

الحمد لله الذي
خلقنا من
الحمم



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکاترونیک

مدل سازی حرارتی یک آون باکسی تحت خلاء و طراحی یک کنترل کننده دما

نگارنده: داریوش آجورلو

اساتید راهنما

دکتر مصطفی نظری، دکتر محسن نظری

استاد مشاور

دکتر ناصرالدین سپهری

خرداد ۱۴۰۰

شماره: ۲۴-۱۸۹-۲۶
تاریخ: ۱۴۰۲/۰۷/۲۴

ویرایش:

باسمه تعالی

فرمهای ارزشیابی پایان نامه کارشناسی ارشد
مربوط به ورودی‌های ۹۴ به بعد



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای داریوش آجورلو با شماره دانشجویی ۹۷۰۱۷۸۴ رشته مهندسی مکاترونیک تحت عنوان مدلسازی حرارتی یک آون باکسی تحت خلاء و طراحی یک کنترل کننده دما که در تاریخ ۱۴۰۰/۴/۱۲ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار شد به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

☒ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ ☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۸ ☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۷/۹۹-۱۶ ☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹ ☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد			
نوع تحقیق: ☐ نظری ☒ عملی			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر مصطفی نظری	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر محسن نظری	دانشیار	
۳- استاد مشاور	دکتر ناصرالدین سپهری	استادیار	
۴- استاد داور اول	دکتر حبیب احمدی	دانشیار	
۵- استاد داور دوم	دکتر علی عباس‌نژاد	استادیار	
۶- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر سید مجتبی واردی کولایی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر مهدی گردویی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: ۱۴۰۲/۰۷/۲۴

تقدیم به

پدر و مادر عزیز و مهربانم

که در سختی ها و دشواری های زندگی، همواره یاری دلسوز و خداکار

و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده اند.

بانشکر فراوان از اساتید محترم

جناب آقای دکتر مصطفی نظری و جناب آقای دکتر محسن نظری و جناب آقای دکتر ناصرالدین پهری

که در تمام مراحل پژوهش و به ثمر رساندن این پایان نامه راهنما و پشتیبان این جانب بودند.

تهدنامه

اینجانب **داریوش آجورلو** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی مکترونیک** دانشکده مکانیک و مکترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **مدل سازی حرارتی یک آون باکسی تحت خلا و طراحی یک کنترل کننده دما تحت راهنمایی دکتر مصطفی نظری** متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

کوره‌ها و آون‌های تحت خلاء کاربردهای فراوانی در صنایع دارند. پرکاربردترین و متداول‌ترین نوع آن‌ها، از نوع باکسی می‌باشد. ایجاد یک محیط همگن حرارتی در آون‌ها و کوره‌های خلاء اهمیت بالایی دارد. همچنین، کنترل دقیق دما جهت رسیدن به اهداف مورد نظر بسیار حائز اهمیت است. برای رسیدن به این اهداف، وجود یک مدل ریاضی بسیار مفید خواهد بود. از طرفی، به دلیل وجود مود انتقال حرارت تشعشع در محیط خلاء، رفتار سیستم بسیار غیرخطی خواهد بود و بنابراین مدل‌های خطی کارایی و دقت لازم را ندارند. در این پژوهش، ابتدا یک مدل معادلات دیفرانسیل معمولی غیرخطی جدید برای یک آون باکسی تحت خلاء استخراج شده است و اعتبار مدل با استفاده از یک مجموعه تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. سپس، با به دست آوردن تابع تبدیل سیستم در سه نقطه کاری مختلف، میزان غیرخطی بودن آن بررسی شده است. در مرحله بعد، یک مدل ARX و ARMAX برای سیستم به دست آمده و سپس اعتبار سنجی شده است. برای کنترل دمای آون، یک کنترل‌کننده PID، طراحی شده که ضرایب آن با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک، علف هرز مهاجم، کرم شب تاب و رقابت استعماری به دست آمده است. در گام بعد، یک کنترل‌کننده فازی طراحی شده که قوانین، توابع عضویت ورودی و خروجی و بهره‌های ورودی و خروجی، با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک، جستجوی هارمونی، بهینه‌سازی فاخته، چرخه آب بهینه شده‌اند. همچنین، تابع هزینه در همه الگوریتم‌های بهینه‌سازی با استفاده از روش‌های انتگرال مربعات خطا، انتگرال زمان در مربعات خطا، انتگرال قدر مطلق خطا و انتگرال زمان در قدر مطلق خطا اندازه‌گیری شده است. با مقایسه نتایج کنترل‌کننده PID و کنترل‌کننده فازی، مشاهده می‌شود که نتیجه به دست آمده در کنترل‌کننده فازی که با الگوریتم چرخه آب بهینه شده است، عملکرد بهتری نسبت به بقیه دارد. و در پایان، کنترل‌کننده PID و فازی بر روی آون پیاده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تست‌های تجربی، مشابه شبیه‌سازی‌های انجام شده است.

کلمات کلیدی: آون خلاء، مدل‌سازی ریاضی، کنترل‌کننده PID، کنترل‌کننده فازی، الگوریتم‌های فراابتکاری

لیست مقالات استخراج از پایان نامه

۱- ارائه مدل حرارتی کوره الکتریکی خلاء مکعبی برای محاسبات بلادرنگ: مدل معادلات دیفرانسیل معمولی غیرخطی و اعتبارسنجی تجربی

2-An Experimentally Validated Mathematical Model of a Vacuum Box Furnace and Designing an Optimized Real-time Controller Using Metaheuristic Techniques

3- Mathematical modeling and designing an optimized fuzzy temperature controller for a vacuum box electric furnace: Numerical and experimental study

فهرست مطالب

فهرست جداول	ت
فهرست اشکال	ث
فصل ۱: مقدمه	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۱-۲ تاریخچه	۳
فصل ۲: مدل سازی	۹
۲-۱ توصیف سیستم	۱۰
۲-۲ مدل فضای حالت	۱۲
۲-۲-۱ روش ظرفیت فشرده	۱۵
۲-۲-۲ جابه جایی آزاد	۱۷
۲-۲-۳ ضریب شکل	۲۲
۲-۳ آنالیز حساسیت کلی	۲۳
۲-۴ عملکرد سیستم	۲۵
۲-۴-۱ مدولاسیون پهنای باند (PWM)	۲۶
۲-۵ شناسایی پارامترهای مدل و اعتبارسنجی تجربی	۳۰
۲-۶ تابع تبدیل سیستم	۳۲
۲-۷ مدل ARX	۳۳
۲-۸ مدل ARMAX	۳۵

۳۹	فصل ۳: طراحی کنترل کننده
۴۰	۳-۱ طراحی کنترل کننده.....
۴۰	۳-۲ کنترل کننده PID.....
۴۲	۳-۲-۱ روش زیگلر-نیکولز با استفاده از سیستم حلقه باز.....
۴۳	۳-۲-۲ الگوریتم ژنتیک (GA).....
۴۴	۳-۲-۳ الگوریتم بهینه‌سازی علف هرز مهاجم (IWO).....
۴۷	۳-۲-۴ الگوریتم کرم شب تاب (FA).....
۴۸	۳-۲-۵ الگوریتم رقابت استعماری (ICA).....
۵۱	۳-۳ کنترل کننده فازی.....
۵۳	۳-۳-۱ الگوریتم جستجوی هارمونی (HS).....
۵۵	۳-۳-۲ الگوریتم بهینه‌سازی فاخته (COA).....
۵۸	۳-۳-۳ الگوریتم چرخه آب (WCA).....
۶۰	۳-۴ پیاده سازی کنترل کننده فازی و PID در تست تجربی.....
۶۰	۳-۵ نتایج.....
۶۱	۳-۵-۱ کنترل کننده PID.....
۶۵	۳-۵-۲ کنترل کننده فازی.....
۸۵	فصل ۴: جمع بندی
۸۸	مراجع.....

فهرست جداول

جدول ۲-۱. تابع تبدیل آن خلاء در نقاط کاری متفاوت	۳۳
جدول ۳-۱. به دست آوردن ضرایب PID با استفاده از روش زیگلر-نیکولز	۴۲
جدول ۳-۳. مقادیر تابع هزینه برای الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده شده در کنترل‌کننده PID	۶۴
جدول ۳-۴. قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک با معیار ISE	۶۸
جدول ۳-۵. قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک با معیار ITAE	۶۸
جدول ۳-۶. قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک با معیار ITSE	۶۹
جدول ۳-۷. قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک با معیار IAE	۶۹
جدول ۳-۸. قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم جستجوی هارمونی با معیار ISE	۷۳
جدول ۳-۹. قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم جستجوی هارمونی با معیار ITAE	۷۳
جدول ۳-۱۰. قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم جستجوی هارمونی با معیار ITSE	۷۴
جدول ۳-۱۱. قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم جستجوی هارمونی با معیار IAE	۷۴
جدول ۳-۱۲. قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم فاخته با معیار ISE	۷۷
جدول ۳-۱۳. قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم فاخته با معیار ITSE	۷۷
جدول ۳-۱۴. قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم چرخه آب با معیار ISE	۸۱
جدول ۳-۱۵. قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم چرخه آب با معیار ITAE	۸۱
جدول ۳-۱۶. قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم چرخه آب با معیار ITSE	۸۲
جدول ۳-۱۷. قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم چرخه آب با معیار IAE	۸۲
جدول ۳-۱۸. مقادیر تابع هزینه برای الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده شده در کنترل‌کننده فازی	۸۳

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: هندسه سیستم و موقعیت قرارگیری گرمکن‌ها و سنسور دما. (الف): نمای روبه‌رو، (ب): نمای جانبی
۱۰.....
- شکل ۲-۲: یک آون خلاء با هندسه مکعبی
۱۱.....
- شکل ۲-۳: (الف): المنت میله‌ای، (ب): سنسور PT 100
۱۲.....
- شکل ۲-۴: (الف): پشم سنگ، (ب): برد سرامیکی
۱۲.....
- شکل ۲-۵: مدار الکتریکی معادل سیستم انتقال حرارتی آون
۱۳.....
- شکل ۲-۶: تاثیر عدد بيو بر توزيع دمای پایای دیوار مسطحی که سطح آن در شرایط جابه‌جایی است.. ۱۷
شکل ۲-۷: توزیع دمای گذار برای چند عدد بیوی مختلف در دیوار مسطحی که به صورت متقارن سرد می‌شود.
۱۷.....
- شکل ۲-۸: تشکیل لایه مرزی روی یک صفحه گرم عمودی
۱۹.....
- شکل ۲-۹: هندسه صفحات عمودی و افقی برای محاسبه ضریب شکل
۲۳.....
- شکل ۲-۱۰: هندسه صفحه و یک جسم
۲۴.....
- شکل ۲-۱۱: ضرایب همبستگی رتبه جزئی برای مدل ریاضی آون خلاء.....
۲۵.....
- شکل ۲-۱۲: رله حالت جامد.....
۲۶.....
- شکل ۲-۱۳: سیگنال PWM با دوره سیگنال‌های متفاوت
۲۷.....
- شکل ۲-۱۴: مدت زمان خاموش و روشن بودن گرمکن‌ها در Duty Cycle های مختلف
۲۸.....
- شکل ۲-۱۵: فرکانس و دوره تناوب سیگنال PWM
۲۹.....
- شکل ۲-۱۶: رابطه بین تغییرات ورودی بلوک سیمولینک و ولتاژ اعمال شده به گرمکن‌ها.....
۳۰.....
- شکل ۲-۱۷: (الف): برد آردوینو یونو، (ب): ماژول MAX31865
۳۰.....
- شکل ۲-۱۸: مقایسه خروجی مدل ریاضی و سیستم تجربی
۳۲.....
- شکل ۲-۱۹: مقایسه خروجی مدل ARX و سیستم تجربی
۳۴.....
- شکل ۲-۲۰: مقایسه خروجی مدل ARX و سیستم تجربی با یک ورودی دلخواه
۳۵.....
- شکل ۲-۲۱: مقایسه خروجی مدل ARMAX و سیستم تجربی
۳۷.....
- شکل ۲-۲۲: مقایسه خروجی مدل ARMAX و سیستم تجربی با ورودی دلخواه
۳۸.....
- شکل ۳-۱: ساختار کنترل کننده PID
۴۱.....
- شکل ۳-۲: سیگنال خروجی حلقه باز سیستم
۴۲.....
- شکل ۳-۳: فلوچارت الگوریتم ژنتیک (GA)
۴۴.....

شکل ۳-۴: فلوچارت الگوریتم علف هرز مهاجم (IWO).....	۴۶
شکل ۳-۵: الگوریتم کرم شب تاب (FA).....	۴۸
شکل ۳-۶: فلوچارت الگوریتم رقابت استعماری (ICA).....	۵۰
شکل ۳-۷: ساختار کنترل کننده فازی.....	۵۱
شکل ۳-۸: توابع عضویت ورودی و خروجی.....	۵۲
شکل ۳-۹: فلوچارت الگوریتم جستجوی هارمونی (HS).....	۵۵
شکل ۳-۱۰: فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی فاخته (COA).....	۵۷
شکل ۳-۱۱: فلوچارت الگوریتم چرخه آب (WCA).....	۵۹
شکل ۳-۱۲: (الف) برد آردوینو DUE (ب) مبدل دیجیتال به آنالوگ.....	۶۰
شکل ۳-۱۳: رفتار سیستم حلقه بسته و ورودی کنترلی کنترل کننده PID به دست آمده توسط الگوریتم ژنتیک (GA).....	۶۱
شکل ۳-۱۴: رفتار سیستم حلقه بسته و ورودی کنترلی کنترل کننده PID به دست آمده توسط الگوریتم علف هرز مهاجم (IWO).....	۶۲
شکل ۳-۱۵: رفتار سیستم حلقه بسته و ورودی کنترلی کنترل کننده PID به دست آمده توسط الگوریتم کرم شب تاب (FA).....	۶۳
شکل ۳-۱۶: رفتار سیستم حلقه بسته و ورودی کنترلی کنترل کننده PID به دست آمده توسط الگوریتم رقابت استعماری (ICA).....	۶۳
شکل ۳-۱۷: رفتار سیستم حلقه بسته و ورودی کنترلی کنترل کننده PID در تست تجربی.....	۶۴
شکل ۳-۱۸: رفتار سیستم حلقه بسته و ورودی کنترلی کنترل کننده فازی به دست آمده توسط الگوریتم ژنتیک (GA).....	۶۵
شکل ۳-۱۹: توابع فازی ورودی و خروجی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک با معیار ISE.....	۶۶
شکل ۳-۲۰: توابع فازی ورودی و خروجی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک با معیار ITAE.....	۶۶
شکل ۳-۲۱: توابع فازی ورودی و خروجی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک با معیار ITSE.....	۶۷
شکل ۳-۲۲: توابع فازی ورودی و خروجی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک با معیار IAE.....	۶۷
شکل ۳-۲۳: رفتار سیستم حلقه بسته و ورودی کنترلی کنترل کننده فازی به دست آمده توسط الگوریتم جستجوی هارمونی (HS).....	۷۰
شکل ۳-۲۴: توابع فازی ورودی و خروجی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم جستجوی هارمونی با معیار ISE.....	۷۱
شکل ۳-۲۵: توابع فازی ورودی و خروجی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم جستجوی هارمونی با معیار ITAE.....	۷۱

- شکل ۳-۲۶: توابع فازی ورودی و خروجی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم جستجوی هارمونی با معیار ITSE ۷۲
- شکل ۳-۲۷: توابع فازی ورودی و خروجی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم جستجوی هارمونی با معیار IAE ۷۲
- شکل ۳-۲۸: رفتار سیستم حلقه بسته و ورودی کنترلی کنترل‌کننده فازی به دست آمده توسط الگوریتم بهینه‌سازی فاخته (COA) ۷۵
- شکل ۳-۲۹: توابع فازی ورودی و خروجی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم بهینه‌سازی فاخته با معیار ISE ۷۶
- شکل ۳-۳۰: توابع فازی ورودی و خروجی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم بهینه‌سازی فاخته با معیار ITSE ۷۶
- شکل ۳-۳۱: رفتار سیستم حلقه بسته و ورودی کنترلی کنترل‌کننده فازی به دست آمده توسط الگوریتم چرخه آب (WCA) ۷۸
- شکل ۳-۳۲: توابع فازی ورودی و خروجی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم چرخه آب با معیار ISE ۷۹
- شکل ۳-۳۳: توابع فازی ورودی و خروجی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم چرخه آب با معیار ITAE ۷۹
- شکل ۳-۳۴: توابع فازی ورودی و خروجی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم چرخه آب با معیار ITSE ۸۰
- شکل ۳-۳۵: توابع فازی ورودی و خروجی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم چرخه آب با معیار IAE ۸۰
- شکل ۳-۳۶: رفتار سیستم حلقه بسته و ورودی کنترلی کنترل‌کننده فازی در تست تجربی ۸۳

فصل ۱: مقدمه

۱-۱ مقدمه

آون‌ها و کوره‌های تحت خلاء^۱ کاربردهای بسیاری در صنعت و آزمایشگاه‌ها دارد. در صنایع متالوژی برای انجام عملیات حرارتی (بازپخت، سختکاری پوسته، پیرسختکاری، برگشت دادن، کربن دهی، نرمال سازی و کوئنچ کردن) بر روی یک قطعه به منظور بهینه‌سازی خواص آن قطعه از آون تحت خلاء استفاده می‌شود [۱]. خشک کردن مواد غذایی، قطعات الکترونیکی و تجهیزات پزشکی که در فرآیند خشک کردن از طریق انتقال حرارت به روش جابه‌جایی و رسانش ممکن است آسیب ببینند، از جمله کاربردهای این سیستم‌ها می‌باشند. رایج‌ترین نوع آن‌ها دارای هندسه مکعبی می‌باشد چرا که استفاده از آن بسیار راحت است.

مدل‌سازی ریاضی آون‌های تحت خلاء به درک بهتر فرآیند انتقال حرارت داخل آون کمک می‌کند و همچنین امکان طراحی کنترل‌کننده دما را فراهم می‌کند. به طور کلی مدل‌سازی آون‌ها و کوره‌ها به منظور بهینه کردن مصرف انرژی، طراحی کنترل‌کننده دما و بررسی عملکرد آون‌ها و کوره‌ها قبل از انجام تست‌های عملی روی آنها انجام می‌شود. تا کنون مدل‌های صفر-یک بعدی^۲، مدل‌های دو بعدی^۳ (2D)، مدل‌های سه بعدی^۴ (3D)، مدل فضای حالت و تابع تبدیل برای چنین سیستم‌هایی ارائه شده‌اند.

¹ Vacuum Ovens and Furnaces

² Zero-One Dimensional

³ Two Dimensional

⁴ Three Dimensional

۲-۱ تاریخچه

در مدل‌های سه بعدی از روش دینامیک سیالات محاسباتی^۱ (CFD) استفاده شده است. این مدل‌ها در نمایش فرآیند انتقال حرارت داخل کوره‌ها و آن‌ها دارای دقت بالایی هستند اما زمان پردازش آن‌ها زیاد می‌باشد [۲-۵]. بنابراین مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی نمی‌توانند برای کاربردهای بلادرنگ^۲ استفاده شوند. یک مدل سه بعدی برای انتقال حرارت تشعشع در [۶] ارائه شده است. در [۲]، با استفاده از یک مدل انتقال حرارت سه بعدی عددی، یک کنترل‌کننده PID برای بهینه کردن فرآیند گرم کردن و کمینه کردن مصرف انرژی برای یک کوره خلاء ارائه شده است. یک مدل ریاضی سه بعدی برای یک کوره ذوب آهن^۳ به منظور کاهش اکسایش آهن در [۳] ارائه شده است. برای بررسی فرآیند بازگرمایش یک قطعه در [۵]، یک مدل سه بعدی مورد استفاده قرار گرفته است. در [۷]، یک طراحی بهینه برای یک کوره خلاء، با استفاده از داده‌های تجربی و تحلیل گرمایی ارائه شده است تا با استفاده از آن یک کوره خلاء دما بالا طراحی شود. مدل‌های سه فازی کوره قوس-امپدانس^۴ و کوره قوس-جریان-کنترل شده^۵ با ترکیب نتایج مدل شناسایی شده برای سیستم با مدل‌های تحلیلی مشتق شده از سیستم انتقال حرارت کوره و تخلیه قوس الکتریکی ارائه شده است [۸]. یک مدل ریاضی برای مطالعه فرآیند انبساط پرلیت^۶ در یک کوره الکتریکی عمودی ارائه شده است [۹]. یک مدل عددی بسیار کارآمد که با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی می‌تواند احتراق و گرمایش فولاد را در یک کوره دوار صنعتی توصیف کند، ارائه شده است [۱۰]. در [۱۱]، یک چهارچوب ریاضی بر اساس انرژی-اکسرژی به طور جامع ارائه شده است. علاوه بر این، یک استراتژی بهینه‌سازی اقتصادی، برای به حداقل رساندن هزینه تهیه انرژی کل، با استفاده از پیش بینی سرعت باد به عنوان ورودی و با در نظر گرفتن حد بالا و پایین نیروی باد برای مدل سازی عدم قطعیت آن، ارائه شده است. و همچنین، ابزار شبیه‌سازی ریاضی به منظور مدل

^۱ Computational Fluid Dynamic

^۲ Real-Time

^۳ Blast Furnace

^۴ Arc-Impedance

^۵ Arc-Current-Controlled

^۶ Perlite

سازی میزان جریان آنتالپی گازهای غیرفعال در یک کوره قوس الکتریکی، ارائه شده است [۱۲]. در [۱۳]، یک مدل EAF برای مطالعه عملکرد یک کوره قوس الکتریکی ارائه شده است.

از طرفی دیگر، مدل‌های دو بعدی نسبت به مدل‌های سه بعدی حجم محاسبات کمتری دارند، اما دقت آن‌ها پایین‌تر است. مدل‌های دو بعدی انتقال حرارت برای مطالعه فرآیند انتقال حرارت در یک کوره ذوب آهن در [۱۴ و ۱۵] مورد استفاده قرار گرفته است. با استفاده از شبیه‌سازی یک لوله دمنده، مدل انتقال حرارت دو بعدی یک محفظه احتراق ذغال سنگ پودر شده^۱ در [۱۶] به دست آمده است. یک مدل دو بعدی برای ارزیابی الگوی انتقال حرارت برای کاهش مصرف انرژی در [۱۷] ارائه شده است. در [۱۸] یک مدل دو بعدی عددی انتقال حرارت برای یک کوره بازگرمایش فولاد^۲ ارائه شده است. در [۱۹] یک مقایسه بین یک مدل دو بعدی و سه بعدی انتقال حرارت به منظور شبیه‌سازی عملکرد گرمایی کوره بازگرمایش آهن انجام شده است. یک مدل دینامیکی $2D^+$ برای یک کوره پخت آند افقی صنعتی^۳ در [۲۰] ارائه شده است. همچنین، یک مدل ریاضی برای یک کوره ذوب آهن، برای پیش‌بینی مسیر منحنی سقوط و اعتبارسنجی آن با داده‌های تجربی به دست آمده، ارائه شده است [۲۱].

پیشتر بیان کردیم که مدل‌های دو بعدی و سه بعدی مشکلاتی را به همراه دارند. برای حل این مشکلات مدل‌های صفر-یک بعدی ارائه شده‌اند. در [۱] یک مدل ریاضی برای یک کوره با هندسه مکعبی با استفاده از معادلات موازنه انرژی ارائه شده است. انرژی مصرفی در هر شعله در دماهای مختلف با در نظر گرفتن عملکرد کوره، خصوصیات بار و خصوصیات فیزیکی کوره محاسبه می‌شوند. یک مدل صفر-یک بعدی ترمودینامیکی در [۴] ارائه شده است که می‌تواند در اندازه‌گیری اثر احتراق غنی شده با اکسیژن در فرآیند انتقال حرارت مورد استفاده قرار گیرد. مدل‌های به شکل فضای حالت [۱۸ و ۲۲ و ۲۳] برای یک

¹ Pulverized Coal

² Steel Reheating Furnace

³ Industrial Horizontal Anode Baking Furnace

کوره بازگرم^۱، کوره سختکاری شیشه^۲ و مدل‌های تابع تبدیل در [۲۴-۲۶]، به طور معمول برای طراحی کنترل‌کننده دما براساس مدل استفاده می‌شوند.

غالب مدل‌های ارائه شده برای بررسی انتقال حرارت در کوره‌ها و آون‌ها به صورت معادلات دیفرانسیل پاره‌ای^۳ (PDE) هستند و با روش‌های CFD حل شده‌اند، که چنین مدل‌هایی برای طراحی کنترل‌کننده مناسب نمی‌باشند. مدل‌های ارائه شده به شکل تابع تبدیل، به دلیل ماهیت خطی بودن فقط برای طراحی کنترل‌کننده حول نقطه کار مناسب هستند.

کنترل دمای آون، از آن جهت حائز اهمیت است که می‌تواند علاوه بر کمینه کردن زمان برخاست^۴، در مصرف انرژی صرفه جویی نماید. تاکنون، تلاش‌های زیادی برای پیاده سازی کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرال گیر-مشتق گیر^۵ (PID)، کنترل‌کننده فازی^۶ و همچنین چند کنترل‌کننده غیرخطی انجام شده است.

در [۲۵]، یک کنترل‌کننده PID بهینه برای کنترل دمای یک کوره برقی به منظور کاهش زمان برخاست، کاهش خطا و صرفه جویی در مصرف انرژی، طراحی شده است. در [۲۶]، با استفاده از الگوریتم نلد^۷ یک کنترل‌کننده PID برای یک کوره برقی بهینه شده است. یک سیستم کنترلی بهینه برای کنترل دما با استفاده از میکروکنترلر C51 در [۲۷] طراحی و پیاده سازی شده است. همچنین یک کنترل‌کننده PID برای کنترل کردن دما در [۲۸] ارائه شده است. در تلاشی دیگر، یک کنترل‌کننده مقاوم مرتبه کسری^۸ PID برای یک کوره خورشیدی در [۲۹] ارائه شده که در این روش عملکرد یک کوره خورشیدی توسط یک کنترل‌کننده مقاوم مرتبه کسری مشتقی-انتگرال گیر-تناسبی کنترل شده است. در [۳۰] عملکرد یک کوره برقی توسط یک کنترل‌کننده PID کنترل شده و همچنین این

¹ Reheating Furnace

² Tempered Glass Furnace

³ Partial Differential Equations

⁴ Rise Time

⁵ Proportional-Integral-Derivative

⁶ Fuzzy Controller

⁷ Nelder Mead

⁸ Fractional Robust

کنترل‌کننده توسط الگوریتم بهینه‌سازی گرده افشانی گل^۱، بهینه‌سازی شده است. در [۳۱]، یک سیستم کنترلی برای یک کوره خلاء، با استفاده از الگوریتم هوشمند اسمیت^۲ طراحی شده و همچنین در [۳۲] یک کنترل‌کننده PID، بر اساس الگوریتم ژنتیک و یک کنترل‌کننده IMC بر اساس الگوریتم ژنتیک برای کنترل دمای یک مبدل گرما^۳ طراحی شده است و بر اساس نتایج، کنترل‌کننده IMC عملکرد مطلوب‌تری ارائه داده است. در [۳۳]، یک کنترل‌کننده پیش بین بر اساس مدل، برای کنترل دمای راکتور پیاده سازی شده است. در [۳۴]، از یک الگوریتم فازی خود آموز^۴ برای بهینه کردن پارامترهای کنترل‌کننده PID استفاده شده است. همچنین برای کنترل دمای کوره‌ها از کنترل‌کننده فازی استفاده شده است [۳۵-۳۸]. در این پژوهش، با استفاده از معادلات فضای حالت آون، یک کنترل‌کننده PID و یک کنترل‌کننده فازی طراحی شده و هر کدام از آنها توسط الگوریتم‌های فراابتکاری بهینه‌سازی شده است.

