

## شبیه‌سازی و بهینه‌سازی واحد جداسازی گوگرد پالایشگاه گاز ایلام به روش پاسخ سطح

اسما طاهری نیا، فرهاد شهرکی\*، میرمحمد خلیلی پور لنگرودی، محمدرضا سردشتی بیرجندی

گروه مهندسی شیمی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۵ دی ۱۳۹۷

دریافت پس از اصلاح: ۲۶ اردیبهشت ۱۳۹۸

پذیرش نهایی: ۱۷ شهریور ۱۳۹۸

### کلمات کلیدی:

واحد جداسازی گوگرد

بهینه‌سازی

روش کلاوس

روش پاسخ سطح

آنالیز واریانس

### چکیده

هدف از این پژوهش بهینه‌سازی واحد جداسازی گوگرد به منظور افزایش تولید گوگرد و کاهش همزمان تولید دی‌اکسید کربن، بر مبنای اطلاعات واحد جداسازی گوگرد پالایشگاه گاز ایلام است. متغیرهای ورودی واحد جداسازی گوگرد شامل: دبی جریان خوراک، دبی هوا، دمای کوره، فشار کوره، درجه حرارت راکتور کاتالیستی اول و فشار راکتور کاتالیستی اول می‌باشند. مدل ریاضی فرآیند با استفاده از روش پاسخ سطح به دست آمده است و دقت و صحت مدل با تحلیل واریانس بررسی گردید. در انتها شرایط عملیاتی فرآیند جداسازی گوگرد با روش بهینه‌سازی عددی انجام و ارائه گردید. نتایج نشان داد که مؤثرترین این پارامترها، دمای کوره، دبی هوا، و دبی خوراک می‌باشند. نقاط بهینه برای دمای کوره  $1039^{\circ}\text{C}$ ، نرخ دبی هوا  $\text{kmol/h}$   $469/33$  و نرخ دبی خوراک  $\text{kmol/h}$   $1110/38$  بدست آمد که این نقاط بهینه، باعث افزایش تولید گوگرد از  $30\%$  به  $89\%$  و کاهش تولید دی‌اکسید کربن از  $55\%$  به  $8\%$  شد.

حقوق ناشر محفوظ است.

\* عهده دار مکاتبات

fshahraki@eng.usb.ac.ir

## ۱- مقدمه

گازی که از منابع نفتی یا از صنایع نفت و گاز و پتروشیمی استخراج می‌شود، دارای مقادیر گوناگونی سولفید هیدروژن ( $H_2S$ ) و دی‌اکسید کربن ( $CO_2$ ) است و به این دلیل، اصطلاحاً گازترش نامیده می‌شود. اگرچه مقدار زیاد  $CO_2$  مطلوب نیست، اما  $H_2S$  با اهمیت‌ترین ناخالصی است که باید برای آن چاره‌ای اندیشید. گاز  $H_2S$  یک ماده بسیار سمی می‌باشد که باید از خوراک جدا شود. بنابراین تبدیل  $H_2S$  به گوگرد و بازیابی گوگرد موجود در گازترش یک فرآیند، بسیار مهم می‌باشد، چون یک ماده سمی و خورنده را به یک ماده قابل فروش تبدیل می‌کند. یکی از فرآیندهای موجود در صنایع پالایشگاهی، فرآیند بازیابی گوگرد از جریان گاز اسیدی می‌باشد. حداکثر میزان جداسازی گوگرد در واحدهای کلاوس موجود در ایران در حدود ۹۶ درصد است. در سطح دنیا تلاش‌های وسیعی جهت افزایش راندمان این فرآیند و کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری انجام شده است. علاوه بر این در کنار بازیابی گوگرد از جریان گاز اسیدی، گاز  $CO_2$  نیز به مقدار چشم‌گیری تولید می‌گردد [۱ و ۲]. جهت جلوگیری از اثرات منفی تغییرات آب و هوایی، قوانین بین‌المللی همچون پروتکل کیوتو (Kyoto accord) دولت‌ها را ملزم به کاهش ورود این گازها به اتمسفر می‌نماید [۳]. بطور کلی در فرآیندهای شیمیایی، بهینه‌سازی به منظور افزایش بهره‌وری و سود دهی از یکسو و کاهش مصرف انرژی و مواد اولیه و همچنین کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی از سوی دیگر، دارای جایگاه ویژه‌ای می‌باشند.

