\ \dot{\tilde{\gamma}}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}-\varepsilon\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial J}{\partial K_P}\right)\\ 0\\ 0\end{bmatrix}$$
$$A = \begin{bmatrix}0 & -\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial J}{\partial K_P}\right) & -\frac{\partial J}{\partial K_P}\\ 0 & 0 & 1\\ \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3\end{bmatrix} \qquad (۱۲)$$

در تساوی (۱۲) اگر بتوان مقادیر α_1 و α_2 و α_3 را به گونه‌ای تعیین کرد تا مقادیر ویژه ماتریس A منفی باشد آنگاه می‌توان اطمینان داشت که شرایط (۹) برقرار بوده و تابع لیاپانوف (۳) به سمت صفر میل خواهد کرد. هرچه مقادیر ویژه منفی‌تر باشد سیستم کنترلی زودتر به شرایط (۹) خواهد رسید. علاوه بر این مقادیر ویژه نباید دارای بخش موهومی‌باشند چرا که وجود بخش موهومی‌سبب بروز مسیرحالت[۱] گردابی از مبدا به مقصد می‌شود که در چنین مسیری امکان منفی شدن مقدایر حالت همچون γ در حالت گذرا خواهد بود که مطلوب نیست[۲۰]. همچنین هرچه مقادیر ویژه از نظر عددی به هم نزدیک باشند مسیر پیمایش حالت در فضای حالت از نقطه شروع تا نقطه همگرایی به شکل یک خط مستقیم نزدیک تر خواهد بود[۲۰]. مستقیم بودن مسیر حالت از نقطه آغاز حالت به نقطه پایان حالت از این جهت مطلوب است که با قرار دادن مقدار اولیه $\gamma. > \varepsilon$ می‌توان اطمینان داشت که حالاتی در مسیر مبدا به مقصد به وجود نمی‌آید که مقدار γ منفی شود. از طرفی بدست آوردن مستقیم مقادیر α_1 و α_2 و α_3 به منظور برقراری شرایط مطلوب برای مقادیر ویژه ماتریس A نیازمند حل سه نامساوی غیرخطی است. از طرفی حل دقیق نامساوی های غیرخطی یک مساله NP^2 است که اجرای آن زمانبر است و می‌تواند پاسخ صحیح سریع کنترل‌کننده را مخدوش کند. اما پیچیدگی محاسباتی الگوریتم جایا از کلاس P^3 هست و علی رغم تولید نکردن بهترین جواب می‌تواند با جستجو در فضای مساله جواب نزدیک به بهترین جواب را بدست آورد. لذا در این مقاله به منظور تعیین مقادیر مناسب α_1 و α_2 و α_3 در هر لحظه از الگوریتم فراابتکاری جایا [۲۱و۲۲] استفاده خواهد شد. مزیت استفاده از الگوریتم جایا پیچیدگی محاسباتی کم و سرعت بالای اجرای آن در عین همگرایی سریع آن به جواب مطلوب است. الگوریتم جایا مانند سایر الگوریتم های فراابتکاری نیاز به یک تابع هزینه به منظور پیدا کردن جواب مطلوب دارد. از آنجایی که هدف یافتن مقادیر بهینه α_1 و α_2 و α_3 است به قسمی‌که مقادیر ویژه ماتریس A منفی باشد و به یکدیگر نزدیک باشد لذا تابع هزینه زیر به عنوان معیار جستجو برای الگوریتم جایا پیشنهاد می‌شود.

$$Cost = \begin{cases}\dfrac{1}{(1+|\prod\lambda(A)|)(\sum|\lambda(A)|)} & \lambda_i(A) < 0\\ +\infty & \lambda_i(A) \geq 0 \ or\\ & \lambda_i(A) \in Q\end{cases} \qquad (۱۳)$$