در فصل ۲، ابتدا به توصیف سیستم پرداخته شده و یک مدل غیرخطی به صورت معادلات دیفرانسیل معمولی^۵ (ODE) با استفاده از قوانین انتقال حرارت ارائه شده است. این مدل به صورت فضای حالت ارائه شده تا برای طراحی کنترل‌کننده مناسب باشد. سپس برای انتقال حرارت آون با محیط اطراف، مفاهیم اعداد بیو^۶ و ناسلت^۷ بیان شده‌اند. در قسمت بعد، ضریب شکل^۸ برای تبادل انتقال حرارت تشعشع بین صفحات عمود بر هم، صفحات موازی و ضریب شکل بین یک نقطه و یک صفحه ارائه شده است. در بخش بعدی، با شبیه‌سازی مونت کارلو^۹، حساسیت مدل با پارامترهای ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، ضریب انتقال حرارت رسانش و ضریب گسیل بررسی شده است. سپس مکانیزم عملکرد سیستم و

¹ Flower Pollination Algorithm

² Smith Intelligence Algorithm

³ Heat Exchanger

⁴ Fuzzy Self-Learning

⁵ Ordinary Differential Equations

⁶ Biot Number

⁷ Nusselt Number

⁸ Shape Factor

⁹ Monte Carlo

PWM¹ توضیح داده شده و برای اعتبارسنجی مدل ریاضی یازده چرخه گرم و سرد شدن بر روی آون پیاده سازی شده و مدل ریاضی با آن تطابق داده شده است. در قسمت بعد، تابع تبدیل سیستم در سه نقطه کاری متفاوت به دست آمده و با بررسی صفر و قطب‌های آن‌ها میزان غیرخطی بودن سیستم مشخص شده و در پایان، یک مدل ARX و یک مدل ARMAX با استفاده از داده‌های تجربی به دست آمده است.

در فصل ۳، براساس مدل فضای حالتی که پیشتر اشاره شد، ابتدا یک کنترل‌کننده PID طراحی شده و بهره‌های آن با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری ژنتیک (GA)^۲، علف هرز مهاجم (IWO)^۳، کرم شب تاب (FA)^۴ و رقابت استعماری (ICA)^۵ بهینه‌سازی شده‌اند. سپس یک کنترل‌کننده فازی طراحی شده و بهره‌های ورودی و خروجی، قوانین فازی و توابع عضویت ورودی و خروجی آن با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک، جستجوی هارمونی (HS)^۶، فاخته (COA)^۷ و چرخه آب (WCA)^۸ بهینه شده‌اند. در تمام الگوریتم‌های بهینه‌سازی مقدار خطا با استفاده از معیارهای انتگرال مربعات خطا (ISE)^۹، انتگرال زمان در مربعات خطا (ITSE)^{۱۰}، انتگرال قدر مطلق خطا (IAE)^{۱۱} و انتگرال زمان در قدر مطلق خطا (ITAE)^{۱۲} اندازه گیری شده است. و همچنین، نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده و نتایج پیاده سازی کنترل‌کننده‌های فازی و PID آورده و با هم مقایسه شده‌اند.

¹ Pulse-width Modulation

² Genetic Algorithm

³ Invasive Weed Optimization

⁴ Firefly Algorithm

⁵ Imperialist Competitive Algorithm

⁶ Harmony Search

⁷ Cuckoo Optimization Algorithm

⁸ Water Cycle Algorithm

⁹ Integral of Square Error

¹⁰ Integral of Time Square Error

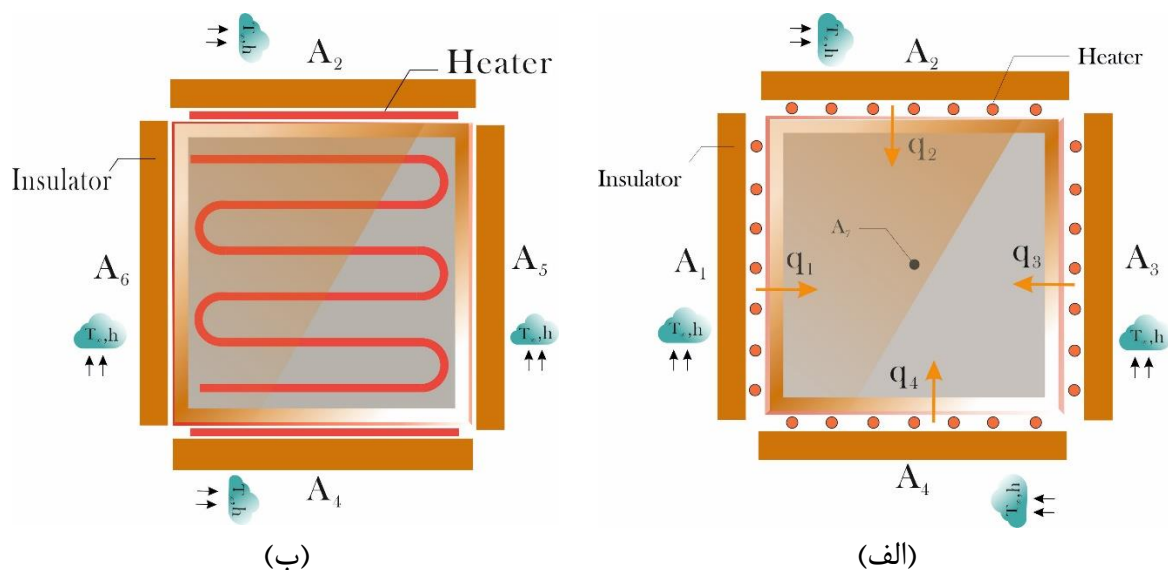
¹¹ Integral of Absolute Error

¹² Integral of Time Absolute Error

فصل ۲: مدل سازی

۲-۱ توصیف سیستم

هندسه آون در شکل ۲-۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، این آون دارای هندسه مکعبی شکل بوده و جنس صفحات آن استیل ضد زنگ (AISI 304) می‌باشد. صفحات این آون به ترتیب با A_1 - A_6 نامگذاری شده‌اند. همانطور که پیشتر اشاره شد، این آون در شرایط خلاء کار می‌کند. بنابراین انتقال حرارت فقط در حالت تشعشع انجام می‌شود. المتهای حرارتی این آون در صفحات ۱ تا ۴ قرار دارند. بنابراین شار حرارتی فقط از طریق صفحات ۱ تا ۴ به فضای داخل آون وارد خواهند شد. شار حرارتی که از طریق صفحات ۱ تا ۴ وارد می‌شود، به ترتیب با q_1 ، q_2 ، q_3 و q_4 نشان داده شده است (شکل ۲-۱ الف). هر کدام از صفحات آون عایق بندی شده است، بنابراین انتقال گرما از فضای داخل آون به محیط اطراف، ابتدا از طریق رسانش و سپس از طریق جابه‌جایی به محیط اطراف منتقل می‌شود.



شکل ۲-۱: هندسه سیستم و موقعیت قرارگیری گرمکن‌ها و سنسور دما. (الف): نمای روبه‌رو، (ب): نمای جانبی

برای بررسی تغییرات دمای درون آون، یک نقطه کروی شکل در وسط آن در نظر گرفته شده است (شکل ۲-۱ ب) که در واقع این نقطه بیانگر سنسور اندازه‌گیری دما می‌باشد که در اینجا ما از سنسور PT 100 استفاده کرده‌ایم. مساحت این نقطه کروی شکل با A_7 نشان داده شده است.

در شکل ۲-۲ آون خلاء مورد نظر نشان داده شده است. این آون خلاء با حجم ۴۰ لیتر توسط شرکت دانش بنیان علم گستران صنعت آرتا ساخته شده است. فضای داخل این آون، توسط پمپ خلاء و از طریق یک درگاه KF16 خلاء می‌شود. این آون از چهار جهت توسط المنت میله‌ای که در شکل ۳-۲(الف)، نشان داده شده است گرم می‌شود.

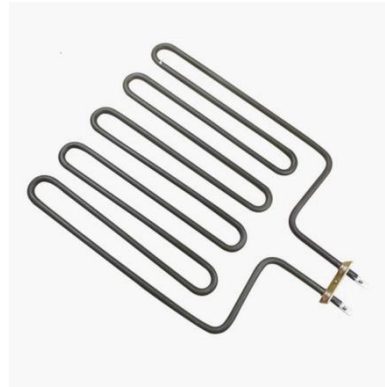


شکل ۲-۲: یک آون خلاء با هندسه مکعبی

دمای داخل آون خلاء توسط یک سنسور PT 100 اندازه گیری می‌شود (شکل ۳-۲ب). همانطور که از اسم این سنسور بر می‌آید، جنس آن از پلاتین (نماد شیمیایی پلاتین PT می‌باشد) بوده و عدد ۱۰۰ بیانگر مقاومت الکتریکی آن در دمای صفر درجه سانتیگراد بر حسب اهم است. این سنسور در سه نوع دو سییم، سه سییم و چهار سییم می‌باشد و می‌تواند تا دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد را اندازه گیری نماید. دقت این سنسورها تا یک دهم درجه می‌باشد و با استفاده از یک اتصال خلاء، دمای داخل محفظه را اندازه گیری می‌کند.



(ب)



(الف)

شکل ۲-۳: (الف): المنت میله‌ای، (ب): سنسور PT 100

دیواره‌های این آون با پشم سنگ و برد سرامیکی که در شکل ۲-۴ نشان شده است، عایق شده‌اند.



(ب)

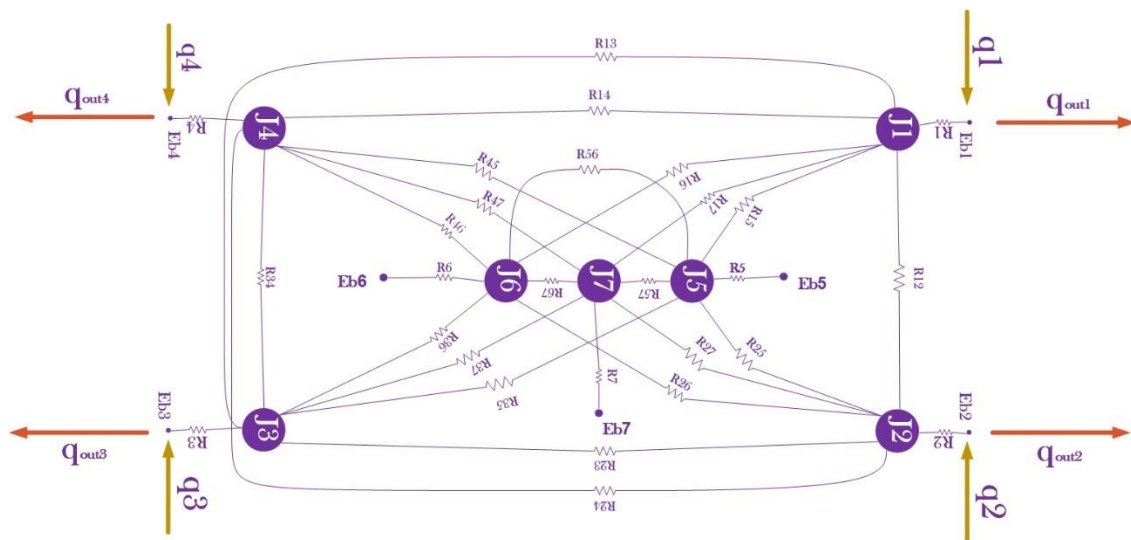


(الف)

شکل ۲-۴: (الف): پشم سنگ، (ب): برد سرامیکی

۲-۲ مدل فضای حالت

در شکل ۲-۵ مدار الکتریکی معادل سیستم نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، ۷ گره وجود دارد که نشان‌دهنده صفحات آون و نقطه کروی در وسط آون (شکل ۲-۱ الف) می‌باشد که به ترتیب با J_1 تا J_7 نشان داده شده است.



شکل ۵-۲: مدار الکتریکی معادل سیستم انتقال حرارتی آون

شار حرارتی در این مدار به عنوان جریان در نظر گرفته می‌شود. با توجه به قانون جریان کیرشهف^۱ (KCL)، جریان یا بار الکتریکی وارد شده به یک گره برابر با بار یا جریانی است که از آن خارج می‌شود. به عبارت دیگر، مجموع جبری تمام جریان‌های وارد شده به یک گره باید برابر صفر باشد. بنابراین با در نظر گرفتن این موضوع می‌توان شار حرارتی که به هر گره وارد و از آن خارج می‌شود را به صورت زیر نوشت:

$$\frac{E_{bi} - J_i}{R_i} = \sum_{j=1}^N \frac{J_i - J_j}{R_{ij}}, \quad i, j = 1 \dots 7 \quad (2-1)$$

که در آن E_{bi} ، توان گسیل سطح A_i ، J_i شار تشعشع خروجی از سطح A_i و J_j شار تشعشع ورودی به سطح j می‌باشد. و همچنین R_i مقاومت سطح A_i و R_{ij} مقاومت بین سطح i و سطح j می‌باشد. توان گسیل سطح A_i را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد.

$$E_{bi} = \sigma T_i^4 \quad (2-2)$$

مقاومت سطح i به صورت زیر نوشته می‌شود:

¹ Kirchhoff Current Law

$$R_i = \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i A_i}, \quad i = 1 \dots 7 \quad (2-3)$$

و همچنین مقاومت بین هر سطح را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد

$$R_{ij} = (A_i F_{ij})^{-1}, \quad i, j = 1 \dots 7 \quad (2-4)$$

که در آن ε_i گسیلمندی سطح i ، A_i مساحت سطح i و F_{ij} ضریب شکل بین سطوح i و j می‌باشد. برای هر گره می‌توان قانون ولتاژ کیرشهف^۱ (KVL) را نوشت. در واقع، تبادل انرژی در هر گره با توجه به رابطه زیر بیان می‌شود.

$$q_i - \frac{J_i - \sigma T_i^4}{R_i} - \frac{T_i - T_\infty}{R_{cond} + R_{tconv}} = m_i C_p \frac{dT_i}{dt} \quad i = 1, \dots, 6 \quad (2-5)$$

در این رابطه q_i شار حرارتی تولید شده توسط گرمکن‌ها در سطح i ، σ ثابت استفان بولتزمن^۲، T_i دمای صفحه i ، m_i جرم صفحه i ، C_p ظرفیت گرمایی، T_∞ دمای محیط، R_{cond} مقاومت گرمایی رسانش و R_{tconv} مقاومت گرمایی جابه‌جایی می‌باشد. برای نقطه کروی شکل که پیشتر به آن اشاره کردیم، تبادل انرژی به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\frac{J_7 - \sigma T_7^4}{R_7} = m_7 C_p \frac{dT_7}{dt} \quad (2-6)$$

و R_{tconv} به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$R_{t,conv} = \frac{1}{h A_i}, i = 1 \dots 6 \quad (2-7)$$

که در آن h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بوده و همچنین R_{cond} برابر است با:

$$R_{cond} = \frac{\Delta x}{k A_i}, i = 1 \dots 6 \quad (2-8)$$

که در آن Δx ضخامت عایق‌ها و k ضریب انتقال حرارت رسانش می‌باشد.

¹ Kirchhoff Voltage Law

² Stefan Boltzmann

۱-۲-۲ روش ظرفیت فشرده

وقتی یک قطعه داغ در یک مایع داغ^۱ قرار می‌گیرد، بر اثر انتقال گرمای جابه‌جایی در سطح تماس قطعه با مایع، دمای آن کاهش می‌یابد و به دمای مایع می‌رسد. در این فرآیند گذرا، فرض می‌شود شیب دما در جسم ناچیز است. به عبارت دیگر، دمای قطعه در هر لحظه به صورت یکنواخت فرض می‌شود [۳۹].

روش ظرفیت فشرده، ساده‌ترین و مناسب‌ترین راه برای حل مسائل رسانش گذراست. بنابراین شناخت شرایط کاربرد آن اهمیت دارد. برای تعیین یک معیار مناسب، انتقال گرمای رسانشی در یک دیوار مسطح (شکل ۶-۲) را در نظر می‌گیریم. یکی از سطوح این دیوار در دمای $T_{s,1}$ است. سطح دیگر، با دمای $T_{s,2}$ ، در مجاورت یک سیال با دمای T_{∞} قرار دارد ($T_{\infty} < T_{s,2} < T_{s,1}$). در شرایط پایا، موازنه انرژی برای این دیوار به صورت زیر درمی‌آید.

$$\frac{kA}{L}(T_{s,1} - T_{s,2}) = hA(T_{s,2} - T_{\infty}) \quad (۲-۹)$$

در رابطه (۲-۹)، k ضریب رسانش دیوار است. از این رابطه نتیجه می‌شود:

$$\frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{T_{s,2} - T_{\infty}} = \frac{(L/kA)}{(1/hA)} = \frac{R_{cond}}{R_{conv}} = \frac{hL_c}{k_s} = Bi \quad (۲-۱۰)$$

پارامتر $\frac{hL}{k_s}$ را عدد بیو می‌نامند که در آن h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی سیال، k_s ضریب انتقال حرارت رسانشی در بدنه جسم و L_c طول مشخصه می‌باشد. L_c به صورت نسبت حجم به مساحت تعریف می‌شود.

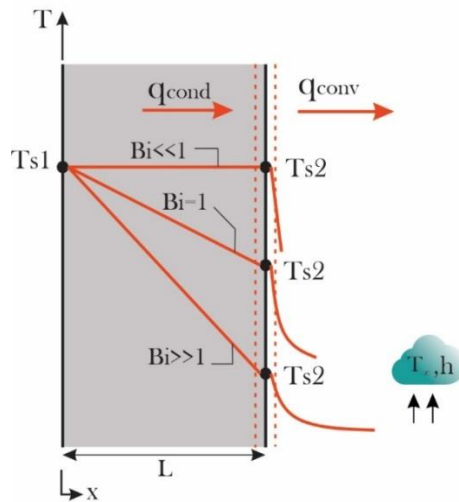
$$L_c = \frac{V}{A} \quad (۲-۱۱)$$

عدد بیو، عددی بی بعد است که ارتباط مقاومت به انتقال حرارت داخلی و سطح بدنه را نشان می‌دهد. عدد بیو را می‌توان به صورت مقاومت جابه‌جایی سیال به مقاومت رسانشی بدنه تعریف کرد. در مسائل انتقال گرمای رسانشی که شامل سطح هستند، عدد بیو نقش مهمی دارد. به عنوان مثال در حالتی که

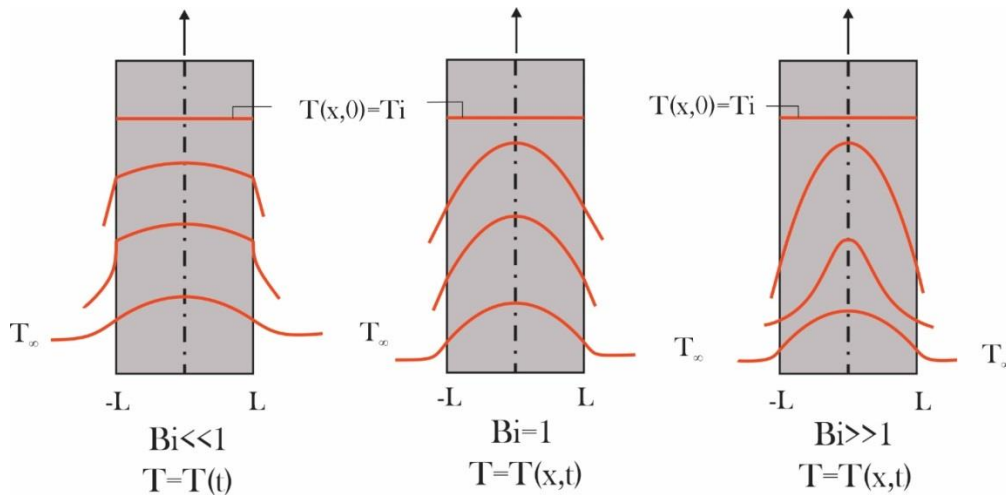
¹ Hot Liquid

$Bi < 1$ است، توزیع دمای جسم در فرآیند گذرا تقریباً به صورت یکنواخت است زیرا، در این حالت، مقاومت رسانشی جسم بسیار کمتر از مقاومت جابه‌جایی در لایه مرزی سیال است.

برای بررسی نقش عدد بیو در رسانش گذرا، دیوار مسطح در شکل ۶-۲ را در نظر می‌گیریم. ابتدا، این دیوار در دمای یکنواخت T_i است. ناگهان، طرفین آن با دو سیال (در شرایط T_∞ و h) تماس می‌گیرند. با فرض $T_\infty < T_i$ ، دیوار به صورت جابه‌جایی سرد می‌شود. انتقال گرما در دیوار را به صورت یک بعدی و در جهت x در نظر می‌گیریم. می‌خواهیم تابع تغییرات دمای دیوار برحسب مکان و زمان را بیابیم. این تغییرات تابع عدد بیو است. سه حالت در شکل ۷-۲ نشان داده شده‌اند: (۱) $Bi < 1$. در این حالت، شیب دما در دیوار ناچیز است و $T(x, t) \approx T(t)$. یعنی دمای جسم تقریباً به صورت یکنواخت تا T_∞ کاهش می‌یابد. (۲) عدد بیو مقدار متوسطی دارد. در این حالت، شیب دما در دیوار چشمگیر است و $T = T(x, t)$. (۳) $Bi > 1$. در این حالت، اختلاف دما در عرض دیوار بسیار بیشتر از اختلاف دمای بین سطح دیوار و سیال است.



شکل ۶-۲: تاثیر عدد بیو بر توزیع دمای پایای دیوار مسطحی که سطح آن در شرایط جابه‌جایی است.



شکل ۷-۲: توزیع دمای گذار برای چند عدد بیوی مختلف در دیوار مسطحی که به صورت متقارن سرد می‌شود.

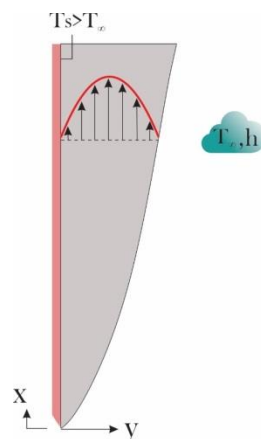
۲-۲-۲ جابه‌جایی آزاد

انتقال حرارت آن با محیط اطراف از نوع جابه‌جایی است که این جابه‌جایی از نوع جابه‌جایی آزاد می‌باشد. در جابه‌جایی آزاد، سیال بر اثر نیروی شناوری به جریان درمی‌آید. نیروی شناوری نیز ناشی از

وجود همزمان نیروی حجمی و شیب چگالی در سیال است. نیروی حجمی، متناسب با چگالی و معمولاً به صورت گرانشی است. شیب چگالی معمولاً ناشی از دماست [۳۹].

جابه‌جایی آزاد به دو دسته تقسیم می‌شود: ۱- جابه‌جایی آزاد در حالتی که جریان با هیچ سطحی مقید نمی‌شود، ۲- جابه‌جایی آزاد در حالتی که جریان با یک سطح مقید می‌شود. در این سیستم جابه‌جایی آزاد از نوع دوم می‌باشد.

برای بررسی جابه‌جایی آزاد برای جریان‌هایی که با یک سطح مقید شده‌اند، شکل ۸-۲ را در نظر می‌گیریم. طبق این شکل، یک صفحه با دمای T_s در یک سیال وسیع و ساکن، با دمای T_∞ غوطه‌ور است. چون $T_s > T_\infty$ ، چگالی سیال نزدیک صفحه کم‌تر از چگالی سیالی است که در فاصله دور از صفحه قرار دارد. در نتیجه، نیروی شناوری در سیال به‌وجود می‌آید که آن نیز یک لایه مرزی جابه‌جایی آزاد را ایجاد می‌کند. در این لایه مرزی، سیال گرم به صورت عمودی بالا می‌رود و سیال ناحیه ساکن را همراه می‌برد. در حالت $T_s < T_\infty$ نیز لایه مرزی جابه‌جایی آزاد به‌وجود می‌آید، اما سیال به طرف پایین جریان می‌یابد.



شکل ۸-۲: تشکیل لایه مرزی روی یک صفحه گرم عمودی

ضریب جابه‌جایی متوسط برای یک صفحه به طول L چنین است:

$$\bar{h} = \frac{1}{L} \int_0^L h dx \quad (۲-۱۲)$$

پس از محاسبه انتگرال، نتیجه می‌شود:

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}L}{k_f} \quad (2-13)$$

که به آن عدد ناسلت گفته می‌شود. عدد ناسلت را می‌توان به صورت نسبت انتقال حرارت جابه‌جایی سیال به انتقال حرارت رسانشی سیال تعریف کرد. رابطه دیگر عدد ناسلت به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$\overline{Nu}_L = C Ra_L^n \quad (2-14)$$

که در آن:

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \quad (2-15)$$

که به آن عدد رایلی گفته می‌شود. در رابطه بالا β ضریب انبساط، g شتاب گرانش، ν ویسکوزیته سینماتیکی و α پخشندگی گرمایی می‌باشد. رابطه (2-14) برای صفحات عمودی می‌باشد. اگر صفحه به صورت افقی باشد، نیروی شناوری بر سطح آن عمود خواهد بود. انتقال گرما و نقش جریان در صفحات افقی نیز شدیداً به عوامل زیر بستگی دارد:

(۱) صفحه گرم‌تر از محیط باشد یا سردتر از آن.

(۲) صفحه به طرف بالا باشد، یا به طرف پایین.

در یک صفحه سرد رو به بالا سیال می‌خواهد به طرف پایین حرکت کند و در یک صفحه گرم رو به پایین سیال می‌خواهد به طرف بالا حرکت کند. اما صفحه مانع این حرکت‌ها می‌شود. در نتیجه، سیال قبل از این که از لبه‌های صفحه به طرف پایین یا بالا حرکت کند، به صورت افقی جریان می‌یابد. از این رو، انتقال گرما بین صفحه و محیط به خوبی روی نمی‌دهد. در مقابل، برای یک صفحه سرد رو به پایین، سیال سرد رو به پایین جریان می‌یابد و جایگزین سیال گرمی می‌شود که در محیط به طرف بالا حرکت می‌کند. برای یک صفحه گرم رو به بالا، سیال گرم به طرف بالا جریان می‌یابد و جایگزین سیال سردی می‌شود که در محیط به طرف پایین حرکت می‌کند. بنابراین، در هر دو حالت، انتقال گرما بین صفحه و محیط به خوبی روی می‌دهد.

مک آدامز روابطی را برای صفحات افقی ارائه داده است [۴۰]. در مراجع [۴۱ و ۴۲]، به جای طول مشخصه موجود در روابط مک آدامز، از طول مشخصه زیر استفاده شده است:

$$L \equiv \frac{A_s}{P} \quad (2-16)$$

که در آن، A_s و P ، به ترتیب، مساحت و محیط صفحه‌اند. به این ترتیب، روابط مک آدامز دقیق‌تر شده‌اند و نتایج زیر به دست آمده‌اند:

برای سطح بالایی صفحه گرم، یا سطح پایینی صفحه سرد:

$$\overline{Nu}_L = 0.54 Ra_L^{\frac{1}{4}} \quad (2-17)$$

$$\overline{Nu}_L = 0.15 Ra_L^{\frac{1}{3}} \quad (2-18)$$

برای سطح پایینی صفحه گرم، یا سطح بالایی صفحه سرد:

$$\overline{Nu}_L = 0.27 Ra_L^{\frac{1}{4}} \quad (2-19)$$

بنابراین با داشتن عدد ناسلت می‌توان ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را به صورت زیر نوشت.

$$h = \frac{k}{L} \overline{Nu}_L \quad (2-20)$$

همانطور که بیان شد پارامتر k با استفاده از عدد بیو محاسبه و پارامتر h با استفاده از عدد ناسلت و ریلی محاسبه می‌شود. با توجه به شکل رفتاری پارامتر ε [۳۹]، می‌توان این پارامتر را به صورت تابعی از دما نوشت.

