

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

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

محمدحسین هاشمی<sup>۱</sup>، کیوان زاهدی<sup>۲</sup>، محسن منتظری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی کنترل، گروه برق کنترل، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران mhasheme4@gmail.com

<sup>۲</sup> فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی کنترل، گروه برق کنترل، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران keyvanzahedi73@gmail.com

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی برق کنترل، گروه برق کنترل، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران m\_montazeri@sbu.ac.ir

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۶

ویرایش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۲

دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۰۷

**چکیده:** یکی از حلقه‌های کنترلی مهم در نیروگاه‌های حرارتی، حلقه کنترل 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 آب تغذیه کنترل می‌شود، فرمان کنترلی اعمال شده باید دارای حداقل نوسان باشد تا عمر شیر آب تغذیه در اثر استهلاک کم نشود. بدین منظور در این مقاله، یک الگوریتم کنترلی تطبیقی جدید ارائه می‌شود که علاوه بر کاهش استهلاک شیر کنترلی، 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 پارامترهای مدل دینامیکی درام بویلر مقاوم باشد. به منظور ارزیابی کارایی الگوریتم ارائه شده در شرایط واقعی، این الگوریتم بر روی مدل دینامیکی سطح آب درام IP بویلر شماره ۱۱ نیروگاه سیکل ترکیبی قم اجرا شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی این روش کنترلی و مقایسه آن با عملکرد کنترل کننده کلاسیک موجود نیروگاه، کنترل کننده مدل‌غزشی و کنترل کننده PID مرتبه کسری خود تنظیم در شرایط یکسان، نشان می‌دهد که روش ارائه شده از دو جنبه حفظ سطح آب درام حول نقطه تنظیم تحت شرایط مختلف و کاهش 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.

**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<sup>۱</sup> 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 آب 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 لوله‌های 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 [۲۰۱]. 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 در سیگنال 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<sup>۲</sup> 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 [۸، ۷]. در این ساختار کنترلی، از دبی آب تغذیه در پسخور<sup>۳</sup> حلقه داخلی و اختلاف سطح در پسخور حلقه خارجی استفاده می‌شود و دبی بخار خروجی به عنوان پیشخور<sup>۴</sup> در کنترل کننده 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 الگوریتم‌های 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<sup>۵</sup> (ADRC) طراحی شده است. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی، مشاهده می‌شود که اثرات نایقینی‌های مختلف در سیستم کاهش یافته است. از مزایای کنترل کننده ADRC می‌توان به دقت بالا و سرعت پاسخ بالا آن اشاره کرد. در [۱۱] برای طراحی کنترل کننده، 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. نهایتاً طراحی کنترل کننده مقاوم QFT برای مدل مذکور انجام شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان دهنده عملکرد بهتر سیستم کنترل نسبت به ساختار کنترل کننده 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 پارامترهای 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 مزیت‌های روش کنترل مد لغزشی و رویکرد خطی فضای حالت توسعه یافته یک کنترل کننده مد لغزشی مبتنی بر رویکرد برای کنترل سطح آب درام ارائه می‌شود. نتایج نشان دهنده بالادزگی<sup>۶</sup> 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 پارامترهای سیستم از کنترل تحمل پذیری خطا در حالت مد لغزشی تطبیقی استفاده می‌کنند. این روش می‌تواند نایقینی و تاخیرهای توزیع شده را جبران کند. در [۱۵] از ساختار ANFIS جهت مدل‌سازی رفتار درام IP نیروگاه سیکل ترکیبی قم استفاده شده است و از داده‌های تجربی جهت اعتبار سنجی مدل استفاده شده است. سپس از یک کنترل کننده 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 کنترل کننده PID معمولی مورد استفاده در نیروگاه

<sup>۴</sup>Feed-Forward

<sup>۵</sup>Active Disturbance Rejection Control

<sup>۶</sup>Overshoot

<sup>۱</sup>Super heat

<sup>۲</sup>Cascade-Three Elements

<sup>۳</sup>Feed-back

کنترل کننده PID نیروگاه قم بر روی مدل بدست آمده سطح درام IP بویلر شماره ۱۱ نیروگاه قم اعمال می شود و کارایی این کنترل کننده ها از نظر حفظ سطح آب درام در محدوده مجاز و استهلاک شیر کنترل آب تغذیه بررسی و مقایسه می شوند.

