فناوری و انرژی هسته ای

Journal home page: http://Nucte.sbu.ac.ir

فصلنامه فناوری و انرژی هسته ای، دوره اول، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱، ۱-۹

# طراحی، شبیه‌سازی و ارزیابی سیستم کنترل فشار در تست لوپ تحقیقاتی فشار بالا

ابولفضل شوقی[۱]، امیرسعید شیرانی[۱]، سید علی حسینی*[۱]، مهدی زنگیان[۱]

[۱]دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۴

## چکیده

طراحی و شبیه‌سازی تست‌لوپ‌های تحقیقاتی در میان کشورهای صاحب فناوری هسته‌ای اهمیت بالایی دارد. کارکرد سیستم کنترل فشار نقشی اساسی در کارکرد ایمن این تست‌لوپ‌های تحقیقاتی دارد. دراین مقاله به طراحی و شبیه‌سازی مدار تحت‌فشار و دمای بالا با استفاده از نرم‌افزار مهندسی Aspen HYSYS پرداخته‌شده‌است. برای کنترل فشار مدار شبیه‌سازی شده، یک سیستم تعدیل فشار به مدار اصلی متصل شده‌است. این سیستم با تزریق و برداشت نیتروژن در بالا دست فشارنده، فشار مدار را در حد معین ثابت نگه می‌دارد. همچنین این سیستم شامل یک کنترل‌کننده PID طراحی شده درون بخش Simulink نرم‌افزار MATLAB است که بصورت کوپل با نرم‌افزار مهندسی Aspen HYSYS و با کنترل میزان تزریق و برداشت نیتروژن، فشار مدار اصلی را در حد معین (حد مرجع) ثابت نگه می‌دارد. برای اطمینان از صحت عملکرد سیستم تعدیل فشار در حالت‌های گذرا، سناریوهای مختلفی برای ارزیابی سیستم کنترل فشار اجرا شده‌اند.

**واژه های کلیدی:** مدارتحت فشار، کنترل کننده PID، سیستم تعدیل فشار، کوپل Aspen HYSYSبا MATLAB Simulink

## ۱- مقدمه

طراحی و شبیهسازی تستلوپهای تحقیقاتی در میان کشورهای صاحب فنّاوری هستهای، از اهمیت بالایی برخوردار است. تستلوپها معمولاً از دو دیدگاه طراحی و ساخته میشوند. یک نمونه از تستلوپهای مهم که در حوزه صنعت هستهای توسعه دادهشدهاند، تستلوپهای فشار بالا و دمابالا میباشند. این تستلوپها اهدافی ازجمله بررسی پارامترهای ترموهیدرولیکی مدار، بررسی کارکرد و آزمودن میلههای سوخت، کارکرد مدار راکتور (در مقیاسی کوچکتر)، با تأکید بر ایجاد شرایط واقعی ازنظر دبی، فشار، دما و ... را دنبال میکنند. بنابراین در جهت پیشبرد و توسعه صنعت هستهای، ساخت و توسعه تستلوپ هایی که تحت شرایط حاکم بر راکتور واقعی کار میکند، در جهت انجام آزمایشهای موردنیاز، ضروری به نظر میرسد. در این تجهیزات آزمایشی، از سیالات مختلفی متناسب با نوع آزمایش، استفاده میشود. Ruzickova و همکاران در مدار راکتور آب فوق بحرانی، به آزمایش کیفیت سوخت پرداختهاند. (Ruzickova et.al.,2014)

Graydon L. Yoder Jr و همکاران به بررسی یک مدار آزمایشگاهی پرداختهاند. این مدار برای توسعه راکتورهای دمابالاخنکشونده با نمک فلوراید یکپارچه شده است. آنها از یک تانک انباشتگر که توسط گاز آرگون پشتیبانیمیشود برای کنترل فشار مدار استفاده کردهاند. (Graydon L.et.al.,2013) از فشارندههای

* Corresponding Author E-mail: sal_hosseini@sbu.ac.ir

مختلفی برای کنترل مدار استفاده شده است. انتخاب نوع فشارنده متناسب با ماهیت فرایند انتخاب می‌گردد. Mengmeng Xi و همکاران، به بررسی تأثیر شرایط اقیانوسی روی پارامترهای ترموهیدرولیکی پرداخته‌اند. معادلات و عملکرد سیستم فشارنده گازی در کار آن‌ها شرح داده‌شده است . (Mengmeng Xi et.al.,2015)