با بازنویسی روابط (۲-۴) و (۲-۵) می‌توان نوشت:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{q_i}{m_i C_p} - \frac{J_i - \sigma T_i^4}{R_i m_i C_p} - \frac{T_i - T_\infty}{m_i C_p (R_{cond} + R_{tconv})} \quad (2-21)$$

$$\frac{dT_7}{dt} = \frac{J_7 - \sigma T_7^4}{R_7 m_7 C_p} \quad (2-22)$$

با توجه به رابطه (۲-۱)، می‌توان ماتریس J را به صورت زیر نوشت.

$$\begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \\ J_4 \\ J_5 \\ J_6 \\ J_7 \end{bmatrix} = \sigma \begin{bmatrix} M_{11} & \cdots & M_{17} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{71} & \cdots & M_{77} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_7 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} T_1^4 \\ T_2^4 \\ T_3^4 \\ T_4^4 \\ T_5^4 \\ T_6^4 \\ T_7^4 \end{bmatrix} \quad (2-23)$$

که در آن درآیه‌های قطر اصلی ماتریس M برابر است با:

$$\begin{cases} M_{11} = \sum_{j=2}^7 \frac{1}{R_{1j}} + \frac{1}{R_1} \\ M_{ii} = \sum_{j=1}^7 \frac{1}{R_{ij}} + \sum_{j=1}^{i-1} \frac{1}{R_{ij}} + \frac{1}{R_i} & i, j = 2, 3, \dots, 6 \\ M_{77} = \sum_{j=1}^6 \frac{1}{R_{7j}} + \frac{1}{R_7} \end{cases} \quad (2-24)$$

و درآیه‌های دیگر این ماتریس از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$M_{ij} = -\frac{1}{R_{ij}} \quad i, j = 1, 2, \dots, 7, \quad i \neq j \quad (2-25)$$

با ترکیب روابط (2-21) و (2-22) و (2-23)، مدل فضای حالت سیستم به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\dot{\Theta} = \frac{1}{C_p} \Phi^{-1} \Omega - \frac{\sigma}{C_p} \Phi^{-1} \Psi^{-1} (M^{-1} \Psi^{-1} + I) \Theta^4 - [\gamma \ 0] \Phi^{-1} (\Theta - \Theta_{\infty}) \quad (2-26)$$

$$Y = C \Theta$$

در رابطه بالا Y خروجی سیستم و:

$$\begin{aligned} \Theta &= [T_1 \ T_2 \ T_3 \ T_4 \ T_5 \ T_6 \ T_7]^T \\ \dot{\Theta} &= [\dot{T}_1 \ \dot{T}_2 \ \dot{T}_3 \ \dot{T}_4 \ \dot{T}_5 \ \dot{T}_6 \ \dot{T}_7]^T \\ \Theta^4 &= [T_1^4 \ T_2^4 \ T_3^4 \ T_4^4 \ T_5^4 \ T_6^4 \ T_7^4]^T \\ \Theta_{\infty} &= [T_{\infty} \ T_{\infty} \ T_{\infty} \ T_{\infty} \ T_{\infty} \ T_{\infty} \ T_{\infty}]^T \\ \Phi &= \text{diag}(m_i), i = 1..7 \\ \Psi &= \text{diag}(R_i), i = 1..7 \\ \Omega &= [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ C &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1] \end{aligned}$$

$$Y = \frac{1}{C_p(R_{cond} + R_{tconv})} I_{6 \times 6}$$

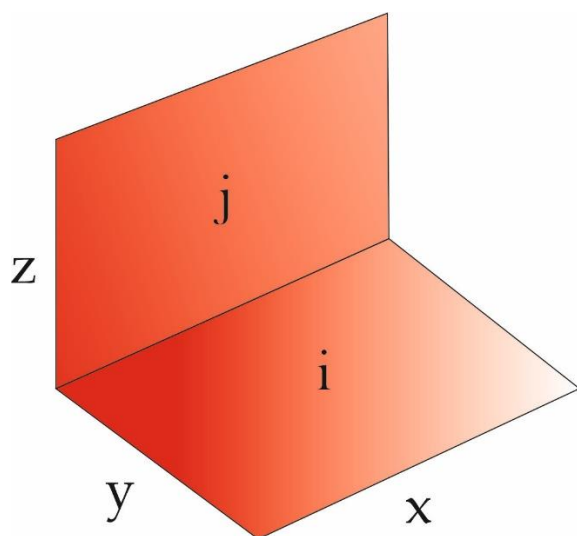
۳-۲-۲ ضریب شکل

برای به دست آوردن درآیه‌های ماتریس M ، ضریب شکل‌ها باید محاسبه شوند. کسری از تشعشع خروجی از سطح i که توسط سطح j دریافت می‌شود را ضریب شکل می‌گویند. ضریب شکل برای صفحه‌های موازی (شکل ۲-۹ الف) از رابطه (۲-۲۷) به دست می‌آید [۳۹].

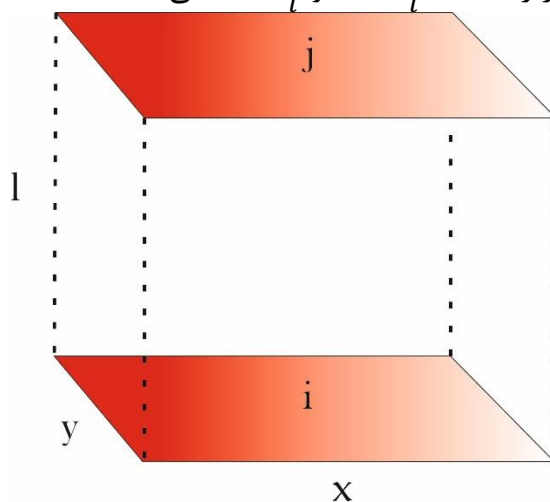
$$F_{ij} = \frac{2}{\pi XY} \left(\ln \left[\frac{(1 - X^2)(1 + Y^2)}{1 + X^2 + Y^2} \right]^{\frac{1}{2}} + X(1 + Y^2)^{\frac{1}{2}} \tan^{-1} \frac{X}{(1 + Y^2)^{\frac{1}{2}}} \dots \right. \quad (2-27)$$

$$\left. + Y(1 + X^2)^{\frac{1}{2}} \tan^{-1} \frac{Y}{(1 + X^2)^{\frac{1}{2}}} - X \tan^{-1} X - Y \tan^{-1} Y \right)$$

در رابطه بالا $X = \frac{x}{l}$ و $Y = \frac{y}{l}$ می‌باشد.



(ب)



(الف)

شکل ۲-۹: هندسه صفحات عمودی و افقی برای محاسبه ضریب شکل

برای صفحات عمود بر هم (شکل ۲-۹ ب) ضریب شکل را می‌توان از رابطه (۲-۲۸) حساب کرد [۳۹].

$$F_{ij} = \frac{1}{\pi W} \left(W \tan^{-1} \frac{1}{W} + H \tan^{-1} \frac{1}{H} - (H^2 + W^2)^{\frac{1}{2}} \tan^{-1} \frac{1}{(H^2 + W^2)^{\frac{1}{2}}} \right. \quad (2-28)$$

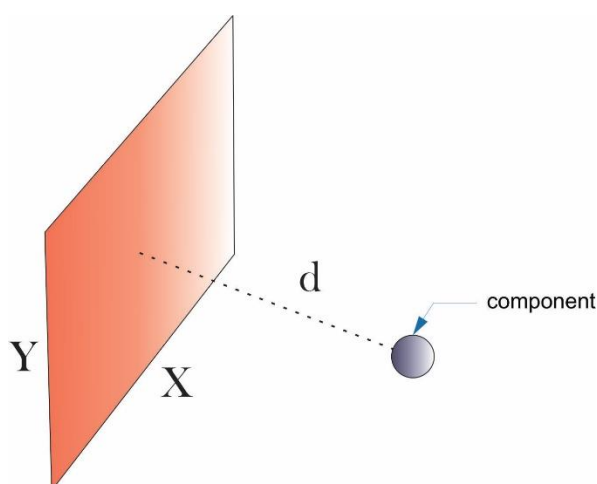
$$\left. + \frac{1}{4} \ln \left(\frac{(1 + W^2)(1 + H^2)}{1 + W^2 + H^2} \left[\frac{W^2(1 + W^2 + H^2)}{(1 + W^2)(W^2 + H^2)} \right]^{W^2} \times \left[\frac{H^2(1 + H^2 + W^2)}{(1 + H^2)(H^2 + W^2)} \right]^{H^2} \right) \right)$$

در رابطه بالا $H = \frac{z}{x}$ و $W = \frac{y}{x}$ می‌باشد.

و برای محاسبه ضریب شکل یک صفحه و یک نقطه (شکل ۱۰-۲) می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد [۳۹].

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad (2-29)$$

در این رابطه R فاصله بین صفحه و نقطه مورد نظر، θ_i و θ_j به ترتیب زاویه بین خط R و خط عمود بر صفحه و نقطه می‌باشد.



شکل ۱۰-۲: هندسه صفحه و یک جسم

۳-۲ آنالیز حساسیت کلی

به منظور بررسی اثر پارامترهای سیستم بر روی خروجی سیستم ارائه شده، از آنالیز حساسیت بهره^۱ گرفته شده است. برای این منظور آنالیز حساسیت کلی با نمونه برداری لاتین هایپرکیوب^۲ و ضرایب

^۱ Sensitivity Analysis

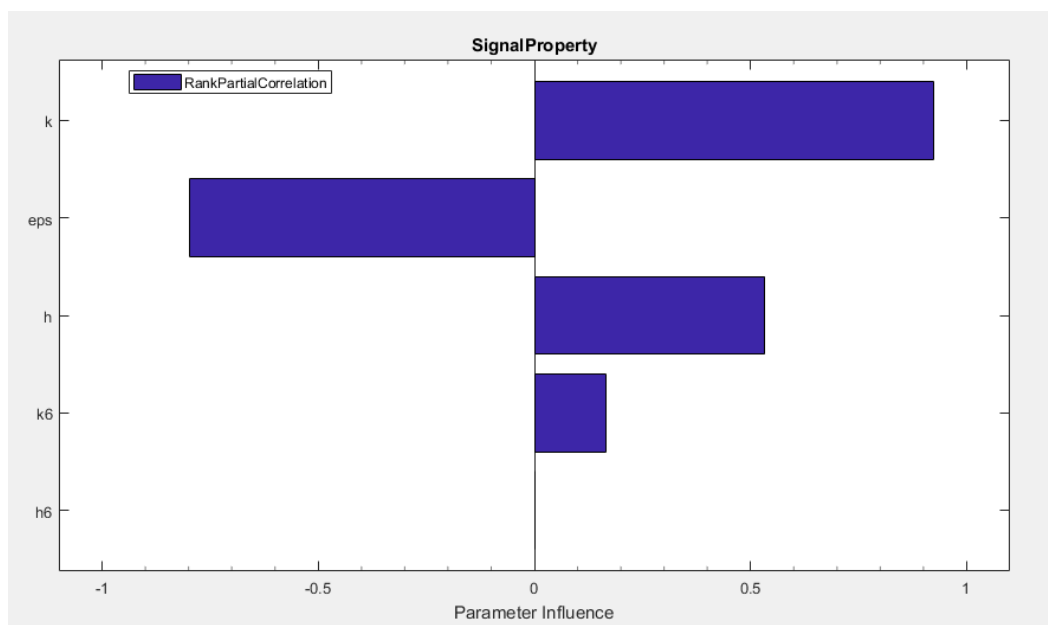
^۲ Latin Hypercube Sampling (LHS)

همبستگی رتبه جزئی^۱ برای رتبه‌بندی پارامترها استفاده شده است که مطمئن‌ترین و موثرترین روش می‌باشد [۴۳].

نمونه‌برداری لاتین هایپرکیوب یک نمونه‌برداری طبقه‌ای مونت کارلو می‌باشد. این روش با نمونه‌برداری مناسب‌تر قادر به رسیدن به صحتی بیشتر از نمونه‌برداری‌های ساده است. در این روش نمونه‌برداری، برای هر متغیر یک تابع چگالی احتمال^۲ در نظر گرفته می‌شود و توزیع نمونه‌ها به N بازه تقسیم می‌شود. N باید از $k+1$ بزرگتر باشد که k تعداد پارامترهای متغیر است. هر یک از این N بازه در هر مرتبه یک بار نمونه‌برداری می‌شوند. با این روش نه تنها تعداد نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌برداری ساده کمتر نمی‌شود بلکه کل بازه را نیز بهتر پوشش می‌دهد. سپس، یک ماتریس که ماتریس LHS نامیده می‌شود تشکیل می‌شود که دارای N ردیف و k ستون است. برای هر ردیف، خروجی مدل استخراج شده و سپس اثر تغییر پارامتر سنجیده خواهد شد [۴۴ و ۴۵]. برای هر پارامتر عددی در بازه (۱ و -۱) اختصاص داده می‌شود که بزرگی آن نشان‌دهنده اثر بیشتر بر خروجی و علامت آن نوع رابطه را نشان می‌دهد. پارامترهای در نظر گرفته شده برای آنالیز حساسیت پنج پارامتر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی (h)، ضریب انتقال حرارت رسانشی (k)، ضریب گسیل (ε)، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی برای صفحه A_6 (h_6) و ضریب انتقال حرارت رسانشی برای صفحه A_6 (k_6) با استفاده از الگوریتم ژنتیک، شناسایی شده‌اند. و همچنین خروجی دمای T_7 در نظر گرفته شده است (شکل ۱۱-۲). همانطور که در شکل ۱۱-۲ نشان داده شده است، k بیشترین تاثیر مثبت و ε بیشترین تاثیر منفی را دارد. همچنین، کمترین اثر مربوط به h_6 می‌باشد.

¹ Partial Rank Correlation Coefficients (PRCC)

² Probability Density Function (PDF)



شکل ۱۱-۲: ضرایب همبستگی رتبه جزئی برای مدل ریاضی آون خلاء

۲-۴ عملکرد سیستم

از آنجایی که برای کنترل دمای آون باید شار گرمای ورودی به فضای داخل آون کنترل شود، بنابراین گرمکن‌های این آون باید ولتاژهای متفاوتی را دریافت کنند تا بتوانند شار حرارتی را تغییر دهند. از طرفی گرمکن‌های میله‌ای فقط با اعمال ولتاژ ۲۲۰ ولت کار می‌کنند. به عبارت دیگر، اگر برای کاهش شار حرارتی که به محفظه آون وارد می‌شود ولتاژ اعمالی به گرمکن‌ها را از ۲۲۰ ولت کمتر کنیم، گرمکن‌ها از کار افتاده و خاموش می‌شوند. برای حل این مشکل، با استفاده از یک رله حالت جامد^۱ (شکل ۱۲-۲) و تولید سیگنال PWM^۲ ولتاژ اعمال شده به گرمکن‌ها و در نتیجه شار حرارتی ورودی به محفظه آون را کنترل می‌کنیم.

^۱ Solid State Relay (SSR)

^۲ Pulse Width Modulation

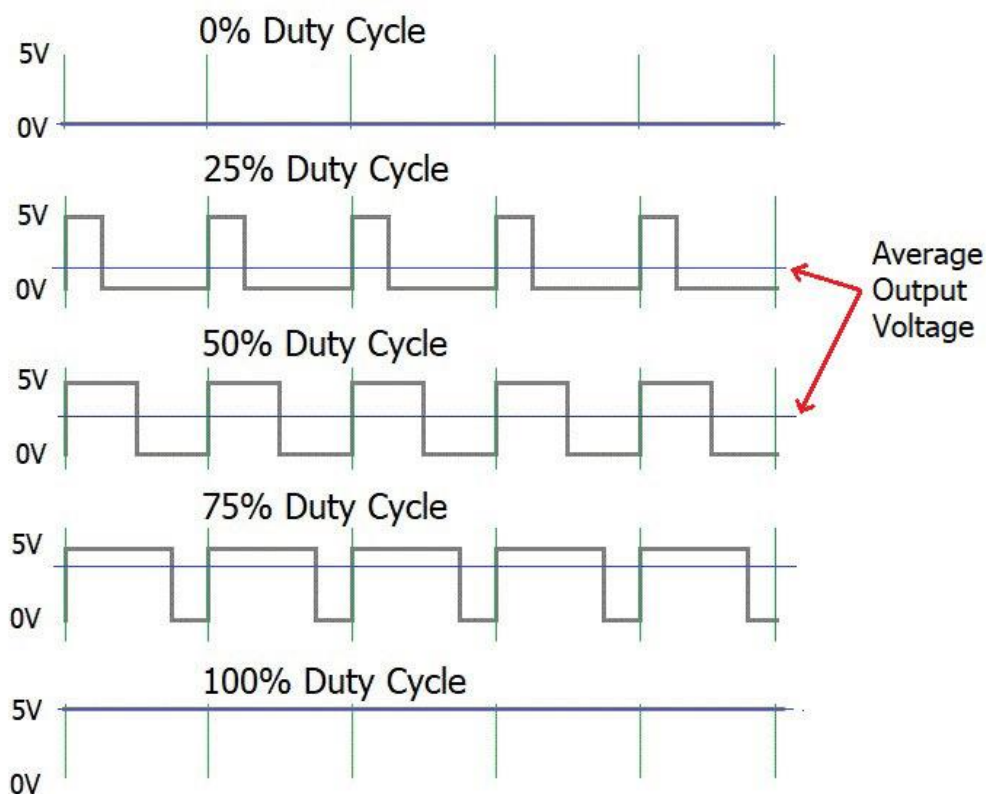


شکل ۱۲-۲: رله حالت جامد

۱-۴-۲ مدولاسیون پهنای باند (PWM)

PWM یا مدولاسیون پهنای باند یک روش بسیار موثر برای به دست آوردن ولتاژ خروجی قابل کنترل و قابل تنظیم از ولتاژ ورودی ثابت و یا متغیر می‌باشد. PWM فقط عرض سیگنال را تغییر داده و فرکانس همیشه ثابت است. به عبارت دیگر PWM، یک اصطلاح برای یک نوع از سیگنال دیجیتال می‌باشد که در مدارهای مختلف برای کنترل استفاده می‌شود. در واقع با کمک PWM می‌توان ولتاژ پایه‌های خروجی میکروکنترلر را تغییر داد و در نتیجه شار حرارتی ورودی به محفظه داخل آون را کنترل کرد. در PWM ولتاژ تولید شده خروجی از صفر تا مقدار ولتاژ مرجع تعیین شده، تغییر می‌کند. در واقع با استفاده از تکنیک PWM می‌توان ولتاژ و جریان را با استفاده از یک ترانزیستور تقویت کنیم و همچنین روی مقدار ولتاژ خروجی نیز کنترل داشته باشیم. به طور مثال، اگر دوره سیگنال^۱ یک موج PWM برابر با ۷۰٪ باشد، این بدان معنی است که در هر سیکل ۷۰٪ درصد ولتاژ، برابر با ولتاژ مرجع و ۳۰٪ ولتاژ برابر با صفر است. در شکل ۱۳-۲ سیگنال PWM با دوره سیگنال‌های متفاوت نشان داده شده است [۴۶].

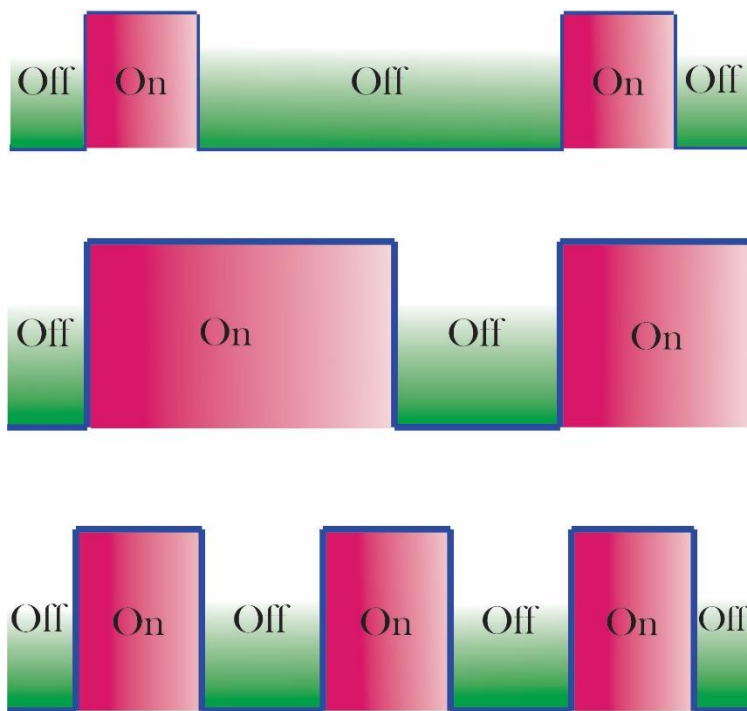
^۱ Duty Cycle



شکل ۱۳-۲: سیگنال PWM با دوره سیگنال‌های متفاوت

اگر سیگنال PWM در یک فرکانس ثابت کار کند، با تغییر زمان هنگامی که دامنه سیگنال بالا می‌باشد، می‌توان زمان دامنه سیگنال پایین را تغییر داد. میزان زمانی که دامنه سیگنال بالا می‌باشد، پهنای پالس^۱ نامیده می‌شود. این پهنای پالس که بستگی به دوره دارد، Duty Cycle گفته می‌شود. Duty Cycle به میزان درصد روشن و خاموش بودن گرمکن‌ها در یک دوره زمانی گفته می‌شود. با ضرب Duty Cycle در ۱۰۰، می‌توان آن را به صورت درصد نشان داد. در شکل ۱۴-۲ چند موج PWM با دوره سیگنال‌های متفاوت نشان داده شده است.

^۱ Pulse Width

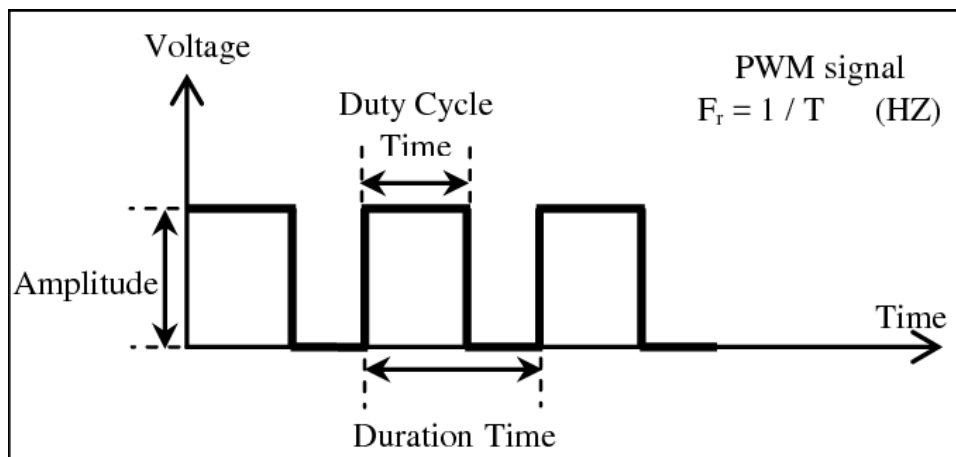


شکل ۲-۱۴: مدت زمان خاموش و روشن بودن گرمکن‌ها در Duty Cycle های مختلف

در ادامه، رابطه به دست آوردن Duty Cycle آورده شده است.

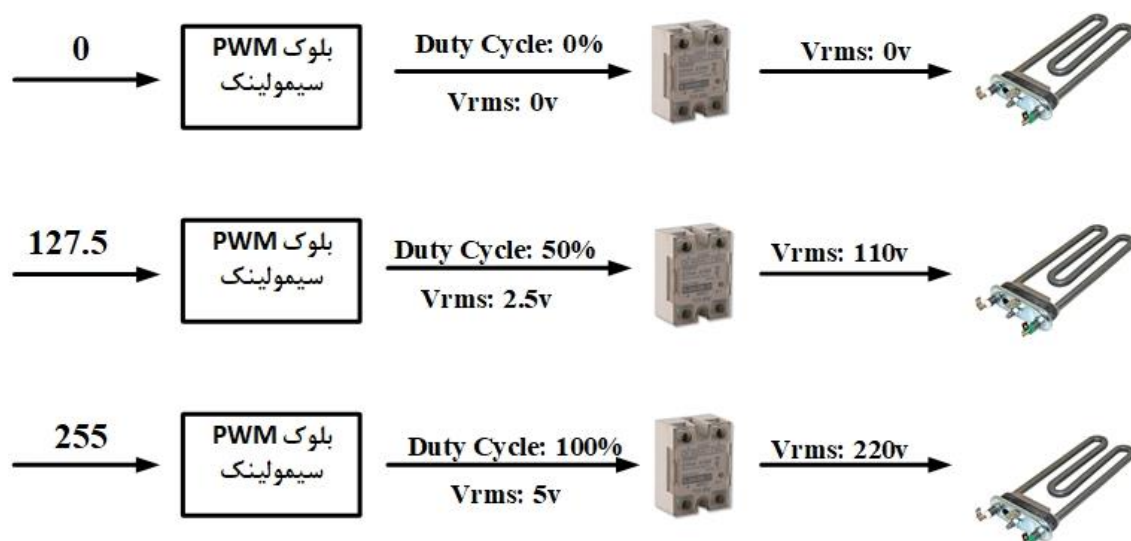
$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \times 100 \quad (2-30)$$

و همچنین در شکل ۲-۱۵ یک سیگنال PWM با دوره تناوب و فرکانس آن نشان داده شده است [۴۷].



شکل ۲-۱۵: فرکانس و دوره تناوب سیگنال PWM

با استفاده از محیط سیمولینک^۱ و برد آردوینو یونو^۲ سیگنال PWM مورد نیاز برای کنترل دمای آون تولید شده است. ورودی بلوک PWM در محیط سیمولینک، اعدادی بین ۰ و ۲۵۵ را قبول می‌کند. برای مثال، زمانی که عدد ۰ به ورودی این بلوک اعمال شود، Duty Cycle برابر با ۰٪ بوده و در نتیجه هیچ ولتاژی به رله وارد نمی‌شود و ولتاژ اعمال شده به گرمکن‌ها صفر می‌شود. و همچنین، اگر عدد ۲۵۵ به ورودی این بلوک داده شود، Duty Cycle برابر با ۱۰۰٪ بوده، ولتاژ ورودی رله ۵ ولت می‌شود و ولتاژ اعمال شده به گرمکن‌ها ۲۲۰ ولت خواهد شد. حال اگر بخواهیم ولتاژ گرمکن‌ها را به نصف برسانیم، کفایت ورودی بلوک PWM را ۱۲۷/۵ کنیم تا ولتاژ گرمکن‌ها ۱۱۰ ولت شود. در شکل ۱۶-۲ این فرآیند نشان داده شده است.



شکل ۱۶-۲: رابطه بین تغییرات ورودی بلوک سیمولینک و ولتاژ اعمال شده به گرمکن‌ها

ولتاژ موثر یا V_{rms} را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_n^2}{n}} \quad (۲-۳۱)$$

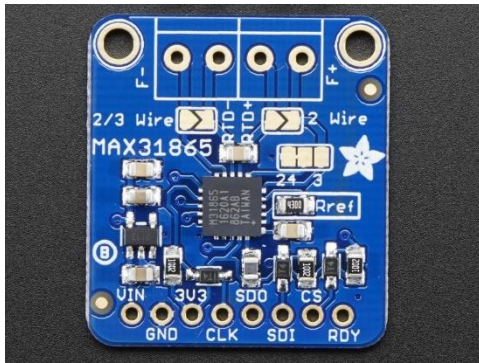
و همچنین می‌توان آن را با انتگرال گیری از رابطه زیر حساب کرد.

^۱ Simulink

^۲ Arduino Uno

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt} \quad (۲-۳۲)$$

دمایی که توسط سنسور PT 100 اندازه گیری می شود، توسط ماژول MAX31865 (شکل ۱۷-۲.ب) به داده قابل فهم برای آردوینو یونو (شکل ۱۷-۲.الف) تبدیل می شود.



(ب)



(الف)

شکل ۱۷-۲: (الف): برد آردوینو یونو، (ب): ماژول MAX31865

۵-۲ شناسایی پارامترهای مدل و اعتبارسنجی تجربی

برای شناسایی مدل ریاضی، مطابق شکل ۱۸-۲، داده یازده چرخه گرم و سرد شدن توسط برد آردوینو یونو و ماژول MAX31865 ثبت شده است. برای تطبیق دادن مدل ریاضی با مدل تجربی، با استفاده از الگوریتم ژنتیک پارامترهای h ، h_6 ، k ، k_6 و ε شناسایی شده اند. برای این منظور از هشت سیکل برای شناسایی و سه سیکل (سیکل های ۴، ۵ و ۸) برای اعتبارسنجی استفاده شده است. با توجه به غیرخطی بودن مدل در حالت تشعشع، پارامترها به صورت تابعی خطی از دمای اولیه استخراج شده اند [۳۹]. همچنین جهت تطبیق بهتر مدل، پارامترها در دو فاز حرارت دهی و خنک شدن به صورت جداگانه استخراج شده اند.