## ۲- مدل سازی سطح آب درام بویلر نیروگاه سیکل

### ترکیبی قم

در این بخش، ابتدا مدل سازی سطح آب درام بویلر با استفاده از روش ارائه شده در [۹] توسعه داده می شود. در واقع ابتدا به قوانین فیزیکی مدل سازی پرداخته شده و نهایتاً مدل ریاضی حاکم بر سطح آب درام بویلر بدست می آید. پس از آن پارامترهای مربوط به درام بویلر شماره ۱۱ نیروگاه قم ارائه شده و در مدل سازی جایگزین می شود. در پایان، پس از بدست آمدن مدل ریاضی حاکم بر سطح آب درام، این مدل با استفاده از داده های اخذ شده از آن نیروگاه صحت سنجی می شود.

### ۱-۲ مدل سازی

مطابق [۹] یکی از مدل های کارآمد ارائه شده برای سطح آب درام بویلر مورد استفاده در نیروگاه ها، 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 می آید. این مدل دارای سه متغیر حالت می باشد. همچنین پارامترهای فیزیکی بکار رفته در این مدل به راحتی از داده های مربوط به ساختار بویلر قابل استخراج می باشد. علت استفاده از این روش برای مدل سازی 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.

$$\begin{aligned} e_{11} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{12} \frac{dp}{dt} &= q_f - q_s \\ e_{21} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{22} \frac{dp}{dt} &= Q + q_f h_f - q_s h_s \\ e_{32} \frac{dp}{dt} + e_{33} \frac{d\alpha_r}{dt} &= Q - \alpha_r h_c q_{dc} \\ e_{42} \frac{dp}{dt} + e_{43} \frac{d\alpha_r}{dt} + e_{44} \frac{dV_{sd}}{dt} &= \frac{\rho_s}{T_d} (V_{sd}^* - V_{sd}) \\ &+ \frac{h_f - h_w}{h_c} q_f \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} V_{st} &= V_t - V_{wt} \\ V_{wd} &= V_{wt} - V_{dc} - (1 - \alpha_v) V_r \\ V_{swd} &= V_{wd} + V_{sd} \\ L &= p_1 V_{swd}^7 + p_2 V_{swd}^6 + p_3 V_{swd}^5 \\ &+ p_4 V_{swd}^4 + p_5 V_{swd}^3 \\ &+ p_6 V_{swd}^2 + p_7 V_{swd} + p_8 \end{aligned}$$

کمیت های مدل سازی (۱) مطابق با جدول ۱ توصیف می شود. پارامترهای e خود توابع غیرخطی هستند که تابعی از مشخصات آب و

قم مورد مقایسه قرار گرفته است که نتایج نشان دهنده بالازدگی و زمان نشست کمتر و عملکرد بهتر این کنترل کننده نسبت به کنترل کننده PI معمولی می باشد. از کنترل کننده LADRC مبتنی بر GCC<sup>۱</sup> در [۱۶] استفاده می شود که نتایج شبیه سازی نشان دهنده توانایی بالای رد اغتشاشات بصورت بلادرنگ توسط این کنترل کننده می باشد. 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 شیر کنترل 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 می شود. پس از آن با استفاده از روش نوآورانه دینامیک تطبیقگر، مقادیر ضریب تناسبی PID های آبشاری سه عنصره به صورت برخط به گونه ای تنظیم می شود 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 می شود. در [۱۹] چندروش کنترلی برای کنترل سطح آب درام یک واحد سیکل ترکیبی ارائه شده و با هم مقایسه می شود. این روش ها شامل روش کنترل فازی تنظیم شونده با الگوریتم کلونی زنبور عسل، تنظیم پارامترهای کنترل کننده PID آبشاری سه عنصره با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور عسل و تنظیم پارامترهای کنترل کننده PID مرتبه کسری آبشاری سه عنصره با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور عسل است. پس از تنظیم پارامترها متناسب با مدل و شبیه سازی این نتیجه بدست می آید 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 مدل سازی می شود. پس از آن با استفاده از داده های موجود نیروگاه اعتبار سنجی مدل بدست آمده صورت می گیرد. پس از آن کنترل کننده جدیدی مبتنی بر PID مرتبه کسری آبشاری سه عنصره و ماتریس تطبیقگر (ماتریس تطبیقگر یک روش تطبیقی جدید در این مقاله است) ارائه می شود به قسمی که 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 می توان تضمین کرد که اهداف کنترلی یعنی حفظ سطح و کاهش استهلاک شیر محقق می شود. نهایتاً با انجام شبیه سازی چهار کنترل کننده که عبارت اند از کنترل کننده ارائه شده در این مقاله، کنترل کننده PID مرتبه کسری [۱۹]، کنترل کننده مد لغزشی و