در همین راستا، این پژوهش به دنبال طراحی و شبیه‌سازی تست‌لوپ تحت‌فشار و دمای بالا است. یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های طراحی ایمن تست‌لوپ‌های تحت‌فشار، سیستم‌های کنترلی از قبیل سیستم‌های کنترل دبی، فشار و دمای مربوط به این تجهیزات است. (Lotfi, M. et.al.,2020) (Sabharwall, P. et.al.,2015) در مسیر طراحی و شبیه‌سازی تست‌لوپ تحقیقاتی، در این کار از مشخصات هندسی و فرایندی تست‌لوپ آزمایشگاه ملی آیداهو آمریکا الگوبرداری شده است . (O'Brien,J.E.et.al.,2017)( O’Brien, J.E.et.al,2014)

در این مقاله، تست لوپ موردنظر، تحت شرایط حاکم بر راکتورهای آبی تحت‌فشار(PWR)، به‌وسیله نرم‌افزار HYSYS، در حالت‌پایا شبیه‌سازی شده است. سپس با دریافت شرایط اولیه از حالت‌پایا به حالت گذرا (Dynamic) منتقل شده تا رفتار دینامیکی سیستم، طی سناریوها، توسط نرم‌افزار HYSYS مدل‌سازی گردد. یکی از موارد بسیار ضروری در بهره‌برداری تست‌لوپ‌ها، کنترل و تعدیل فشار لوپ اصلی با گذر زمان است، زیرا فشار سیستم با انجام آزمایش‌های گوناگون تغییر می‌نماید، درحالی‌که فشار باید مطابق با حد موردنظر، طی آزمایش ثابت نگه‌داشته شود. بنابراین جهت رسیدن به این مهم، یک سیستم تعدیل فشار به لوپ اصلی متصل شده است.

سیستم تعدیل فشار، متشکل از دو ناحیه آب و نیتروژن است. شبیه‌سازی سیستم کنترل فشار، درون نرم‌افزار HYSYS و همچنین بررسی عملکرد آن در حالت گذرا، ایده اصلی این مقاله را شکل می‌دهد. برای سیستم تعدیل فشار، یک سیستم‌کنترلی در بخش Simulink نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی شده است.

در ادامه یک رابط محیطی بین دو نرم‌افزار HYSYS و MATLAB برقرار گردیده است، که طی حالت‌های گذرا در لوپ، سیستم کنترلی طراحی‌شده در MATLAB، شرایط موجود در حلقه را از HYSYS دریافت می‌نماید، محاسبات را انجام داده و سپس دستورات لازم را به سیستم تعدیل فشار موجود در HYSYS ارسال می‌نماید. این عملیات و برقراری ارتباط بین دو نرم‌افزار با گام زمانی ۰.۱ ثانیه پیش می‌رود. بدین ترتیب، طی حالت‌های گذرا، فشار، ثابت نگه‌داشته می‌شود. نهایتاً یک سناریو گذرا که شامل یک حادثه است، برای حلقه در نظر گرفته شده و عملکرد سیستم تعدیل فشار مورد ارزیابی قرار گرفته است.
(Tuan, T. T.et.al.,2016)

## ۲- روش انجام تحقیق

قبل از ایجاد هرگونه تأسیسات هسته‌ای و استفاده از مواد مختلف در ساخت آن، آزمایش‌های بسیاری در زمینه‌های گوناگون صورت می‌گیرد، تا از صحت عملکرد آن‌ها در شرایط واقعی، اطمینان حاصل شود. در این تحقیق، با الگوبرداری از تست لوپ آیداهو آمریکا، به طراحی و شبیه‌سازی تست لوپ تحت‌فشار و دمای بالا پرداخته شده است. موازنه مواد، انرژی و ترکیب در حالت گذرا، در زمان یکسان درنظرگرفته نمی‌شود.

در فرایند به‌صورت گذرا، توازن مواد یا فشار-جریان برای هر بازه زمانی حل شده و فشار و جریان به‌طور همزمان در یک ماتریکس فشار-جریان محاسبه گردیده است. موازنه انرژی و مواد به شیوه متوالی ماژولار حل شده است. چون حل‌کننده فشار-جریان، موازنه آن را در شبکه، به‌طور منحصربه‌فرد در نظر گرفته است، خصوصیات فشار-جریان از خصوصیات دما-ترکیب جدا شده است. بنابراین خصوصیات جریان‌ها در مدار با گذشت زمان، تأثیرپذیری از شرایط حاکم بر مدار و نحوه عملکرد تجهیزات، تغییر می‌کنند. خلاصه‌ای از شرایط

عملیاتی حاکم در لوپ در جدول۱ آورده شده است. همچنین نمایی از تست‌لوپ شبیه‌سازی‌شده در شکل۱ نشان داده‌شده است. آزمایش‌های موردنظر، تحت شرایط فیزیکی (دما، فشار، دبی و ...) مشابه با عملکرد واقعی تأسیسات هسته‌ای انجام گرفته است.

