

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک
رشته مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

کنترل در حضور نامعینی برای یک رکتور CSTR بر اساس تغییر دما و غلظت با وجود دبی ثابت ورودی

نگارنده:

صمد عسکری

اساتید راهنما:

دکتر حبیب احمدی

دکتر مهدی بامداد

شهریور ۹۵

دانشگاه شاهرود
دانشکده: مهندسی مکانیک و مکاترونیک
رشته: مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای صمد عسکری به شماره دانشجویی: ۹۳۱۲۱۰۴
تحت عنوان: کنترل در حضور نامعینی برای یک رکتور CSTR بر اساس تغییر دما و غلظت
باوجود دبی ثابت ورودی

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی مکاترونیک
مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیر و تشکر

خداوندا

همه‌اش از کرم توست که بی‌دریغ سایه لطف و رحمت بر سر من
گسترده‌ای

پدر و مادر عزیزم هزاران سپاس و هزاران بوسه نثار خاک

پایتان

باور دارم : بدون شک سهم ریشه در هر ثمره‌ای که شاخه می‌دهد
بیشتر است

و

هزاران لطف و سپاس به پیشگاه ارجمند و شامخ اساتید،

جناب آقای دکتر حبیب احمدی و دکتر

مهدی بامداد

در این فرصت از رنج و زحمات اساتید گران‌قدر خود که در پرورش
اندوخته‌های علمی اینجانب و به ثمر نشاندن این پایان‌نامه سهم
بسزایی داشتند صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنم.

تعهد نامه

اینجانب صمد عسکری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکترونیک دانشکده مهندسی مکانیک و مکترونیک دانشگاه شاهرود، نویسنده پایان نامه "کنترل در حضور نامعینی برای یک رکتور CSTR بر اساس تغییر دما و غلظت با دبی ثابت ورودی" تحت راهنمایی دکتر حبیب احمدی و دکتر مهدی بامداد متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده 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 شاهرود است و مقالات مستخرج بانام «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 بافت های 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 افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه 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.

راکتورهای شیمیایی محلی برای انجام یک واکنش شیمیایی هستند. واکنش شیمیایی فرآیندی است که طی آن یک یا چند ماده به مواد دیگر تبدیل می شوند. از موارد مهم کنترل رکتور رسیدن به دما، فشار، دبی و غلظت مطلوب است زیرا که بسیاری از واکنشها فقط در یک دما و فشار مطلوب صورت می گیرد و اگر غیر از این باشد این واکنش صورت نخواهد گرفت. از دیگر موارد کنترل رکتور بحث ایمنی تجهیزات و کارگران است؛ زیرا گاهی اوقات افزایش دما و فشار کنترل نشده باعث ایجاد حادثه مالی و جانی جبران نشده ای برای کارگران و تجهیزات خواهد شد. در این پایان نامه برای سیستم مورد مطالعه کنترلر مد لغزشی برای کنترل دما و غلظت، برای رسیدن به دما و غلظت مطلوب، طراحی و به سیستم اعمال شد. در ورودی این رکتور از دو شیر و یک بویلر که یکی از شیرها ماده اصلی و دیگری ماده فرعی می باشد استفاده شد. با استفاده از کنترلر شیرها می توان غلظت ماده ورودی به رکتور برای ایجاد واکنش مورد نظر را به صورت دلخواه تغییر داد و به وسیله بویلر تغییر دمایی را ایجاد کرد تا در صورت نیاز در هر لحظه، خروجی مطلوب متفاوتی ایجاد شود. همچنین با توجه به وجود اشکالاتی مثل پدیده چترینگ در روش مد لغزشی سعی می شود از روش های بهبود یافته ای برای کنترل مقاوم در حضور نامعینی و کاهش پدیده چترینگ برای مسئله مورد مطالعه استفاده کرد. هدف از انجام این تحقیق از بین بردن پدیده چترینگ و مقایسه مقادیر بهینه ضرایب همگرایی روش تاگوچی و¹ RSM برای کاهش خطای دما و غلظت در یک رکتور CSTR با دو شیر قابل تنظیم ورودی می باشد که نتایج آزمایش نشان دهنده کارایی بسیار خوب کنترلر مد لغزشی برای کنترل دما و غلظت رکتور با روش RSM از نظر وقت و هزینه با خطای بسیار کم می باشد.

کلمات کلیدی: راکتور، CSTR، دما، غلظت، فاز

¹ Response Surface Methodology

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- [۱] " بهینه سازی پارامترهای مستقل (ضریب همگرایی) مد لغزشی برای کنترل یک رکتور CSTR با روش سطح پاسخ (RSM) "، پذیرفته شده در اولین کنفرانس ملی تحقیقات بین رشته‌ای در مهندسی کامپیوتر، برق، مکانیک و مکاترونیک
- [۲] " بهینه‌سازی ضرایب همگرایی مد لغزشی برای کنترل دما و غلظت یک رکتور CSTR با روش تاگوچی "، پذیرفته شده در اولین کنفرانس ملی تحقیقات بین رشته‌ای در مهندسی کامپیوتر، برق، مکانیک و مکاترونیک

۱	فصل ۱
۱	مقدمه
۲	۱-۱. مقدمه
۳	۲-۱. انواع راکتورها از نظر فاز درگیر در واکنش
۴	۳-۱. انواع راکتورها شیمیایی
۴	۱-۳-۱. راکتورهای بسته و نیمه‌بسته
۵	۲-۳-۱. راکتورهای پیوسته
۵	۳-۳-۱. راکتور پلاگ
۷	۴-۳-۱. راکتور مخزنی با همزن
۸	۵-۳-۱. راکتور ثابت بستر و سیال بستر
۹	۴-۱. معادله راکتور
۹	۱-۴-۱. زمان اقامت، زمان نیمه عمر و زمان پایان واکنش
۱۱	۵-۱. انتقال حرارت، میکسینگ و انتقال جرم در راکتور
۱۳	۶-۱. سینتیک واکنش
۱۴	۷-۱. ترمودینامیک واکنش
۱۴	۸-۱. انواع واکنش شیمیایی
۱۵	۹-۱. اثر کاتالیزورها و بازدارندهای
۱۶	۱۰-۱. هدف پایان نامه
۱۹	فصل ۲

مروری بر کارهای انجام شده

- ۲-۱. مقدمه..... ۲۰
- ۲-۲. بهینه‌سازی با روش پاسخ سطح..... ۲۱
- ۲-۲-۱. بهینه‌سازی فرایند انعقاد الکتریکی..... ۲۱
- ۲-۲-۲. گرانول کردن کود کمپوست با روش سطح پاسخ..... ۲۳
- ۲-۲-۳. استخراج اینولین از غده سیب زمینی ترشی..... ۲۵
- ۲-۲-۴. استخراج اینولین از ریشه بابا آدم..... ۲۶
- ۲-۲-۵. فرایند خشک کردن لایه نازک موز..... ۲۷
- ۲-۲-۶. بهینه‌سازی شرایط استخراج صمغ دانه بزرک ایرانی..... ۲۸
- ۲-۲-۷. الیاف آمیخته پلی‌پروپیلن _ پلی بوتیلن ترفتالت (PP/PBT)..... ۲۸
- ۲-۲-۸. تولید نفت در چاه‌های هوشمند..... ۲۹
- ۲-۲-۹. تصفیه پساب آب صابون با استفاده از کلرور فریک..... ۲۹
- ۲-۳. بهینه‌سازی به روش تاگوچی..... ۳۰
- ۲-۳-۱. فرایند متالوژی پودر جهت تولید آلیاژ حافظه‌دار نایتیلون..... ۳۰
- ۲-۳-۲. بهینه‌سازی تولید توفو از نظر وزن و طعم..... ۳۱
- ۲-۳-۳. بهینه‌سازی کیفیت از طریق طراحی پارامتر..... ۳۲
- ۲-۳-۴. ساخت نانو ذرات هیدروکسی آپاتیت..... ۳۲
- ۲-۳-۵. اختلاط بهینه بتن خودتراکم..... ۳۳
- ۲-۳-۶. بهبود کارایی پیش‌بینی تقاضای برق..... ۳۳
- ۲-۴. کنترل مد لغزشی فازی و فیلتر کالمن..... ۳۴
- ۲-۵. رکتور CSTR بر اساس کاربرد مخلوط‌کن کنترل‌شده با استفاده از PLC..... ۳۶
- ۲-۶. کنترل بر اساس PLC و SCADA برای یک رکتور CSTR..... ۳۸

۷-۲. طراحی کنترلر برای کلاسی از راکتور..... ۳۹

۸-۲. پدیده چترینگ آزاد برای سیستم‌های گسسته و آزمایش روی رکتور CSTR..... ۴۰

۹-۲. کنترل ترکیب با حرکت دلخواه بین دو حالت برای رکتور CSTR..... ۴۰

۴۱ فصل ۳

طراحی کنترل کننده مد لغزشی

۱-۳. مقدمه‌ای بر کنترل غیرخطی..... ۴۲

۲-۳. مد لغزشی..... ۴۳

۳-۳. اثبات مد لغزشی برای رکتور CSTR مرتبه ۱..... ۴۷

۴-۳. بررسی توانایی حذف اغتشاش..... ۴۹

۵-۳. شرح مدل رکتور CSTR..... ۵۰

۶-۳. شبیه‌سازی و طراحی کنترلر..... ۵۲

۷-۳. بهینه‌سازی به روش RSM..... ۵۴

۸-۳. چگونگی اجرای روش RSM..... ۵۵

۹-۳. بهینه‌سازی به روش تاگوچی..... ۵۹

۱-۹-۳. نحوه عملکرد روش تاگوچی و مزایای آن..... ۵۹

۶۱ فصل ۴

نتایج

۱-۴. نتایج شبیه‌سازی با تابع علامت و اشباع..... ۶۲

۲-۴. نتایج بهینه‌سازی کنترلر مد لغزشی با روش (RSM)..... ۶۷

۱-۲-۴. بررسی جدول ANOVA..... ۶۸

- ۷۰.....۲-۲-۴. بررسی نمودار احتمال نرمال.....
- ۷۲.....۳-۲-۴. بررسی نمودار مقادیر مانده در مقابل پیش‌بینی شده.....
- ۷۳.....۴-۲-۴. بررسی نمودار مقادیر واقعی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده.....
- ۷۴.....۵-۲-۴. بررسی نمودار باکس کاکس.....
- ۷۵.....۶-۲-۴. مدل گرافیکی متغیرهای مستقل بر حسب خطا.....
- ۷۸.....۷-۲-۴. شرایط بهینه و درصد رضایت‌مندی شاخص برای کنترلر مد لغزشی.....
- ۷۹.....۳-۴. نتایج بهینه‌سازی کنترلر PID با روش (RSM).....
- ۸۳.....۱-۳-۴. نتایج بهینه‌سازی به روش تاگوچی.....
- ۸۶.....۲-۳-۴. انجام آزمایش تأییدی تاگوچی.....

۸۷

فصل ۵

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

- ۸۸.....۱-۵. نتیجه‌گیری.....
- ۹۰.....۲-۵. پیشنهادها.....

مراجع

پیوست‌ها

فهرست اشکال

- ۷.....شکل ۱-۱: طرح شماتیک یک راکتور پلاگ.....
- ۸.....شکل ۲-۱: محیط داخلی یک راکتور مخزنی (CSTR).....
- ۹.....شکل ۳-۱: طرح شماتیک از یک راکتور ثابت بستر.....

- شکل ۱-۴: شماتیک یک رآکتور به همراه کویل‌های گرمایشی و سرمایشی در اطراف آن.....۱۲
- شکل ۱-۵: برشی از یک رآکتور مخزنی به همراه سیستم خنک‌کننده جاکتی که شفت و پروانه همزن در وسط آن دیده می‌شود.....۱۳
- شکل ۱-۶: طرحی از یک فرآیند کاتالیزوری سیال بستر که در سمت راست رآکتور شیمیایی و در سمت چپ واحد بازیابی کاتالیست قرار دارد.....۱۶
- شکل ۱-۷: نمای کلی از سیستم با دو شیر ورودی و یک بویلر.....۱۷
- شکل ۱-۲: مدل اولیه از CSTR.....۳۷
- شکل ۱-۳: سطح لغزش.....۴۶
- شکل ۲-۳: سطح لغزش وقتی شیب تابع منفی باشد.....۴۷
- شکل ۳-۳: تابع علامت.....۵۰
- شکل ۳-۴: فرایند کنترل دما و غلظت رکتور به صورت شماتیک.....۵۱
- شکل ۳-۵: شبیه‌سازی رکتور با سیمولینک متلب با استفاده از کنترلر مد لغزشی.....۵۳
- شکل ۳-۶: شبیه‌سازی شیرهای ورودی رکتور با سیمولینک متلب با استفاده از کنترلر PID.....۵۳
- شکل ۳-۷: طرح آزمایش برای متغیرها برای کنترلر PID.....۵۸
- شکل ۴-۱: نمودار غلظت نسبت به زمان (با تابع علامت).....۶۲
- شکل ۴-۲: نمودار دما نسبت به زمان.....۶۳
- شکل ۴-۳: غلظت شیر A.....۶۳
- شکل ۴-۴: دبی شیر A.....۶۴
- شکل ۴-۵: تابع اشباع.....۶۴
- شکل ۴-۶: نمودار غلظت با استفاده از تابع اشباع.....۶۵
- شکل ۴-۷: نمودار دما با استفاده از تابع اشباع.....۶۵

- شکل ۴-۸: دبی شیر A با استفاده از تابع اشباع..... ۶۶
- شکل ۴-۹: غلظت شیر A با استفاده از تابع اشباع..... ۶۶
- شکل ۴-۱۰: دبی شیر B با استفاده از تابع اشباع..... ۶۷
- شکل ۴-۱۱: نمودار احتمال نرمال برای خطای غلظت e_1 ۷۱
- شکل ۴-۱۲: نمودار احتمال نرمال برای خطای دما e_2 ۷۱
- شکل ۴-۱۳: نمودار مقادیر مانده در مقابل پیش‌بینی شده برای خطای غلظت e_1 ۷۲
- شکل ۴-۱۴: نمودار مقادیر مانده در مقابل پیش‌بینی شده برای خطای دما e_2 ۷۳
- شکل ۴-۱۵: نمودار مقادیر واقعی در مقابل پیش‌بینی شده برای خطای غلظت e_1 ۷۳
- شکل ۴-۱۶: نمودار مقادیر واقعی در مقابل پیش‌بینی شده برای خطای دما e_2 ۷۴
- شکل ۴-۱۷: نمودار BOX COX برای خطای غلظت e_1 ۷۴
- شکل ۴-۱۸: نمودار BOX COX برای خطای دما e_2 ۷۵
- شکل ۴-۱۹: نمودار تغییرات γ_1 و γ_2 بر حسب خطای غلظت e_1 ۷۶
- شکل ۴-۲۰: نمودار تغییرات γ_1 بر حسب خطای غلظت e_1 ۷۶
- شکل ۴-۲۱: نمودار تغییرات γ_1 و γ_2 بر حسب خطای دما..... ۷۷
- شکل ۴-۲۲: نمودار تغییرات γ_2 بر حسب خطای دما e_2 ۷۷
- شکل ۴-۲۳: نمودار تغییرات γ_2 بر حسب خطای دما e_2 ۷۸
- شکل ۴-۲۴: نمودار شاخص رضایتمندی برای ردیف اول جدول شرایط بهینه ۷۹
- شکل ۴-۲۵: نمودار شاخص رضایتمندی برای ردیف اول جدول شرایط بهینه برای کنترلر PID..... ۸۰
- شکل ۴-۲۶: نمودار غلظت برای حالت بهینه..... ۸۰
- شکل ۴-۲۷: نمودار دما برای حالت بهینه..... ۸۱
- شکل ۴-۲۸: غلظت شیر A..... ۸۱
- شکل ۴-۲۹: دبی شیر A..... ۸۲

- شکل ۴-۳۰: دبی شیر B..... ۸۲
- شکل ۴-۳۱: نمودار سیگنال به نویز برای خطای غلظت..... ۸۵
- شکل ۴-۳۲: نمودار میانگین جواب‌ها برای خطای غلظت..... ۸۵
- شکل ۴-۳۳: نمودار میانگین جواب‌ها برای خطای دما..... ۸۶

فهرست جداول

- جدول ۱-۱: انواع رآکتورها از نظر فاز درگیر در واکنش..... ۳
- جدول ۱-۳: پارامترهای نرمال سیستم..... ۵۱
- جدول ۲-۳: مقادیر تغذیه و مطلوب..... ۵۲
- جدول ۳-۳: پارامترهای رآکتور..... ۵۲
- جدول ۳-۴: متغیرهای مستقل در فرایند و مقادیر آن‌ها..... ۵۶
- جدول ۳-۵: طرح آزمایش برای متغیرها مد لغزشی..... ۵۷
- جدول ۳-۶: متغیرهای مستقل در فرایند بهینه‌سازی برای کاهش خطای کنترلر PID..... ۵۷
- جدول ۳-۷: طرح آزمایش برای متغیرها برای کنترلر PID..... ۵۸
- جدول ۴-۱: پارامترهای شیر کنترلی..... ۶۲
- جدول ۴-۲: LEVERAGE (یک نوع متغیر آماری)..... ۶۸
- جدول ۴-۳: نتایج تحلیل اثر متغیرهای مستقل بر خطای غلظت..... ۶۹
- جدول ۴-۴: نتایج تحلیل اثر متغیرهای مستقل بر خطای دما e_p (ANOVA)..... ۷۰
- جدول ۴-۵: شرایط بهینه کاهش خطا و پاسخ متناظر کنترلر مد لغزشی..... ۷۸
- جدول ۴-۶: شرایط بهینه کاهش خطا و پاسخ متناظر برای کنترلر PID..... ۷۹
- جدول ۴-۷: فاکتورها و مقادیر آن‌ها در آزمایش انجام‌شده..... ۸۳
- جدول ۴-۸: آرایه مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها..... ۸۳

جدول ۴-۹: نتایج پیش‌بینی مدل تاگوچی..... ۸۶

فصل ۱

مقدمه

۱-۱. مقدمه

رآکتورهای شیمیایی محلی برای انجام یک واکنش شیمیایی هستند. واکنش شیمیایی فرآیندی است که طی آن یک یا چند ماده به مواد دیگر تبدیل می‌شوند. مواد اولیه موادی با ارزش اقتصادی کمتر می‌باشند و در عوض محصولات موادی با ارزش بالاتر است. درک سینتیک و سازوکار واکنش یکی از نکات مهم در طراحی رآکتورهای صنعتی است. معادله سرعت، تعادلی بودن یا نبودن، فاز مواد درگیر در واکنش (جامد، مایع، گاز)، گرماگیر یا گرماده بودن و همچنین اثر کاتالیزور بر واکنش، از جمله مهم‌ترین نکاتی است که در طراحی رآکتور حائز اهمیت است [۱]. رآکتورها می‌توانند جهت تولید انبوه مواد شیمیایی، دارویی و مواد پتروشیمی و در واحدهای صنعتی بزرگ به کار گرفته شوند و یا جهت انجام مطالعات و تحقیقات و در ابعاد کوچک به کار بروند. طراحی رآکتورها با توجه به مکانیزم واکنش و همچنین نوع واکنش و فاز مواد درگیر در واکنش متفاوت است. در طراحی رآکتورهای شیمیایی برخی از پارامترها مانند دما، فشار و دبی مواد ورودی و خروجی، توسط طراح قابل تغییر است؛ اما برخی پارامترها مانند ماهیت واکنش، گرماگیر یا گرماده بودن، ایجاد گاز و یا تغییر در حجم مواد، از جمله مواردی است که به طبیعت واکنش مربوط بوده و در اختیار طراح قرار ندارد. از مجموع این موارد می‌توان نتیجه گرفت که رآکتورها در اشکال پیوسته و یا بسته، بستر ثابت و یا بستر متلاطم، تحت فشار یا در فشار اتمسفری و یا با اثر کاتالیست و یا بدون اثر کاتالیست طراحی می‌شوند؛ اما می‌توان رآکتورها را در چند دسته بزرگ و کلی از جمله رآکتورهای پیوسته و ناپیوسته، رآکتورهای سیال بستر و یا ثابت بستر، رآکتورهای لوله‌ای (پلاگ) و مخزنی و یا رآکتورهای همگن و ناهمگن، طبقه‌بندی کرد [۲]. رآکتورهای مخزنی با همزن که به‌اختصار رآکتورهای CSTR نیز شناخته می‌شوند. این رآکتورها به‌صورت مخازنی همراه با ورودی‌ها و خروجی‌ها هستند که عمل اختلاط و هم زدن مواد توسط شفت و پروانه صورت می‌گیرد. این نوع رآکتورهای پیوسته در مقایسه با رآکتورهای پلاگ حجم بیشتری نیاز دارند اما حجم

¹ Continuous-Stirred Tank Reactor

تولید در آن‌ها بالاتر است [۳]. واکنش‌ها در رآکتور ممکن است به‌صورت همگن (تمامی مواد در یک‌فاز هستند) و یا ناهمگن (مواد درگیر در واکنش در فازهای مختلف قرار دارند) انجام شود. این امر موجب می‌شود تا در طراحی رآکتور محدودیت‌هایی ایجاد شود. واکنش‌های گازی نمونه‌ای از واکنش‌های همگن هستند که معمولاً در رآکتورهای لوله‌ای انجام می‌شوند. رآکتورهای ناهمگن بر اساس فازهای درگیر در واکنش شکل‌های مختلفی دارند اما نکته مهم در این رآکتورها ایجاد انتقال جرم و تماس مناسب بین فازها برای انجام واکنش است [۴].

۱-۲. انواع رآکتورهای از نظر فاز درگیر در واکنش:

در جدول (۱-۱) انواع رآکتورهای شیمیایی از نظر فازهای درگیر در واکنش و نمونه‌های صنعتی آن نشان داده شده‌اند [۲]:

جدول ۱-۱: انواع رآکتورها از نظر فاز درگیر در واکنش

نوع فرآیند	نمونه صنعتی
فرآیند گاز-جامد	واکنش گاز کلر با اکسید اورانیوم برای تولید اورانیوم کلرید فرار • زدایش ناخالصی اکسید آهن از اکسید تیتانیوم با استفاده از گاز کلر • سوختن زغال سنگ • تولید گاز از زغال سنگ • تولید گاز هیدروژن از واکنش بخار آب و آهن • تولید کاربید سینامید از واکنش نیتروژن هوا با کلسیم کاربید • واکنش سوختن سنگ معدن سولفید آهن در هوا
فرآیند مایع-جامد	فرآیند انتقال یون • تولید استیلن از واکنش آب و کلسیم کاربید • لیچینگ سنگ معدن اورانیوم با اسید سولفوریک • واکنش اسیدسولفوریک و سدیم کلرید جامد با سدیم فسفات و یا سدیم نیترات
فرآیند گاز-مایع	تولید سدیم تیوسولفات از واکنش گوگرد دی‌اکسید و محلول آبی سدیم کربنات و سدیم سولفید • تولید سدیم نیتريت از واکنش نیتريك اكسيد و اكسيژن با محلول سدیم کربنات • تولید سدیم هیپوکلریت از واکنش کلر با سدیم هیدروکسید • تولید آلومینیوم نیترات از واکنش آمونیاک و اسید نیتريك محلول • تولید اسید نیتريك از جذب نیتريك اكسيد در آب • استخراج ید از واکنش گوگرد دی‌اکسید با محلول سدیم یدات • واکنش هیدروژنه کردن روغن‌های گیاهی با گاز هیدروژن
فرآیند مایع-مایع	تولید سود سوزآور از واکنش آمالگام سدیم و آب • نیتروژن دار کردن ترکیبات آلی با محلول آبی نیتريك اسید • تولید صابون از واکنش محلول‌های قلیایی و چربی‌ها یا اسیدهای چرب • زدایش گوگرد از مشتقات نفتی با اتانول آمین‌ها •
فرآیند جامد-جامد	تولید سیمان • تولید کاربید بور از واکنش اکسید بور و کربن • تولید سیلیکات کلسیم از آهک و سیلیکا • تولید کلسیم کاربید از واکنش آهک و کربن • فرآیند لب‌لانک
فرآیند مایع-گاز	مایع سازی و یا هیدروژنه کردن زغال سنگ در دوغاب نفتی

۱-۳. انواع رآکتورهای شیمیایی:

رآکتورهای شیمیایی طراحی‌های پیچیده‌ای دارند که گاه طی سالیان متمادی برای یک فرآیند خاص به تکامل رسیده است. پارامترهای بسیار بر طراحی و شکل رآکتور مؤثر هستند که موجب تنوع انواع رآکتورها می‌شوند؛ اما می‌توان بر اساس برخی پارامترهای اساسی، رآکتورها را به دسته‌های عمده تقسیم کرد که در زیر به آن می‌پردازیم [۴].

- رآکتور بسته و نیمه بسته
- رآکتور پیوسته
- رآکتور پلاگ
- رآکتور مخزنی با همزن (cstr)
- رآکتورهای ثابت بستر و سیال بستر

۱-۳-۱. رآکتور بسته و نیمه بسته:

رآکتور بسته گونه ساده‌ای از رآکتورهای شیمیایی هستند که به صورت مخزنی همراه با همزن و سیستم تبادل حرارت است. در این رآکتورها مواد اولیه داخل رآکتور پر می‌شود و سپس واکنش انجام می‌گیرد. پس از تکمیل واکنش و تولید محصول، درب رآکتور باز شده و محصولات تخلیه می‌شوند. این فرآیند بارها و بارها قابل تکرار است. رآکتورهای نیمه بسته نیز به همین صورت است با این تفاوت که در این نوع از رآکتورها، مواد اولیه به آرامی به مخزن افزوده می‌شود اما خروجی از رآکتور وجود ندارد [۵]. از رآکتورهای بسته عمدتاً در تولید محصول در ابعاد کم و محصولات مقطعی و یا فصلی دارند استفاده می‌شود. موادی مانند مواد دارویی از جمله موادی هستند که در سیستم‌های بسته تولید می‌شود. تغییر در شکل فرآیند با استفاده از رآکتورهای بسته به مراتب آسان‌تر و به صرفه‌تر از فرآیندهای پیوسته است. دانستن سینتیک و سازوکار فرآیند در رآکتورهای بسته کم‌اهمیت‌تر است به

همین سبب است که سینتیک عمده فرآیندهای داروسازی ناشناخته است [۶].

۱-۳-۲. رآکتور پیوسته:

رآکتورهای پیوسته گونه‌ای متداول از رآکتورها هستند که در آن‌ها یک یا چند جریان ورودی به سیستم، مواد واکنش‌دهنده را به داخل رآکتور می‌آورد و پس از واکنش، از خروجی یا خروجی‌های رآکتور محصولات خارج می‌شوند. به‌طور معمول دبی ورودی و خروجی از این رآکتورها ثابت است. در غیر این صورت امکان سرریز و یا تخلیه سریع مخزن رآکتور وجود دارد. در زیر معادله کلی موازنه رآکتور (رابطه ۱-۱) پیوسته نوشته شده است [۳] و [۵].

Q_{int} : دبی جرمی ورودی

Q_{out} : دبی جرمی خروجی

$$\{Q_{int}\} - \{Q_{out}\} + \{Q_m\} - \{Q_c\} = \{Q_F\} \quad (1-1)$$

Q_m : دبی جرمی تولیدی

Q_c : دبی جرمی مصرفی

Q_F : دبی جرمی انباشته

این نوع رآکتورها عمدتاً برای تولید محصولات با حجم بالا و محصولاتی که میزان تقاضای آن‌ها به‌صورت ثابت در بازار وجود دارد استفاده می‌شود. مواد سوختی، محصولات پتروشیمی و مواد شوینده و بهداشتی از جمله این مواد هستند. ایجاد تغییرات در رآکتورهای پیوسته به دلیل این‌که در فرآیندهای پیوسته باید همه فرآیندها با یکدیگر هماهنگ کار کنند به‌مراتب سخت‌تر از رآکتورهای بسته است. به همین دلیل از این نوع رآکتورها در تولید یک محصول یا محصولاتی که تولید آن شباهت زیادی به هم دارند استفاده می‌شود [۶]. دو نوع متداول از رآکتورهای پیوسته، رآکتورهای مخزنی با همزن و رآکتورهای پلاگ (لوله‌ای) هستند.

۱-۳-۳. رآکتور پلاگ:

رآکتورهای پلاگ گونه‌ای از رآکتورهای پیوسته هستند که در آن‌ها به‌جای یک مخزن یا تانک، از یک لوله برای انجام واکنش استفاده می‌شود (شکل ۱-۱). این نوع رآکتورها نسبت به شکل مخزنی آن، فضای

کمتری اشغال می‌کنند. در عین حال به دلیل ساختار لوله‌ای، سطح تماس بیشتری با محیط اطراف داشته و تبادل گرما راحت‌تر انجام می‌شود [۵]. جریان پلاگ گونه‌ای از جریان سیال در داخل لوله است که در آن سرعت حرکت سیال در نزدیکی دیواره لوله و در مرکز لوله یکنواخت است. این امر موجب می‌شود مواد واکنش‌دهنده به‌طور یکنواخت با یکدیگر تماس یافته و واکنش انجام شود. این نوع از جریان با لوله‌های بلند و باریک ایجاد می‌شود. همچنین مارپیچ کردن لوله نیز می‌تواند به این امر کمک کند [۵]. معادله عمومی رآکتورهای پلاگ به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۳، ۴].

$$\frac{V_P}{q} = \int_{[A]_0}^{[A]_f} \frac{d[A]}{-\gamma_A} \quad (2-1)$$

در این معادله (رابطه ۲-۱) q نشان‌دهنده دبی حجمی و V_P نشان‌دهنده حجم رآکتور پلاگ $[A]_0$ نشان‌دهنده غلظت گونه A در لحظه اول، $[A]_f$ نشان‌دهنده غلظت نهایی گونه A و γ نشان‌دهنده سرعت واکنش است.

همچنین رابطه زمان اقامت (رابطه ۳-۱) در این نوع رآکتور پیوسته به‌صورت زیر است که در آن C_{A0} نشان‌دهنده غلظت گونه A در حالت اول، F نشان‌دهنده دبی جرمی، V_P حجم رآکتور پلاگ و q دبی حجمی می‌باشد.

$$t_P = C_{A0} \frac{V_P}{F_{A0}} = \frac{V_P}{q} \quad (3-1)$$



شکل ۱-۱: طرح شماتیک یک راکتور پلاگ

۱-۳-۴. راکتور مخزنی با همزن:

راکتورهای مخزنی با همزن که به اختصار راکتورهای CSTR نیز شناخته می‌شوند. این راکتورها به صورت مخزنی همراه با ورودی‌ها و خروجی‌ها هستند که عمل اختلاط و هم زدن مواد توسط شفت و پروانه صورت می‌گیرد. این نوع راکتورهای پیوسته در مقایسه با راکتورهای پلاگ حجم بیشتری نیاز دارند اما حجم تولید در آن‌ها بالاتر است. همچنین در داخل این راکتورها از بافل‌ها یا تیغه‌هایی استفاده می‌شود که باعث می‌شوند اختلاط بهتر صورت گیرد (شکل ۱-۲). معادله عمومی راکتور (رابطه ۴-۱) برای این نوع از راکتور برحسب غلظت به صورت زیر تعریف می‌شود [۳].

$$\frac{V_m}{q} = \frac{C_{A0}}{-\gamma_A(C_{AF})} \quad (4-1)$$

در معادله (۴-۱)، V_m نشان‌دهنده حجم راکتور CSTR و (C_{AF}) سرعت معادله در نقطه پایانی واکنش می‌باشد.

زمان اقامت در این نوع رآکتور معادله (۵-۱) نیز مشابه رآکتور پلاگ به صورت زیر قابل تعریف است :

$$t_m = C_{A0} \frac{V_m}{F_{A0}} = \frac{V_m}{q} \quad (۵-۱)$$

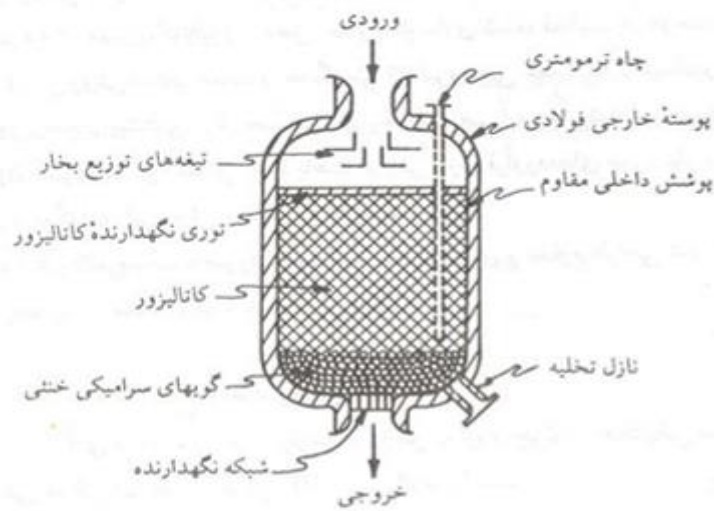


شکل ۱-۲: محیط داخلی یک رکتور مخزنی (CSTR)

۵-۳-۱. رآکتور ثابت بستر و سیال بستر:

گونه دیگری از رآکتورها، رآکتورهای ثابت بستر و سیال بستر هستند. در رآکتورهای ثابت (شکل ۱-۳) بستر ماده جامد که معمولاً کاتالیست می باشد، به طور ثابت داخل رآکتور قرار دارد و مواد واکنش دهنده پس از عبور از روی این مواد، واکنش داده و از رآکتور خارج می شوند. رآکتورهای آکنده نمونه ای از این نوع رآکتورها هستند. نمونه ای از کاربرد این نوع رآکتورها برای تصفیه گازهای خروجی از نیروگاه های سوخت فسیلی است. در این نوع نیروگاه ها، پس از فرآیند احتراق، گازهای حاوی ترکیبات مضر نیتروژن از داخل رآکتور حاوی کاتالیست عبور می کند تا ترکیبات مضر آن به مواد کم خطرتر تبدیل شوند [۷]. در رآکتورهای سیال بستر مواد جامد با جریانی از سیال در داخل رآکتور به صورت معلق در می آیند. این مواد جامد می توانند واکنش دهنده ها، کاتالیست ها و یا بازدارنده ها باشند. این فرآیند موجب افزایش انتقال جرم و حرارت در رآکتور و اختلاط کامل تر اجزا می شود. از دیگر مزایای این نوع رآکتور امکان خارج کردن جامد از رآکتور به صورت پیوسته و انتقال به واحد دیگر است. به عنوان نمونه هنگامی که احیا دوباره بازدارنده ها و کاتالیست ها نیاز باشد، می توان آن ها را به این ترتیب از رآکتور خارج

و به واحد بازیابی منتقل کرد [۸].