<sup>۱</sup> Gray Correlation Compensation

$e_{42y} \left( (1 - \alpha_v) \frac{d\rho_w}{dp} + \alpha_v \frac{d\rho_s}{dp} + (r_s - r_w) \frac{d\alpha_v}{dp} + V_{sd} \frac{d\rho_s}{dp} \right)$	$e_{42x}$
$\frac{\rho_s V_{sd} \frac{dh_s}{dp} + \rho_w V_{wd} \frac{dh_w}{dp} - V_{sd} + m_d C_p \frac{dT_s}{dp}}{hc + e_{42x}}$	$e_{42}$
$(1 + \beta)(\alpha_r V_r (\rho_s - \rho_w) \frac{d\alpha_v}{d\alpha_r})$	$e_{43}$
$\rho_s$	$e_{44}$

جدول ۳: مقادیر عددی مربوط به پارامتر p مدل بویلر

پارامتر	عدد
$p_1$	$1.586 \times 10^{-7}$
$p_2$	$8.937 \times 10^{-7}$
$p_3$	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 نرم افزار متلب محیط سیمولینک پیاده سازی می شود. سپس داده های ورودی مدل مربوط به یک زمان خاص نیروگاه به این مدل اعمال می شود و پس از آن، داده سطح آب درام خروجی مدل با داده سطح آب درام واقعی آن زمان نیروگاه مقایسه می شود. هرچه میزان اختلاف (در بدترین شرایط پیش آمده برای نیروگاه) کمتر باشد بدان معنی خواهد بود که مدل سازی 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 مدل سازی 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 تقاضای بخار، تغییرات در وضعیت سطح مشاهده می شود که این تغییرات نهایتاً سبب افت شدید سطح درام بویلر می شود. در این زمان مدارهای حفاظتی عمل کرده و واحد بخار مربوط از مدار خارج شد. از زمان حدود ثانیه ۶۲۰۰۰ تا حدود ثانیه ۷۰۰۰۰ واحد بخار مذکور مجدداً در سرویس قرار گرفت. در شکل ۱ مشاهده می شود که به جز قسمت مربوط

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 کمیت های 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
p: چگالی ویژه	w: آب
P: فشار	f: آب تغذیه
h: آنتالپی ویژه	f: مجموع
T: دما	dc: دانکامر
t: زمان	f: ترايزر
Q: نرخ انتقال جرم	
Q: گرما ورودی	
αr: کیفیت بخار	
αv: نرخ تغییرات حجم بخار	
m: مجموع جرم فلزات درام و تیوب ها	

جدول ۲: روابط حاکم بر پارامتر e<sub>ij</sub> از مدل

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

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

### ۳- طراحی کنترل کننده

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 کنترل کننده 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.

$$J = \frac{1}{2} e^2 + \frac{1}{2} \alpha \dot{c}_v^2 \quad (3)$$

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  $\alpha$  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 کنترل کننده پیشنهادی علاوه بر حفظ سطح آب درام، سبب کاهش استهلاک شیر آب تغذیه نیز خواهد شد.

#### ۳-۲ بررسی ساختار سیستم کنترلی

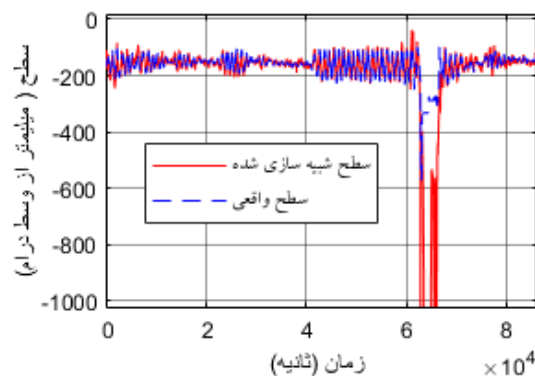
ساختار کنترلی ارائه شده در این مقاله بر اساس [۱۸] می‌باشد. اما به منظور ارتقا و بهبود عملکرد آن در مقایسه با کنترل کننده‌های جدید ارائه شده بخش‌هایی از آن اصلاح شده است. مطابق شکل ۳، کنترل کننده ارائه شده در این مقاله ساختار کنترلی مورد استفاده آبشاری سه عنصره است. در حلقه داخلی کنترل کننده PI برای کنترل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

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

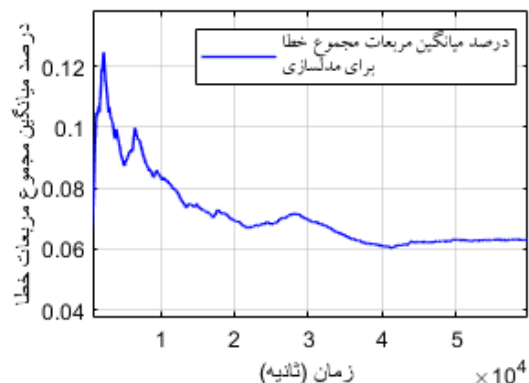
شاخص میانگین درصد خطا مطابق با معادله زیر اندازه گرفته می‌شود. با توجه به آن که در ثانیه صفر شبیه‌سازی مقدار انتگرال صفر هست لذا مشکلی برای صفر شدن معرج کسر وجود نخواهد داشت.

