کنترل سطح آب و فشار در فشارنده راکتور آب سبک تحت فشار با استفاده از روش مرتبه کسری

INC29-1014

سیدهادی حیدری[۱]، امید صفرزاده[۱*]

۱. دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران

چکیده:

هدف اصلی یک نیروگاه اتمی، تولید الکتریسیته می‌باشد. راکتور آبی تحت‌فشار، بدان معنی است که خنک کردن راکتور توسط آب تحت‌فشار صورت می‌گیرد. در یک نیروگاه هسته‌ای تولید برق، از آب تحت‌فشار به‌عنوان خنک‌کننده اصلی استفاده می‌شود و لازم است فشار سیستم در محدوده‌های تعیین‌شده باشد. این وظیفه توسط فشارنده که با مدار خنک‌کننده اصلی در ارتباط است، صورت می‌گیرد. حجم خنک‌کننده اصلی با تغییرات دمای متوسطش متراکم یا منبسط می‌شود و درنتیجه مایع خنک‌کننده اصلی در محدوده معین باقی می‌ماند. فشارنده به دوش و شیرهای اطمینان و ایمنی و هیترهای گرم‌کننده الکتریکی مجهز است. کنترل سطح آب و فشار داخل فشارنده از اهمیت بالایی برخوردار است که برای کنترل راکتورهای آب تحت‌فشار به کار گرفته می‌شود، به‌طوری‌که با ثابت نگه‌داشتن سطح آب و فشار داخل فشارنده عملکرد مطلوب مدار اول راکتور PWR تضمین می‌شود. در این مقاله، کنترل‌کننده مرتبه کسری سطح آب و فشار طراحی شده است.

کلیدواژه‌ها: فشارنده، مدل سه ناحیه‌ای، کنترل مرتبه کسری، کنترل فشار و سطح آب.

Water level and pressure control in pressurized light water reactor pressurizer using fractional order method

SH. Heidari[1], O. Safarzadeh[1*]

1. Faculty of Engineering, Shahed University, Tehran, Iran

Abstract:

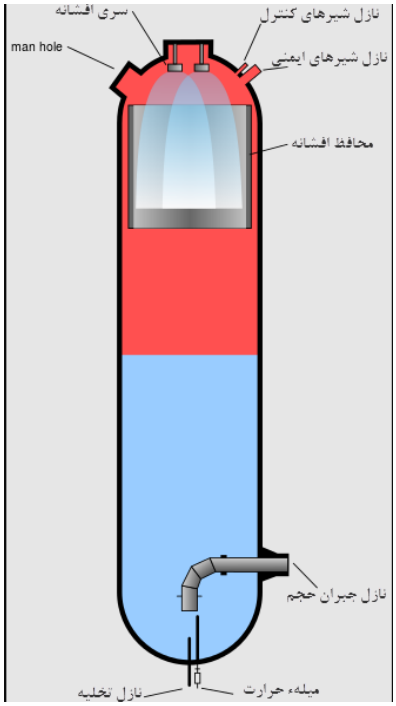
The main purpose of a nuclear power plant is to produce electricity. Pressurized water reactor means that the cooling of the reactor is done by pressurized water. In a nuclear power plant, pressurized water is used as the main coolant and the system pressure must be within specified limits. This task is done by the pressurizer which is connected with the main cooling circuit. The volume of the main coolant contracts or expands with changes in its average temperature, and as a result, the main coolant remains within a certain range. The pressurizer is equipped with a spray, relief and safety valves, and electric heater. The control of water level and pressure inside the pressurizer is of great importance, which is used to control pressurized water reactors, so that by keeping the water level and pressure inside the pressurizer constant, the optimal performance of the first circuit of the PWR reactor is guaranteed. In this paper, the fractional order controller of water level and pressure is designed.