شکل ۱-۳: طرح شماتیک از یک رکتور ثابت بستر

۴-۱. معادله رآکتور:

معادله رآکتور رابطه ریاضیاتی است که پارامترهای مربوط به رآکتور مانند زمان اقامت و حجم رآکتور را به سرعت واکنش، نشان می‌دهند. این معادلات می‌توانند به صورت عمومی برای دسته‌ای خاصی رآکتورها مطرح شوند و یا به صورت تجربی برای گونه خاصی از رآکتور به دست بیایند. [۹].

۱-۴-۱. زمان اقامت، زمان نیمه‌عمر و زمان پایان واکنش:

در رآکتورهای پیوسته که به طور مداوم مواد خام وارد و محصولات خارج می‌شوند، نمی‌توان زمان مشخصی برای انجام واکنش و تبدیل مواد اولیه به محصول بیان کرد. در نتیجه از کمیتی به نام زمان اقامت استفاده می‌شود. زمان اقامت متوسط زمانی است که یک ذره وارد رآکتور شده و تا زمان خروج در آنجا در حال واکنش است. این کمیت به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$t = \frac{V}{q} \quad (۶-۱)$$

در معادله (۶-۱)، V نشان‌دهنده حجم رآکتور پیوسته، q دبی حجمی ورودی و خروجی از رآکتور و t زمان اقامت است. زمان اقامت یکی از پارامترهای مورد استفاده در معادله رآکتور است [۳].

زمان نیمه عمر مدت زمانی است که نیمی از غلظت ماده اولیه تزریق شده در رآکتور، به محصولات تبدیل می شوند. به عنوان مثال در واکنش ساده $A \rightarrow B$ نیمه عمر واکنش به صورت زیر تعریف می شود [۳] در این معادله k عددی ثابت است که به «ثابت سرعت واکنش» معروف است و عدد k بزرگ تر (مقدار k) نشان دهنده واکنش سریع تر است. همچنین n میزان بستگی سرعت واکنش به غلظت A را نشان می دهد که به درجه واکنش نسبت به گونه A معروف است. این پارامتر معمولاً عددی بین صفر تا ۳ است. همچنین اگر گونه های واکنش دهنده بیش از یکی باشد، از جمع توان های واکنش دهنده ها، درجه کلی واکنش حاصل می شود. روش های گوناگونی برای به دست آوردن این معادلات وجود دارد؛ اعم از روش های تئوری و یا استفاده از داده های آزمایشگاهی [۱].

$$-\gamma_A = K[A]^n \rightarrow -\frac{d[A]}{dt} = K[A]^n \rightarrow \frac{-d[A]}{[A]^n} = Kdt \quad (7-1)$$

از این رابطه با در نظر گرفتن شرایط مرزی زیر انتگرال می گیریم:

- غلظت گونه A_0 از $[A]_0$ تا $[A]_{\frac{1}{2}}$ که نصف غلظت اولیه است، تغییر می کند.

- زمان از لحظه ۰ تا زمان نیمه عمر $(t_{\frac{1}{2}})$ در تغییر است:

$$\int_0^{A_{\frac{1}{2}}} \frac{d[A]}{[A]^n} = \int_0^{t_{\frac{1}{2}}} K dt \rightarrow \frac{-(\frac{[A]_0}{2})^{1-n}}{1-n} + \frac{[A]_0^{1-n}}{1-n} = Kt_{\frac{1}{2}} \rightarrow \quad (8-1)$$

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{(2^{n-1} - 1)[A]_0^{1-n}}{K[n-1]}$$

همچنین زمان پایان واکنش به شیوه مشابه به صورت زیر به دست می آید. باید توجه داشت که تنها واکنش هایی پایان پذیر هستند که در آن ها $n < 1$ باشد، در غیر این صورت همواره مقادیری از مواد اولیه در رآکتور به صورت واکنش نداده باقی می ماند [۳].

$$-\gamma_A = K[A]^n \rightarrow -\frac{d[A]}{dt} = K[A]^n \rightarrow \frac{-d[A]}{[A]^n} = Kdt \quad (9-1)$$

از این رابطه با در نظر گرفتن شرایط مرزی زیر انتگرال می‌گیریم:

- غلظت گونه A از $[A]_0$ تا $[A]=0$ که به معنی صفر شدن غلظت مواد اولیه است، تغییر می‌کند.

- زمان از لحظه ۰ تا زمان پایان واکنش (t_{end}) در تغییر است [۳].

$$\int_{[A]_0}^0 -\frac{d[A]}{[A]^n} = \int_0^{t_{end}} Kdt \rightarrow \frac{(0)^{1-n}}{1-n} + \frac{[A]_0^{1-n}}{1-n} = Kt_{end} \rightarrow \quad (10-1)$$

$$t_{end} = \frac{[A]_0^{1-n}}{K[n-1]}$$

۵-۱. انتقال حرارت، میکسینگ و انتقال جرم در رآکتور:

انتقال حرارت فرآیند چه از نظر عملیاتی و چه از نظر ایمنی از اهمیت بالایی برخوردار است. عمده واکنش‌های شیمیایی یا گرماده هستند و یا گرماگیر؛ در نتیجه در حین انجام واکنش ممکن است محتویات درون رآکتور گرم شده و یا سرد شوند. بالا رفتن بیش از حد دما در رآکتور می‌تواند موجب اختلال در عملکرد رآکتور و تجهیزات کنترلی آن شود و از همه مهم‌تر، ریسک خطر انفجار و نشت مواد را بالا می‌برد. همچنین در صورتی که واکنش گرماگیر باشد، با پیشرفت واکنش محتویات رآکتور سردتر می‌شود و ممکن است موجب کندی سرعت واکنش و یا انجماد در رآکتور و تجهیزات آن شود. در نتیجه می‌بایست در رآکتورها، همواره دما را در حد مناسب و ایمن نگه داشت. برای این منظور از مبدل‌ها و تجهیزات انتقال حرارت استفاده می‌شود. یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای کنترل دمای رآکتورها، استفاده از جاکت (پوشش حرارتی) و یا کویل‌های تبادل حرارت است. در جاکت‌ها (شکل ۱-۵)، یک لایه از سیال با دمای بالاتر و یا پایین‌تر برای تنظیم دما، در اطراف رآکتور و بدون تماس جرمی با محتویات رآکتور، مرتباً در چرخش است. در روش کویل (شکل ۱-۴) نیز لوله‌هایی که حاوی سیال سردتر و یا گرم‌تر است به صورت مارپیچ و یا اشکال دیگر در اطراف رآکتور قرار داده می‌شود تا تبادل حرارت با

رآکتور انجام شود [۴].

فرآیند هم زدن و انتقال جرم در رآکتورها از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا در صورتی که محتویات داخل رآکتور به خوبی ترکیب نشوند، امکان واکنش ندادن بخشی از مواد و در نتیجه پایین آمدن کیفیت محصول می‌شود. عمل هم زدن در رآکتورهای مخزنی شکل، با استفاده از همزن‌های دوار که به شفت و الکتروموتور متصل است انجام می‌شود. در رآکتورهای لوله‌ای (پلاگ) نیز به دلیل شکل رآکتور، عمل اختلاط در طول لوله با حرکت سیال اتفاق می‌افتد. شکل، نحوه قرارگیری و سرعت چرخش همزن بستگی به عواملی چون حجم مخزن، شکل مخزن، ویسکوزیته سیال و ... دارد. همچنین انتخاب جنس همزن و بدنه رآکتور به مواد داخل رآکتور بستگی دارد. مثلاً اگر مواد داخل رآکتور خورنده باشند، استفاده از فولاد و موادی که امکان خورده شدن در آن وجود دارد، غیرمنطقی است [۱۱]. در این گونه موارد انتخاب مواد جایگزین و یا پوشش دهی تجهیزات با لعاب‌های سرامیکی و یا پوشش‌های پلیمری روش مناسبی در جلوگیری از خوردگی و واکنش‌های ناخواسته است [۱۲].



شکل ۱-۴: شماتیک یک رآکتور به همراه کویل‌های گرمایشی و سرمایشی در اطراف آن



شکل ۱-۵: برشی از یک رآکتور مخزنی به همراه سیستم خنک‌کننده جاکتی که شفت و پروانه همزن در وسط آن دیده می‌شود

۱-۶. سینتیک واکنش:

سینتیک واکنش شیمیایی عبارت است از بررسی سازوکار انجام یک واکنش شیمیایی. علم سینتیک شیمیایی به‌طور کامل به نحوه انجام واکنش، واکنش‌های جانبی، مواد واسط تولیدی و بسیاری از جزئیات یک واکنش می‌پردازد. سرعت واکنش و بستگی آن به غلظت گونه‌های درگیر در واکنش با استفاده از رابطه‌ای به نام معادله سرعت بیان می‌شود. به‌طور کلی تغییر غلظت گونه‌ای موجود در واکنش در واحد زمان را سرعت واکنش نسبت به آن ماده تعریف می‌کنند مثلاً برای واکنش ساده $A \rightarrow B$ معادله سرعت به صورت زیر است [۱].

$$\gamma_A = \frac{d[A]}{dt} \quad (1-11)$$

معادله سرعت واکنش را می‌توان به شکل زیر هم بازنویسی کرد. باید توجه داشت که در معادله زیر علامت منفی به‌طور قراردادی نشان‌دهنده مصرف گونه A است. به همین ترتیب برای تولید گونه B از

علامت مثبت استفاده می‌شود.

$$-\gamma_A = K[A_n] \quad (12-1)$$

۷-۱. ترمودینامیک واکنش:

بررسی واکنش‌ها از نظر انرژی، در حوزه مباحث ترمودینامیک شیمیایی است. گرماگیر و یا گرماده بودن واکنش و میزان انرژی تبادل شده در واکنش از نکات مهم در این علم است. اهمیت این مسئله از آن جهت است که برای رآکتورها می‌باید دستگاه‌های گرمایش و یا سرمایش طراحی شود تا تبادل انرژی به‌خوبی انجام شود. وجود هر نوع اشکال و یا محاسبات نادرست در سیستم تبادل انرژی موجب اختلال در انجام واکنش، کیفیت محصول، مقدار محصول و حتی خطر جانی و مالی می‌شود. به‌عنوان نمونه در واکنش‌های گرماده شدید، در صورتی که گرمای تولیدشده در واکنش به‌خوبی تبادل نشود، افزایش بی‌رویه دما داخل رآکتور می‌تواند منجر به افزایش حجم و بالا رفتن فشار شود، همچنین در واکنش‌هایی که با تولید گاز شدید انجام می‌شوند، ممکن است موجب انفجار شود [۲].

۸-۱. انواع واکنش‌ها:

توجه به ماهیت و نوع واکنش نیز در طراحی رآکتور از اهمیت بالایی برخوردار است. مثلاً در واکنش‌های یک‌طرفه تقریباً تمام مواد واکنش‌دهنده با نسبت‌های استوکیومتری مشخص مصرف می‌شوند؛ اما در واکنش‌های تعادلی در یک سیستم بسته، در دما و فشار مشخص، مواد اولیه و مواد تولیدی پس از مدتی با یکدیگر به تعادل می‌رسند، یعنی با گذشت زمان، غلظت مواد دچار تغییر نشده و مقداری از مواد اولیه به‌صورت واکنش نداده در سیستم باقی می‌ماند. رفتار واکنش‌های تعادلی با اصلی به نام اصل لوشاتلیه بررسی می‌شود [۲].



در واکنش‌های رقابتی یک یا چند واکنش جانبی که منجر به تولید مواد بلااستفاده می‌شود، در کنار واکنش اصلی رخ می‌دهد. در این نوع واکنش‌ها باید پارامترهای فرآیند طوری طراحی شود که بیشترین

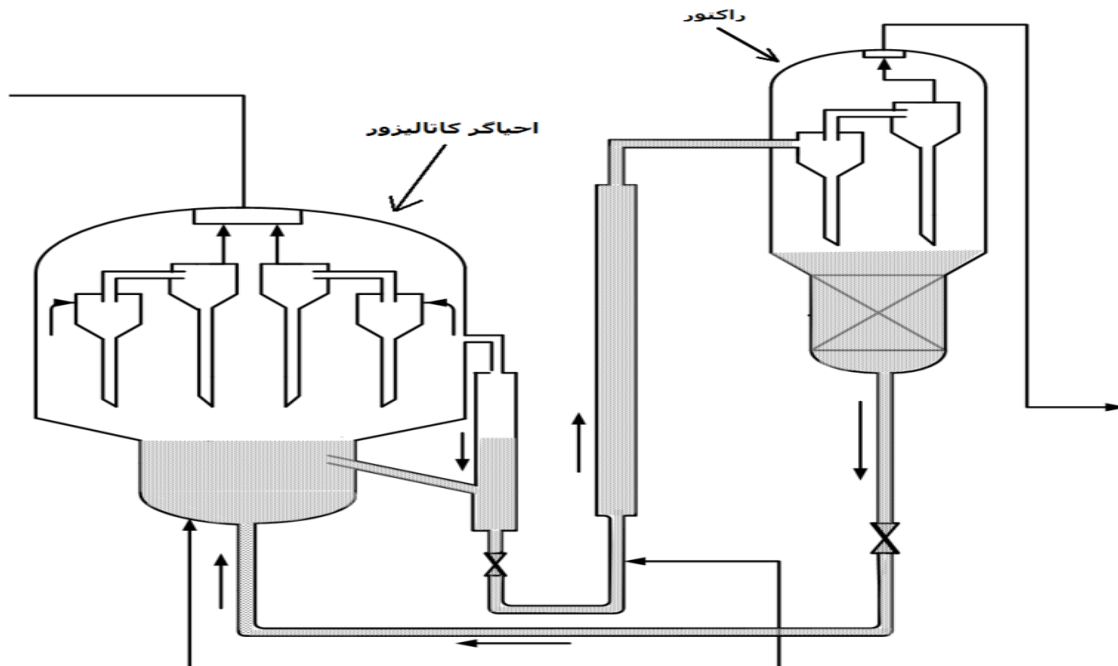
مقدار ممکن از ماده مطلوب تولید شود [۳].



همچنین در واکنش‌های سری چند واکنش پشت سر هم انجام می‌شود تا محصول نهایی تولید شود. به عبارتی واکنش کلی از ترکیب چند واکنش به وجود می‌آید. در این نوع واکنش‌ها، سرعت کلی واکنش به سرعت کندترین واکنش بستگی دارد [۳].

۹-۱. اثر کاتالیزورها در واکنش شیمیایی:

کاتالیزورها موادی هستند که با دخالت در واکنش و تغییر مسیر واکنش، سرعت واکنش را بالا می‌برند. از کاتالیزورها در واکنش‌هایی که در شرایط معمول با سرعت پایین انجام می‌شوند استفاده می‌شود. در نقطه مقابل مواد دیگری به نام بازدارنده‌ها وجود دارند که مانند کاتالیست هستند با این تفاوت که افزودن آن به واکنش موجب کندی و حتی توقف واکنش می‌شود. بازدارنده‌ها به‌طور ویژه در صنایع پلیمر و برای کنترل فرآیندهای پلیمراسیون در رآکتور شیمیایی کاربرد دارد. کاتالیزورها و بازدارنده‌ها می‌توانند به‌صورت همگن با فاز مواد درگیر در واکنش مصرف شوند که به واکنش‌های کاتالیستی همگن معروف هستند. واکنش‌هایی که کاتالیست و مواد درگیر در واکنش در یک‌فاز قرار ندارند به واکنش‌های کاتالیستی ناهمگن معروف هستند [۲]. این مواد معمولاً با درصد بسیار پایین و به اشکال مختلف در فرآیند مورد استفاده قرار می‌گیرند. ممکن است کاتالیزور یا بازدارنده به‌صورت ثابت در رآکتور شیمیایی قرار داشته باشد و مواد واکنش‌دهنده پس از تماس با آن خارج شوند. در نقطه مقابل ممکن است این مواد به‌صورت پودر یا اشکال دیگر به داخل رآکتور تزریق و سپس از آن خارج شوند. به‌عنوان نمونه در فرآیند کراکینگ کاتالیزوری سیال بستر (شکل ۱-۶)، کاتالیست زئولیت به‌صورت پودر به داخل رآکتور تزریق می‌شود. پس از اشباع شدن کاتالیزور، همراه با فرآورده‌ها از فرآیند خارج و پس از جداسازی و بازیابی مجدداً به داخل رآکتور تزریق می‌شود. به این ترتیب این چرخه دائماً ادامه پیدا می‌کند و کاتالیزور در فرآیند مرتباً در گردش است [۱۳].

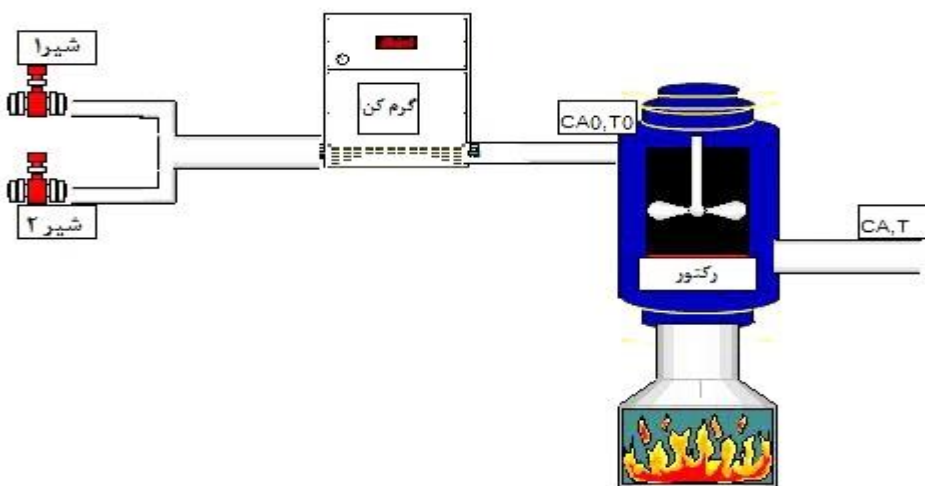


شکل ۱-۶: طرحی از یک فرآیند کاتالیزوری سیال بستر. در سمت راست رآکتور شیمیایی و در سمت چپ واحد بازیابی کاتالیست قرار دارد.

۱-۱۰. هدف پایان نامه:

از موارد مهم کنترل رآکتور رسیدن به دما، فشار، دبی و غلظت مطلوب است زیرا که بسیاری از واکنش‌ها فقط در یک دما و فشار مطلوب صورت می‌گیرد و اگر غیرازاین باشد این واکنش صورت نخواهد گرفت. از دیگر موارد کنترل رآکتور بحث ایمنی تجهیزات و کارگران است؛ زیرا گاهی اوقات افزایش دما و فشار کنترل نشده باعث ایجاد حادثه مالی و جانی جبران نشده‌ای برای کارگران و تجهیزات خواهد شد. اهمیت روش کنترل مقاوم در کنترل دستگاه‌های دارای عدم قطعیت مشخص می‌شود. عدم قطعیت مدل سیستم غیرخطی ممکن است ناشی از مبهم بودن دستگاه (ناشناخته بودن پارامترهای دستگاه)، یا ساده‌سازی هدفمند دینامیک‌های سیستم باشد. عدم قطعیت‌های مدل‌سازی می‌توانند به دودسته‌ی اصلی؛ عدم قطعیت‌های ساختاری (پارامتری) و عدم قطعیت‌های غیر ساختاری (دینامیک‌های مدل نشده) تقسیم شوند. دسته اول به بی‌دقتی اجزای مدل و دسته دوم به بی‌دقتی در مرتبه‌ی سیستم

مربوط می‌شوند. عدم قطعیت مدل‌سازی می‌تواند آثار نامطلوبی بر سیستم کنترل غیرخطی داشته باشد. هدف کلی از انجام این پایان‌نامه کنترل دما و غلظت یک راکتور CSTR در حضور نامعینی برای رسیدن به دما و غلظت مطلوب، از بین بردن پدیده چترینگ و مقایسه مقادیر بهینه ضرایب همگرایی روش تاگوچی و RSM¹ برای کاهش خطای دما و غلظت در یک راکتور CSTR با دو شیر قابل تنظیم ورودی می‌باشد که نتایج آزمایش نشان‌دهنده کارایی بسیار خوب کنترلر مد لغزشی برای کنترل دما و غلظت راکتور با روش RSM از نظر وقت و هزینه با خطای بسیار کم می‌باشد. شکل (۷-۱) نمای کلی سیستم طراحی شده برای کنترل دما و غلظت را نشان می‌دهد:



شکل ۷-۱: نمای کلی از سیستم با دو شیر ورودی و یک بویلر

¹ Response Surface Methodology

فصل ۲

مروری بر کارهای انجام شده

در این فصل به مروری بر کارهای انجام شده در زمینه‌ی کنترل دما، فشار و غلظت رآکتور و کنترل در حضور نامعینی‌ها برای رآکتور CSTR و روش‌های بهینه‌سازی RSM یا همان پاسخ سطح و تاگوچی که یک روش آماری بسیار دقیق است می‌پردازیم.

۲-۱. مقدمه:

مهندسی شیمی به‌عنوان یک دانش سامان‌یافته و روشمند، عمری کمی بیشتر از صدسال دارد. در اواخر سده‌ی ۱۹ میلادی این دانش به دلیل نیازی که به فرایندهای شیمیایی احساس می‌شد از مهندسی مکانیک جدا شد. پیش از انقلاب صنعتی در سده‌ی ۱۸ میلادی، شیمی در صنعت بیشتر به‌صورت تولیدات دسته‌ای یا (Batch production) بود. این‌گونه فرایندها بیشتر مانند آشپزی است یعنی مواد خام (مواد به‌صورت تکی) در یک ظرف در برابر گرما و فشار مناسب قرار می‌گرفتند، پس از دگرگونی‌های موردنیاز، آزمایش کیفیت می‌شدند تا مطمئن شوند به محصول نهایی دست‌یافته‌اند یا خیر، البته گاهی این فرایند به‌صورت گام‌به‌گام و از ظرفی به ظرف دیگر انجام می‌شد. این روش کند و کم بازده است ولی همچنان برای تولید برخی محصولات گران‌قیمت مانند عطر یا برخی عصاره‌های گیاهی کاربرد دارد. امروزه بیشتر مواد شیمیایی پس از عبور از یک «خط تولید» شیمیایی پیوسته تولید می‌شوند. انقلاب صنعتی در بازه‌ی زمانی گذار از روش تولید دسته‌ای به فرایند تولید پیوسته روی داد [۱۴]. همچنین در زمینه‌ی کنترل و بهینه‌سازی رکتورها روش‌های زیادی ارائه شده است برای مثال کنترلر فازی لغزشی و یا بهینه‌سازی به کمک الگوریتم GA^1 (ژنتیک) یا PSO^2 (پرندگان)، الگوریتم تفاضلی و غیره، ولی از جمله روش‌های دیگری که می‌توان به آن‌ها برای بهینه‌سازی اشاره کرد روش‌های آماری RSM یا همان پاسخ سطح و روش تاگوچی می‌باشد که با تعداد آزمایش‌های محدود می‌توان به نتایج بسیار خوبی در این زمینه دست‌یافت.

¹ Genetic Algorithm

² Particle swarm optimization

۲-۲. بهینه‌سازی به روش سطح پاسخ:

۲-۲-۱. بهینه‌سازی فرایند انعقاد الکتریکی:

مقدمه: فاضلاب ناشی از فرایندهای رنگ رزی و تکمیلی در صنعت نساجی، منبعی قابل توجه از آلودگی است که دارای رنگ شدید، اکسیژن موردنیاز شیمیایی بالا، pH متغیر (اسیدی یا بازی بسته به فرایند مورد استفاده)، دمای بالا، ذرات معلق و اکسیژن موردنیاز شیمیایی بالا است [۱۵، ۱۶]. فاضلاب‌های رنگی حاوی مواد شیمیایی سمی و سرطان‌زای منتشر شده به محیط‌زیست تحت واکنش‌های شیمیایی و بیولوژیکی و مصرف اکسیژن محلول آب‌ها، منبع آلودگی زیباشناختی است و با جلوگیری از نفوذ نور در آب باعث اختلال در زندگی آبزیان می‌شود و به دلیل مقاومت نسبت به نور، فعالیت بیولوژیکی و دیگر شرایط زیست‌محیطی تجزیه‌کننده، عامل آلودگی جدی محیط‌زیست به شمار می‌روند [۱۷]. این در حالی است که سالانه حدود ۱۰۰ هزار نوع رنگ مختلف در سرتاسر دنیا به میزان حدود ۷۰۰۰۰۰ ton تولید می‌گردد [۱۸، ۱۹]. بنابراین، این‌ها بایستی قبل از تخلیه نهایی جهت دستیابی به استانداردهای قانونی و زیباشناختی تصفیه گردند [۱۶، ۲۰].

روش متداول برای حذف رنگ از فاضلاب صنعتی عمدتاً شامل تصفیه‌های بیولوژیکی، فیزیک، شیمیایی و ترکیبی از آن‌هاست. تصفیه‌های بیولوژیکی ارزان‌تر از دیگر روش‌ها هستند، اما سمت رنگ معمولاً از رشد باکتریایی جلوگیری کرده و بنابراین راندمان رنگ‌زدایی را محدود می‌کند [۲۱]. روش‌های فیزیک و شیمیایی شامل جذب سطحی (مثلاً کربن فعال)، انعقاد-لخته‌سازی (با استفاده از نمک‌های معدنی یا پلیمرها)، اکسیداسیون شیمیایی (کلر و ازن زنی)، تجزیه نوری، اکسیداسیون پیشرفته، اسمز معکوس و اولترافیلتراسیون است [۲۲].

زمینه و هدف: انعقاد الکتریکی EC به‌عنوان یک روش الکتروشیمیایی جهت غلبه بر مشکلات فناوری‌های رنگ‌زدایی متعارف توسعه یافته و یک جایگزین مناسب برای تصفیه رنگ‌های نساجی است. هدف این مطالعه بهینه‌سازی فرایند EC برای رنگ‌زدایی و حذف COD از یک فاضلاب نساجی واقعی است.

روش بررسی: در تحقیق انجام‌شده، مقیاس آزمایشگاهی راکتور انعقاد الکتریکی جهت تصفیه فاضلاب نساجی طراحی، ساخته و مورد مطالعه قرار گرفت. متغیرهای بهره‌برداری اصلی شامل شدت جریان، زمان ماند، pH اولیه و جنس الکتروده به‌عنوان متغیرهای مستقل، رنگ و COD به‌عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته شد. مراحل آزمایش با استفاده از متغیرهای انتخابی توسط نرم‌افزار Design Expert 7 طراحی شد و فرایند برای رنگ‌زدایی و حذف COD با استفاده از روش سطح پاسخ بهینه‌سازی گردید. آهن و آلومینیوم به دلیل قیمت مناسب و دسترسی آسان بیشترین کاربرد را در انعقاد الکتریکی دارا هستند [۲۳]. هیدروکسید این فلزات باعث انعقاد و ایجاد لخته و در نهایت حذف رنگ و مواد آلی می‌گردد. قبل از اجرای فرایند انعقاد الکتریکی در مقیاس کامل، نیاز به تعیین شرایط بهینه کارکرد فرایند در مقیاس آزمایشگاهی است. بر این اساس، هدف اصلی تحقیق انجام‌شده، بررسی اثرات عوامل اصلی عملیاتی بر روی راندمان فرایند الکتروشیمیایی در تصفیه فاضلاب رنگی صنایع نساجی است. در این مطالعه، از روش سطح پاسخ (Response Surface Methodology) جهت طراحی آزمایش‌ها و شرایط بهینه استفاده شده است. RSM یک شاخه مهمی از طراحی تجربی و یک ابزار اساسی در توسعه فرایندهای جدید، بهینه‌سازی عملکرد آن‌ها و بهبود طراحی و فرمول‌بندی فرآورده‌های جدید است [۲۴]. این روش روی اثرات و رابطه بین متغیرهای فرایند جهت به حداکثر رساندن راندمان‌های رنگ‌زدایی و حذف COD تمرکز می‌کند و هدف آن تعیین شرایط بهینه است.

اثرات شدت جریان و نتایج آزمایش:

در آزمایش انجام‌شده تأثیر شدت جریان در رنگ‌زدایی و حذف COD به‌وسیله الکتروده آهن و آلومینیوم دیده می‌شود که به‌طور کلی با افزایش شدت جریان عملکرد رنگ‌زدایی و حذف COD افزایش می‌یابد. در مطالعات پیشین نشان داده شده است که شدت جریان به‌شدت عملکرد انعقاد الکتریکی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و مؤثر بر عملکرد و اقتصاد فرایند است در همه فرایندهای الکتروشیمیایی، شدت جریان، میزان تولید منعقد کننده و بنابراین سرعت تولید و اندازه حباب‌ها را تعیین می‌کند بر روی رشد بلاک‌ها مؤثر است [۲۵].

۲-۲-۲. گرانول کردن کود کمپوست

با افزایش تولید مواد غذایی، انواع مختلف مواد فرعی و پسماندها ایجاد می‌گردد که این مواد شامل بقایای تولیدات گیاهی، مواد فرعی دامی، بیوماس و غیره می‌باشند که می‌تواند در طی فرآیندی تبدیل به کود کمپوست گردد که به‌عنوان مواد مغذی کودی برای مزارع استفاده شود [۲۶]؛ اما مشکلاتی در زمینه‌ی استفاده از کودها در مزارع وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از: حمل‌ونقل به علت حجم زیاد، رطوبت، توزیع کود در مزرعه، گردوغبار و انبارداری. راه‌حلی که برای رفع این مشکلات در نظر گرفته می‌شود، استفاده از فشرده‌سازی مواد پودری همانند پلت و گرانول کردن می‌باشد [۲۷]. گرانول کردن یکی از مهم‌ترین روش‌ها در صنعت کود سازی شیمیایی است. تا قبل از سال ۱۹۵۰ اکثر کودهای شیمیایی به شکل غیر گرانول به بازار عرضه می‌شد. در این حالت وقتی مواد انبار می‌شدند حالت سفتی به خود می‌گرفتند و گردوغبار از خود تولید می‌کردند [۲۸]. هدف از تحقیق انجام‌شده بررسی تأثیر پارامترهای گرانول کردن کود کمپوست کامل بر روی درصد گرانول‌های مفید با استفاده از روش سطح پاسخ می‌باشد. با توجه به ملاک‌هایی که برای گرانول کردن مانند ساختار ساده دستگاه گرانول ساز، هزینه پایین تولید گرانول، تولید بالا در واحد زمان، کارهای مشابه قبلی در زمینه‌ی گرانول کردن کود و عدم‌تغییر در ساختار شیمیایی مواد اولیه، روش گرانول کردن با استوانه دوار انتخاب گردید که جزء گرانول کردن مرطوب می‌باشد. پارامترهای که بر درصد گرانول مفید، گرانول‌های تولیدی در روش استوانه دوار تأثیر می‌گذارد؛ سرعت چرخش استوانه دوار، زمان گرانول کردن، درصد پرشدگی استوانه دوار از مواد اولیه و غلظت چسباننده می‌باشد.

مراحل تولید گرانول با استفاده از یک استوانه دوار می‌باشد. برای گرانول کردن ابتدا نسبت محلول چسباننده را در آبپاش آماده کرده و مقدار کود موردنظر، وزن شده و در داخل استوانه قرار داده شد. سپس استوانه با دور تعریف‌شده تنظیم شد و چسباننده از طریق سوراخی به قطر ۶ سانتی‌متر که بر روی تلق ایجادشده بود اسپری شد. اندازه‌ای که برای گرانول مفید تعیین‌شده، بین ۴/۷۵ تا ۱۲/۷ میلی‌متر است که این اندازه قابل پخش شدن توسط کودپاش و کاشت هم‌زمان با بذر در خطی کارها

است. همچنین این اندازه بسته به نوع نیاز و شرایط قابل تغییر و تعریف مجدد است.

روش سطح پاسخ (RSM)، مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است که برای تحلیل و مدل‌سازی پاسخ‌های یک فرآیند استفاده می‌شود که در نهایت هدف آن بهینه‌سازی فرآیند است. این روش در واقع یک روش طراحی آماری است که فاکتورهای انتخاب‌شده از مراحل قبل با جزئیات بیشتری مورد بررسی قرار می‌گیرد. یکی از مزایای روش سطح پاسخ کاهش تعداد آزمایش‌هاست [۲۹]. در این قسمت سعی بر این است که فرآیند گرانول کردن کود کمپوست کامل توسط روش سطح پاسخ بهینه‌سازی گردد. در مرحله اول اهداف مورد نظر برای هر پاسخ و همچنین برای هر متغیر مشخص شد.

برای کاهش مصرف انرژی و کاهش هزینه، سرعت چرخش استوانه در مقدار کمینه، زمان گرانول کردن در مقدار کمینه و همچنین درصد پرشدگی در مقدار بیشینه، به‌عنوان هدف بهینه‌سازی در نظر گرفته شد. همچنین برای این که حداقل مقدار ملاس استفاده شود، مقدار ملاس در حالت کمینه در نظر گرفته شد. برای پاسخ‌ها، مقدار درصد گرانول‌های مفید در حالت بیشینه تعریف شد. پس از تعیین اهداف مطلوب، آزمایش‌هایی که بتواند ما را به این اهداف برساند توسط روش RSM و به‌وسیله نرم‌افزار Design Expert 6 پیشنهاد شد.

با استفاده از روش RSM و نرم‌افزار Design Expert 6 که برای به دست آوردن سطوح انجام شد، تعداد ۲۹ تیمار شامل ۵ تکرار در نقطه مرکزی انجام گردید [۳۰].

نتایج حاصل از تجزیه واریانس

نتایج حاصل از تحلیل واریانس نشان می‌دهد که سه عامل زمان فرآیند گرانول کردن، درصد پرشدگی و غلظت چسباننده در سطح یک درصد تأثیر معنی‌داری بر روی مقدار گرانول‌های مفید دارد. افزایش زمان گرانول کردن از ۱۵ دقیقه به ۲۰ دقیقه، مقدار مفید گرانول از ۷۶ درصد به ۶۷ درصد کاهش یافت که این کاهش به‌اندازه ۹ درصد گرانول مفید برای افزایش ۵ دقیقه زمان گرانول کردن

است. با افزایش زمان گرانول شدن، متوسط اندازه گرانول‌ها بیشتر می‌شود [۳۱]. در نتیجه گرانول‌های بیشتری از محدوده تعریف‌شده برای گرانول مفید، عبور کرده و باعث کاهش درصد گرانول مفید می‌شود.