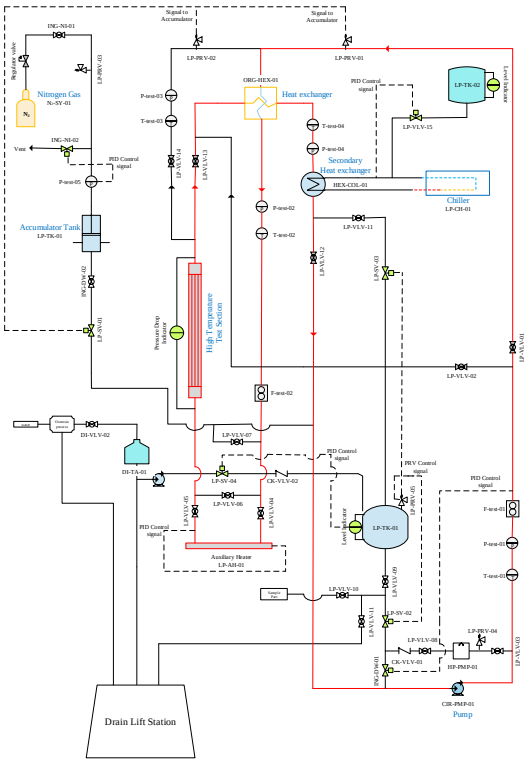
پس از شبیه‌سازی لوپ در نرم‌افزار HYSYS و به‌کارگیری لوپ در حالت گذرا، این محیط نرم‌افزاری به نرم‌افزار MATLABمتصل می‌گردد. سیستم کنترلی لوپ در بخش Simulink نرم‌افزار MATLAB طراحی گردیده است. سپس در طی یک سناریو، عملکرد سیستم تعدیل فشار مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

**جدول ۱: شرایط عملیاتی در لوپ تحقیقاتی**

| پارامتر | واحد | مقدار |
|---|---|---|
| فشار | MPa | ۲۰.۰۲ |
| دبی مولی | Kg mol/h | ۵۹.۳۶ |
| دبی جرمی | Kg/h | ۱۰۶۹ |
| دانسیته جرمی | $Kg/M^3$ | ۹۹۲.۱ |
| دبی حجمی | $M^3/h$ | ۱.۰۷۸ |

## ۱-۲- معرفی مدار تحت‌فشار شبیه‌سازی‌شده

همان‌طور که در قبل گفته شد، مدار شبیه‌سازی‌شده با الگوبرداری از مدار INL یکپارچه شده است. در این مدار از تجهیزات مختلفی ازجمله پمپ، مبدل حرارتی اولیه، مبدل حرارتی ثانویه، سیلندرهای حاوی نیتروژن، بخش آزمایش دمابالا (HTTS )، تجهیزاتکنترلکننده پارامترهای موردنظر، سیستم تعدیل فشار، شیرهای کنترلی و... استفاده شده است. ابتدا تمامی این تجهیزات در محیط نرم‌افزار HYSYS در حالت‌پایا یکپارچه شده است. مدار یکپارچه‌شده، جهت انجام سناریوهای مختلف بر روی آن در حالت گذرا و اطمینان از صحت عملکرد آن در حالت گذرا، به بخش Dynamic نرم‌افزار HYSYS انتقال داده شده است. مدار شبیه‌سازی‌شده، در حالت کلی از دو مدار، که به‌طور مجزا از هم عملیات می‌کنند، تشکیل شده است. یکی از این مدارها، مدار اصلی است، که از بخش آزمایش دمابالا عبور کرده است. مدار دیگر مدار ثانویه است که وظیفه برداشت حرارت اضافی از مدار اصلی را بر عهده دارد، تا دمای مدار اصلی تحت کنترل باقی بماند. این دو مدار توسط مبدل حرارتی ثانویه با یکدیگر تبادل حرارتی انجام می‌دهند.




**شکل۱: نمایی از لوپ فشار و دمای بالا شبیه‌سازی‌شده**

مدار ثانویه مخلوطی از آب و اتیلن گلیکول تشکیل شده است که محدوده دمایی تبخیر و یخزدگی آب را بیشتر کرده است. این ترکیبات، ابتدا در محیط Properties نرم‌افزار HYSYS انتخاب شده است و در ادامه ترکیبدرصدمولی این ترکیبات در محیط شبیه‌سازی انتخاب شده است. از معادله ترمودینامیکی Peng-Robinson جهت انجام محاسبات ترمودینامیکی استفاده شده است.