Keywords: Pressurizer, three region model, fractional controller, pressure and level controls

۱. مقدمه

پس از ۵۰ سال توسعه انرژی هسته‌ای، راکتورهای قدرت به یک ابزار مهم برای تأمین بخشی از انرژی برق کشورهای جهان تبدیل شده است. بعضی از کشورها انرژی برق مورد نیاز خود را به‌وسیله راکتور آب سبک تأمین می‌کنند به نحوی که ۶۴٪ قدرت کل راکتورهای مختلف را در نیروگاه‌های هسته‌ای جهان تشکیل می‌دهند. بر مبنای طراحی راکتورهای آب فشرده، خنک‌کننده (آب) در سیستم خنک‌کننده راکتور[1]، نباید به جوش بیاید. به عبارت دیگر، خنک‌کننده باید در همه حال در حالت مایع باقی بماند. به همین منظور، خنک‌کننده داخل سیستم خنک‌کننده باید به‌اندازه کافی در فشار بالایی قرار داشته باشد، که در دمای کاری خنک‌کننده یا حالت گذرا، جوشش اتفاق نیفتد.

در نیروگاه هسته‌ای از نوع آب تحت‌فشار، یک تجهیز به نام فشارنده وجود دارد که اساساً یک مخزن تحت‌فشار استوانه‌ای با انتهای نیمکره‌ای است که با محور بلند عمودی نصب شده و مستقیماً توسط یک لوله به سیستم خنک‌کننده راکتور متصل می‌شود. اگرچه آب موجود در فشارنده همان مایع خنک‌کننده راکتور است، اما اساساً این آب راکد است، یعنی مایع خنک‌کننده راکتور به‌طور مداوم مانند سایر قسمت‌های سیستم خنک‌کننده راکتور از طریق دستگاه فشارنده، جریان نمی‌یابد. به دلیل تراکم ناپذیری ذاتی آب، در یک سیستم لوله‌کشی متصل به هم، فشار به یک اندازه با تغییرات فشار در هر نقطه از سیستم متصل تنظیم می‌شود. آب در فشارنده ممکن است در همه نقاط سیستم به دلیل تفاوت ارتفاع، در فشار یکسانی نباشد، اما فشار در همه نقاط به یک تغییر فشار، در هر قسمت از سیستم به‌طور یکسان پاسخ می‌دهد. از این پدیده می‌تواند کنترل فشار در یک منطقه کوچک و به‌هم‌پیوسته را با فشارنده انجام داد. فشارنده در مقایسه با محفظه‌های دیگر مانند قلب و مولد بخار، کوچک‌تر است. شکل ۱ نمای یک فشارنده را نشان می‌دهد[۱].



شکل ۱. نمای کلی از یک فشارنده.

فشارنده دارای اهداف زیر است:

۱- جلوگیری از تغییرات فشار غیرمجاز و جبران تغییرات فشار ایجاد شده در مدار اولیه راکتور

۲- به وجود آوردن فشار لازم در مدار اولیه راکتور

۳- محافظت مدار اولیه در قبال فشار اضافی‌تر از فشار طراحی شده

[1] Reactor cooling system

همان‌طور که بیان شد پایین فشارنده، شامل آب و در قسمت بالای آن بخار است. زمانی که فشار فشارنده افت کند و از مقدار تعیین شده موردنظر کمتر شود، به‌وسیله گرم‌کن‌های الکتریکی گرم شده و تولید بخار می‌کند و دوباره فشار افزایش می‌یابد و نیز بالعکس، اگر فشار به مقداری بالاتر از مقدار تعبیه شده برود با چگالش بخار از طریق دوش آب سرد، کاهش می‌یابد.