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد پرشدگی استوانه از ۵ درصد به ۱۰ درصد، مقدار مفید گرانول از ۶۴/۶ درصد به ۷۹ درصد افزایش یافت که این افزایش به‌اندازه ۱۴/۴ درصد گرانول مفید برای افزایش ۵ درصد پرشدگی استوانه است. که بیشترین تأثیر را در پارامتر مقدار گرانول مفید دارا است و همچنین با افزایش غلظت چسباننده از ۴۰ درصد ملاس به ۶۰ درصد (مقدار ملاس به‌کل محلول چسباننده آب و ملاس)، مقدار مفید گرانول از ۷۰/۸ درصد به ۷۲/۶ درصد افزایش یافت که این افزایش به‌اندازه ۱/۸ درصد گرانول مفید برای افزایش ۲۰ درصد از درصد ملاس است و کمترین تأثیر را بر روی درصد گرانول مفید دارا می‌باشد. با افزایش غلظت چسباننده، متوسط اندازه گرانول‌ها با توجه به چسبانندگی بیشتر چسباننده، به مقدار کمی افزایش می‌یابد و این افزایش باعث افزایش اندکی در مقدار درصد گرانول مفید می‌شود. در تحقیقی که گزارش شد افزایش درصد پرشدگی استوانه دوار موجب کاهش متوسط اندازه گرانول‌های تولیدی می‌شود [۳۲].

مطلوب‌ترین شرایط آزمایش شاخص رضایتمندی است که توسط سطح پاسخ پیشنهاد شد. با توجه به نتایج شاخص رضایتمندی در سرعت چرخش ۴۰/۳۸ دور بر دقیقه، زمان گرانول کردن ۱۵ دقیقه، درصد پرشدگی ۱۰ درصد از حجم استوانه و درصد چسباننده ۴۰/۹۷ درصد، مناسب‌ترین پاسخ و شرایط آزمایش را می‌دهد.

۲-۳-۲. استخراج اینولین از غده سیب‌زمینی ترشی

اینولین، در بیش از ۳۶۰۰۰ نوع گیاه تولید می‌شود و پلیمر ذخیره‌ای گیاهانی نظیر کاسنی، غده‌ی کوکب، کنگر فرنگی و سیب‌زمینی ترشی می‌باشد. اینولین توسط برخی باکتری و قارچ‌ها نیز سنتز می‌شود که تفاوت اینولین تولیدی با اینولین گیاهی در درجه پلیمریزاسیون آن می‌باشد [۳۳، ۳۴]. هدف از انجام تحقیق، دستیابی شرایط بهینه‌ی استخراج آبی اینولین از سیب‌زمینی ترشی با استفاده از

روش سطح پاسخ برای تعیین مقادیر بهینه‌ی فاکتورهای موردبررسی بود. مهم‌ترین مسئله تحقیق انجام‌شده بررسی آثار اصلی و متقابل فاکتورها بود، از این‌رو طرح آماری سطح پاسخ انتخاب شد [۳۵]. در مطالعه انجام شده اثر متغیرهای مستقل شامل X_1 دما، X_2 زمان، X_3 نسبت حلال به ماده جامد، در سه سطح مورد ارزیابی قرار گرفت؛ و شش تکرار نقطه مرکزی برای تخمین خطای آزمایش استفاده شد؛ و از طرح مرکب مرکزی با سه متغیر مستقل؛ شامل دما، نسبت آب به دانه و زمان استخراج، در سه سطح، سه بلوک و شش تکرار در نقطه مرکزی طرح برای محاسبه تکرارپذیری فرایند به‌منظور بررسی تأثیر شرایط استخراج اینولین و بهینه‌سازی فرآیند مذکور استفاده شد. تعداد کل آزمایش‌ها با دو تکرار برابر ۴۰ بوده و متغیر وابسته (پاسخ)، درصد بازده استخراج اینولین بود. نتایج فرایند بهینه‌سازی، نشان داد؛ شرایط بهینه استخراج آبی اینولین با راندمان ۴۳ درصد؛ شامل دمای ۷۶/۴۲ درجه سانتی‌گراد زمان ۲۴ دقیقه و نسبت آب به ماده‌ی جامد ۱۲ تعیین گردید؛ و همچنین بیانگر کارایی مفید متدولوژی رویه پاسخ در بهینه‌سازی فرایند استخراج اینولین از سیب‌زمینی ترشی بود. از میان شرایطی که برای استخراج اینولین از سیب‌زمینی ترشی اعمال شد، مشخص شد که راندمان استخراج از نسبت آب به دانه و دما تأثیر می‌پذیرند، به طوری که نسبت آب به دانه به میزان بیشتری از دما بر راندمان تأثیر داشته و اثر زمان نسبت به دو فاکتور دیگر به میزان کمتری بود. بایستی اشاره نمود که هدف از انجام تحقیق، به دست آوردن شرایط تأثیرگذار بر استخراج اینولین از سیب‌زمینی ترشی به‌عنوان یک کار آغازین بود که به‌هرحال، انجام تحقیقات بیشتر در این رابطه ضروری جلوه می‌نماید. از نتایج به‌دست‌آمده می‌توان چنین برداشت نمود که استخراج اینولین از سیب‌زمینی ترشی در کشور با توجه به هزینه‌ی بالای واردات آن و کاربرد وسیع آن در زمینه‌ی دارویی و تغذیه‌ای، منطقی خواهد بود [۳۶].

۲-۲-۴. استخراج اینولین از ریشه بابا آدم

اینولین به علت داشتن ویژگی‌های مفید تغذیه‌ای و اثرات پری باپوتیک به‌طور بسیار گسترده‌ای در غذاهای عملگر در سطح جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. ریشه بابا آدم حاوی اینولین بوده و به میزان وسیعی در مناطق شمالی و غرب ایران کشت می‌شوند؛ اما همچنان اطلاعات کمی در خصوص نحوه

استخراج آن موجود است. در پژوهش انجام شده از طرح مرکب مرکزی، به منظور بررسی تأثیر هم‌زمان؛ نسبت آب به ماده‌ی جامد V/W (۱۵-۵)، زمان (۴۰-۵ دقیقه) و دمای (۹۰-۴۰ درجه سانتی‌گراد) بر راندمان اینولین استخراج شده از ریشه بابا آدم بهره گرفته شد. روش سطح پاسخ، جهت یافتن حالت بهینه برهم‌کنش فاکتورها و برآورد بهترین شرایط فرایند با کمترین تعداد آزمایش قابل اجراست. جهت تعیین میزان اینولین، میزان قند کل و قند احیاء به ترتیب توسط روش فنل سولفوریک اسید و دی نیتروسالیسیلیک اسید، محاسبه شد. نتایج حاصل از تحقیق انجام شده بیانگر کارایی مفید متدولوژی رویه پاسخ در بهینه‌سازی فرایند استخراج بود. از میان شرایطی که برای استخراج اینولین از ریشه بابا آدم اعمال شد، مشخص شد که راندمان استخراج از نسبت آب به دانه و زمان تأثیر می‌پذیرند، به طوری که نسبت آب به دانه به میزان بیشتری از زمان بر راندمان تأثیر داشت. بایستی اشاره نمود که هدف از انجام این تحقیق، به دست آوردن شرایط تأثیرگذار بر استخراج اینولین از ریشه بابا آدم به عنوان یک کار آغازین بود که به هر حال، انجام تحقیقات بیشتر در این رابطه ضروری جلوه می‌نماید. از نتایج به دست آمده می‌توان چنین برداشت نمود که اینولین استحصال از بابا آدم، قابل رقابت با اینولین استحصال از کاسنی اروپا و آمریکاست؛ همچنین استخراج اینولین از ریشه بابا آدم در کشور با توجه به هزینه‌ی بالای واردات آن و کاربرد وسیع آن در زمینه‌ی دارویی و تغذیه‌ای، منطقی خواهد بود [۳۷].

۲-۲-۵. فرایند خشک کردن لایه‌نازک موز

خشک کردن یکی از قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری مواد غذایی است ولی به علت امکان بروز برخی تغییرات نامطلوب در ماده غذایی خشک شده، کنترل این فرآیند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روش سطح پاسخ، مجموعه‌ای از تکنیک‌هایی است که جهت کنترل و بهینه‌سازی فرآیندهایی به کار می‌رود که در آن‌ها سطح مورد نظر تحت تأثیر متغیرهای بسیاری قرار می‌گیرد لذا این روش می‌تواند یکی از راههای مناسب برای کنترل زمان و شرایط مختلف خشک کردن باشد. در پژوهش انجام شده، فرآیند خشک کردن لایه‌نازک موز در چهار دما، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد، سه سرعت هوای ورودی، ۰/۵، ۱ و ۵/۱ متر بر ثانیه و سه ضخامت ۲، ۴ و ۶ میلی‌متر انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که

بیشترین مطلوبیت مربوط به مقدار ۰/۹۱، به منظور کمینه کردن محتوای رطوبت و بیشینه کردن نرخ خشک شدن در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت هوا ۱/۵ متر بر ثانیه، زمان ۱۰۰ دقیقه و ضخامت ۲ میلی‌متر می‌باشد [۳۸].

۲-۲-۶. بهینه‌سازی شرایط استخراج صمغ دانه بزرک ایرانی

در این پروژه استخراج آبی صمغ دانه بزرک (*Linum usitatissimum*) با استفاده از طرح آماری روش صفحه پاسخ (RSM) بهینه‌سازی شد. درجه حرارت استخراج در دامنه (۴۵-۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) PH در حدود (۳-۷) و نسبت آب به دانه در دمای (۲-۲۴) به عنوان فاکتور مؤثر بر درصد بازده استخراج، مقدار پروتئین و ویسکوزیته ظاهری صمغ استخراج‌شده، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که درجه حرارت و PH، دو فاکتور مؤثر بر بازده و کیفیت صمغ استخراجی (خلوص و ویسکوزیته ظاهری) است در صورتی که فاکتور نسبت آب به دانه، دارای اثر کمتری می‌باشد. شرایط بهینه صمغ دانه بزرگ به صورت زیر استخراج گردید، درجه حرارت: (۸۹-۹۰ درجه سانتی‌گراد)، نسبت آب به دانه ۱۴ و PH ۶/۵ تا ۷ و ویسکوزیته صمغ ظاهری نیز اندازه‌گیری شد و اثر استخراج بر خصوصیت رئولوژیکی صمغ حاصل مورد بررسی قرار گرفت [۳۹].

۲-۲-۷. الیاف آمیخته پلی‌پروپیلن _ پلی بوتیلن ترفنالت (PP/PBT)

یکی از اهداف مهم اختلاط پلیمرها در تولید الیاف آمیخته‌ای، بهبود خواص مکانیکی الیاف است. به دلیل تعدد اجزای پلیمری در تولید الیاف آمیخته‌ای، معمولاً بهینه‌سازی ترکیب درصد اجزا، برای دستیابی به خواص بهینه، مستلزم صرف زمان طولانی و هزینه زیاد است. در پژوهش انجام‌شده، با استفاده از روش طراحی آزمایش رویه پاسخ، طرح آزمایشی تهیه شد. متغیرهای ورودی، ترکیب درصد جزء پراکنده و سازگار کننده بود و نتایج خروجی مدنظر از خواص مکانیکی شامل، ازدیاد طول تا پارگی، استحکام، مدول اولیه و کار مخصوص تا پارگی و ضرایب تغییرات آن‌ها انتخاب شدند. با استفاده از طراحی آزمایش، الیاف آمیخته پلیمری به روش مذاب ریسی و با استفاده از اکسترودر تک پیچی

مجهز به ناحیه اختلاط فلوتی از نوع مدوک (Maddock) تهیه شدند. پس از بررسی خواص مکانیکی نمونه‌ها، با استفاده از این روش آماری، ترکیب درصد بهینه اجزا برای تولید الیاف آمیخت با خواص مکانیکی مطلوب، تعیین و مدل‌هایی برای پیش‌بینی خواص مکانیکی ارائه شده است. ترکیب درصد بهینه با استفاده از این روش، با توجه به اجزای بستر -پراکنده و سازگار کننده به ترتیب ۶۴/۸، ۳۱/۷- و ۳/۵ معین شد. همچنین، نتایج ترکیب درصد بهینه و روند تغییرات خواص مکانیکی با استفاده از روش رویه پاسخ، انطباق بسیار خوبی با نتایج تجربی تولید هر یک از نمونه‌ها را نشان داد [۴۰].

۲-۲-۸. تولید نفت در چاه‌های هوشمند

بهینه‌سازی تولید از میادین هیدروکربوری یکی از دغدغه‌های اصلی مدیریت مخازن نفت و گاز است؛ که برای کنترل بهینه تولید از تکنولوژی چاه هوشمند استفاده می‌شود. از جمله چالش‌های مهم این تکنولوژی، تنظیم بهینه شیرهای کنترلی هوشمند است. در تحقیق انجام شده باهدف بهینه‌سازی تنظیمات شیرهای کنترلی هوشمند، نتایج حاصل باحالت معمولی مقایسه شده است. در این راستا از روش‌های طرح آزمایش تاگوچی و سطح پاسخ برای مدل‌سازی و تعیین ارتباط تنظیمات شیرهای کنترلی با مقدار تولید نفت و بهینه‌سازی غیرخطی برای تعیین تنظیمات بهینه شیرهای کنترلی به‌منظور بیشینه کردن تولید نفت، کمینه کردن تولید آب و کاهش زمان محاسبات استفاده شده است [۴۱].

۲-۲-۹. تصفیه پساب آب‌صابون با استفاده از کلرور فریک

برای فرآیندهای ماشین‌کاری فلزات، جهت کاهش گرما و روان کاری در نقطه تماس تیغه با قطعه کاری، استفاده از مایع خنک‌کننده، معروف به آب‌صابون صنعتی نیاز است. در اثر استفاده طولانی‌مدت از آب‌صابون، ساختار شیمیایی آن‌ها تخریب شده و قابلیت مصرف خود را از دست می‌دهند؛ بنابراین بایستی با به‌کارگیری یک روش ایمن آن‌ها را دفع نمود. یکی از روش‌های تصفیه این‌گونه پساب‌ها انعقاد و لخته‌سازی با استفاده از مواد منعقد کننده شیمیایی است. در تحقیق انجام شده از منعقد کننده کلرور فریک برای تصفیه این‌گونه پساب‌ها و جهت بهینه‌سازی فرآیند انعقاد از طرح مرکب مرکزی و روش

سطح پاسخ استفاده گردید. با استفاده از کلرور فریک و به کارگیری یک دستگاه، جار شش خانه‌ای راندمان حذف اکسیژن مورد نیاز شیمیایی COD، کدورت و میزان آزاد شدن روغن به دست آمد. برای بهینه‌سازی پارامترهای بهره‌برداری از فرآیند، شامل PH و مقدار مواد منعقد کننده از طرح مرکب مرکزی و روش سطح پاسخ استفاده شد؛ و برای محاسبه سه متغیر پاسخ، شامل COD، کدورت و روغن آزاد شده از مدل درجه دوم استفاده شد.

نتایج: استفاده از منعقد کننده کلرور فریک در تصفیه آب‌صابون صنعتی، دارای راندمان حذف خوبی در حذف شاخص‌های آلاینده‌گی مورد بررسی داشته و در مقایسه با یک منعقد کننده متداول مثل آلوم، مقدار مصرف منعقد کننده تقریباً برابر اما در خصوص راندمان حذف آلاینده‌ها دارای راندمان بالاتری است. همین‌طور از طرح مرکب مرکزی و روش سطح پاسخ می‌توان برای بهینه‌سازی فرآیند انعقاد و لخته سازی استفاده نمود [۴۲].

۲-۳. بهینه‌سازی به روش تاگوچی

یکی از ساده‌ترین روش‌هایی که امروزه در صنایع متفاوت مورد استفاده قرار می‌گیرد تاگوچی است. با استفاده از این روش که یکی از انواع طراحی آزمایش به صورت فاکتوریل جزئی است، آزمایش‌های لازم برای بهینه‌سازی شرایط تولید به تعداد معدودی قابل کاهش است. شرکت‌های معتبری از جمله فورد، آی تی تی، مینولتا، نیسان، زیراکس و سازمان ناسا در زمینه‌های مختلف از این روش جهت بهینه‌سازی فرآیندهای مورد نظر خود استفاده کرده‌اند [۴۳، ۴۴].

۲-۳-۱. فرایند متالورژی پودر جهت تولید آلیاژ حافظه‌دار نایتیلون

در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی به کمک روش تاگوچی صورت گرفته است. از جمله تولید نمونه‌های آلیاژ حافظه‌دار نایتیلون از فرآیند متالورژی پودر، در تحقیق انجام شده فاکتورهای " زمان آسیا کاری"، " فشار پرس"، " زمان تف جوشی" و " درصد اتمی مس" به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شدند. همچنین ماکزیمم نمودن دمای اتمام استحال استنیتی (Af) به دمای بدن به عنوان تابع هدف تعریف

گردید. نتایج نشان داد که فاکتورهای " زمان آسیا کاری"، "فشار پرس"، درصد اتمی مس بیشترین تأثیر و پارامتر " زمان تف جوشی" با توجه به سطوح انتخابی مربوطه کمترین تأثیر را در فرآیند دارا می‌باشند. همچنین بررسی‌ها نشان داد که نمونه‌های تولیدی شامل فاز نایتینول همراه با سایر ترکیبات بین فلزی می‌باشند. نتایج آزمایش تأییدی، مؤید کارایی روش بکار گرفته‌شده در بهینه‌سازی فرآیند مذکور می‌باشد [۴۵].

۲-۳-۲. بهینه‌سازی تولید توفو از نظر وزن و طعم

به نظر می‌رسد بو و طعم سویا و اجزای ترکیبی پروتئین‌های سویا تا حدی باعث محدود شدن مصرف سویا توسط انسان گردیده است. مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر در طعم و بازدهی تولید توفو، واریته سویای مورد مصرف، دمای انعقاد توفو، ماده منعقد کننده و میزان آب مصرفی می‌باشد. در بررسی انجام‌شده سعی گردیده است با استفاده از روش تاگوچی فاکتورهای اساسی درزمینه‌ی بازدهی تولید و طعم توفو با استفاده از منعقد کننده CaSO_4 و MgCl_2 بهینه‌سازی گردد. نتایج نشان می‌دهد بیشترین تأثیر مربوط به آب مصرفی برای تولید شیر سویا است و پس از آن بیشترین تأثیر را دمای آزمایش دارد و کمترین اثر مربوط به مقدار ماده منعقد کننده است. به‌رحال شرایط بهینه تولید توفو با مناسب‌ترین طعم نشان می‌دهد استفاده از دما در سطح دوم ۷۰ درجه سانتی‌گراد، مقدار آب مصرفی در سطح دوم (۲۲:۱) و مقدار ماده منعقد کننده در سطح سوم (۲٪) دارای بهترین شرایط است. باید توجه داشت چون ارزیابی حسی توسط افراد صورت پذیرفته است بدیهی است که شرایط ارزیابی می‌تواند از خطای انسانی بیشتری برخوردار باشد که این موضوع در نتایج مشاهده می‌گردد. مراجعه به گزارش‌های مختلف درزمینه‌ی تولید توفو نشان می‌دهد به‌طور مستقیم بهینه‌سازی تولید توفو از نظر بازدهی تولید چندان مورد توجه قرار نگرفته است و بیشتر به کیفیت توفوی تولیدشده از نظر خواص کشسانی، وزن مخصوص و موارد دیگر معطوف گردیده است [۴۶، ۴۷، ۴۸، ۴۹] درحالی‌که شرایط تولید به‌خوبی بر روی بازدهی تولید و طعم مؤثر است [۵۰].

۲-۳-۳. بهینه‌سازی کیفیت از طریق طراحی پارامتر

کارخانه‌های مقدم سهامی عام یکی از قدیمی‌ترین کارخانجات نساجی ریسندگی و بافندگی در ایران است. اما با توجه به پیشرفت‌های جدیدی که در تکنولوژی ماشین‌آلات جدید در صنعت نساجی صورت گرفته، این کارخانه نتوانسته ماشین‌آلات خود را همپای آن توسعه دهد. به همین دلیل لزوم بهبود کیفیت محصولات تولیدی با امکانات موجود همواره مدنظر بوده است. با توجه به این که محصول نهایی سالن ریسندگی نازک رسی به‌عنوان مواد اولیه برای بافت پارچه و در نتیجه تغذیه‌ی سالن‌های دیگر می‌باشد، هم‌چنین با در نظر گرفتن مشکلاتی که در حال حاضر به دلیل کیفیت پایین نخ تولیدشده در سالن‌های دیگر به وجود آمده است، با استفاده از روش تاگوچی بهبود کیفیت در سالن ریسندگی مورد توجه قرار گرفته است. مشکلات کیفی که در این سالن گزارش شده شامل: وجود نخ‌های پرتاب و کم تاب، وجود نخ‌های کلفت و نازک و پایین بودن استحکام نخ می‌باشد [۵۱].

۲-۳-۴. ساخت نانو ذرات هیدروکسی آپاتیت

هیدروکسی آپاتیت HA به علت خاصیت زیست فعالی به‌عنوان یک بیو سرامیک به گونه گسترده‌ای در پزشکی و دندانپزشکی استفاده می‌شود. مقدار خلوص HA بر ویژگی زیست فعالیتی آن تأثیر دارد و روش سل_ژل یکی از روش‌های مهم تولید نانو ذرات هیدروکسی آپاتیت است که پارامترهای متعددی در این روش بر خلوص HA تأثیر دارد؛ بنابراین در پژوهش انجام‌شده نانو ذرات هیدروکسی آپاتیت در شرایط گوناگون با روش سل_ژل تولید و به‌منظور کاهش تعداد آزمایش‌ها از روش آماری تاگوچی استفاده شد. بر اساس نتایج شرایط بهینه برای تولید هیدروکسی آپاتیت با بیشترین خلوص، دمای کلسینه ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، زمان کلسینه ۲ ساعت، زمان هیدرولیز ۷۲ ساعت و زمان پیرسازی ۴۸ ساعت است. دمای کلسینه با ۶۰ درصد مشارکت دارای بیشترین تأثیر بر خلوص هیدروکسی آپاتیت است [۵۲].

۲-۳-۵. اختلاط بهینه بتن خودتراکم

بتن خودتراکم، به دلیل روانی بالا سبب افزایش سرعت و کیفیت بیشتر در اجرا گردیده که این امر باعث گسترش روزافزون آن در صنعت ساختمان شده است. روش‌های طراحی طرح اختلاط بهینه این نوع بتن می‌تواند با کاهش هزینه‌ها، موجب تمایل بیشتر کارفرمایان به استفاده از آن و صرفه‌جویی اقتصادی گردد.

در تحقیق انجام‌شده، ضمن تعریف خواص این نوع بتن و روش‌های بهینه‌سازی، با بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر تولید و طرح اختلاط از قبیل سیمان، شن، ماسه، آب، فوق روان کننده و مواد پودری به تعیین متغیرهای تصمیم، تابع هدف و محدودیت‌های مربوط و همچنین معرفی روش‌های رایج ریاضی طرح اختلاط و مقایسه آن‌ها پرداخته و طرح اختلاط بهینه برای بتن خودتراکم با مقاومت بالا ارائه شده است. روش تاگوچی به‌عنوان یک روش طرح اختلاط بهینه‌ی بتن بر اساس داده‌های آماری و بر اساس نسبت‌های جرمی و یا حجمی اجزا به‌کل بتن [۵۳، ۵۴] و بهینه‌سازی بر اساس تعیین حجم فضای خالی برای سائزهای متفاوت ذرات سیلیکا با روش طراحی باکس بنکن [۵۵] به‌عنوان روش‌های آماری طراحی اختلاط بتن موردبررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داد که طراحی بهینه طرح اختلاط بتن خودتراکم با مقاومت بالا با توجه به تعداد اجزای تشکیل‌دهنده‌ی آن، وابستگی زیادی به انتخاب صحیح نوع تابع هدف و محدودیت‌های انتخاب‌شده و تناسب رابطه هرکدام از موارد با مقاومت فشاری بتن خودتراکم و همچنین پارامترهای زیادی از نسبت مواد تشکیل‌دهنده‌ی اجزاء آن مانند نسبت آب به سیمان، آب به مواد پودری، نسبت سنگ‌دانه و دیگر نسبت‌های مؤثر دارد [۵۶].

۲-۳-۶. بهبود کارایی پیش‌بینی تقاضای برق

از رویکرد شبکه عصبی مصنوعی که از پرکاربردترین روش‌های پیش‌بینی است به‌منظور پیش‌بینی مصرف برق شهر یزد استفاده شده است. سپس با استفاده از طراحی آماری تاگوچی ابتدا مهم‌ترین عامل قابل کنترل پیش‌بینی [۵۷] یعنی دوره زمانی داده‌ها، طول افق و تعداد مشاهدات موردنظر در آرایه‌ی متعامد درونی پیکربندی شده و در ادامه مهم‌ترین پارامترهای قابل تنظیم شبکه‌ی عصبی بر اساس

تحقیق [۵۸] شامل تعداد لایه‌های پنهان شبکه، تعداد نورون در هر لایه‌ی پنهان و نرخ یادگیری در آرایه‌ی متعامد بیرونی قرار داده می‌شود تا بتوان اثر آن‌ها را در تعیین وضعیت سطح بهینه‌ی عوامل قابل کنترل به‌طور کامل بررسی کرد. به همین منظور الگویی ۸ مرحله‌ای ارائه شده و از داده‌های واقعی مصرف انرژی برق یزد استفاده می‌شود تا به کارگیری این الگو در یک نمونه‌ی تجربی بیان شود.

نتیجه: روش طراحی آزمایشات تاگوچی برای سنجش مدل پیش‌بینی که تحت تأثیر چندین عامل قابل کنترل و نویز است به کار برده شده است. به کارگیری هم‌زمان آرایه‌های متعامد درونی و بیرونی در طراحی آزمایشات تاگوچی و ترکیب آن با پیش‌بینی انجام گرفته توسط شبکه‌ی عصبی نشان می‌دهد که بهترین پیش‌بینی زمانی اتفاق می‌افتد که دوره‌ی زمانی داده‌ها ۲ ماهه، طول افق پیش‌بینی ۲۴ ماهه و تعداد مشاهدات مورد نیاز ۱۲۰ ماهه باشد. در نهایت نیز ارزیابی و رتبه‌بندی عوامل قابل کنترل مشخص کرد که دوره‌ی زمانی داده‌ها با درصد مشارکت $48/73$ در نتایج آزمایش، بیش‌ترین تأثیر را در کیفیت پیش‌بینی انجام شده دارد [۵۹].

۲-۴. کنترل مد لغزشی فازی و فیلتر کالمن:

کنترل مد لغزشی یک روش کنترلی قوی برای بعضی سیستم‌های غیرخطی است. آن دارای مزایای نیرومندسازی خوب در مقابل عدم اطمینان‌ها و اختلالات بیرونی است. مشروط بر اینکه عدم اطمینان‌ها و اختلالات در محدوده یک پیوستگی قرار گیرد [۶۰]. ایده اصلی در SMC^1 راهنمایی وضعیت‌های سیستم کنترل شده است که می‌بایست بر روی سطح طراحی قرار گرفته (سطوح شیب‌دار) و آن‌ها با قانون Shifting در آنجا بر اساس وضعیت سیستم نگهداری شوند [۶۱]. SMC از بعضی عدم مزایا و محدودیت‌ها رنج می‌برد، اولین و مهم‌ترین آن‌ها سروصدا و پیچ‌های زیاد یا فرکانس بالای نوسان است که این اتفاق می‌تواند عدم ثبات نادیده در طرح دینامیکی کند. یک روش برای حل این مشکل استفاده از سیستم‌های هوشمند مثل کنترل منطقی فازی (FLC) همراه با SMC است [۶۲]. برعکس FLC

¹ Sliding mode control

خالص، در^۱ FSMC قوانین فازی را می‌توان چنان تنظیم کرد که ثبات و استحکام کل سیستم را بتوان به دست آورد [۶۳]. در مقاله مد لغزشی فازی انجام شده یک FSMC بر اساس فیلتر کالمن امتداد یافته EKF پیشنهاد شده است. در این روش از یک CSTR^۲ غیرخطی با ورودی و خروجی انفرادی همراه با نویز استفاده شده است که در آن موضوع طراحی یک کنترل کننده برای مسیریابی مسیر بر خواسته $X_d(t)$ است.

برای این منظور، فن FSMC که تضمین کننده استحکام و ثبات سیستم کنترل است مورد استفاده قرار گرفته است. کنترل کننده فازی از دو ورودی، سطح شیب دار و متغیرهای زمانی استفاده می‌کند که ورودی آن u و خروجی آن y است. سطح شیب دار به صورت زیر ساخته شده است که در آن ضریب‌های c_i بر روی سرعت واکنش و صافی تأثیر گذار است [۶۴].

$$S(e) = c_1 e_1 + c_2 e_2 + \dots + c_n e_n \quad (1-2)$$

قانون فازی چنان طراحی شده است که معادله زیر را ارضا کند:

$$v = ss' \leq 0 \quad (2-2)$$

نتایج شبیه سازی:

در این بخش عملکرد الگوریتم پیشنهادی برای مسائل تنظیم سازی مورد ارزشیابی قرار گرفته است. علاوه بر این نتایج شبیه سازی با کنترل کننده‌های PID با پارامترهای تنظیم شده مقایسه گردیده است. که در رکتور CA و CB خروجی سیستم و خواسته‌های مسئله است و F نرخ جریان ورودی راکتور می‌باشد.

موضوع الگوریتم شامل دو قسمت است، مرحله اول در رابطه با استفاده از EKF^۳ برای تخمین وضعیت در حضور اندازه گیری نویز است و از مزایای این مقاله می‌باشد دوم شامل به کارگیری نرخ جریان F برای

¹ fuzzy Sliding mode control

² Continues Stirred Tank Reactor

³ Extended Kalman Filter

نگهداری تمرکز محصول در ارزش خواسته شده (1/۲۶۶ MOL/L) با FSMC است [۶۴].

همان‌طور که نتایج نشان داد کنترل‌کننده FSMC بعد از واکنش گذرا وضعیت ثابتی مانند کنترلر PID در مقابل نویز دارد ولی واکنش FSMC تا رسیدن به وضعیت تعادل نرم‌تر عمل می‌کند؛ و بر اساس نتایج به دست آمده و منطقه زیر منحنی‌ها و حداکثر اوج کنترل‌کننده PID، این کنترل‌کننده نیاز به کنترل بیشتری در مقایسه با FSMC دارد و بنابراین اجرائیات بهتری را می‌توان با FSMC به دست آورد [۶۴].

۲-۵. رکتور CSTR بر اساس کاربرد مخلوط‌کن کنترل شده با استفاده از PLC:

حرکت نفت و واحد ذخیره شامل دو مخلوط‌کن با درجات ۲ euro و ۳ euro، ورودی از ۶ تانک ذخیره، مخازن ذخیره و غیره است. یک بررسی کلی از این واحدها شامل مطالعه سیستم موجود است و تلاش جهت افزایش آن با استفاده از PLC است. مزایای استفاده از PLC آن است که می‌توانیم پارامترهای ورودی را درک کرده، باز برنامه‌نویسی کنیم و قسمت دوم را با به‌کارگیری مطالعه در ساخت نمونه اولیه و اجرای هم‌زمان سه پارامتر انجام دهیم (درجه حرارت، جریان، موقعیت) [۶۵].

تشریح مدل:

مدل اولیه از CSTR که در آن سه حالت تغذیه از تانک‌ها با ورودی مختلف به وسیله شیرهای برقی (سلونوئید) کنترل می‌شوند. یک مخلوط‌کن از استیل درحالی که دیگری از پلاستیک ساخته شده است. درجه حرارت، محدوده و جریان به ترتیب پارامترهایی هستند که در این راکتور قرار دارند و کنترل می‌شوند. کنترل درجه حرارت به وسیله استفاده از PID^۳ به همراه ترموکوپل صورت می‌گیرد. کنترل‌کننده PID به ترموکوپل، گرماساز و PLC^۴ متصل است، ترموکوپل از ترموکوپل نوع J با محدوده کاری ۰ تا ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد استفاده می‌کند. گرماساز به کنترل‌کننده PID متصل است که نقطه

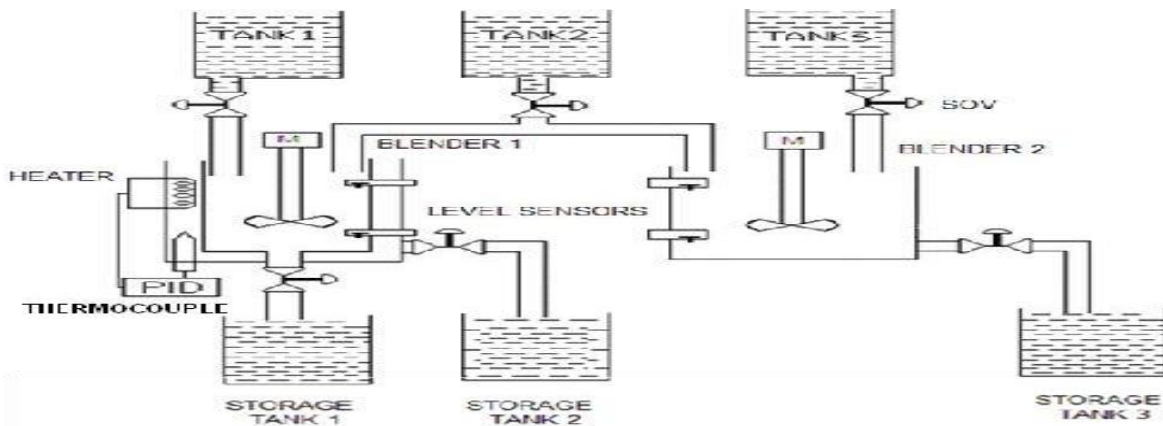
¹ Proportional Integral Derivative

² Continuous-Stirred Tank Reactor

³ Proportional Integral Derivative

⁴ Programmable Logic Controller

تنظیم برای واکنش حرارت‌زا به آن داده شده است. وقتی که به آن نقطه رسید کنترل کننده PID باعث متوقف شدن گرماساز می‌شود و اشتباه کمتری در کنترل کننده PID نسبت به کنترل کننده‌های دیگر می‌افتد [۶۵].