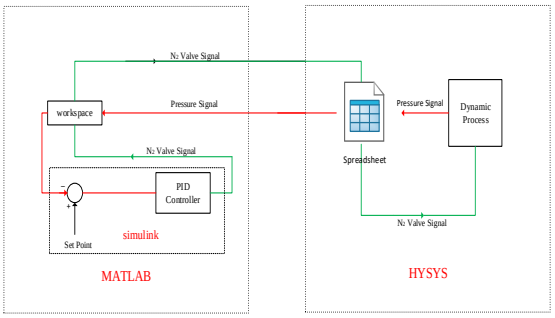
در مسیر مدار ثانویه یک پمپ جهت گردش اجباری و یک سردکن جهت زدودن حرارت دریافتی مدار از مدار اولیه استفاده شده است. کار یا توان گرما برای سردکن تقریباً ۹۵ کیلووات است. همان‌طور که در شکل۱ قابل

مشاهده است، مبدل حرارتی ORG-HEX-01 در میان مسیر مدار اصلی قرار گرفته شده است. وظیفه این مبدل، تبادل حرارت میان جریان خروجی از HTTS و جریانی که در حال آماده شدن برای ورود به HTTS است، می‌باشد. تمامی این تجهیزات در هنگام آزمایش به‌صورت یکپارچه عمل می‌کنند.یک پارامتر بسیار مهم در انجام آزمایش‌ها درون این مدار فشار است. در طول انجام آزمایش در حالت گذرا، به دلیل نوسانات دمایی، فشار دچار تغییر می‌شود. تغییر در فشار، مساعد انجام آزمایش نیست. بنابراین کنترل فشار مدار در طول حالت‌های گذرا از مهم‌ترین وظایف به شمار می‌رود.

## ۲-۲- سیستم تعدیل فشار

نگهداری فشار در حد موردنظر آزمایش اهمیت فراوانی دارد. جهت رسیدن به این مهم، یک سیستم تعدیل فشار برای حلقه در نظر گرفته‌شده است. جهت اتصال سیستم تعدیل فشار به مدار اصلی، حلقه جریان ابتدا توسط پمپ فشارقوی به فشار موردنظر آزمایش رسیده است. نگهداری فشار در طول حالت گذرا با استفاده از یک سیستم تعدیل فشار حاصل شده است. این تانک از دو قسمت آب و گاز غیرقابل تراکم تشکیل شده است. گاز مورداستفاده در این سیستم، نیتروژن است. نحوه اتصال فشارنده به حلقه به این صورت است که در زمان به راه انداختن مدار، فشار سیستم تعدیل فشار، به‌طور از قبل تنظیم‌شده، با استفاده از سیلندرهای حاوی گاز نیتروژن به یک فشار اولیه از حدود ۲۵ درصد از فشار عملیاتی مدار می‌رسد. سپس شیر ING-NI-01 بسته و شیر ING-DW-02 باز شده است. به کمک پمپ فشار بالا، فشار مدار به فشار عملیاتی موردنظر آزمایش رسانده شده است. حال فشار درون سیستم تعدیل فشار، بر روی فشار عملیاتی تنظیم شده است. در این لحظه، شیر ING-NI-01 باز می‌گردد و سیستم تعدیل فشار با اعمال نیتروژن بر روی آن، روی فشار عملیاتی تنظیم می‌شود.

یک شیر برای خروج نیتروژن از سیستم در نظر گرفته شده است. با کنترل بر روی شیرهای ING-NI-01 و ING-NI-02 می‌توان میزان تزریق و برداشت نیتروژن را تنظیم شده است و به این شکل میزان فشار در فشار عملیاتی باقی مانده است. سیستم تعدیل فشار در مدار، مانند یک بافر عمل کرده است که تأثیر تغییر فشار در مدار اصلی را به حداقل رسانده است. میزان بازشدگی و بسته‌شوندگی این دو شیر، توسط یک کنترل‌کننده که در محیط Simulink نرم‌افزار MATLAB شبیه سازی شده است، انجام می‌شود. دیاگرامی از نحوه ارتباط دو محیط نرم‌افزاری با یکدیگر، در شکل۲ قابل‌مشاهده است.




**شکل۲: نمایی از نحوه ارتباط دو نرم‌افزار *HYSYS* و *MATLAB***

دو محیط نرم‌افزاری Aspen HYSYS و MATLAB توسط (COM Technology (CT به یکدیگر متصل شده‌اند. به این صورت قابلیت انتقال اطلاعات بین دو نرم‌افزار ایجاد شده است. از محیط سیمولینک برای شبیه‌سازی کنترل‌کننده PID استفاده شده است.