از سال‌های گذشته تاکنون تحقیقات گوناگونی در زمینه‌ی شبیه‌سازی و ساخت مدل‌های تجربی مختلف و بهینه‌سازی واحدهای جداسازی گوگرد ارائه شده است، که در آن تحقیقات، تعدادی از این روابط از طریق رگرسیون خطی و غیرخطی توصیف و ارائه شده است [۴]. مونیبری و همکاران [۵] مدل حرارتی و دیگ بخار گرمایی فرآیند کلاوس را بر اساس یک مدل تعادلی مدل‌سازی کردند. ماننتی و همکاران [۶ و ۷] کوره و دیگ جداسازی حرارت را بر اساس مجموعه‌ای از ۲۴۰۰ واکنش و سینتیک‌های آن‌ها مدل‌سازی کردند. آن‌ها شرایط فرآیند را برای رسیدن به حداکثر بازده گوگرد تولیدی، تبدیل گاز اسیدی و تولید بخار، بهینه‌سازی کردند. ناساتو و همکاران [۸] یک مدل ریاضی برای ارزیابی ویژگی‌های سینتکی و حرارتی

دیگ بخار در واحد بازیافت گوگرد ارائه دادند، نتایج نشان داد که تولید هیدروژن می‌تواند در دیگ بخار بیش از ۲۰٪ افزایش یابد. علاوه بر این تحقیقات یکی از روش‌های مدل‌سازی و بهینه‌سازی، روش پاسخ سطح می‌باشد، روش پاسخ سطح مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است که برای توسعه مدل فرآیند و بهینه‌سازی پاسخ‌هایی (متغیرهای خروجی) که توسط تعدادی متغیر ورودی تحت تأثیر است، استفاده می‌شود [۹ و ۱۰]. این روش توسط جورج باکس و ویلسون در سال ۱۹۵۱ میلادی برای اولین بار معرفی شد و با گذشت زمان گسترش و بهبود یافته است. در طی سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای به این روش توسط محققان شده است [۴]. گرویسل و همکاران [۱۱] به بررسی عددی گاز اسیدی و گاز سنتز و بررسی دقیق تولیدکننده گاز اسیدی با تمرکز بر تعیین شرایط بهینه برای تولید گوگرد پرداختند. کاظم پور [۱۲] مدل‌سازی بخش حرارتی فرآیند کلاوس از پالایشگاه پارس جنوبی را با استفاده از یک مدل سینتیکی و بهینه‌سازی با استفاده از چندتابع هدف توصیف کرد. که تأثیر پنج پارامتر روی سه تابع برای رسیدن به حداکثر جداسازی گوگرد با حداقل فشار توسط آنالیز حساسیت بررسی گردیده است. شکوه علایی [۱۳] مدل‌سازی سینتیکی راکتورهای کاتالیستی فرآیند کلاوس واحد بازیافت گوگرد پالایشگاه گاز ایلام را با استفاده از یک مدل سینتیکی که تانگ و همکارانش ارائه دادند برای واکنش هیدرولیز دو ترکیب  $CO_2$  و  $CS_2$  جهت برآورد تغییرات درصد تبدیل و غلظت محصولات در طول بستر انجام داد. شفیعی و همکاران [۱۴] شبیه‌سازی و بهینه‌سازی واحد گوگردزدایی پالایشگاه گاز ایلام را با اسپن‌هایسیس انجام دادند، پس از شبیه‌سازی واحد گوگردزدایی ابتدا به مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی در قسمت کوره واکنش با مقادیر واقعی پالایشگاه پرداختند پس از بررسی شبیه‌سازی فرآیند مشاهده شد هر چه که دمای گاز اسیدی ورودی به کوره بالاتر رود میزان گوگرد تولیدی هم افزایش می‌یابد اما از طرف دیگر، دمای کوره هم بالاتر می‌رود که به دنبال آن هزینه‌های مربوط به کنترل افزایش خواهد یافت.

با توجه به تحقیقات انجام شده، بهینه‌سازی فرآیند جداسازی گوگرد به طور موردی با استفاده از روش پاسخ سطح انجام نشده است. بنابراین در این پژوهش به شبیه‌سازی و بهینه‌سازی واحد جداسازی گوگرد پالایشگاه گاز ایلام در جهت مشخص کردن مدل مناسب و بهترین شرایط عملیاتی با

## Archive of SID

می‌تواند کمک کند. در این پژوهش به شبیه‌سازی پایا، واحد جداسازی گوگرد پالایشگاه گاز ایلام با نرم افزار Aspen® و در دو بخش حرارتی و کاتالیستی پرداخته می‌شود. که مشخصات عمومی خوراک ورودی در جدول (۱) آمده است برای شبیه‌سازی فرآیند توسط نرم‌افزار Aspen® لازم است ابتدا یک معادله ترمودینامیکی مناسب برای سیستم انتخاب شود، زیرا برای یافتن خواص انتقالی و ترمودینامیکی سیستم به یک معادله خواص نیاز است. با توجه به اینکه فرآیند گازی است و دارای ترکیبات مرکپتان می‌باشد و مرکپتانها ترکیباتی مشابه الکلها هستند (در آنها بجای اکسیژن، گوگرد با هیدروکربن وارد واکنش شده است مانند R-SH)، مناسب‌ترین معادله ترمودینامیکی در این پژوهش NRTL انتخاب شده است [۱۴].

جدول (۱) مشخصات عمومی خوراک

دما (°C)	فشار (bar)	دبی خوراک (kmol/h)
۵۰	۰/۶۸	۴۶۹

### ۴- بخش حرارتی

این بخش از یک مشعل و یک کوره تشکیل شده است که به ترتیب با استفاده از راکتورهای اختلاط کامل راکتور جریان قالبی شبیه‌سازی شده است، با توجه به وارد کردن سینتیک‌های مختلف از مراجع مختلف و بررسی کردن آنها، مناسب‌ترین سینتیک‌ها برای بخش حرارتی در جدول (۲) نشان داده شده است.

