



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Type of Article (e.g. Research Article)

Modeling of the hot isostatic press furnace system and simultaneous control of temperature and pressure for use in the production of metal and ceramic parts with improved mechanical properties

Moslem Heidari^a, Hadi Ardiny^{b*}, S. Salamn S. Afghahi^c

^a Researrrcher, Imam Hossein university, Tehran, Iran

^b Assistant Professor, Radiation applications Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute

^c Associate Professor, Advanced materials and nanotechnology research center, Imam Hossein University, Tehran, Iran

Paper INFO

Paper history:

Received: 2022-03-13

Revised: 2022-05-12

ACCEPTED: 2022-10-19

Keywords:

HIP;
MATLAB;
Modelling;
Simultaneous tracking of the temperature and pressure;
PID.

ABSTRACT

One of the most advanced technologies for making metal alloys, engineering ceramics and advanced composites is hot isostatic press furnace (HIP) technology, and sensitive parts in space, marine and medical fields such as steel and prosthetics are made using this technology. In this research, very high temperature and simultaneously high pressure is created and maintained in the hip with argon or nitrogen neutral gas. The accuracy of tracking temperature and pressure will have a significant impact on the quality of the material to be sintered, and the main factor is the quality of the final product. For this purpose, first of all, it is necessary to obtain a suitable model of HIP subsystems and their aggregation, which subsystems are modeled and implemented in MATLAB-Simulink software. In the second step, temperature and pressure are controlled with limitations and parameters considered in the production processes of metal or ceramic parts. The simulation results showed that the designed control system is capable of accurately tracking the defined temperature and pressure profiles. By using this system, it is possible to effectively maintain the temperature and pressure in the range of 2000 degrees Celsius and 2000 bar for about an hour, and as a result, parts with desirable mechanical properties can be produced. Also, the designed control system has shown reliability against changes in process parameters and environmental noises.

DOI: <https://doi.org/>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: hardini@aeoi.org.ir

How to cite this article:

نوع مقاله (به عنوان مثال مقاله پژوهشی)

مدل سازی سامانه کوره پرس ایزواستاتیک داغ و کنترل همزمان دما و فشار جهت استفاده در تولید قطعات فلزی و سرامیکی با خواص مکانیکی بهبود یافته

مسلم حیدری^۱، هادی اردینی^{۲*} و سیدسلیمان سید افقهی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۲۰	یکی از فناوری های بسیار پیشرفته جهت ساخت آلیاژهای فلزی، سرامیک های مهندسی و کامپوزیت های پیشرفته، فناوری کوره پرس ایزواستاتیک داغ (هیپ ^۴) می باشد و قطعات حساس در حوزه های فضایی، دریایی و پزشکی مانند فولاد و پروتز با بهره گیری از این فناوری تولید می گردند. در این پژوهش، دما خیلی بالا و همزمان فشار بالا با گاز خنثی آرگون یا نیتروژن در هیپ ایجاد و نگهداشت می گردد. دقت ردیابی دما و فشار بر کیفیت ماده مورد پخت (تفجوشی) تاثیر بسزایی خواهد داشت و عامل اصلی کیفیت محصول نهایی می باشد. بدین منظور در ابتدا نیاز به دستیابی به یک مدل مناسب از زیرسامانه های هیپ و تجمع آنها است که زیرسامانه ها در نرم افزار متلب-سیمولینک مدل سازی و پیاده سازی شده است. است و در قدم دوم کنترل دما و فشار با قیود و پارامترهای مدنظر در فرآیندهای تولید قطعات فلزی یا سرامیکی است. نتایج شبیه سازی نشان داد که سیستم کنترل طراحی شده قادر به ردیابی دقیق پروفایل های دمایی و فشاری تعریف شده است. با استفاده از این سیستم، می توان به طور مؤثر دما و فشار را در محدوده ۲۰۰۰ درجه سانتیگراد و ۲۰۰۰ اتمسفر برای مدت حدود یک ساعت حفظ نمود و در نتیجه، قطعات با خواص مکانیکی مطلوب تولید کرد. همچنین، سیستم کنترل طراحی شده، قابلیت اطمینان خوبی را در برابر تغییرات پارامترهای فرآیند و نویزهای محیطی از خود نشان داده است.
بازنگری مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۲۰	
پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۱۵	
واژگان کلیدی:	
هیپ، متلب، مدل سازی، ردیابی همزمان دما و فشار بالا، کنترل کلاسیک.	

DOI: <https://doi.org/>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه^۵

فناوری هیپ می باشد [1]. به دلیل کاربردهای بسیار متنوع و حساس این فناوری نظیر ساخت سرامیک های ضد گلوله، پره های توربین هواپیما، دفن پسماندهای هسته ای، بهبود خواص مکانیکی و ...، متأسفانه کشور مورد تحریم های

یکی از فناوری های بسیار پیشرفته جهت ساخت آلیاژهای فلزی، سرامیک های مهندسی و کامپوزیت های پیشرفته،

۱ پژوهشگر، مرکز مواد پیشرفته و نانوفناوری دانشکده و پژوهشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین ع، تهران، ایران

۲ استادیار، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران

۳ دانشیار، مرکز مواد پیشرفته و نانوفناوری دانشکده و پژوهشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین ع، تهران، ایران

⁴ Hot Isostatic Press (HIP)

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: hardini@aeoi.org.ir

استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.

پیشرفت‌های اخیر در طراحی کوره‌ها، به ویژه سیستم‌های خنک‌سازی سریع و کنترل دیجیتال، به طور قابل توجهی زمان چرخه عملیات هیپ را کاهش داده‌اند. با این حال، دقت بالای کنترل دما و فشار در شرایط سخت عملیاتی و هزینه بالای آزمایش‌های مختلف، ضرورت استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی دقیق را بیش از پیش آشکار می‌سازد. در شبیه‌سازی فرآیند هیپ، مسیرهای مرجع دما و فشار به واحد پردازش کنترل داده می‌شوند و کنترل‌کننده با تنظیم عملگرهایی مانند شیرها و ترنستورها^۸ تلاش می‌کند تا خروجی‌های واقعی را با این مسیرهای مرجع تطبیق دهد. وجود یک مدل دقیق، امکان ارزیابی عملکرد سیستم کنترل، پیش‌بینی رفتار سیستم در شرایط مختلف و بهینه‌سازی پارامترهای کنترل را فراهم می‌آورد و در نهایت منجر به افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های عملیاتی می‌شود.

در حوزه کنترل، کنترل‌کننده‌های PID سنتی به طور گسترده در فرآیندهای مختلف از جمله هیپ مورد استفاده قرار گرفته‌اند [7]، اما عملکرد آنها را می‌توان در سیستم‌های پیچیده با دینامیک و اختلالات غیرخطی محدود کرد. استراتژی‌های کنترل پیشرفته، مانند کنترل تطبیقی، کنترل پیش‌بینی مدل (MPC)، و کنترل منطق فازی، عملکرد و استحکام بیشتری را در برنامه‌های هیپ ارائه می‌دهند. به عنوان نمونه، [8] یک استراتژی کنترل بازخورد مبتنی بر مدل برای HIP پیشنهاد کرد که اثرات تسلیم، خزش، انتشار و تغییر شکل ظرف را در بر گرفته است. مساله کنترل ردیابی دمای کوره مخزنی همزن دار پیوسته در حین کنترل غلظت مورد توجه قرار داده شده است [9]، [10]. در این تحقیق کنترل واکنش شیمیایی درون کوره با استفاده از ورودی آب سرد و میزان همزدگی به منظور ردیابی دما و غلظت انجام می‌گیرد. به دلیل وجود اغتشاش در عملیات راکتور ناشی از آب سرد و میزان همزدگی و همچنین وجود تاخیر زیاد در این عملیات و از سویی معلوم بودن آینده