در تابع هزینه (۱۳)، $\lambda_i(A)$ مقادیر ویژه i ام ماتریس A می‌باشد. اگر به ازای α_1، α_2 و α_3 معین پیمایش شده توسط الگوریتم جایا مقدار یکی از مقادیر ویژه ماتریس A منفی یا دارای حقیقی نباشد، مقدار هزینه منصوب شده به آن برابر با بی نهایت خواهد بود و به طور قطع آن مقدار کاندید مناسب برای جواب نخواهد بود. در غیر این صورت هزینه منصوب شده به جواب یافت شده به گونه‌ای خواهد بود که با منفی بودن مقادیر ویژه ماتریس A و نزدیکی آنها با یکدیگر رابطه مستقیم داشته باشد. جوابی کاندید جایگزینی در ماتریس A خواهد بود که دارای کمترین هزینه باشد. برای توضیح کارکرد تابع هزینه می‌توان به این گزاره اشاره کرد که اگر اعدادی دارای مجموع ثابت باشند وقتی این اعداد با مجموع ثابت به هم نزدیک هستند که حاصل ضرب آنها بیشینه باشد. لذا از آنجایی که در این تابع هزینه حاصل ضرب مقادیر ویژه در مخرج کسر است؛ می‌توان گفت برای جواب هایی با مجموع مقادیر ویژه برابر، جوابی این تابع هزینه را کمینه می کند دارای مقادیر ویژه یکسان است. لازم به ذکر است که مقادیر ویژه ماتریس می‌تواند تا بی نهایت منفی شود تا تابع هزینه (۱۳) را کمینه سازد. از طرفی با توجه به محدودیت های اجرایی تحقق چنین امری امکان پذیر نیست چرا که این مساله خود می‌تواند سبب ایجاد اعداد بسیار بزرگ در محاسبات شود که هم به لحاظ محاسبات کامپیوتری و هم به لحاظ محدودیت در اعمال محاسبات به ضریب تناسبی کنترل‌کننده مشکل ساز است. لذا در عمل موقع استفاده از این الگوریتم کران بالایی برای مقادیر α_1، α_2 و α_3 در نظر گرفته می‌شود تا مشکلات ذکر شده به وجود نیاید.

با بررسی روند تحقق تطبیقگر می‌توان دریافت که سیستم کنترلی شکل۱ با بهره‌گیری از این تطبیقگر پایدار خواهد بود و وابستگی به مدل

[1] Trajectory

[2] Non deterministic polynomial
[3] Polynomial

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.4.2.0]
[DOI: 10.61186/joc.16.4.15]

نخواهد داشت. همچنین با استفاده از این تطبیقگر اهداف کنترلی مورد اشاره با کمینه کردن تابع هزینه (۳) محقق خواهد شد.

٤- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش با استفاده از مدل بدست آمده برای سطح آب درام بویلر شماره ۱۱ نیروگاه سیکل ترکیبی قم سعی می‌شود کارایی الگوریتم کنترلی پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفته و همچنین کارایی آن با الگوریتم PID کلاسیک خود نیروگاه و کنترلی مدلغزشی و همچنین روش ارائه شده در [۱۹] مقایسه شود. داده های مورد استفاده در این شبیه‌سازی مرتبط با داده های درام IP بویلر شماره ۱۱ نیروگاه سیکل ترکیبی قم در تاریخ ۹۵/۱۱/۱۹ از ساعت ۰۰:۰۰ بامداد الی ۱۱:۵۹ شامگاه است.

تنظیمات پارامترهای هریک از کنترل‌کننده های اعمال شده به مدل سطح درام بویلر مطابق با جدول ۴ می‌باشد.

با توجه به آن که در این مقاله دو معیار حفظ سطح آب درام پیرامون مقدار مطلوب تعیین شده و کم بودن نوسانات شیر کنترل آب تغذیه مد نظر است لذا مقدار سطح آب درام و مقدار فرمان اعمال شده به شیر آب تغذیه به عنوان خروجی شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند که در ادامه رفتار آنها مورد بررسی قرار می گیرد.

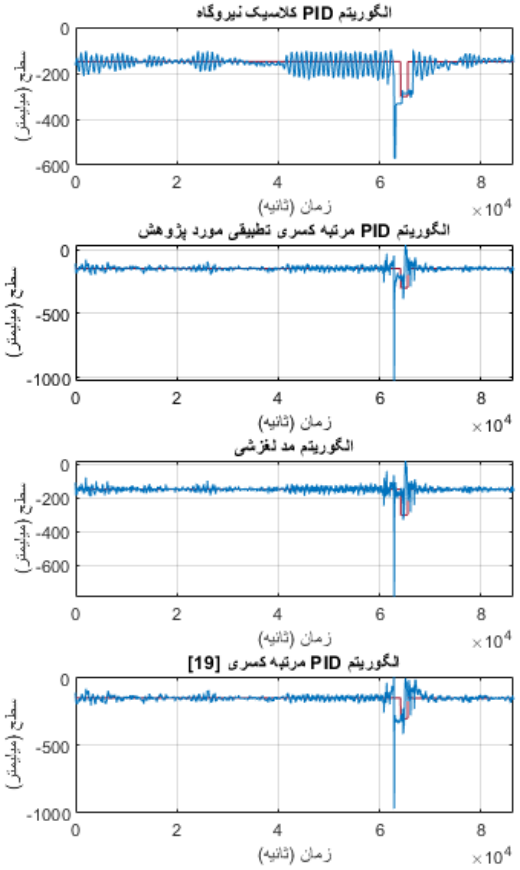
جدول۴ : مقادیر تخصیص داده شده به هر یک از پارامترهای کنترل‌کننده‌های اعمال شده به مدل درام بویلر IP شماره ۱۱ نیروگاه سیکل ترکیبی قم