شکل ۱-۲: مدل اولیه از CSTR

کنترل کننده منطقی قابل برنامه‌ریزی:

دو تا از عمومی‌ترین ساختارهای زبان کنترل کننده منطقی عبارت‌اند از زبان نردبانی و زبان بولی که اساساً یکسری رمز و نمایش گرافیکی از دستورات است که برای ایجاد برنامه کنترل کننده مورد استفاده قرار گرفته است. این دستورات نردبانی تنظیم شده‌اند تا بتوانند کنترل منطقی خواسته شده را به دست آورد که در حافظه PLC وارد می‌شود.

نتایج به دست آمده:

ساختار طرح مخلوط‌کن به‌عنوان نمونه اولیه با موفقیت با به‌کارگیری مطالعات در مورد موضوع انجام گرفت. نمونه‌ای بدین منظور طراحی گردید که به‌صورت کاملاً خودکار کار کند. هدف از پایان‌نامه انجام شده این است که بتوان با حداکثر اعتماد به‌آسانی واحد برنامه‌ریزی را نگهداری کرده و آن را بازسازی کرد و خودکار سازی کامل انجام داد و تعداد نامحدودی از اتصالات NO/NC را برای ورودی و خروجی انجام داد، نصب آسان انجام داد و مصرف نیرو را پایین آورد. همچنین به‌کارگیری هم‌زمان کنترل، از سه پارامتر با واکنش ترکیبی با استفاده از کنترل کننده منطقی قابل برنامه‌ریزی بود [۶۵].

۲-۶. کنترل بر اساس PLC و SCADA برای یک رکتور CSTR:

CSTR ها در بسیاری از صنایع پردازشی برای اهداف ترکیبی دو یا چند واکنش دهنده مورد استفاده قرار می‌گیرند. در یک CSTR واکنش گیر به راکتور در نقطه شروع تغذیه می‌شود و محصول ترکیبی از راکتور در خروجی برداشت می‌شود. کنترل کننده محدود نیز برای ترکیب فرایند واکنش گیر خیلی مهم است، کیفیت محصول ترکیبی بستگی به محدوده واکنش گرها در ترکیب CSTR دارد [۶۶]. در کار پیشنهادی یک PLC و SCADA^۱ را بر اساس کاربردهای تجربی از CSTR توسعه داده شد. PLC مورد استفاده از نوع قدر مطلق است. نرم افزار مورد استفاده در ارتباط PLC با SCADA از نوع کلاسیک RSLINX است؛ و صفحه برنامه برای PLC برابر ۵۰۰ RSLOGIX است [۶۶].

یک سیستم SCADA اصولاً شامل سخت افزار یا علامت I/O است و نیز کنترل کننده‌ها، نرم افزارها، شبکه‌ها و ارتباطات را نیز در برمی‌گیرد. سیستم SCADA اصولاً برای نظارت و کنترل یک زمینه دور، یا تقسیماتی که در فواصل دوردست پخش شده‌اند به کار می‌رود [۶۷] و از PLC برای کنترل اجزائیات و ارتباطات یک SCADA استفاده می‌شود. سیستم SCADA همچنین ایجاد یک عمل کنترلی برای نظارت و بررسی در کنترل و تعریف تنظیمات می‌کند [۶۸].

اجرای فرایند:

از فرایند CSTR در حالت غیر واکنشی استفاده شده است که در آن دو تانک برای ذخیره واکنش دهنده‌ها و CSTR اصلی برای ترکیب این دو واکنش دهنده‌ها استفاده می‌شود. دو شیر سلونوئید برای کنترل جریان از این دو تانک در CSTR اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این دو شیر به عنوان ورودی در CSTR اصلی عمل می‌کنند، شیرهای سلونوئید متصل به جریان CSTR اصلی است که برای تخلیه ترکیب تولیدی بکار می‌رود. کاوشگرهای محدوده و شیرهای سلونوئید متصل به PLC می‌باشند و PLC به SCADA به وسیله کابل RS ۲۳۲ متصل می‌باشد؛ و با توجه به راه اندازی از واحد

¹ supervisory control and data acquisition

SCADA، PLC بر اساس برنامه نردبان کار می‌کند. کارکرد تنظیمات اجرائی با توجه به مراجعه به نمودار نردبانی انجام می‌گیرد [۶۹]. چنین فرض شده که دو تانک بالائی در حال حاضر به‌عنوان بخشی از فرایند مختلف پر شده‌اند، به‌محض اینکه سویچ اصلی روشن شد فرایند به‌صورت برنامه نردبانی کار کند. وقتی که CSRT اصلی خالی باشد PLC شروع به روشن شدن می‌کند و شیر ۱ و پمپ ۱ نیز به کار می‌افتند. وقتی CSTR تا نیمه پر شد شیر ۱ و پمپ ۱ خاموش و بسته می‌شود و شیر ۲ و پمپ ۲ روشن می‌شود. محدوده CSTR به‌وسیله محدوده کاوشگر (پروب) مشخص شده است در این صورت شیر و پمپ ۲ خاموش می‌شود و موتور همزن روشن می‌شود و کار همزن و ترکیب دو واکنش برای زمان از قبل مشخص شده در برنامه نردبانی شروع می‌شود. وقتی این زمان به پایان رسید، موتور همزن خاموش شده و شیر ۳ شروع می‌کند به تخلیه کردن ترکیب واکنش‌گر از CSTR. این فرایند تا وقتی که محدوده CSTR به محدوده خالی برسد ادامه پیدا می‌کند؛ و SCADA و نرم‌افزار RSVIEW ۳۲ به‌طور مداوم فرایند را نشان می‌دهد و همین‌طور بر روی صفحه SCADA با فرایند تقلیدی ادامه پیدا می‌کند [۶۶].

نتایج:

هدف اصلی مقاله دست‌یابی و تکمیل طراحی PLC و SCADA بر اساس ترکیب و کنترل CSTR است. برنامه‌ریزی PLC با استفاده از RSLOGIX ۵۰۰ و کل فرایند به‌وسیله نرم‌افزار RSVIEW ۳۲ انجام گرفت. بدین ترتیب سعی شد که یک تنظیمات تجربی را برای SCADA و PLC بر اساس ترکیب و کنترل SCTR تهیه شود. هدف این تنظیم ایجاد یک حالت و سیستم خودکار با هزینه کم است که بتواند ایجاد نظارت مؤثر بر پروسه کند [۶۹].

۲-۷. طرح کنترلر برای کلاسی از رآکتور

در مقاله انجام‌شده ترکیب یک قانون کنترل مقاوم برای کنترل تنظیمات درجه‌یک از سیستم غیرخطی ارائه شده است. طراح کنترلر مبتنی بر تخمین زننده عدم قطعیت مد لغزشی است که توسط یک چهارچوب مفاهیم دیفرانسیل خطی انجام گرفته است. ثبات حلقه بسته برای سیستم حلقه بسته از طریق تکنیک‌های میانگین‌گیری حاصل شده است. قدرت حالت کنترلر پیشنهادی در حالت اندازه‌گیری،

صدا وضعیت عدم اطمینان و اختلالات پایدار انجام گرفته است. اجرائیات قانون کنترلر پیشنهادی با شبیه‌سازی عددی نشان داده شده است که با مقایسه کنترل کننده پیشنهادی با کنترلر PI با تنظیمات خوب انجام گرفته است [۷۰].

۲-۸. پدیده چترینگ آزاد برای سیستم‌های گسسته و آزمایش روی رآکتور

CSTR

در تحقیق انجام شده پدیده چترینگ آزاد برای سیستم‌های مد لغزشی گسسته مورد بررسی قرار گرفته و به وسیله‌ی یک مثال شبیه‌سازی نشان داده شد. برای برطرف کردن مشکل در صورتی که در پارامترهای متغیر انحراف شدیدی وجود داشته باشد، یک حالت کشویی گسسته ثانویه پیشنهاد می‌شود و ثبات مشاهده کننده پیشنهادی بررسی می‌گردد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که یک اجرای خوب با توجه به دقت وضعیت تخمین زده شده و کاهش چترینگ وجود دارد. عملکرد مد لغزشی گسسته دسته اول در حضور پارامترهای متغیرهای نسبتاً بزرگ مورد بررسی قرار گرفته است و یک مشاهده کننده با مد لغزشی نوع ثانویه بدون چترینگ معرفی شده است [۷۱].

۲-۹. کنترل ترکیب با حرکت دلخواه بین دو حالت برای رآکتور CSTR

در مقاله انجام شده کنترل ترکیب باهدف ثابت نگه‌داری، در یک رآکتور CSTR با حرکت بین دو حالت (با استفاده از یک سوئیچ) مورد توجه قرار گرفته است. ابتدا بر اساس مفاهیم جدید مدل بازخورد خطی، دو حالت غیرخطی ترکیب گردیدند. مزایای این مرحله انتقال مدل غیرخطی تغییر جریان یافته CSTR به یک سیستم انتقال خطی مساوی بدون هیچ گونه ترکیب است. در مرحله دوم یک کنترل کننده ثابتی برای سیستم انتقال خطی با استفاده از تئوری عملی لیاپانوف طراحی شده است. اجرائیات کنترل کننده احتمال ساده‌سازی فرایند طراحی کنترل کننده برای فرایندهای انتقال غیرخطی را با استفاده از روش مدل وضعیت نشان می‌دهد [۱۰].

فصل ۳

طراحی کنترل کننده مد لغزشی

۳-۱. مقدمه‌ای بر کنترل غیرخطی:

سیستم‌های فیزیکی ذاتاً غیرخطی‌اند؛ بنابراین تمام سیستم‌های کنترل در گستره معینی غیرخطی‌اند. سیستم‌های کنترل غیرخطی با معادلات دیفرانسیل غیرخطی می‌توانند بیان شوند. درحالی‌که اگر محدوده عملکرد سیستم کوچک باشد و اثرات غیرخطی مؤثر در آن همواره در نظر گرفته شود، در این صورت این سیستم کنترل را می‌توان به صورت قابل قبولی با یک سیستم خطی شده تقریب زد که دینامیک آن با مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل خطی توصیف می‌شود. عوامل غیرخطی را می‌توان به صورت ذاتی (طبیعی) و عمدی (مصنوعی) دسته‌بندی نمود. عوامل غیرخطی ذاتی عبارت است از عواملی که به طور طبیعی همراه سخت‌افزار و حرکت سیستم‌اند. به عنوان مثال نیروهای مرکزگرا در حرکت چرخشی و اصطکاک کلمبی بین سطح تماس. معمولاً چنین عوامل غیرخطی اثرات غیر مطلوب دارند و سیستم کنترل باید اثرات آن‌ها را جبران کند. عوامل غیرخطی عمدی از طرف دیگر به صورت مصنوعی توسط طراح به سیستم اضافه می‌شود.

عوامل غیرخطی را می‌توان بر مبنای خواص ریاضی آن‌ها، یعنی پیوسته و ناپیوسته دسته‌بندی کرد. از آنجاکه عوامل غیرخطی ناپیوسته نمی‌توانند به طور موضعی با تابع خطی تقریب زده شوند، لذا آن‌ها را عوامل غیرخطی سخت می‌نامند. عوامل غیرخطی سخت مانند لقی، پسماند و چسبندگی عموماً در سیستم‌های کنترل وجود دارد، چه در محدوده بزرگ چه کوچک از عملکرد سیستم. نباید تعجب‌آور باشد که تاکنون هیچ روشی کلی برای تحلیل تمام سیستم‌های کنترل غیرخطی ارائه نشده است. در کنترل غیرخطی، هیچ‌یک از این رهیافت‌های استاندارد را نمی‌توان به کار گرفت، زیرا که حل مستقیم معادلات دیفرانسیل غیرخطی در حالت کلی ممکن نیست و تبدیل‌های حوزه‌ی فرکانس قابل‌اعمال نیستند [۷۲].

بعضی خواص دینامیکی سیستم‌های غیرخطی:

- آن‌ها از اصل انطباق (خطی بودن و همگن بودن) پیروی نمی‌کنند.
- آن‌ها ممکن است چند نقطه تعادل جدا از هم داشته باشند.

- آن‌ها ممکن است خواصی مانند سیکل حد، انشعاب یا هرج و مرج از خود نشان دهند.
- زمان فرار محدود: جواب سیستم‌های غیرخطی ممکن است برای همه‌ی زمان‌ها وجود نداشته باشد.

و از انواع روش‌های کنترل غیرخطی می‌توان به

- روش تابع تعریف
- روش صفحه‌ی فاز
- تحلیل پایداری لیاپونوف
- روش اختلال تکینه
- روش پوپوف
- نظریه مانیفولد مرکزی
- روش بهره کوچک

اشاره نمود [۷۳].

عدم دقت در مدل‌سازی را می‌توان به دو نوع اصلی طبقه‌بندی کرد:

- عدم قطعیت ساختاری (پارامتری)
 - عدم قطعیت غیر ساختاری (دینامیک مدل نشده)
- نوع اول به عدم دقت در جملاتی که واقعاً در مدل هستند مربوط می‌شود، درحالی‌که نوع دوم به عدم دقت در مرتبه سیستم (تخمین پایین‌تر) مربوط می‌شوند [۷۲].

۳-۲. مد لغزشی:

یک روش ساده برای کنترل مقاوم، چیزی است که اصطلاحاً روش‌شناسی کنترل لغزشی نامیده می‌شود. به‌طور شهودی این روش مبتنی است بر این نکته که بسیار آسان‌تر است که سیستم‌های مرتبه اول را کنترل کنیم (دستگاه‌هایی که با معادله دیفرانسیل مرتبه اول توصیف شده‌اند) چه غیرخطی باشند چه نامعین تا اینکه سیستم‌های عمومی‌تر مرتبه n ام (سیستم‌هایی که با معادلات مرتبه n توصیف

می‌شوند) را کنترل کنیم. به همین خاطر، یک ساده کردن نمادی معروف می‌شود که در حقیقت اجازه می‌دهد مسائل مرتبه n ام با مسائل مرتبه‌ی اول معادل جایگزین شوند. آنگاه ساده است نشان دهیم که برای مسائل تبدیل‌شده عملکرد کامل می‌تواند در اصل با وجود بی‌دقتی‌های دلخواه پارامتر به دست آید؛ اما چنین عملکردی، در ازای بهای بسیار زیاد، فعالیت‌های بسیار زیاد کنترلی به دست می‌آید. این مسئله نوعاً با سایر منابع عدم قطعیت مدل‌سازی در تضاد است، مثلاً حضور دینامیک‌های صرف‌نظر شده که ممکن است فعالیت‌های زیاد کنترلی را تحریک کند. این مطلب ما را سوق می‌دهد به اصلاح قوانین کنترلی که با داشتن فعالیت کنترل قابل قبول، معطوف شود به، به دست آوردن مصالحه بین عملکرد ردیابی و عدم قطعیت پارامتر.

طرح کنترل‌کننده لغزشی، روشی قانونمند برای مسئله‌ی حفظ پایداری و عملکرد یکنواخت در روبه‌رویی با بی‌دقتی‌های مدل‌سازی است. به‌علاوه، با اجازه دادن به اینکه مصالحه‌ی بین مدل‌سازی و عملکرد به‌صورت ساده‌ای کمی شود، می‌توان کل فرایند طراحی را روشن کرد. کنترل لغزشی با موفقیت در جابه‌جا کننده‌های ربات، وسایل نقلیه‌ی زیرآبی، موتورهای و انتقال خود محرک، موتورهای الکتریکی با عملکرد بالا و سیستم‌های قدرت مورد استفاده قرار گرفته است [۷۲].

در روش مد لغزشی سطحی به اسم سطح لغزش تعریف می‌شود و باعث می‌شود خطا روی این سطح بلغزد و به سمت صفر برسد. سیستم زیر را فرض کنید:

$$\dot{x} = f(x) + u \quad (۱-۳)$$

در صورتی که سیستم کاملاً معلوم و $f(x)$ شناخته شده باشد کنترلر باعث خواهد شد به سطح لغزش صفر برسیم حال برای سیستم نامعین داریم:

$$\hat{f}(x) = 0.7 \begin{bmatrix} -a_0 \exp\left(\frac{-G}{x_2}\right) x_1 \\ -a_1 \exp\left(\frac{-G}{x_2}\right) C_A + a_2 (T_{cin} - T) \end{bmatrix} \quad (۲-۳)$$

$$f_1(x) = \frac{F}{V} (-x_1) - a_0 \exp\left(\frac{-G}{x_2}\right) x_1 \quad (۳-۳)$$

$$f_2(x) = \frac{F}{V}(-x_2) - a_1 \exp\left(\frac{-G}{x_2}\right)x_1 + a_2(T_{cin} - T) \quad (4-3)$$

در رابطه فوق $f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix}$ بردار نامعلوم سیستم (فرض مدل نامعلوم سیستم) و دارای نامعینی است و

بردار دینامیک معلوم سیستم و شناخت ما از سیستم است. هدف، ردگیری (tracking) $\hat{f} = \begin{bmatrix} \hat{f}_1 \\ \hat{f}_2 \end{bmatrix}$

می‌باشد یعنی x به سمت x_d میل کند یا خطا به سمت صفر میل کند.

$$x \rightarrow x_d \quad (5-3)$$

$$\dot{x} \rightarrow \dot{x}_d \quad (6-3)$$

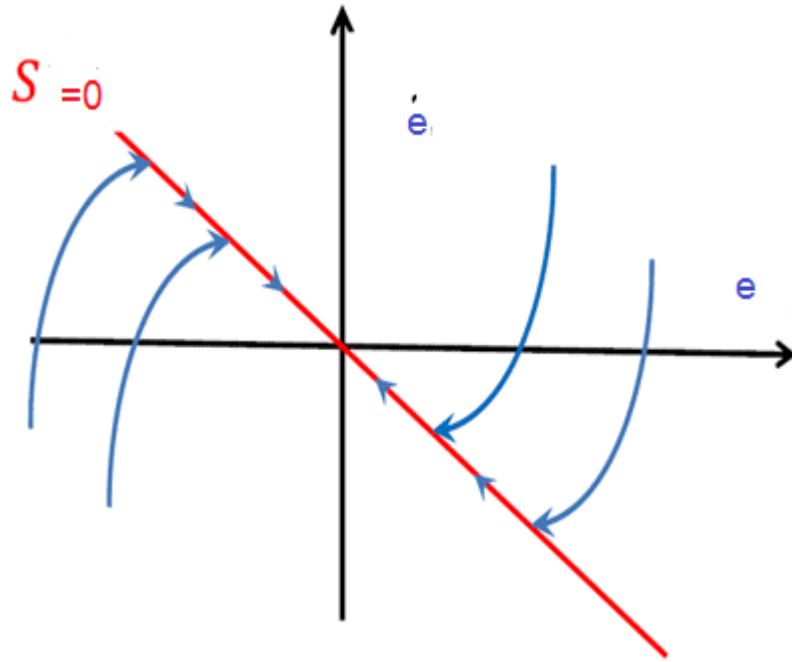
در معادله (5-3) x بردار حالت و در معادله (6-3) \dot{x} بردار سرعت می‌باشد. در سطح لغزش متغیری به نام S تعریف می‌شود که حاوی دینامیک خطا (خطای ردگیری) می‌باشد که در معادله (7-3) نشان داده شده است.

$$S = \dot{e} + \lambda e \quad (7-3)$$

در معادله (7-3) e نشان دهنده خطا و λ سرعت همگرایی می‌باشد. با فرض اینکه $S \rightarrow 0$ میل کند e به صورت نمایی به سمت صفر میل می‌کند. آنگاه

$$\lambda > 0 \\ t \rightarrow \infty \Rightarrow e \rightarrow 0 \Rightarrow x \rightarrow x_d \quad (8-3)$$

$$\dot{e} + \lambda e = 0 \quad (9-3)$$



شکل ۳-۱: سطح لغزش

هدف یافتن u است که باعث شود $S \rightarrow 0$ میل کند

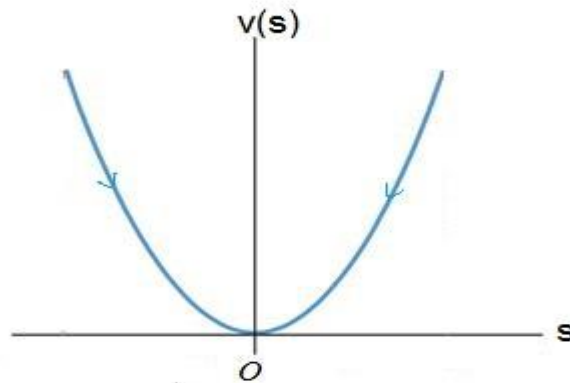
- اگر روی مبدأ باشد که روی مبدأ باقی می ماند
- اگر روی سطح لغزش باشیم ($S=0$) آنگاه با توجه به $e^{-\lambda(t)}$ با گذشت زمان خط به صفر میل می کند

- اما اگر خارج از خط $S=0$ باشیم باید با تعریف کنترلر به خط برسیم.

برای تعریف u از تابع لیاپانوف استفاده می کنیم. تابع لیاپانوفی پیشنهاد می دهیم که حاوی S باشد:

$$v(S) = \frac{1}{2}S^2 \quad (۳-۱۰)$$

طبق معیار پایداری $v(S)$ باید مثبت $\dot{v}(S)$ باید منفی باشد.



شکل ۳-۲: سطح لغزش وقتی شیب تابع منفی باشد

اگر طوری عمل کنیم $\dot{v}(S) \leq 0$ باشد (منفی معین) شیب تابع منفی می شود و طبق ریاضیات کاهش می کند و به سمت $S=0$ میل می کند.

$$\dot{v}(S) = S\dot{S} \quad (11-3)$$

تعریف می کنیم:

$$\dot{v}(S) = -\gamma|S|, \gamma > 0 \quad (12-3)$$

$$S\dot{S} = -\gamma|S| \rightarrow \frac{S}{|S|}\dot{S} = -\gamma = \text{Sign}S \quad (13-3)$$

در معادله (۱۳-۳) γ نشان دهنده ضریب همگرایی مد لغزشی می باشد.

۳-۳. اثبات مد لغزشی برای رکتور CSTR مرتبه ۱:

معادله دینامیکی برای رکتور CSTR انتخابی به صورت زیر است:

$$\dot{x}_1 = -a_0 e^{-\frac{g}{x_2}} x_1 - \frac{F}{V} x_1 + \frac{F}{V} u_1 = f_1 + v_1 \quad (14-3)$$

$$\dot{x}_2 = a_1 e^{-\frac{g}{x_2}} x_2 - \frac{F}{V} x_2 + a_2 (T_{cin} - x_2) + \frac{F}{V} u_2 = f_2 + v_2 \quad (15-3)$$

$$f_1 = -a_0 e^{-\frac{g}{x_2}} x_1 - \frac{F}{V} x_1 \quad (16-3)$$

$$v_1 = \frac{F}{V} u_1 \quad (17-3)$$

$$f_2 = a_1 e^{-\frac{g}{x_2}} x_2 - \frac{F}{V} x_2 + a_2 (T_{cin} - x_2) \quad (18-3)$$

$$v_2 = \frac{F}{V} u_2 \quad (19-3)$$

با توجه به سطح لغزش برای معادله اول رکتور CSTR داریم:

$$S_1 = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e \rightarrow S_1 = e_1 \quad (20-3)$$

در معادله (۲۰-۳) e_1 خطای غلظت و S_1 سطح لغزش اول و n مرتبه سیستم (مرتبه اول) می باشد که با قرار دادن رابطه (۱-۳) در مشتق رابطه (۲۰-۳) داریم:

$$\dot{S}_1 = \dot{e}_1 = \dot{x}_{d1} - \dot{x}_1 = \dot{x}_{d1} - f_1 - v_1 \quad (21-3)$$

$$v_{1eq} = -f_1 + \dot{x}_{d1} \quad (22-3)$$

برای جبران عدم قطعیت‌ها تابع v_1 به صورت زیر تعریف می شود به عبارت دیگر چون در آن حد نامعینی دیده نشده است پس یک ترم جبرانی اضافه می شود. با قرار دادن رابطه (۲۲-۳) در (۲۳-۳) داریم:

$$v_1 = v_{1eq} - k_1 \text{Sgn}(S_1) = -\hat{f}_1 + \dot{x}_{d1} - k_1 \text{Sgn}(S_1) \quad (23-3)$$

$$S_1 \dot{S}_1 \leq -\gamma_1 |S_1| \quad (24-3)$$

در معادله (۲۴-۳) γ_1 نشان دهنده ضریب همگرایی اول می باشد. با قرار دادن رابطه (۲۱-۳) در (۲۴-۳) داریم:

$$(\dot{x}_{d1} - f_1 - v_1) S_1 \leq -\gamma_1 |S_1| \quad (25-3)$$

با قرار دادن رابطه (۲۳-۳) در رابطه (۲۵-۳) داریم:

$$(\dot{x}_{d1} - f_1 + \hat{f}_1 - \dot{x}_{d1} + k_1 \text{Sgn}(S_1)) S_1 \leq -\gamma_1 |S_1| \quad (26-3)$$

$$(-f_1 + \hat{f}_1 + k_1 \text{Sgn}(S_1)) S_1 \leq -\gamma_1 |S_1| \quad (27-3)$$

$$(-f_1 + \hat{f}_1)S_1 + k_1 \leq -\gamma_1 |S_1| \quad (28-3)$$

$$k_1 \leq -(-f_1 + \hat{f}_1) \text{Sgn}(S_1) - \gamma_1 \quad (29-3)$$

$$k_1 = -\gamma_1 - F_1 \quad (30-3)$$

$$\Delta f_1 = \left| f_1 - \hat{f}_1 \right| \leq F_1 \quad (31-3)$$

در معادله (31-3) Δf_1 نشان دهنده نرم نامعینی می‌باشد. در نهایت با قرار دادن معادله (30-3) در معادله (23-3) کنترلر مد لغزشی مرتبه اول به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$u_1 = -\hat{f}_1 + \dot{x}_{d1} + (\gamma_1 + F_1) \times \text{Sat}(S_1) \quad (32-3)$$

در معادله (32-3) u_1 ورودی غلظت سیستم و \hat{f}_1 شناخت ما از سیستم، γ_1 ضریب همگرایی مد لغزشی اول، F_1 حد نامعینی سیستم برای ورودی اول، Sat (تابع اشباع) و \dot{x}_{d1} مقدار مطلوب ماده اول می‌باشد. برای معادله دوم رکتور CSTR نیز به همین طریق می‌توان کنترلر مد لغزشی را به دست آورد.

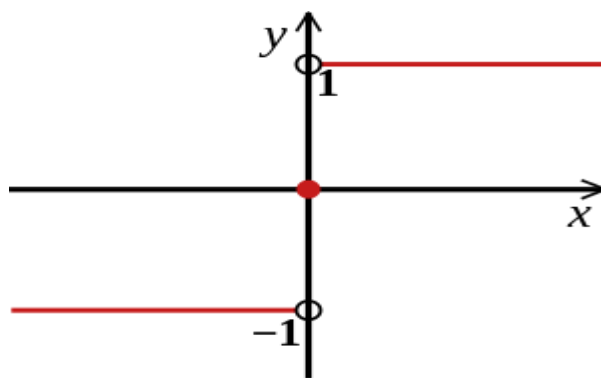
$$u_2 = -\hat{f}_2 + \dot{x}_{d2} + (\gamma_2 + F_2) \times \text{Sat}(S_2) \quad (33-3)$$

در معادله (33-3) u_2 ورودی دما و \hat{f}_2 شناخت ما از سیستم، γ_2 ضریب همگرایی مد لغزشی دوم، F_2 حد نامعینی سیستم برای ورودی دوم، Sat (تابع اشباع) و \dot{x}_{d2} مقدار مطلوب ماده دوم می‌باشد.

۴-۳. بررسی توانایی حذف اغتشاش:

از مشکلات مد لغزشی استفاده از کنترلر ناپیوسته علامت یا Sign و پدیده چترینگ می‌باشد؛ که عبارت از نوسانات بالا، ولی محدود است که جهت اجرای عملی باید از آن اجتناب کرد. در اینجا برای کاهش پدیده چترینگ از تابع Saturation یا اشباع استفاده شده است. در پدیده چترینگ به دلیل نزدیکی S به سمت صفر، $\text{Sign}(S)$ بین ۱ و -۱ نوسان می‌کند.

$$\frac{S}{|S|} = \text{Sgn}(S) \quad (34-3)$$



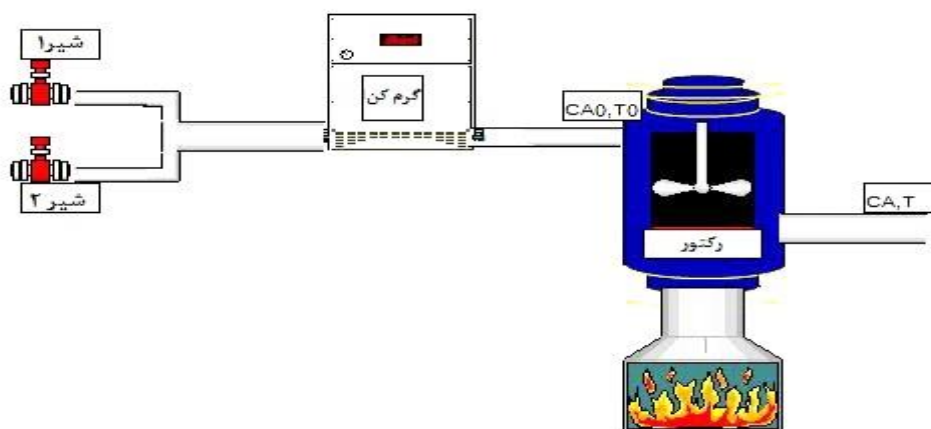
شکل ۳-۳: تابع علامت

۳-۵. شرح مدل رکتور CSTR:

هدف از طراحی کنترل کننده واداشتن سیستم تحت کنترل به داشتن رفتاری مطابق با رفتار مطلوب است. رفتار مطلوب می تواند معیارهای مختلفی از قبیل سرعت، دقت، مصرف سوخت، زمان و ... باشد. در اینجا هدف از طراحی کنترلر برای رآکتور CSTR رساندن غلظت و دمای رآکتور به مقدار مطلوب با کمترین خطا بعد از انجام واکنش می باشد؛ که این فرایند به صورت شماتیک در شکل (۳-۴) نشان داده شده است که شامل یک حجم ثابت CSTR که توسط دو شیر و یک بویلر، غلظت و دمای آن توسط سرپرست تغییر می کند. در این رآکتور مقدار غلظت و حجم ماده B مشخص است که با توجه به روابط کنترلر شیرها غلظت ماده A و سپس دبی ماده A و B به دست می آید و درنهایت با استفاده از یک دبی سنج می توان دبی دو شیر ورودی را برای رسیدن به غلظت و دمای مطلوب تعیین کرد. در راکتور گرماگیر واکنش برگشت ناپذیر از فرم $A \rightarrow B$ رخ می دهد، همچنین به این رکتور توسط گرماساز گرما داده می شود تا واکنش موردنظر به درستی صورت گیرد، زیرا که بسیاری از واکنش های شیمیایی حتماً باید در یک دما و زمان خاص صورت گیرد. با فرض حجم مایع ثابت و تلفات حرارتی ناچیز CSTR در هر حالت به وسیله معادله دیفرانسیل زیر شرح داده شده است [۱۰].

$$\dot{x}_1 = -a_0 e^{-\frac{g}{x_2}} x_1 - \frac{F}{V} x_1 + \frac{F}{V} u_1 \quad (3-35)$$

$$\dot{x}_2 = a_1 e^{-\frac{g}{x_2}} x_2 - \frac{F}{V} x_2 + a_2 (T_{cin} - x_2) + \frac{F}{V} u_2 \quad (3-36)$$



شکل ۳-۴: فرایند کنترل دما و غلظت رکتور به صورت شماتیک

در جدول شکل (۳-۱) پارامترهای نرمال فرایند نشان داده شده است:

جدول ۳-۱: پارامترهای نرمال سیستم

$V(L)$	۱۰۰
$\rho(g l^{-1})$	۱۰۰۰
$c_p(j g^{-1} C^{-1})$	۰/۲۳۹
$\Delta H(j mol^{-1})$	$۱۰^۴ \times -۵$
$\frac{E}{R(C)} = g$	۸۷۵۰
$k_0(\min^{-1})$	$۱۰^{۱۰} \times ۷/۲$
$U_A(j \min^{-1} C^{-1})$	۵×۱۰^۴
$K_0 = a_0$	$۱۰^{۱۰} \times ۷/۲$
$a_1 = \frac{\Delta H}{\rho C_p} K_0$	$۱۰^{۱۳} \times -۱/۵۰۶$
$a_2 = \frac{U_A}{V \rho C_p}$	۲/۰۹۲

در جداول (۳-۲) و (۳-۳) مقادیر تغذیه و مطلوب برای این رکتور به همراه معرفی هر یک از پارامترهای

آن آورده شده است.