ظالمانه نسبت به خرید این تجهیز قرار گرفته است. این فناوری برای اولین بار در سال ۱۹۵۵ تحت نظر انجمن انرژی اتمی آمریکا متولد شد. هدف آن تولید المان مخصوص سوخت هسته‌ای با استفاده از روش پیوند پخشی^۶ بود، که اورانیم اکسید را به بدنه فلزی تیوب اتصال^۷ دهد. ادامه تلاش‌ها و پیشرفت‌ها منجر به تولید کوره‌های هیپ در مقیاس بزرگ گشت. هیپ روشی برای اعمال همزمان فشار و دمای بالا برای ساخت قطعات فلزی و سرامیکی است و هدف آن بهبود خواص مکانیکی قطعات تولید شده است [2]، [3]. در فرآیند هیپ، قطعات در یک کوره دما بالا و تحت فشار قرار می‌گیرند. فشار یکنواخت گاز خنثی باعث پر شدن حفره‌های داخلی قطعات و افزایش چگالی آنها می‌شود. این فرآیند به طور دقیق کنترل می‌شود تا خواص نهایی محصول به بهترین شکل ممکن حاصل شود [4]. با توجه به مزایای فراوان این فناوری، توسعه داخلی آن می‌تواند گامی بزرگ در جهت رفع نیازهای صنعتی کشور و کاهش وابستگی به خارج باشد. جهت اجرای عملیات هیپ زیرسامانه‌های مختلفی نیاز است که می‌توان به زیرسامانه تولید توان حرارتی، زیرسامانه هیدرولیکی برای جابه‌جایی درپوش دستگاه و برداشتن یا گذاشتن ماده کار، زیرسامانه گاز ایجاد فشار بالا، انتقال و یا قطع انتقال گاز از منبع گاز به داخل کوره، زیرسامانه خنک‌سازی برای جلوگیری از آسیب تجهیزات از جمله بوسترها و بدنه کوره و زیرسامانه خلاء‌سازی برای تخلیه هوای کوره قبل از انتقال گاز به داخل آن و شروع حرارت‌دهی اشاره نمود [5]. نمونه‌ای از سامانه هیپ ساخت شرکت EPSI در شکل ۱ آمده است.



شکل ۱: کوره ساخت شرکت EPSI [6]

سازی در متلب-سیمولینک نشان از مزیت روش هوشمند ارائه شده در ردیابی دما به همراه کاهش مصرف سوخت دارد [14]. در تحقیق دیگری، روشی برای کنترل دمای کوره عملیات هیپ به کار رفته است که در آن یک کوره به شش ناحیه دمایی تقسیم شده است. با توجه به قیود حرارتی موجود و نایقینی‌های موجود در مدل از روش کنترل چند متغیره پیش‌بین مقاوم استفاده شده است که تحت کنترل‌کننده نظارتی به صورت تحمل‌پذیر خطا دما و فشار را کنترل می‌کند.

در حوزه مدل سازی، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) می‌تواند برای مدل‌سازی جریان گاز در محفظه HIP استفاده شود، که برای درک انتقال حرارت و توزیع فشار بسیار مهم است. مدل‌های حرارتی-مکانیکی همراه برای شبیه‌سازی دقیق ضروری هستند، زیرا دما و تغییر شکل مکانیکی به یکدیگر وابسته هستند [15]، [16]. در مقاله یک مدل حرارتی-مکانیکی جفت شده را برای شبیه‌سازی فرآیند هیپ، با در نظر گرفتن اثرات خواص مواد وابسته به دما و تغییر شکل غیر خطی، توسعه داده شده است [17]. در مقاله دیگری، عملکرد هندسه‌ی خاصی از یک کوره‌ی حرارتی پرس گرم به صورت عددی مطالعه شده است. به منظور افزایش دقت حل مسئله از مدل ترمودینامیکی گاز واقعی استفاده شده و معادلات پیوستگی، مومنتوم، آشفتگی و انرژی به صورت هم‌زمان حل شده است [18].

ادغام مدل‌های هیپ با سیستم‌های کنترلی می‌تواند استراتژی‌های کنترلی دقیق‌تر و تطبیقی را امکان‌پذیر کند. کنترل‌کننده‌های مبتنی بر مدل می‌توانند از داده‌های فرآیند بلادرنگ برای تخمین وضعیت فعلی و تنظیم ورودی‌های کنترل بر این اساس استفاده کنند [19]. در مقاله [17] همچنین یک استراتژی کنترل مبتنی بر مدل برای هیپ پیشنهاد شده است، که در آن مدل فرآیند برای پیش‌بینی رفتار آینده سیستم و بهینه‌سازی ورودی‌های کنترل استفاده شد. تکنیک‌های مبتنی بر داده، مانند

مسیر دمایی که باید واکنش طی کند، روش کنترل پیش‌بین برای این تحقیق انتخاب شده است که در ضمن حفظ قیود دما و غلظت، ردیابی مناسبی را نیز دارا است. نتایج شبیه‌سازی نشان از موفقیت آمیز بودن طرح کنترلی مورد نظر دارد. در تحقیق دیگری موضوع کنترل دمای گلخانه مورد توجه محققان قرار داشته است. در این سامانه دو نوع اغتشاش ناشی از آب و هوای بیرون و دیگری نویزهای نامعین در نظر گرفته شده است. در این مقاله یک روش MPC⁹ مقاوم مبتنی بر PSO¹⁰ بر اساس مدل غیرخطی گلخانه پیشنهاد شده است. راهبرد کنترلی پیشنهاد شده امتیازهای مناسبی را برای فن‌آوری‌های کنترلی گلخانه‌ای فراهم آورده است [11]. در تحقیق دیگری روش کنترل پیش‌بین تعمیم یافته برای کنترل دمای یک اتاق با سه ناحیه دمایی به کار رفته است. در این روش به دلیل وابستگی مقدار دما بین نواحی دمایی رویکرد چند متغیره برای طراحی آن‌ها استفاده شده است. حل مساله چند متغیره از طریق دکوپله سازی تابع تبدیل انجام گرفته است. روش پیشنهاد شده بر روی PLC پیاده سازی گردید و نتایج نشان از موفقیت روش یاد شده در کاهش فزاینده پاسخ نسبت به روش PID¹¹ و GPC¹² دارد [12]. مساله کنترل دمای دیگ بخار مورد توجه نویسندگان در تحقیق دیگری قرار گرفته است. چالش اساسی در کنترل دیگ بخار وجود معادلات دینامیکی با غیرخطی‌گری‌های پیچیده و پارامترهای نایقین می‌باشد. در این تحقیق از روش کنترل پیش‌بین برای غلبه بر غیرخطی‌گری‌های بزرگ و قیود مختلفی که در عملیات وجود دارد استفاده شده است. روش پیش‌بین طراحی شده از نظر کیفیت شاخص ITAE¹³ با روش PID معمولی مورد مقایسه قرار گرفته است و برتری آن در کاهش این شاخص مورد ارزیابی قرار گرفته است [13]. روش فازی-منطقی برای تنظیم حرارت محفظه بسته داخل اتاق خودرو به همراه کنترل غلظت CO₂ با استفاده از سامانه پایش هوا، تهویه و حرارت ارائه گردید. نتیجه شبیه