$$ep(t) = \frac{100}{t} \int_0^t \frac{|L_{sim}(t) - L_{real}(t)|}{|L_{real}(t)|} dt \quad (2)$$

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)



با زمان نیست و گاهی به صورت پله ای توسط بهره بردار تغییر می کند؛ لذا مشتق تغییرات سطح مطلوب نسبت به زمان برابر با صفر خواهد بود. همچنین به منظور صفر شدن خطای سطح در حالت مانا، مقدار ضریب انتگرال گیر PID حلقه کنترل مذکور مقدار مثبت و ثابت در نظر گرفته می شود. 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 الزاماً روند نزولی و یا صعودی اکید ندارد (الزاماً یکنوا نیست). با توجه به برقراری این گزاره ریاضی که ترکیب یک تابع غیریکنوا با یک تابع یکنوا تولید یک تابع غیریکنوا می کند؛ پس اگر مقدار خطا به عنوان ورودی با تابع لیاپانوف ترکیب شود تابع لیاپانوف مذکور الزاماً 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 حالت هایی که ممکن است رخ بدهد لازم است تا ضریب انتگرال گیر کنترل کننده 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 می توان مقدار ضریب مشتق گیر 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.

$$\dot{V} = \frac{\partial V}{\partial K_p} \dot{K}_p < 0 \quad (6)$$

$$\dot{K}_p = -\gamma \frac{\partial V}{\partial K_p} \quad (7)$$

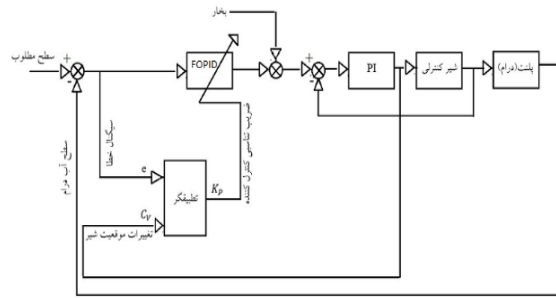
$$\dot{V} = -\gamma \left(\frac{\partial V}{\partial K_p}\right)^2 < 0 \quad (8)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \gamma = \varepsilon > 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \left(\frac{\partial V}{\partial K_p}\right) = 0 \quad (9)$$

چون در تعیین مقدار  $\dot{K}_p$  می توان آزادانه عمل کرد لذا در نامساوی (۶) با فرض برقراری تساوی (۷) می توان نامساوی (۸) را معادل با نامساوی (۵) در نظر گرفت. از طرفی می توان گفت در صورت برقراری روابط (۹) نامساوی (۸) برقرار خواهد بود. لذا برقراری روابط (۹) می تواند نزولی اکید بودن تابع لیاپانوف را تضمین کند. بدین ترتیب می توان 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 می شود.

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 می شود و گاهی همگرایی صورت

تغذیه ورودی به درام را به گونه ای 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<sup>۱</sup>، ضریب تناسبی کنترل کننده حلقه کنترل سطح به صورت تطبیقی در جهت کمینه کردن تابع هزینه (۳) به صورت برخط توسط بلوک تطبیقگر تعیین می شود. 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 می کند.

### ۳-۳ تحقق تطبیقگر

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

$$V = J \quad (4)$$

از آنجا که هدف طراحی این تطبیقگر کمینه کردن تابع هزینه (۳) با استفاده از پارامترهای قابل تنظیم می باشد 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 می توان 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 می باشد.

$$\dot{V} = \frac{\partial V}{\partial K_p} \dot{K}_p + \frac{\partial V}{\partial K_I} \dot{K}_I + \frac{\partial V}{\partial K_D} (\dot{K}_D) + \frac{\partial V}{\partial S} \dot{S} < 0 \quad (5)$$

for  $V \neq 0$

در نامساوی (۵)  $K_I$  ضریب انتگرال گیر،  $K_D$  ضریب مشتق گیر و  $K_p$  ضریب تناسبی کنترل کننده PID مرتبه کسری حلقه کنترل سطح و  $S$  مقدار نقطه تنظیم سطح آب درام می باشد. از آنجایی که نقطه تنظیم سطح متغیر

<sup>۱</sup> Swell and Shrink

سریع کنترل کننده را مخدوش کند. اما پیچیدگی محاسباتی الگوریتم جایا از کلاس  $P^3$  هست و علی رغم تولید نکردن بهترین جواب می تواند با جستجو در فضای مساله جواب نزدیک به بهترین جواب را بدست آورد. لذا در این مقاله به منظور تعیین مقادیر مناسب  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  و  $\alpha_3$  در هر لحظه از الگوریتم فراابتکاری جایا [۲۱ و ۲۲] 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  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  و  $\alpha_3$  است به قسمی که مقادیر ویژه ماتریس  $A$  منفی باشد و به یکدیگر نزدیک باشد لذا تابع هزینه زیر به عنوان معیار جستجو برای الگوریتم جایا پیشنهاد می شود.