سیمولینک(Simulink)، یکی از بسته‌های نرم‌افزاری بسیار پرکاربرد برای شبیه‌سازی مهندسی است. سیمولینک با نرم‌افزار متلب (MATLAB) ادغام شده و برای مدل‌سازی، شبیه‌سازی و تحلیلی سیستم‌های دینامیکی به کار می‌رود. ساختار کنترل‌کننده شبیه‌سازی‌شده در سیمولینک متلب و نحوه ورود و خروج اطلاعات از آن در شکل۳ قابل‌مشاهده است. کنترل‌کننده PID از سه قسمت مجزا به نام‌های تناسبی

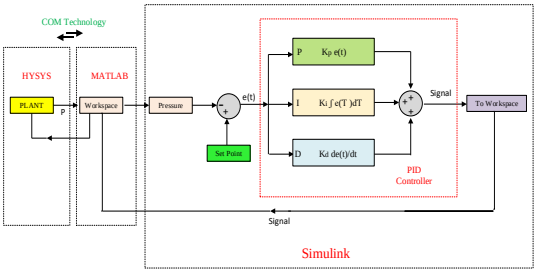
(Proportional)، انتگرالی (Integral)، مشتق‌گیر (Derivative) تشکیل شده است که هرکدام از آن‌ها سیگنال خطا را به‌عنوان ورودی گرفته و عملیاتی را روی آن انجام می‌دهند و درنهایت خروجی‌شان باهم جمع می‌شود.

خروجی این مجموعه که همان خروجی کنترل‌کننده PID است برای اصلاح خطا (error) به سیستم فرستاده می‌شود. بنابراین تابع تبدیل کنترل‌کننده در معادله۱ آورده شده است.

$$G_C = k_P + \frac{K_i}{S} + K_d S \qquad (۱)$$

توجه به رفتار سیستم مقدار KP، Ki و Kd به ترتیب ۰.۵۱ ، ۱.۰۷ و ۰.۰۴۵۱ در نظر گرفته شده است.

نحوه عملکرد آن به این صورت است که نرم‌افزار HYSYS ، مقدار فشار در انتهای هر بازه زمانی (در این شبیه‌سازی ۰.۱ ثانیه در نظر گرفته شده است)، از طریق spreadsheet به کمک CT به درون متلب ارسال کرده است. متلب این مقدار فشار را به بخش سیمولینک ارسال می‌کند. مقدار فشار را مقدار مرجع مقایسه شده است و اختلاف این دو مقدار، به‌عنوان خطا به کنترل‌کننده PID ارسال گردیده است. کنترل‌کننده پس از انجام محاسبات ریاضی سیگنالی را به‌عنوان دستور تولید کرده است. این دستور از محیط سیمولینک به Workspace متلب ارسال شده است. HYSYS این سیگنال را از متلب دریافت کرده و بر روی شیر کنترل تزریق نیتروژن اعمال کرده است. بنابراین میزان باز و بسته شوندگی شیر، کنترل شده است.




**شکل۳: نمایی از قرارگیری و عملکرد کنترل‌کننده *PID* در سیمولینک متلب**

کنترل‌کننده A، کنترل شیر ING-NI-01 را بر عهده دارد و میزان باز و بسته شدن آن را کنترل می‌کند. کنترل‌کننده B با همین ساختار، روی شیر ING-NI-02 که وظیفه خروج نیتروژن را بر عهده دارد، حاکم است. درنتیجه با کنترل میزان تزریق و برداشت نیتروژن از سیستم تعدیل فشار ، فشار در مدار کنترل شده است.

### ۳-۲- سناریو افزایش فشار در مدار

همان‌طور که در شکل۶ قابل‌مشاهده است، فشار در یک مقدار مشخصی باقی‌مانده است. جهت آزمودن سیستم تعدیل فشار و کنترل‌کننده حاکم بر آن، یک سناریو برای مدار درنظر گرفته شده است. در این سناریو سردکن موجود در مدار ثانویه (حاوی آب و اتیلن گلیکول) که وظیفه برداشت حرارت اضافی از مدار را بر عهده دارد، از دست رفته است. همان‌طور که در شکل۴ نیز دیده می‌شود، به دنبال این حادثه دما در مدار اصلی شروع به افزایش کرده است. این اتفاق سبب تغییر در حجم مخصوص می‌شود، زیرا حجم مخصوص تابعی از فشار و آنتالپی است.

$$\upsilon = f(P, h) \qquad (۲)$$

افزایش دما، سبب کاهش دانسیته و افزایش حجم مخصوص شده است. فشار در مدار اصلی به دنبال این اتفاق شروع به افزایش کرده است. سیستم تعدیل فشار، با ورود مقداری از آب مدار اصلی به درون خود، فشار مدار اصلی را در حد معینی، ثابت نگه‌داشته است. معادله تغییرات جرم آب لوپ با گذشت زمان در معادله۳ آورده شده است.