کنترل‌کننده مورد استفاده	مقادیر تنظیم شده پارامتر
PID مرتبه کسری تطبیقی	**حلقه داخلی** **نوع کنترل‌کننده :** PID **ضرایب کنترل‌کننده :** Kp=0.8 Ki=0.02 Kd=0 ***حلقه خارجی*** **نوع کنترل‌کننده :** PID مرتبه کسری به همراه تطبیقگر **ضرایب :** Kp=adaptive, Ki = 0.0125, λ=0.6,Kd = 0.01,μ = 0.4 پارامترهای سیستم تطبیقگر:$\alpha = 0.1$ کران مقادیر متغیر ماتریس دینامیک تطبیقی : [-۲۰۰,۲۰۰]
PID مرتبه کسری تنظیم شده با الگوریتم زنبور عسل [۱۹]	**حلقه داخلی** **نوع کنترل‌کننده :** PID مرتبه کسری **ضرایب:** Kp=0.8, Ki = 0.015, λ=1.1,Kd = 0,μ = 0 ***حلقه خارجی*** **نوع کنترل‌کننده :** PID مرتبه کسری **ضرایب :** Kp=20, Ki = 0.0125, λ=0.6,Kd = 0.01,μ = 0.4 پارامترهای کلونی زنبور عسل مطابق با [۱۸] است.
مدلغزشی	**حلقه داخلی** **نوع کنترل‌کننده :** PID **ضرایب کنترل‌کننده :** Kp=0.8 Ki=0.02 Kd=0 ***حلقه خارجی*** **نوع کنترل‌کننده :** مدلغزشی سطح لغزش: $s = \dot{e} + 2e$ قانون کنترلی :
	$u = 250\left(\dot{L} + \ddot{L_{sp}} + 2\dot{e} + \left[(3 - 3exp^{-20e^2}) + 1\right]sgn(s)\right)$
PID کلاسیک نیروگاه (بر اساس اسناد نیروگاه سیکل ترکیبی قم)	**حلقه داخلی** **نوع کنترل‌کننده :** PID **ضرایب کنترل‌کننده :** Kp=0.8 Ki=0.02 Kd=0 **حلقه داخلی** **نوع کنترل‌کننده :** PID ضرایب کنترل‌کننده : Kp=10 Ki=0.0125 Kd=0.25

۴-۱ نتایج شبیه‌سازی تغییرات کمیت سطح آب درام

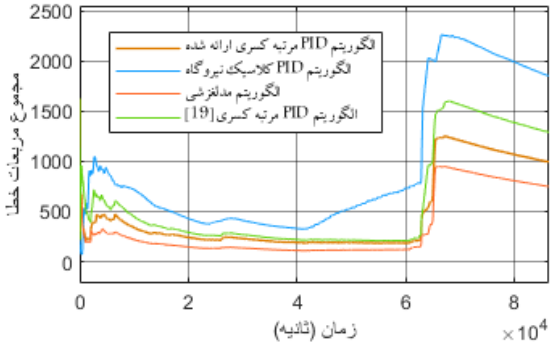
خروجی سطح آب درام مربوط به هریک از کنترل‌کننده‌ها مطابق با شرایط شبیه‌سازی بیان شده در شکل ۴ قابل مشاهده است. به منظور مقایسه کارایی هریک از الگوریتم های کنترلی ازدیدگاه حفظ سطح پیرامون نقطه تنظیم تعیین شده لازم است تا یک معیار عددی تعیین شود. معیار مورد استفاده در این مقاله مجموع مربعات خطا است.

شکل ۵ نشان دهنده مجموع مربعات خطا هر الگوریتم کنترلی در زمان معین است.