نتایج به دست آمده برای پارامترهای مورد نظر توسط الگوریتم ژنتیک نشان می دهد که هر چه دمای آون بالاتر می رود پارامترهای h ، h_6 ، k و k_6 به طور خطی افزایش می یابند و هر چه دمای آون پایین می رود، این پارامترها به طور خطی کاهش می یابند. بنابراین می توان برای فاز گرم و سرد شدن در هر

چرخه، پارامترهای h , k , h_6 , k_6 و ε را به صورت یک معادله مرتبه یک نوشت. روابط (۲-۳۳) تا (۲-۳۷) پارامترهای سیستم در فاز گرم شدن و روابط (۲-۳۸) تا (۲-۴۲) پارامترهای سیستم را در فاز خنک شدن نشان می‌دهند.

$$h = 0.0399T_0 + 12.032 \quad (2-33)$$

$$k = 0.0006T_0 + 0.0742 \quad (2-34)$$

$$h_6 = 0.1501T_0 - 3.344 \quad (2-35)$$

$$k_6 = 0.0036T_0 - 0.0313 \quad (2-36)$$

$$\varepsilon = 0.0005T_0 + 0.12 \quad (2-37)$$

در روابط فوق، T_0 دمای اولیه آون در هر چرخه گرم شدن می‌باشد. با توجه به شکل ۲-۱۸، دمای اولیه در سیکل گرم شدن، نقاط دره و دمای اولیه برای سیکل سرد شدن، نقاط قله نمودار می‌باشد.

$$h = 0.0055T_0 + 23.359 \quad (2-38)$$

$$k = 0.0013T_0 + 0.6628 \quad (2-39)$$

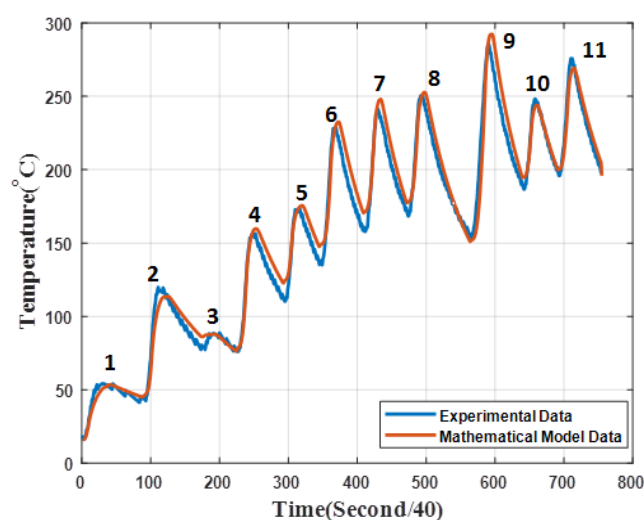
$$h_6 = 0.0045T_0 + 23.388 \quad (2-40)$$

$$k_6 = 0.001T_0 + 0.6997 \quad (2-41)$$

$$\varepsilon = -0.0003T_0 + 0.2204 \quad (2-42)$$

شکل ۲-۱۸، تطابق مناسب نتایج تجربی و مدل ریاضی را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل

مشاهده می‌شود، تطابق بسیار مناسبی بین مدل ارائه شده و سیستم تجربی وجود دارد.



شکل ۲-۱۸: مقایسه خروجی مدل ریاضی و سیستم تجربی

۶-۲ تابع تبدیل سیستم

برای به دست آوردن تابع تبدیل آون خلاء، با اعمال ورودی دلخواه به آن داده‌های خروجی را ثبت کرده و با استفاده از جعبه ابزار متلب، تابع تبدیل سیستم را برای سه ورودی مختلف شناسایی کرده‌ایم. در ادامه تابع تبدیل گسسته به ازای سه ورودی مختلف آورده شده است.

$$G_1(z) = \frac{0.01439z}{z^2 - 1.768z + 0.7696} \quad (۲-۴۳)$$

$$G_2(z) = \frac{0.000437z}{z^2 - 1.983z + 0.9826} \quad (۲-۴۴)$$

$$G_3(z) = \frac{0.02012z}{z^2 - 1.583z + 0.5851} \quad (۲-۴۵)$$

صفر و قطب‌های این توابع تبدیل در جدول ۲-۱ نشان داده شده است.

جدول ۲-۱: تابع تبدیل آون خلاء در نقاط کاری متفاوت

قطب	صفر	تابع تبدیل
0.776, 0.9923	0	G_1
0.985, 0.997	0	G_2
0.5885, 0.994	0	G_3

همانطور که مشاهده می‌شود، قطب‌های این توابع تبدیل یکسان نیستند. این مسئله نشان می‌دهد که سیستم بسیار غیرخطی بوده و نمی‌توان یک تابع تبدیل کلی برای آن تعریف کرد. بنابراین برای هر نقطه کاری بایستی یک تابع تبدیل به دست آید. از این رو، می‌توان برای هر نقطه کاری مورد نظر، یک تابع تبدیل به دست آورد.

۷-۲ مدل ARX

مدل‌های سری زمانی ARX، نمایشی خطی از دینامیک سیستم‌ها به صورت گسسته می‌باشد. قرار دادن یک مدل در فرم ARX آن، پایه و اساس بسیاری از روش‌ها در فرآیندهای دینامیکی و تحلیل‌های کنترلی می‌باشد. در ادامه، مدل سری زمانی، با یک ورودی و یک خروجی با اندیس k ، که به گام زمانی اشاره دارد، نشان داده شده است.

$$y_{k+1} = \sum_{i=1}^{n_a} a_i y_{k-i+1} + \sum_{i=1}^{n_b} b_i u_{k-i+1} \quad (۲-۴۶)$$

با در نظر گرفتن $n_a = 3$ ، $n_b = 2$ با یک ورودی و یک خروجی، مدل سری زمانی به صورت زیر درمی‌آید:

$$y_{k+1} = a_1 y_k + a_2 y_{k-1} + a_3 y_{k-2} + b_1 u_k + b_2 u_{k-1} \quad (۲-۴۷)$$

اگر سیستم دارای دو ورودی و دو خروجی باشد، مدل سری زمانی به صورت زیر درمی‌آید.

$$\begin{aligned} y_{1,k+1} &= a_{1,1} y_{1,k} + b_{1,1} u_{1,k} + b_{1,2} u_{2,k} \\ y_{2,k+1} &= a_{1,2} y_{2,k} + b_{2,1} u_{1,k} + b_{2,2} u_{2,k} \end{aligned} \quad (۲-۴۸)$$

مدل‌های سری زمانی ARX، برای شناسایی و کنترل پیشرفته استفاده می‌شوند. از این مدل‌ها در فرآیندهای صنعتی مانند پتروشیمی و پالایشگاه‌های نفت، از دهه ۱۹۸۰ استفاده می‌شود.

مدل ARX گسسته برای آون خلاء به صورت زیر به دست آمده است.

$$A(z)y(t) = B(z)u(t) + e(t) \quad (۲-۴۹)$$

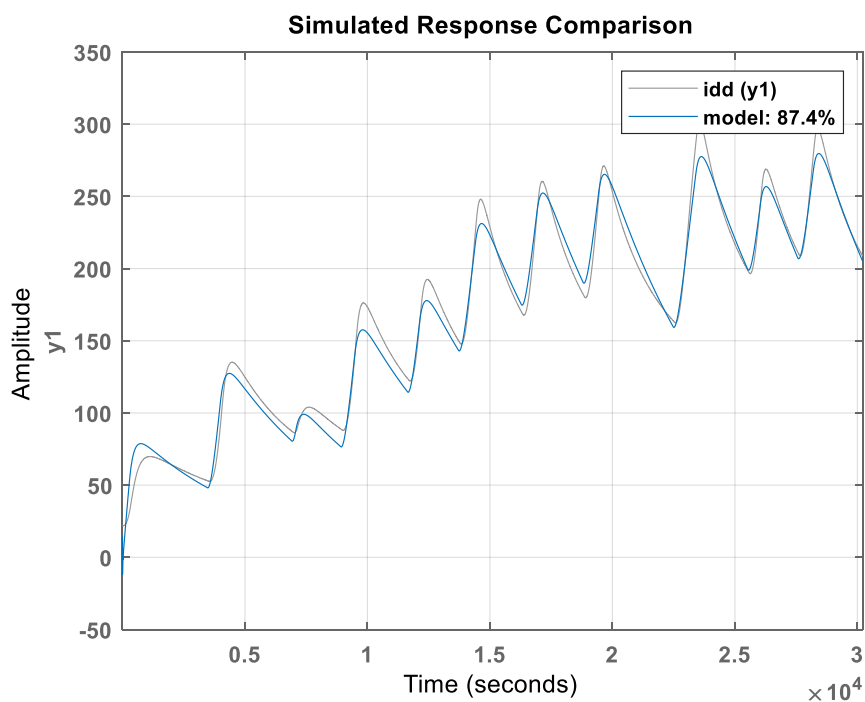
که در آن $A(z)$ و $B(z)$ برابرند با:

$$A(z) = z^7 - 0.4799z^6 - 0.1934z^5 - 0.7838z^4 \dots \quad (۲-۵۰)$$

$$-0.1326z^3 + 0.101z^2 + 0.2157z + 0.2731$$

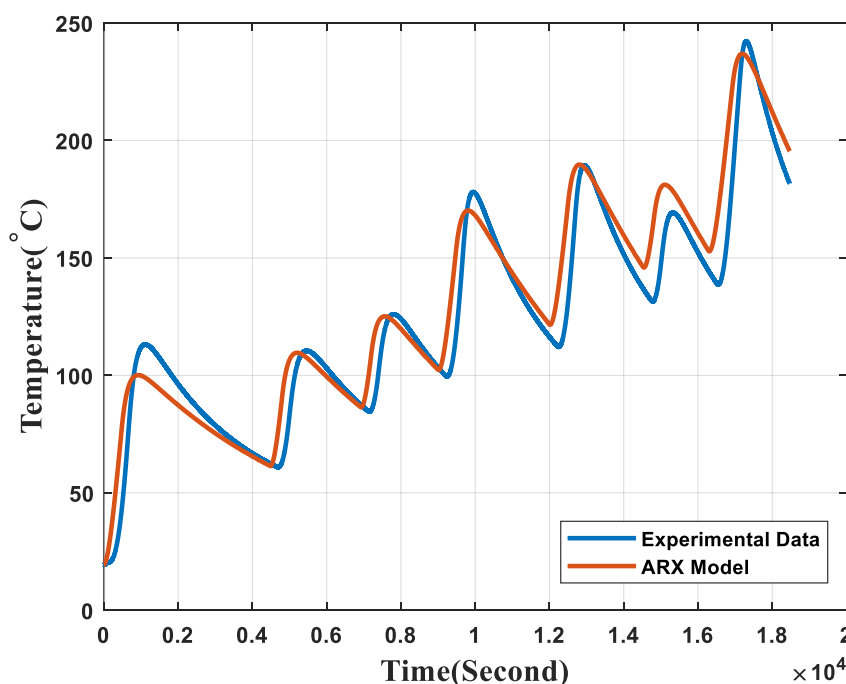
$$B(z) = 2.753e - 5 \quad (۲-۵۱)$$

برای اعتبارسنجی این مدل ورودی که قبلاً در یازده چرخه گرم و سرد شدن به آون دادیم را به مدل ARX به دست آمده اعمال می‌کنیم (شکل ۱۹-۲).



شکل ۱۹-۲: مقایسه خروجی مدل ARX و سیستم تجربی

همانطور که در شکل بالا دیده می‌شود مدل ARX به دست آمده، با دقت خوبی با داده های تجربی سیستم مطابقت دارد. برای اطمینان پیدا کردن از این که مدل ARX به دست آمده برای هر ورودی دلخواه درست کار می‌کند، با اعمال یک ورودی جدید به آون و مدل ARX خروجی آن‌ها را بررسی می‌کنیم (شکل ۲۰-۲).



شکل ۲۰-۲: مقایسه خروجی مدل ARX و سیستم تجربی با یک ورودی دلخواه

همانطور که در شکل بالا دیده می‌شود، برای یک ورودی جدید، مدل ARX به دست آمده با داده‌های تجربی مطابقت دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که برای هر ورودی دلخواه، مدل شناسایی شده درست است.

۸-۲ مدل ARMAX

یک مدل AR، با مرتبه p به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$X_t = c + \sum_{i=1}^p \varphi_i X_{t-i} + \varepsilon_t \quad (۲-۵۲)$$

که در آن $\varphi_1, \dots, \varphi_p$ پارامترهای مدل هستند. C ثابت مدل و ε_t خطای نویز سفید می‌باشد. می‌توان برای سادگی ترم خطا را حذف کرد. مدل MA با مرتبه q به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$X_t = \mu + \varepsilon_t + \sum_{i=1}^q \theta_i \varepsilon_{t-i} \quad (۲-۵۳)$$

در این مدل $\theta_1, \dots, \theta_q$ پارامترهای مدل هستند. μ امید ریاضی X_t است.

مدل ARMA، مدلی است با خود همبستگی^۱ مرتبه‌ی p و میانگین متحرک^۲ مرتبه‌ی q و شامل دو مدل ذکر شده در بالا می‌باشد.

$$X_t = c + \varepsilon_t + \sum_{i=1}^p \varphi_i X_{t-i} + \sum_{i=1}^q \theta_i \varepsilon_{t-i} \quad (2-54)$$

مدل ARMAX مدلی است که در آن علاوه بر p ترم اتورگرسیو^۳ و q ترم میانگین متحرک با b ترم سری زمانی برونزای d_t نیز مواجهیم.

$$X_t = \varepsilon_t + \sum_{i=1}^p \varphi_i X_{t-i} + \sum_{i=1}^q \theta_i \varepsilon_{t-i} + \sum_{i=1}^b \eta_i d_{t-i} \quad (2-55)$$

که در آن $\eta_1, \dots, \eta_b$ پارامترهای سری‌های برونزای d_t هستند. مدل ARMAX به دست آمده برای سیستم به صورت زیر است.

$$A(z)y(t) = B(z)u(t) + C(z)e(t) \quad (2-56)$$

که در آن $A(z)$ ، $B(z)$ و $C(z)$ برابرند با:

$$A(z) = z^7 - 2.886z^6 + 2.982z^5 - 1.865z^4 \dots \quad (2-57)$$

$$+ 1.601z^3 - 1.126z^2 + 0.3182z - 0.02349$$

$$B(z) = 4.735e - 8 \quad (2-58)$$

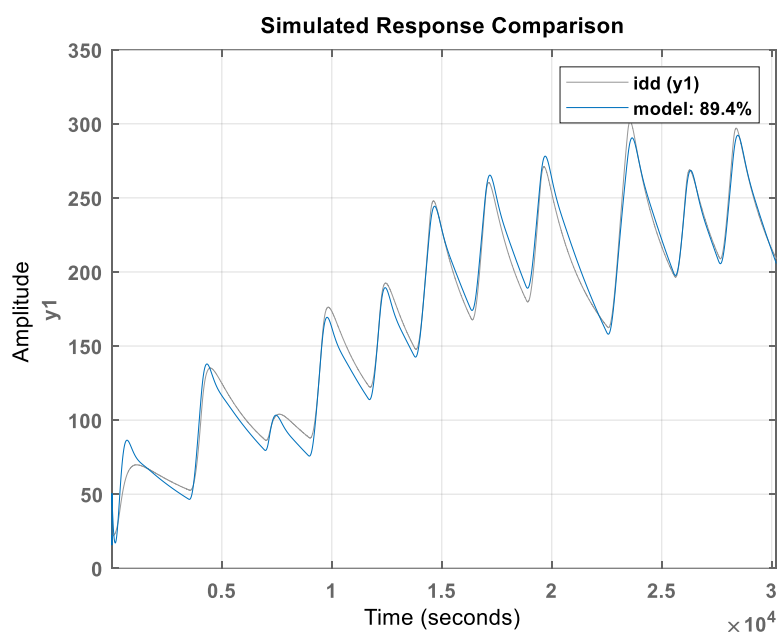
$$C(z) = z^3 - 2.827z^2 + 2.67z - 0.8428 \quad (2-59)$$

برای اعتبارسنجی، ورودی که به آن در یازده چرخه گرم و سرد شدن اعمال کردیم را به مدل ARMAX اعمال می‌کنیم.

¹ Auto Correlation

² Moving Average

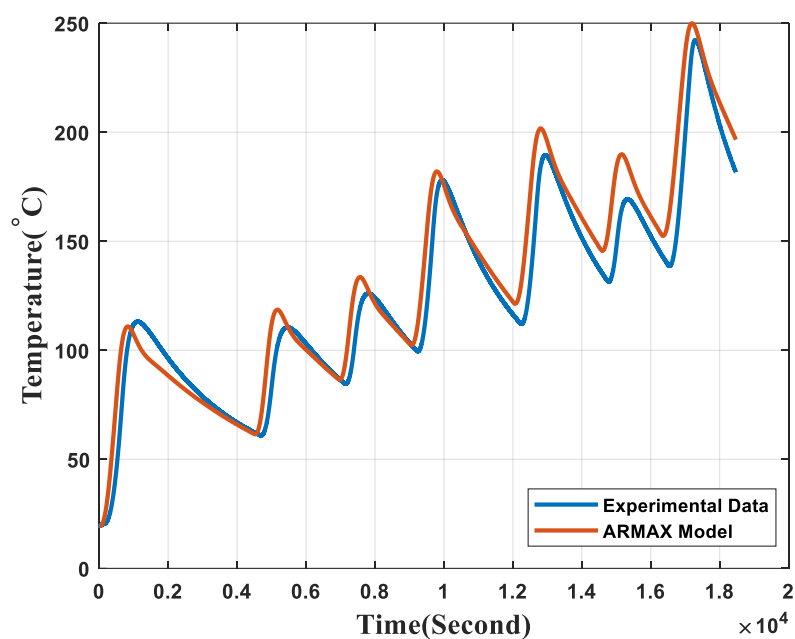
³ Autoregressive



شکل ۲۱-۲: مقایسه خروجی مدل ARMAX و سیستم تجربی

با مقایسه مدل ARMAX با مدل ARX، مشاهده می‌شود که دقت مدل ARMAX بهتر بوده و عملکرد بهتری دارد (شکل ۲۱-۲).

مانند حالت قبل، برای اطمینان پیدا کردن از این که مدل ARMAX برای هر ورودی دلخواه به درستی کار می‌کند، با اعمال یک ورودی دلخواه به آن و مدل ARMAX، خروجی آن‌ها را بررسی می‌کنیم (شکل ۲۲-۲).



شکل ۲-۲۲: مقایسه خروجی مدل ARMAX و سیستم تجربی با ورودی دلخواه

و همانطور که در این شکل دیده می‌شود، مدل ARMAX شناسایی شده تطابق خوبی با داده‌های تجربی جدید دارد. پس می‌توان نتیجه گرفت که مدل ARMAX شناسایی شده برای هر ورودی دلخواه، معتبر است.

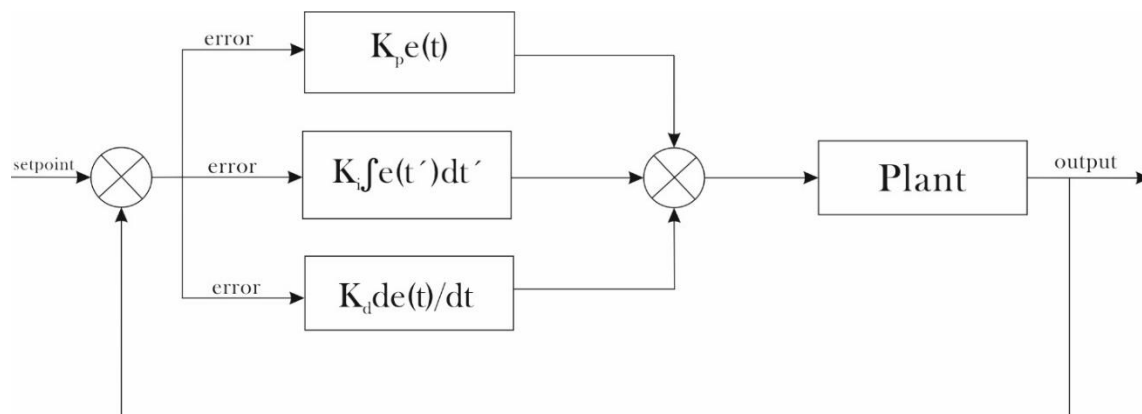
فصل ۳: طراحی کنترل کننده

۳-۱ طراحی کنترل کننده

طراحی کنترل کننده مناسب برای محیط‌های انتقال حرارتی، از آن جهت حائز اهمیت است که می‌تواند علاوه بر کم کردن زمان برخاست، در مصرف انرژی صرفه جویی نماید. همانطور که پیش از این اشاره کردیم برای کنترل دمای محیط‌های انتقال حرارتی، کنترل کننده‌های مختلفی از جمله کنترل کننده PID، کنترل کننده فازی و چند کنترل کننده غیرخطی از قبیل کنترل کننده مقاوم و کنترل کننده مود لغزشی، طراحی شده است. در این قسمت، برای مدل فضایی که قبلاً در مورد آن توضیح دادیم، ابتدا یک کنترل کننده PID طراحی کرده و سپس با الگوریتم‌های بهینه‌سازی بهره‌های آن بهینه شده است و سپس، یک کنترل کننده فازی طراحی و قوانین، توابع عضویت ورودی و خروجی و همچنین بهره‌های آن، بهینه شده‌اند.

۳-۲ کنترل کننده PID

کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی و یا PID یکی از پر کاربردترین نوع از انواع کنترل کننده‌ها در صنعت می‌باشد. زیرا این کنترل کننده‌ها، علاوه بر آن که ساختار ساده‌ای دارند و استفاده از آن‌ها بسیار راحت است، عملکرد مناسبی در کنترل بسیاری از سیستم‌ها دارد. همانطور که از نام این کنترل کننده برمی‌آید، از سه قسمت تناسبی (Proportional)، انتگرال گیر (Integral) و مشتق گیر (Derivative) ساخته شده است که هر کدام از آن‌ها سیگنال خطا را به عنوان ورودی گرفته و عملیاتی را روی آن انجام می‌دهند و سپس خروجی آن‌ها با هم جمع شده و به عنوان ورودی به سیستم داده می‌شود. این کنترل کننده با اندازه گیری سیگنال خطا، گذشته، حال و آینده خطا را محاسبه کرده و با توجه به آن سیگنال کنترلی را تولید می‌کند. در شکل ۳-۱، یک کنترل کننده PID نشان داده شده است.



شکل ۳-۱: ساختار کنترل کننده PID

با توجه به شکل، تابع تبدیل کنترل کننده را می توان به صورت زیر نوشت:

$$Output(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de}{dt} \right) \quad (3-1)$$

فرم دیگر رابطه بالا به صورت زیر است.

$$G_c = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3-2)$$

برای به دست آوردن ضرایب K ، T_i و T_d روش های مختلفی وجود دارد. در این قسمت ضرایب PID با استفاده از روش زیگلر-نیکولز و چند الگوریتم فرا ابتکاری به دست آمده است. همانطور که قبلا اشاره شد، برای اندازه گیری خطا، از چهار معیار استفاده شده، که در ادامه روابط مربوط به آنها آورده شده است.

$$ISE = \int_0^\infty e^2(t) dt \quad (3-3)$$

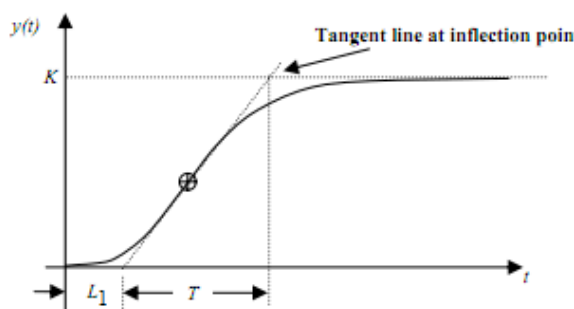
$$ITSE = \int_0^\infty t e^2(t) dt \quad (3-4)$$

$$IAE = \int_0^\infty |e(t)| dt \quad (3-5)$$

$$ITAE = \int_0^\infty t |e(t)| dt \quad (3-6)$$

۳-۲-۱ روش زیگلر-نیکولز با استفاده از سیستم حلقه باز

در این روش باید حلقه فیدبک را از مدار باز کنیم تا به یک سیستم حلقه باز تبدیل شود. سپس یک ورودی پله به مدار اعمال می‌کنیم و با بررسی سیگنال خروجی (شکل ۳-۲)، پارامترهای جدول ۳-۱ را به دست می‌آوریم [۴۸].



شکل ۳-۲: سیگنال خروجی حلقه باز سیستم

همانطور که در شکل ۳-۲ مشاهده می‌شود با اعمال ورودی پله به سیستم، خروجی آن به دست آمده و نقطه عطف آن مشخص شده است. سپس خط مماس بر نقطه عطف رسم شده و پارامترهای جدول به دست خواهند آمد.

جدول ۳-۱: به دست آوردن ضرایب PID با استفاده از روش زیگلر-نیکولز			
Control Type	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

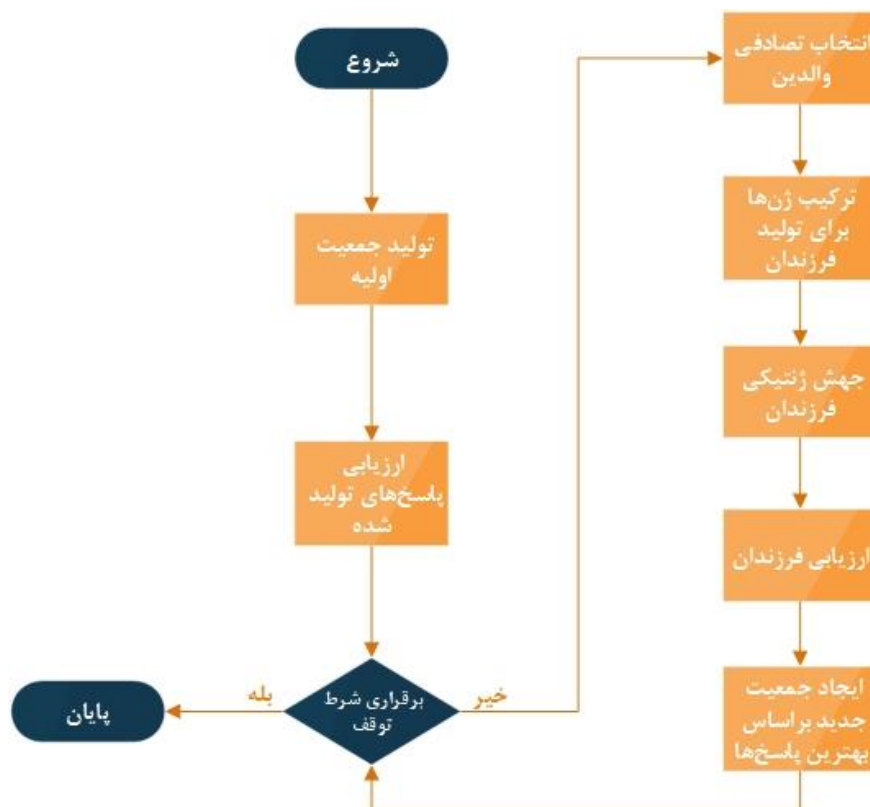
با به دست آوردن پارامترهای جدول ۳-۱ و استفاده از روابط ۳-۱ و ۳-۲ ضرایب کنترل‌کننده PID با استفاده از روش زیگلر-نیکولز به دست می‌آید.

۲-۲-۳ الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم ژنتیک یک الگوریتم فرا ابتکاری است که در بسیاری از مسائل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این الگوریتم از نظریه تکاملی داروین الهام گرفته شده و از تکنیک‌های زیست‌شناسی فرگشتی مانند وراثت، جهش زیستی و قانون انتخاب طبیعی استفاده می‌کند. براساس قانون انتخاب طبیعی، گونه‌هایی که بهترین ویژگی‌ها را دارند، به تولید مثل و بقا ادامه می‌دهند و آنهایی که این ویژگی‌ها را نداشته باشند، به مرور زمان از بین خواهند رفت. این الگوریتم از تکامل ژنتیکی به عنوان یک الگو برای حل مسائل استفاده می‌کند.

در ابتدا، به طور تصادفی جمعیتی از جواب‌ها برای مساله تولید می‌شود که به هر کدام از آن‌ها کروموزوم می‌گویند. سپس، با استفاده از عملگرهای الگوریتم ژنتیک (وراثت و جهش ژنتیکی)، کروموزوم‌های بهتر انتخاب شده و با هم ترکیب می‌شوند و سپس جهشی در آن‌ها ایجاد می‌شود و در نهایت این جمعیت با جمعیت فعلی ترکیب می‌شود. در شکل ۳-۳ فلوچارت الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود، در ابتدا جمعیتی از کروموزوم‌ها تولید می‌شوند و در مرحله بعد این کروموزوم‌ها در تابع هزینه ارزیابی می‌شوند. چنانچه مقدار تابع هزینه مطلوب باشد الگوریتم متوقف شده و در غیر این صورت، کروموزوم‌هایی که جواب‌های مطلوب‌تری تولید کردند، با هم ترکیب می‌شوند و جهش می‌یابند تا فرزندان تولید شوند. این فرزندان دوباره در تابع هزینه ارزیابی می‌شوند و جمعیتی جدید را تشکیل داده که جایگزین جمعیت اولیه می‌شود. این حلقه تا جایی ادامه پیدا می‌کند که تابع هزینه مقدار مطلوبی پیدا کند.



