



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

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

ISSN: 2783-2538



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,*}, Seyed Salamn Seyed Afghahi ^a

^a Advanced Materials and Nanotechnology Research Center, Imam Hossein University, Tehran, Iran

^b Radiation Applications Research School, Nuclear Science and Technology Research Institut, Tehran, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2023-07-13

Revised: 2024-08-01

Accepted: 2025-01-01

Keywords:

HIP;
MATLAB;
Modeling;
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 temperatures and simultaneously high pressure are created and maintained in the hip with argon or nitrogen-neutral gas. The accuracy of tracking temperature and pressure will significantly impact 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 MATALB-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 can accurately track 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/10.22075/jme.2024.33989.2659>

© 2025 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@aoi.org.ir

How to cite this article:

heidari, M. , Ardiny, H. and Seyyed Afghahi, S. (2025). 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. Journal of Modeling in Engineering, 23(Special Issue 81), 109-121. doi: 10.22075/jme.2024.33989.2659

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*}، سیدسلیمان سید افقهی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۱۲ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۲۰ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۵	یکی از فناوری های بسیار پیشرفته جهت ساخت آلیاژهای فلزی، سرامیک های مهندسی و کامپوزیت های پیشرفته، فناوری کوره پرس ایزواستاتیک داغ (هیپ ^۲) 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 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. در قدم دوم کنترل دما و فشار با قیود و پارامترهای مدنظر در فرآیندهای تولید قطعات فلزی یا سرامیکی است. نتایج شبیه سازی نشان داده است که سیستم کنترل طراحی شده، قادر به ردیابی دقیق پروفایل های دما و فشار تعریف شده است. با استفاده از این سامانه، 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 در برابر تغییرات پارامترهای فرآیند و نویزهای محیطی از خود نشان داده است.

واژگان کلیدی:

هیپ،
متلب،
مدلسازی،
ردیابی همزمان دما و فشار بالا،
کنترل کلاسیک.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.33989.2659>

© 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

یکی از فناوری های بسیار پیشرفته جهت ساخت آلیاژهای فلزی، سرامیک های مهندسی و کامپوزیت های پیشرفته، فناوری هیپ می باشد [۱]. 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 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 هسته ای با استفاده از روش پیوند پخشی^۳ بود، که اورانیم اکسید را به بدنه فلزی تیوب اتصال^۴ دهد.

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

۱. مرکز مواد پیشرفته و نانو فناوری دانشکده و پژوهشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین ع، تهران، ایران

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

² Hot Isostatic Press (HIP)

³ Diffusion Bonding

⁴ Bond

استناد به این مقاله:

حیدری، مسلم، اردینی، هادی و سیدافقهی، سیدسلیمان (۱۴۰۴). 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. مدل سازی در مهندسی، ۲۳ (شماره ویژه ۸۱)، ۱۰۹-۱۲۱. doi: 10.22075/jme.2024.33989.2659

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 به‌طور گسترده در فرآیندهای مختلف از جمله هیپ مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۷]، 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، مرجع [۸] 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. در تحقیق دیگری مساله کنترل ردیابی دمای کوره مخزنی همزن‌دار پیوسته در حین کنترل غلظت مورد توجه قرار داده شده است [۹ و ۱۰]. 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 رآکتور ناشی از آب سرد و میزان همزدگی و همچنین وجود تاخیر زیاد در این عملیات و از سویی معلوم بودن آینده مسیر دمایی که باید واکنش طی کند، روش کنترل پیش بین 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 مقاله دیگری، یک روش 6 MPC مقاوم مبتنی بر 7 PSO بر اساس مدل غیرخطی گلخانه پیشنهاد شده است. راهبرد کنترلی پیشنهاد شده امتیازهای مناسبی را برای فن-آورهای کنترلی گلخانه‌ای فراهم آورده است [۱۱]. در تحقیق دیگری روش کنترل پیش بین 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

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 [۲ و ۳]. 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 [۴]. 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 خلاء-سازی برای تخلیه هوای کوره قبل از انتقال گاز به داخل آن و شروع حرارت‌دهی اشاره نمود [۵]. نمونه‌ای از سامانه هیپ ساخت شرکت EPSI در شکل (۱) آمده است.



شکل ۱- کوره ساخت شرکت EPSI [۶]

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 تریستورها تلاش می‌کند تا خروجی‌های واقعی را با این مسیرهای مرجع تطبیق دهد.

⁷ Particle Swarm Optimization

⁵ Thyristor

⁶ Model Predictive Control

است. به منظور افزایش دقت حل مسئله از مدل ترمودینامیکی گاز واقعی استفاده شده و معادلات پیوستگی، مومنتوم، آشفستگی و انرژی به صورت همزمان حل شده است [۱۸].