$$\frac{dM_W}{dt} = \sum_{loop} \frac{-V_i}{\upsilon_i^2} \frac{\delta \upsilon_i}{\delta h_i} \frac{dh_i}{dt} - \sum_{loop} \frac{-V_i}{\upsilon_i^2} \frac{\delta \upsilon_i}{\delta P} \frac{dP}{dt} \qquad (۳)$$

این معادله برای تمامی حجم‌های کنترل لوپ شبیه‌سازی‌شده، برقرار است. در اینجا، M_W جرم ناحیه آب، υ_i و h_i به ترتیب حجم مخصوص و آنتالپی ناحیه

i ام ، V_i حجمی از حجم کنترل ناحیه i ام و P فشار در لوپ اصلی است. بنابراین، میزان آب درون سیستم تعدیل فشار، افزایش یا کاهش می‌نماید و سطح آب درون آن تغییر می‌نماید. معادله سطح آب سیستم تعدیل فشار توسط معادله ۳ آورده شده است.

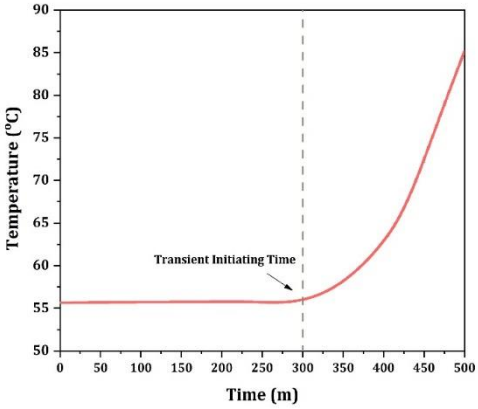
$$\frac{dL}{dt}=\frac{1}{A}\left[M_W\left(\frac{\delta\upsilon_w}{\delta h_w}\frac{dh_w}{dt}+\frac{\delta\upsilon_w}{\delta P}\frac{dP}{dt}\right)+\upsilon_w\frac{dM_w}{dt}\right] \qquad (۴)$$

آزمایش در حالت پویا، در مدت ۵۴۰ ثانیه با گام زمانی ۰.۱ ثانیه، جهت تبادل اطلاعات، بین دو نرم‌افزار انجام می‌گردد و نتایج و عملکرد سیستم تعدیل فشار مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

## ۳- نتایج و بحث

یک سناریو برای لوپ در نرم‌افزار HYSYS شبیه‌سازی گردید. این سناریو، حادثه ازدست‌رفتن سیستم برداشت حرارت از لوپ‌اصلی، توسط لوپ‌ثانویه است. به‌این‌ترتیب دما در حلقه اصلی شروع به افزایش نمود و سبب تغییر در حجم مخصوص آب گردید. به دنبال آن فشار در مدار اصلی شروع به افزایش کرده است.

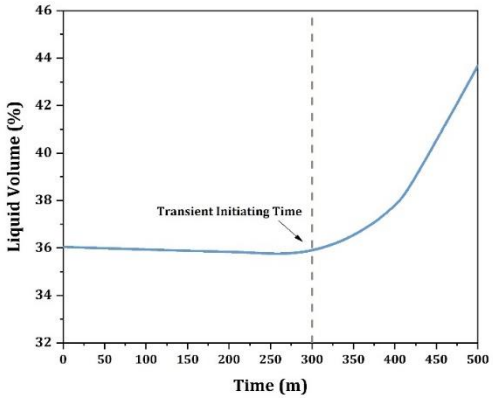
همان‌طور که گفته شد، سیستم تعدیل فشار به لوپ‌اصلی متصل گردیده و لوپ، شروع به کار می‌نماید. پس از گذشت ۳۰۰ ثانیه از عملیات، لوپ دچار حادثه شده و لوپ‌ثانویه برداشت حرارت خود را از دست داده است.