شکل ۳-۳: فلوچارت الگوریتم ژنتیک (GA)

۳-۲-۳ الگوریتم بهینه‌سازی علف هرز مهاجم (IWO)

الگوریتم بهینه‌سازی علف هرز مهاجم یکی از الگوریتم‌های فرا ابتکاری است که در سال ۲۰۰۶ ارائه شده است [۴۹]. این الگوریتم براساس رفتار علف‌های هرز در تولید مثل، رشد و بقا نوشته شده است. برای سالیان سال، انسان‌ها به کشاورزی و باغبانی مشغول بوده‌اند. و همیشه یک سری عوامل مزاحم وجود داشته‌اند که به میوه‌ها و محصولات کشاورزی آسیب می‌رسانده‌اند. یکی از این عوامل مزاحم، علف‌های هرز هستند. و علت این موضوع این است که علف‌های هرز از روشی بهینه برای تولید مثل استفاده می‌کنند. علف‌های هرز همیشه می‌دانند که بذره‌ای خود را در کدام ناحیه از زمین کشاورزی و یا باغ پخش کنند تا نسل بعد از خود رشد بهتری نسبت به خودشان داشته باشند. و همین موضوع باعث شده

تا کشاورزها و باغبانان نتوانند بر علف هرز مهاجم پیروز شوند. به طوریکه کشاورزها می‌گویند: "علف هرز همیشه پیروز است."

تمام موجودات زنده برای تولید مثل و بقای خود، از روشی به نام تئوری انتخاب r و k^1 استفاده می‌کنند [۴۹]. در تئوری انتخاب r ، هدف اصلی، سریع زندگی کردن است. به طوریکه تولید مثل بسیار سریع و در تعداد بالا و عمر کوتاه است. می‌توان گفت در این روش، کمیت مهم‌تر از کیفیت است. به عبارت دیگر، موجوداتی که از این روش پیروی می‌کنند، تولید مثلی سریع و تعداد فرزندان آن‌ها بیشتر می‌باشد. در حقیقت آن‌ها فقط به دنبال افزایش جمعیت خود هستند. در تئوری انتخاب k ، بر خلاف تئوری انتخاب r ، کیفیت مهم‌تر از کمیت است. و موجوداتی که از این روش پیروی می‌کنند، زمان بیشتری برای بزرگ کردن و تربیت فرزندان خود می‌گذارند و عمر بیشتری دارند.

علف‌های هرز مهاجم برای تولید مثل خود، از ترکیبی از تئوری انتخاب r و تئوری انتخاب k استفاده می‌کنند. در ابتدا تلاش آن‌ها در جهت افزایش جمعیتشان در یک منطقه می‌باشند (کمیت). و سپس، در جهت بهتر کردن نسل‌های بعد از خود تلاش می‌کنند (کیفیت).

برای تولید بذر در یک کلونی علف‌های هرز، از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$S = \left[S_{min} + (S_{max} - S_{min}) \frac{f - f_{worst}}{f_{best} - f_{worst}} \right] \quad (3-7)$$

در این رابطه S_{min} مقدار کمینه بذرهای تولید شده، S_{max} مقدار بیشینه بذرهای تولید شده، f_{worst} بدترین مقدار تابع هزینه در یک کلونی، f_{best} بهترین مقدار تابع هزینه در کلونی و f تابع سود گیاهان می‌باشد. در شکل ۳-۴ فلوچارت الگوریتم علف هرز مهاجم نشان داده شده است.

¹ R-K Selection Theory



شکل ۴-۳: فلوچارت الگوریتم علف هرز مهاجم (IWO)

همانطور که در شکل ۴-۳ دیده می‌شود، تعدادی بذر به منظور مقدار دهی اولیه تولید شده و در فضای مسئله پخش می‌شود. سپس این بذرها تبدیل به گیاه می‌شوند و تابع سود آن‌ها محاسبه شده و تولید بذر می‌کنند. در مرحله بعد تابع سود گیاه-بذر محاسبه شده و رقابتی بین گیاهان و بذرها براساس مقدار سود آن‌ها بوجود می‌آید. و این فرآیند تا زمانی ادامه می‌یابد که شرط توقف برقرار شود.

۴-۲-۳ الگوریتم کرم شب تاب (FA)

الگوریتم کرم شب تاب، یک الگوریتم فرا ابتکاری جدید است که از رفتار کرم‌های شب تاب در طبیعت الهام گرفته شده است. کرم‌های شب تاب از الگوهای نوری خاصی برای جذب کرم‌های شب تاب دیگر به منظور جفت گیری و یا برای جذب شکار و همچنین برای دفاع از خود در مقابل شکارچیان دیگر استفاده می‌کنند. در این الگوریتم، تعدادی کرم شب تاب مصنوعی وجود دارد و برای هر کدام از آن‌ها هزینه و یا سود در نظر گرفته می‌شود. کرم شب تابی که هزینه و یا سود بهتری داشته باشد، جذاب‌تر است [۵۰]. بنابراین برای جذب کرم‌های شب تاب دیگر و یا شکار موفق‌تر است. برای جذابیت یک کرم شب تاب می‌توان رابطه زیر را بیان کرد.

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^m} \quad (3-8)$$

شکل دیگر این رابطه برابر است با:

$$\beta = \frac{\beta_0}{1 + \gamma r^m} \quad (3-9)$$

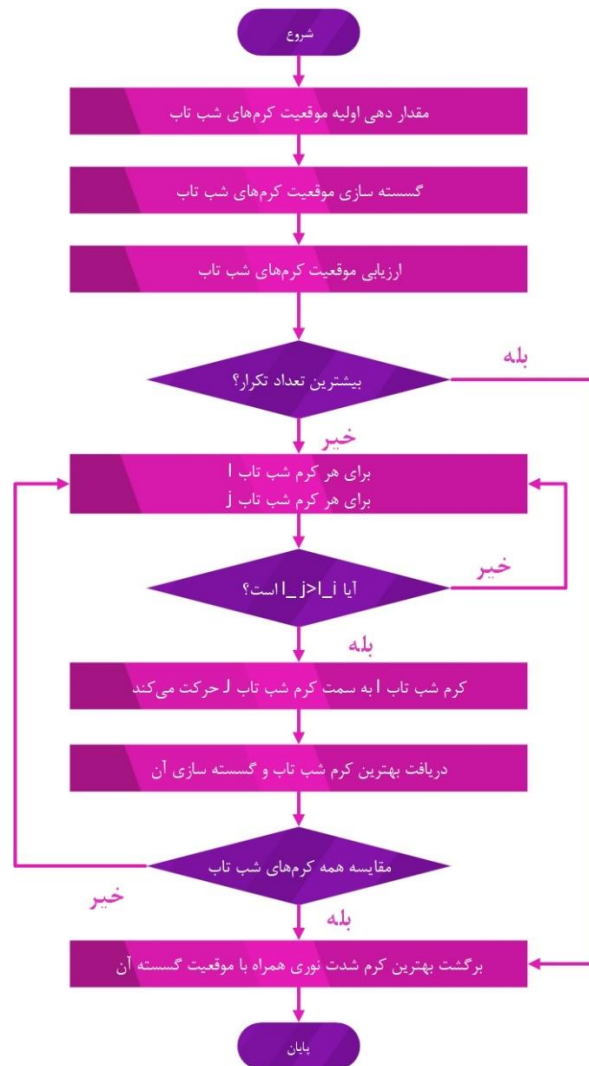
که در آن β_0 مقدار جذابیت در فاصله $r=0$ ، γ ضریب جذب و r فاصله بین کرم شب تاب و حشرات دیگر است. جاذبه حشرات و کرم‌های شب تاب دیگر را می‌توان به این صورت بیان کرد.

$$x_i' = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r^m} (x_j - x_i) + \alpha \varepsilon_i \quad (3-10)$$

شرایط جذب توسط رابطه (۳-۱۱) بیان می‌شود.

$$I_j > I_i \quad (3-11)$$

که، I_j برابر با شدت نور کرم شب تاب j و I_i شدت نور کرم شب تاب i می‌باشد. در ادامه فلوچارت الگوریتم کرم شب تاب نشان داده شده است (شکل ۳-۵).



شکل ۵-۳: الگوریتم کرم شب تاب (FA)

در شکل بالا، ابتدا، جمعیتی اولیه از کرم‌های شب تاب تشکیل شده و موقعیت آن‌ها ارزیابی می‌شود. پس از بررسی شرط جذب، کرم‌های شب تاب به طرف یکدیگر حرکت می‌کنند. در پایان، بهترین کرم شب تاب مشخص شده و شدت نوری و موقعیت آن مشخص می‌شود.

۵-۲-۳ الگوریتم رقابت استعماری (ICA)

الگوریتم رقابت استعماری از شبیه‌سازی اجتماعی و سیاسی روند استعمار الهام گرفته شده است [۵۱]. در این الگوریتم، جمعیتی از کشورها با ویژگی‌هایی وجود دارند که این ویژگی‌ها همان ویژگی‌هایی است

که در یک مسئله بهینه‌سازی مورد بحث قرار می‌گیرند. در یک تابع هزینه N_{var} بعدی، یک کشور به صورت زیر تعریف می‌شود.

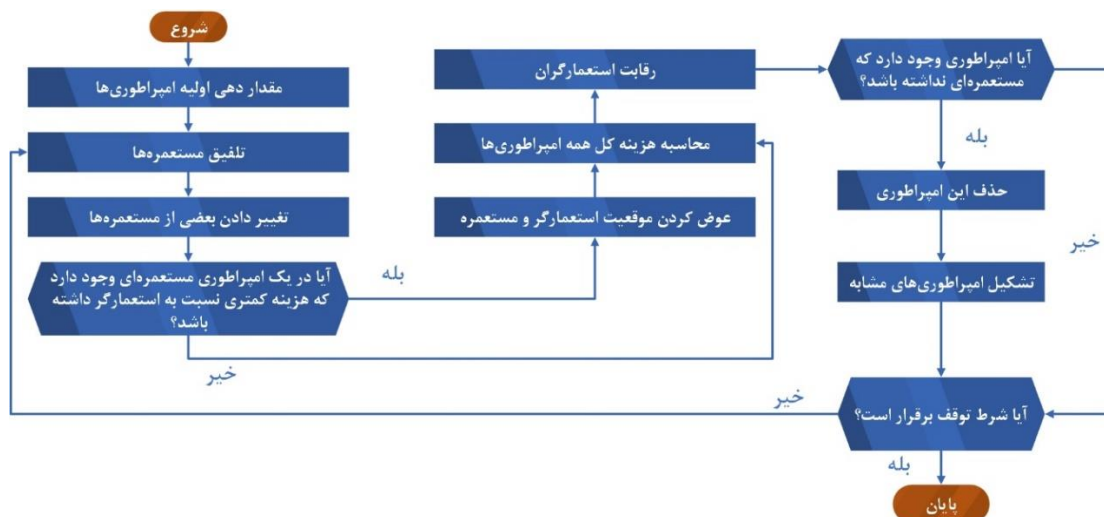
$$country = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_{N_{var}}] \quad (3-12)$$

می‌توان گفت که هدف اصلی پیاده سازی الگوریتم رقابت استعماری، رسیدن به یک کشوری است که در همه‌ی جنبه‌ها از جمله: اقتصاد، فرهنگ، دانش، ورزش و غیره بهترین باشد. ترکیبی از تمام این ویژگی‌ها می‌تواند به عنوان یک تابع هزینه برای هر کشور در نظر گرفته شود.

$$cost = f(country) = f(p_1, p_2, p_3, \dots, p_{N_{var}}) \quad (3-13)$$

همانطور که قبلاً اشاره کردیم، در این الگوریتم جمعیتی از کشورها وجود دارند که بعضی از این کشورها تابع هزینه بهتری دارند. این کشورها، که تابع هزینه بهتری دارند در نقش ایمپریالیست^۱ یا استعمارگر ظاهر شده و بقیه کشورها را استعمار می‌کنند تا به امپراطوری تبدیل شوند. در هر امپراطوری، مستعمره‌ها در تلاش و همکاری برای بهینه کردن امپراطوری هستند. و همچنین، این مستعمره‌ها در حال رقابت با یکدیگر برای بهتر شدن هستند. گاهی اوقات این کشورها (مستعمره‌ها) تغییراتی را در ویژگی‌هایشان ایجاد می‌کنند تا بتوانند شرایط متفاوتی را تجربه کنند. به عبارت دیگر، مستعمره‌ها انقلاب می‌کنند تا بتوانند به بهتر شدن امپراطوری کمک کنند. علاوه بر این، انقلاب در یک مستعمره، می‌تواند آن را به یک استعمارگر در امپراطوری تبدیل کند. و همچنین، امپراطوری‌ها همیشه در رقابت با یکدیگر هستند تا مستعمره‌های یکدیگر را جذب کنند. این به آن معنا است که مستعمره‌ها از امپراطوری‌های ضعیف‌تر جدا شده و به امپراطوری‌های قویتر می‌پیوندند. و سرانجام، امپراطوری‌هایی که تمام مستعمره‌های خود را از دست می‌دهند، نابود می‌شوند. در شکل ۶-۳، فلوجارت الگوریتم رقابت استعماری نشان داده شده است.

¹ Imperialist

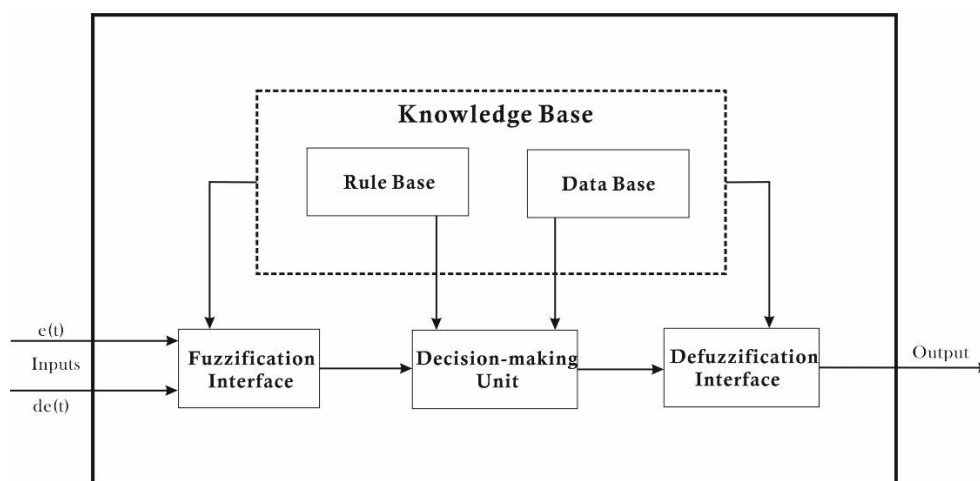


شکل ۳-۶: فلوچارت الگوریتم رقابت استعماری (ICA)

همانطور که در شکل ۳-۶ دیده می‌شود، در ابتدا، امپراطوری‌ها مقدار دهی می‌شوند. سپس، مستعمره‌ها مشخص شده و چنانچه هزینه این مستعمره‌ها بهتر از امپراطوری‌ها باشد، موقعیت مستعمره‌ها با امپراطوری‌ها عوض می‌شود. در مرحله بعد، هزینه هر امپراطوری محاسبه شده و با یکدیگر رقابت می‌کنند تا مستعمره‌های یکدیگر را بگیرند. اگر امپراطوری وجود داشته باشد که تمام مستعمره‌های خود را از دست داده باشد، نابود می‌شود. این فرآیند تا زمانی ادامه پیدا می‌کند تا شرط توقف برقرار شود.

۳-۳ کنترل کننده فازی

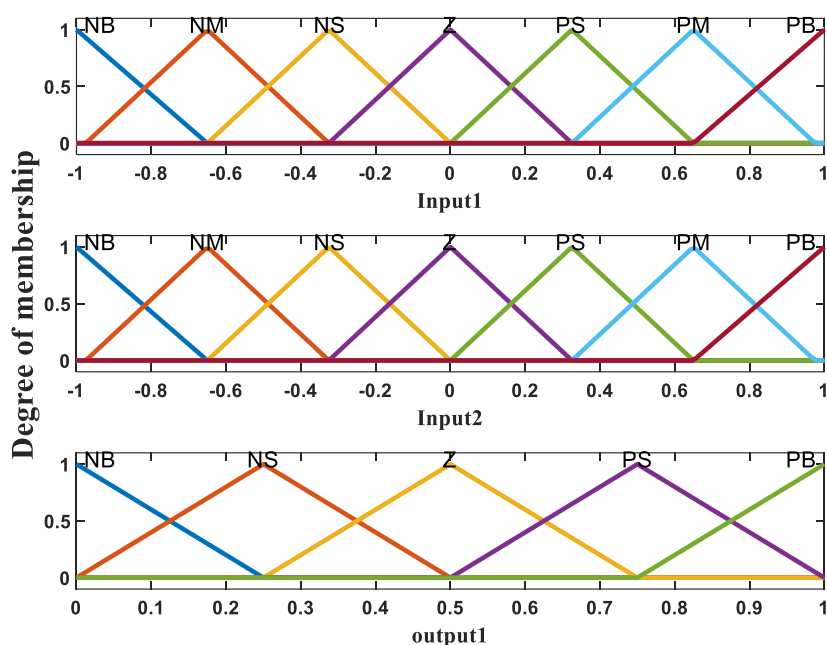
کنترل کننده فازی، کنترل کننده‌ای است که براساس منطق فازی تعریف می‌شود. منطق فازی یک سیستم ریاضی است که با تحلیل و بررسی مقادیر ورودی به صورت آنالوگ به متغیرهای منطقی، خروجی متناسب با آن را تولید می‌کند. یک کنترل کننده فازی و اجزای آن در شکل ۳-۷ نشان داده شده است.



شکل ۳-۷: ساختار کنترل کننده فازی

برای کنترل دمای آونی که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است، از منطق فازی ممدانی^۱ استفاده شده است. ورودی یک کنترل کننده فازی شامل دو بخش خطا و مشتق خطا می‌باشد. برای هر کدام از ورودی‌ها و خروجی کنترل کننده، توابع عضویت فازی اختصاص داده می‌شود (شکل ۳-۸). همانطور که در شکل ۳-۷ نشان داده شده است، پایگاه قواعد شامل پایگاه داده و پایگاه قوانین فازی می‌باشد [۵۲]. این داده‌ها و قوانین به صورت اگر-آنگاه که به صورت یک جدول (جدول ۳-۲) نشان داده می‌شود تعریف می‌شود که در آن تمام حالت‌های ورودی و خروجی وجود دارد.

¹ Mamdani



شکل ۸-۳: توابع عضویت ورودی و خروجی

در ابتدا دما و مشتق آن به صورت داده‌ها قابل فهم برای کنترل کننده فازی با استفاده از فازی ساز تبدیل می‌شوند. سپس واحد تصمیم‌گیری با استفاده از پایگاه داده و قوانین که شامل گزاره‌های ترکیبی فازی که با کمک یک t -نرم فازی از شرایط مختلف ورودی تعریف می‌شود، خروجی مورد نیاز برای موتور استنتاج فازی ممدانی را تولید می‌کنند. پس از تحلیل، سیگنال خروجی با استفاده از غیر فازی ساز متوسط مراکز، غیر فازی می‌شود و دما را با افزایش و کاهش ولتاژ کنترل می‌کند. توابع عضویت فازی می‌توانند از نوع مثلثی، دوزنقه‌ای و یا گوسی باشند [۵۲]. توابع عضویت مورد استفاده در این کنترل کننده از نوع مثلثی می‌باشد (شکل ۸-۳).

جدول ۲-۳: قوانین فازی

Error								
Change of Error		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
	NB	NB	NB	NS	NS	NS	NS	Z
	NM	NB	NS	NS	NS	NS	Z	PS
	NS	NS	NS	NS	NS	Z	PS	PS
	Z	NS	NS	NS	Z	PS	PS	PS
	PS	NS	NS	Z	PS	PS	PS	PS
	PM	NS	Z	PS	PS	PS	PS	PB
	PB	Z	PS	PS	PS	PS	PB	PB

توابع عضویت، قوانین، بهره‌های ورودی و خروجی با الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک (GA)، جستجوی هارمونی (HS)، بهینه‌سازی فاخته (COA) و چرخه آب (WCA)، بهینه‌سازی شده‌اند. برای محاسبه خطا از روابطی که برای معیارهای مختلف خطا، بیان شده استفاده کرده‌ایم (روابط (۳-۳) تا (۳-۶)). در ادامه به بررسی این الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌پردازیم.

۳-۳-۱ الگوریتم جستجوی هارمونی (HS)

الگوریتم جستجوی هارمونی اولین بار در سال ۲۰۰۱ ارائه شد [۵۳]. این روش از مفاهیم پایه و اساسی تولید هارمونی الهام گرفته شده است. در دنیای موسیقی، یک نوازنده یا نویسنده آهنگ در تلاش برای ترکیب‌های مختلف از ملودی‌ها و گام‌های موسیقی‌ای که در حافظه‌اش ذخیره کرده است، می‌باشد. و همواره تلاش می‌کند تا یک هارمونی بدون نقص بسازد [۵۴]. این فرآیند را می‌توان در مسائل مهندسی برای بهینه‌سازی پیاده‌سازی کرد.

در ابتدا یک حافظه هارمونی برای بهینه‌سازی ایجاد شده و راه حلی برای آن ارائه می‌شود. برای یک مسئله N-بعدی حافظه هارمونی را می‌توان به صورت زیر نوشت.

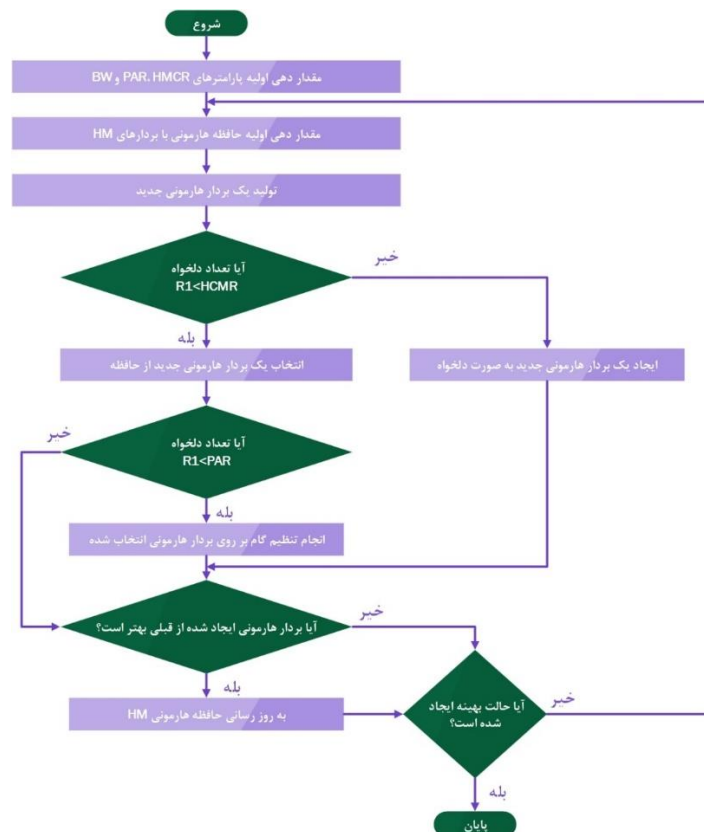
$$HM = \begin{bmatrix} x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^1 \\ x_1^2, x_2^2, \dots, x_n^2 \\ \vdots \\ x_1^{HMS}, x_2^{HMS}, \dots, x_n^{HMS} \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

سپس یک راه حل جدید به صورت بداهه $[x_1', x_2', \dots, x_n']$ از HM ساخته می‌شود. هر کدام از این x_j' ها، براساس پارامتری به نام حافظه هارمونی با در نظر گرفتن نرخ^۱ (HMCR) تعیین می‌شوند. پارامتر HMCR، به صورت احتمال انتخاب یک عضو از اعضای HM تعریف می‌شود. اگر x_j' از HM باشد، می‌توان گفت که از بعد لازم عضوی دلخواه از HM انتخاب شده است و براساس میزان تنظیم صدا^۲ (PAR) جهش داده می‌شود. میزان تنظیم صدا مشخص کننده احتمال کاندید شدن عضوی از HM برای جهش یافتن است.

بدین ترتیب، حافظه هارمونی به روز رسانی می‌شود و راه حل‌های جدید ارزیابی شده و این روند تا زمانی ادامه پیدا می‌کند تا بهترین هارمونی ساخته شود. در شکل ۹-۳، زیر فلوچارت الگوریتم جستجوی هارمونی نشان داده شده است.

¹ Harmony Memory Considering Rate

² Pitching Adjust Rate



شکل ۹-۳: فلوچارت الگوریتم جستجوی هارمونی (HS)

در شکل ۹-۳، در ابتدا، پارامترهای PAR و $HMCR$ مقدار دهی می‌شوند. در مرحله بعد، بردارهای حافظه هارمونی تشکیل شده و ماتریس HM تشکیل می‌شود. پس از بررسی شرط حافظه هارمونی با در نظر گرفتن نرخ و میزان تنظیم صدا، بردار هارمونی انتخاب شده، تنظیم گام می‌شود. اگر بردار هارمونی ایجاد شده از قبلی بهتر باشد، ماتریس حافظه هارمونی به روز رسانی می‌شود.

۳-۳-۲ الگوریتم بهینه‌سازی فاخته (COA)

الگوریتم بهینه‌سازی فاخته از رفتار فاخته‌ها در تولید مثل الهام گرفته شده است [۵۵]. در طبیعت فاخته‌ها، لانه نمی‌سازند و به جای آن تخم‌های خود را در لانه پرندگان دیگر می‌گذارند. و این تخم‌ها شانس جوجه شدن را در لانه پرندگان دیگر پیدا می‌کنند. هر چه شانس جوجه شدن تخم‌ها در لانه‌های

یک منطقه بیشتر باشد، آن منطقه برای تخم گذاری فاخته‌ها مناسب تر است. در یک مسئله بهینه‌سازی، جواب بهینه را می‌توان در اطراف این مناطق پیدا کرد. به طور کلی فاخته‌ها، تلاش می‌کنند تا از تخم‌های خود محافظت کنند. به همین منظور تخم‌های خود را هم‌رنگ با تخم‌های پرندۀ میزبان می‌کنند تا پرندۀ میزبان تخم‌های فاخته را شناسایی نکند. و همچنین آن‌ها به مناطق امن مهاجرت می‌کنند تا تخم‌هایشان در امان باشد.

در یک مسئله بهینه‌سازی، در ابتدا مانند هر الگوریتم بهینه‌سازی دیگر، یک جمعیت اولیه از فاخته‌ها تشکیل می‌شود که هر کدام از آن‌ها موقعیتی در فضای مسئله دارند. هر کدام از فاخته‌ها در جمعیت اولیه، تعدادی تخم در محیط اطراف خود می‌گذارد. این تخم‌ها به جوجه تبدیل شده و سرانجام به یک پرندۀ بالغ تبدیل می‌شوند. این فاخته‌ها یک جامعه را تشکیل می‌دهند. هر جامعه یک زیستگاه برای زندگی دارد. بهترین زیستگاه در میان همه جوامع مقصد همه فاخته‌ها خواهد بود. بنابراین فاخته‌ها در تلاش برای مهاجرت به بهترین زیستگاه برای تخم گذاری هستند.