ادغام مدل های هیپ با سیستم های کنترلی می تواند استراتژی های کنترلی دقیق تر و تطبیقی را امکان پذیر کند. کنترل کننده های مبتنی بر مدل می توانند از داده های فرآیند بلادرنگ برای تخمین وضعیت فعلی و تنظیم ورودی های کنترلی بر این اساس استفاده کنند [۱۹]. در مقاله [۱۷] همچنین یک استراتژی کنترلی مبتنی بر مدل برای هیپ پیشنهاد شده است، که در آن مدل فرآیند برای پیش بینی رفتار آینده سیستم و بهینه سازی ورودی های کنترلی استفاده شد. تکنیک های مبتنی بر داده، مانند یادگیری ماشین و شبکه های عصبی مصنوعی نیز می توانند برای توسعه مدل هایی از داده های فرآیند تاریخی استفاده شوند [۴].

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 در گذشته تلاش های تحقیقاتی معطوف به تحلیل اثر عملیات بر ماده مورد پخت بوده است [۲۰]. 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 [۲۱].

در سال های اخیر، علاقه فزاینده ای به ادغام رویکردهای مدل سازی پیچیده با استراتژی های مختلف کنترلی 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 بازخورد حسگرها بر متغیرهای کلیدی فرآیند استفاده می کنند، هدف این تحقیق کنترلی 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 کنترلی دقیق بر فرآیند ساخت و تسهیل

رویکرد چند متغیره برای طراحی آن ها 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 فراجاهش پاسخ نسبت به روش PID^9 و GPC^9 دارد [۱۲]. مساله کنترل دمای دیگ بخار مورد توجه نویسندگان در تحقیق دیگری قرار گرفته است. چالش اساسی در کنترل دیگ بخار وجود معادلات دینامیکی با غیرخطی گری های پیچیده و پارامترهای ناپقین می باشد. در این تحقیق از روش کنترل پیش بین برای غلبه بر غیرخطی گری های بزرگ و قیود مختلفی که در عملیات وجود دارد استفاده شده است. روش پیش بین طراحی شده از نظر کیفیت شاخص $ITAE^{10}$ با روش PID معمولی مورد مقایسه قرار گرفته است و برتری آن در کاهش این شاخص مورد ارزیابی قرار گرفته است [۱۳]. روش فازی-منطقی برای تنظیم حرارت محفظه بسته داخل اتاق خودرو به همراه کنترلی غلظت CO_2 با استفاده از سامانه پایش هوا، تهویه و حرارت ارائه گردید. نتیجه شبیه سازی در متلب-سیمولینک نشان از مزیت روش هوشمند ارائه شده در ردیابی دما به همراه کاهش مصرف سوخت دارد [۱۴]. 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 ناپقینی های موجود در مدل از روش کنترل چند متغیره پیش بین مقاوم استفاده شده است که تحت کنترل کننده نظارتی به صورت تحمل پذیر خطا دما و فشار را کنترل می کند.

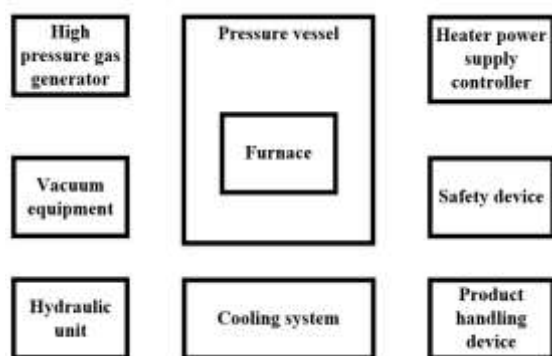
در حوزه مدل سازی، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) می تواند برای مدل سازی جریان گاز در محفظه HIP استفاده شود، که برای درک انتقال حرارت و توزیع فشار بسیار مهم است. مدل های حرارتی-مکانیکی همراه برای شبیه سازی دقیق ضروری هستند، زیرا دما و تغییر شکل مکانیکی به یکدیگر وابسته هستند [۱۵ و ۱۶]. در مقاله دیگری مدل حرارتی-مکانیکی جفت شده را برای شبیه سازی فرآیند هیپ، با در نظر گرفتن اثرات خواص مواد وابسته به دما و تغییر شکل غیر خطی، توسعه داده شده است [۱۷]. در مقاله دیگری، عملکرد هندسه ی خاصی از یک کوره ی حرارتی پرس گرم به صورت عددی مطالعه شده

¹⁰ Integral of Time Absolute Error

⁹ Proportional, Integral, Derivative controller

⁹ Generalized Predictive Control

ترین مولفه برای ایمنی در حین اجرا می‌باشد. این مولفه شامل یک سیلندر ستونی فشار است که با درب پوش‌هایی در دو طرف آن بسته می‌شود و همچنین شامل یک قاب فشار است که از درب پوش‌ها در برابر فشار محوری وارد شده پشتیبانی می‌کند. همچنین مخزن فشار با یک پوسته خنک‌کننده^{۱۳} مجهز شده است که باعث کاهش دما در بدنه فولادی مخزن هیپ می‌گردد.