شکل۴ : خروجی سطح آب درام مربوط به هر یک از الگوریتم‌های کنترلی

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.4.2.0]
[DOI: 10.61186/joc.16.4.15]



شکل ۵ : مجموع مربعات خطا هر یک از الگوریتم‌های کنترلی در لحظه معین

مطابق شکل ۵ مشاهده می‌شود که الگوریتم کنترلی مدل لغزشی دارای کمترین میزان مربع خطا هست. پس از آن الگوریتم پیشنهادی دارای کمترین مجموع مربعات خطا است. الگوریتم های کنترلی ارائه شده در [۱۹] و الگوریتم کلاسیک نیروگاه قم به ترتیب در جایگاه بعدی ازدیدگاه کمینه بودن نمودار مجموع مربعات خطا قرار دارند. همچنین مقدار نهایی مجموع مربعات خطا هریک از الگوریتم های کنترلی مطابق با جدول ۵ است.

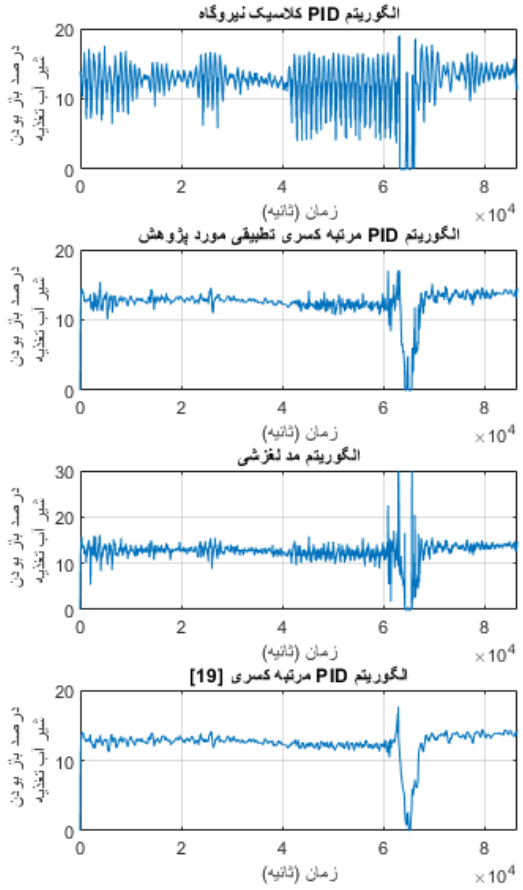
جدول ۴: مقدار نهایی مجموع مربعات خطای سطح هر یک از الگوریتم‌های کنترلی

کنترل‌کننده مورد استفاده	مقدار نهایی مجموع مربعات خطا
PID مرتبه کسری تطبیقی	۱۰۱۴
PID مرتبه کسری تنظیم شده با الگوریتم زنبور عسل [۱۹]	۱۲۹۱
مدلغزشی	۷۵۰.۶
PID کلاسیک نیروگاه	۱۸۵۱

۴-۲ نتایج شبیه‌سازی نوسانات شیر کنترلی

در این بخش خروجی شیر آب تغذیه از منظر کمی‌و میزان نوسانات مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در شکل ۶ خروجی کمی‌آب تغذیه هریک از الگوریتم های کنترلی مورد بررسی مطابق با شرایط شبیه‌سازی بیان شده مشاهده می‌شود.

مطابق با شکل ۶ دامنه نوسانات شیر کنترلی به ترتیب بر اساس میزان تغییرات کم به زیاد عبارت خواهد بود از:



شکل ۶ : نمودار مقادیر فرمان به شیر آب تغذیه برای هریک از الگوریتم‌های کنترلی

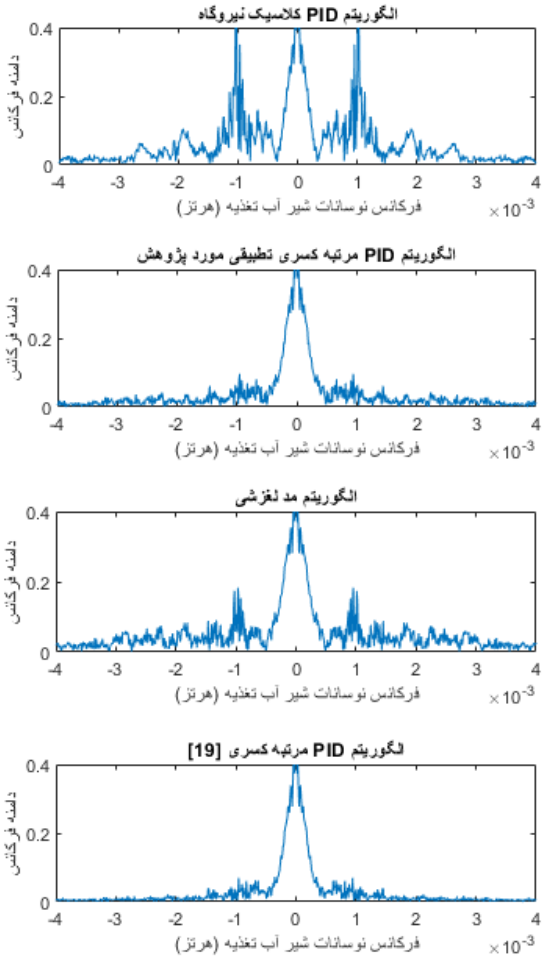
۱- الگوریتم کنترلی [۱۹] / ۲- الگوریتم کنترلی پیشنهادی / ۳- الگوریتم کنترل مدلغزشی / ۴- الگوریتم کنترلی کلاسیک نیروگاه

اما از آنجا که در خرابی یک سیستم مکانیکی نظیر شیر کنترل آب تغذیه بالا بودن دامنه فرکانس های بالا به مراتب موثرتر از بالا بودن دامنه فرکانس های پایین است لذا با بررسی مقدار کمی‌نمی‌توان اطلاع چندانی در رابطه با این که کدام الگوریتم کنترلی سبب استهلاک بیشتر شیر کنترلی می‌شود بدست آورد. لذا لازم است که در گام اول از هر یک از خروجی های مربوط به ورودی فرمان شیر کنترل آب تغذیه به کمک تبدیل فوریه طیف فرکانسی گرفته شود. شکل ۷ مقادیر مربوط به طیف فرکانسی فرمان کنترلی اعمال شده به شیر آب تغذیه هر یک از الگوریتم های کنترلی را نشان می‌دهد.

از آنجا که برای مقایسه نوسانات شیر لازم است تا از یک مبنای عددی استفاده شود لذا رابطه زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$freqIndex = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \left|\omega Mag\left(u_{freq}(\omega)\right)\right| d\omega}{\int_{-\infty}^{+\infty} \left|Mag\left(u_{freq}(\omega)\right)\right| d\omega} \qquad (۱۴)$$

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.4.2.0]
[DOI: 10.61186/joc.16.4.15]



شکل ۷: نمودار طیف فرکانسی فرمان کنترلی اعمال شده به شیر آب تغذیه برای هر یک از الگوریتم های کنترلی

در (۱۴) u_{freq} برابر با طیف فرکانسی فرمان اعمال شده به شیر آب تغذیه و ω برابر با فرکانس است. شاخص (۱۴) برابر با گشتاور اول اندازه طیف فرکانسی است. در این شاخص هرچه دامنه فرکانس های بالا بیشتر باشد مقدار این شاخص بزرگتر خواهد بود و هرچه دامنه نوسانات فرکانس های پایین بیشتر باشد اندازه این شاخص کوچکتر خواهد بود. لذا بر اساس این شاخص (و مطالب گفته شده) الگوریتمی‌دارای استهلاک کمتر شیر آب تغذیه است که عدد کمتری را به خود اختصاص دهد.

در جدول ۶ می‌توان مقادیر مربوط به شاخص نوسانات مبتنی بر معیار (۱۴) را برای هر یک از الگوریتم های کنترلی مورد بررسی مشاهده کرد.

۴-۳ جمع بندی نتایج شبیه‌سازی

باتوجه به معیارهای کاربردی در نیروگاه در خصوص حلقه کنترل سطح آب درام، یک الگوریتم کارا الگوریتمی است که بتواند علاوه بر کنترل سطح آب به طور مناسب نوسانات شیر آب تغذیه آن نیز کم باشد تا استهلاک شیر آب تغذیه کاهش یابد.