12 Generalized Predictive Control

13 Integral of Time Absolute Error

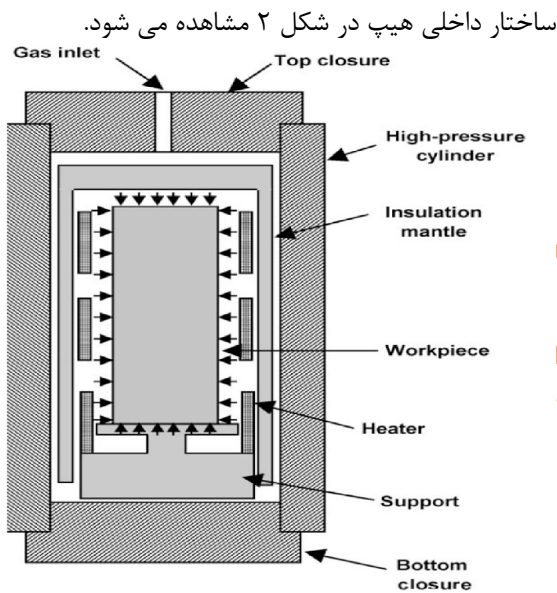
9 Model Predictive Control

10 Particle Swarm Optimization

11 Proportional, Integral, Derivative controller

در SIMSCAPE موجب شده است که نتیجه تحقیق تاثیر زیادی بر کیفیت کنترل ردیابی دمای ساختمان مطابق دمای مطلوب داشته باشد. در مقاله پیش رو نتایج شبیه سازی عملیات هیپ از نظر کیفیت ردیابی دما و فشار در نرم افزار متلب-سیمولینک گزارش شده است. بر اساس دانش نویسندگان مقاله تا کنون تحقیقی بر اساس مدل سازی و کنترل یک سیستم هیپ متشکل چند زیر سیستم صورت نگرفته است که این مقاله با بهره گیری از شبیه سازی اشاره شده به ارایه نتایج در بخش ۴ و نتیجه گیری در بخش ۵ پرداخته است.

۲- ساختار هیپ



شکل ۲: زیرسامانه های هیپ

مولفه های این سامانه در شکل ۳ مشخص شده اند. از میان مولفه های یاد شده در شکل ۳ مخزن فشار قوی مهم ترین مولفه برای ایمنی در حین اجرا می باشد. این مولفه شامل یک سیلندر ستونی فشار است که با درب پوش هایی در دو طرف آن بسته می شود و همچنین شامل یک قاب فشار است که از درب پوش ها در برابر فشار محوری وارد شده پشتیبانی می کند. همچنین مخزن فشار با یک پوسته خنک

یادگیری ماشین و شبکه های عصبی مصنوعی نیز می توانند برای توسعه مدل هایی از داده های فرآیند تاریخی استفاده شوند [4].

در تحقیقات صورت گرفته در حوزه کوره های مشابه هیپ محققان روش های مختلفی را به منظور دستیابی به دقت مطلوب دنبال کرده اند با توجه به جستجوی نویسندگان این مقاله تا کنون نتایج شبیه سازی جامع از این عملیات برای انجام آزمون های مختلف هیپ به چاپ نرسیده است و بیش تر تلاش های تحقیقاتی معطوف به تحلیل اثر عملیات بر ماده مورد پخت بوده است [20]. به عنوان نمونه مدل ویسکوپلاستیک برای شبیه سازی هیپ در نرم افزار PreCAD به کار رفته است که در آن تغییر خواص ماده مورد پخت مورد بحث قرار گرفته است [21].

در سال های اخیر، علاقه فزاینده ای به ادغام رویکردهای مدل سازی پیچیده با استراتژی های مختلف کنترل برای افزایش عملکرد و کارایی فرآیندها وجود داشته است. هیپ نیز یک فرآیند با سطح فناوری بالا است که اجرای هر سیکل آن پرهزینه و زمان بر است. با استفاده از الگوریتم های کنترل پیش بینی کننده که از باز خورد حسگرها بر متغیرهای کلیدی فرآیند استفاده می کنند، هدف این تحقیق کنترل تنظیمات دما و فشار برای دستیابی به خواص مواد مورد نظر است. مدل سازی یکپارچه بر روی زیرسامانه های متنوع نقش موثری در امکان تولید قطعات فلزی و سرامیکی با کارایی بالا با امکان کنترل دقیق بر فرآیند ساخت و تسهیل تولید قطعات با خواص مکانیکی برتر دارد. با توجه به تعدد زیرسامانه ها و متفاوت بودن دنیای فیزیکی حاکم بر آن ها نیاز به محیط شبیه سازی چندگانه است. امروزه از مشهورترین ها نرم افزارها در زمینه مدل سازی های چندگانه^{۱۴} می توان متلب-سیمولینک و Amesim را نام برد. محیط SIMSCAPE قابلیت هایی برای تجزیه و تحلیل عملیات های ابعاد وسیع و پیچیده دارد که روز به روز در حال پیشرفت است و همچنین می تواند برای انجام آزمایش های^{۱۵} HIL بسیار مناسب باشد. وجود کتابخانه قوی

وارد کوره نگردد و کیفیت محصول کاهش نیابد. تجهیزات خلا سازی برای خارج کردن هوای داخل مخزن فشار قوی قبل از شروع عملیات فشار دهی به کار می روند. معمولا برای تخلیه هوا پمپ‌های چرخشی به کار گرفته می شود. تجهیزات حرارت دهی و کنترل توان، تامین و کنترل توان الکتریکی داده شده به حرارت دهنده را بر عهده دارند. برای کنترل توان حرارت دهنده از تریستورها استفاده می شود. تجهیزات خنک کنندگی که آبرگرد هستند برای جلوگیری از افزایش دمای تجهیزاتی مانند مخزن فشار قوی و بوستر بیش از حد استاندارد می باشند. این تجهیزات شامل مبدل حرارتی، پمپ آب، تانک ها می باشد. ادوات ایمنی شامل شامل شیرهای اطمینان^{۱۸} دیسک های پاره شونده^{۱۹} و سنسورهایی که فشار و دما را اندازه گیری می کنند و برای جلوگیری از بالازدگی فشار و دما از حد مجاز می باشد. واحد هیدرولیک برای راه اندازی تجهیزاتی به کار می رود که حرکت قاب فشار و سایر تجهیزات که درب پوش ها را می گذارند و بر می دارند.

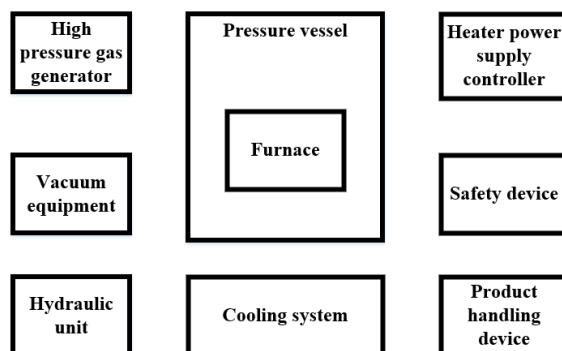
به طور کلی از نگاه کنترلی و ایمنی می توان تجهیزات را به سه دسته عملگرها، حسگرها و ادوات ایمنی تقسیم نمود که در Error! Reference source not found. به آنها اشاره شده است.

جدول ۱: دسته بندی تجهیزات

عملگرها	حسگرها	ادوات ایمنی
پمپ خلا، شیرهای هیدرولیکی، المنت ها، شیرهای سلونوئیدی و بوسترها	فشارسنج، ترموکوپل، RTD و فلومتر	شیرهای اطمینان، شیر یکطرفه و شیرهای دستی، دیسک پاره شونده

در MATLAB با استفاده از بلوک های SIMSCAPE بخش های مختلف هیپ مدل سازی شده اند. بخش های الکتریکی، گاز، هیدرولیک و ... از جمله این بخش ها می باشند. در ادامه مدل سازی هر کدام از این زیرسامانه ها توضیح داده شده است.