$$Cost = \begin{cases} \frac{1}{(1 + |\prod \lambda(A)|)(\sum |\lambda(A)|)} & \lambda_i(A) < 0 \\ +\infty & \lambda_i(A) \geq 0 \text{ or} \\ & \lambda_i(A) \in Q \end{cases} \quad (13)$$

در تابع هزینه (۱۳)،  $\lambda_i(A)$  مقادیر ویژه  $A$  ماتریس می باشد. اگر به ازای  $\alpha_1$ ،  $\alpha_2$  و  $\alpha_3$  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 گونه ای 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 می توان 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؛ می توان 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 می تواند 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 می تواند سبب ایجاد اعداد بسیار بزرگ در محاسبات شود که هم به لحاظ محاسبات کامپیوتری و هم به لحاظ محدودیت در اعمال محاسبات به ضریب تناسی کنترل کننده مشکل ساز است. لذا در عمل موقع استفاده از این الگوریتم کران بالایی برای مقادیر  $\alpha_1$ ،  $\alpha_2$  و  $\alpha_3$  در نظر گرفته می شود تا مشکلات ذکر شده به وجود نیاید.

با بررسی روند تحقق تطبیقگر می توان دریافت که سیستم کنترلی شکل ۱ با بهره گیری از این تطبیقگر پایدار خواهد بود و وابستگی به مدل

نخواهد گرفت و اگر مقدار  $K_p$  بیش از مقدار مطلوب باشد سیستم دچار نوسان در میدا و گاهها 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 می توان تساوی زیر را در نظر گرفت.

$$\dot{K}_p = -\dot{\gamma} \left( \frac{\partial J}{\partial K_p} \right) - \gamma \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial J}{\partial K_p} \right) \quad (10)$$

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

$$\dot{K}_p = -\dot{\tilde{\gamma}} \left( \frac{\partial J}{\partial K_p} \right) - \tilde{\gamma} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial J}{\partial K_p} \right) - \varepsilon \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial J}{\partial K_p} \right) \quad (11)$$

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

$$\begin{bmatrix} \dot{K}_p \\ \dot{\tilde{\gamma}} \\ \dot{\tilde{\gamma}} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} K_p \\ \tilde{\gamma} \\ \tilde{\gamma} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\varepsilon \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial J}{\partial K_p} \right) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial J}{\partial K_p} \right) & -\frac{\partial J}{\partial K_p} \\ 0 & 0 & 1 \\ \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \end{bmatrix}$$

در تساوی (۱۲) اگر بتوان مقادیر  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  و  $\alpha_3$  را به گونه ای تعیین کرد تا مقادیر ویژه ماتریس  $A$  منفی باشد آنگاه می توان اطمینان داشت که شرایط (۹) برقرار بوده و تابع لیاپانوف (۳) به سمت صفر میل خواهد کرد. هرچه مقادیر ویژه منفی تر باشد سیستم کنترلی زودتر به شرایط (۹) خواهد رسید. علاوه بر این مقادیر ویژه نباید دارای بخش موهومی باشند چرا که وجود بخش موهومی سبب بروز مسیر حالت<sup>۱</sup> گردابی از میدا به مقصد می شود که در چنین مسیری امکان منفی شدن مقادیر حالت همچون  $\gamma$  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  $\gamma > \varepsilon$  می توان اطمینان داشت که حالتی در مسیر میدا به مقصد به وجود نمی آید که مقدار  $\gamma$  منفی شود. از طرفی بدست آوردن مستقیم مقادیر  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  و  $\alpha_3$  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 می تواند پاسخ صحیح

<sup>2</sup> Non deterministic polynomial  
<sup>3</sup> Polynomial

<sup>۱</sup> Trajectory

$u = 250 (\dot{L} + \ddot{L}_{sp} + 2\dot{e} + [(3 - 3\exp^{-20e^2}) + 1] \text{sgn}(s))$	
حلقه داخلی نوع کنترل کننده: PID ضرایب کنترل کننده: $K_p=0.8$ $K_i=0.02$ $K_d=0$	PID کلاسیک نیروگاه (بر اساس اسناد نیروگاه سیکل ترکیبی قم)
حلقه داخلی نوع کنترل کننده: PID ضرایب کنترل کننده: $K_p=10$ $K_i=0.0125$ $K_d=0.25$	

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

#### ۴- 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 مدل‌گزینی و همچنین روش ارائه شده در [۱۹] مقایسه شود. داده‌های مورد استفاده در این شبیه‌سازی مرتبط با داده‌های درام IP بویلر شماره ۱۱ نیروگاه سیکل ترکیبی قم در تاریخ ۹۵/۱۱/۱۹ از ساعت ۰۰:۰۰ بامداد الی ۱۱:۵۹ شامگاه است.