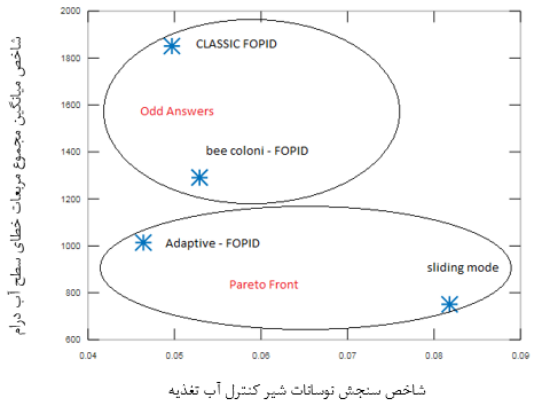
از این روی لازم است تا برای انتخاب الگوریتم کارا یک مقایسه و تصمیم گیری چندهدفه داده شده در شکل ۸ صورت پذیرد و با استفاده از مقادیر جداول ۲ و ۳ یک جبهه پاراتو همانند شکل ۸تشکیل شود.

مطابق شکل ۸ مشاهده می‌شود که الگوریتم های PID کلاسیک نیروگاه و الگوریتم [۱۹] در ردیف های پایین قرار می‌گیرند و فقط دو الگوریتم مدلغزشی و الگوریتم پیشنهادی در جبهه پاراتو باقی خواهند ماند. الگوریتم تطبیقی ارائه شده در این مقاله دارای بازه معقول برای مجموع مربعات خطا از دید بهره بردار هست و نوسانات شیرکنترل و استهلاک ناشی از آن برای تجهیز نیروگاه به مراتب کمتر از الگوریتم کنترلی مدلغزشی است.

همچنین الگوریتم ارائه شده در این مقاله دارای یک امتیاز دیگر نسبت به الگوریتم مدل لغزشی می‌باشد و آن تطبیقی بودن آن است که سبب می‌شود با فرسوده شدن سیستم بویلر و تغییر پارامترهای دینامیک سیستم کنترل‌کننده نسبت به الگوریتم مد لغزشی بهتر عمل کرده و نیاز به تنظیم مجدد نداشته باشد.

جدول ۶: مقدار شاخص نوسان شیر آب تغذیه مربوط به هریک از الگوریتم‌های کنترلی

کنترل‌کننده مورد استفاده	مقدار شاخص نوسان شیر آب تغذیه
PID مرتبه کسری تطبیقی	۰.۰۴۶۴
PID مرتبه کسری تنظیم شده با الگوریتم زنبور عسل [۱۹]	۰.۰۵۲۹
مدلغزشی	۰.۰۸۱۸
PID کلاسیک نیروگاه	۰.۰۴۹۷



شکل ۸: نمودار جبهه پاراتو برای سنجش کارایی الگوریتم های کنترلی

لذا با در نظر گرفتن کلیه موارد از منظر بهره‌برداری، الگوریتم کنترلی ارائه شده در این مقاله با توجه به امکانات سخت افزاری نیروگاه، یک

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.4.2.0]
[DOI: 10.61186/joc.16.4.15]

گزینه مناسب برای استفاده در کنترل سطح بویلر درام نیروگاه سیکل ترکیبی است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش تطبیقی جدید ارائه شد. از آنجایی که طراحی این کنترل‌کننده مبتنی بر برقراری شرایط پایداری لیاپانوف بود لذا کنترل‌کننده پیشنهاد شده پایدار است به طوری که پارامترهای فرعی آن به منظور برقراری شرایط همگرایی و پایداری با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری جایا تنظیم می‌شود. علت تنظیم پارامترها با استفاده از الگوریتم فراابتکاری جایا به علت پیچیدگی بالای محاسباتی حل مستقیم یافتن پارامترها است (تعلق حل نامساوی های غیرخطی به کلاس پیچیدگی محاسباتی NP) که بلادرنگ بودن کنترل‌کننده را دچار مشکل می‌کند. نقطه قوت این الگوریتم ارائه شده عدم وابستگی آن به پارامترهای مدل دینامیکی سطح آب درام بود. همچنین این الگوریتم ارائه شده این قابلیت را دارا است تا با تنظیم پارامترهای کنترلی در جهت کمینه کردن هر تابع هزینه مثبت معین، اهداف کنترلی معینی را محقق سازد. به منظور بررسی قابلیت این الگوریتم در این مقاله مطالعه موردی بر روی کنترل سطح آب درام بویلر نیروگاه سیکل‌ترکیبی قم انجام شد. در این راستا تابع هزینه مثبت معینی تعریف شد که با کمینه شدن آن اهداف کنترلی تعیین شده نظیر کاهش خطای سطح و کم شدن دامنه و فرکانس نوسانات شیر آب تغذیه (به منظور کاهش استهلاک تجهیز) محقق شود.