کننده^{۱۶} مجهز شده است که باعث کاهش دما در بدنه فولادی مخزن هیپ می گردد.



شکل ۳: مولفه های مدل هیپ در سیمولینک

داخل مخزن فشار قوی یک کوره قرار دارد که قلب تجهیزات درگیر داخل هیپ می باشد. کوره شامل یک حرارت دهنده که دمای داخل کوره را تامین می کنند و یک لایه عایق می باشد از افزایش دمای مخزن و تجهیزات بیش از حد استاندارد جلوگیری می کند. معمولا حرارت دهنده های مقاومتی استفاده می شوند که از جنس گرافیت یا مولیبدن می باشند. انتخاب جنس حرارت دهنده مقاومتی بستگی به شرایط کاری عملیات و بیشینه دمای عملیات دارد. یک ساختار عایق ویژه متفاوت از آن چه که در کوره های معمولی استفاده می شود برای کوره هیپ نیاز است که هدف اصلی آن جلوگیری از همرفت دمایی است. ترموکوپل های نوع C برای اندازه گیری دما و کنترل حلقه بسته دما به کار گرفته می شود.

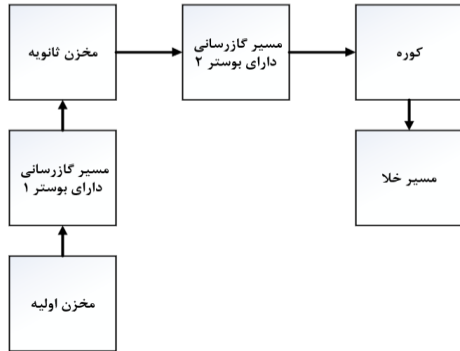
تجهیزاتی که برای تامین گاز فشار قوی به مخزن فشار و دریافت مجدد از مخزن فشار قوی به کار گرفته می شوند با نام تجهیزات تولید گاز فشار قوی شناخته می شوند. این تجهیزات شامل بوسترها، شیرهای فشار قوی، فیلترهای خط، اندازه گیرهای عقربه ای فشار، آکومولاتورهای گاز مربوط به لوله های فشار قوی و اتصالات فشار قوی می باشد. مهم ترین مولفه این بخش بوستر می باشد. بنا بر شرایط عملیات نوع های مختلفی از بوستر به کار می رود ولی به طور معمول از نوع بدون روغن^{۱۷} استفاده می شود تا آلودگی

18 Relief valves
19 Rupture disk

16 Water-cooled jacket
17 Oil-free

زیرسامانه گرمایش

مسیرها شامل شیرهای کنترلی و لوله‌های حامل گاز می‌باشد. مخزن‌ها با استفاده از بلوک‌های محفظه^{۲۰} ساخته شده‌اند. مدل بوستر از کتابخانه گاز در MATLAB انتخاب شده است.



شکل ۵: زیرسامانه تامین گاز فشارقوی

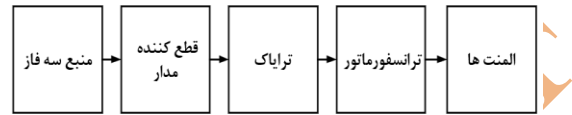
بوسترهای طراحی شده دارای جابجایی حجمی $1200 \frac{cm^3}{rev}$ و بازده حجمی نامی ۰/۷ می‌باشند. پارامترهای گاز آرگون با استفاده از نرم افزار²¹ refprop9 محاسبه گردیدند و از طریق بلوک Properties کتابخانه گاز وارد مدل شده‌اند. در این نرم افزار فشار در بازه [0,200] مگاپاسکال و دما در بازه [0,2300] کلوین به عنوان ورودی به نرم افزار داده می‌شود و نرم افزار در خروجی مقادیر مشخصات گاز آرگون را می‌دهد.

جدول ۲: محاسبه چگالی آرگون در MATLAB

fluid='argon';
Density = refpropm('D','T', T,'P', P, fluid);
%[kg/m3]

با استفاده از کتابخانه refprop در MATLAB می‌توان مطابق جدول ۲ چگالی را در دمای T و فشار P محاسبه نمود. برای سایر پارامترهای گاز آرگون که در جدول ۳ به آن‌ها اشاره شده است نیز به همین منوال می‌توان عمل نمود. به دلیل دشواری شبیه‌سازی بر روی پارامترهای گاز آرگون در حالت گاز واقعی و به وجود آمدن خطاهای عددی،

زیرسامانه گرمایش توان الکتریکی تولید شده را به المنت‌ها منتقل می‌کند. در شکل ۴ چگونگی مدل‌سازی این سامانه آورده شده است.



شکل ۴: زیرسامانه گرمایش هیپ

شرایط کاری محیط در دمای ۳۰/۱۵ کلوین و رسانایی کابل الکتریکی $\frac{1}{\Omega} \cdot 10^{-12}$ در نظر گرفته شده است. منبع برق سه فاز دارای ولتاژ فاز به فاز ۳۸۰ ولتاژ در فرکانس کاری ۵۰ هرتز می‌باشد. به دلیل شبیه‌سازی در فرکانس ۵۰ هرتز زمان نمونه بردای شبیه‌سازی ۱۰۰ میکروثانیه در نظر گرفته شده است تا هر نیم تناوب با دقت مناسب شبیه‌سازی شود. بلوک ترایاک یک بلوک با ۶ تریستور در دو جهت رفت و برگشت است که با تنظیم زاویه آتش آن می‌توان ولتاژ خروجی را کنترل کرد. بر اساس ولتاژ خروجی دمای کوره تعیین می‌شود. ترانسفورماتور به کار رفته دارای توان ظاهری ۲۵۰ کیلووات می‌باشد که به صورت مثلث-ستاره به یک بار مثلثی شامل سه المنت متصل شده است. به دلیل همگن بودن شرایط پخت داخل کوره برای همه جهات مختلف ماده مورد پخت، المنت‌ها به صورت دوری در حالت مثلث بسته شده‌اند.

زیرسامانه گازرسانی

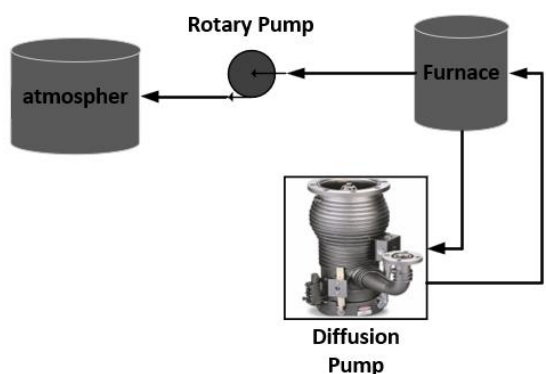
در مدل این زیرسامانه که شامل شیرهای فشار قوی گاز و بوسترها می‌باشد در شکل ۵ آورده شده است. مسیر جریان گاز در این شکل مشاهده می‌شود. کوره به صورت یک مخزن مدل شده است که واکنش‌های دمایی داخل کوره را بر اساس معادلات پایستگی جرم و انرژی مدل می‌کند.

²¹ نرم افزار refprop یک نرم افزار تخصصی در حوزه تعیین مشخصات مواد مختلف در فشارها و دماهای مختلف می‌باشد.