جدول ۳-۲ مقادیر تغذیه و مطلوب

F(L min ⁻¹)	Tc(C)	CA(mol L ⁻¹)	T(C)
۲	۲۹۹/۱	۰/۲۴۳۸	۲۹۷

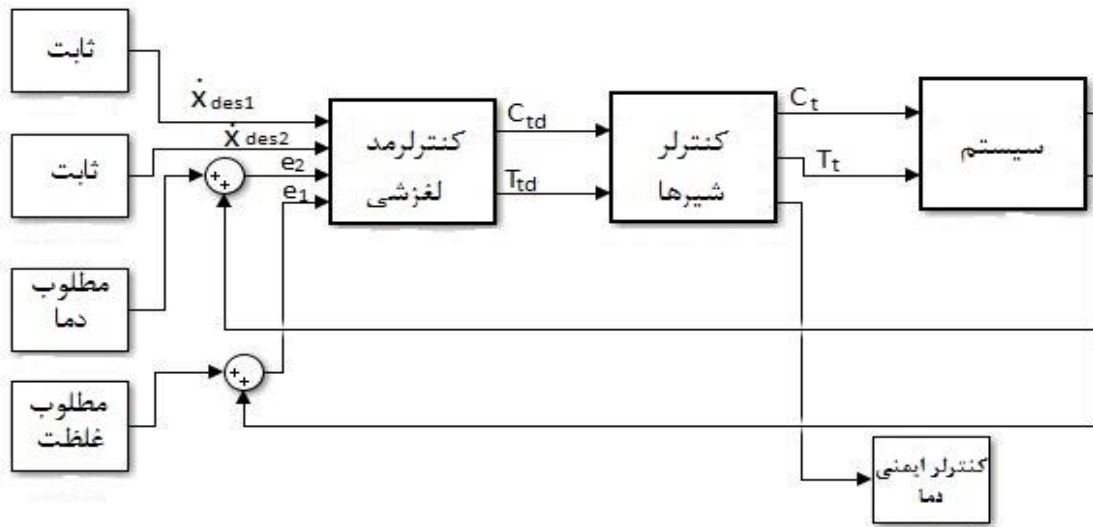
جدول ۳-۳: پارامترهای رآکتور

نام گذاری	
دمای رکتور (C)	T
دمای گرماساز (C)	T _C
ضرایب ثابت	a ₀ , a ₁ , a ₂
غلظت واکنش دهنده (mol L ⁻¹)	C _A
ظرفیت گرمایی سیال (J g ⁻¹ C ⁻¹)	C _P
ثابت گاز (J mol ⁻¹ C ⁻¹)	R
ثابت انتقال حرارت (J min ⁻¹ C ⁻¹)	UA
آنتالپی واکنش (J mol ⁻¹)	ΔH
چگالی سیال (g L ⁻¹)	ρ
حجم رکتور (L)	V

۳-۶. شبیه سازی و طراحی کنترلر:

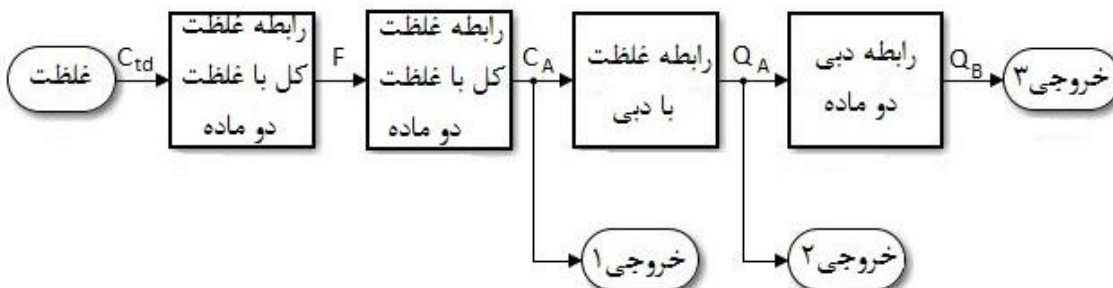
دیگرام بلوکی روش پیشنهادی که با سیمولینک متلب طراحی شده در شکل (۳-۵) نشان داده شده است. ابتدا از روش مد لغزشی برای کنترل دما و غلظت در حضور نامعینی استفاده شده است که در آن هدف به دست آوردن مقدار مطلوب دما و غلظت می باشد؛ و همچنین سیستمی امنیتی برای کنترلر دمای داخل رکتور در نظر گرفته شده که در صورتی که دمای داخل رکتور از حد معینی، بنا به هر دلیل

افزایش یابد فرایند کل متوقف شود.



شکل ۳-۵: شبیه‌سازی رکتور با سیمولینک متلب با استفاده از کنترلر مد لغزشی.

دیگرام بلوکی شکل (۳-۶) برای کنترل غلظت و دبی موردنظر برای شیرهای ورودی است. فرمول‌های بیان‌شده، رابطه مستقیم غلظت و دبی را بیان می‌کند که با توجه به وجود این رابطه می‌توان کنترلی را برای دو شیر ورودی طراحی کرد که بتوان غلظت را به‌طور دلخواه و موردنیاز تغییر داد. در فرمول‌های ذکرشده C_A نشان‌دهنده غلظت ماده اول یا همان ماده اصلی است و C_B نشان‌دهنده غلظت ماده فرعی است و به ترتیب Q_A و Q_B نشان‌دهنده دبی ماده اول (ماده اصلی) و دوم است [۷۴، ۷۵، ۷۶].



شکل ۳-۶: شبیه‌سازی شیرهای ورودی رکتور با سیمولینک متلب با استفاده از کنترلر PID

$$Q_A + Q_B = Q_C = \text{Cons} = A \quad (37-3)$$

$$\frac{Q_A}{Q_A + Q_B} = C_A \quad (38-3)$$

رابطه غلظت کل با غلظت شیر اول و دوم با ضرایب استوکیومتری ۱

$$C = \frac{a(V_A \times C_A) + b(V_B \times C_B)}{V_A + V_B} \quad (39-3)$$

$$F = C \times (V_A + V_B) - V_B \times C_B = V_A \times C_A \quad (40-3)$$

$$Q_B = A - Q_A \quad (41-3)$$

۳-۷. بهینه‌سازی به روش RSM:

(Response Surface Methodology) یا به اختصار RSM، مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی است که رابطه‌ی بین یک یا چند متغیر پاسخ را با چندین متغیر مستقل (مورد مطالعه) تعیین می‌کند [۷۷]. این روش در سال ۱۹۵۱ توسط باکس و ویلسون معرفی شد تا به امروز نیز از آن به عنوان یکی از ابزارهای طراحی آزمایش استفاده می‌گردد. هرچند بسیاری این روش را به عنوان یک شبه مدل (Metamodel) می‌دانند [۷۸]. مطالعاتی نظیر مطالعه‌ی کرمی و همکاران روش سطح پاسخ را به عنوان یک روش قابل قبول در مقایسه با روش‌های سنتی مدل‌سازی نشان داده است [۷۹]. در علوم مهندسی بسیاری از پدیده‌ها بر مبنای تئوری‌های مربوط به خودشان مدل‌سازی می‌شوند. این در حالی است که پدیده‌های بسیاری به علت وابستگی به تعداد بسیاری عامل کنترل‌کننده، ناشناخته بودن مکانیسم یا پیچیده بودن ریاضیاتی قابلیت داشتن مدل ریاضی رضایت بخشی را ندارند. در چنین مواردی استفاده از روش‌های تجربی مدل‌سازی کارساز است؛ روش سطح پاسخ به عنوان یکی از روش‌ها مدل‌سازی تجربی مطرح است [۸۰]. روش سطح پاسخ، یکی از رویکردهای بررسی در طراحی آزمایش و علوم وابسته است. در روش سطح پاسخ سعی می‌شود تا با استفاده از یک طرح آزمایش مناسب، راهی برای تخمین برهمکنش‌ها، اثرات درجه دوم و حتی شکل موضعی سطح پاسخ مورد مطالعه یافته شود. در این میان

اهداف خاصی به‌طور جدی دنبال می‌شوند که از مهم‌ترینشان می‌توان به بهبود فرآیند با یافتن ورودی‌های بهینه، رفع مشکلات و نقاط ضعف فرآیند و پایدارسازی آن اشاره کرد. در اینجا پایدارسازی مفهوم مهمی در آمار کیفیت است که به حداقل کردن اثرات متغیرهای ثانویه یا غیر کنترلی (اغتشاشی) دلالت می‌کند.

انجام روش سطح پاسخ بدون داشتن اطلاعات در مورد فرآیند و متغیرهای مؤثر بر آن، می‌تواند گمراه‌کننده باشد. متداول‌تر است که قبل از انجام مراحل روش سطح پاسخ، فرآیند مورد مطالعه به‌خوبی بررسی شود و در ابتدا از یک طرح آزمایش غربال برای شناسایی اثر ورودی‌ها بر فرآیند مورد مطالعه استفاده گردد [۷۸, ۸۱].

۳-۸. چگونگی اجرای روش RSM:

هدف از اجرای روش RSM تخمین پارامترهای قابل کنترل γ_1 و γ_2 یا همان ضریب همگرایی برای کنترلر مد لغزشی است که در صورتی که این پارامترها درست تخمین زده شوند می‌توانیم با کمترین خطابه مقدار غلظت و دمای مطلوب دست‌یابیم. RSM خود دارای ۲ فن است، یکی Central Composite Design که هم‌زمان می‌تواند ۲ تا ۹ فاکتور (متغیر مستقل) را با تعداد زیادی پاسخ (متغیر وابسته) مدل‌سازی و بهینه نماید. دیگری Box- Behnken که ۳ الی ۷ فاکتور را با تعداد زیادی پاسخ (متغیر وابسته) مدل‌سازی نموده و بهینه می‌کند. نکته قابل‌توجه این است که برای استفاده از این روش‌ها از ابتدا طراحی آزمایش‌ها باید به‌وسیله این روش‌ها انجام گیرد تا بتوان تحلیل داده‌ها را نیز به همین روش‌ها و به کمک نرم‌افزار انجام داد. به‌طوری‌که طراحی آزمایش‌ها توسط نرم‌افزار و البته با توجه به اطلاعاتی که به آن داده می‌شود مشخص می‌گردد و پس از به دست آمدن نتایج آزمایش‌ها، تحلیل داده‌ها نیز توسط نرم‌افزار صورت گرفته و نقطه بهینه به دست می‌آید. در واقع RSM با استفاده از رگرسیون و بر اساس یک تابع چندجمله‌ای، مدل‌سازی ریاضی داده‌ها را انجام می‌دهد. برای انجام یک تحقیق بر اساس RSM به کمک یک نرم‌افزار آماری از قبیل MINITAB یا SPSS، Design Expert، پنج مرحله شامل طراحی آزمایش‌ها (Experimental Design)، تجزیه و تحلیل داده‌ها (Experimental

(Analyses)، غربالگری و حذف فاکتور های غیر معنی دار و تجدید مدل ریاضی تا رسیدن به مدل قابل قبول (Screening)، بهینه سازی (Optimization) و یافتن ناحیه و نقطه بهینه ادامه می یابد. در نهایت باید اعتبار سنجی (Validation) یافته ها و نقطه بهینه به کمک نرم افزار آماری صورت گیرد. در اینجا از روش CCD یا (Central Composite Design) و نرم افزار Design Expert 7 برای به دست آوردن سطوح پاسخ استفاده شده است؛ که شامل تعداد ۱۳ آزمایش و ۵ تکرار در نقطه مرکزی است. در جدول (۳-۴) متغیرها و سطوح کدبندی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که بازه های انتخابی بعد از انجام چند طرح آزمایشی با توجه به بازه های نتایج بهتر در نظر گرفته شده است.

جدول ۳-۴: متغیرهای مستقل در فرایند و مقادیر آنها

پارامتر parameter	نماد Symbol	+ α	سطوح کدبندی شده پارامتر Coded levels of parameter			
			۱	۰	- ۱	- α
ضریب همگرایی Convergence Factor	γ_1	۷۵۰۰	۶۰۰۰	۴۵۰۰	۳۰۰۰	۱۵۰۰
ضریب همگرایی Convergence Factor	γ_2	۱۰۰	۹۰	۸۰	۷۰	۶۰

در جدول (۳-۵) طرح آزمایشی برای متغیرهای مورد نظر آورده شده که شامل ۱۳ آزمایش است و خروجی مورد نظر برای هر کدام از آنها با آزمایش از کنترلر مد لغزشی گرفته شده است.

جدول ۳-۵: طرح آزمایش برای متغیرها مد لغزشی

std	Run	Block ۱	γ_1	γ_2	e_1	e_2
۱۰	۱	Block ۱	۴۵۰۰	۸۰	۰/۰۰۰۰۸۵۷۴	-۰/۲۳۱۶
۳	۲	Block ۱	۶۰۰۰	۷۰	۰/۰۰۰۰۶۴۱۶	-۰/۲۴۵۵
۴	۳	Block ۱	۳۰۰۰	۷۰	۰/۰۰۰۰۱۲۸۵	-۰/۲۴۵۴
۶	۴	Block ۱	۱۵۰۰	۸۰	۰/۰۰۰۰۲۵۶۹	-۰/۲۳۱۵
۲	۵	Block ۱	۳۰۰۰	۹۰	۰/۰۰۰۰۱۲۸۵	-۰/۲۱۹۲
۱	۶	Block ۱	۶۰۰۰	۹۰	۰/۰۰۰۰۶۴۱۱	-۰/۲۱۹۲
۱۱	۷	Block ۱	۴۵۰۰	۸۰	۰/۰۰۰۰۸۵۷۴	-۰/۲۳۱۶
۱۲	۸	Block ۱	۴۵۰۰	۸۰	۰/۰۰۰۰۸۵۷۴	-۰/۲۳۱۶
۸	۹	Block ۱	۴۵۰۰	۶۰	۰/۰۰۰۰۸۵۸۲	-۰/۲۶۱۱
۹	۱۰	Block ۱	۴۵۰۰	۸۰	۰/۰۰۰۰۸۵۷۴	-۰/۲۳۱۶
۷	۱۱	Block ۱	۴۵۰۰	۱۰۰	۰/۰۰۰۰۸۵۸	-۰/۲۰۸۱
۱۳	۱۲	Block ۱	۴۵۰۰	۸۰	۰/۰۰۰۰۸۵۷۴	-۰/۲۳۱۶
۵	۱۳	Block ۱	۷۵۰۰	۸۰	۰/۰۰۰۰۵۱۱	-۰/۰۴۵۷۲

همچنین برای کنترلر PID متغیرها و سطوح کدبندی شده به صورت جدول (۳-۶) می باشد؛ که شامل ۲۰ آزمایش با ۶ نقطه مرکزی می باشد.

جدول ۳-۶: متغیرهای مستقل در فرایند بهینه سازی برای کاهش خطای کنترلر PID

پارامتر Parameter	نماد Symbol	سطوح کدبندی شده پارامتر Coded levels of parameter				
		+alpha	۱	۰	- ۱	-alpha
ضریب کنترلر تناسبی Factor proportional controller	kp	۷۵	۳۰	-۱۵	-۶۰	-۱۰۵
ضریب کنترلر انتگرال گیر Factor integrator controller	ki	۲۲/۵	۱۰	-۲/۵	-۱۵	-۲۷/۵
ضریب کنترلر مشتق گیر Derivative controller factor	kd	۲۰	۱۰	۰	-۱۰	-۲۰

جدول ۳-۷: طرح آزمایش برای متغیرها برای کنترلر PID

std	آزمایش	Block ۱	kp	ki	kd	e1	e2
۱۲	۱	Block ۱	-۱۵	-۲/۵	۰	-۵/۲۴۷	۵۸۸/۴
۲۰	۲	Block ۱	-۱۵	-۲/۵	۲۰	-۰/۸۱۱۸	۵۹۱/۴
۱۷	۳	Block ۱	-۱۵	۲۲/۵	۰	۰/۵۱۷۵	۵۹۴/۳
۱۵	۴	Block ۱	۷۵	-۲/۵	۰	۰/۴۷۹۸	۵۹۳/۸
۲	۵	Block ۱	-۱۵	-۲/۵	۰	-۵/۲۴۷	۵۸۸/۴
۱۶	۶	Block ۱	-۶۰	-۱۵	-۱۰	-۲۵۵۰۰۰	۲۹۷
۴	۷	Block ۱	-۱۵	-۲۷/۵	۰	-۳۹۶/۲	۲۹۷
۷	۸	Block ۱	-۱۵	-۲/۵	۰	-۵/۲۴۷	۵۸۸/۴
۹	۹	Block ۱	۳۰	۱۰	۱۰	۰/۴۸۸۲	۵۹۵/۱
۱۱	۱۰	Block ۱	-۶۰	۱۰	-۱۰	-۲۰۹۱۰۰۰	۵۱۷
۱	۱۱	Block ۱	-۶۰	۱۰	۱۰	-۱۱۲۲	۵۶۰/۸
۱۸	۱۲	Block ۱	-۶۰	-۱۵	۱۰	-۷۶۱۶	۲۹۷
۶	۱۳	Block ۱	۳۰	-۱۵	۱۰	-۰/۰۱۸۶۹	۵۷۷/۹
۱۳	۱۴	Block ۱	-۱۵	-۲/۵	-۲۰	-۱۴۰	۵۷۲/۶
۱۰	۱۵	Block ۱	-۱۵	-۲/۵	۰	-۵/۲۴۷	۵۸۸/۴
۳	۱۶	Block ۱	۳۰	-۱۵	-۱۰	-۰/۴۹۲۹	۵۷۶/۷
۸	۱۷	Block ۱	-۱۰۵	-۲/۵	۰	-۲۵۵۴۰۰	۲۹۷
۱۹	۱۸	Block ۱	-۱۵	-۲/۵	۰	-۵/۲۴۷	۵۵۵/۴
۱۴	۱۹	Block ۱	۳۰	۱۰	-۱۰	۰/۴۸۷۹	۵۹۵
۵	۲۰	Block ۱	-۱۵	-۲/۵	۰	-۵/۲۴۷	۵۸۸/۴

بعد از تعیین و به دست آوردن طرح آزمایشی، ابتدا صحت آن با توجه به مقدار (LEVERRAG) تعیین می‌شود. بعد از آن تابع انتقال توانی مناسب برای نرمال کردن داده‌ها و بهبود مدل انتخاب می‌کنیم. انتخاب تابع توانی به این صورت است که در مرحله اول نمی‌توان در این مورد نظر داد و بعد از به دست آوردن جدول (ANOVA) و تعیین صحت آماری به کمک نمودار (BOX COX) می‌توان بهترین رابطه بین متغیرهای مستقل و خروجی و همچنین بهترین تابع توانی را به دست آورد و در مرحله آخر می‌توان

نمای گرافیکی آن‌ها به همراه درصد رضایتمندی شاخص را نشان داد. بعد از به دست آوردن نتایج، نتایج دوباره با کنترلر، کنترل می‌شود و در پایان بهینه‌ترین حالت انتخاب می‌شود. برای بررسی کفایت آماری باید چند نمودار بررسی شود:

- منحنی BOX COX
 - نمودار احتمال نرمال
 - نمودار نسبت مقادیر واقعی در مقابل پیش‌بینی شده
 - باقیمانده استیوننتیده (شناسایی نقاط غیر طبیعی) داخلی نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده
- البته به‌غیر از این نمودارها نمودارهای دیگری نیز وجود دارد ولی مشهورترین و پرکاربردترین آن‌ها معمولاً نمودارهای نام‌برده هستند.

۳-۹. بهینه‌سازی به روش تاگوچی

یکی از ساده‌ترین روش‌هایی که امروزه در صنایع متفاوت مورد استفاده قرار می‌گیرد تاگوچی است. با استفاده از این روش که یکی از انواع طراحی آزمایش به صورت فاکتوریل جزئی است، آزمایش‌های لازم برای بهینه‌سازی شرایط تولید به تعداد معدودی قابل کاهش است. شرکت‌های معتبری از جمله فورد، آی تی تی، مینولتا، نیسان، زیراکس و سازمان ناسا در زمینه‌های مختلف از این روش جهت بهینه‌سازی فرآیندهای موردنظر خود استفاده کرده‌اند [۹، ۱۰].

۳-۹-۱. نحوه عملکرد روش تاگوچی و مزایای آن:

روش تاگوچی دو عنصر جدید و قدرتمند را ایجاد می‌کند: اولی این است که این روش یک روش مرتب و منظم برای توسعه یک محصول یا بررسی مسائل پیچیده است. دومی این است که این روش وسیله‌ای برای بازرسی مقرون‌به‌صرفه گزینه‌های نهایی قابل استفاده فراهم می‌کند.

روش تاگوچی در چهار مرحله انجام می‌شود:

- کنکاش مشخصات کیفی و پارامترهای طراحی مهم در ارتباط با محصول

- طراحی و هدایت آزمایش‌های
- تحلیل نتایج برای تعیین شرایط بهینه
- انجام آزمون یا آزمون‌های تأیید با استفاده از شرایط بهینه

آزمایشات تاگوچی بر مبنای قوانین سخت طراحی می‌شوند. در این روش برای طراحی آزمایشات از آرایه‌های ارتوگونال استفاده می‌شود. عموماً آرایه‌های ارتوگونال متداول و قابل استفاده برای فاکتورهای ۲، ۳ و ۴ سطحی در منابع قابل دسترسی هستند. فرایند طراحی آزمایشات شامل آرایه ارتوگونال مناسب، اختصاص دادن فاکتورها به ستون‌های مناسب و تعیین شرایط برای آزمایش است. ابتدا اثر فاکتورها به صورت کیفی برآورد می‌شود، شرایط بهینه و عملکرد در حالت بهینه نیز با بررسی اثرات فاکتورها تعیین می‌شود. وقتی آزمایشات شامل تکرار در هر موقعیت آزمایشی بوده و نتایج به صورت کمی اندازه‌گیری شد، تاگوچی تحلیل نسبت S/N (نسبت سیگنال به نویز) را توصیه می‌کند. با ترکیب حالت‌های بهینه تعیین شده در نهایت تحلیل نتایج با استفاده از آزمون تأیید مجدد تاگوچی انجام می‌گردد. اگر مقادیر آزمایش، کاملاً با عملکرد پیش‌بینی شده تاگوچی مطابقت داشته باشد آزمایش را از لحاظ علمی می‌توان مستمر جلوه داد.

در این آزمایش از نرم‌افزار MINITAB 17، روش DOE¹ و روش تاگوچی استفاده شده است. DOE یکی از قوی‌ترین فنون بهبود کیفیت و افزایش بهره‌وری است. در این شیوه از طریق انجام برخی آزمایش‌ها، آگاهانه تغییراتی در فرآیند یا سیستم اعمال می‌شود تا تأثیر آن‌ها در ویژگی‌های عملکردی یا پاسخ فرآیند یا سیستم به آن‌ها، مورد بررسی قرار گیرد. طراحی آزمایش‌ها، دست‌کاری سیستماتیک تعدادی از متغیرهاست که در آن تأثیر این دست‌کاری‌ها ارزیابی می‌گردند و از روی آن‌ها نتیجه‌گیری شده و نتایج به دست آمده پیاده‌سازی می‌شوند.

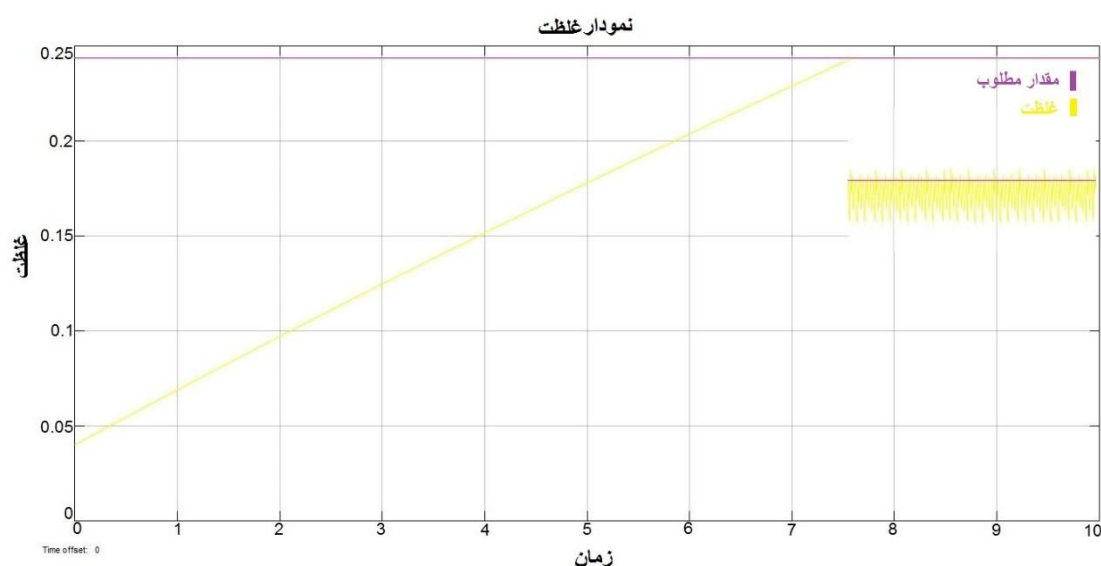
¹ Design of experiments

فصل ٤

نتایج

۴-۱. نتایج شبیه‌سازی با تابع علامت و اشباع

نتایج شبیه‌سازی کنترلر مد لغزشی برای کنترل دمای رکتور بدون در نظر گرفتن مقادیر بهینه، با مقدار ضرایب همگرایی اول $1/5$ - و ضریب همگرایی دوم 2000 با استفاده از تابع علامت (Sign) به صورت شکل (۴-۱) نشان داده شده است. همان‌طور که از نمودار غلظت نسبت به زمان در بازه $7/5$ تا 10 (به صورت زوم شده) مشخص است غلظت در بازه $0.2438/0$ در حال چترینگ می‌باشد. همچنین مقدار حجم و غلظت برای کنترلر شیرها به صورت جدول (۴-۱) در نظر گرفته شده است.



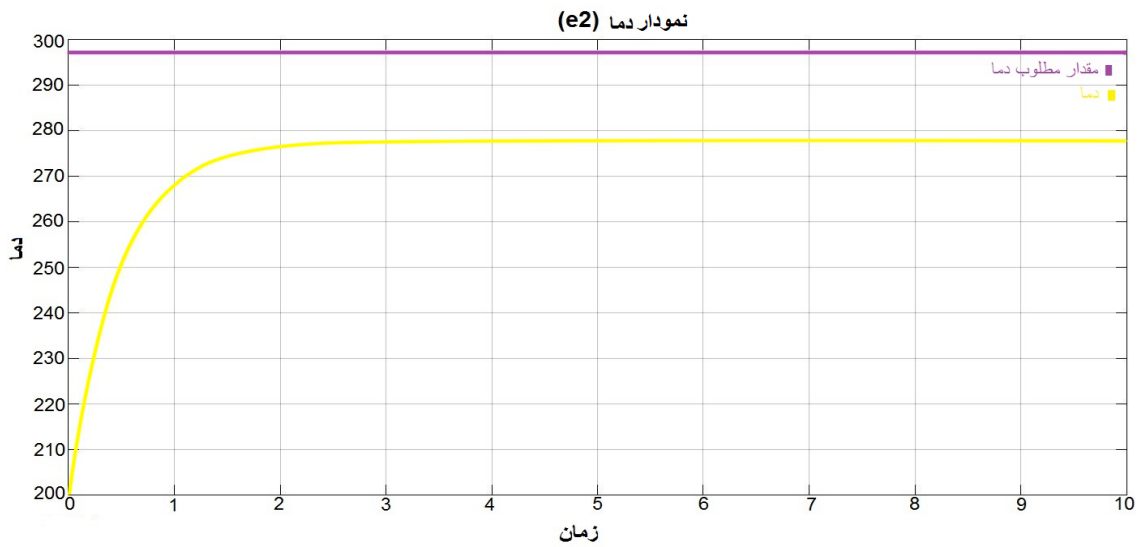
شکل ۴-۱: نمودار غلظت نسبت به زمان (با تابع علامت)

جدول ۴-۱ پارامترهای شیر کنترلی

پارامتر	V_A (Lit) حجم ماده A	V_B (Lit) حجم ماده B	V (Lit) حجم کل	CB (MolL^{-1}) غلظت ماده B
مقدار	۸۰	۲۰	۱۰۰	۰/۱۴

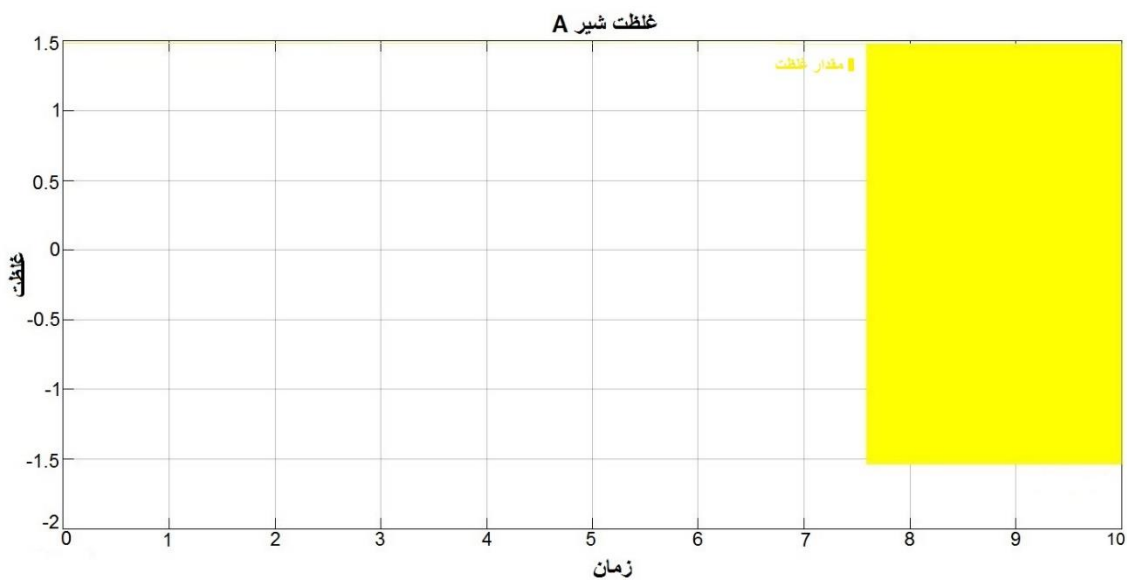
شکل (۴-۲) نمودار دما نسبت به زمان با تابع علامت را نشان می‌دهد که خطای دما در این حالت نسبت به مقدار مطلوب بسیار زیاد و قابل قبول نمی‌باشد. دلیل زیاد بودن خطا نسبت به مقدار مطلوب

در روش کنترلر مد لغزشی به ماهیت سیستم کنترلی (رکتور CSTR) برمی گردد.

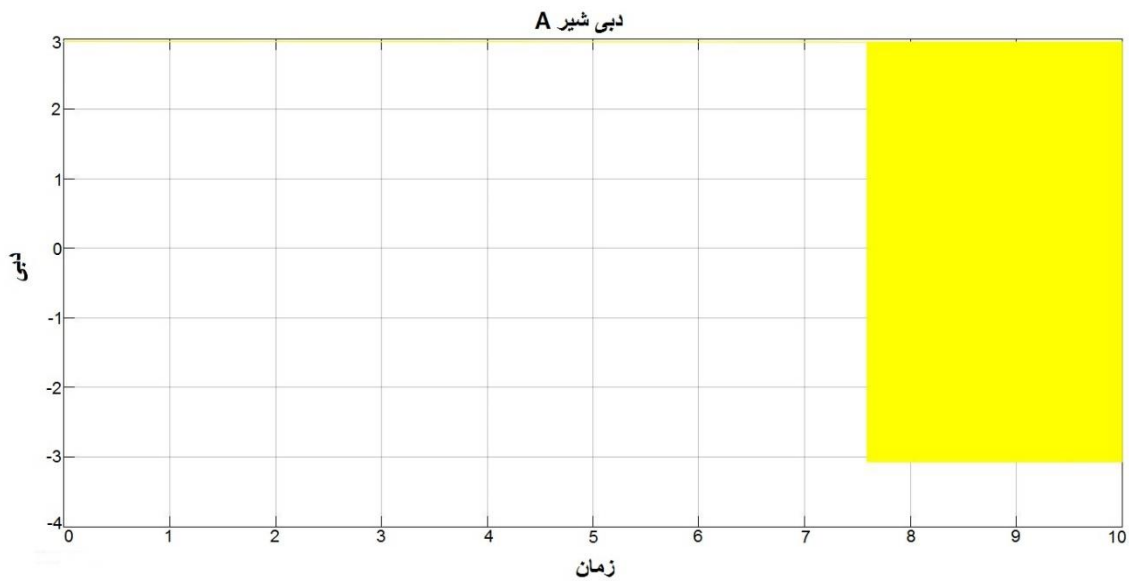


شکل ۴-۲: نمودار دما نسبت به زمان

شکل (۴-۳) و (۴-۴) دبی و غلظت شیر A و B (شیر با ماده اصلی و فرعی) با تابع علامت با همان ضرایب همگرایی بدون در نظر گرفتن حالت‌های بهینه نشان می‌دهد؛ که غلظت و دبی شیر A به دلیل چترینگ زیاد قابل اندازه‌گیری دقیق نمی‌باشند.