به منظور بررسی کارایی الگوریتم ارائه شده ابتدا یک مدل ریاضی از سطح آب درام بویلر نیروگاه سیکل ترکیبی قم ارائه شد و این مدل با استفاده از داده‌های درام بویلر IP شماره ۱۱ نیروگاه سیکل ترکیبی قم مورخ ۹۵/۱۱/۱۹ صحت سنجی شد. پس از تایید صحت مدل بدست آمده الگوریتم تطبیقی ارائه شده در این مقاله مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. همچنین به منظور بررسی و مقایسه کارایی الگوریتم این پژوهش با الگوریتم های دیگر، الگوریتم [۱۹] ، الگوریتم کلاسیک نیروگاه قم و الگوریتم مدلغزشی نیز شبیه‌سازی شد. با بررسی و مقایسه نتایج شبیه‌سازی الگوریتم ها مشخص شد که الگوریتم کنترلی ارائه شده هم از نظر کاهش خطای سطح و هم از نظر کاهش نوسانات شیر دارای عملکرد بسیار بهتری نسبت به الگوریتم [۱۹] و الگوریتم کلاسیک نیروگاه بوده است. همچنین عملکرد الگوریتم کنترلی ارائه شده با روش مدلغزشی بر روی مدل ترمودینامیکی بویلر نیروگاه قم مقایسه و ارزیابی شد. نتیجه این مقایسه چنین بود که عملکرد الگوریتم کنترلی ارائه شده از نظر کاهش استهلاک شیر بسیار بهتر از روش مدلغزشی بود. همچنین از جهت کاهش خطای سطح، در شرایط عدم وجود اغتشاش بخار روش مدلغزشی اندکی بهتر از روش ارائه شده در این مقاله بود که این مساله هم به دلیل اهمیت پیدا کردن کاهش نوسانات شیر آب تغذیه امری منطقی تلقی می‌شود.

در مجموع می‌توان چنین نتیجه گرفت که با استفاده از روش کنترلی جدید پیشنهادی، می‌توان با غلبه بر عوامل غیرخطی حاکم بر دینامیک درام بویلر که ناشی از خاصیت تطبیقی بودن الگوریتم ارائه شده است؛ سطح آب درام را تحت هر شرایطی (بروز یا عدم بروز اغتشاش بخار) به طور مطلوب کنترل کرد به قسمی‌که میزان استهلاک شیر آب تغذیه ناشی از نوسانات کاهش یابد. همچنین به علت عدم وابستگی روش کنترلی ارائه شده پارامترهای دینامیکی بویلر، می‌توان تضمین کرد که در صورت تغییرات پارامترهای درام بویلر ناشی از استهلاک و مرور زمان، روش کنترلی ارائه شده نیاز به تنظیم مجدد نخواهد داشت. لذا می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم کنترلی پیشنهادی می‌تواند به عنوان یک الگوریتم کارآمد در حلقه کنترل سطح آب درام در نیروگاه ها بکار گرفته شود.

تشکر و قدردانی

در این قسمت، از مدیریت و پرسنل محترم نیروگاه سیکل ترکیبی قم که دراجرای عملی پروژه همکاری داشته اند، قدردانی می گردد.

مراجع

[1] E. Godoy, S.J. Benz, N.J. Scenna, 2013, "Optimal Economic Stretegy For The Multi Period Design And Long-Term Operation Of Natural Gas Combined Cycle Power Plants", Applied Thermal Engineering, Vol. 51, No.1-2, pp. 218-230.

[2] Mehrpanahi, S. M. Hossienalipour, K. Mobini, 2013, "Investigation Of Effects Of Repowering Options On Electricity Generation Cost On Iran Steam Power Plant", International Journal of Sustainable Energy, Vol. 32, No. 4, pp. 229-243.

[3] B. S. T. Selvi, D. Kalpana, T. Thyagarajan, 2017, "Modeling and prediction of boiler drum in a thermal power plant", 2017 Trends in Industrial Measurement and Automation (TIMA), Chennai, pp. 1-6.

[4] Chaibakhsh, 2013, "Modeling and Long-term Simulation of a Heat Recovery System Generator", Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, Vol. 19, No. 2, pp. 91-114.

[5] R. M. Chen, X. Zhang, and W. D. Zhang, 2017, "Boiler water level estimation method based on adaptive EKF filltering algorithm", Control Eng., vol. 24, no. 2, pp. 93-296.