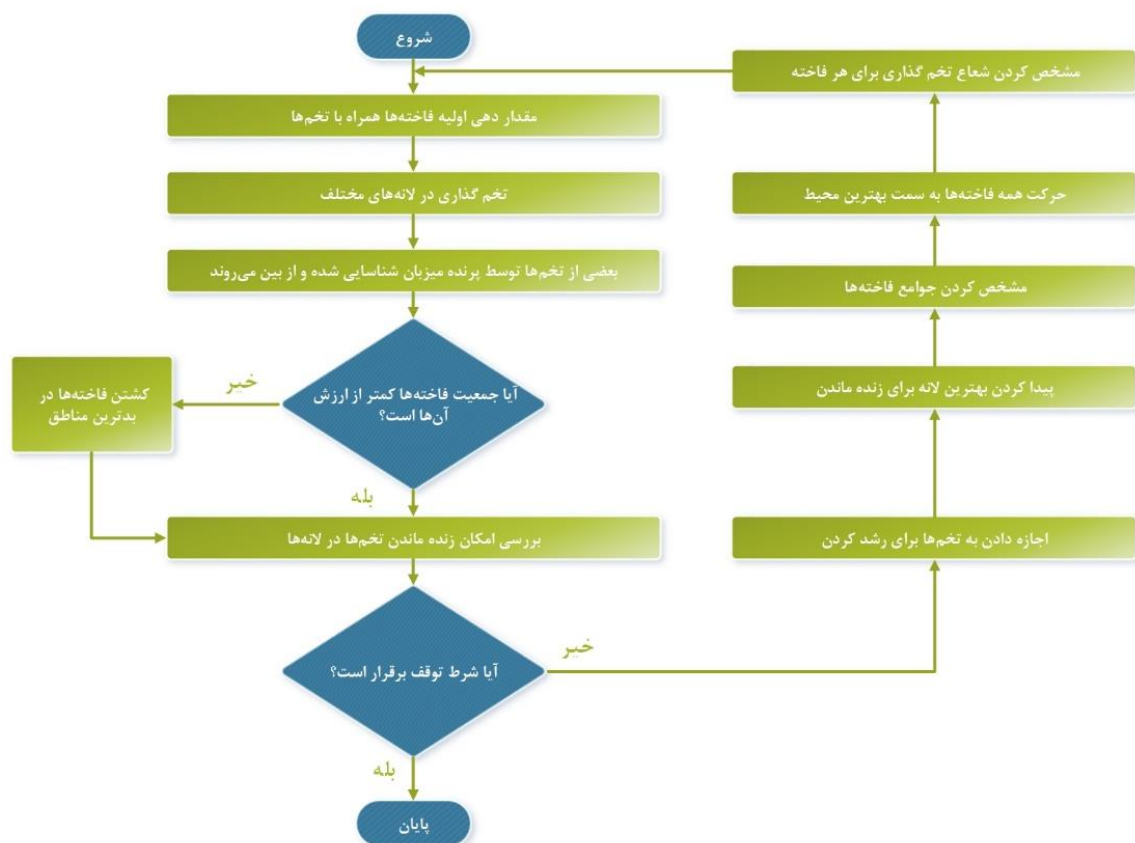
در یک مسئله بهینه‌سازی، یک زیستگاه، یک آرایه N -بعدی می‌باشد.

$$habitat = [x_1, x_2, \dots, x_N] \quad (3-15)$$

شعاع تخم گذاری فاخته‌ها از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$Egg \ Laying \ Radius = \alpha \times \frac{Nunber \ of \ current \ cuckoo's \ eggs}{Total \ number \ of \ eggs} \times (var_{max} - var_{min}) \quad (3-16)$$

در ادامه فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی فاخته نشان داده شده است (شکل ۳-۱۰).



شکل ۱۰-۳: فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی فاخته (COA)

در شکل ۱۰-۳، در ابتدا، فاخته‌ها و تخم‌های آن‌ها مقدار دهی می‌شوند. در مرحله بعد، فاخته‌ها در لانه‌های پرندگان دیگر تخم می‌گذارند. بعضی از تخم‌های فاخته‌ها، توسط پرندگان میزبان از بین می‌روند. اگر جمعیت فاخته‌ها از ارزش آن‌ها کمتر باشد، امکان زنده ماندن تخم‌ها در لانه‌ها وجود دارد. بنابراین تخم‌ها در این لانه‌ها، به جوجه تبدیل شده و جوامعی از فاخته‌ها تشکیل می‌شود. این فاخته‌ها به سمت بهترین مناطق برای تخم‌گذاری حرکت می‌کنند. و در این مناطق شعاع تخم‌گذاری آن‌ها مشخص می‌شود. و این فرآیند تا جایی ادامه پیدا می‌کند که شرط توقف برقرار شود.

۳-۳-۳ الگوریتم چرخه آب (WCA)

الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب یک الگوریتم فراابتکاری است که از فرآیند چرخه آب در طبیعت الهام گرفته شده است. این الگوریتم براساس چگونگی شکل‌گیری نهرها، رودها و جاری شدن آنها به سمت دریا شکل گرفته است [۵۶]. فرآیندهای اصلی چرخه آب که در این الگوریتم استفاده شده است عبارتند از: باریدن باران، حرکت سطحی نهرها و رودخانه‌ها به سمت دریا و تبخیر و میعان.

در ابتدا جمعیتی از بارش باران شکل گرفته و به صورت یک آرایه N_{var} در می‌آید.

$$Raindrop = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n] \quad (3-17)$$

بنابراین N_{pop} برابر است با:

$$N_{pop} = \begin{bmatrix} Raindrop_1 \\ Raindrop_2 \\ Raindrop_3 \\ \vdots \\ Raindrop_{N_{pop}} \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

تعداد نهرها از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$N_{streams} = N_{pop} - N_{SR} \quad (3-19)$$

که در آن N_{SR} برابر با:

$$N_{SR} = \text{Number of Rivers} + \frac{1}{\text{Sea}} \quad (3-20)$$

با توجه به شدت جریان آب در دریا و رودخانه‌ها، هر نهر به یک رودخانه و یا دریا اختصاص داده می‌شود. حرکت نهرها به سمت دریا را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد.

$$\vec{X}_{Stream}^{t+1} = \vec{X}_{Stream}^t + rand \times C \times (\vec{X}_{Sea}^t - \vec{X}_{Stream}^t) \quad (3-21)$$

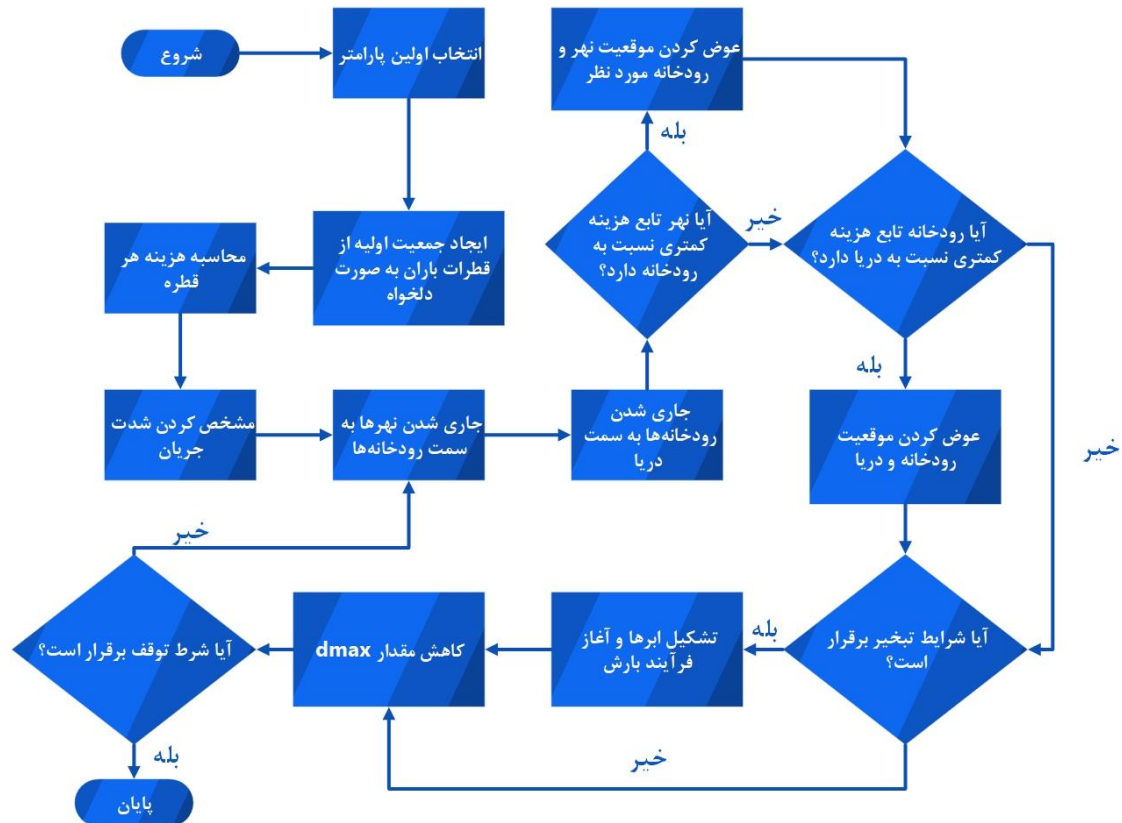
حرکت نهرها به سمت رودخانه‌ها از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\vec{X}_{Stream}^{t+1} = \vec{X}_{Stream}^t + rand \times C \times (\vec{X}_{River}^t - \vec{X}_{Stream}^t) \quad (3-22)$$

و بالاخره حرکت رودخانه‌ها به سمت دریا از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\vec{X}_{River}^{t+1} = \vec{X}_{River}^t + rand \times C \times (\vec{X}_{Sea}^t - \vec{X}_{River}^t) \quad (3-23)$$

در شکل ۳-۱۱ فلوچارت الگوریتم چرخه آب نشان داده شده است.

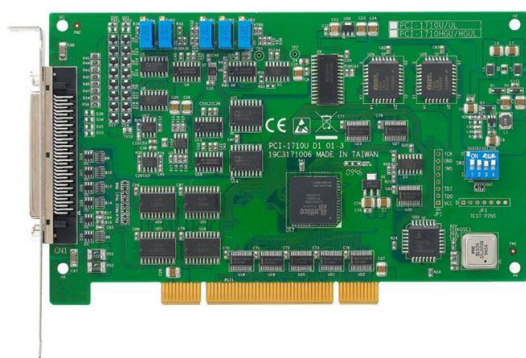


شکل ۳-۱۱: فلوچارت الگوریتم چرخه آب (WCA)

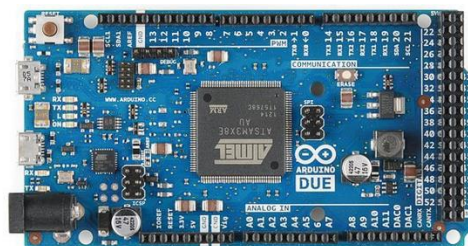
همانطور که در فلوچارت الگوریتم چرخه آب (شکل ۳-۱۱) دیده می‌شود، ابتدا جمعیتی از قطرات باران ایجاد می‌شود و هزینه هر کدام از آن‌ها محاسبه می‌شود. پس از مشخص شدن شدت جریان، نهرها به سمت رودخانه‌ها و رودخانه‌ها به سمت دریا جاری می‌شوند. اگر تابع هزینه نهر کمتر از رودخانه باشد، موقعیت نهر و رودخانه عوض می‌شود. و همچنین اگر تابع هزینه رودخانه کمتر از دریا باشد، موقعیت آن با دریا عوض می‌شود. سپس، با بررسی شرط تبخیر، ابرها تشکیل شده و فرآیند بارش باران ایجاد می‌شود. و این چرخه تا برقراری شرط توقف ادامه پیدا می‌کند.

۴-۳ پیاده سازی کنترل کننده فازی و PID در تست تجربی

برای پیاده سازی کنترل کننده PID و کنترل کننده فازی، داده های سنسور PT 100، توسط ماژول MAX31865 خوانده شده و به یک برد آردوینو DUE (شکل ۱۲-۳ الف) داده می شود. داده های دریافتی در برد آردوینو DUE، از پایه های ورودی سیگنال آنالوگ (Analog In) وارد شده و از پایه های خروجی سیگنال آنالوگ (DAC) به یک مبدل دیجیتال به آنالوگ^۱ (شکل ۱۲-۳ ب) داده شده و پس از آن وارد محیط سیمولینک شده و عملیات کنترلی بر روی آن انجام می شود.



(ب)



(الف)

شکل ۱۲-۳: (الف) برد آردوینو DUE (ب) مبدل دیجیتال به آنالوگ

۵-۳ نتایج

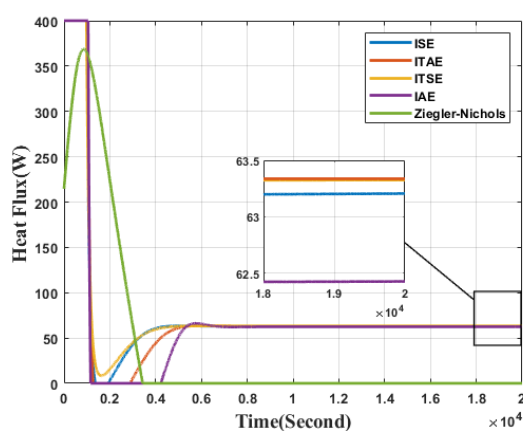
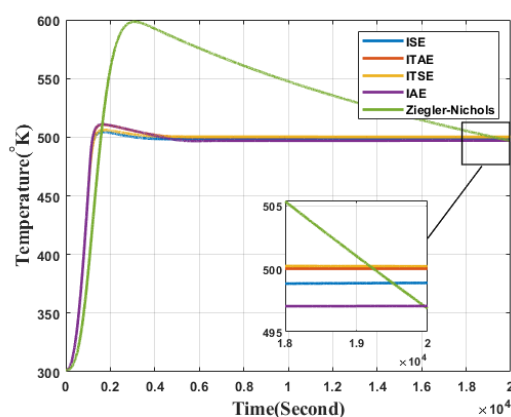
در تمام شبیه سازی ها، دمای مطلوب ۵۰۰ درجه کلوین و دمای اولیه ۳۰۱/۷ درجه کلوین می باشد. شار حرارتی در بازه ۰ تا ۴۰۰ وات در نظر گرفته شده است.

¹ Digital-to-Analog Converter

۳-۵-۱ کنترل کننده PID

۳-۵-۱-۱ نتایج الگوریتم GA

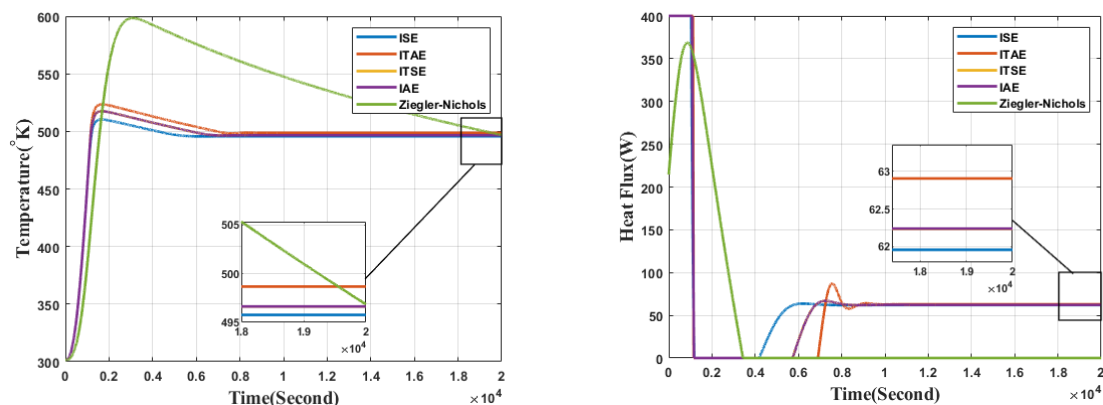
در شکل ۳-۱۳ رفتار سیستم حلقه بسته و ورودی کنترلی به دست آمده توسط الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، بهترین نتیجه به دست آمده از سیستم مربوط به معیار اندازه گیری خطا ITAE می باشد. زیرا علاوه بر آن که خطای حالت ماندگار کمتری دارد، فراجاهش آن نسبت به معیارهای دیگر کمتر می باشد. در تمامی معیارها ورودی کنترلی در ابتدا به صورت بیشینه و سپس کمینه می شود تا از فراجاهش جلوگیری شود. اگرچه، کمترین زمان نشست مربوط به معیار ISE و کمترین میزان مصرف انرژی مربوط به معیار IAE می باشد. در روش زیگلر-نیکولز، ورودی کنترلی به صورت افزایشی شروع می شود. ولی هنگامی که بقیه ورودی ها صفر می شوند، ورودی زیگلر-نیکولز صفر نمی شود.



شکل ۳-۱۳: رفتار سیستم حلقه بسته و ورودی کنترلی کنترل کننده PID به دست آمده توسط الگوریتم ژنتیک (GA)

۳-۵-۱-۲ نتایج الگوریتم IWO

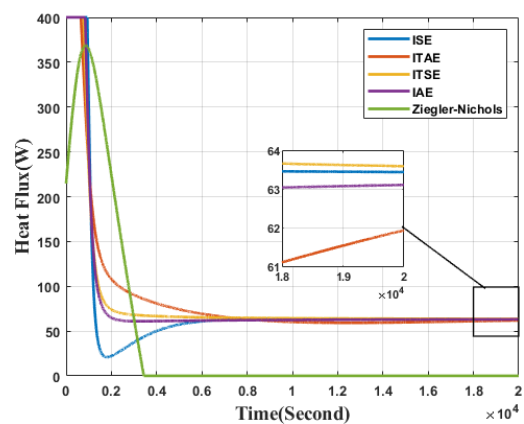
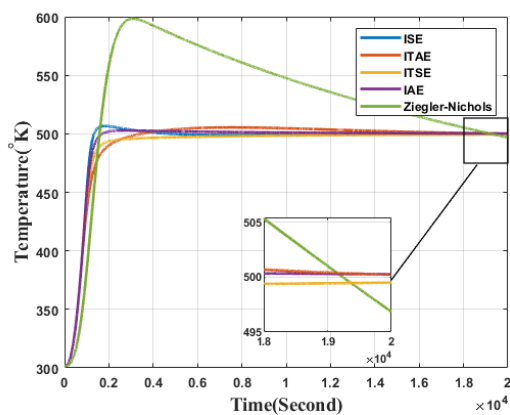
رفتار سیستم و ورودی کنترلی به دست آمده توسط الگوریتم علف هرز مهاجم، در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است. در این روش، فراجش‌ها، زمان‌های نشست و خطاهای حالت ماندگار بیشتر از روش GA است. مانند روش قبل، معیار ITAE، بهترین جواب را نسبت به بقیه معیارها دارد.



شکل ۳-۱۴: رفتار سیستم حلقه بسته و ورودی کنترلی کنترل کننده PID به دست آمده توسط الگوریتم علف هرز مهاجم (IWO)

۳-۵-۱-۳ نتایج الگوریتم FA

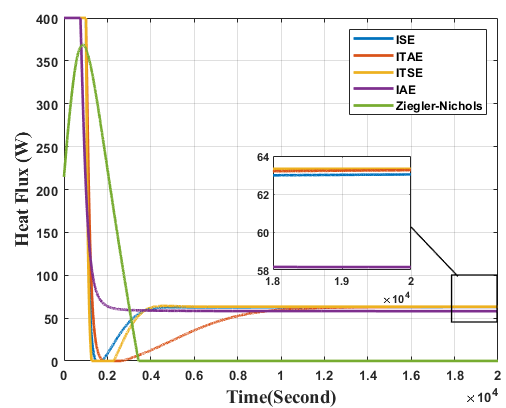
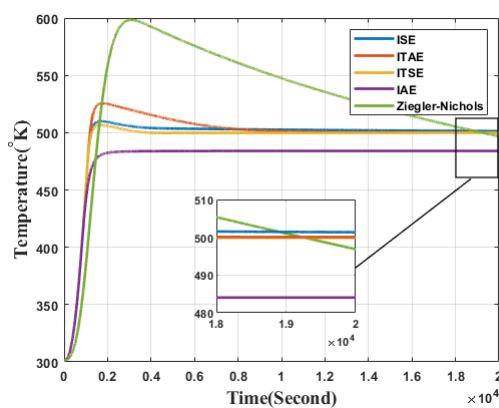
رفتار سیستم و ورودی کنترلی به دست آمده توسط الگوریتم FA در شکل ۳-۱۵ نشان داده شده است. در این روش، خطای حالت ماندگار در معیار ITAE نسبت به معیار ISE و IAE کمتر می‌باشد. معیار ISE کمترین زمان نشست را دارد. در مقایسه با روش GA، زمان نشست افزایش یافته است و ورودی کنترلی هیچ کدام از معیارها صفر نشده است.



شکل ۳-۱۵: رفتار سیستم حلقه بسته و ورودی کنترلی کنترل کننده PID به دست آمده توسط الگوریتم کرم شپ تاب (FA)

۴-۱-۵-۳ نتایج الگوریتم ICA

رفتار سیستم و ورودی کنترلی به دست آمده توسط الگوریتم ICA، در شکل ۳-۱۶ نشان داده شده است. در این روش معیار ITSE زمان برخاست کمتر، خطای حالت ماندگار کمتر و فراجهش کمتری دارد.



شکل ۳-۱۶: رفتار سیستم حلقه بسته و ورودی کنترلی کنترل کننده PID به دست آمده توسط الگوریتم رقابت استعماری (ICA)

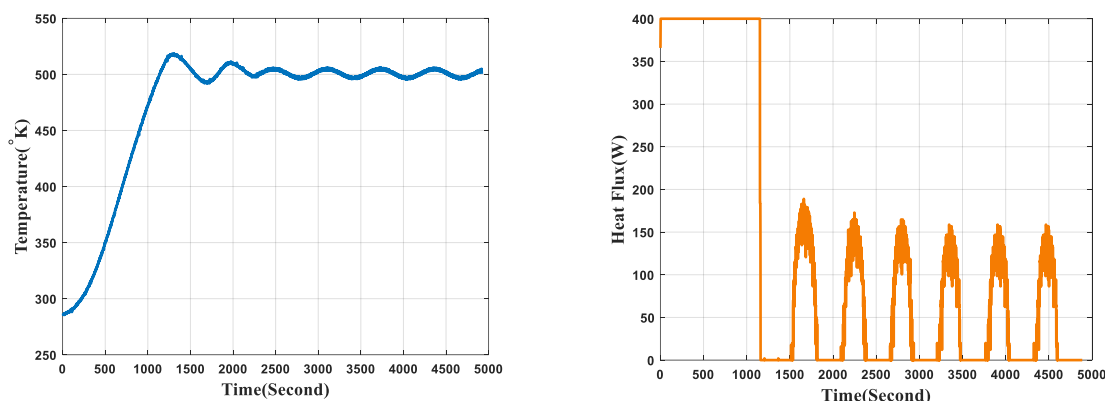
مقادیر تابع هزینه در هر روش بهینه‌سازی در جدول ۳-۳ نشان داده شده است. الگوریتم FA، بهترین نتیجه را در معیار IAE دارد. الگوریتم GA بهترین نتیجه را در معیار ISE و ITAE ارائه می‌دهد. و الگوریتم ICA بهترین نتیجه را در معیار ITSE دارد.

جدول ۳-۳: مقادیر تابع هزینه برای الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده شده در کنترل‌کننده PID

	IAE	ISE	ITAE	ITSE
GA	2.194e+05	2.478e+07	1.147e+08	9.008e+09
IWO	2.441e+05	2.512e+07	5.226e+08	1.227e+10
FA	1.815e+05	2.482e+07	5.935e+08	9.823e+09
ICA	4.662e+05	2.496e+07	4.659e+08	8.985e+09

۵-۱-۳ کنترل‌کننده PID بهینه شده در تست تجربی

رفتار سیستم و ورودی کنترلی در تست تجربی در شکل ۳-۱۷ نشان داده شده است.



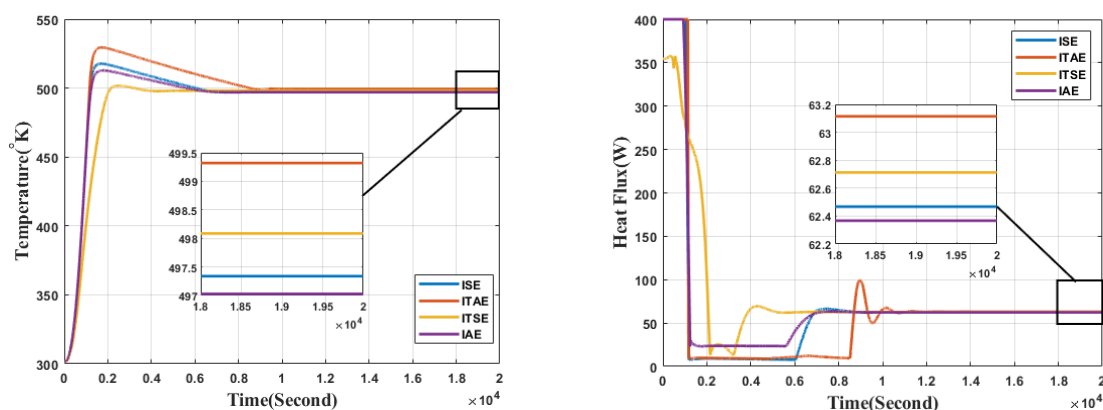
شکل ۳-۱۷: رفتار سیستم حلقه بسته و ورودی کنترلی کنترل‌کننده PID در تست تجربی

همانطور که دیده می‌شود، رفتار سیستم حلقه بسته همانند بهترین نتیجه به دست آمده در الگوریتم بهینه سازی کرم شب تاب می‌باشد. نوسان سیستم حول دمای مطلوب به دلیل دقت دستگاه اندازه گیری و اغتشاش می‌باشد. با استفاده از تجهیزات بهتر، نتایج بهتر خواهند شد. با مقایسه ورودی کنترلی با نتایج شبیه‌سازی‌ها مشاهده می‌شود که ورودی کنترلی در تست تجربی دارای حالتی نوسانی بوده که این مسئله به خاطر ماهیت PWM است.

۲-۵-۳ کنترل کننده فازی

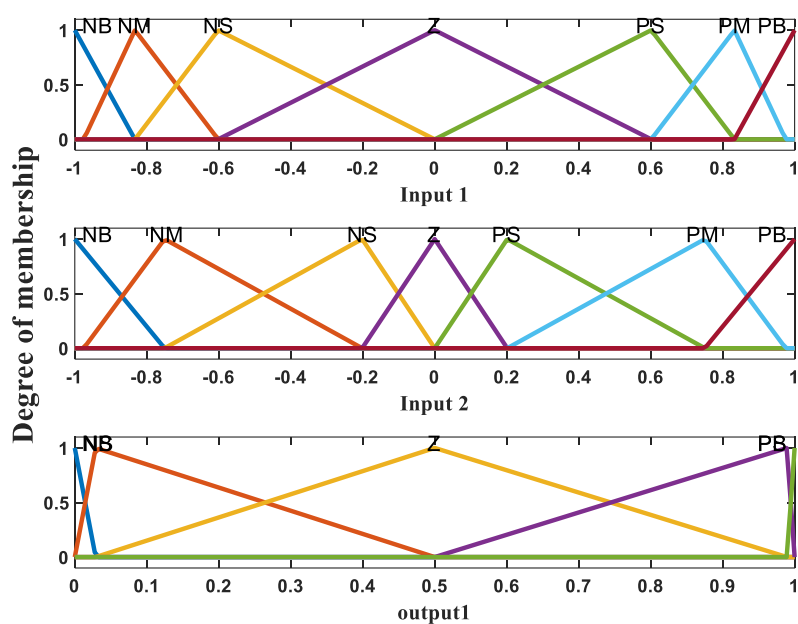
۳-۵-۲-۱ نتایج الگوریتم GA

رفتار سیستم و ورودی کنترلی به دست آمده توسط الگوریتم GA، در شکل ۳-۱۸ نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، معیار ITAE کمترین خطای حالت ماندگار را دارد، اما فراجاهش آن بسیار زیاد است. بنابراین مطلوب نمی‌باشد. بهترین نتیجه مربوط به معیار ITSE است. زیرا علاوه بر آن که فراجاهش آن از همه کمتر است، خطای حالت ماندگار کمی هم دارد.