شکل ۴-۳: مقدار غلظت شیر A

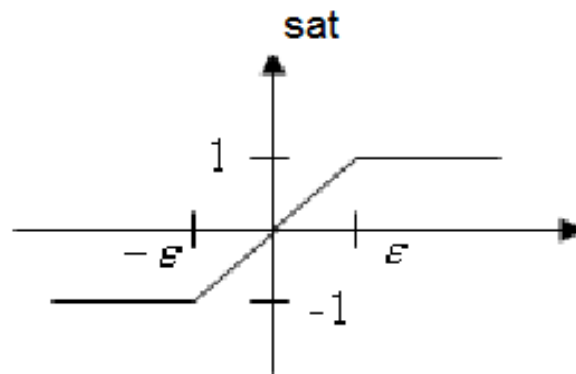


شکل ۴-۴: دبی شیر A

استفاده از تابع Saturation به جای Sign:

$$|S| > \varepsilon \rightarrow \text{Sat}\left(\frac{\delta}{\varepsilon}\right) = \text{Sgn}(S) \quad (۱-۴)$$

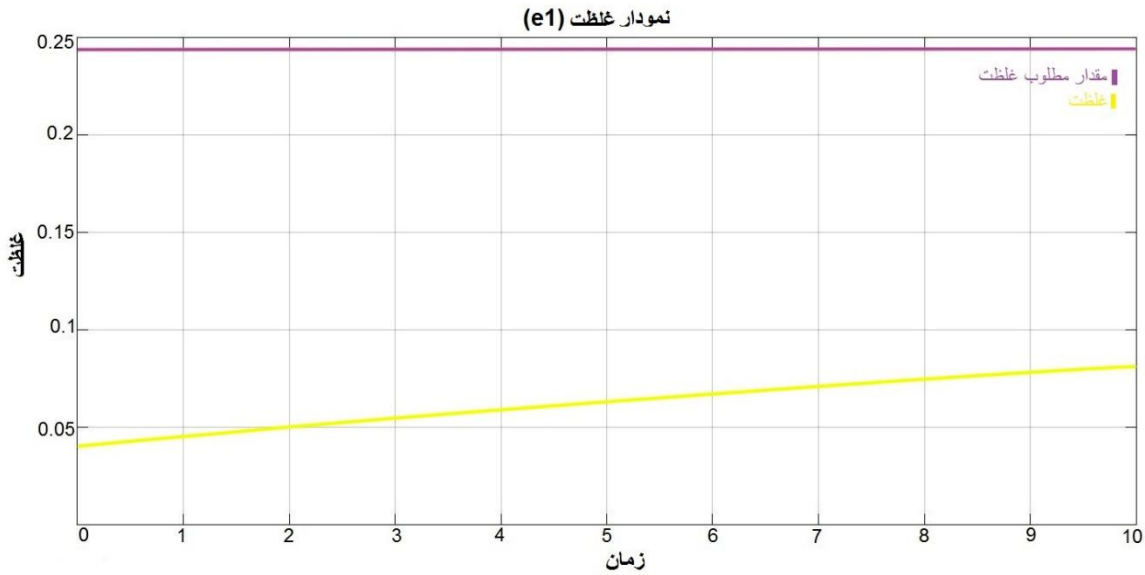
$$|S| < \varepsilon \rightarrow \text{Sat}\left(\frac{\delta}{\varepsilon}\right) = \frac{\delta}{\varepsilon} \quad (۲-۴)$$



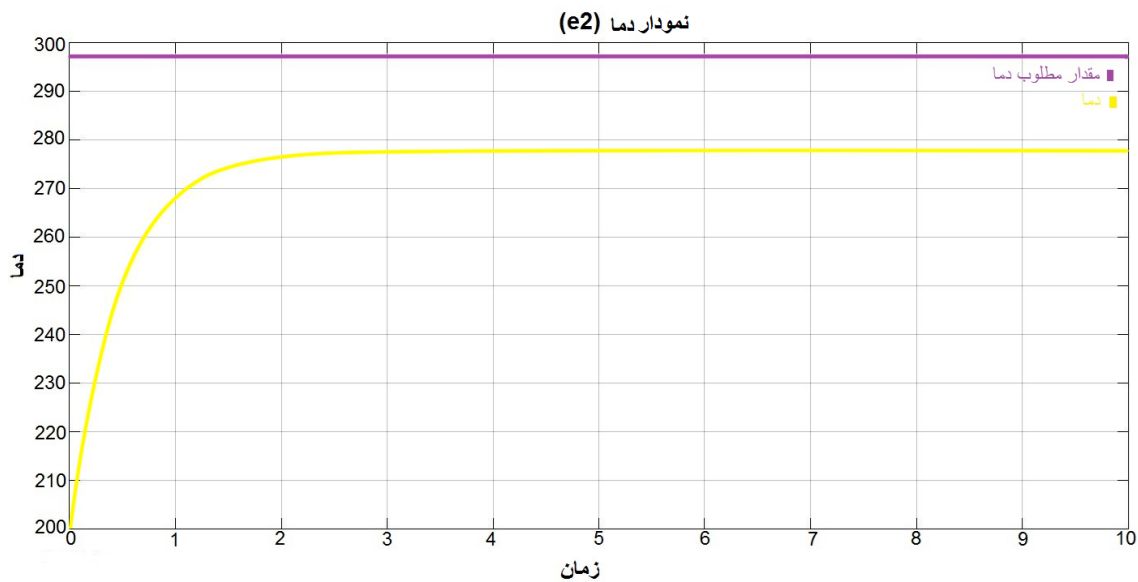
شکل ۴-۵: تابع اشباع

با اعمال تابع اشباع به جای تابع علامت با همان مقادیر ضرایب همگرایی می‌بینیم که چترینگ یا لرزش کاملاً از بین می‌رود ولی هنوز خطای دما و غلظت نسبت به مقدار مطلوب با توجه به شکل‌های (۶-۴) و (۷-۴) زیاد می‌باشد. همچنین با توجه به شکل‌های (۸-۴)، (۹-۴) دبی و غلظت شیر اول هر دو به صورت تقریباً خطی در حال کاهش می‌باشد و نمی‌توان مقادیر آنها را به صورت دقیق به دست

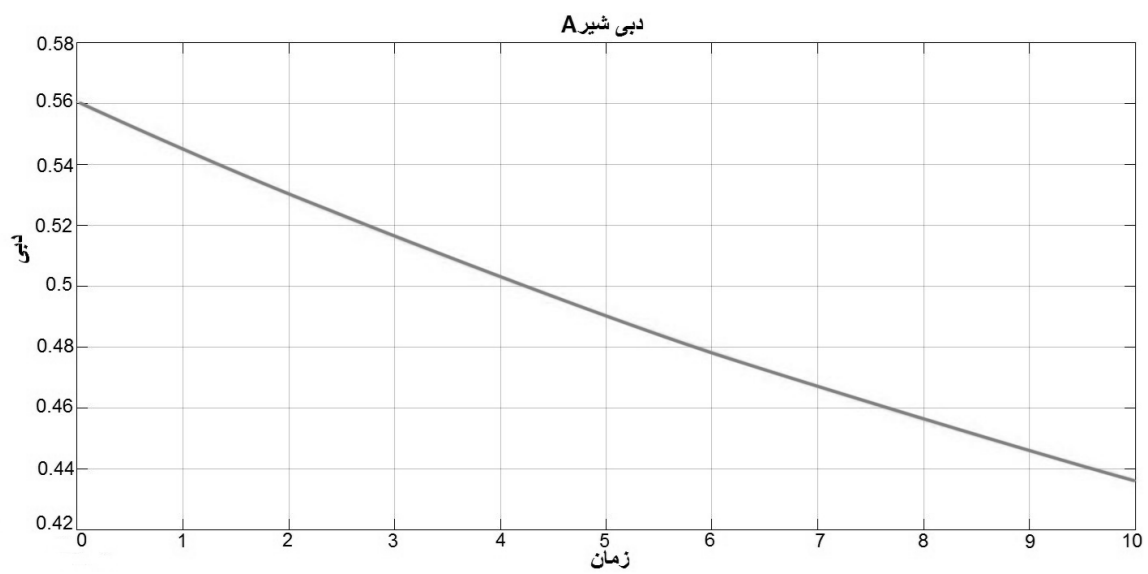
آورد. در شکل (۴-۱۰) نیز مقدار دبی برای شیر دوم به صورت سهمی در حال افزایش است و نمی‌توان مقدار ثابتی برای آن به دست آورد.



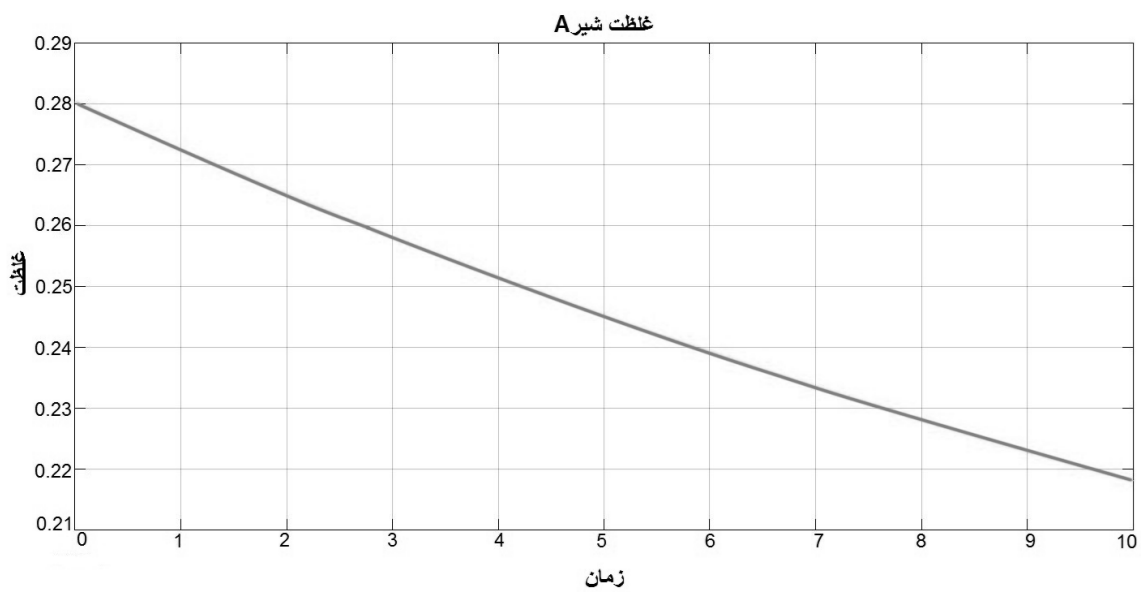
شکل ۴-۶: نمودار غلظت با استفاده از تابع اشباع



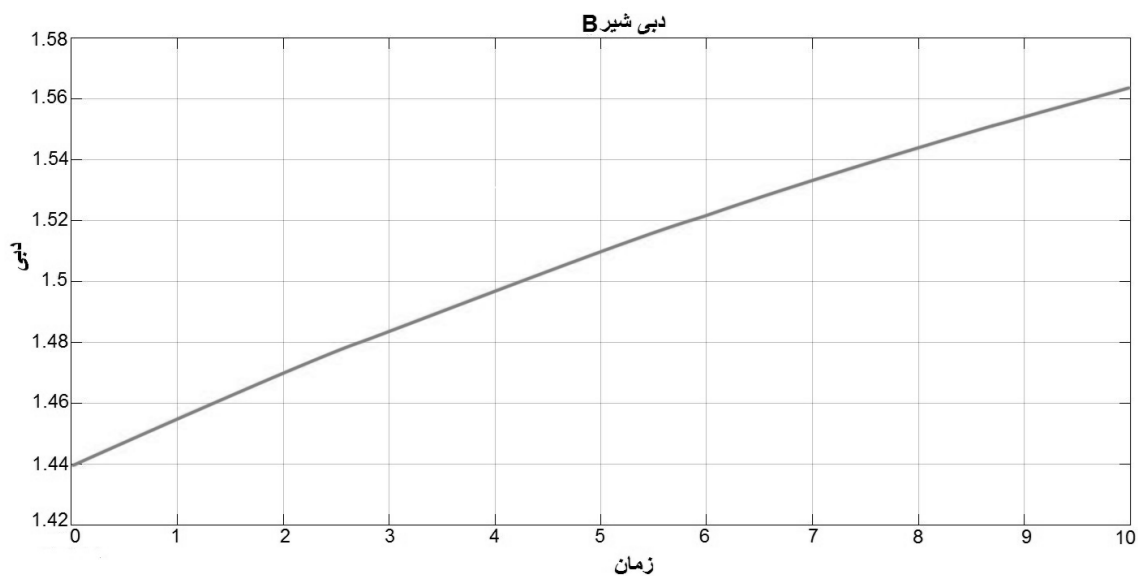
شکل ۴-۷: خطای دما با استفاده از تابع اشباع



شکل ۴-۸: دبی شیر A با استفاده از تابع اشباع



شکل ۴-۹: غلظت شیر A با استفاده از تابع اشباع



شکل ۴-۱۰: دبی شیر B با استفاده از تابع اشباع

۲-۴. نتایج بهینه‌سازی کنترلر مد لغزشی با روش (RSM):

اولین گام در بررسی نتایج، بررسی مقدار عددی LEVERAGE (یک متغیر آماری) است که اگر این عدد به ۱ نزدیک باشد آن آزمایش باید دوباره تکرار شود. در جدول (۲-۴) مقادیر LEVERAGR برای طرح آزمایشی کنترلر مد لغزشی نشان داده شده است؛ که این نتایج نشان‌دهنده صحت آزمایش انجام شده می‌باشد و نیاز به تکرار مجدد آن آزمایش‌ها وجود ندارد.

جدول ۴-۲: LEVERAGE

نوع نقطه	قدرت نفوذ Leverage	آزمایش
فاکتوریال	۰/۴۹۴۳	۶
فاکتوریال	۰/۴۹۴۳	۵
فاکتوریال	۰/۴۹۴۳	۲
فاکتوریال	۰/۴۹۴۳	۳
محوری	۰/۷۹۰۲	۱۳
محوری	۰/۷۹۰۲	۴
محوری	۰/۷۹۰۲	۱۱
محوری	۰/۷۹۰۲	۹
مرکزی	۰/۱۷۲۴	۱۰
مرکزی	۰/۱۷۲۴	۱
مرکزی	۰/۱۷۲۴	۷
مرکزی	۰/۱۷۲۴	۸
مرکزی	۰/۱۷۲۴	۶

۴-۲-۱. بررسی جدول ANOVA

جداول (۳-۴) و (۴-۴) نتایج تحلیل متغیرهای مستقل بر مقدار خطای غلظت و دما را نشان می‌دهد. این جدول ANOVA نام دارد که متغیرهای مختلف همراه با ضرایب آماری آن‌ها نمایش داده می‌شود. برای مثال در این جدول (۳-۴) DOF یا درجه آزادی ۲ برای سیستم نشان‌دهنده این است که با دو جمله می‌توان خطای غلظت و دما را برحسب متغیرها مستقل تخمین زد؛ و در این جداول مقادیری برای ما قابل قبول است که P-VALUE آن کمتر از ۰/۰۵ باشد (یک تخمین آماری). در نهایت رابطه (۴-۱) ارتباط بین متغیرهای مستقل و خطای غلظت و رابطه (۴-۲) رابطه بین متغیرهای مستقل با دما را نمایش می‌دهد.

$$(e_1)^{-1.81} = -8.46785 \times 10^5 - 1329.51537\gamma_1 + .87971\gamma_1^2 \quad (1-4)$$

$$(e_2 + .28)^{-1.29} = 1040.46091 - 0.016876\gamma_1 + 22.49365\gamma_2 - (2.40526 \times 10^6) \times \gamma_1^2 + .12213\gamma_2^2 \quad (2-4)$$

جدول ۳-۴: نتایج تحلیل اثر متغیرهای مستقل بر خطای غلظت

** معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد

منبع تغییر Source of variation	مجموع مربعات Sum of square	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of square	مقدار F F value	Prob > F
مدل Model	۲/۴۰۶E+۰۱۵	۲	۱/۲۰۳E+۰۱۵	۱/۶۹۳E+۰۰۶	< ./.۰۰۰۱**
A- γ_1 ضریب همگرایی	۲/۳۰۹E+۰۱۵	۱	۲/۳۰۹E+۰۱۵	۳/۲۴۹E+۰۰۶	< ./.۰۰۰۱**
A ^۲	۹/۷۶۴E+۰۱۳	۱	۹/۷۶۴E+۰۱۳	۱/۳۷۴E+۰۰۵	< ./.۰۰۰۱**
ضریب تعیین R-squared	۱				
ضریب تغییرات C.V	۰/۱۱				

جدول ۴-۴: نتایج تحلیل اثر متغیرهای مستقل بر خطای دما e_2 (ANOVA)
 ** معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد

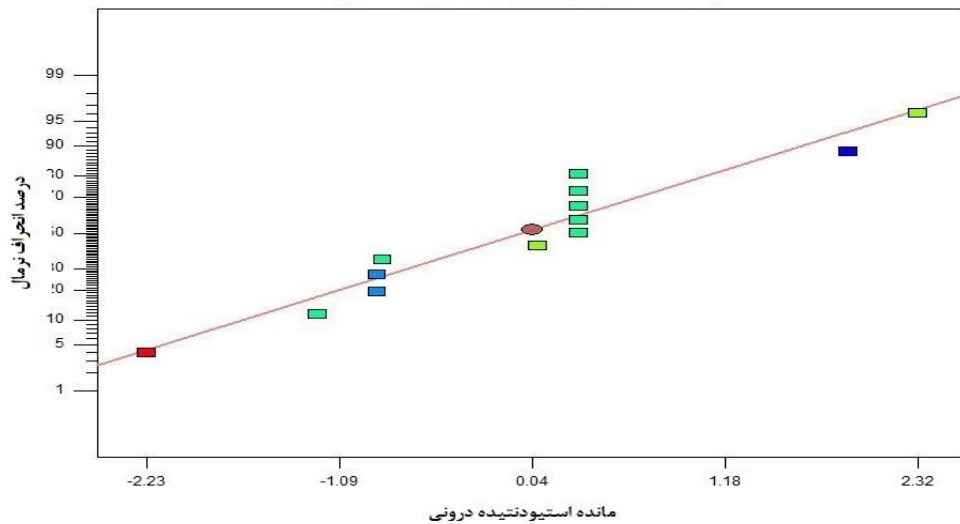
منبع تغییر Source of variation	مجموع مربعات Sum of square	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of square	مقدار F F value	Prob > F
مدل Model	۱۶۴۶۰/۴۲	۴	۴۱۱۵/۱۱	۳۷/۷۳	< ./.۰۰۰۱**
A- γ_1 ضریب	۶۱۴/۷۵	۱	۶۱۴/۷۵	۵/۶۴	< ./.۰۰۰۱**
A ^۲	۶۷۱/۰۹	۱	۶۷۱/۰۹	۶/۱۵	< ./.۰۰۰۱**
B ^۲	۳۴۱۷/۴۵	۱	۳۴۱۷/۴۵	۳۱/۳۳	< /.۰۰۰۵**
B- γ_2 ضریب همگرایی	۱۰۴۶۲/۷۵	۱	۱۰۴۶۲/۷۵	۹۵/۹۲	< ./.۰۰۰۱**
ضریب تعیین R-squared	۹۴/۹۷				
ضریب تغییرات C.V	۱۸/۶۱				

همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد برای بررسی کفایت آماری جدول ANOVA و رابطه (۴-۱) و (۴-۲) باید چند نمودار مورد بررسی قرار گیرد که مهم‌ترین آن‌ها BOX COX است؛ که با استفاده از این نمودار می‌توان بهترین تابع انتقال توانی (تابعی که برای نرمال‌سازی داده‌ها و بهبود مدل از آن استفاده می‌شود) را بعد انجام چند سعی و خطا تخمین زد.

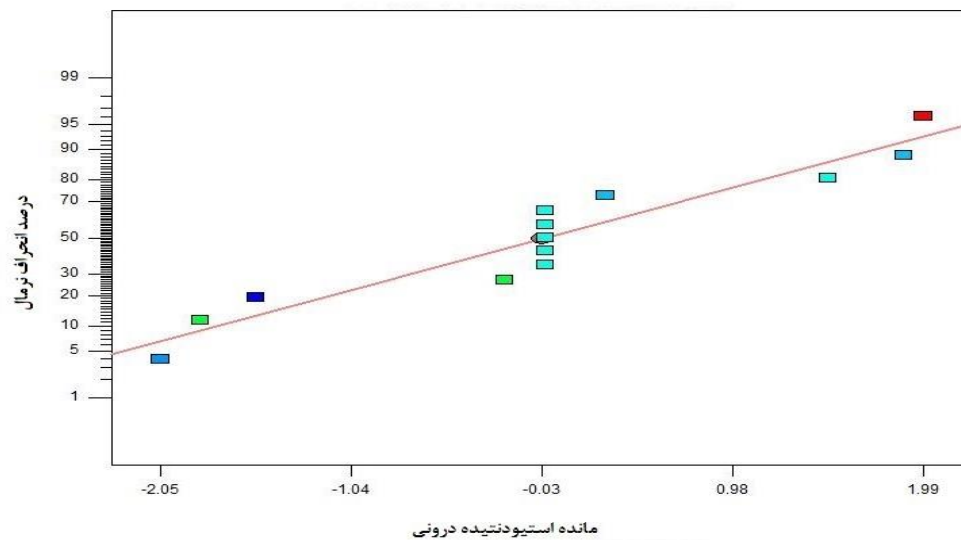
۴-۲-۲. بررسی نمودار احتمال نرمال:

اولین نمودار برای کنترل صحت داده‌ها نمودار احتمال نرمال است که به صورت شکل (۴-۱۱) و (۴-۱۲) نمایش داده شده است. نمودار احتمال نرمال نشان می‌دهد که داده چگونه از یک توزیع نرمال پیروی می‌کند. حتی با وجود داده‌های طبیعی انتظار برخی پراکنش‌های متوسط وجود دارد. الگوهای منحنی شکل و مشخص تنها با یک نگاه قابل تشخیص می‌باشند و نشان می‌دهد که با انجام یک تابع

انتقال بر روی متغیر وابسته یا پاسخ مدل، تجزیه و تحلیل بهتری به دست می‌آید در صورتی که در شکل، توزیع کاملاً نرمال نشان دهنده این است که نیازی به استفاده از تابع انتقال توانی مجدد نیست.



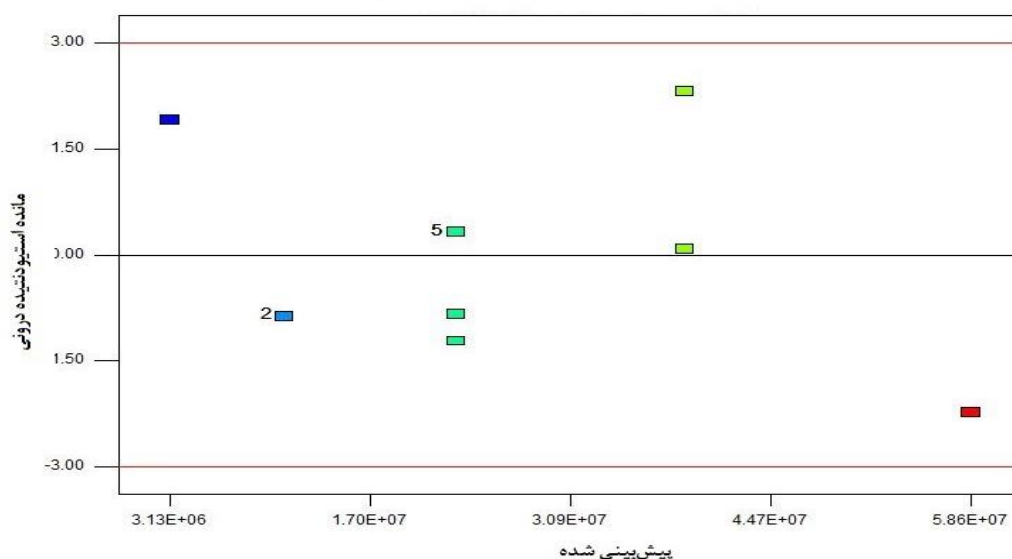
شکل ۴-۱۱: نمودار احتمال نرمال برای خطای غلظت e_1



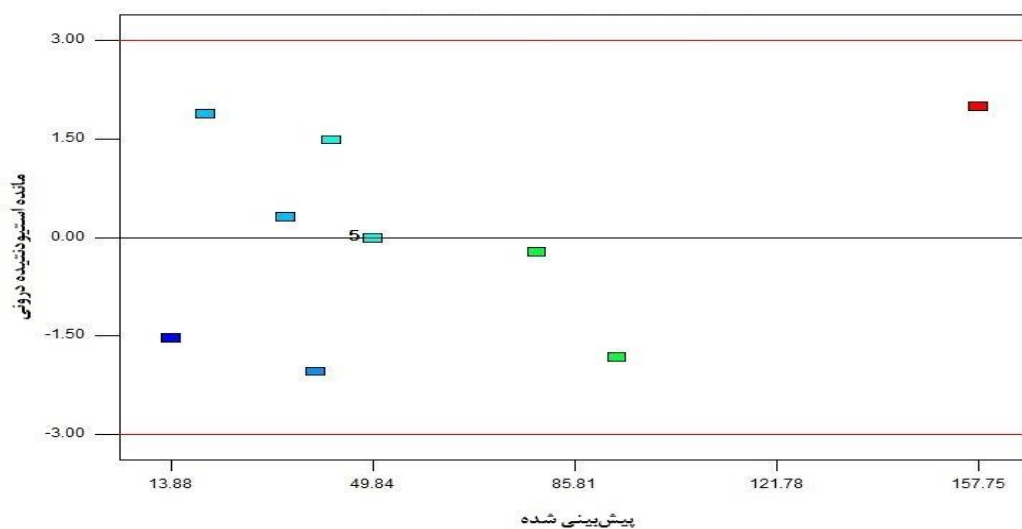
شکل ۴-۱۲: نمودار احتمال نرمال برای خطای دما e_2

۳-۲-۴. بررسی نمودار مقادیر مانده در مقابل پیش‌بینی شده:

نمودار بعدی که باید برای کفایت آماری بررسی شود نمودار مقادیر مانده در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده است که در شکل (۴-۱۳) و (۴-۱۴) نشان داده شده است. این نمودار باید دارای پراکندگی تصادفی باشد که نشان‌دهنده طیف ثابت مانده در سراسر نمودار است و الگوهای به شکل $>$ نیاز به استفاده از یک تابع انتقال توانی را نشان می‌دهد. این نمودار بین مثبت و منفی استاندارد را برای ما مشخص می‌کند و اگر نقاط بیرون از آن قرار گیرند برون رشته‌ای است.



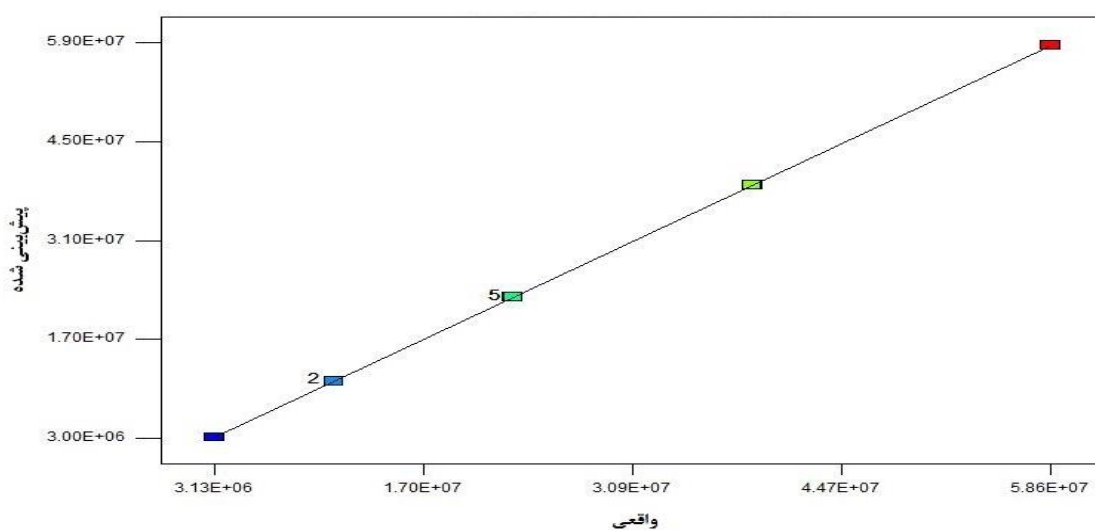
شکل ۴-۱۳: نمودار مقادیر مانده در مقابل پیش‌بینی شده برای خطای غلظت e_1



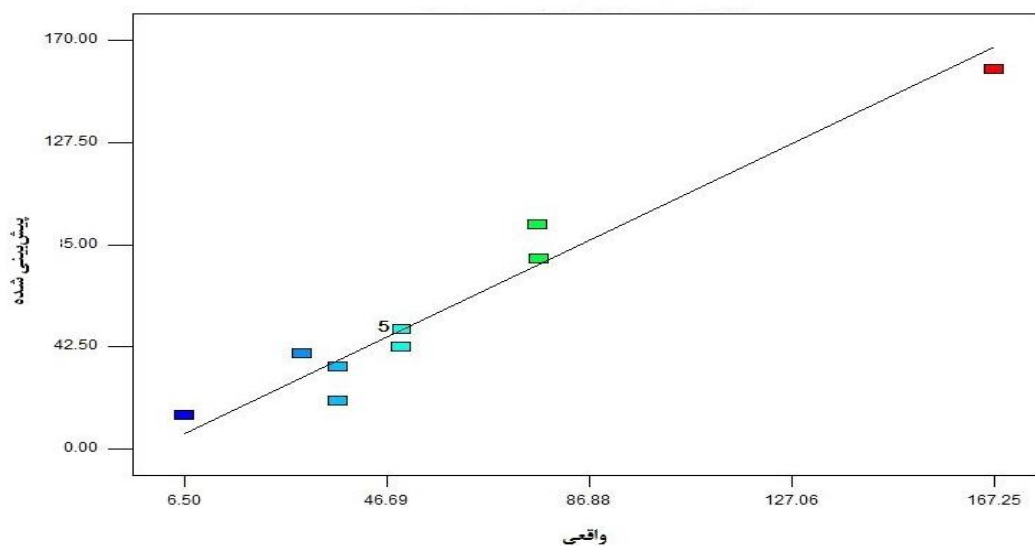
شکل ۴-۱۴: نمودار مقادیر مانده در مقابل پیش‌بینی شده برای خطای دما e_2

۴-۲-۴. بررسی نمودار مقادیر واقعی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده:

شکل (۴-۱۵) و (۴-۱۶) مقادیر واقعی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد که برای کمک به تشخیص مقادیر یا گروهی از مقادیر که توسط مدل پیش‌بینی نشده بیان شده است. با دانستن مقادیر پیش‌بینی نشده توسط مدل می‌توان در مرحله بعد از مقادیری استفاده کرد که این مقادیر را نیز در برداشته باشد.



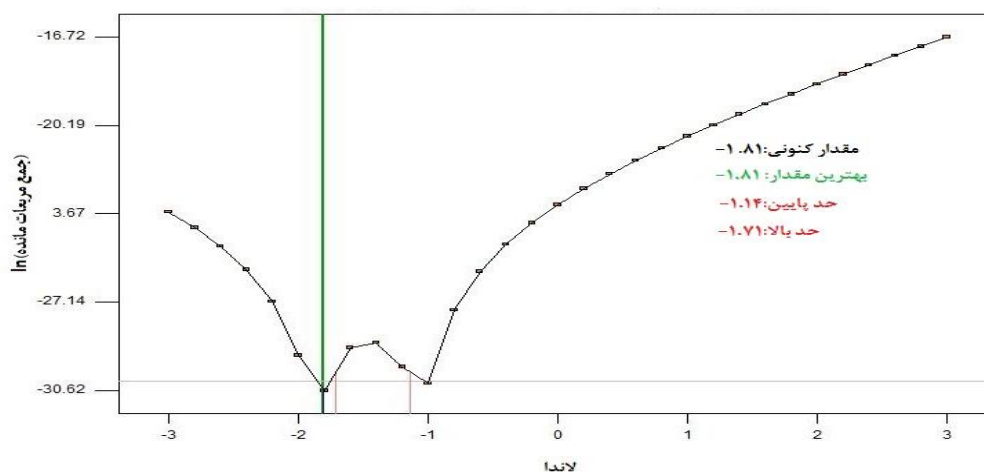
شکل ۴-۱۵: نمودار مقادیر واقعی در مقابل پیش‌بینی شده برای خطای غلظت e_1



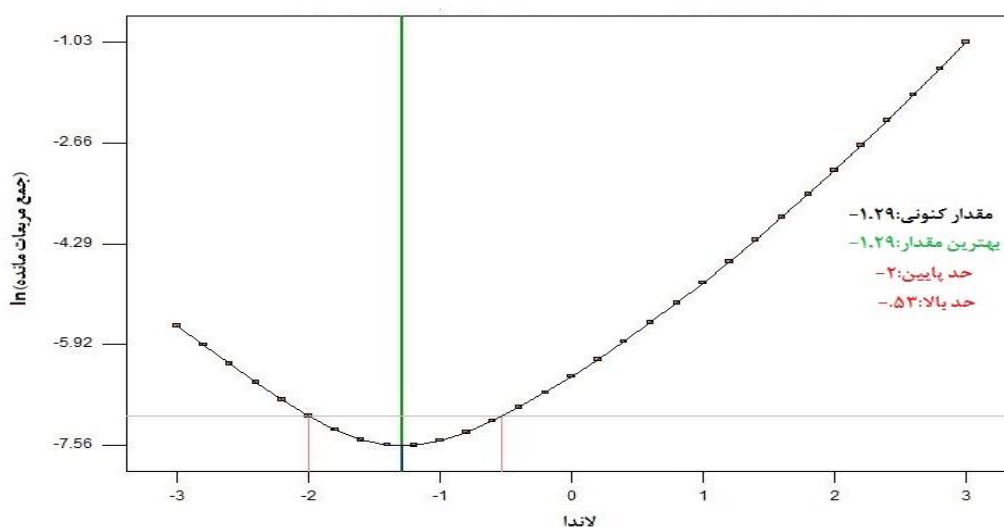
شکل ۴-۱۶: نمودار مقادیر واقعی در مقابل پیش‌بینی شده برای خطای دما e_2

۴-۲-۵. بررسی نمودار باکس کاکس:

نمودار باکس کاکس در شکل (۴-۱۷) و (۴-۱۸) ابزاری برای کمک به تشخیص مناسب‌ترین تابع انتقال توانی به منظور اعمال بر پاسخ است. پایین‌ترین نقطه در نمودار باکس کاکس بهترین مقدار لاندا را که در آن حداقل مجموع مربعات مانده در مدل تبدیل‌شده ایجاد می‌شود را نشان می‌دهد. هنگامی که نسبت حداقل به حداکثر پاسخ بزرگ‌تر از سه باشد توانایی بیشتری در بهبود مدل با استفاده از تابع توانی وجود خواهد داشت.



شکل ۴-۱۷: نمودار BOX COX برای خطای غلظت e_1



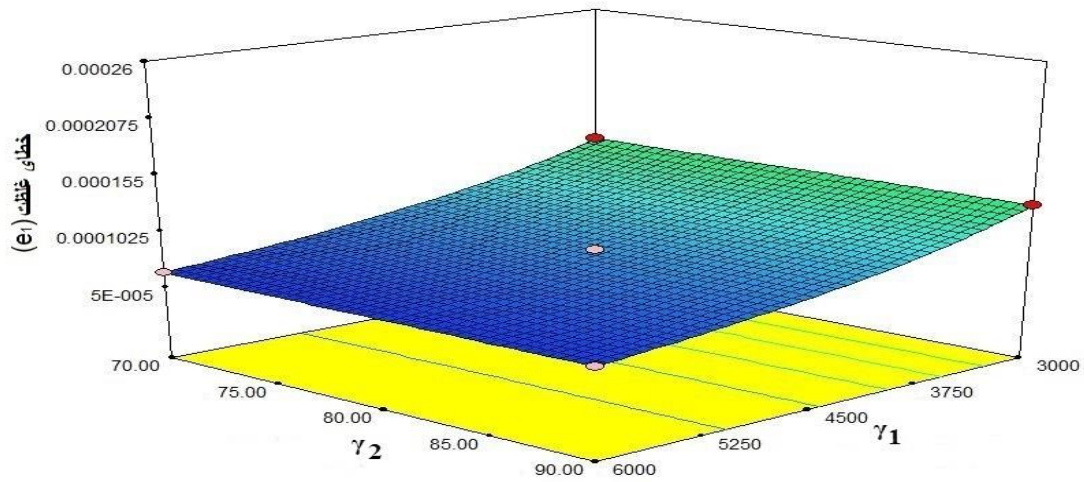
شکل ۴-۱۸: نمودار BOX COX برای خطای دما e_2

همان‌طور که از نمودار مشخص است مقدار کنونی (توان خروجی) با بهترین مقدار برابر است یعنی بهترین تابع انتقال توانی انتخاب‌شده و کفایت آماری رابطه (۴-۱)، (۴-۲) و جدول ANOVA تأیید شده است. در صورتی که مقدار کنونی با بهترین مقدار فاصله (مقدار لاندا) زیادی داشت با توجه به پیشنهاد نمودار باکس کاکس مقادیری که می‌تواند بین حد بالا و پایین باشد و یا بهترین مقدار را انتخاب می‌کنیم، مقدار تابع انتقال را تغییر داده و نمودارها را دوباره چک می‌کنیم. برای خطای دما نیز به همین ترتیب نمودار ANOVA، احتمال نرمال، نمودار مقادیر مانده در مقابل پیش‌بینی‌شده، مقادیر واقعی در مقابل مقادیر پیش‌بینی‌شده و در نهایت نمودار باکس کاکس برای کفایت آماری را کنترل می‌کنیم.