شکل ۳- مولفه‌های مدل هیپ در سیمولینک [۲]

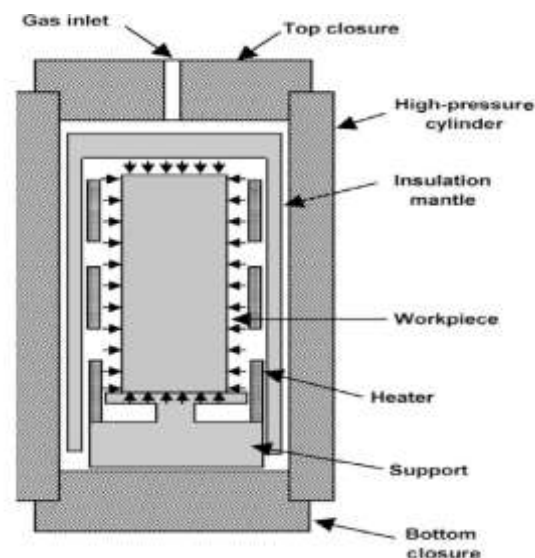
داخل مخزن فشار قوی یک کوره قرار دارد که قلب تجهیزات درگیر داخل هیپ می‌باشد. کوره شامل یک حرارت دهنده که دمای داخل کوره را تامین می‌کند و یک لایه عایق می‌باشد از افزایش دمای مخزن و تجهیزات بیش از حد استاندارد جلوگیری می‌کند. معمولاً حرارت دهنده‌های مقاوم‌تری استفاده می‌شوند که از جنس گرافیت یا مولیبدن می‌باشند. 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 کوره‌های معمولی استفاده می‌شود برای کوره هیپ نیاز است که هدف اصلی آن جلوگیری از همرفت دمایی است. ترموکوپل‌های نوع C برای اندازه‌گیری دما و کنترل حلقه بسته دما به کار گرفته می‌شود.

تجهیزاتی که برای تامین گاز فشار قوی به مخزن فشار و دریافت مجدد از مخزن فشار قوی به کار گرفته می‌شوند با نام تجهیزات تولید گاز فشار قوی شناخته می‌شوند. این تجهیزات شامل بوسترها، شیرهای فشار قوی، فیلترهای خط، اندازه‌گیرهای عقربه‌ای فشار، آکومولاتورهای گاز مربوط به لوله‌های فشار قوی و اتصالات فشار قوی می‌باشد. مهم‌ترین مولفه این بخش بوستر می‌باشد. بنا بر شرایط عملیات نوع‌های مختلفی از بوستر به کار می‌رود ولی به

تولید قطعات با خواص مکانیکی برتر دارد. با توجه به تعدد زیرسامانه‌ها و متفاوت بودن دنیای فیزیکی حاکم بر آنها نیاز به محیط شبیه‌سازی چندگانه است. امروزه از مشهورترین‌ها نرم‌افزارها در زمینه مدل‌سازی‌های چندگانه^{۱۱} می‌توان متلب-سیمولینک و Amesim را نام برد. محیط SIMSCAPE قابلیت‌هایی برای تجزیه و تحلیل عملیات‌های ابعاد وسیع و پیچیده دارد که روز به روز در حال پیشرفت است و همچنین می‌تواند برای انجام آزمایش‌های HIL^{۱۲} بسیار مناسب باشد. وجود کتابخانه قوی در SIMSCAPE موجب شده است که نتیجه تحقیق تأثیر زیادی بر کیفیت کنترل ردیابی دمای ساختمان مطابق دمای مطلوب داشته باشد. در مقاله پیش رو نتایج شبیه‌سازی عملیات هیپ از نظر کیفیت ردیابی دما و فشار در نرم‌افزار 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 بهره‌گیری از شبیه‌سازی اشاره شده به ارایه نتایج در بخش ۴ و نتیجه‌گیری در بخش ۵ پرداخته است.

۲- ساختار هیپ

ساختار داخلی هیپ در شکل (۲) مشاهده می‌شود.