وظیفه خنک‌کنندگی ابتدا با چیلر^{۲۴} می‌باشد و در صورت ایراد در عملکرد آن با استفاده تانک جانشین عملیات خنک‌کنندگی انجام می‌گیرد. برای مکش آب گرد از پمپ آب استفاده شده است که به منظور ایمنی دو پمپ موازی با هم قرار گرفته است که در صورت خرابی یکی، دیگری بتواند در دسترس باشد. این دو پمپ وظیفه پمپاژ آب به داخل مسیر خنک‌سازی را برعهده دارند. برای مدل‌سازی مبدل حرارتی از بلوک heat exchanger استفاده شده است. سرعت آبگرد توسط حسگر فلومتر اندازه‌گیری می‌شود که با استفاده از مقدار اندازه گرفته شده می‌توان سالم بودن زیرسامانه آبگرد را چک نمود.

زیرسامانه خلاءسازی

زیرسامانه خلاءسازی به منظور تخلیه اکسیژن از محفظه داخلی کوره مطابق شکل ۷ طراحی شده است. این زیرسامانه با مکش قوی فشار هوای داخل محفظه کوره را به کم‌تر از ۰/۰۱ بار می‌رساند.



شکل ۷: زیرسامانه خلاء سازی

در این طراحی اگر پمپ چرخشی فشار خلاء را تا حدود ۰/۰۱ اتمسفر می‌رساند. بعد از آن پمپ دیفیوژن وظیفه فشار خلاء کمتر را بر اساس نیاز ایجاد می‌نماید. که می‌توان فشارهای خلاء پایین‌تر از ۰/۰۰۰۰۱ اتمسفر رسید.

۳- ساختار کنترل حلقه بسته دما

از پارامترهای گاز آرگون در حالت گاز کامل برای شبیه‌سازی استفاده شد. در جدول ۳ پارامترهای گاز آرگون محاسبه شده در نرم افزار refprop در حالت گاز کامل آورده شده است.

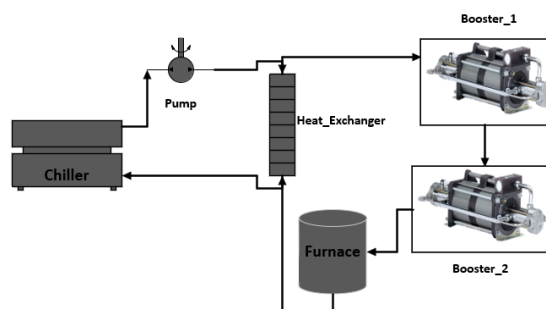
جدول ۳: پارامترهای گاز آرگون در حالت گاز کامل

عملگرها	حسگرها	ادوات ایمنی
ثابت ویژه گاز	$\frac{kJ}{K * kg}$	۰/۲۰۸۱
ضریب فشردگی		۱
دمای مرجع برای گاز ویژه	K	۲۹۳/۱۵
انتالپی ویژه در دمای مرجع	$\frac{kJ}{kg}$	۴۲۰
حرارت ویژه در فشار ثابت	$\frac{kJ}{K * kg}$	۰/۵۲۰۳
ویسکوزیته	$s * uPa$	۲۲/۳
رسانایی حرارتی	$\frac{mW}{K * m}$	۱۶

از بلوک شیر برگشتی^{۲۲} در مسیر ۲ استفاده شده است تا گاز فشار بالا به بخش گاز فشار ضعیف برنگردد. شیرهای مربوط به مسیرهای ۱ و ۲ از نوع شیرهای دریچه‌ای^{۲۳} هستند و بر اساس فرمان‌های سامانه کنترل، وضعیت شیرها در طی زمان تغییر می‌کنند.

زیرسامانه خنک‌سازی

مدل‌سازی این بخش با استفاده از بلوک‌های مربوط به کتابخانه انتقال حرارت مطابق شکل ۶ انجام گرفته است.



شکل ۶: زیرسامانه خنک‌سازی

24 Chiller

22 Check valve
23 Gate valve

$$V_o = V_s \left[\frac{1}{2} + \frac{3}{4\pi} \sin(2\alpha) + \sin(2\alpha + 60^\circ) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$$

$$V_o = V_s \left[\frac{5}{4} - \frac{3\alpha}{2\pi} + \frac{3}{4\pi} \sin(2\alpha + 60^\circ) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$$

در حالت بار ستاره‌ای سلفی خالص بخشی از روابط بالا تغییر می‌کند:

$$V_o = V_s \left[\frac{5}{2} - \frac{3\alpha}{\pi} + \frac{3}{2\pi} \sin(2\alpha + 60^\circ) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$120^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$$

$$V_o = V_s \left[\frac{5}{2} - \frac{3\alpha}{\pi} + \frac{3}{2\pi} \sin 2\alpha \right]^{\frac{1}{2}}$$

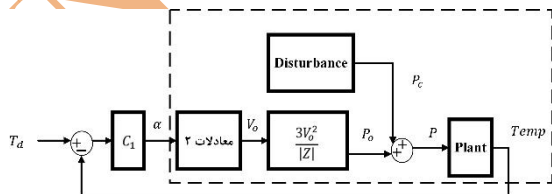
$$90^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$$

ساختار گراف بار به کار گرفته شده در شبیه‌سازی به صورت مثلی می‌باشد. این مدار از نظر محاسبه توان الکتریکی خروجی معادل یک مدار مقاومتی ستاره با مقاومت ۰/۳۳ می‌باشد. پس میزان توان خروجی محاسبه شده به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$P_{out} = \frac{V_o^3}{|Z|} = \frac{3V_o^2}{|Z|}$$

لازم به ذکر است در حالتی که بار به صورت RL باشد محاسبه فرم بسته rms ولتاژ خروجی بسیار پیچیده است. بدین منظور از اثر خاصیت سلفی به منظور طراحی ساده کنترل می‌توان صرف نظر کرد. بر اساس محاسبات اخیر ساختار حلقه بسته کنترل به صورت Error! Reference source not found در

جدول ۴ معرفی گردیده اند.

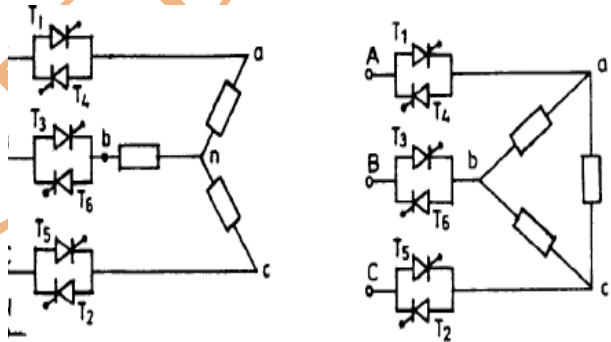


شکل ۹: ساختار حلقه بسته کنترل دمای کوره

جدول ۴: پارامترهای به کار رفته در حلقه کنترل

ردیف	پارامتر	مشخصه
۱	C_1	کنترل کننده حلقه بیرونی

کنترل حرارت جهت ردیابی مسیر مرجع دما و فشار در ناحیه دما و فشار ثابت با استفاده از تنظیم زاویه آتش ترستورها صورت می‌گیرد. در حالت‌های شیب مثبت و منفی دمایی می‌توان از شیرهای کنترلی گاز و استفاده از خنک‌کننده‌های فوری^{۲۵} ردیابی دما به عنوان محرک‌های دما و فشار استفاده نمود. المنتها به صورت ستاره یا مثلث می‌توانند بسته شوند. در اتصال ستاره، انتهای هر سه المنت به یک نقطه مشترک متصل می‌شوند که نقطه خنثی نامیده می‌شود. در این حالت، ولتاژ بین هر فاز و نقطه خنثی برابر با $\sqrt{3}$ برابر ولتاژ خط است، اما جریان فاز و خط برابر هستند. در اتصال مثلث، سر المنت یک فاز به انتهای المنت فاز بعدی متصل می‌شود و به این ترتیب یک مثلث تشکیل می‌شود. در این حالت، ولتاژ فاز و خط برابر هستند، اما جریان خط برابر با $\sqrt{3}$ برابر جریان فاز است.