کنترل سطح آب فشارنده، یکی از وظایف بسیار مهم و پیچیده در نیروگاه است. این پیچیدگی، برخاسته از غیرخطی بودن، مشخصه غیر کمینه فاز و نویز اندازه‌گیری است. ازاین‌رو، طراحی یک سیستم کنترل مناسب برای سطح آب فشارنده، بسیار دشوار است. سطح آب فشارنده در صنعت با کنترل تناسبی و انتگرالی PI در یک ساختار سه المانه انجام می‌شود. کنترل PI دارای کمبودهایی به‌ویژه در سطح پایین قدرت توان فشارنده است. ازاین‌رو، در توان پایین عمل کنترل به‌صورت دستی انجام می‌شود. در کنترل سطح آب و فشار فشارنده از سیستم‌های کنترلی حلقه بسته برای پروسه‌های کنترل فشار خنک‌کننده، کنترل سطح آب و فشار داخل فشارنده، کنترل دمای متوسط خنک‌کننده و ... استفاده می‌شود که در این میان سیستم کنترل سطح آب و فشار داخل فشارنده از اهمیت بالاتری برخوردار است که برای کنترل راکتورهای آب تحت‌فشار به کار گرفته می‌شود، به‌طوری‌که با ثابت نگه‌داشتن سطح آب و فشار داخل فشارنده عملکرد مطلوب مدار اول راکتور PWR تضمین می‌شود. ما قصد داریم با طراحی کنترل‌کننده مرتبه کسری، سطح آب و فشار فشارنده را کنترل کنیم

آقای وانگ و همکاران با استفاده از یک الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی چندمنظوره پارامترهای کنترلی PID در سیستم‌های کنترل فشار و کنترل سطح آب استفاده کردند[۲]. آقای دیو و همکاران کنترل سطح آب و فشار فشارنده یک راکتور تنظیم فشار آبی PWR را با استفاده از کنترل PID و کنترل فازی ارائه کرده‌اند. استراتژی کنترل فشار و کنترل سطح آب مرتبط به تنظیم‌کننده فشاری که از کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی-مشتقی PID بهره برده است. که برای کنترل بهتر سطح آب فشارنده، کنترل فازی است که طراحی‌شده و تأثیرات کنترلی بهتری دارد[۳].

در این مقاله، یک کنترل‌کننده مرتبه کسری برای کنترل سطح آب و فشار طراحی شده است.

۲. مدل‌سازی فشارنده

در این بخش پارامترهای کنترلی و معادلات ریاضی حاکم بر یک فشارنده سه ناحیه‌ای ارائه می‌گردد. ابتدا یک مدل فشارنده سه ناحیه‌ای نامتعادل ارائه می شود. فشارنده دارای معادلات دینامیکی غیرخطی می‌با شد. یک فشارنده سه ناحیه‌ای برای مطالعه در خصوص کنترل پارامترهای آن، انتخاب شده است. در وضعیت حالت پایداری ، مقادیر آب و بخار در فشارنده به ترتیب ۸/۹۰۷ مترمکعب و ۵/۸۳۵ مترمکعب می‌باشد.

بر اساس قانون بقای جرم و انرژی برای هر ناحیه درون محفظه فشارنده و همچنین ثابت بودن حجم محفظه فشارنده مدل نامتعادل سه‌ناحیه‌ای را می‌توان به‌صورت زیر ارائه داد[۲]:

$$\frac{dM_1}{dt} = w_{be2}+w_{ce}-w_{bc}-w_{sc}-w_{wc}-w_{rv}-w_{sv} \quad (۱)$$

$$\frac{dM_2}{dt} = w_{su}+w_{sp}+w_{bc}+w_{sc}+w_{wc}+w_{be3}-w_{be2}-w_{ce} \quad (۲)$$

$$\frac{dM_3}{dt} = w_{su3}-w_{be3} \quad (۳)$$

$$\frac{d(M_1h_1)}{dt} = w_{sp}(h_{sp}-h_f)+(w_{be2}+w_{ce})h_g-(w_{bc}+w_{sc})h_f-(w_{cw}+w_{rv}+w_{sv})h_1+V_1\frac{dp}{dt} \quad (۴)$$