شکل ۲- زیرسامانه‌های هیپ (شکل بر گرفته شده از شرکت (Kobelco)

مولفه‌های این سامانه در شکل (۳) مشخص شده‌اند. از میان مولفه‌های یاد شده در شکل (۳) مخزن فشار قوی مهم

¹³ Water-cooled jacket

¹¹ Multi-modal

¹² Hardware in the Loop

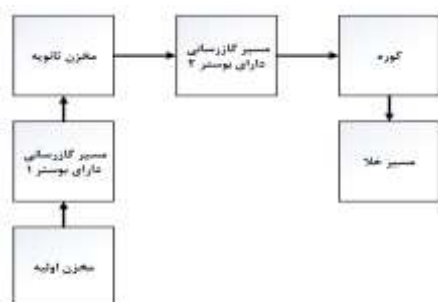


شکل ۴- زیرسامانه گرمایش هیپ

شرایط کاری محیط در دمای ۳۰۰/۱۵ کلین و رسانایی کابل الکتریکی $\frac{1}{\Omega}$ ۱۲-۱۰ در نظر گرفته شده است. منبع برق سه فاز دارای ولتاژ فاز به فاز ۳۸۰ ولتاژ در فرکانس کاری ۵۰ هرتز می باشد. به دلیل شبیه سازی در فرکانس ۵۰ هرتز زمان نمونه بردای شبیه سازی ۱۰۰ میکروثانیه در نظر گرفته شده است تا هر نیم تناوب با دقت مناسب شبیه سازی شود. بلوک ترایاک یک بلوک با ۶ ترستور در دو جهت رفت و برگشت است که با تنظیم زاویه آتش آن می توان ولتاژ خروجی را کنترل کرد. بر اساس ولتاژ خروجی دمای کوره تعیین می شود. ترانسفورماتور به کار رفته دارای توان ظاهری ۲۵۰ کیلووات می باشد که به صورت مثلث-ستاره به یک بار مثلی شامل سه المنت متصل شده است. به دلیل همگن بودن شرایط پخت داخل کوره برای همه جهات مختلف ماده مورد پخت، المنت ها به صورت دوری در حالت مثلث بسته شده اند.

زیرسامانه گازرسانی

در مدل این زیرسامانه که شامل شیرهای فشار قوی گاز و بوسترها می باشد در شکل (۵) آورده شده است. مسیر جریان گاز در شکل (۵) مشاهده می شود. کوره به صورت یک مخزن مدل شده است که واکنش های دمایی داخل کوره را بر اساس معادلات پایستگی جرم و انرژی مدل می کند. مسیرها شامل شیرهای کنترلی و لوله های حامل گاز می باشد. مخزن ها با استفاده از بلوک های محفظه^{۱۷} ساخته شده اند. مدل بوستر از کتابخانه گاز در متلب انتخاب شده است.



شکل ۵- زیرسامانه تامین گاز فشارقوی

طور معمول از نوع بدون روغن^{۱۴} استفاده می شود تا آلودگی 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. معمولاً برای تخلیه هوا پمپ های 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 ترستورها استفاده می شود. تجهیزات خنک کنندگی که آبگرد 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 شیرهای اطمینان^{۱۵} دیسک های پاره شونده^{۱۶} و سنسورهای که فشار و دما را اندازه گیری می کنند و برای جلوگیری از بالا زدگی 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 جدول ۱ به آن ها 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 متلب 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.

زیرسامانه گرمایش

زیرسامانه گرمایش توان الکتریکی تولید شده را به المنت ها منتقل می کند. در شکل (۴) چگونگی مدل سازی این سامانه آورده شده است.

¹⁶ Rupture disk

¹⁷ Chamber

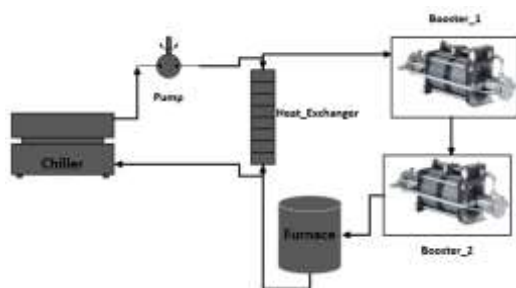
¹⁴ Oil-free

¹⁵ Relief valves

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.