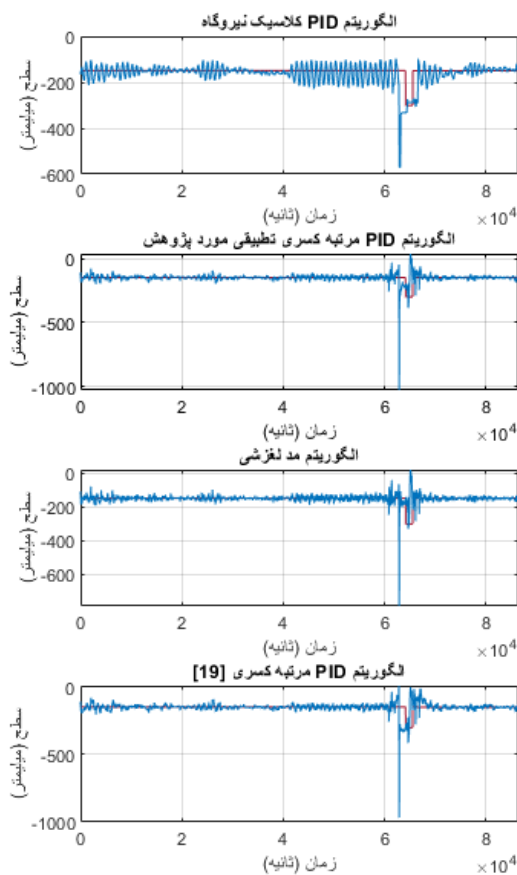
تنظیمات پارامترهای هر یک از کنترل کننده‌های اعمال شده به مدل سطح درام بویلر مطابق با جدول ۴ می‌باشد.

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 می‌گیرد.

جدول ۴: مقادیر تخصیص داده شده به هر یک از پارامترهای کنترل کننده‌های اعمال شده به مدل درام بویلر IP شماره ۱۱ نیروگاه سیکل ترکیبی قم

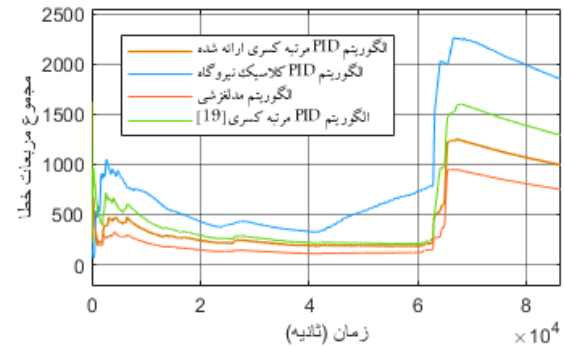
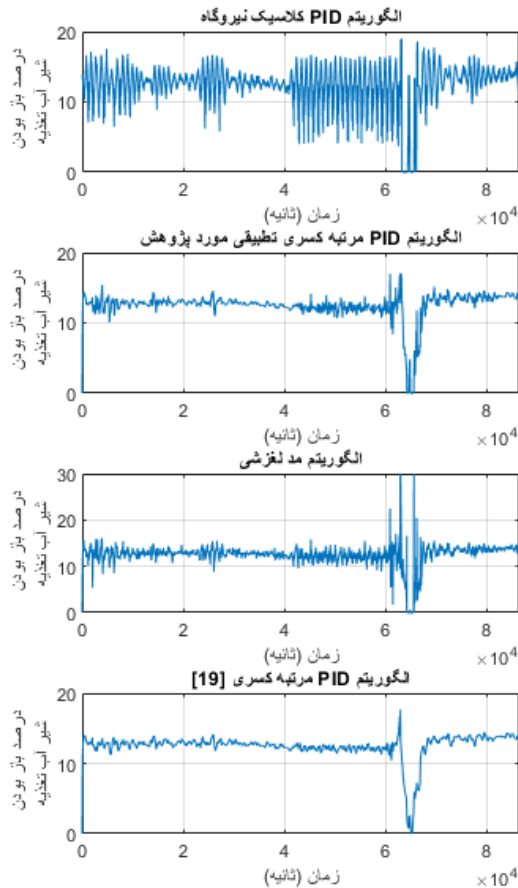
کنترل کننده مورد استفاده	مقادیر تنظیم شده پارامتر
PID مرتبه کسری تطبیقی	حلقه داخلی نوع کنترل کننده: PID ضرایب کنترل کننده: $K_p=0.8$ $K_i=0.02$ $K_d=0$ حلقه خارجی نوع کنترل کننده: PID مرتبه کسری به همراه تطبیقگر ضرایب: $K_p=\text{adaptive}$ , $K_i = 0.0125$ , $\lambda=0.6$ , $K_d = 0.01$ , $\mu = 0.4$ پارامترهای سیستم تطبیقگر: $\alpha = 0.1$ کران مقادیر متغییر ماتریس دینامیک تطبیقی: [-۲۰۰, ۲۰۰]
PID مرتبه کسری تنظیم شده با الگوریتم زنبور عسل [۱۹]	حلقه داخلی نوع کنترل کننده: PID مرتبه کسری ضرایب: $K_p=0.8$ , $K_i = 0.015$ , $\lambda=1.1$ , $K_d = 0$ , $\mu = 0$ حلقه خارجی نوع کنترل کننده: PID مرتبه کسری ضرایب: $K_p=20$ , $K_i = 0.0125$ , $\lambda=0.6$ , $K_d = 0.01$ , $\mu = 0.4$ پارامترهای کلونی زنبور عسل مطابق با [۱۸] است.
مدل‌گزینی	حلقه داخلی نوع کنترل کننده: PID ضرایب کنترل کننده: $K_p=0.8$ $K_i=0.02$ $K_d=0$ حلقه خارجی نوع کنترل کننده: مدل‌گزینی سطح لغزش: $s = \dot{e} + 2e$ قانون کنترلی:

۴-۱ نتایج شبیه‌سازی تغییرات کمیت سطح آب درام خروجی سطح آب درام مربوط به هر یک از کنترل کننده‌ها مطابق با شرایط شبیه‌سازی بیان شده در شکل ۴ قابل مشاهده است. به منظور مقایسه کارایی هر یک از الگوریتم‌های کنترلی از دیدگاه 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.



شکل ۴: خروجی سطح آب درام مربوط به هر یک از الگوریتم‌های کنترلی





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. الگوریتم‌های کنترلی ارائه شده در [۱۹] و الگوریتم کلاسیک نیروگاه قم به ترتیب در جایگاه بعدی از دیدگاه کمیته بودن نمودار مجموع مربعات خطا قرار دارند. همچنین مقدار نهایی مجموع مربعات خطا هر یک از الگوریتم‌های کنترلی مطابق با جدول ۵ است.

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

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

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

۱- الگوریتم کنترلی [۱۹] / ۲- الگوریتم کنترلی پیشنهادی / ۳- الگوریتم کنترل مدل لغزشی / ۴- الگوریتم کنترلی کلاسیک نیروگاه  
اما از آنجا که در خرابی یک سیستم مکانیکی نظیر شیر کنترل آب تغذیه بالا بودن دامنه فرکانس‌های بالا به مراتب موثرتر از بالا بودن دامنه فرکانس‌های پایین است لذا با بررسی مقدار کمی نمی‌توان 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 خروجی‌های 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 الگوریتم‌های 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.

$$freqIndex = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} |\omega Mag(u_{freq}(\omega))| d\omega}{\int_{-\infty}^{+\infty} |Mag(u_{freq}(\omega))| d\omega} \quad (14)$$

#### ۴-۲ نتایج شبیه‌سازی نوسانات شیر کنترلی

در این بخش خروجی شیر آب تغذیه از منظر کمی و میزان نوسانات مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در شکل ۶ خروجی کمی آب تغذیه هر یک از الگوریتم‌های 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:

کنترل سطح آب به طور مناسب نوسانات شیر آب تغذیه آن نیز کم باشد تا استهلاك شیر آب تغذیه کاهش یابد.

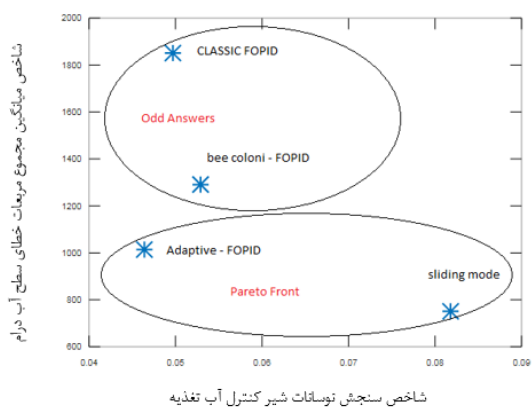
از این روی لازم است تا برای انتخاب الگوریتم کارا یک مقایسه و تصمیم گیری چندهدفه داده شده در شکل ۸ صورت پذیرد و با استفاده از مقادیر جدول ۲ و ۳ یک جبهه پاراتو همانند شکل ۸ تشکیل شود.