$$\frac{d(M_2h_2)}{dt}=w_{su2}h_{su}+(w_{sp}+w_{bc}+w_{sc}+w_{cw})h_f(w_{be2}+w_{ce})h_g+w_{be3}h_g+Q_{h2}+V_2\frac{dp}{dt} \quad (۵)$$

$$\frac{d(M_3h_3)}{dt} = w_{su3}h_{su}-w_{be3}h_g+Q_{h3}+V_3\frac{dp}{dt} \quad (۶)$$

$$\frac{dV}{dt}=\sum_{i=1}^{3}\frac{d(M_i v_i)}{dt} = 0 \quad (۷)$$

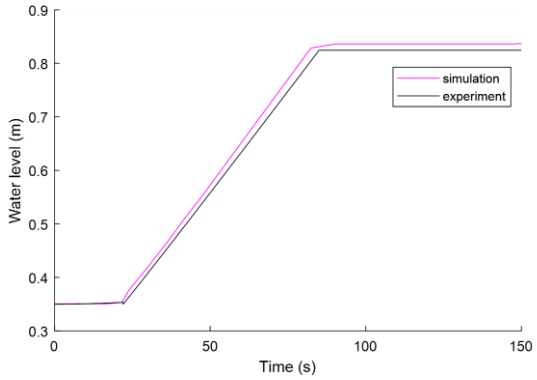
به‌طوری‌که M برابر جرم با واحد کیلوگرم و h برابر آنتالپی ویژه با واحد MJ/kg و P برابر فشار با واحد MPa و V برابر حجم کلی با واحد مترمکعب و Q برابر توان گرمایی گرم‌کننده‌های برقی با واحد MW و W برابر جریان جرمی با واحد kg/s و v برابر حجم ویژه با واحد m^3/s و زیرنویس‌های ۱ و ۲ و ۳ به ترتیب ناحیه بخار، ناحیه آب اصلی و ناحیه آب جریان دار را نشان می‌دهند، زیرنویس‌ها be۳ و be۲ به ترتیب اشاره به تبخیر حجمی در ناحیه آب اصلی و ناحیه آب جریان دار دارد، زیرنویس ce به تبخیر در محیط بین ناحیه آب اصلی و ناحیه بخار اشاره دارد، زیرنویس wc به میعان دیواره اشاره دارد، زیرنویس rv و sv به ترتیب به سوپاپ رهایی و سوپاپ ایمنی اشاره دارند، زیرنویس sp جریان تزریقی اشاره دارد، زیرنویس su به جریان موجی اشاره دارد، زیرنویس‌های su۲ و su۳ به جریان موجی آب به درون یا به خارج ناحیه آب اصلی و ناحیه آب جریان دار اشاره می‌کنند، زیرنویس‌های h2 و h3 به ترتیب به توان گرمایی منتقل شده به ناحیه آب اصلی و ناحیه آب جریان دار از طرف گرم‌کن‌های برقی اشاره دارند، زیرنویس g و f به ترتیب به بخار و آب اشباع شده اشاره دارند.

در این مقاله، معادلات بالا در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی و رفتار فشارنده شبیه‌سازی شد. برای صحت سنجی مدل فشارنده، از آزمون صورت گرفته در دانشگاه MIT استفاده شده است. بدین منظور سیستم اندازه‌گیری ساخته و با انجام مجموعه آزمودن‌های مختلف بر روی فشارنده با استفاده از مشخصات فنی این سیستم اندازه‌گیری در جدول ۱، تأثیر پدیده‌های مختلف در بررسی رفتار این سیستم بررسی گردید.