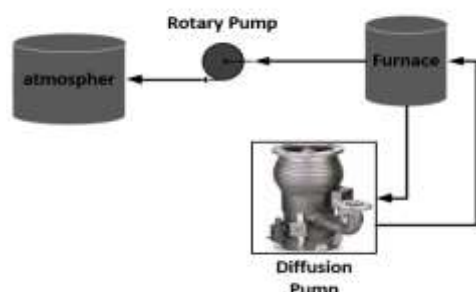


شکل ۶- زیرسامانه خنک‌سازی

وظیفه خنک‌کنندگی ابتدا با چیلر^{۲۱} می‌باشد و در صورت ایراد در عملکرد آن با استفاده از تانک جانشین عملیات خنک‌کنندگی انجام می‌گیرد. برای مکش آب از پمپ 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 خلاء‌سازی

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 افزار^{۱۸} refprop 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] کلون 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 متلب

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

با استفاده از کتابخانه refprop در متلب 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، 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
آنتالپی 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^{۱۹} 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^{۲۰}

¹⁹ Check valve

²⁰ Gate valve

²¹ Chiller

^{۱۸} نرم افزار refprop یک نرم افزار تخصصی در حوزه تعیین مشخصات مواد مختلف در فشارها و دماهای مختلف می‌باشد.

با ۲۲۰ می باشد. مقدار rms ولتاژ فاز خروجی V_o بر اساس محدوده زاویه آتش α به صورت زیر محاسبه می شود:

$$V_o = V_s \left[1 - \frac{3\alpha}{2\pi} + \frac{3}{4\pi} \sin 2\alpha \right]^{\frac{1}{2}} \quad 0 \leq \alpha \leq 60^\circ$$

$$V_o = V_s \left[\frac{1}{2} + \frac{3}{4\pi} \sin(2\alpha) + \sin(2\alpha + 60^\circ) \right]^{\frac{1}{2}} \quad 60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$$

$$V_o = V_s \left[\frac{5}{4} - \frac{3\alpha}{2\pi} + \frac{3}{4\pi} \sin(2\alpha + 60^\circ) \right]^{\frac{1}{2}} \quad 90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$$

در حالت بار ستاره ای سلفی خالص بخشی از روابط بالا تغییر می کند:

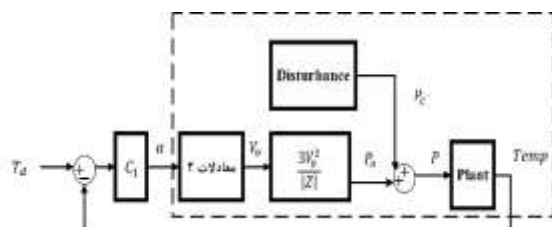
$$V_o = V_s \left[\frac{5}{2} - \frac{3\alpha}{\pi} + \frac{3}{2\pi} \sin(2\alpha + 60^\circ) \right]^{\frac{1}{2}} \quad 120^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$$

$$V_o = V_s \left[\frac{5}{2} - \frac{3\alpha}{\pi} + \frac{3}{2\pi} \sin 2\alpha \right]^{\frac{1}{2}} \quad 90^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$$

ساختار گراف بار به کار گرفته شده در شبیه سازی به صورت مثلی می باشد. این مدار از نظر محاسبه توان الکتریکی خروجی معادل یک مدار مقاومتی ستاره با مقاومت 0.33 می باشد. پس میزان توان خروجی محاسبه شده به صورت زیر محاسبه می شود.

$$P_{out} = \frac{V_o^3}{|Z|} = \frac{3V_o^2}{|Z|} \quad (4)$$

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 می توان صرف نظر کرد. بر اساس محاسبات اخیر ساختار حلقه بسته کنترل به صورت شکل (۹) در می آید که پارامترهای آن در جدول ۴ معرفی گردیده اند.

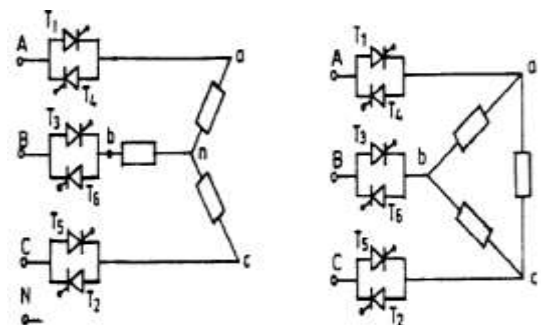


شکل ۹- ساختار حلقه بسته کنترل دمای کوره

در این طراحی اگر پمپ چرخشی فشار خلاء را تا حدود 0.01 اتمسفر می رساند. بعد از آن پمپ دیفیوژن وظیفه فشار خلاء کمتر را بر اساس نیاز ایجاد می نماید. که می توان فشارهای خلاء پایین تر از 0.0001 اتمسفر رسید.