مطابق شکل ۸ مشاهده می شود که الگوریتم های PID کلاسیک نیروگاه و الگوریتم [۱۹] در ردیف های پایین قرار می گیرند 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 استهلاك 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 می باشد و آن تطبیقی بودن آن است که سبب می شود با فرسوده شدن سیستم بویلر و تغییر پارامترهای دینامیک سیستم کنترل کننده نسبت به الگوریتم مدل لغزشی بهتر عمل کرده و نیاز به تنظیم مجدد نداشته باشد.

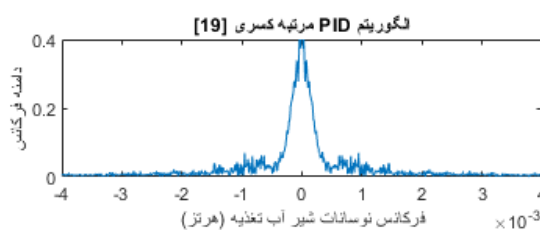
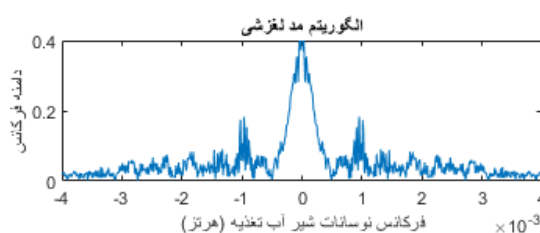
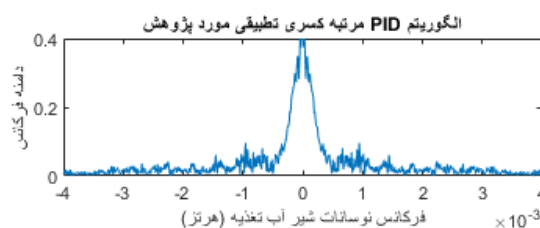
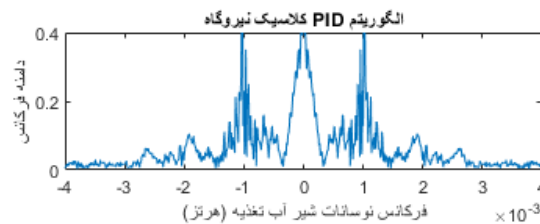
جدول ۶: مقدار شاخص نوسان شیر آب تغذیه مربوط به هر یک از الگوریتم های کنترلی

کنترل کننده 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 بهره برداری، الگوریتم کنترلی ارائه شده در این مقاله با توجه به امکانات سخت افزاری نیروگاه، یک



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  $\omega$  برابر با فرکانس است. شاخص (۱۴) برابر با گشتاور اول اندازه طیف فرکانسی است. در این شاخص هر چه دامنه فرکانس های بالا بیشتر باشد مقدار این شاخص بزرگتر خواهد بود و هر چه دامنه نوسانات فرکانس های پایین بیشتر باشد اندازه این شاخص کوچکتر خواهد بود. لذا بر اساس این شاخص (و مطالب گفته شده) الگوریتمی دارای استهلاك کمتر شیر آب تغذیه است که عدد کمتری را به خود اختصاص دهد.

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

#### ۳-۴ جمع بندی نتایج شبیه سازی

باتوجه به معیارهای کاربردی در نیروگاه در خصوص حلقه کنترل سطح آب درام، یک الگوریتم کارا الگوریتمی است که بتواند علاوه بر

آب درام را تحت هر شرایطی (بروز یا عدم بروز اغتشاش بخار) به طور مطلوب کنترل کرد به قسمی که 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 نیروگاه‌ها بکار گرفته شود.

### تشکر و قدردانی

در این قسمت، از مدیریت و پرسنل محترم نیروگاه سیکل ترکیبی قم که در اجرای عملی پروژه همکاری داشته‌اند، قدردانی می‌گردد.

### مراجع

- [1] E. Godoy, S.J. Benz, N.J. Scenna, 2013, "Optimal Economic Strategy 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 filtering 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

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

### ۵- نتیجه گیری

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 فراابتکاری 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 سیکل ترکیبی 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 مدل‌گزشی نیز شبیه‌سازی شد. با بررسی و مقایسه نتایج شبیه‌سازی الگوریتم‌ها 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 مدل‌گزشی 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 مدل‌گزشی بود. همچنین از جهت کاهش خطای سطح، در شرایط عدم وجود اغتشاش بخار روش مدل‌گزشی 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

- 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.
- [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 علمی فنی، تهران، صفحات ۵۸۰-۵۶۷
- [21] R. Rao, 2016, "Jaya: A Simple And New Optimization Algorithm For Solving Constrained And Unconstrained Optimization Problems",