شکل ۸: ساختارهای مثلی (سمت چپ) و ستاره‌ای (سمت راست) بار به منظور کنترل در حالت دما ثابت بر اساس ساختار شکل ۸ مقدار توان خروجی بر اساس مرجع در حالت بار ستاره مقاومتی خالص به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$V_{AN} = \sqrt{2} V_s \sin \omega t$$

$$V_{BN} = \sqrt{2} V_s \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$V_{CN} = \sqrt{2} V_s \sin(\omega t - 240^\circ)$$

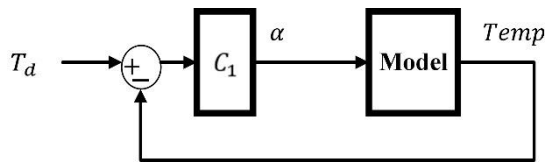
ولتاژهای محاسبه شده در رابطه بالا ولتاژهای فاز هر کدام از خطها می‌باشد. مقدار V_s rms^{۲۶} ولتاژ فاز می‌باشد و برابر با ۲۲۰ می‌باشد. مقدار rms ولتاژ فاز خروجی V_o بر اساس محدوده زاویه آتش α به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$V_o = V_s \left[1 - \frac{3\alpha}{2\pi} + \frac{3}{4\pi} \sin 2\alpha \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$0 \leq \alpha \leq 60^\circ$$

26 Root mean square

25 Rapid cooling



شکل ۱۰: ساختار خلاصه شده کنترل دما

بر اساس روش شناسایی سامانه^{۲۷} از داده‌های بدست آمده از شبیه‌ساز و با استفاده از جعبه ابزار شناسایی^{۲۸} سامانه در MATLAB مدل^{۲۹} tf کوره به صورت زیر محاسبه گردید.

$$\text{Model: } \frac{\text{Temp}(s)}{\alpha(s)} = \frac{4.8546s + 0.0022}{s^2 + 3.956 \times 10^{-9}s + 1.034 \times 10^{-7}} \quad ۵$$

$$\text{Fitness} = 100 * \left(1 - \frac{\text{norm}(y-\hat{y})}{\text{norm}(y-\bar{y})} \right) \quad 60.58\% \quad ۶$$

در رابطه ۶، \hat{y} مقدار تخمین زده شده خروجی به ازای داده‌های ارزیابی می‌باشد و \bar{y} مقدار میانگین داده‌های دمای اندازه‌گیری شده توسط شبیه‌ساز بر حسب کلون می‌باشد. ورودی مدل مقدار نسبت زاویه آتش بر حسب درجه می‌باشد. مقدار این شاخص هرچه بیشتر باشد، تخمین محاسبه شده دقیق‌تر خواهد بود. بر مبنای این مدل می‌توان یک ساختار PI ساده را برای سامانه طراحی نمود. به دلیل این که کنترل‌کننده PI دارای خاصیت مقاوم نسبت به ناپیچینی‌های مدل می‌باشد مقدار دقت خیلی بالایی برای تخمین مدل نیاز نمی‌باشد. کنترل‌کننده PI به دلیل ساختار ساده‌اش قابلیت پیاده‌سازی در انواع PLC^{۳۰} ها را دارد و نسبت به کنترل‌کننده‌های غیرخطی و هوشمند به راحتی عملیاتی می‌شود.

با توجه به رابطه قانون گازها رابطه دما و فشار در صورتی که مولکول‌های گاز در داخل حجم کوره ثابت بماند، خطی تغییر می‌کند. (رابطه ۷)

$$PV = nRT \quad ۷$$

در رابطه بالا R ثابت جهانی گازها می‌باشد و n مولاریته گاز داخل حجم V است. مقادیر P و T به ترتیب فشار و دمای گاز در آن حجم می‌باشد.

در ابتدای سناریوی کوره بعد از عملیات خلاص‌سازی با استفاده از فشار گاز مخزن اولیه مخزن ثانویه پر می‌شود و

مقدار زاویه آتش بر حسب درجه	α	۲
rms ولتاژ فاز ورودی	V_s	۳
rms ولتاژ فاز خروجی	V_o	۴
توان حرارتی خروجی	P_o	۵
افت توان ناشی از آبگرد	P_c	۶
توان کل وارد شده به کوره	P	۷
دوره تناوب سیگنال خروجی	T	۸
امپدانس هر کدام از المنت‌ها	Z	۹
کوره	plant	۱۰
منبع اغتشاش مانند آبگرد	Disturban	۱۱
دمای کوره	Temp	۱۲
دمای ورودی مرجع	T_d	۱۳

اغتشاش P_c مدل‌کننده افت دما بر اساس جریان آبگرد است. مقدار اغتشاش در طول شبیه‌سازی به صورت توان منفی ثابت در نظر گرفته شده است و مقدار آن در شبیه‌سازی برابر ۱/۵- کیلووات در نظر گرفته شده است.

به دلیل وجود غیرخطی‌گری‌ها در رابطه زاویه آتش - حرارت خروجی، کنترل دقیق دما باید بر اساس روش‌های غیرخطی محاسبه گردد. برای سادگی می‌توان ساختار داخل بسته نقطه‌چین در شکل ۹ را به صورت شکل ۱۰ خلاصه‌سازی نمود. این شکل کلی کنترل حلقه بسته دما است که به طور مداوم دمای یک محیط یا فرآیند را اندازه‌گیری کرده و با مقایسه آن با دمای تنظیم شده، اقدامات لازم (نظیر کنترل زاویه آتش ترستور) را برای حفظ دمای مورد نظر انجام می‌دهد. در این سیستم، یک سنسور دمای محیط را اندازه‌گیری کرده و سیگنالی را به کنترل‌کننده ارسال می‌کند. کنترل‌کننده این سیگنال را با مقدار دمای تنظیم شده مقایسه کرده و در صورت وجود اختلاف، فرمان لازم را به ترستور ارسال می‌کند تا دمای مخزن به مقدار تنظیم شده برسد. این فرآیند به صورت مداوم تکرار می‌شود تا دمای محیط در محدوده مورد نظر حفظ شود.

جدول ۵: مفروضات آزمایش

ردیف	مشخصه	واحد	مقدار
۱	زمان عملیات	sec	۹۰۰۰
۲	توان خنک کنندگی آب گرد	w	۱۵۰۰
۳	زمان نمونه برداری	sec	۰/۰۰۰۱
۴	دمای ناحیه holding	k	۲۰۰۰
۵	شیب ناحیه heating	$\frac{k}{min}$	۴/۵
۶	مقدار خلاء	Pa	۲۰
۷	فشار ناحیه holding	MPa	۲۰۰
۸	مدت زمان ناحیه شیب دمایی	Sec	۱۰۰۰

محدوده بیشینه خطا و بیشینه انتگرال گیری روی بازه ۱۰۰ ثانیه‌ای بر اساس درخواست کاربر به منظور دقت ردیابی به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$-100 < e(t) < 200 \rightarrow \int_{t-T}^t e(t) dt < 200T \quad ۱۱$$

بر اساس قانون کنترل PI خروجی کنترل به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\alpha(t) = ke(t) + I \int_{t-T}^t e(t) dt \quad ۱۲$$