۳- ساختار کنترل حلقه بسته دما

کنترل حرارت جهت ردیابی مسیر مرجع دما و فشار در ناحیه دما و فشار ثابت با استفاده از تنظیم زاویه آتش ترستورها صورت می گیرد. در حالت های شیب مثبت و منفی دمایی می توان از شیرهای کنترلی گاز و استفاده از خنک کننده های فوری^{۲۲} ردیابی دما به عنوان محرک های دما و فشار استفاده نمود. المنتها به صورت ستاره یا مثلث می توانند بسته شوند. در اتصال ستاره، انتهای هر سه المنت به یک نقطه مشترک متصل می شوند که نقطه خنثی نامیده می شود. 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 می شود و به این ترتیب یک مثلث تشکیل می شود. 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 ستاره ای (سمت راست) بار [۲۲]

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 می گردد:

$$\begin{aligned} V_{AN} &= \sqrt{2} V_s \sin \omega t \\ V_{BN} &= \sqrt{2} V_s \sin(\omega t - 120^\circ) \\ V_{CN} &= \sqrt{2} V_s \sin(\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \quad (1)$$

ولتاژهای محاسبه شده در رابطه بالا ولتاژهای فاز هر کدام از خطها می باشد. V_s مقدار rms^{۲۳} ولتاژ فاز می باشد و برابر

²³ Root mean square

²² Rapid cooling

بر اساس روش شناسایی سامانه^{۲۴} از داده‌های بدست آمده از شبیه‌ساز و با استفاده از جعبه افزار شناسایی^{۲۵} سامانه در مدل tf^{۲۶} کوره به صورت زیر محاسبه گردید:

$$\text{Model: } \frac{Temp(s)}{\alpha(s)} = \frac{4.8546s + 0.0022}{s^2 + 3.956 \times 10^{-9}s + 1.034 \times 10^{-7}} \quad (5)$$

$$\text{Fitness} = 100 * \left(1 - \frac{\text{norm}(y-\hat{y})}{\text{norm}(y-\bar{y})}\right) \quad (6)$$

در رابطه $\hat{y}$ ، Error! Reference source not found. 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^{۲۷} 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)

$$PV = nRT \quad (7)$$

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.

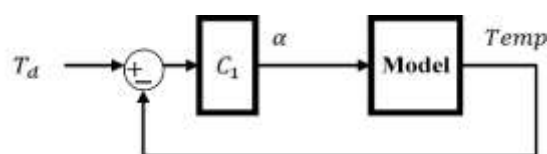
در ابتدای سناریوی کوره بعد از عملیات خللاسازی با استفاده از فشار گاز مخزن اولیه مخزن ثانویه پر می‌شود و سپس از طریق دریچه‌های کنترلی گاز داخل مخزن ثانویه وارد کوره می‌شود تا فشار اولیه کوره تامین گردد. بعد از تامین اولیه گاز داخل حجم کوره شیرهای ورودی کوره بسته می‌شوند و حرارت دهی آغاز می‌شود. اگر در 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

جدول ۴- پارامترهای به کار رفته در حلقه کنترل

ردیف	پارامتر	مشخصه
۱	C_1	کنترل کننده حلقه بیرونی
۲	α	مقدار زاویه آتش بر حسب درجه
۳	V_s	rms ولتاژ فاز ورودی
۴	V_o	rms ولتاژ فاز خروجی
۵	P_o	توان حرارتی خروجی
۶	P_c	افت توان ناشی از آبگرد
۷	P	توان کل وارد شده به کوره
۸	T	دوره تناوب سیگنال خروجی
۹	Z	امپدانس هر کدام از المنت‌ها
۱۰	plant	کوره
۱۱	Disturban	منبع اغتشاش مانند آبگرد
۱۲	Temp	دمای کوره
۱۳	T_d	دمای ورودی مرجع

اغتشاش P_c مدل کننده 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) خلاصه سازی 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.



شکل ۱۰- ساختار خلاصه شده کنترل دما

²⁷ Program Logic Controller

²⁴ System Identification

²⁵ Ident tool

²⁶ Transfer Function

$$-100 < e(t) < 200 \rightarrow \int_{t-T}^t e(t)dt < 200T \quad (11)$$

بر اساس قانون کنترل PI خروجی کنترل به صورت زیر محاسبه می شود.