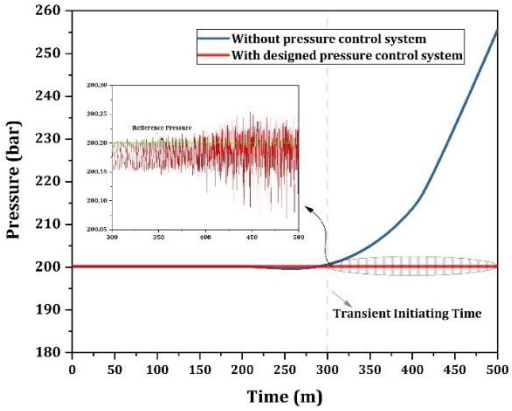

**شکل۴: تغییرات دمایی در طول شبیهسازی**

همان‌طور که در شکل۴ قابل‌مشاهده است، دما در حلقه شروع به افزایش نموده است. این افزایش دما در لوپ اصلی، سبب می‌شود چگالی کاهش یابد و به دنبال آن حجم مخصوص روندی رو به رشد را تجربه کند. این افزایش حجم مخصوص سبب افزایش فشار در لوپ اصلی می‌شود، که این خوشایند عملیات نیست. در اینجا سیستم تعدیل فشار وارد عمل گردیده و با وارد نمودن مقداری از آب لوپ‌اصلی به درون خود، در مقابل این افزایش حجم مخصوص واکنش نشان می‌دهد و فشار را در حد معین کنترل می‌کند. تغییرات سطح مایع درون سیستم تعدیل فشار در طول شبیه‌سازی، در شکل۵ نشان داده شده است.

با افزایش در مقدار فشار در لوپ، در انتهای بازه زمانی(۰.۱ ثانیه)، مقدار فشار به متلب ارسال شده است. متلب مقدار را به سیمولینک فرستاده است. این مقدار با Set Point آزمایش مقایسه گردیده‌است. مقدار خطا به کنترل‌کننده A و B وارد شده است. کنترل‌کننده A سیگنالی را به شیر کنترل ING-NI-01 فرستاده است. شیر کنترل شروع به بسته شدن کرده است تا نیتروژن کمتری به سیستم تعدیل فشار تزریق شود و فشار از روی آن برداشته شود. کنترل‌کننده B سیگنالی را به شیر کنترل ING-NI-02 فرستاده است. این شیر کنترل که وظیفه خارج کردن نیتروژن از سیستم تعدیل فشار را بر عهده دارد، شروع به باز شدن کرده است. با انجام این عملیات مقداری از آب مدار اصلی به درون سیستم تعدیل فشار انبساط یافته است و فشار در حد موردنظر آزمایش نگه‌داشته است. تمامی محاسبات مانند محاسبه سطح مایع درون سیستم تعدیل فشار، درصد مایع درون سیستم و میزان جرم آب ورودی یا خروجی به سیستم در نرم‌افزار MATLAB انجام گرفته است.




**شکل۵: تغییرات درصد حجم مایع درون سیستم تعدیل فشار**




**شکل۶: مقایسه فشار لوپ در دو حالت با و بدون سیستم‌تعدیل‌فشار**

مقایسه لوپ متصل به سیستم تعدیل فشار و لوپ فاقد سیستم تعدیل فشار در شکل۶ آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در صورت عدم وجود سیستم تعدیل فشار، فشار لوپ به سرعت افزایش می‌نماید و از کنترل خارج می‌گردد. از نتایج مشخص است که سیستم تعدیل فشار، نقش کلیدی در حفظ فشار لوپ دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حادثه در ثانیه ۳۰۰ پس از شروع فرایند رخ می‌دهد و دما شروع به افزایش می‌نماید، درنتیجه حجم مخصوص آب دچار دگرگونی می‌شود و موجب بالا رفتن سطح آب درون سیستم تعدیل فشار می‌گردد. به‌این‌ترتیب، فشار حتی در شرایط حادثه نیز توسط سیستم کنترل فشار طراحی‌شده در حد معین ثابت نگه داشته می‌شود.

## ۴- نتیجه گیری

کارکرد سیستم کنترل فشار، نقشی اساسی در کارکرد ایمن تست‌لوپ‌های تحقیقاتی دارد. در این مقاله به طراحی و شبیه‌سازی مدار تحت‌فشار و دمای بالا با استفاده از نرم‌افزار مهندسی Aspen HYSYS پرداخته شد. برای کنترل فشار مدار شبیه‌سازی‌شده، یک سیستم تعدیل فشار به مدار اصلی متصل گردید. این سیستم با تزریق و برداشت نیتروژن در بالادست فشارنده، فشار مدار را در حد معین ثابت نگه داشت. همچنین در بخش سیمولینک نرم‌افزار متلب یک کنترل‌کننده PID شبیه‌سازی گردید. این کنترل‌کننده با نرم‌افزار HYSYS کوپل گردید. میزان تزریق و برداشت نیتروژن در فشارنده به‌وسیله این کنترل‌کننده انجام شد.

سناریوهای مختلفی بر روی مدار تحت‌فشار در حالت گذرا صورت پذیرفت و از صحت عملکرد سیستم فشارنده اطمینان حاصل شد. در زمان اجرای سناریوهای مختلف (سناریو افزایش فشار و کاهش فشار)، فشارنده با تبادل آب با مدار اصلی، فشار مدار را در حد معینی(حد مرجع) ثابت نگه داشت. به‌این‌ترتیب با اتصال این سیستم فشارنده به مدار تحت‌فشار و دمای بالا، امکان انجام آزمایش در حد معینی از فشار قابل انجام است.