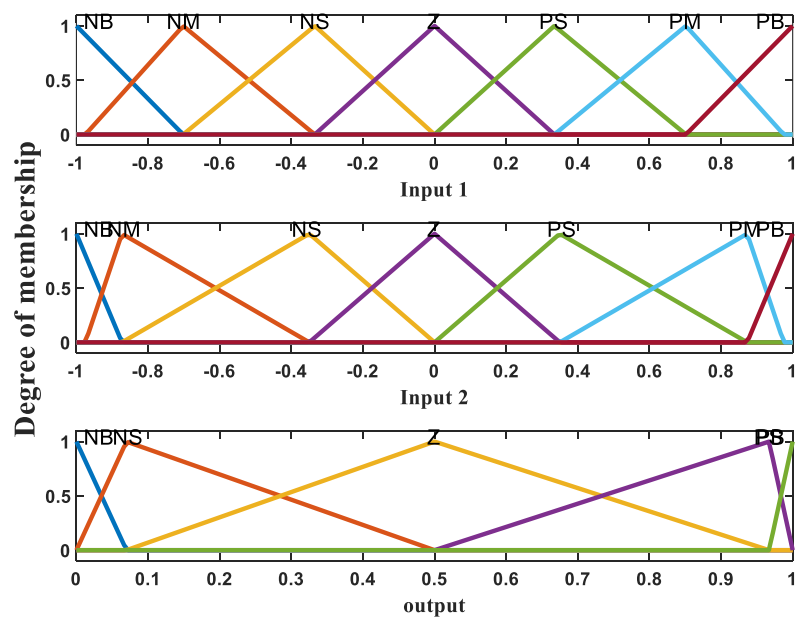


شکل ۳-۱۸: رفتار سیستم حلقه بسته و ورودی کنترلی کنترل کننده فازی به دست آمده توسط الگوریتم ژنتیک (GA)

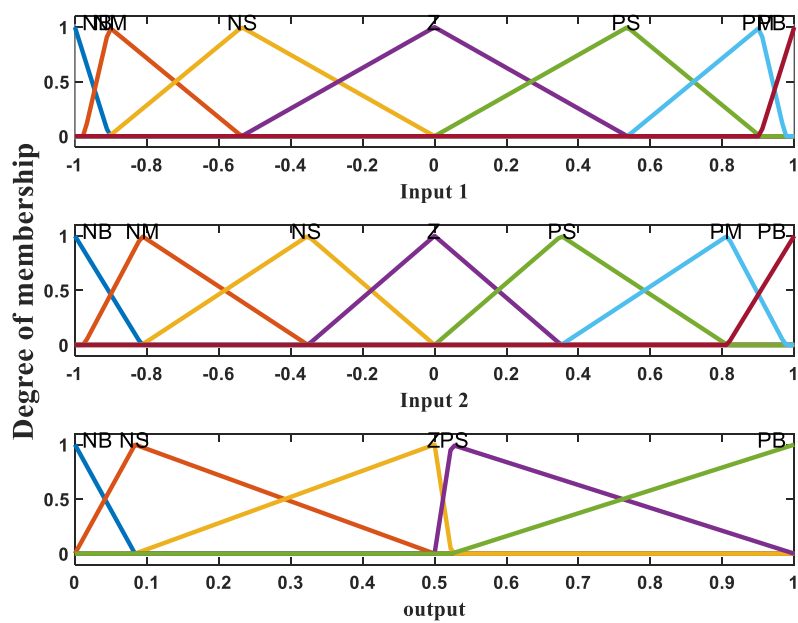
در شکل ۳-۱۹ تا ۳-۲۲، توابع عضویت ورودی و خروجی، بعد از بهینه‌سازی برای هر معیار نشان داده شده است. با توجه به رفتار سیستم، می‌توان گفت که توابع عضویتی که در شکل ۳-۲۱ نشان داده شده است، بهترین حالت برای توابع عضویت ورودی و خروجی در بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک است. قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک برای هر معیار در جدول ۳-۳ تا ۳-۶ نشان داده شده است. با توجه به رفتار سیستم بهترین قوانین فازی به دست آمده توسط الگوریتم ژنتیک، در جدول ۳-۵ می‌باشد.



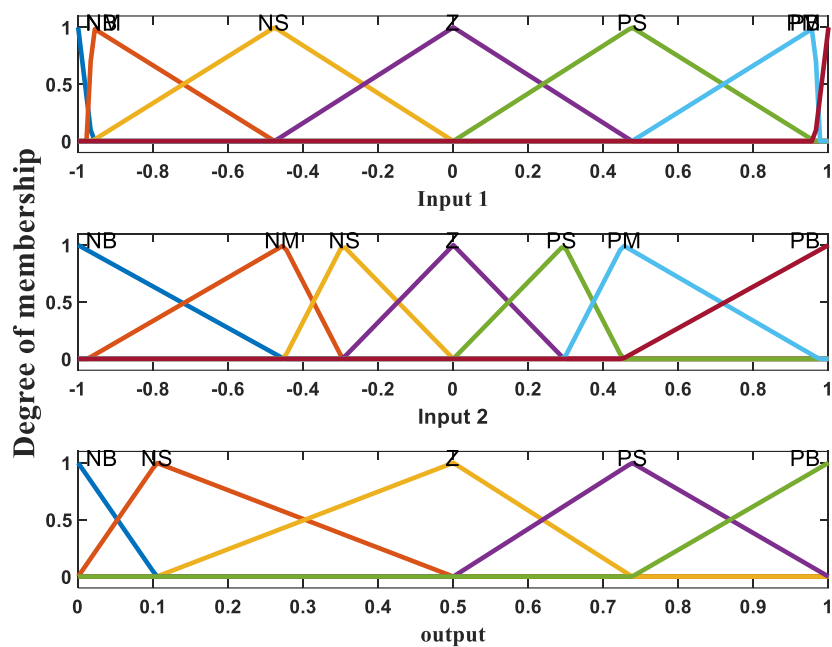
شکل ۱۹-۳: توابع فازی ورودی و خروجی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک با معیار ISE



شکل ۲۰-۳: توابع فازی ورودی و خروجی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک با معیار ITAE



شکل ۲۱-۳: توابع فازی ورودی و خروجی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک با معیار ITSE



شکل ۲۲-۳: توابع فازی ورودی و خروجی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک با معیار IAE

جدول ۳-۴: قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک با معیار ISE

Error								
Change of Error		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
	NB	PS	Z	PB	NB	NB	NB	NB
	NM	Z	PB	NB	NB	NB	NB	PB
	NS	PB	NB	NB	NB	NB	PB	PB
	Z	NB	NB	NB	NB	PB	PB	PB
	PS	NB	NB	NB	PB	PB	PB	NB
	PM	NB	NB	PB	PB	PB	NB	Z
	PB	NB	PB	PB	PB	NB	Z	NS

جدول ۳-۵: قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک با معیار ITAE

Error								
Change of Error		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
	NB	PB	PB	PB	PB	NB	NB	NB
	NM	PB	PB	PB	NB	NB	NB	PB
	NS	PB	PB	NB	NB	NB	PB	PB
	Z	PB	NB	NB	NB	PB	PB	NB
	PS	NB	NB	NB	PB	PB	NB	NB
	PM	NB	NB	PB	PB	NB	NB	NB
	PB	NB	PB	PB	NB	NB	NB	NB

جدول ۳-۶: قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک با معیار ITSE

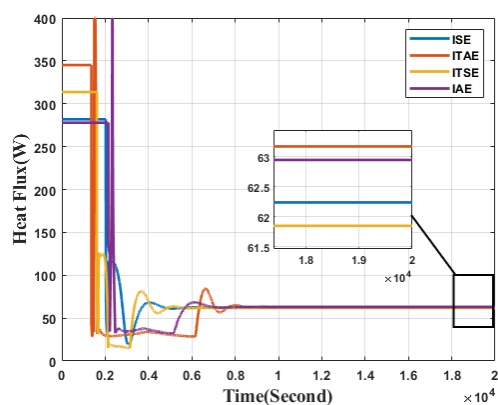
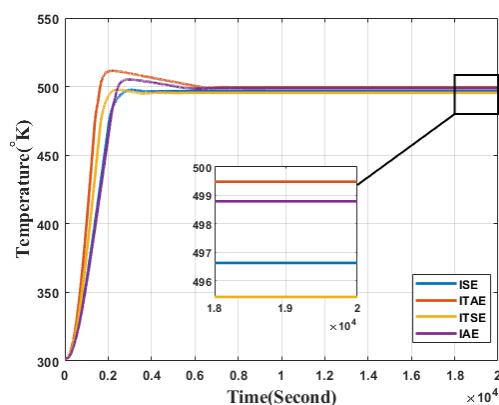
Error								
Change of Error		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
	NB	NB	NS	NS	NB	NB	NS	NB
	NM	NS	NS	NB	NB	NS	NB	PS
	NS	NS	NB	NB	NS	NB	PS	PB
	Z	NB	NB	NS	NB	PS	PB	PB
	PS	NB	NS	NB	PS	PB	PB	PS
	PM	NS	NB	PS	PB	PB	PS	PS
	PB	NB	PS	PB	PB	PS	PS	PB

جدول ۳-۷: قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک با معیار IAE

Error								
Change of Error		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
	NB	NS	NS	NS	PB	NS	NB	NB
	NM	NS	NS	PB	NS	NB	NB	PB
	NS	NS	PB	NS	NB	NB	PB	PS
	Z	PB	NS	NB	NB	PB	PS	NB
	PS	NS	NB	NB	PB	PS	NB	PS
	PM	NB	NB	PB	PS	NB	PS	PS
	PB	NB	PB	PS	NB	PS	PS	PS

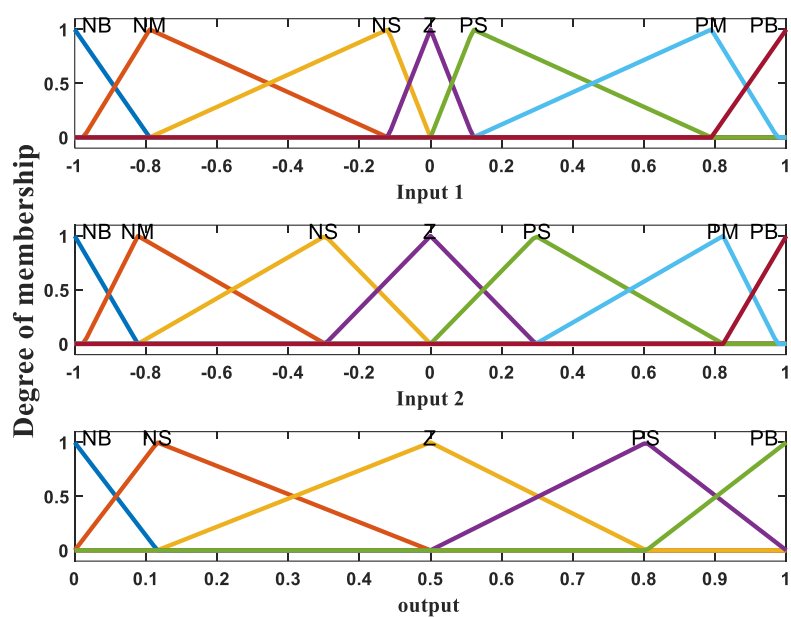
۳-۵-۲-۲ نتایج الگوریتم HS

رفتار سیستم و ورودی کنترلی به دست آمده توسط الگوریتم HS، در شکل ۳-۲۳ نشان داده شده است. می‌توان گفت معیار IAE، بهترین عملکرد را دارد زیرا فراجش آن کم بوده و همچنین خطای حالت ماندگار آن هم کم می‌باشد. با وجود این که معیار ITAE، خطای حالت ماندگار کمتری دارد، اما فراجش آن زیاد می‌باشد که مطلوب نیست.

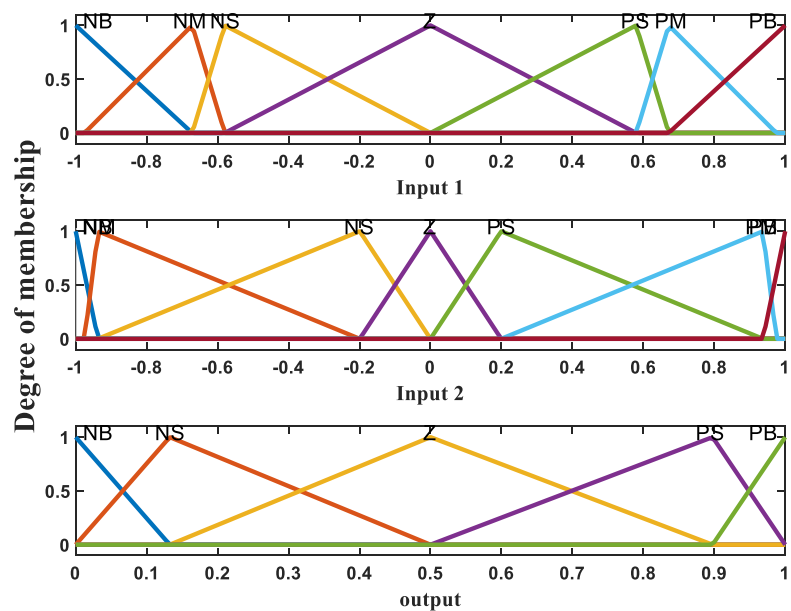


شکل ۲۳-۳: رفتار سیستم حلقه بسته و ورودی کنترلی کنترل کننده فازی به دست آمده توسط الگوریتم جستجوی هارمونی (HS)

در شکل ۲۴-۳ تا ۲۷-۳، توابع عضویت ورودی و خروجی، بعد از بهینه سازی توسط الگوریتم HS برای هر معیار نشان داده شده است. با توجه به رفتار سیستم، می توان گفت که توابع عضویتی که در شکل ۲۷-۳ نشان داده شده است، بهترین حالت برای توابع عضویت ورودی و خروجی در بهینه سازی با الگوریتم جستجوی هارمونی است. قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم جستجوی هارمونی در جدول ۳-۱۰ تا ۳-۷ نشان داده شده است. با توجه به رفتار سیستم، بهترین قوانین فازی به دست آمده توسط الگوریتم جستجوی هارمونی، جدول ۳-۱۰ می باشد.

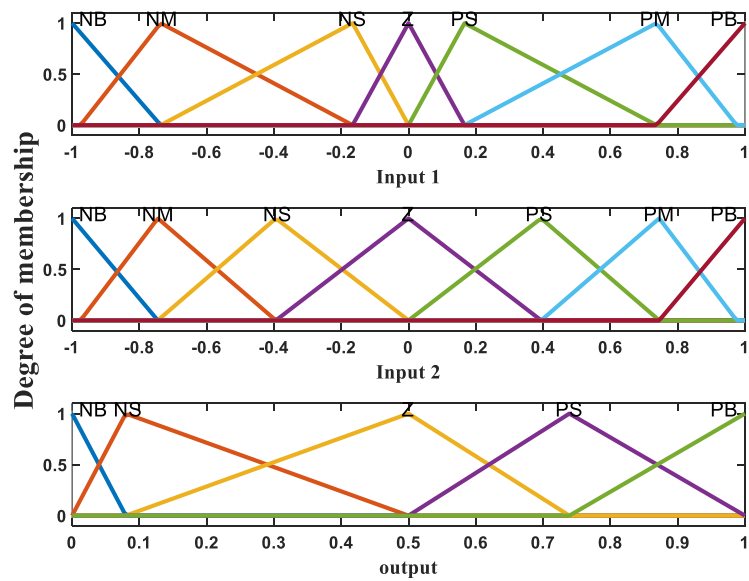


شکل ۲۴-۳: توابع فازی ورودی و خروجی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم جستجوی هارمونی با معیار ISE



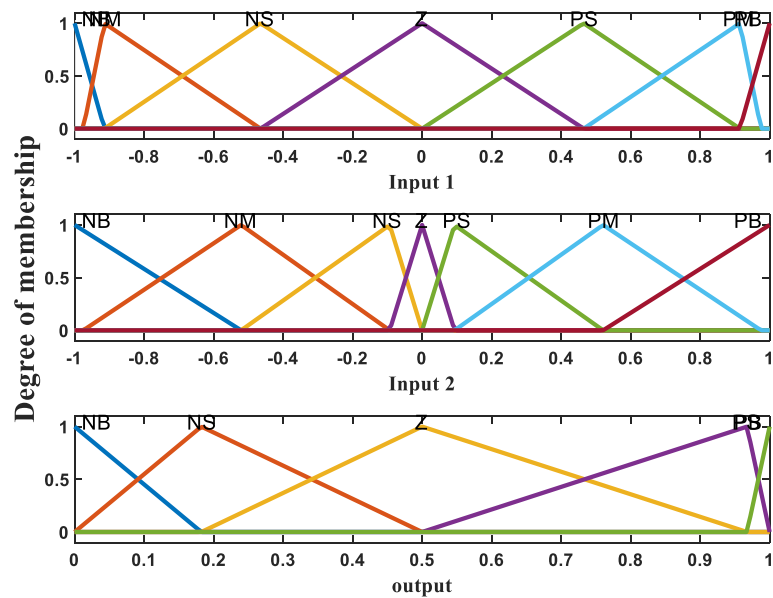
شکل ۲۵-۳: توابع فازی ورودی و خروجی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم جستجوی هارمونی با معیار

ITAE



شکل ۲۶-۳: توابع فازی ورودی و خروجی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم جستجوی هارمونی با معیار

ITSE



شکل ۲۷-۳: توابع فازی ورودی و خروجی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم جستجوی هارمونی با معیار

IAE

جدول ۸-۳: قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم جستجوی هارمونی با معیار ISE

Error								
Change of Error		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
	NB	PB	PB	PS	PB	PS	PB	NB
	NM	PB	PS	PB	PS	PB	NB	NB
	NS	PS	PB	PS	PB	NB	NB	NS
	Z	PB	PS	PB	NB	NB	NS	NB
	PS	PS	PB	NB	NB	NS	NB	NS
	PM	PB	NB	NB	NS	NB	NS	NB
	PB	NB	NB	NS	NB	NS	NB	NB

جدول ۹-۳: قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم جستجوی هارمونی با معیار ITAE

Error								
Change of Error		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
	NB	PB	PS	NB	PB	PB	NB	NB
	NM	PS	NB	PB	PB	NB	NB	PB
	NS	NB	PB	PB	NB	NB	PB	NB
	Z	PB	PB	NB	NB	PB	NB	NB
	PS	PB	NB	NB	PB	NB	NB	PB
	PM	NB	NB	PB	NB	NB	PB	NS
	PB	NB	PB	NB	NB	PB	NS	NB

جدول ۳-۱۰: قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم جستجوی هارمونی با معیار ITSE

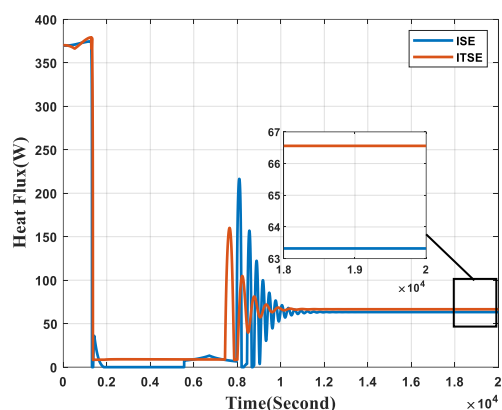
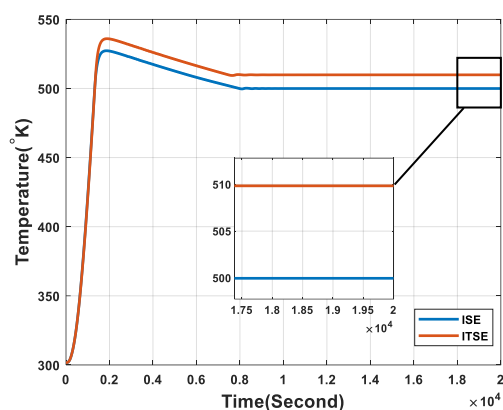
Error								
Change of Error		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
	NB	NB	NS	NB	PB	PS	PB	NB
	NM	NS	NB	PB	PS	PB	NB	NB
	NS	NB	PB	PS	PB	NB	NB	NS
	Z	PB	PS	PB	NB	NB	NS	NB
	PS	PS	PB	NB	NB	NS	NB	PB
	PM	PB	NB	NB	NS	NB	PB	PS
	PB	NB	NB	NS	NB	PB	PS	PB

جدول ۳-۱۱: قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم جستجوی هارمونی با معیار IAE

Error								
Change of Error		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
	NB	NS	NS	PS	PS	PB	NB	NB
	NM	NS	PS	PS	PB	NB	NB	PB
	NS	PS	PS	PB	NB	NB	PB	NB
	Z	PS	PB	NB	NB	PB	NB	NS
	PS	PB	NB	NB	PB	NB	NS	NS
	PM	NB	NB	PB	NB	NS	NS	PS
	PB	NB	PB	NB	NS	NS	PS	PS

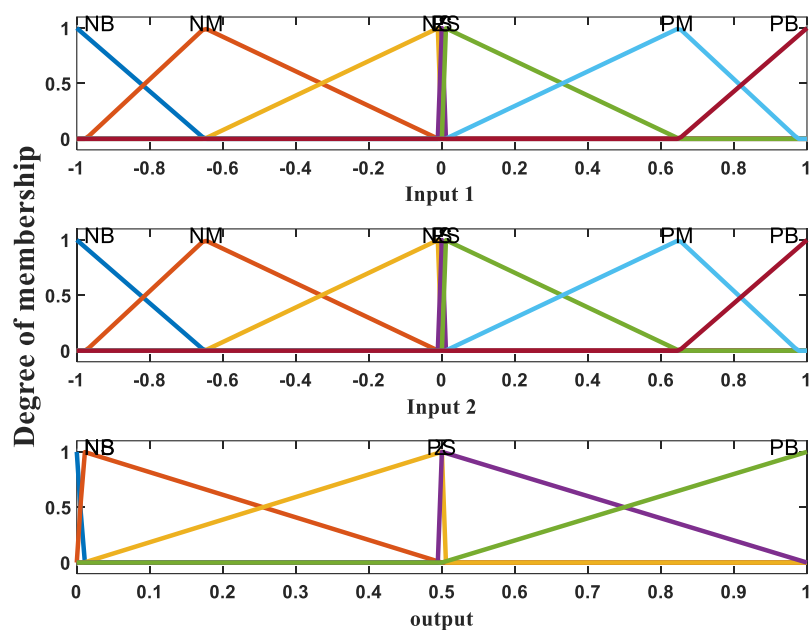
۳-۵-۲-۳ نتایج الگوریتم COA

رفتار سیستم و ورودی کنترلی به دست آمده توسط الگوریتم COA، در شکل ۳-۲۸، نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، معیار ISE عملکرد بهتری نسبت به معیار ITSE دارد چرا که فراجاهش بیشتری نسبت به معیار ITSE دارد و خطای حالت ماندگار ندارد. اما با این وجود فراجاهش آن زیاد است. به دلیل آن که معیار IAE و ITAE به همگرایی نرسیدند، نتایج آن‌ها آورده نشده است.

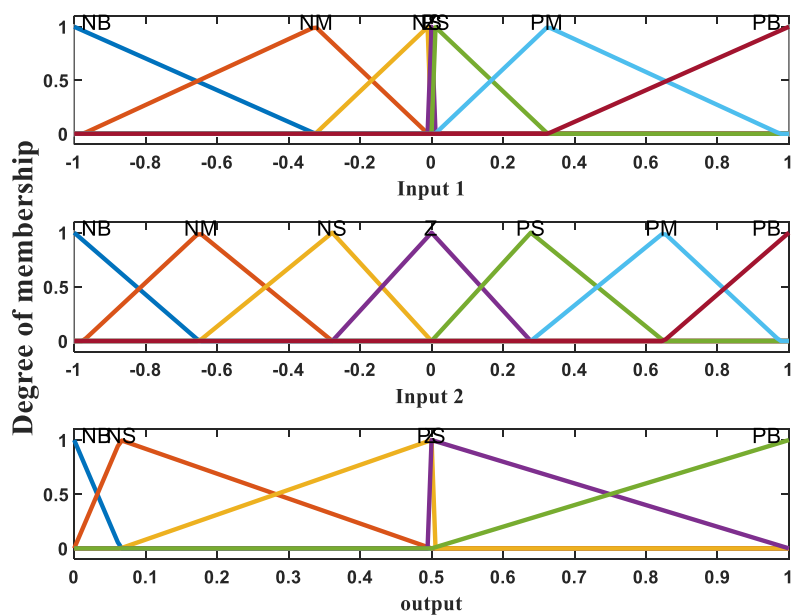


شکل ۳-۲۸: رفتار سیستم حلقه بسته و ورودی کنترلی کنترل کننده فازی به دست آمده توسط الگوریتم بهینه‌سازی فاخته (COA)

در شکل ۳-۲۹ و ۳-۳۰، توابع عضویت ورودی و خروجی، بعد از بهینه‌سازی توسط الگوریتم COA برای معیارهای ISE و ITSE نشان داده شده است. با توجه به رفتار سیستم، می‌توان گفت که توابع عضویتی که در شکل ۳-۲۹ نشان داده شده است، بهترین حالت برای توابع عضویت ورودی و خروجی در الگوریتم بهینه‌سازی فاخته می‌باشد. قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم فاخته در جدول ۳-۱۱ و ۳-۱۲ نشان داده شده است. با توجه به رفتار سیستم، بهترین قوانین فازی به دست آمده توسط الگوریتم فاخته جدول ۳-۱۱ می‌باشد.



شکل ۲۹-۳: توابع فازی ورودی و خروجی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم بهینه‌سازی فاخته با معیار ISE



شکل ۳۰-۳: توابع فازی ورودی و خروجی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم بهینه‌سازی فاخته با معیار ITSE

ITSE

جدول ۳-۱۲: قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم فاخته با معیار ISE

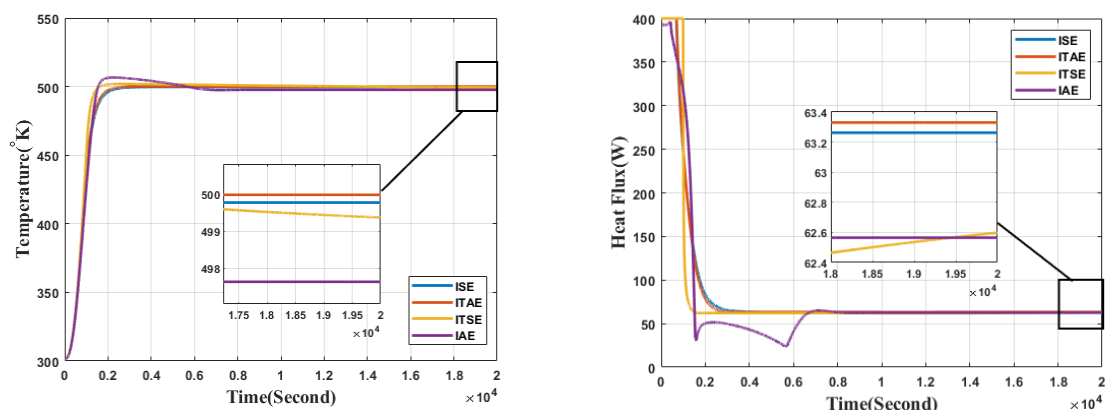
Error								
Change of Error		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
	NB	NB	NB	NB	NS	NB	NB	NB
	NM	NB	NB	NS	NB	NB	NB	PB
	NS	NB	NS	NB	NB	NB	PB	PB
	Z	NS	NB	NB	NB	PB	PB	PS
	PS	NB	NB	NB	PB	PB	PS	PB
	PM	NB	NB	PB	PB	PS	PB	PB
	PB	NB	PB	PB	PS	PB	PB	PB

جدول ۳-۱۳: قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم فاخته با معیار ITSE

Error								
Change of Error		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
	NB	NB	NB	PS	NB	NB	NB	PB
	NM	NB	PS	NB	NB	NB	PB	PB
	NS	PS	NB	NB	NB	PB	PB	PB
	Z	NB	NB	NB	PB	PB	PB	PB
	PS	NB	NB	PB	PB	PB	PB	NS
	PM	NB	PB	PB	PB	PB	NS	PB
	PB	PB	PB	PB	PB	NS	PB	PB

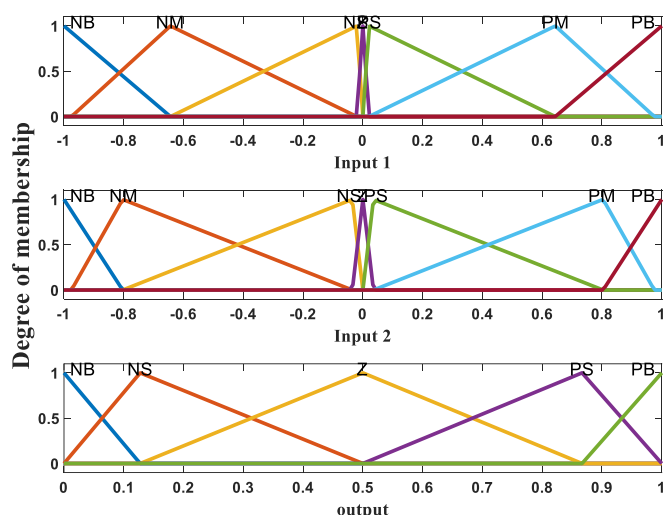
۴-۲-۵ نتایج الگوریتم WCA

رفتار سیستم و ورودی کنترلی به دست آمده توسط الگوریتم WCA، در شکل ۳-۳۱ نشان داده شده است. در این الگوریتم معیار ITAE و ISE، نتیجه بهتری نسبت به بقیه دارد. همچنین معیار IAE و ITSE، عملکرد بسیار خوبی را در زمان برخاست دارند. اما به دلیل آن که خطای حالت ماندگار آنها بیشتر از معیار ITAE و ISE می‌باشد، مطلوب نیستند. در مجموع بهترین عملکرد مربوط به معیار ITAE است.