$$\alpha(t) = ke(t) + I \int_{t-T}^t e(t)dt \quad (12)$$

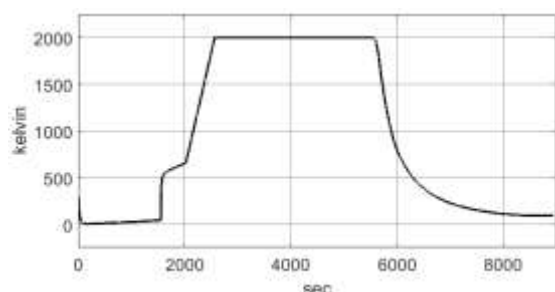
برای این که حاصل خروجی کنترل در بازه $[0, 180]$ قرار گیرد، باید ضرایب k و I تا حدود مناسبی پایین باشد و برای مقابله با اثر اشباع عملگر نیز از روش پایان پذیری انتگرالی استفاده شده است. در جدول ۶ ضرایب کنترل PI که با استفاده از قیود مطرح شده و به صورت سعی و خطا در بستر شبیه ساز محاسبه شده اند، گزارش شده است. شاخص *resetting factor* بیانگر طول دوره انتگرال گیری است.

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

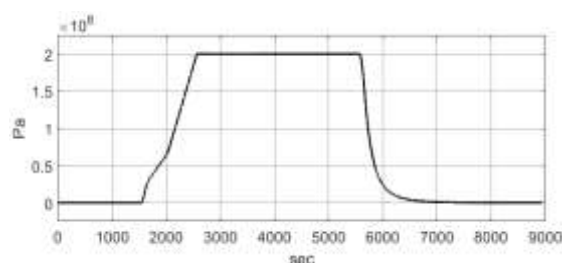
با توجه به رابطه ۱۰ و اطلاعات جدول ۵ مقدار فشار اولیه کوره حدود ۷۰ مگاپاسکال می شود:

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

نتایج شبیه سازی با فرضیات آورده شده در جدول ۵ به صورت شکل (۱۱) و شکل (۱۲) در آمده اند.



شکل ۱۱- ردیابی دما بر حسب کلین 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

فشار و دمای ناحیه نگهداشت (P_h, T_h) به صورت زیر می شود:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_h}{T_h} \quad (8)$$

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:

$$a = \frac{T_h - T_1}{t_r} \rightarrow T_1 = -at_r + T_h \quad (9)$$

با جایگذاری رابطه ۹ در رابطه ۸ مقدار P_1 محاسبه می شود:

$$P_1 = \frac{(-at_r + T_h)}{T_h} P_h \quad (10)$$

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 می توان 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 می ماند و بلافاصله بعد از رسیدن فشار کوره به مقدار P_1 بسته می شوند. اگر فرض کنیم افت مولکول گاز در داخل کوره رخ نمی دهد، 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 می گیرد.

۴- شبیه سازی و نتایج

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

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	۲۰۰
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 ثانیه ای بر اساس درخواست کاربر به منظور دقت ردیابی به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

صورت مجازی مدل سازی شده اند. به منظور کنترل دقیق فشار و دما در فرآیند هیپ، از کنترل کننده PI با حلقه بسته و استفاده از ترستورها بهره گرفته شده است. این کنترل کننده ها به صورت مداوم پارامترهای فرآیند را اندازه گیری کرده و با مقایسه آن ها با مقادیر مرجع، فرمان های لازم را به عملگرها ارسال می کنند تا شرایط فرآیند در محدوده مطلوب حفظ شود.

نتایج شبیه سازی برای یک عملیات ۹۰۰۰ ثانیه ای نشان می دهد که طراحی کنترل کننده پیاده سازی 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 می دهد که در محدوده حرارت دهی، فشار سیستم به دلیل قوانین گازهای کامل به صورت متناسب با دما تغییر می کند. این رفتار مطابق با انتظار بوده و نشان از صحت مدل سازی انجام شده دارد. همچنین نتایج شبیه سازی نشان می دهد که در صورت افت فشار در محدوده کنترل دمای ثابت، می توان با استفاده از یک کنترل کننده 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 می شود که در تحقیقات آتی به بررسی حساسیت سیستم کنترل نسبت به تغییرات پارامترهای شیرها پرداخته شود. همچنین، طراحی یک کنترل کننده مقاوم نسبت به تغییرات پارامترهای سخت افزاری هیپ، یکی از مهم ترین چالش های پیش رو است. با توسعه چنین کنترل کننده ای می توان اطمینان حاصل کرد که سیستم کنترل در شرایط مختلف عملیاتی به صورت پایدار و قابل اعتماد عمل می کند. علاوه بر این، می توان با استفاده از روش های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی، مدل های پیشرفته تری برای پیش بینی رفتار سیستم و بهبود عملکرد کنترل کننده ها توسعه داد.