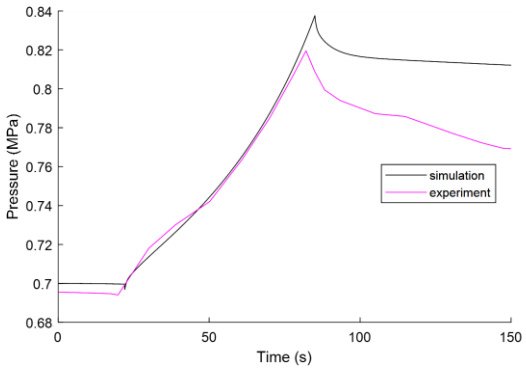
جدول ۱. مشخصات فنی سیستم اندازه‌گیری MIT

مشخصات سیستم	مقدار
قطر داخلی(متر)	۰/۲۰۳
ارتفاع(متر)	۱/۱۴۳
ضخامت دیواره(متر)	۰/۰۰۹۵
چگالی دیواره(کیلوگرم بر مترمکعب)	۷۷۵۳
هدایت حرارتی دیواره(وات بر متر-کلوین)	۳۵
ضریب انتقال حرارت جابجایی محیط هوا (وات بر مترمربع-کلوین)	۱/۵
ظرفیت حرارتی دیواره(ژول بر کیلوگرم-کلوین)	۴۸۶
دمای محیط(کلوین)	۲۹۸

هدف از انجام آزمون درون رفت، بررسی رفتار فشارنده در حالت گذرا است درحالی‌که فشارنده که در وضعیت اولیه اشباع شده است. در این آزمایش فشارنده در فشار داخلی اولیه ۰/۶۹۷ مگا پاسکال و سطح مایع در ارتفاع ۰/۳۵ متر است. درون‌رفت از ثانیه ۲۲ آغاز و به مدت ۶۳ ثانیه ادامه دارد. دبی جرمی و دمای مایع درون‌رفت به ترتیب ۰/۲۵ kg/s و ۲۴ °C است. تغییرات ارتفاع آب و فشار به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نمایش داده شده است. اختلاف موجود بین فشار واقعی و شبیه‌سازی می‌تواند ناشی از روابط همبسته برای لحاظ کردن نرخ چگالش و تبخیر باشد.



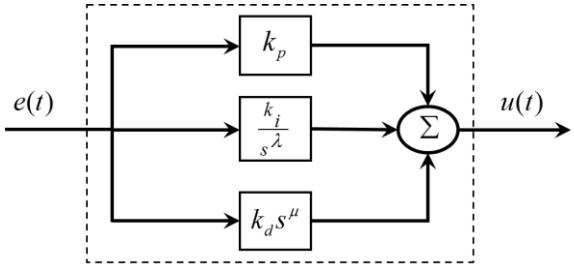
شکل ۲. تغییرات سطح آب در اثر فرایند درون رفت



شکل ۳. تغییرات فشار در اثر فرایند درون رفت

۳. طراحی کنترل‌کننده

ساختار یک کنترل‌کننده PID مرتبه کسری در شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۴. ساختار یک کنترل‌کننده PID مرتبه کسری

ساختار تعمیم‌یافته‌ای به‌صورت زیر دست‌یافت است [۴].

$$C(s)=k_p+\frac{k_i}{s^{\lambda}}+k_d s^{\mu},\ \lambda,\mu\in(0,2) \quad (۸)$$

در ساختار فوق λ مرتبه انتگرال‌گیری و μ مرتبه مشتق‌گیری را مشخص می‌کند. در این کنترل‌کننده ارتباط بین ورودی $e(t)$ و خروجی $u(t)$ به‌صورت زیر خواهد بود:

$$u(t)=k_p e(t)+k_i I_t^{\lambda} e(t)+k_d {}_c D_t^{\mu} e(t) \quad (۹)$$

کنترل‌کننده PID مرتبه کسری دارای پنج پارامتر کنترلی قابل تنظیم k_p، k_i، k_d، λ و μ بنابراین این کنترل‌کننده در مقایسه با کنترل‌کننده PID کلاسیک که تنها دارای سه پارامتر قابل تنظیم k_p، k_i و k_d است، می‌تواند از توانایی‌های بیشتری برخوردار باشد. درواقع همان‌گونه که عملگرهای مشتق یا انتگرال کلاسیک حالت‌های خاصی از عملگرهای مشتق و یا انتگرال مرتبه کسری هستند، کنترل‌کننده PID کلاسیک نیز می‌تواند به‌عنوان حالت خاصی $(\lambda=\mu=1)$ از کنترل‌کننده PID مرتبه کسری در نظر گرفته شود. درصورتی‌که کنترل‌کننده فوق فاقدترم انتگرال مرتبه کسری بوده، یعنی تابع تبدیل آن به‌صورت