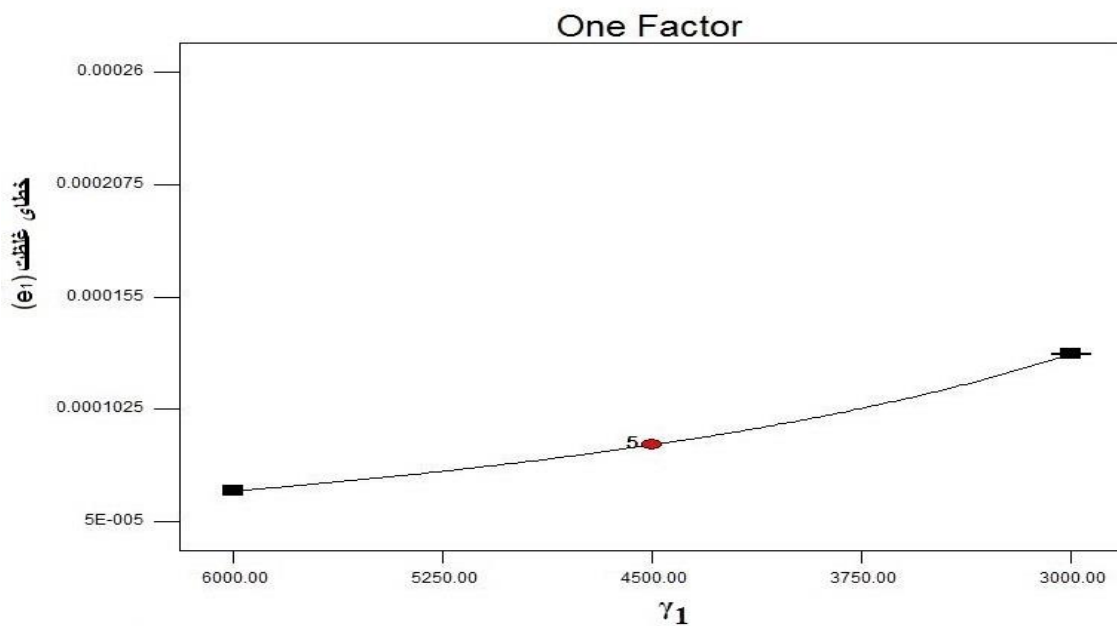
۴-۲-۶. مدل گرافیکی متغیرهای مستقل بر حسب خطا:

در شکل (۴-۱۹) نمودار گرافیکی تغییرات خطای غلظت e_1 بر حسب متغیر γ_1 و γ_2 نشان داده شده است. همان‌طور که از نمودار مشخص است با تغییر γ_2 غلظت هیچ تغییری نمی‌کند و همچنان ثابت است یعنی γ_2 روی متغیر اول بی‌تأثیر است که در جدول ANOVA نیز نشان داده شد؛ و متغیر دوم یعنی γ_1 به‌طور مستقیم بر روی غلظت تأثیر دارد و هرچه قدر از ۳۰۰۰ به ۶۰۰۰ نزدیک شویم خطا کاهش می‌یابد که دقیقه در حالت عملی و با استفاده از کنترلر مد لغزشی همین نتایج برداشت شد.

نمای دوبعدی از نمودار گرافیکی در شکل (۴-۲۰) نیز نشان داده شده است.



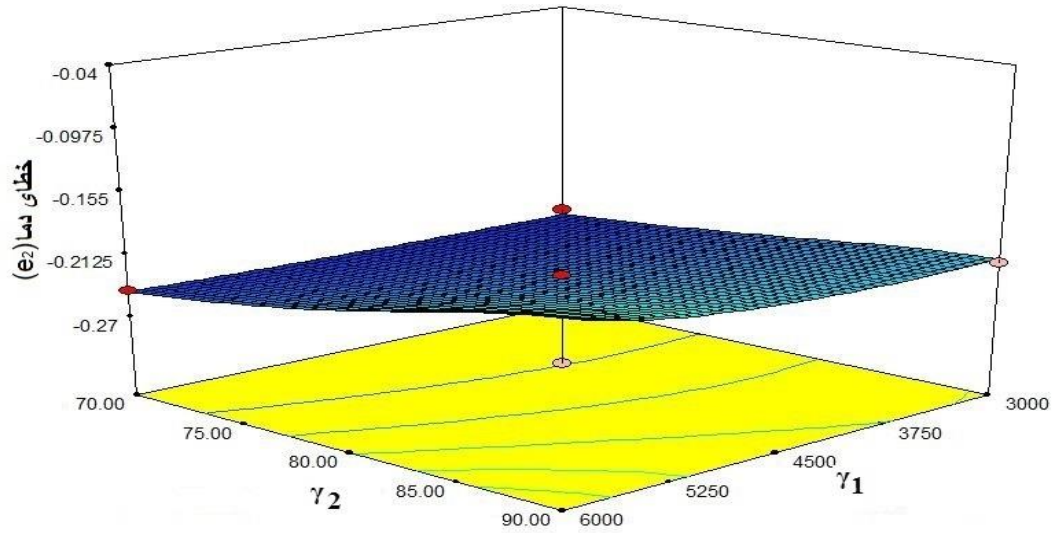
شکل ۴-۱۹: نمودار تغییرات γ_1 و γ_2 بر حسب خطای غلطت e_1



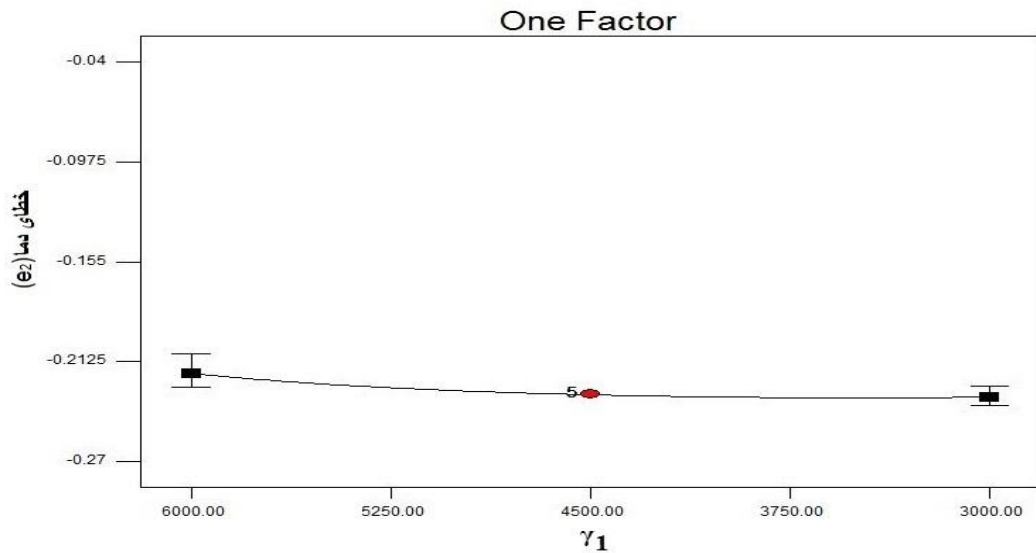
شکل ۴-۲۰: نمودار تغییرات γ_1 بر حسب خطای غلطت e_1

در شکل (۴-۲۱) نمودار گرافیکی تغییرات خطای دما e_2 بر حسب متغیر γ_1 و γ_2 نشان داده شده است؛ که برای γ_2 هرچه قدر از ۷۰ به ۹۰ نزدیک شویم مقدار خطابه صفر نزدیک تر می شود؛ و برای γ_2 هرچه قدر از ۳۰۰۰ به ۶۰۰۰ نزدیک شویم مقدار خطا کمتر می شود که در حالت عملی و با

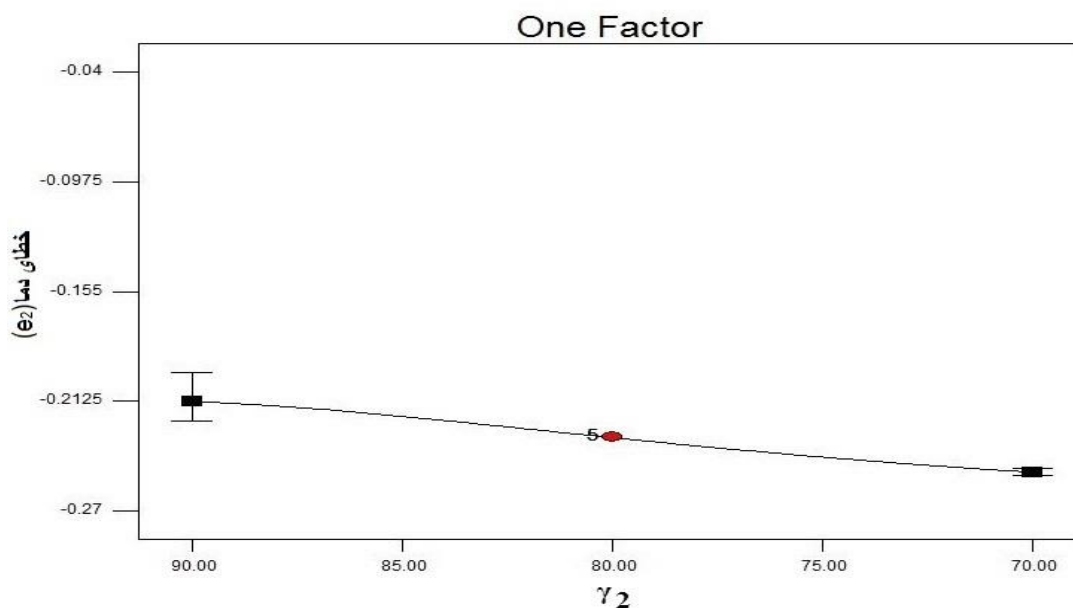
کنترلر مد لغزشی نیز همین نتایج برداشت شد. شکل‌های (۲۲-۴) و (۲۳-۴) نمودار دویبعدی تغییرات خطا برحسب متغیرهای مستقل را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۱: نمودار تغییرات γ_1 و γ_2 برحسب خطای دما



شکل ۴-۲۲: نمودار تغییرات γ_1 برحسب خطای دما e_2



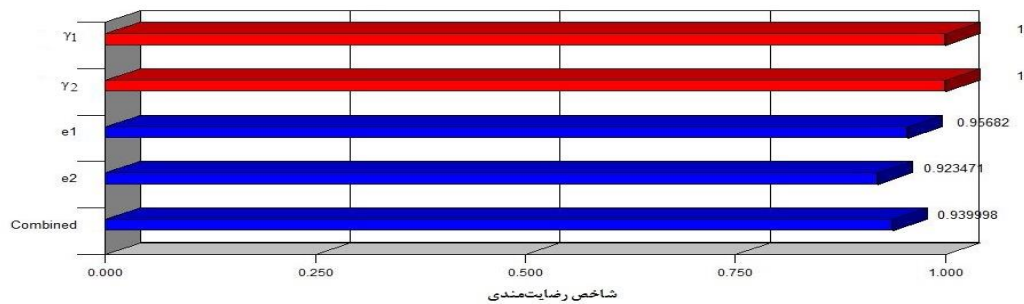
شکل ۴-۲۳: نمودار تغییرات γ_2 برحسب خطای دما e_2

۴-۲-۷. شرایط بهینه و درصد رضایتمندی شاخص برای کنترلر مد لغزشی:

در جدول (۴-۵) فهرستی از شرایط بهینه نمایش داده شده است؛ که با توجه به اهداف تعیین شده ردیف ۱ در جدول مطلوب‌ترین شرایط را با توجه به شاخص رضایتمندی، توسط سطح پاسخ پیشنهاد می‌کند. همان‌طور که از ردیف اول جدول مشخص است γ_1 برابر $5999/94$ و γ_2 برابر 70 مناسب‌ترین پاسخ و شرایط آزمایش را نشان می‌دهد. برای برنامه Design Expert ۷ پاسخ خطای دما و غلظت $0/246119$ ؛ و $0/41623E-005$ با شاخص رضایتمندی $0/940$ ؛ که بیشترین مقدار شاخص رضایت را دارد به اهداف تعیین شده نزدیک است. شکل (۴-۲۴) نمودار شاخص رضایتمندی را برای ردیف اول جدول شرایط بهینه را مشخص می‌کند.

جدول ۴-۵: شرایط بهینه کاهش خطا و پاسخ متناظر کنترلر مد لغزشی

ردیف test	ضریب همگرایی γ_2	ضریب همگرایی γ_1	خطای دما e_2	خطای غلظت e_1	شاخص رضایتمندی Desirability
۱	$70/00$	$5999/94$	$-0/246119$	$6/41623E-005$	$0/940$
۲	$70/00$	$5670/59$	$-0/247373$	$6/79428E-005$	$0/937$



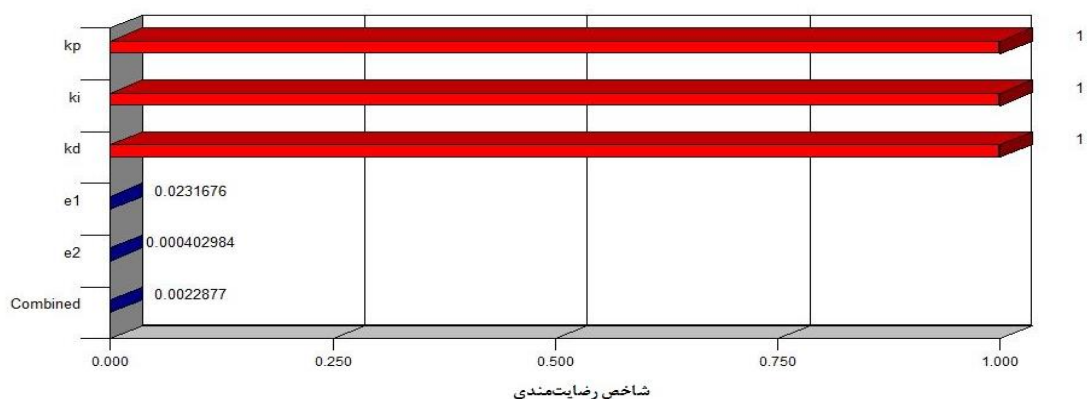
شکل ۴-۲۴: نمودار شاخص رضایتمندی برای ردیف اول جدول شرایط بهینه

۳-۴. نتایج شبیه‌سازی کنترلر PID با روش RSM:

در جدول (۴-۶) فهرستی از شرایط بهینه برای کنترلر PID در نظر گرفته شده است. این مقادیر پس از انجام چند دوره آزمایش در بازه‌های مختلف و فهمیدن بهترین بازه و کوچک‌ترین بازه برای جواب‌های تقریباً منطقی به دست آمده است، همان‌طور که از جدول شاخص رضایتمندی و نمودار شاخص رضایتمندی (۴-۲۵) مشخص است در صد رضایتمندی کنترلر PID نسبت به کنترلر مد لغزشی بسیار پایین می‌باشد.

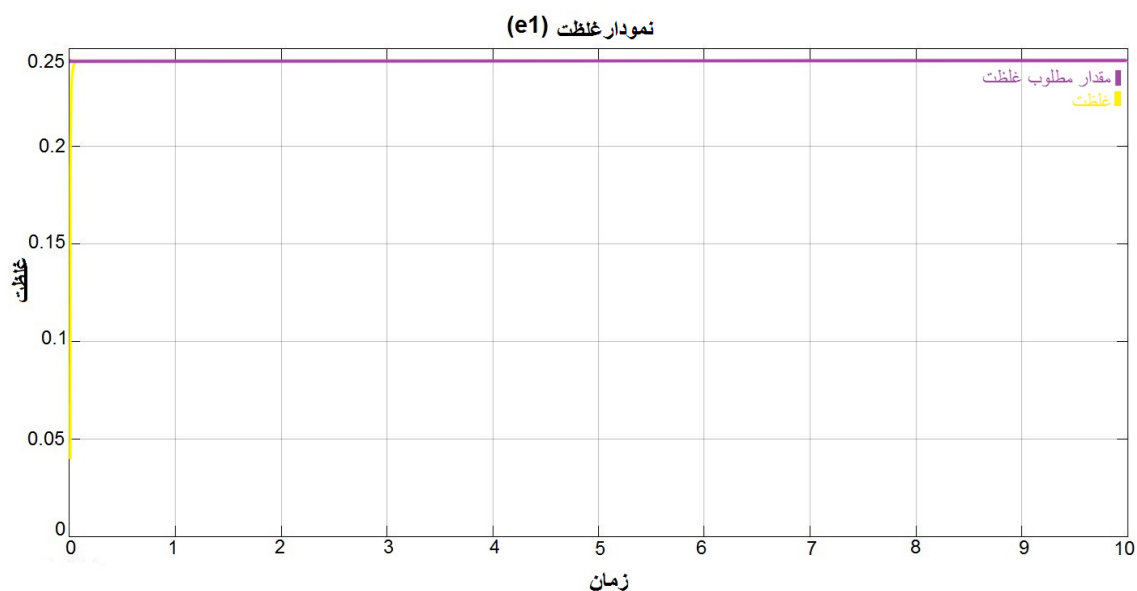
جدول ۴-۶: شرایط بهینه کاهش خطا و پاسخ متناظر برای کنترلر PID

شاخص رضایتمندی Desirability	خطای غلظت e_1	خطای غلظت e_2	ضریب تناسبی Kp	ضریب انتگرال گیر k_i	ضریب مشتق گیر k_d	ردیف test
۰/۰۰۲	-۴۰۴۲۷۳	۲۹۷/۵۹۹	-۵۹/۹۸	-۱۵/۰۰	-۱۰/۰۰	۱
۰/۰۰۲	-۴۰۱۲۸۹	۲۹۷/۵۷	-۶۰/۰۰	-۱۵/۰۰	-۹/۸۸	۲
۰/۰۰۲	-۴۰۴۳۷۷	۲۹۸/۷۷۱	-۵۹/۹۹	-۱۴/۷۷	-۱۰/۰۰	۳
۰/۰۰۲	-۴۰۰۰۸۴	۲۹۸/۴۵۸	-۵۹/۳۸	-۱۵/۰۰	-۱۰/۰۰	۴
۰/۰۰۲	-۳۷۲۶۲۴	۲۹۷/۵۷	-۶۰/۰۰	-۱۵/۰۰	-۸/۸۱	۵
۰/۰۰۲	-۳۳۱۰۹۷	۲۹۷/۵۷	-۶۰/۰۰	-۱۵/۰۰	-۷/۲۰	۶
۰/۰۰۱	-۲۲۶۷۹۶	۲۹۷/۵۷	-۶۰/۰۰	-۱۵/۰۰	-۲/۸۴	۷
۰/۰۰۱	-۲۰۲۶۰۴	۲۹۹/۹۰۹	-۵۸/۳۸	-۱۵/۰۰	-۱/۹۹	۸
۰/۰۰۱	-۱۸۰۱۱۵	۲۹۹/۶۵۴	-۶۰/۰۰	-۱۴/۵۹	-۰/۷۴	۹

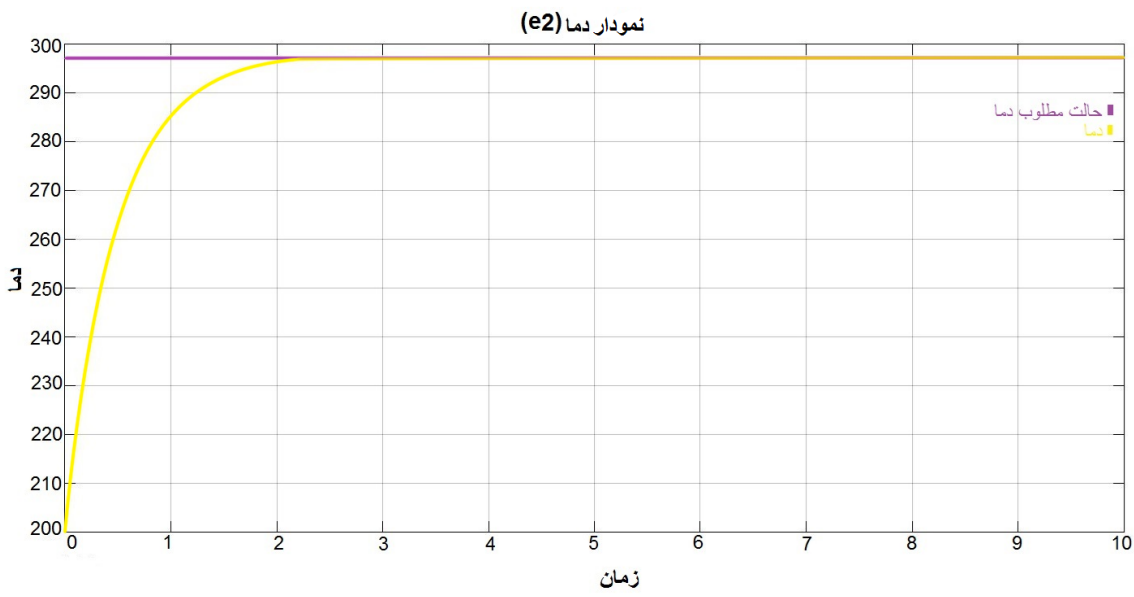


شکل ۴-۲۵: نمودار شاخص رضایتمندی برای ردیف اول جدول شرایط بهینه برای کنترلر PID

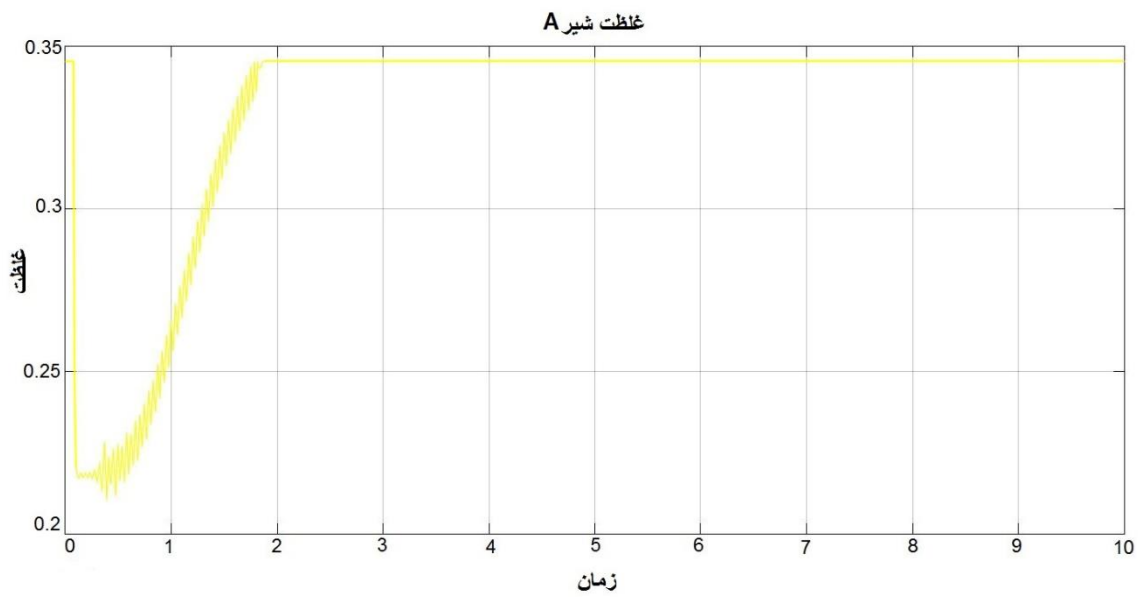
در نهایت با استفاده از مقادیر بهینه به دست آمده به روش RSM، نمودار غلظت و دما نسبت به مقدار مطلوب، مقادیر دبی و غلظت شیرها با توجه به نمودارهای (۴-۲۶)، (۴-۲۷)، (۴-۲۸)، (۴-۲۹) و (۴-۳۰) به دست می‌آید که با توجه به نمودار غلظت و دما، خطا نسبت به مقدار مطلوب بسیار کم و قابل قبول می‌باشد و نمودارهای دبی و غلظت مقادیر ثابتی را برای تنظیم شیرهای ورودی نشان می‌دهند.



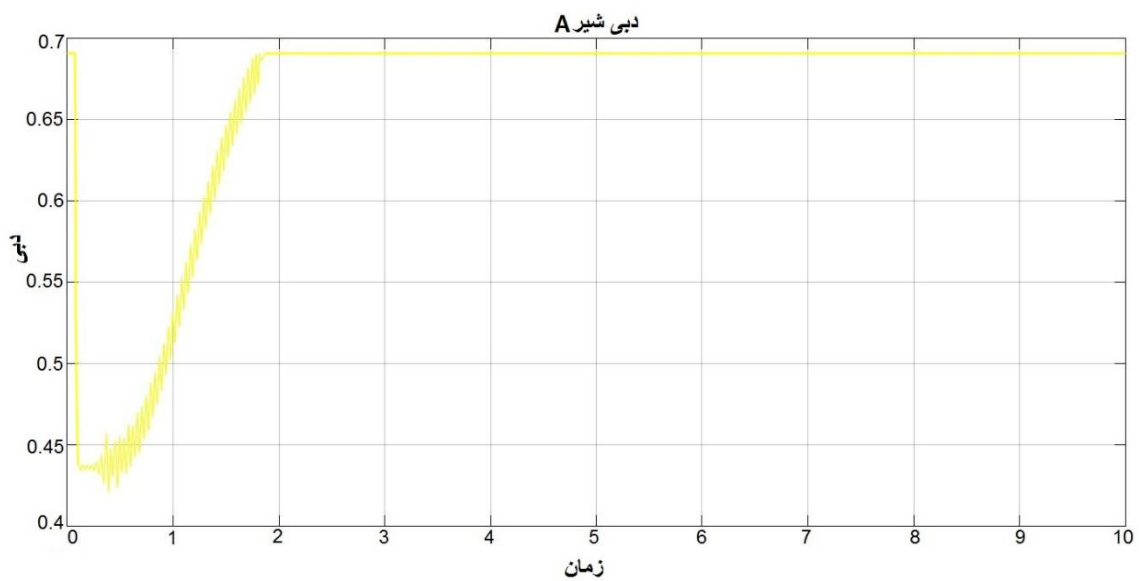
شکل ۴-۲۶: نمودار غلظت برای حالت بهینه



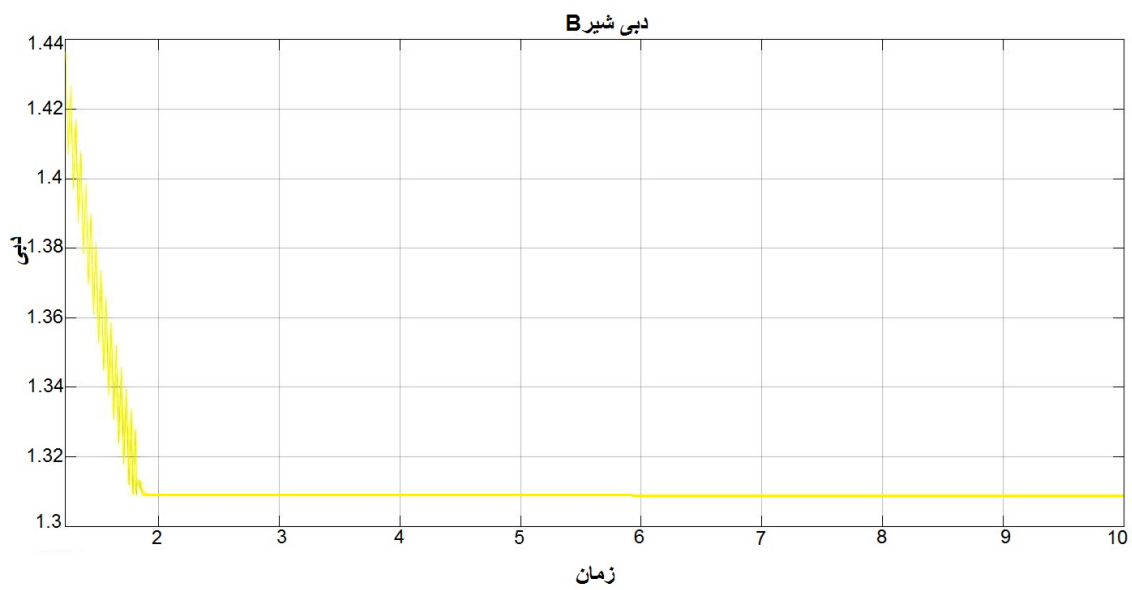
شکل ۴-۲۷: نمودار دما برای حالت بهینه



شکل ۴-۲۸: غلظت شیر A



شکل ۴-۲۹: دبی شیر A



شکل ۴-۳۰: دبی شیر B

۳-۴-۱. نتایج بهینه‌سازی به روش تاگوچی

فاکتورهای انتخابی جهت بهینه‌سازی به روش تاگوچی همراه با سطوح آن‌ها در جدول (۴-۷)

ذکر شده است.

جدول ۴-۷: فاکتورها و مقادیر آن‌ها در آزمایش انجام شده

پارامترهای فرایند	واحد	سمبل	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴	سطح ۵
γ_1	mol/L	A	۱۵۰۰	۳۰۰۰	۴۵۰۰	۶۰۰۰	۷۵۰۰
γ_2	C	B	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰

جدول (۴-۸) آرایه‌های متعامد L_{25} برای انجام آزمایش را نشان می‌دهد که شامل تعدادی از ترکیبات

آزمایشی است؛ که بعد از انتخاب آرایه‌های متعامد مناسب با توجه به تعداد فاکتورها و تعداد سطوح

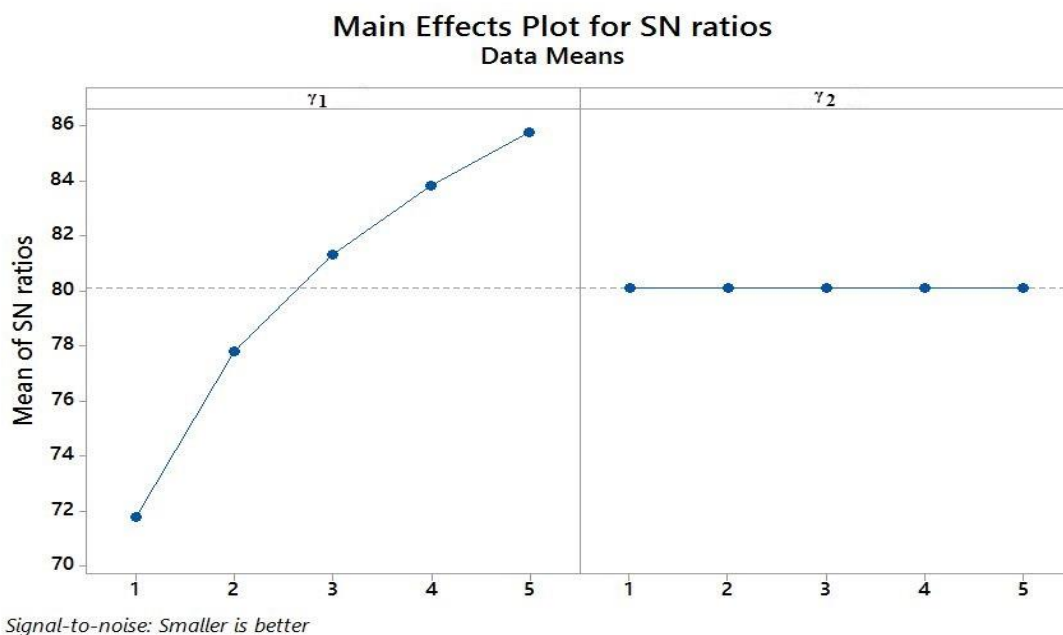
موردنظر می‌توان به طراحی آزمایش موردنظر پرداخت.