برای این که حاصل خروجی کنترل در بازه [۰، ۱۸۰] قرار گیرد، باید ضرایب k و I تا حدود متناسبی پایین باشد و برای مقابله با اثر اشباع عملگر نیز از روش پایان پذیری انتگرالی استفاده شده است. در جدول ۶ ضرایب کنترل PI که با استفاده از قیود مطرح شده و به صورت سعی و خطا در بستر شبیه‌ساز محاسبه شده‌اند، گزارش شده است. شاخص *resetting factor* بیانگر طول دوره انتگرال گیری است.

$$P = 0.001, I = 0.0001, \text{resetting factor} = 100$$

با توجه به رابطه ۱۰ و اطلاعات جدول ۵ مقدار فشار اولیه کوره حدود ۷۰ مگاپاسکال می‌شود:

$$P_1 = 70 \text{ MPa}$$

سپس از طریق دریچه های کنترلی گاز داخل مخزن ثانویه وارد کوره می‌شود تا فشار اولیه کوره تامین گردد. بعد از تامین اولیه گاز داخل حجم کوره شیرهای ورودی کوره بسته می‌شوند و حرارت دهی آغاز می‌شود. اگر در لحظه آغاز حرارت دهی دمای اولیه کوره T_1 باشد و فشار اولیه نیز P_1 باشد، بر اساس قانون گازها ارتباط این دما و فشار با فشار و دمای ناحیه نگهداشت (P_h, T_h) به صورت زیر می‌شود:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_h}{T_h} \quad ۸$$

از طرفی مقدار شیب (a) و بازه شیب دهی دما (t_r) توجه به مسیر مرجع از پیش معلوم است. در این صورت مقدار T_1 برابر است با:

$$a = \frac{T_h - T_1}{t_r} \rightarrow T_1 = -at_r + T_h \quad ۹$$

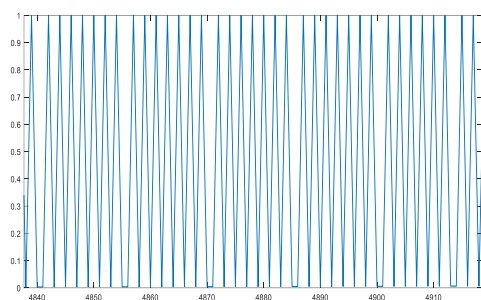
با جایگذاری رابطه ۹ در رابطه ۸ مقدار P_1 محاسبه می‌شود:

$$P_1 = \frac{(-at_r + T_h)}{T_h} P_h \quad ۱۰$$

با توجه به این که دمای ناحیه نگهداشت و فشار آن قبل از عملیات معلوم است و دمای اولیه کوره نیز به طور تقریبی معلوم است می‌توان فشار اولیه ای که بوستر ۲ قبل از حرارت دهی باید ایجاد کند را محاسبه نمود. تا زمانی که فشار به مقدار اولیه نرسیده باشد شیرهای کنترلی مسیر ۲ باز می‌مانند و بلافاصله بعد از رسیدن فشار کوره به مقدار P_1 بسته می‌شوند. اگر فرض کنیم افت مولکول گاز در داخل کوره رخ نمی‌دهد بر اساس رابطه خطی دما و فشار و همچنین تنظیم مناسب اولیه فشار کوره به مقدار P_1 ، ردیابی دما و فشار به درستی صورت می‌گیرد.

۴- شبیه سازی و نتایج

شبیه سازی عملیات هیپ در محیط سیمولینک مطابق شرایط آورده شده در جدول ۵ انجام گرفته است.



شکل ۱۳: خروجی کنترل کننده PID با پایان پذیری انتگرالی در بازه زمانی ۴۸۴۰ تا ۴۹۱۰ ثانیه مقدار شاخص انتگرال مجموع مربعات خطا^{۳۱} در دو حالت اغتشاشی ۲۰۰۰ وات و ۲۵۰۰ وات مورد توجه قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی ها در جدول زیر مشاهده می شود.

جدول ۶: ناحیه نگهداشت IAE

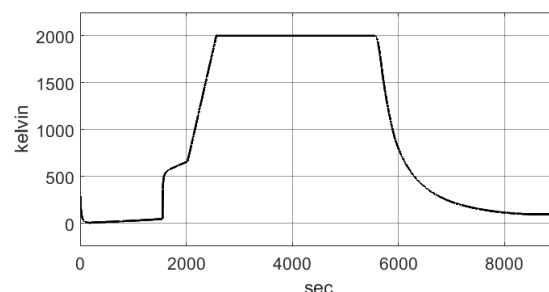
۱	آزمایش	توان اغتشاش	IAE
۲	آزمایش اول	۲۰۰۰ وات	۰/۰۲۳۵
۳	آزمایش دوم	۲۵۰۰ وات	۰/۰۳۰۵

همانطور که مشخص است نحوه طراحی کنترل کننده طوری بوده است که مقدار شاخص IAE در دو حالت مقدار قابل قبولی داشته است و شاخص خطای ردیابی مقدار کمی داشته است.

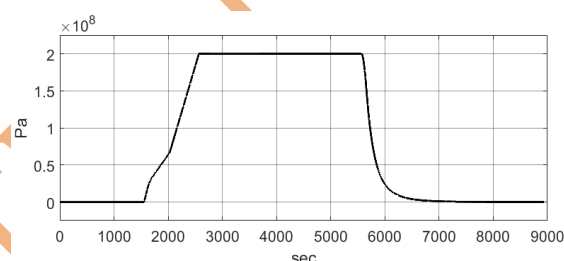
۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، یک مدل جامع از فرآیند هیپ ارائه شده است که شامل زیرسیستم‌های هیدرولیکی، الکتریکی، گازرسانی، خلاءسازی و خنک‌سازی می‌باشد. برای شبیه‌سازی دقیق رفتار این سیستم پیچیده، از نرم‌افزار SIMSCAPE استفاده شده است. با بهره‌گیری از این نرم‌افزار، تمامی اجزای سیستم و تعاملات بین آن‌ها به صورت مجازی مدل‌سازی شده‌اند. به منظور کنترل دقیق فشار و دما در فرآیند هیپ، از کنترل کننده PI با حلقه بسته و استفاده از تریتورها بهره گرفته شده است. این کنترل‌کننده‌ها به صورت مداوم پارامترهای فرآیند را اندازه‌گیری کرده و با مقایسه آن‌ها با مقادیر مرجع،

نتایج شبیه سازی با فرضیات آورده شده در جدول ۵ به صورت شکل ۱۱ و شکل ۱۲ درآمده‌اند.



شکل ۱۱: ردیابی دما بر حسب کلونین با استفاده از کنترل PI



شکل ۱۲: ردیابی فشار کوره با استفاده از کنترل PI سناریو کارکرد هیپ به این صورت تعریف شده است که دما تقریباً با یک شیب ثابت زیاد شود تا به دمای ۲۰۰ درجه برسد و بعد به مدت زمان تقریباً یک ساعت در دمای ۲۰۰ درجه باقی بماند و بعد با خاموش شدن المنتها کاهش دما پیدا کند. همان طور که از شکل ۱۱ و شکل ۱۲ مشخص است ردیابی فشار و دما به طور موفقیت آمیز برای این سناریو و برای ناحیه نگهداشت دما و فشار دمای ۲۰۰۰ کلونین و فشار ۲۰۰ مگاپاسکال صورت گرفته است. در شکل ۱۳ مقدار نسبت زاویه آتش که سیگنال کنترل را در محدوده دما-فشار ثابت می‌سازد، مشاهده می‌شود. سیگنال کنترل در ناحیه نگهداشت دمایی با شیب مشخص شده از ۰ تا ۱ تغییر می‌کند.