$$C(s)=k_p+k_d s^{\mu},\ \mu\in(0,2) \quad (۱۰)$$

باشد، با یک کنترل‌کننده PD مرتبه کسری مواجه خواهیم بود. این کنترل‌کننده که درواقع یک فرم تعمیم‌یافته برای کنترل‌کننده PD کلاسیک است را در ادبیات موضوع کنترل‌کننده FOPD یا PD^{μ} نیز نامیده‌اند.

حال می‌خواهیم پارامترهای قابل تنظیم این کنترل‌کننده به‌گونه‌ای تنظیم شوند که به‌طور هم‌زمان اهداف کنترلی زیر برآورده شوند:

هدف کنترلی اول: سیستم کنترلی دارای حد فاز دلخواه ϕ_m باشد.

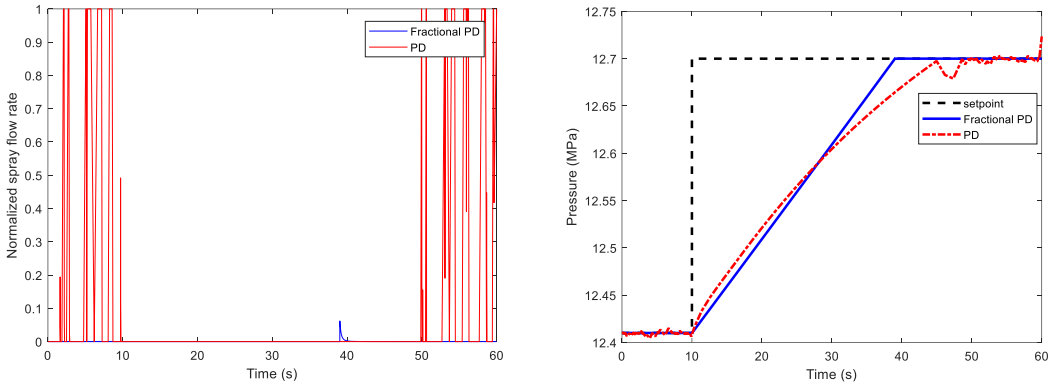
هدف کنترلی دوم: فرکانس قطع و یا فرکانس گذر بهره[۲] تابع تبدیل سیستم حلقه باز برابر مقدار دلخواه w_c باشد.

هدف کنترلی سوم: دیاگرام فاز تابع تبدیل سیستم حلقه باز در فرکانس قطع مسطح[۳] باشد.

هدف کنترلی چهارم: اندازه تابع تبدیل حلقه بسته در محدوده فرکانسی $w \in [w_n, \infty)$ که در آن w_n فرکانس مشخصی است، از مقدار دلخواه γ_n بزرگ‌تر نباشد.