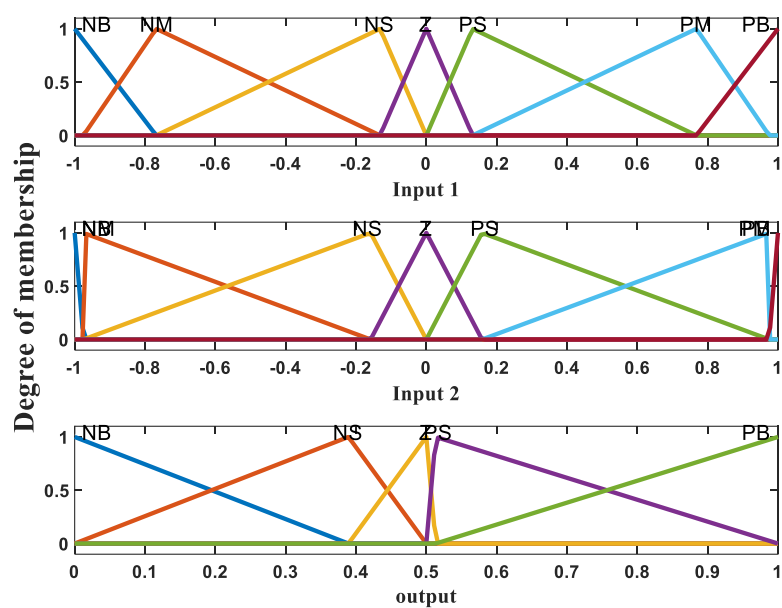


شکل ۳-۳۱: رفتار سیستم حلقه بسته و ورودی کنترلی کنترل کننده فازی به دست آمده توسط الگوریتم چرخه آب (WCA)

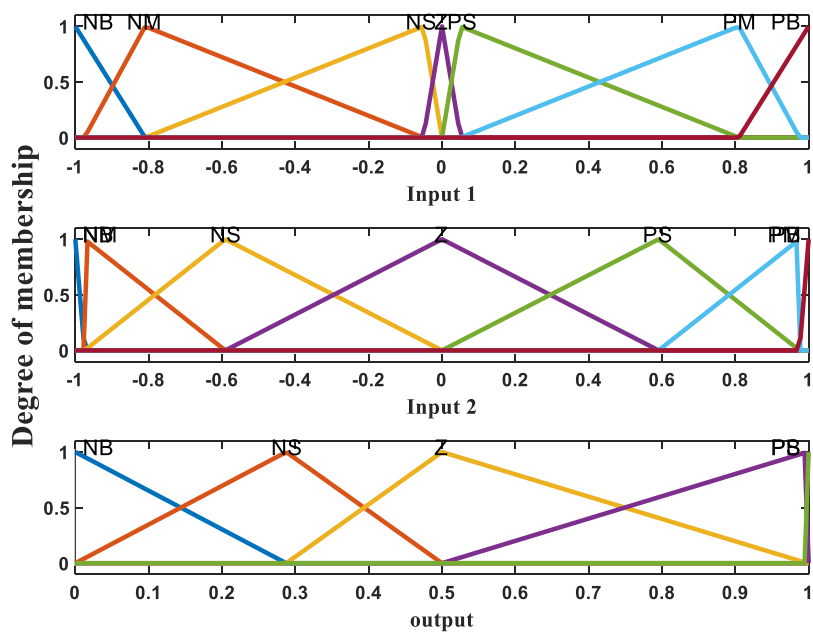
در شکل ۳-۳۲ تا ۳-۳۵، توابع عضویت ورودی و خروجی، بعد از بهینه‌سازی توسط الگوریتم WCA برای هر معیار نشان داده شده است. با توجه به اینکه عملکرد سیستم در معیار ISE و ITAE بهتر از حالت‌های دیگر بوده است، می‌توان گفت که توابع عضویتی که در شکل ۳-۳۲ و ۳-۳۳ نشان داده شده است، بهترین حالت برای توابع عضویت ورودی و خروجی در الگوریتم چرخه آب می‌باشد. قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم چرخه آب، در جدول ۳-۱۳ تا ۳-۱۴ نشان داده شده است. با توجه به رفتار سیستم، بهترین قوانین فازی به دست آمده توسط این الگوریتم در جدول ۳-۱۳ و جدول ۳-۱۴ می‌باشد.



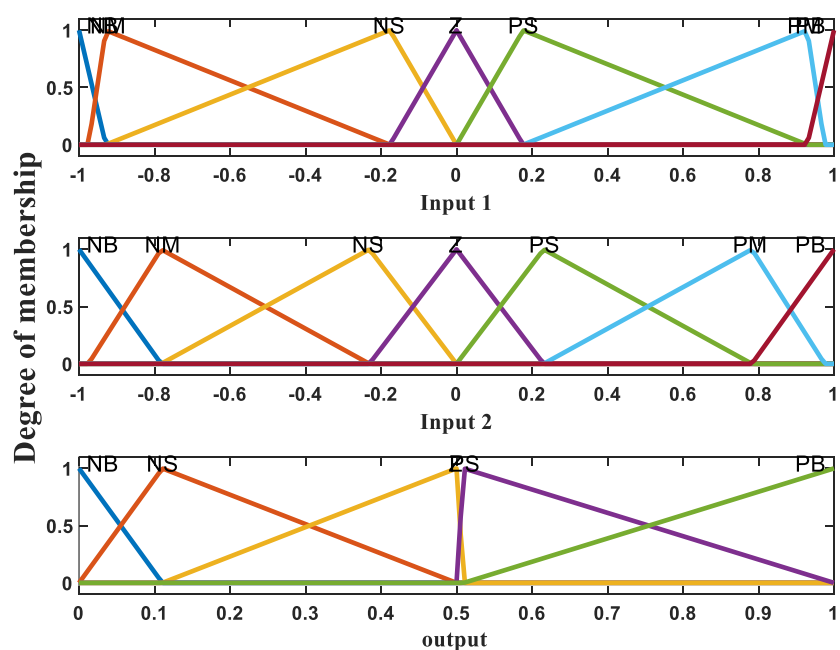
شکل ۳-۳۲: توابع فازی ورودی و خروجی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم چرخه آب با معیار ISE



شکل ۳-۳۳: توابع فازی ورودی و خروجی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم چرخه آب با معیار ITAE



شکل ۳-۳۴: توابع فازی ورودی و خروجی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم چرخه آب با معیار ITSE



شکل ۳-۳۵: توابع فازی ورودی و خروجی پس از بهینه‌سازی توسط الگوریتم چرخه آب با معیار IAE

جدول ۳-۱۴: قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم چرخه آب با معیار ISE

Error								
Change of Error		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
	NB	Z	Z	NB	PS	PS	PB	NB
	NM	Z	NB	PS	PS	PB	NB	NB
	NS	NB	PS	PS	PS	NB	NB	NS
	Z	PS	PS	PS	NB	NB	NS	NS
	PS	PS	PS	NB	NB	NS	NS	PB
	PM	PS	NB	NB	NS	NS	PB	Z
	PB	NB	NB	NS	NS	PB	Z	Z

جدول ۳-۱۵: قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم چرخه آب با معیار ITAE

Error								
Change of Error		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
	NB	PB	PS	PB	NS	Z	NB	NB
	NM	PS	PB	NS	Z	NB	NB	PB
	NS	PB	NS	Z	NB	NB	PB	Z
	Z	NS	Z	NB	NB	PB	Z	PS
	PS	Z	NB	NB	PB	Z	PS	NB
	PM	NB	NB	PB	Z	PS	NB	NS
	PB	NB	PB	Z	PS	NB	NS	NB

جدول ۳-۱۶: قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم چرخه آب با معیار ITSE

Error								
Change of Error		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
	NB	PS	PB	NB	PB	NB	NB	NB
	NM	PB	NB	PB	NB	NB	NB	PB
	NS	NB	PB	NB	NB	NB	PB	PB
	Z	PB	NB	NB	NB	PB	PB	NB
	PS	NB	NB	NB	PB	PB	NB	PB
	PM	NB	NB	PB	PB	NB	PB	NB
	PB	NB	PB	PB	NB	PB	NB	NS

جدول ۳-۱۷: قوانین فازی بهینه شده توسط الگوریتم چرخه آب با معیار IAE

Error								
Change of Error		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
	NB	Z	PB	NB	NB	Z	NS	NB
	NM	PB	NB	NB	Z	NS	NB	PS
	NS	NB	NB	Z	NS	NB	PS	Z
	Z	NB	Z	NS	NB	PS	Z	PB
	PS	Z	NS	NB	PS	Z	PB	PB
	PM	NS	NB	PS	Z	PB	PB	NB
	PB	NB	PS	Z	PB	PB	NB	Z

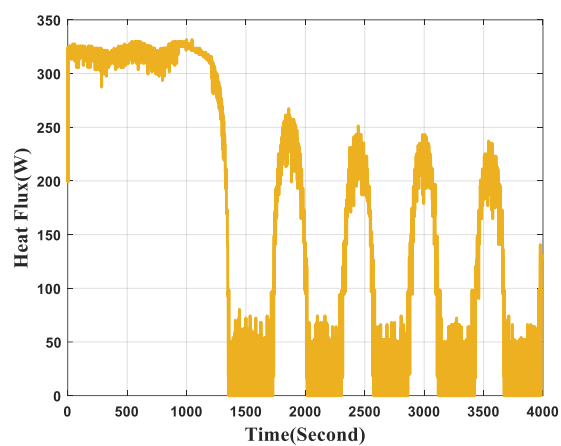
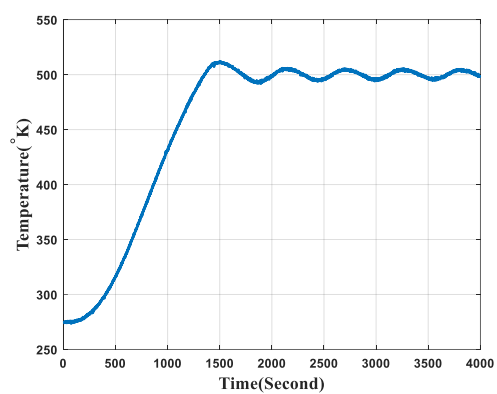
مقادیر تابع هزینه در هر الگوریتم بهینه‌سازی، در جدول ۳-۱۷ نشان داده شده است. الگوریتم WCA، بهترین عملکرد را در هر چهار معیار دارد.

جدول ۳-۱۸: مقادیر تابع هزینه برای الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده شده در کنترل‌کننده فازی

	IAE	ISE	ITAE	ITSE
GA	2.2702e+05	2.5403e+07	5.8581e+08	1.5195e+10
HS	3.0367e+05	4.1266e+07	2.9504e+08	2.2348e+10
COA	-	3.2494e+07	-	4.0701e+10
WCA	2.2138e+05	2.5373e+07	9.4764e+07	9.0480e+09

۳-۵-۲-۵ کنترل‌کننده فازی بهینه شده در تست تجربی

رفتار سیستم و ورودی کنترلی در تست تجربی در شکل ۳-۳۶ نشان شده است. همانطور که دیده می‌شود، رفتار سیستم و ورودی کنترلی در تست تجربی مشابه بهترین کنترل فازی بهینه شده در الگوریتم چرخه آب می‌باشد. علت نوسانی شدن ورودی کنترلی، ماهیت عملکرد PWM می‌باشد.



شکل ۳۶-۳: رفتار سیستم حلقه بسته و ورودی کنترلی کنترل کننده فازی در تست تجربی

فصل ۴: جمع‌بندی

یک مدل ریاضی برای نشان دادن انتقال حرارت در یک آون خلاء ارائه شده است. در ابتدا، مدل حرارتی سیستم با استفاده از قوانین انتقال حرارت به دست آمده است. سپس روابط مربوط به آن با استفاده از قوانین KVL و KCL به دست آمده است. این مدل به شکل یک دستگاه معادلات دیفرانسیل معمولی غیرخطی است. این مدل نه تنها می‌تواند برای طراحی ابعادی و بهینه‌سازی حرارتی آون‌ها و کوره‌ها استفاده شود، بلکه برای طراحی کنترل‌کننده‌های مدل‌مبنا و کاربردهای برخط نیز بسیار مفید است. جهت اعتبارسنجی مدل ارائه شده، از یک سیستم تجربی استفاده شده است. تطابق نتایج مدل غیرخطی ارائه شده و سیستم تجربی، نشان‌دهنده اعتبار مدل ارائه شده می‌باشد. برای شناسایی پارامترهای سیستم به دلیل غیرخطی بودن سیستم از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک استفاده شده است. همچنین جهت بررسی پارامترهای حساس بر خروجی سیستم، از شبیه‌سازی مونت کارلو برای آنالیز حساسیت کلی استفاده شده است. در این روش، از نمونه‌برداری لاتین‌هایپرکیوب و ضرایب همبستگی رتبه جزئی برای رتبه‌بندی پارامترها استفاده شده است. به منظور بررسی میزان غیرخطی بودن سیستم، تابع تبدیل آن برای سه نقطه کاری متفاوت به دست آمده است. قطب‌های این توابع تبدیل نشان می‌دهد که سیستم بسیار غیرخطی بوده و نمی‌توان برای آن یک تابع تبدیل کلی تعریف کرد. بنابراین از توابع تبدیل به دست آمده می‌توان برای نقاط کاری مربوط به هر کدام استفاده کرد. برای به دست آوردن مدلی بهتر، برای آون خلاء از مدل‌های شناسایی سیستم مانند ARX و ARMAX استفاده شده است. اعتبارسنجی این مدل‌ها نشان می‌دهد که مدل‌های ARX و ARMAX تطابق خوبی با سیستم تجربی دارند. برای کنترل دمای آون، در ابتدا یک کنترل‌کننده PID طراحی شده و ضرایب آن با استفاده از چهار الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک (GA)، بهینه‌سازی علف هرز مهاجم (IWO)، کرم شب تاب (FA) و رقابت استعماری (ICA) بهینه شده است. سپس، یک کنترل‌کننده فازی برای آون طراحی شده و قوانین فازی، توابع عضویت ورودی و خروجی و بهره‌های ورودی و خروجی آن با استفاده از چهار الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک (GA)، جستجوی هارمونی (HS)، بهینه‌سازی فاخته (COA) و چرخه آب (WCA) بهینه شده است. برای نتیجه

گیری بهتر، در تمام الگوریتم‌های فرا ابتکاری، از چهار معیار اندازه گیری خطای، انتگرال مربعات خطا (ISE)، انتگرال زمان در مربعات خطا (ITSE)، انتگرال قدر مطلق خطا (IAE) و انتگرال زمان در قدر مطلق خطا (ITAE) استفاده شده است. بهترین نتیجه به دست آمده، مربوط به کنترل‌کننده فازی با بهینه‌سازی الگوریتم چرخه آب و با معیار ITAE می‌باشد. و همچنین کنترل‌کننده PID و فازی پیاده شده بر روی آون، مشابه شبیه‌سازی‌های انجام شده است. و این موضوع نشان می‌دهد که مدل ارائه شده، می‌تواند برای طراحی یک کنترل‌کننده غیرخطی بلادرنگ استفاده شود.

مراجع

- [1] J.C. Tudon-martinez, A. Cantu-perez, J.D.J. Lozoya-santos, A. Cardenas-romero, Mathematical model-based design of an industrial box furnace, *Appl. Therm. Eng.* 161 (2019) 114153. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114153>.
- [2] X. Hao, J. Gu, N. Chen, W. Zhang, X. Zuo, 3-D Numerical analysis on heating process of loads within vacuum heat treatment furnace, 28 (2008) 1925–1931. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.12.007>.
- [3] J.A. De Castro, H. Nogami, J. Yagi, Three-dimensional Multiphase Mathematical Modeling of the Blast Furnace Based on the Multifluid Model, 42 (2002) 44–52.
- [4] B. Mayr, R. Prieler, M. Demuth, C. Hochenauer, Modelling of high temperature furnaces under air-fuel and oxygen enriched conditions, *Appl. Therm. Eng.* 136 (2018) 492–503. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.03.013>.
- [5] G. Tang, B. Wu, D. Bai, Y. Wang, R. Bodnar, C.Q. Zhou, International Journal of Heat and Mass Transfer Modeling of the slab heating process in a walking beam reheating furnace for process optimization, *Int. J. Heat Mass Transf.* 113 (2017) 1142–1151. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.026>.
- [6] W.A. Fiveland, Three-Dimensional Radiative Heat-Transfer Solutions by the Discrete-Ordinates Method, 2 (1988). <https://doi.org/10.2514/3.105>.
- [7] Z.-Z. Li, Y.-D. Shen, K. HEO, J.-W. Lee, S.-Y. SEOL, Y.-H. BYUN, C.-J. LEE, Feasible Optimal Design of High Temperature Vacuum Furnace Using Experiences and Thermal Analysis Database *, *J. Therm. Sci. Technol.* 2 (2007) 123–133. <https://doi.org/10.1299/jtst.2.123>.
- [8] S.A. Billings, H. Nicholson, Modeling a three-phase electric arc furnace: a comparative study of control strategies, *Appl. Math. Model.* 1 (1977) 355–361.
- [9] P.M. Angelopoulos, D.I. Gerogiorgis, I. Paspaliaris, Mathematical modeling and process simulation of perlite grain expansion in a vertical electrical furnace, *Appl. Math. Model.* 38 (2014) 1799–1822. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.09.019>.
- [10] M. Landfahrer, C. Schluckner, R. Prieler, H. Gerhardter, T. Zmek, J. Klarner, C. Hochenauer, Development and application of a numerically efficient model describing a rotary hearth furnace using CFD, *Energy.* 180 (2019) 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.091>.
- [11] F. Jabari, B. Mohammadi-ivatloo, M.B. Bannae Sharifian, S. Nojavan, Design and robust optimization of a novel industrial continuous heat treatment furnace, *Energy.* 142 (2018) 896–910. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.096>.
- [12] M. Kirschen, V. Velikorodov, H. Pfeifer, Mathematical modelling of heat transfer in dedusting plants and comparison to off-gas measurements at electric arc furnaces, *Energy.* 31 (2006) 2926–2939. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.12.006>.
- [13] D.C. Bhonsle, R.B. Kelkar, Analyzing power quality issues in electric arc furnace by modeling, *Energy.* 115 (2016) 830–839. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.043>.
- [14] P. Richard, A. Hiroshi, P.R. Austin, H. Nogami, J.I. Yagi, Model of Four Phase Motion and Heat Transfer the Blast Furnace, *ISIJ Int.* 37 (1997) 458–467. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.37.458>.
- [15] K. Takatani, T. Inada, K. Takata, Mathematical Model for Transient Erosion Process of Blast, 41 (2001) 1139–1145.
- [16] K. Takeda, F.C. Lockwood, Integrated mathematical model of pulverised coal combustion in a blast furnace, *ISIJ Int.* 37 (1997) 432–440.

- <https://doi.org/10.2355/isijinternational.37.432>.
- [17] J.Y. Jang, J.B. Huang, Optimization of a slab heating pattern for minimum energy consumption in a walking-beam type reheating furnace, *Appl. Therm. Eng.* 85 (2015) 313–321. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.029>.
 - [18] P. Skopec, T. Vyhlidal, J. Knobloch, Reheating Furnace Modeling and Temperature Estimation based on Model Order Reduction, 2019 22nd Int. Conf. Process Control. (2019) 55–61.
 - [19] C. Tan, J. Jenkins, J. Ward, J. Broughton, A. Heeley, Zone modelling of the thermal performances of a large-scale bloom reheating furnace, *Appl. Therm. Eng.* 50 (2013) 1111–1118. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.06.046>.
 - [20] N. Oumarou, D. Kocaefe, Y. Kocaefe, An advanced dynamic process model for industrial horizontal anode baking furnace, *Appl. Math. Model.* 53 (2018) 384–399. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.09.003>.
 - [21] D. Fu, Y. Chen, C.Q. Zhou, Mathematical modeling of blast furnace burden distribution with non-uniform descending speed, *Appl. Math. Model.* 39 (2013) 7554–7567. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.02.054>.
 - [22] N.B. Almutairi, M. Zribi, Sliding mode controllers for a tempered glass furnace, *ISA Trans.* (2015) 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2015.11.005>.
 - [23] L. Bitschnau, M. Kozek, Modeling and control of an industrial continuous furnace, *CSSim 2009 - 1st Int. Conf. Comput. Intell. Model. Simul.* (2009) 231–236. <https://doi.org/10.1109/CSSim.2009.26>.
 - [24] S.L. Liu, G.X. Liu, X.F. Cheng, W.X. Zhang, Design of temperature control system based on PLC, *Appl. Mech. Mater.* 644–650 (2014) 195–198. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.644-650.195>.
 - [25] M. Gani, S. Islam, M. Ahsan, Optimal PID tuning for controlling the temperature of electric furnace by genetic algorithm, *SN Appl. Sci.* (2019). <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0929-y>.
 - [26] V. Sinlapakun, W. Assawinchaichote, Optimized PID controller design for electric furnace temperature systems with Nelder Mead Algorithm, *ECTI-CON 2015 - 2015 12th Int. Conf. Electr. Eng. Comput. Telecommun. Inf. Technol.* (2015). <https://doi.org/10.1109/ECTICon.2015.7206925>.
 - [27] Z. Guo, J. Chu, Design of Temperature Control System for Electric Heating Furnace Based on C51 Microcontroller, 126 (2017) 595–598.
 - [28] Y.V.P.K. Y V Pavan Kumar, Cascaded PID Controller Design for Heating Furnace Temperature Control, *IOSR J. Electron. Commun. Eng.* 5 (2013) 76–83. <https://doi.org/10.9790/2834-0537683>.
 - [29] M. Beschi, F. Padula, A. Visioli, Fractional robust PID control of a solar furnace, *Control Eng. Pract.* (2016) 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.04.005>.
 - [30] N. Pringsakul, D. Puangdownreong, C. Thammarat, S. Hlangnamthip, Obtaining Optimal PIDA Controller for Temperature Control of Electric Furnace System via Flower Pollination Algorithm Department of Electrical Engineering, *WSEAS Trans. Syst. Control.* 14 (2019) 1–7.
 - [31] G. Chen, D. Song, Design of Temperature Control System Based on Vacuum Furnace, 154 (2018) 336–342.
 - [32] R. Valarmathi, P.R. Theerthagiri, S. Rakeshkumar, V. Gomathi, Design of Genetic Algorithm Based Internal Model Controller for a Heat Exchanger, 7th IEEE Int. Conf. Comput. Power, Energy, Inf. Commun. ICCPEIC 2018. (2018) 489–495. <https://doi.org/10.1109/ICCPEIC.2018.8525208>.

- [33] S.S. Voutetakis, P. Seferlis, S. Papadopoulou, Y. Kyriakos, Model-based control of temperature and energy requirements in a fluidised furnace reactor, *Energy*. 31 (2006) 2418–2427. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.10.019>.
- [34] C. Deng, Z. Wang, Self-Learning Fuzzy Algorithm Optimized Temperature Control and Efficiency Monitoring of Heat Exchanger, *Chinese Control Conf. CCC*. 2018-July (2018) 3394–3399. <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2018.8483928>.
- [35] J. Li, C. Yan, J. Liu, Design of Temperature Control System Based on Fuzzy PID, 420 (2012) 1756–1759. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.418-420.1756>.
- [36] L. Wei, BAO and Jiang, CAO and Cheng, Research on the Temperature Control System Based on Fuzzy Variable Cycle for Resistance Furnace, *Process Autom. Instrum.* (2017) 15.
- [37] H. Yu, J. Jia, G. Chen, X. Chen, Temperature control of electric furnace based on fuzzy PID, *ICEOE 2011 - 2011 Int. Conf. Electron. Optoelectron. Proc.* 3 (2011). <https://doi.org/10.1109/ICEOE.2011.6013295>.
- [38] D. Shi, G. Gao, Z. Gao, P. Xiao, Application of expert fuzzy PID method for temperature control of heating furnace, *Procedia Eng.* 29 (2012) 257–261. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.12.703>.
- [39] INCORPERA, Heat and Mass Trnasfer, 2012.
- [40] W. McAdams, Heat Transmission.pdf, McGraw-Hill, New York, 1954.
- [41] E.M. Sparrow, R.J. Goldstein, D.C. Jones, CO ~ ECTION MASS TRANSFER PLATES ADJACENT MI, 16 (1973) 1025–1035.
- [42] J.R. Lloyd, Natural Convection Adjacent to Horizontal Surface of Various Pianforms, (2016) 443–447.
- [43] C. Simpkins, System Identification: Theory for the User, 2nd Edition (Ljung, L.; 1999) [On the Shelf], 2012. <https://doi.org/10.1109/MRA.2012.2192817>.
- [44] A. Hoare, D.G. Regan, D.P. Wilson, Sampling and sensitivity analyses tools (SaSAT) for computational modelling, *Theor. Biol. Med. Model.* 5 (2008) 1–18. <https://doi.org/10.1186/1742-4682-5-4>.
- [45] B. Iooss, P. Lemaître, Uncertainty Management in Simulation-Optimization of Complex Systems, *Oper. Res. Comput. Sci. Interfaces Ser.* 59 (2015) 101–122. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7547-8>.
- [46] Aswinth Raj, What is PWM: Pulse Width Modulation, (2018). <https://circuitdigest.com/tutorial/what-is-pwm-pulse-width-modulation>.
- [47] M.A.A. Mohamed, A.M. Elmahalawy, H.M. Harb, Developing the pulse width modulation tool (PWMT) for two timer mechanism technique in microcontrollers, *Proc. 2013 2nd Int. Japan-Egypt Conf. Electron. Commun. Comput. JEC-ECC 2013*. (2013) 148–153. <https://doi.org/10.1109/JEC-ECC.2013.6766403>.
- [48] PI Controller Design (Ziegler-Nichols) and Unit Step Response Graphing for 4th order system, (n.d.). <https://electronics.stackexchange.com/questions/396028/pi-controller-design-ziegler-nichols-and-unit-step-response-graphing-for-4th-o>.
- [49] Xin-SheYang, A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2006.07.003>.
- [50] Xin-SheYang, Engineering optimization:an introduction with metaheuristic application, (n.d.).
- [51] Xin-SheYang, Imperialist competitive algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition, 2007. <https://doi.org/10.1109/CEC.2007.4425083>.

- [52] L.-X. Wang, A Course in Fuzzy Systems and Control, Prentice-Hall, Inc., USA, 1996.
- [53] R.K. Arora, A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search, Optimization. (2001) 51–70. <https://doi.org/10.1201/b18469-4>.
- [54] X.Z. Gao, V. Govindasamy, H. Xu, X. Wang, K. Zenger, Harmony search method: Theory and applications, Comput. Intell. Neurosci. 2015 (2015). <https://doi.org/10.1155/2015/258491>.
- [55] R. Rajabioun, Cuckoo optimization algorithm, Appl. Soft Comput. J. 11 (2011) 5508–5518. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.05.008>.
- [56] H. Eskandar, A. Sadollah, A. Bahreininejad, M. Hamdi, Water cycle algorithm - A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems, Comput. Struct. 110–111 (2012) 151–166. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2012.07.010>.

Abstract

Vacuum ovens and furnaces have many applications in the industry. The most widely used and common type is the box type. Creating a homogeneous thermal environment in ovens and vacuum furnaces is of great importance. Also, accurate temperature control is very important to achieve the desired goals. To achieve these goals, having a mathematical model will be very useful. On the other hand, due to the presence of radiation heat transfer mode in a vacuum environment, the behavior of the system will be very nonlinear and therefore linear models do not have the necessary efficiency and accuracy. In this research, first, a new model of ordinary nonlinear differential equations for a vacuum box oven is extracted and the validity of the model is investigated using an experimental set. Then, by obtaining the system transfer function at three different operating points, its nonlinearity is investigated. Next, an ARX and ARMAX model for the system is obtained and then validated. To control the oven temperature, a PID controller is designed based on the proposed model, the coefficients of which are obtained using genetic algorithms, invasive weed, firefly, and imperialist competition. In the next step, a fuzzy controller is designed in which the rules, input and output membership functions, and input and output gains are optimized using genetic algorithms, harmony search, cuckoo optimization, and the water cycle. Also, the measurement error in all optimization algorithms is ISE, IAE, ITSE, and ITAE. Comparing the results of the PID controller and the fuzzy controller, it can be seen that the result obtained in the fuzzy controller optimized by the water cycle algorithm has a better performance than the others. Finally, the PID and the fuzzy controller are implemented on the oven. The results show that the results obtained from the experimental tests are similar to the simulations performed.

Keywords: Vacuum oven, Mathematical modeling, PID controller, Fuzzy controller, Metaheuristic algorithms.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical Engineering

M.Sc. Thesis in Mechatronic Engineering

Mathematical modeling of a vacuum box oven and designing a temperature controller

By: Dariush Ajorloo

Supervisor:

Dr. Mostafa Nazari, Dr. Mohsen Nazari

Advisor:

Dr. Naserodin Sepehry

June, 2021