## ۵- مراجع

[۱]M. Ruzickova, T. Schulenberg, D.C. Visser, R. Novotny, A. Kiss, C. Maraczy,A. Toivonen. Overview and progress in the European project: “Supercritical WateR Reactor e Fuel Qualification Test”.(2014). Progress in Nuclear Energy.

[۲]Graydon L. Yoder Jr., Adam Aaron, Burns Cunningham, David Fugate, David Holcomb, Roger Kisner, Fred Peretz, Kevin Robb, John Wilgen, Dane Wilson.(2013). An experimental test facility to support development of the fluoride-salt-cooled high-temperature reactor. Annals of Nuclear Energy.

[۳]Sabharwall, P., O'Brien, J. E., Yoon, S., & Sun, X. (2015). Experimental facility for development of high-temperature reactor technology: instrumentation needs and challenges. EPJ Nuclear Sciences & Technologies, 1, 14.

[۴]Lotfi, M., Menhaj, M. B., Hosseini, S. A., & Shirani, A. S. (2020). A design of switching supervisory control based on fuzzy-PID controllers for VVER-1000 pressurizer system with RELAP5 and MATLAB coupling. Annals of Nuclear Energy, 147, 107625.

[۵]O'Brien, J. E., Yoon, S. J., Sabharwall, P., & Bragg-Sitton, S. M. (2017). High-Pressure, High-Temperature Thermal Hydraulic Test Facility for Nuclear-Renewable Hybrid Energy System Studies; Facility Design Description and Status Report (No. INL/EXT-17-43269-Rev000). Idaho National Lab.(INL), Idaho Falls, ID (United States.(

[۶]O'Brien, J. E., Sabharwall, P., & Yoon, S. (2014, November). Development of a Multi-Loop Flow and Heat Transfer Facility for Advanced Nuclear Reactor Thermal Hydraulic and Hybrid Energy System Studies. In ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Vol. 46552, p. V08AT10A090). American Society of Mechanical Engineers.

[۷]Mengmeng Xi, Yingwei Wu, Wenxi Tian, G.H. Su, Suizheng Qiu. The influence of ocean conditions on thermal-hydraulic characteristics of a passive residual heat removal system.(2015). Progress in Nuclear Energy.

[۸]Tuan, T. T., Tufa, L. D., Mutalib, M. I. A., & Abdallah, A. F. M. (2016). Control of depropanizer in dynamic Hysys simulation using MPC in Matlab-Simulink. Procedia engineering, 148, 1104-1111.

[۹]Xi, M., Wu, Y., Tian, W., Su, G. H., & Qiu, S. (2015). The influence of ocean conditions on thermal-hydraulic characteristics of a passive residual heat removal system. Progress in Nuclear Energy, 85, 573-587.

[۱۰]Truong Thanh Tuana, Lemma Dendena Tufaa Mohamed Ibrahim Abdul Mutaliba, Abdelraheem Faisal Mohammed Abdallah. Control of depropanizer in dynamic Hysys simulation using MPC in Matlab-Simulink (2016). Procedia Engineering.

Nuclear Technology and Energy

Journal home page: http://Nucte.sbu.ac.ir

Nuclear Technology and Energy, Vol. 1, No. 4, Winter 2023, 1-9

# Design, Simulation and Evaluation of Pressure Control System in a High-pressure Research Test loop

Abolfazl Shoghi[a], Amir Saeed Shirani[a], Seyed Ali Hosseini[a]*, Mahdi Zangian[a]
[a]Faculty of Nuclear Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: 08 - 05 - 2021
Accepted: 05 - 09 - 2021

## Abstract

Design and simulation of research test facilities have great importance among countries nuclear technology. The operation of the pressure control system plays an essential role in the safe operation of these research test loops. In this paper, high-pressure and high-temperature circuit are designed and simulated using Aspen HYSYS engineering software. A pressure control system is connected to the primary circuit to control the simulated circuit pressure. This system keeps the circuit pressure constant at a certain level (reference limit) by injecting and removing nitrogen in the upper head of the pressurizer. The simulation includes a PID control system designed within the Simulink MATLAB, in coupling with Aspen HYSYS engineering software. To ensure the correct operation of the pressure control system in transients, various scenarios have been performed to evaluate the pressure control system.

**Keywords:** High-Pressure Test Facilities, PID Controller, Pressurizer, Coupling of Aspen HYSYS with MATLAB Simulink