[6] J. Li and X. G. Wang, 2015, "Model reference adaptive inner model-based control in boiler drum water level based on fuzzy-PID control", Therm. Power Gener., vol. 44, no. 2, pp. 96-100.

[7] P. X. Rong, S. Y. Gao, and L. T. Wang, 2015, "The optimization of drum water level control system for industrial boiler", J. Harbin Univ. Sci. Technol.,vol. 20, no. 6, pp. 78-82.

[8] Y. Wang, 2017, "Multi-model predictive control of drum water level based on RBF neural network dynamic compensation", Ship Sci. Technol., vol. 39, no. 2, pp. 52-54.

[9] Lu, C. X., Rees, N. W., & Donaldson, S. C. 2005, "The use of the Åström-Bell model for the design

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.4.2.0]
[DOI: 10.61186/joc.16.4.15]

of drum level controllers in power plant boilers", IFAC Proceedings, Vol.38, 139-144.

[10] H. Gan, B. LV, 2018, "Research on Drum Water Level Control of Marine Auxiliary Boiler Based On ADRC", Polish Maritime Research, Vol.25, No.2, pp. 35-41.

[11] P.U. Sunil, J. Brave, P. Natarj, 2018, "A Robust Heat Recovery Steam Generator Drum Level Control for Wide Range Operation Flexibility Considering Renewable Energy Integration", Energy, Vol. 163, No.1 , pp. 873-893.

[12] Y. Zhao, J. Wang, F. Yan, and Y. Shen, Jan. 2019, "Adaptive sliding mode fault tolerant control for type-2 fuzzy systems with distributed delays", Information Sciences, vol. 473, pp. 227-238.

[13] C. Pu, J. Ren , J. Su, 2019, "The Sliding Mode Control of the Drum Water Level Based on Extended State Observer" , IEEE Access, vol. 7, pp. 135942-135948.

[14] Y. Zhao, J. Wang, F. Yan, and Y. Shen, Jan. 2019, "Adaptive sliding mode faulttolerant control for type-2 fuzzy systems with distributed delays", Information Sciences,vol. 473, pp. 227-238.

[15] P Abbasi, E Rezaeifard, M Montazeri, 2019, "Adaptive Neuro-Fuzzy Modeling and Control of IP Drum Level of a power Plant for Improving Transient Response", 27th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Iran, pp 944-950.

[16] D. Wang, H. L. Xie, D. Liu, 2020, "Boiler Drum Water Level Control Based on Linear Active Disturbance Rejection and Gray Correlation Compensation", Journal of Control Engineering and Applied Informatics ,Vol. 22. No.3, pp. 42-49.

[17] A. MANI, 2019, "Failure Analysis of High-Pressure Turbine Control Valve and Its Remedial Measures in 210MW Leningrad Metal Works Turbine", ICONIC RESEARCH AND ENGINEERING JOURNALS, Vol 2, No.1, pp. 53-61.

[۱۸] کیوان زاهدی، محمدحسین هاشمی، محسن منتظری، اردیبهشت ۱۴۰۰، کنترل سطح آب درام بویلر نیروگاهی با استفاده از الگوریتم کنترل تطبیقی جدید با در نظر گرفتن کارایی و افزایش عمر شیر کنترلی، بیست و نهمین کنفرانس مهندسی برق ، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

[19] M.A Elhosseini, A.shams El-din, H.A.Ali, A.Abraham, 2022, "Heat recovery steam generator (HRSG) three-element drum level control utilizing Fractional order PID and fuzzy controllers", ISA transactions, 122, pp.281-293.

[۲۰] معادلات دیفرانسیل مقدماتی و مسائل مقدار مرزی جلد دوم،ویرایش هفتم،۱۳۸۴، ویلیام ای بویس، دکتر علی اکبر عالم زاده، انتشارات علمی‌فنی،تهران،صفحات ۵۸۰-۵۶۷

[21] R. Rao, 2016, "Jaya: A Simple And New Optimization Algorithm For Solving Constrained And Unconstrained Optimization Problems", International Journal of Industrial Engineering Computations, Vol. 7, No. 1, pp. 19-34.

[22] Ankit K. Sahu, Jagadish K. Bokom, V. P. Singh, S. P. Singh, 2016, "Jaya Algorithem Based Tuning of PID Controller", International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering, Vol. 4, No. 12, pp. 2347-6982.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1401.16.4.2.0]
[DOI: 10.61186/joc.16.4.15]