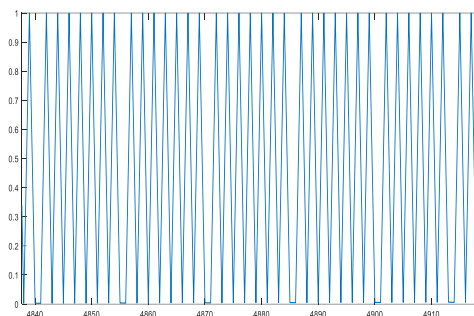
تعارض منافع

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

تاییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانند.

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 کلوین و فشار ۲۰۰ مگاپاسکال صورت گرفته است. در شکل (۱۳) مقدار نسبت زاویه آتش که سیگنال کنترل را در محدوده دما-فشار ثابت می سازد، مشاهده می شود. سیگنال کنترل در ناحیه نگهداشت دمایی با شیب مشخص شده از ۰ تا ۱ تغییر می کند.



شکل ۱۳- خروجی کنترل کننده PID با پایان پذیری انتگرالی در بازه زمانی ۴۸۴۰ ثانیه تا ۴۹۱۰ ثانیه

مقدار شاخص انتگرال مجموع مربعات خطا^{۲۸} 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- IAE ناحیه نگهداشت

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 زیرسیستم های هیدرولیکی، الکتریکی، گازرسانی، خلاء سازی و خنک سازی می باشد. برای شبیه سازی دقیق رفتار این سیستم پیچیده، از نرم افزار SIMSCAPE استفاده شده است. با بهره گیری از این نرم افزار، تمامی اجزای سیستم و تعاملات بین آن ها به

²⁸ Integral absolute Error

مشارکت‌های نویسندگان

مسلم حیدری: روش‌شناسی، نوآوری، بازیابی پردازش داده‌ها و ارزیابی آن، تهیه پیش نویس اصلی، اعتبار سنجی، بررسی و ویرایش نتایج، تجزیه و تحلیل داده و توابع، نرم افزار، پردازش داده‌ها

هادی اردینی: روش‌شناسی، بازیابی پردازش داده‌ها و ارزیابی آن، تهیه و بازیابی پیش نویس اصلی، تجزیه و

تحلیل داده و توابع، نرم افزار، پردازش داده‌ها
سیدسلیمان سیدافقهی: روش‌شناسی، بازیابی پردازش داده‌ها و ارزیابی آن، تهیه و بازیابی پیش نویس اصلی، مدیریت پروژه و جذب منابع مالی

منابع

از منابع مالی دانشگاه جامع امام حسین (ع) جهت انجام این پژوهش استفاده شده است.

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.* 72, no. 9 (1989): 1656–1660
- [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* 1, (2008): 1-11
- [4] H.V. Atkinson and S. Davies. "Fundamental aspects of hot isostatic pressing: An overview." *Metall. Mater. Trans. A* 31, no. 12 (2000): 2981–3000
- [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): 157–192
- [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." 10th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics, IEEE, Nov. 2022, pp. 254–260, 2022.
- [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* 145 (2018): 33–36
- [9] F. Wu. "LMI-based robust model predictive control and its application to an industrial CSTR problem." *J. Process Control* 11, no. 6 (2001): 649–659
- [10] P. Kumar, J.B. Rawlings, and P. Carrette. "Modeling proportional–integral controllers in tracking and economic model predictive control." *J. Process Control* 122, (2023): 1–12
- [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, pp. 123–128, 2010
- [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* 8 (2020): 13924–13936.
- [13] X. Kong, X. Liu, and K.Y. Lee. "Nonlinear multivariable hierarchical model predictive control for boiler-turbine system." *Energy* 93 (2015): 309–322
- [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* 33, no. 6 (2001): 531–543
- [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* 16, no. 5 (2023): 104689
- [16] M. Hemmat Esfe, S. Alidoust, S.N. Hosseini Tamrabad, D. Toghraie, and H. 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* 48, (2023): 103094

- [17] M.H. Bocanegra-Bernal. "Hot Isostatic Pressing (HIP) technology and its applications to metals and ceramics." *J. Mater. Sci* 39, no. 21 (2004): 2004
- [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* 38.3, no. 1 (2022): 85–97
- [19] M. Heidari, H. 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 (2021): 1-14
- [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, pp. 637–641 vol.1., 1999
- [21] R. Baccino and F. Moret. "Numerical modeling of powder metallurgy processes." *Mater. Des* 21, no. 4 (2000): 359–364
- [22] B.P. Ganthia, L. Ray, P. Senapati, and S.K. Barik. "Simulation of three phase voltage controlled soft switching start of induction motor drive." *Int. J. Recent Technol. Eng* 8, no. 3 (2019): 8104–8116.