- 1656–1660, Sep. 1989, doi: 10.1111/j.1151-2916.1989.tb06298.x.
- [2] M. Koizumi and M. Nishihara, *Isostatic pressing: technology and applications*. Springer Science & Business Media, 1991.
- [3] F. X. Zimmerman, “Hot isostatic pressing: today and tomorrow,” *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 1, pp. 1–11, 2008.
- [4] H. V. Atkinson and S. Davies, “Fundamental aspects of hot isostatic pressing: An overview,” *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 31, no. 12, pp. 2981–3000, Dec. 2000, doi: 10.1007/s11661-000-0078-2.
- [5] G. R. Vadolia, K. P. Singh, M. K. Gupta, B. Doshi, and V. Rathore, “Introduction to Isostatic Pressing and Its Optimization,” in *Modeling and Optimization in Manufacturing: Toward Greener Production by Integrating Computer Simulation*, Wiley, 2021, pp. 157–192. doi: 10.1002/9783527825233.ch6.
- [6] “EPSI.” Accessed: May 04, 2023. [Online]. Available: <https://epsi-highpressure.com/en/service>
- [7] A. Samii, A. Akram, and H. Ardiny, “Comparison of PI and Adaptive Fuzzy Controllers for Position Tracking of Servo System with Variable Loaded BLDC Motor,” in *10th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics, ICRoM 2022*, IEEE, Nov. 2022, pp. 254–260. doi: 10.1109/ICRoM57054.2022.10025035.
- [8] M. N. Gushev, N. Sridharan, Z. Thompson, K. A. Terrani, and S. S. Babu, “Influence of hot isostatic pressing on the performance of aluminum alloy fabricated by ultrasonic additive manufacturing,” *Scr. Mater.*, vol. 145, pp. 33–36, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.10.004>.
- [9] F. Wu, “LMI-based robust model predictive control and its application to an industrial CSTR problem,” *J. Process Control*, vol. 11, no. 6, pp. 649–659, Dec. 2001, doi: 10.1016/S0959-1524(00)00052-4.
- [10] P. Kumar, J. B. Rawlings, and P. Carrette, “Modeling proportional–integral controllers in tracking and

فرمان‌های لازم را به عملگرها ارسال می‌کنند تا شرایط فرآیند در محدوده مطلوب حفظ شود.

نتایج شبیه‌سازی برای یک عملیات ۹۰۰۰ ثانیه‌ای نشان می‌دهد که طراحی کنترل‌کننده پیاده‌سازی شده عملکرد بسیار خوبی دارد. این سیستم کنترل توانایی ردیابی دقیق تغییرات دما و فشار را داشته و در برابر اغتشاشات دمایی مقاوم است. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که در محدوده حرارت‌دهی، فشار سیستم به دلیل قوانین گازهای کامل به صورت متناسب با دما تغییر می‌کند. این رفتار مطابق با انتظار بوده و نشان از صحت مدل‌سازی انجام شده دارد. همچنین، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در صورت افت فشار در محدوده کنترل دمای ثابت، می‌توان با استفاده از یک کنترل‌کننده فشار اضافی که بر روی شیر ورودی و خروجی مخزن گاز آرگون نصب شده است، مقدار کاهش یا افزایش فشار را جبران کرد.

با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش، پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آتی به بررسی حساسیت سیستم کنترل نسبت به تغییرات پارامترهای شیرها پرداخته شود. همچنین، طراحی یک کنترل‌کننده مقاوم نسبت به تغییرات پارامترهای سخت‌افزاری هیپ، یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش رو است. با توسعه چنین کنترل‌کننده‌ای می‌توان اطمینان حاصل کرد که سیستم کنترل در شرایط مختلف عملیاتی به صورت پایدار و قابل اعتماد عمل می‌کند. علاوه بر این، می‌توان با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی، مدل‌های پیشرفته‌تری برای پیش‌بینی رفتار سیستم و بهبود عملکرد کنترل‌کننده‌ها توسعه داد.

تعارض منافع

نویسنده اعلام می‌کند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

مراجع

- [1] I. Tanaka, G. Pezzotti, T. Okamoto, Y. Miyamoto, and M. Koizumi, “Hot Isostatic Press Sintering and Properties of Silicon Nitride without Additives,” *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 72, no. 9, pp.

- Hatami, "Thermal conductivity of MWCNT-TiO₂/Water-EG hybrid nanofluids: Calculating the price performance factor (PPF) using statistical and experimental methods (RSM)," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 48, p. 103094, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.csite.2023.103094.
- [17] M. H. Bocanegra-Bernal, "Hot Isostatic Pressing (HIP) technology and its applications to metals and ceramics," *J. Mater. Sci.*, vol. 39, no. 21, pp. 6399–6420, Nov. 2004, doi: 10.1023/B:JMSC.0000044878.11441.90.
- [18] S. Shoaee, M. Bakouei, M. M. Behzadi, and M. Taghipoor, "Numerical investigation of affecting parameters on the thermal and dynamic performance of a hot isostatic pressing furnace," *Sharif J. Mech. Eng.*, vol. 38.3, no. 1, pp. 85–97, 2022, doi: 10.24200/j40.2022.59079.1621.
- [19] M. H. Hadi Adriny, "Applying a supervisory control system based on a petri net model for fault tolerant handling of AUVs in water ingress accidents," *Iran. J. Mar. Sci. Technol.* 25 (29), 1-14, 2021.
- [20] M. Gopinathan, R. K. Mehra, and J. C. Runkle, "A model predictive fault-tolerant temperature control scheme for hot isostatic pressing furnaces," in *Proceedings of the 1999 American Control Conference (Cat. No. 99CH36251)*, IEEE, 1999, pp. 637–641 vol.1. doi: 10.1109/ACC.1999.782906.
- [21] R. Baccino and F. Moret, "Numerical modeling of powder metallurgy processes," *Mater. Des.*, vol. 21, no. 4, pp. 359–364, Aug. 2000, doi: 10.1016/S0261-3069(99)00094-1.
- economic model predictive control," *J. Process Control*, vol. 122, pp. 1–12, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.jprocont.2022.12.003.
- [11] Q. Zou, A. Ji, S. Zhang, M. Shi, and Y. Luo, "Model predictive control based on particle swarm optimization of greenhouse climate for saving energy consumption," in *2010 World Automation Congress, WAC 2010*, 2010, pp. 123–128.
- [12] Z. Chen, J. Cui, Z. Lei, J. Shen, and R. Xiao, "Design of an Improved Implicit Generalized Predictive Controller for Temperature Control Systems," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 13924–13936, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2965021.
- [13] X. Kong, X. Liu, and K. Y. Lee, "Nonlinear multivariable hierarchical model predictive control for boiler-turbine system," *Energy*, vol. 93, pp. 309–322, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.09.030.
- [14] D. Kolokotsa, D. Tsiavos, G. . Stavrakakis, K. Kalaitzakis, and E. Antonidakis, "Advanced fuzzy logic controllers design and evaluation for buildings' occupants thermal–visual comfort and indoor air quality satisfaction," *Energy Build.*, vol. 33, no. 6, pp. 531–543, Jul. 2001, doi: 10.1016/S0378-7788(00)00098-0.
- [15] M. Hemmat Esfe *et al.*, "Theoretical - Experimental study of factors affecting the thermal conductivity of SWCNT-CuO (25:75)/water nanofluid and challenging comparison with CuO nanofluids/water," *Arab. J. Chem.*, vol. 16, no. 5, p. 104689, May 2023, doi: 10.1016/j.arabjc.2023.104689.
- [16] M. Hemmat Esfe, S. Alidoust, S. N. Hosseini Tamrabad, D. Toghraie, and H.