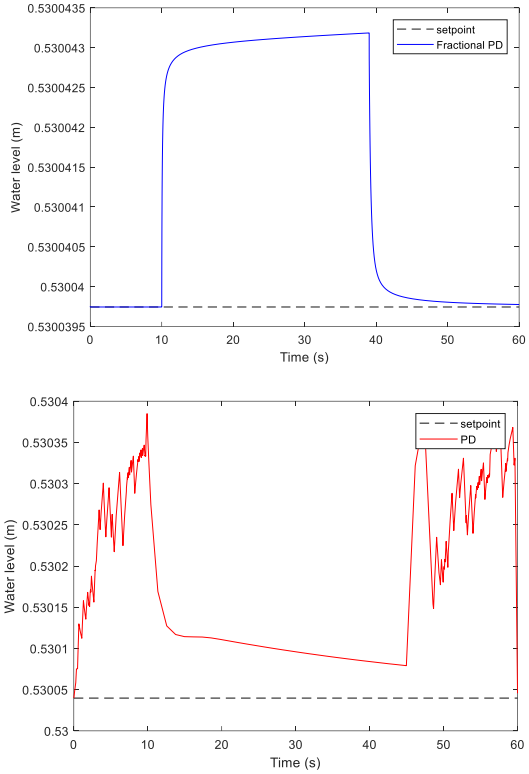
برای طراحی کنترل‌کننده PD مرتبه کسری از جعبه‌ابزار FOMCON در برنامه متلب استفاده شده است.

برای ارزیابی سیستم کنترل طراحی شده یک سناریو ردیابی فشار از فشار ۱۲/۴۱ MPa به ۱۲/۷ MPa درنظر گرفته شده است. شکل ۵ ردیابی فشار در سیستم کنترل مرتبه کسری و معمولی را نشان می‌دهد. نقطه تنظیم سطح آب در مقدار ثابت قرار دارد. شکل ۶ نتیجه ردیابی فشار و اثر آن بر تغییرات سطح آب را برای کنترل‌کننده مرتبه کسری و معمولی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، سطح آب در مقدار نقطه تنظیم قرار خواهد گرفت.



شکل ۵. ردیابی فشار (راست) و تغییرات دبی آب بهنجارشده افشاننده در هنگام ردیابی فشار (چپ)

۱_Gain crossover frequency
۲_Flat



شکل ۶. تغییرات سطح آب بر اثر تغییر در نقطه تنظیم فشار در کنترل‌کننده مرتبه کسری (راست) و متداول (چپ)

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک سیستم کنترل فشار و سطح آب مرتبه کسری ارائه شد. نتایج نشانگر عملکرد مناسب این سیستم کنترل است. کنترل‌کننده PD متداول در سیگنال کنترلی دارای یک عملکرد نوسانی در دبی آب دوش است که موجب عملکرد نامطلوب شیر و کاهش عمر آن می‌شود. کنترل‌کننده مرتبه کسری توانست اغتشاش روی سطح آب را به‌خوبی دفع نماید در حالی‌که کنترل‌کننده متداول این امر را انجام نداد. کنترل‌کننده مرتبه کسری دارای عملکرد بهتری در مقایسه با کنترل‌کننده متداول است. البته به دلیل تعداد پارامترهای بیشتر کنترل‌کننده مرتبه کسری، این عملکرد بهتر قابل پیش‌بینی بود.

۵. مراجع

[1] Todreas NE, Kazimi MS. Nuclear systems volume I: Thermal hydraulic fundamentals. CRC press; 2021.
[2] Pengfei Wang, Jiashuang Wan, Shifa Wu, Fuyu Zhao (2020),A Fuzzy-Logic-Based Pressure Set Point Modification Method For Pressurized Water Reactor Pressurizers. Annals Of Nuclear Energy 135, 106954.
[3] Guo Duo Zhang,Xu Hong Yang,Si Yu Qiao,Yu Jun Wu (2013),Research On Pressurizer Pressure Control System Of 900MW Pressurized Water Reactor Nuclear Power Plant,Advanced Materials Research Vols. 718-720, NO 1215-1220
[4] Ahmad Salehi, Omid Safarzadeh, Mohammad Hossein Kazemi (2019), Fractional Order PID Control Of Steam Generator Water Level For Nuclear Steam Supply Systems. Nuclear Engineering and Design 342 45–59.
[5] Tepljakov, A., Petlenkov, E., Belikov, J., 2011. FOMCON: a MATLAB toolbox for fractional-order system identification and control. Int. J. Microelectr. Comput. Sci. 2 (2), 51–62.