جدول ۴-۸: آرایه‌های مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها

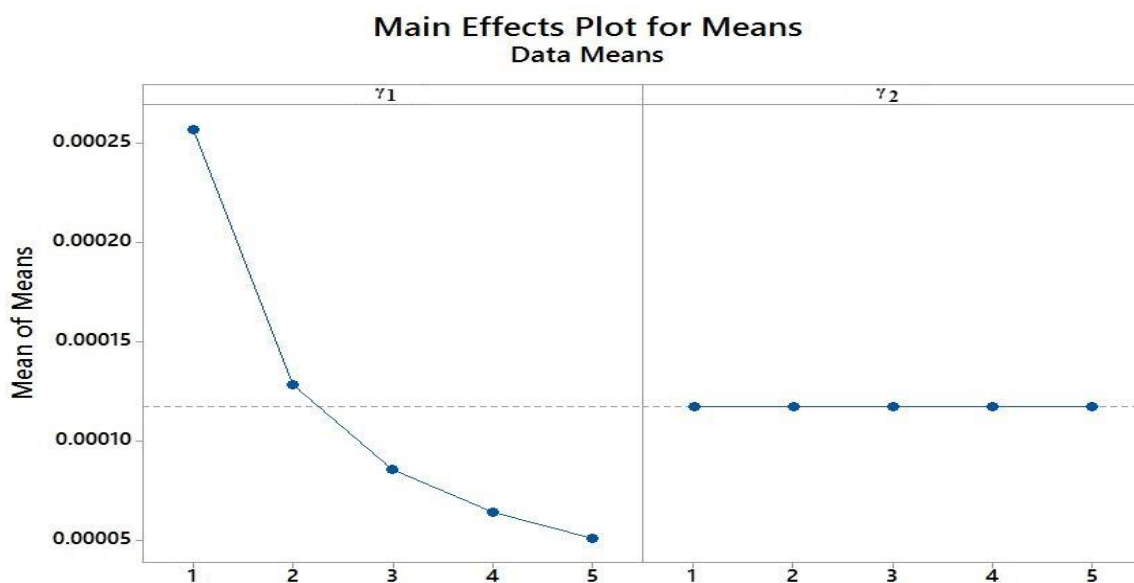
شماره آزمایش RUN	γ_1	γ_2	e_1 (غلظت)	e_2 (دما)	سیگنال به نویز (S/N)
۱	۱	۱	۰/۰۰۰۲۵۷	-۰/۲۶۱	۷۱/۷۹۴۵۸۰۷۱
۲	۱	۲	۰/۰۰۰۲۵۷	-۰/۲۴۵۳	۷۱/۷۹۷۹۵۸۴۷
۳	۱	۳	۰/۰۰۰۲۵۷	-۰/۲۳۱۵	۷۱/۸۰۱۳۳۷۵۳
۴	۱	۴	۰/۰۰۰۲۵۷	-۰/۲۱۹۱	۷۱/۸۱۴۸۶۶۹۶
۵	۱	۵	۰/۰۰۰۲۵۷	-۰/۲۰۸	۷۱/۸۰۸۰۹۹۶۱
۶	۲	۱	۰/۰۰۰۱۲۹	-۰/۲۶۱۱	۷۷/۸۰۸۴۲۹۰۶
۷	۲	۲	۰/۰۰۰۱۲۹	-۰/۲۴۵۴	۷۷/۸۱۵۱۸۰۶۳
۸	۲	۳	۰/۰۰۰۱۲۹	-۰/۲۳۱۵	۷۷/۸۱۵۱۸۰۶۳

۹	۲	۴	۰/۰۰۰۱۲۹	--/۲۱۹۲	۷۷/۸۱۵۱۸۰۶۳
۱۰	۲	۵	۰/۰۰۰۱۲۸	--/۲۰۸	۷۷/۸۲۸۶۹۹۵۳
۱۱	۳	۱	۸/۵۸E-۰۰۵	--/۲۶۱۱	۸۱/۳۲۹۲۴۱۹۶
۱۲	۳	۲	۰/۰۰۰۰۸۶	--/۲۴۵۴	۸۱/۳۱۰۰۳۰۹۸
۱۳	۳	۳	۸/۵۷E-۰۰۵	--/۲۳۱۶	۸۱/۳۳۷۳۴۳۵۳
۱۴	۳	۴	۸/۶E-۰۰۵	--/۲۱۹۲	۸۱/۳۱۳۰۶۱۴۷
۱۵	۳	۵	۸/۵۸E-۰۰۵	--/۲۰۸۱	۸۱/۳۲۶۲۰۵۸۲
۱۶	۴	۱	۶/۴۴E-۰۰۵	--/۲۶۱۱	۸۳/۸۲۷۶۷۹۲۹
۱۷	۴	۲	۶/۴۲E-۰۰۵	--/۲۴۵۵	۸۳/۸۴۷۹۴۶۶
۱۸	۴	۳	۶/۴۴E-۰۰۵	--/۲۳۱۶	۸۳/۸۲۴۹۸۰۵۵
۱۹	۴	۴	۶/۴۲E-۰۰۵	--/۲۱۹۲	۸۳/۸۵۴۷۱۲۸۹
۲۰	۴	۵	۶/۴۲E-۰۰۵	--/۲۰۸۱	۸۳/۸۴۹۲۹۹۴۴
۲۱	۵	۱	۵/۱۶E-۰۰۵	--/۲۶۱۱	۸۵/۷۴۵۳۲۲۸۲
۲۲	۵	۲	۵/۱۵E-۰۰۵	--/۲۴۵۵	۸۵/۷۶۰۴۸۲۹۱
۲۳	۵	۳	۵/۱۳E-۰۰۵	--/۲۳۱۶	۸۵/۷۶۵۹۵۹۷۱
۲۴	۵	۴	۵/۱۵E-۰۰۵	--/۲۱۹۲	۸۵.۷۶۳۸۵۵۴۲
۲۵	۵	۵	۵/۱۵E-۰۰۵	--/۲۰۸۱	۸۵.۷۷۰۶۰۴۳۶

در جدول (۴-۸) مقادیر e_1 و e_2 بعد از انجام طرح آزمایشی تاگوچی و اعمال بر کنترلر به دست آمده است. پس از انجام آزمایش و گرفتن خروجی از نرم افزار، مقادیر نسبت سیگنال به نویز و میانگین جوابها به دست آمد. همان طور که از جدول آرایه های متعامد و شکل (۴-۳۱) مشخص است جوابی برای ما قابل قبول است (بهینه است) که مقدار سیگنال به نویز آن از همه بی شتر باشد که آزمایش شماره ۲۵ بهینه ترین سطح (سطح ۵) را به ما پیشنهاد می دهد.



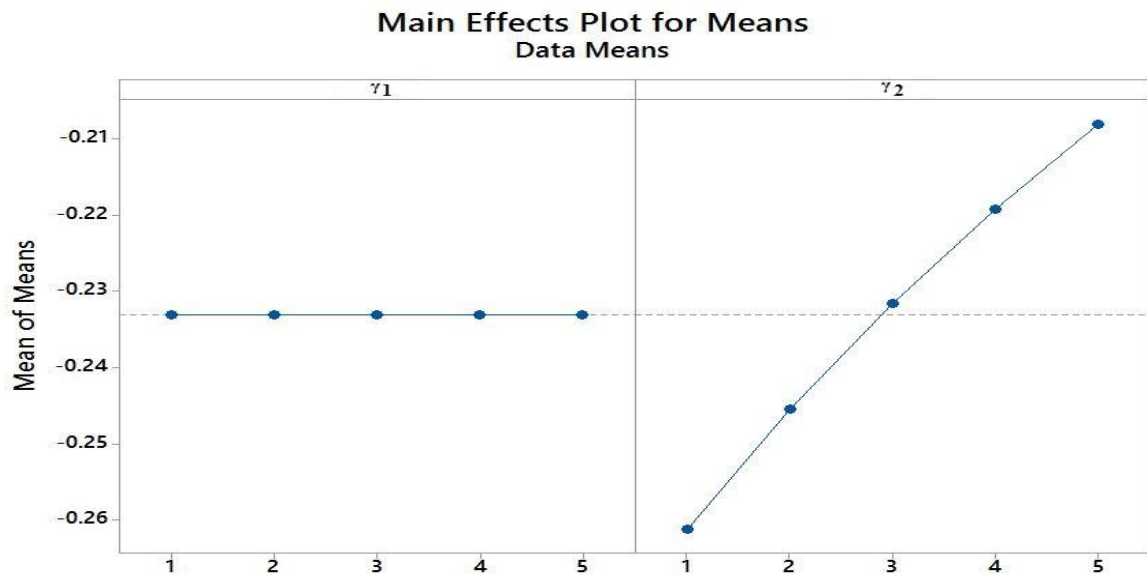
شکل ۴-۳۱: نمودار سیگنال به نویز برای خطای غلظت



شکل ۴-۳۲: نمودار میانگین جوابها برای خطای غلظت

شکل (۴-۳۲) نمودار میانگین جوابها را برای خطای غلظت نشان می‌دهد که عکس نمودار سیگنال به نویز می‌باشد و هرچه قدر مقدار آن کمتر باشد آن سطح بهینه‌تر است. همچنین شکل (۴-۳۳) نمودار میانگین برای خطای دما را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این نمودار مشخص است این نمودار نیز

بهینه‌ترین سطح را سطح ۵ معرفی کرده است.



شکل ۴-۳۳: نمودار میانگین جواب‌ها برای خطای دما

۴-۳-۲. انجام آزمایش تأییدی تاگوچی

آخرین مرحله از روش طراحی آزمایشات تاگوچی، انجام آزمایش تأییدی (جدول ۴-۹) است. هدف از آزمایش تأییدی اعتبار بخشیدن به نتایج و بحث‌های انجام‌شده در قسمت تجزیه و تحلیل می‌باشد. به این منظور معمولاً یک آزمون با استفاده از ترکیب حالت بهینه انجام می‌شود و سپس بازه اطمینان برای آن تعیین می‌گردد. اگر مقدار سیگنال به نویز نمونه آزمایش در داخل بازه اطمینان به دست آمده قرار گیرد می‌توان بر صحت تحلیل‌های انجام‌شده مطمئن بود. همچنین برای مقایسه مقادیر واقعی در مقابل مقادیر پیش‌بینی‌شده و سنجش کارایی مدل از ضریب تعیین R^2 استفاده‌شده که انطباق مقادیر واقعی را در مقابل نتایج پیش‌بینی‌شده را نشان می‌دهد که مقادیر به دست آمده برای این ضریب ۱۰۰٪ می‌باشد.

جدول ۴-۹: نتایج پیش‌بینی مدل تاگوچی

سطح	پیش‌بینی	آزمایش
	A Δ B Δ	A Δ B Δ
سیگنال به نویز	۸۵/۷۷۰۶۰۴۳۶	۸۵/۷۷۰۶۰۴۳۶
پاسخ	۵/۱۵E-۰۵	۵/۱۵E-۰۵
مقدار میانگین	-۰/۲۰۸۱	-۰/۲۰۸۱

فصل ۵

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱. نتیجه‌گیری:

در این پایان‌نامه به کنترل یک رکتور CSTR (کنترل غلظت و دمای مطلوب با سیمولینک متلب) در حضور نامعینی و بهینه‌سازی آن با روش RSM پرداختیم. برای کنترل یک رکتور CSTR راه‌های زیادی پیشنهاد شده است که اکثراً آن‌ها با Plc و SCADA می‌باشند. در این پایان‌نامه از کنترل مد لغزشی (به دلیل ماهیت غیرخطی رکتور) برای کنترل دما و غلظت رکتور استفاده شد و ضرایب همگرایی کنترلر مد لغزشی را برای به دست آوردن جواب‌های بهینه و کمترین خطای دما و غلظت و صرفه‌جویی در هزینه و وقت با استفاده روش RSM که یک روش آماری بسیار قوی است، با تخمین بسیار خوبی به دست آمد که باعث شد کنترلر ما کمترین خطای، غلظت و دما را داشته باشد. همچنین در مرحله دوم با استفاده از روش تاگوچی بهینه‌سازی مجدد صورت گرفت که خطای به دست آمده از آن در بازه تعیین شده کمتر از خطای روش RSM بود ولی با توجه به تعداد آزمایشات انجام شده در روش تاگوچی که تعداد آن بیشتر از روش RSM بود، به دلیل صرفه‌جویی در وقت و هزینه آزمایش که یکی از فاکتورهای مهم بهینه‌سازی است در نهایت از روش RSM استفاده گردید. این روش آماری نسبت به روش‌های دیگری بهینه‌سازی از دقت بالاتر، سرعت و هزینه کمتری برای آزمایش برخوردار است، برای مثال برای انجام این آزمایش به روش ژنتیک نیاز به حداقل چند هزار اجرا برای به دست آوردن پاسخ و صرف هزینه و زمان زیادی بود در صورتی که در این روش با انجام ۱۳ اجرا و چند سری تغییرات بازه آزمایش نتیجه مطلوب به دست آمد. از مزایای دیگر این روش گرفتن نمودارهای گرافیکی بسیار خوب از تغییرات متغیرهای مستقل نسبت به خروجی و به دست آوردن رابطه‌ای ریاضی بین متغیرهای مستقل و متغیرهای خروجی و گرفتن جدول آماری ANOVA است که متغیرهای مختلف با ضرایب آماری آن‌ها را نشان می‌دهد.

روش دیگری که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است استفاده از کنترلر PID برای کنترل غلظت و دمای رکتور و تخمین پارامترهای آن (k_p , k_i , k_d) با روش RSM می‌باشد. در مقایسه‌ای که میان استفاده از این کنترلر و کنترلر مد لغزشی و درصد رضایت‌مندی آن‌ها با استفاده روش RSM صورت

گرفته است درصد رضایت‌مندی استفاده از کنترلر مد لغزشی بسیار بهتر از استفاده از کنترلر PID برای رکتور CSTR می‌باشد؛ که با استفاده از کنترلر مد لغزشی و تخمین مناسب ضرایب همگرایی مد لغزشی می‌توان با دقت بالایی و خطای بسیار کمی مقدار دما و غلظت مطلوب خروجی را به دست آورد. در پایان برای کنترل دمای مخزن رکتور سیستم ایمنی طراحی شده که از تجاوز دمای داخلی رکتور به هر دلیل از حد مجاز جلوگیری شود.

مقایسه نتایج روش تاگوچی و RSM

مقایسه نتایج روش RSM و تاگوچی هر دو نشان‌دهنده این است که هرچقدر ضرایب کنترل‌کننده (γ_1, γ_2) در ابتدا از ۱۵۰۰ به ۶۰۰۰ و از ۶۰ به ۹۰ نزدیک‌تر شود خطای غلظت و دما کمتر شده و جواب بهینه‌تر می‌شود. ولی برای مقادیر بزرگتر از ۶۰۰۰ و ۹۰ هرچقدر که اعداد بزرگتری انتخاب شود، تاثیر آن بر روی بهینه‌سازی خطای خروجی بسیار کم، یا می‌توان گفت بی‌تاثیر می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که برای انجام آزمایش به روش تاگوچی به دلیل تعداد بیشتر آزمایشات پیشنهادی در این کار نیاز به وقت و هزینه بیشتری وجود دارد. در نتیجه اگر علاوه بر خطا، وقت و هزینه برای ما مهم باشد که یکی از فاکتورهای مهم بهینه‌سازی است، انتخاب روش RSM برای بهینه‌سازی مقرون‌به‌صرفه است و نتایج دقیق و قابل قبولی را می‌دهد. ولی اگر در انجام آزمایش وقت و هزینه فاکتور زیاد مهمی نباشد، روش تاگوچی روش دقیق‌تری برای انجام آزمایش می‌باشد. از نتایج مهم دیگر این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- استفاده از کنترلر PID برای کنترل دما و غلظت یک رکتور CSTR به دلیل ماهیت غیرخطی آن به تنهایی امکان‌پذیر نیست و در صورت استفاده از این روش، باید از روش‌های دیگری به همراه این روش برای کاهش خطا استفاده شود.
- برای استفاده از روش بهینه‌سازی RSM و نرم‌افزار Design Expert همیشه باید ابتدا از بازه‌های بزرگ ضرایب مستقل را بررسی کرد تا در مرحله بعد به بازه‌های کوچک‌تر و کوچک‌تر رفت. شاید نتوان با یک یا دو بار آزمایش به نتایج خوبی دست‌یافت، ولی اگر بازه آزمایش

به صورت تجربی درست تشخیص داده شود، با یکبار آزمایش می توان به نتایج درستی دست یافت.

- نکته قابل توجه این است که برای استفاده از روش RSM ابتدا طراحی آزمایش ها باید به وسیله این روش ها انجام گیرد تا بتوان تحلیل داده ها را نیز به همین روش ها و به کمک نرم افزار انجام داد.

- برای به دست آوردن جواب های دقیق تر از کنترلر مد لغزشی می توان تابع Saturation را نیز به وسیله روش RSM بهینه سازی کرد.

- برای کاهش پدیده اغتشاش یا چترینگ می توان از تابع Tangent به جای Saturation استفاده کرد.

۵-۲. پیشنهادها:

- برای کنترل پارامترهای دیگر رکتور نیز می توان از روش RSM استفاده کرد.
- پیشنهاد می شود در انجام آزمایشات از روش RSM و تاگوچی زمانی استفاده شود که تعداد متغیرهای مهم در ارتباط با خروجی و قابل بهینه سازی محدود باشد، زیرا با افزایش تعداد متغیرهای مستقل تعداد آزمایش ها و زمان انجام آزمایش افزایش می یابد.
- اگر هدف از انجام آزمایش غربالگری و بررسی پارامترهای مهم تاثیرگذار بر خروجی باشد روش تاگوچی روش بسیار دقیق و سریعی برای این کار می باشد.

مراجع:

- [۱] مورتیمر چارلز. (۱۳۸۳). شیمی عمومی. ج. دوم. ترجمه‌ی عیسی یوری. تهران: نشر علوم دانشگاهی، شابک ۵-۳۳-۶۱۸۶-۹۶۴.
- [۲] Perry Robert H. and Don W. Green. "4". In Perry's Chemical Engineers' Handbook. vol. 1. McGraw-Hill, 1984. ISBN 0-07-049479-7.
- [۳] لوز سپیل اوکتاو. (۱۳۸۴). طراحی راکتورهای شیمیایی. ترجمه‌ی مرتضی سهرابی. تهران: جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، شابک ۹-۰۲-۸۷۳۷-۹۶۴.
- [۴] Faulk J. Concise Encyclopedia of Chemistry. New York: McGraw-Hill, 2004. ISBN 0-07-143953-6.
- [۵] Stenstrom, Michael K. and Rosso D. "Fundamentals of Theory" (PDF). 2004. Retrieved 10 Jan 2013.
- [۶] هوپل ویلیام. (۱۳۸۳). واحدهای نیمه‌صنعتی و بزرگ‌سازی فرآیندهای شیمیایی. ترجمه‌ی محسن محسن نیا. تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، شابک ۸-۲۳۳-۴۶۳-۹۶۴.
- [۷] Ullmann F. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. vol. B4. New York: John Wiley & Sons, 2011. ISBN 978-3-527-30673-2.
- [۸] Coulson J. M and Richardson J. F. "10". In Coulson & Richardsons Chemical Engineering. vol. 3, Chemical and Biochemical Reactors & Process Control. Elsevier, 1994. ISBN 9780080410036
- [۹] Barton P.I , Lee C.K , Modeling, simulation, sensitivity analysis, and optimization of hybrid systems, ACM Trans. Model. Comput. Simul. 12 (4) (2002) 256–289.
- [۱۰] Barkhordari Yazdi M, Jahed-Motlagh MR, Stabilization of a CSTR with two arbitrarily switching modes using modal state feedback linearization, Chemical Engineering Journal 155 (2009) 838–843
- [۱۱] Ludwig Ernest E. Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants. vol. 2. Gulf Professional Publishing, 1984. ISBN 978-0884151012.

[۱۲] Fontana Mars G. Corrosion Engineering. New York: McGraw-Hill, 1986. ISBN 0-07-100360-6.

[۱۳] جعفری نصر م. (۱۳۸۹). «مدل سازی واکنش شکست کاتالیزی سیال بستر و بررسی پارامترهای فرآیند در تولید بنزین» (PDF) مجله مهندسی شیمی ایران (تهران: انجمن مهندسی شیمی ایران)، ش. ۵۲. ISSN ۱۷۳۵-۵۴۰۰

[۱۴] W. F. Furter, A Century of Chemical Engineering Plenum Press (New York). 1982

[۱۵] Pajootan E, Arami M, Mahmoodi NM. Binary system dye removal by electrocoagulation from synthetic and real colored wastewaters. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2012. 43(2):282-90.

[۱۶] Essadki A, Bennajah M, Gourich B, Vial C, Azzi M, Delmas H. Electrocoagulation/electroflotation in an external-loop airlift reactor—application to the decolorization of textile dye wastewater: A case study. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2008. 47(8):1211-23.

[۱۷] Du L-N, Yang Y-Y, Li G, Wang S, Jia X-M, Zhao Y-H. Optimization of heavy metal-containing dye Acid Black 172 decolorization by *Pseudomonas* sp. DY\ using statistical designs. International Biodeterioration & Biodegradation, 2010. 64(7):566-73.

[۱۸] Asilian H, RMoussavi G, Mahmoudi M. Adsorption of reactive red 198 azo dye from aqueous solution onto the waste coagulation sludge of the water treatment plants. Iranian Journal of Health and Environment, 2010. 3(1):93-102 (in Persian).

[۱۹] Dalvand A, Jonidi jafari A, Gholami M, Ameri A, Mahmoodi NM. Treatment of synthetic wastewater containing reactive red 198 by electrocoagulation process. Iranian Journal of Health and Environment, 2011. 4(1):11-22 (in Persian)

[۲۰] Daneshvar N, Khataee A, Amani Ghadim A, Rasoulifard M. Decolorization of CI Acid Yellow 23 solution by electrocoagulation process: Investigation of operational parameters and evaluation of specific electrical energy consumption (SEEC). Journal of Hazardous Materials, 2007. 148(3):566-72.

[۲۱] Eslami A, Massoudinejad MR, Ghanbari F, Moradi M. Study on treatability of real

textile wastewater by electrochemically generated fenton reagent using graphite felt cathode. Iranian Journal of Health and Environment, 2012. 5(3):273-82 (in Persian).

[۲۲] Zaroual Z, Azzi M, Saib N, Chaïnet E. Contribution to the study of electrocoagulation mechanism in basic textile effluent. Journal of Hazardous Materials, 2006.131(1):73-78.

[۲۳] Asadi Habib M, Alavi Moghaddam SMR, Arami M, Hashemi SH. Optimization of the electrocoagulation process for removal of Cr (VI) using taguchi method. Journal of Water & Wastewater, 2011. 22(4):2-8 (in Persian).

[۲۴] Korbahti BK, Rauf M. Response surface methodology (RSM) analysis of photoinduced decoloration of toludine blue. Chemical Engineering Journal, 2008.136(1):25-30.

[۲۵] Linares-Hernández I, Barrera-Díaz C, Roa-Morales G, Bilyeu B, Urena-Nunez F. Influence of the anodic material on electrocoagulation performance. Chemical Engineering Journal, 2009.148(1):97-105.

[۲۶] Rezaeifar J. Investigation parameters of pellets from cattle manure for extruder design. MSc Thesis. Aboureyhan College. University of Tehran, Tehran, Iran. (In Farsi), 2008.

[۲۷] Ghasemi Y, M. H. Kianmehr A. H. Mirzabe, and B. Abooali. The effect of rotational speed of the drum on physical properties of granulated compost fertilizer. Journal of Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2013. 49 (2): 743-755.

[۲۸] Hicks G. C., McCamy I. W., and Norton M. M. Studies of fertilizer granulation at TVA. In: Proceedings of the second International Symposium on Agglomeration, Atlanta, USA. 1977

[۲۹] Myers R. H., and D. C. Montgomery. Response Surface Methodology. John Wiley and Sons. New York, 1995.

[۳۰] Zafari A, Kianmehr M. H, and Hoseini A. A. M. Optimizing expenditure energy in compost fertilizer extrusion processing using response surface methodology. Iran Biosystem Engineering, 2013. 44 (1): 45-56. (In Farsi).

[۳۱] Heim A, Obraniak A, and Gluba T. Changes of feed bulk density during drum granulation of bentonite. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*.2005; 39: 219-228.

[۳۲] Chansataporn W, and Nopharatana M. Effects of binder content and drum filling degree on cassava pearl granulation using drum granulator. *Asian Journal of Food and Agro-Industry*.2009; 2 (4): 739748.

[۳۳] López M, Dorotea, María Dolores Navarro-Martínez, Francisco Rojas-Melgarejo, Alexander N.P. Soledad Chazarra H and Neptuno J. Molecular properties and prebiotic effect of inulin obtained from, 2005.

[۳۴] زرگری ع. (۱۳۷۲). گیاهان دارویی، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ پنجم، جلد سوم، صفحه

۸۹۰

[۳۵] Li J, wei d.D, Shao X.I.D. Optimization of the ultrasonically assisted extraction of polysaccharides from *Zizyphus jujuba* cv. *jinsixiaozao* *Journal of Food Engineering*, 2007. 80: 176–183

[۳۶] وکیلپان ح، وطن خواه ش. و آذرنگ، ه. (۱۳۸۹). بهینه سازی استخراج اینولین از غده‌ی

سیب زمینی ترشی به کمک روش سطح پاسخ، ۱۷۶ - جلد ۶، شماره ۳، ص. ۱۸۳

[۳۷] میلانی، حسین، ف، زائرزاده، ا، گلی محمود غ. و توکلی، ا. (۱۳۹۰). بهینه سازی شرایط استخراج اینولین از ریشه بابا آدم به کمک روش سطح پاسخ، سال یازدهم، دوره اول، ویژه نامه شماره هشت

[۳۸] کریمی ف، دهقان نیا ج. و قنبرزاده ب. (۱۳۹۱). بهینه سازی فرآیند خشک کردن لایه نازک موز

به روش سطح پاسخ، نشریه پژوهش های صنایع غذایی، جلد ۳۲، شماره ۴

[۳۹] ماهری ب، برزگر م، سحری م. و دهقانی و. (۱۳۸۳). بهینه سازی شرایط استخراج صمغ دانه

بزرک ایرانی به روش صفحه پاسخ. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال هشتم، شماره چهارم

[۴۰] توانایی م، شوشتری، ا، گوهرپی ف. و مقدم م. (۱۳۹۱). بهینه سازی و پیش بینی خواص مکانیکی

الیاف آمیخته ای پلی پروپیلن - پلی بوتیلن ترفتالات (PP/PBT) با استفاده از روش طراحی، مجله علوم

و فناوری نساجی، سال دوم، شماره ۲، شماره پیاپی ۳، صفحه ۱۰۴-۱۱۳

[۴۱] میرحسینی ع، حسن‌آبادی م، مطهری م. و عسگری ع. (۱۳۹۰). بهینه‌سازی تولید نفت در

چاه‌های هوشمند با روش طرح آزمایش، پژوهش نفت، سال بیست و دوم، شماره ۷۱، صفحه ۳۸-۵۷

[۴۲] علی‌جمالی ح، دیندارلو ک. و نیک‌پی ا. (۱۳۹۴). بهینه‌سازی تصفیه پساب آب‌صابون با استفاده

از کلرور فریک با به‌کارگیری روش سطح، مجله طب پیشگیری، سال دوم، شماره اول، ایران: ۲۰-۱۰

[۴۳] Ranjit k.R. Design of experiments using the taguchi approach. John Wiley & Sons

, 2001. INC. ISBN:0_471_36101_1.

[۴۴] Taguchi G, Chowadhury S. and Taguchi, S., "Robust Engineering". McGraw-Hill.

2000; Pp.1-200.

[۴۵] صادقی ع، باباخانی ا، مستجاب‌الدعوه ح. و زبرجد، س. (۱۳۹۱). بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند

متالورژی پودر جهت تولید آلیاژ حافظه‌دار نایتینول با استفاده از روش تاگوچی، ششمین همایش

مشترک انجمن مهندسين متالورژی

[۴۶] Bachmann H.P. Cheese analogues: a review. International Dairy Journal,

2001.11:505-515.

[۴۷] Al Mahfuz A, Tsukamoto C, Kudou S, et al. Changes of astringent sensation of soy

milk during tofu curd formation. Journal of Agricultural and Food Chemistry Volume:

52 Issue: 23 Pages, 2004. 7070-7074

[۴۸] Characteristics of Production-Scale tofu as affected by soymilk coagulation method:

Propeller blade size, Mixing time and coagulant concentration. Food Research

International.31(4),289-295.

[۴۹] Yasir S.B.M, Sutton K.H, Newberry M.P, et al. The impact of Maillard cross-

linking on soy proteins and tofu texture. Food Chemistry Volume:104 Issue: 4 Pages,

2007. 1502-1508

[۵۰] تقی زاده ت، زارع د، مرتضوی ع، محسنی ف، آذین، م. و حیدریان، م. (۱۳۸۶). استفاده از روش

آماري تاگوچی در بهینه سازی تولید توفو از نظر وزن و طعم، فصلنامه علوم و صنایع غذایی، دوره ۶،

شماره ۴

[۵۱] زندیه م. و اخوان ن. (۱۳۷۸). بهینه‌سازی کیفیت از طریق طراحی پارامتر به روش تاگوچی،

دومین کنفرانس ملی مهندسی صنایع

[۵۲] یوسفی خ، زبرجد م. و وحدتی خاکی ج. (۱۳۹۳). بهینه‌سازی شرایط آزمایش با روش آماری

تاگوچی برای ساخت نانو ذرات هیدروکسی آپاتیت به روش سل_ژل، مجله مواد نوین، جلد ۴، شماره ۳

[۵۳] Baris S, Tansel İc Y, Şimşek E.H “A TOPSISbased Taguchi optimization to determine optimal mixture proportions of the high strength selfcompacting concrete”, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems 125, 18-32, 2013.

[۵۴] Ayan E, Saatcioglu O, Turanli L “Parameter optimization on compressive strength of steel fiber reinforced high strength concrete”, Construction and Building Materials 25, 2837–2844, 2011.

[۵۵] Muthukumar M, Mohan D, Rajendran M “Optimization of mix proportions of mineral aggregates using Box Behnken design of experiments”, Cement & Concrete Composites 25, 751–758, 2003.

[۵۶] اسکندری ح، پاکزاد ا. و طیبی نژاد، م. (۱۳۹۳). مدلسازی طرح اختلاط بهینه بتن خودتراکم،

تحقیقات بتن ، سال ششم، شماره دوم

[۵۷] Radaev N, Estimate of the Number of Observations Required to Check the Adequacy of Dose-Effect Models, Atomic Energy, 1998. 85 (1), 60–65.

[۵۸] Walczac S and Cerpa N, Heuristic Principles for the Design of Artificial Neural Networks, Informational Software Technology, 1999. 41, 107-117.

[۵۹] مروتی شریف‌آبادی ع، حاتمی منش م، بنی فاطمه ع. و کشاورز، م. (۱۳۹۲). بهبود کارایی پیش‌بینی تقاضای برق با استفاده از طراحی آزمایشات تاگوچی، فصل‌نامه‌ی مطالعات اقتصاد انرژی، سال دهم، شماره‌ی ۴۱، تابستان ۱۳۹۳، صفحات ۱۷۵-۱۹۳

[۶۰] Ho H.F. Wong Y.K. and A.B. Rad, "Adaptive fuzzy sliding mode control with chattering elimination for nonlinear SISO systems," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 17, pp. 1199-1210, 2009.

[۶۱] Roopaei M. and Zolghadri Jahromi M. "Chattering-free fuzzy sliding mode control in MIMO uncertain systems," *Nonlinear Analysis*, vol. 71, pp. 4430-4437, 2009.

[۶۲] Kaynak O. Erbatur K. and Ertugrul M "The Fusion of Computationally Intelligent Methodologies and SlidingMode Control-A Survey," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 48, no. 11, pp. 4-17, 2001.

[۶۳] Lo J.C. and Kuo Y.H. "Decoupled Fuzzy Sliding-Mode Control," *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 426-435, 1998.

[۶۴] Moshksar E. Shabaninia F. Noroozi N. Fuzzy Sliding Mode Control Algorithm and Extended Kalman Filter for Nonlinear Chemical Reactors, *IEEE IRI 2010*, August 4-6, 2010, Las Vegas, Nevada, USA978-1-4244-8099-9/10/\$26.00 ©2010 IEEE

[۶۵] Bharathi M, DrSelvakumar C. Continuous Stirred Tank Reactor Based Blender Controlled Application using PLC, Issue 1, January 2013

[۶۶] Mohd A.M, Najeeb M.A, Mrs. Fabia A, Sidra A, PLC and SCADA Based Control of Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR), Vol. 3, Issue 12, December 2015

[۶۸] Kalaivani S. Jagadeeswari M. PLC & SCADA Based Effective Boiler Automation System for Thermal Power Plant, *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)*, Volume 4 Issue 4, April 2015

[۶۷] Boyer Stuart A. *SCADA Supervisory Control and Data Acquisition*, USA: ISA. p. 179. ISBN 978-1-936007-09-7.

- [٤٩] Mohd A. Najeeb M.A. Fabia, A. and Sidra, A. PLC and SCADA Based Control of Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR),2015. 10.17148/IJIREICE.2015.31238
- [٧٠] Aguilar-Lopez, R. and Alvarez-Ramirez J. Sliding-mode control scheme for a class of continuous chemical reactors. Vol.. 14Y. No 4. July 2002
- [٧١] Mihoub M , Said Nouri A. and Ben Abdennour R. A chattering free second order discrete sliding mode observer: an experimentation on a chemical reactor, 978-1-4244-8092-0/10/\$26.00 ©2010
- [٧٢] Jean Jacques Slotine ,Weiping Li, Applied Nonlinear Control, c1991.
- [٧٣] Isidori A. Nonlinear Control Systems, 3rd edition, Springer Verlag, London, 1995.
- [٧٤] Treybal R.E. Mass Transfer Operation, Printed in Singapore.1980 :800 pages.
- [٧٥] White F. M. Fluid mechanics. 7th ed. University of Rhode Island, 2009:862 Pages
- [٧٦] Skoog D. A. and West D. M. Fundamentals of Analytical Chemistry,1918. 7th ed:336 Pages
- [٧٧] Witek-Krowiak A, Chojnacka K, Podstawczyk D, Dawiec A, Pokomeda K. Application of response surface methodology and artificial neural network methods in modelling and optimization of biosorption process. Bioresource technology. 2014 May 31;160:150-60.
- [٧٨] Fu, Michael C. Handbook of simulation optimization. Vol. 216. New York: Springer, 2015.
- [٧٩] Karami H. R, Keyhani M, and Mowla D. "Experimental analysis of drag reduction in the pipelines with response surface methodology." Journal of Petroleum Science and Engineering 138.112-104,2016.
- [٨٠] Box George E.P, and Norman R. Draper. Response surfaces, mixtures, and ridge analyses. Vol. 649. John Wiley & Sons, 2007

[۱۸] Soltani M. and Soltani J. Determination of optimal combination of applied water and nitrogen for potato yield using response surface methodology (RSM). Journal of Bioscience Biotechnology Research Communication, 2016. 9(1): 46-54

Abstract:

Chemical reactors are places where chemical reactions take place. Chemical reactions are processors where during that time one or more materials change into the other materials. Among the important elements of reactor control are reaching suitable temperature, pressure, flow and density, since many of the reactions are taking place in similar suitable temperature, and pressure and in any other condition this reaction does not take place. Another important issue about reactor control is the matter of safety of instruments and workers, since increase in the uncontrolled temperature and pressure cause financial and life of the workers and instruments. In this thesis to control the study system of Sliding Mode controller is used to control temperature and pressure to reach the suitable temperature and pressure is planed and presented to the system. At the inlet of the reactor, there are two taps and a boiler, one of the taps is used for the main material and the other one is for subsidiary material. With the use of taps' controllers the entering material's density in to the reactor for creation of changes in reaction through boiler the temperature changes will take place to be able to create suitable outlet at any times necessary. Also due to difficulties such as Shake phenomena in Sliding Mode method improved methods are used for controlling stability and reduction in the Shake phenomena for studying this matter. The aim of this research is to remove Shake phenomena and compare the amount of optimized convergence of tagochi method to reduce RSM error in temperature and density in the CSTR reactor with two adjustable inlet taps where the result of the test Show efficiency of the Sliding Mode controller for controlling temperature and density according to RSM method with regard to minimizing errors in time and expenses.

Keywords: Reactor, CSTR, Temperature, Concentration, Phase



Shahrood University of Technology
Faculty of mechanic, mechatronic Engineering

MSc Thesis in Mechatronic

**Control for a Reactor in the Presence of an Unknown CSTR Based on
the Concentration and Temperature Input with Constant Flow rate
Reactor**

By: Samad askari

Supervisor:
Dr. Habib Ahmadi
Dr. Mahdi Bamdad

September 2016