فرضیاتی که برای مدل سینتیکی کوره واکنش و مشعل در نظر گرفته شد به شرح ذیل است:

۱- گاز ایده آل است بدلیل اینکه فشار پایین و دما بالا می‌باشد.

۲- حالت پایا است.

۳- راکتور آداباتیک است و با توجه به شرایط عملیاتی کوره واکنش (فشار ۱/۱۷ bar و دمای ۱۰۳۸/۸۵ °C) جهت حفظ پوسته آن در مقابل حرارت و تشعشع زیاد، جداره داخلی کوره با مواد نسوز کاملاً عایقکاری شده است.

۴- به دلیل نوع جریان با آشفستگی پایین، از پراکندگی شعاعی صرف نظر شده است.

۵- به دلیل اینکه در معادله سرعت، غلظت، مولاریته، ضریب فعالیت بصورت توانی ظاهر می‌شوند از مدل Power

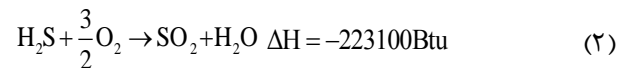
استفاده از روش پاسخ سطح برای حداکثر نمودن تولید گوگرد و حداقل نمودن تولید دی‌اکسید کربن پرداخته می‌شود.

### ۲- فرآیند جداسازی گوگرد

روش کلاوس اولین بار در سال ۱۸۸۳ توسط شیمیدان انگلیسی به نام کارل فریدریش کلاوس ( Carl Friedrich Claus) پایه‌گذاری گردید. واکنش اصلی کلاوس بر پایه اکسیداسیون سولفید هیدروژن با هوا (اکسیژن) در حضور کاتالیست (بوکسیت) در یک راکتور تک مرحله‌ای می‌باشد. محصولات این واکنش، گوگرد عنصری و آب است. فرآیند کلاوس به دلیل نقش کلیدی در تبدیل سولفید هیدروژن به گوگرد در این واحد از اهمیت زیادی برخوردار است، اکسید شدن  $H_2S$  موجود در گاز اسیدی به گوگرد و آب و سوختن هیدروکربن‌های موجود و به وجود آمدن محصولات بدون گوگرد مسیر شیمیایی فرآیند است. معادله (۱) واکنش کلی فرآیند را نشان می‌دهد که این واکنش در عمل هیچگاه اتفاق نمی‌افتد.



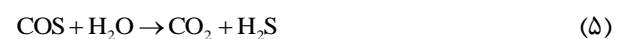
مقدار n در رابطه‌ی (۱) می‌تواند مقادیری بین ۲ تا ۸ را داشته باشند در واقع فرآیند با سوختن یک سوم جریان گاز اسیدی با مقدار هوای کافی و تولید  $H_2O$  و  $SO_2$  همراه می‌باشد که همان واکنش اصلی اکسیداسیون است و به صورت زیر می‌باشد.



دو سوم باقیمانده جریان گاز اسیدی، به طور مستقیم به داخل کوره تزریق شده و  $H_2S$  با  $SO_2$  موجود در کوره مطابق رابطه (۳) واکنش می‌دهد.



واکنش‌های (۴) و (۵)، واکنش‌های هیدرولیز در راکتورهای کاتالیستی واحد جداسازی گوگرد می‌باشند که به دلیل دمای پایین و غلظت پایین واکنشگرها تنها در راکتور اول اتفاق می‌افتند [۶].



### ۳- روش کار

شبیه‌سازی به عنوان ابزاری قدرتمند در پیش‌بینی عملکرد فرآیند و تفسیر دیاگرام فرآیند به منظور رفع عیوب آن

طول راکتورها = ۹۱۴۴ میلیمتر

قطر راکتورها = ۳۶۵۸ میلیمتر

مناسب‌ترین سینتیک‌های این بخش که برگرفته از مراجع مختلف می‌باشند در جدول (۳) آمده است. واکنش‌های هیدرولیز (واکنش دوم و سوم در جدول ۳) به علت سرعت بالا و وابستگی زیاد به دما فقط در راکتور اول رخ می‌دهند زیرا دما در راکتورهای دوم و سوم و همچنین غلظت واکنشگرها به اندازه‌های پایین است که دیگر واکنشی صورت نمی‌گیرد و برای این بخش از مدل LHHW استفاده می‌شود، مدل LHHW برای سیستم‌های واکنشی کاتالیستی ناهمگن با فاز گاز، گاز-جامد و مایع-مایع تعریف می‌شوند که شامل ۳ زیر مرحله است.

❖ جذب واکنش دهنده‌ها بر روی سطح فعال

❖ تبدیل واکنش دهنده‌ها در سطح کاتالیزور به

محصول

❖ جدا شدن محصول از سطح کاتالیست [۱۵].

و همچنین نتایج شبیه‌سازی جریان خروجی از راکتور کاتالیستی اول در جدول (۵) نمایش داده شده است.

Law برای بخش حرارتی استفاده شده است که شکل کلی مدل سینتیکی بصورت زیر است:

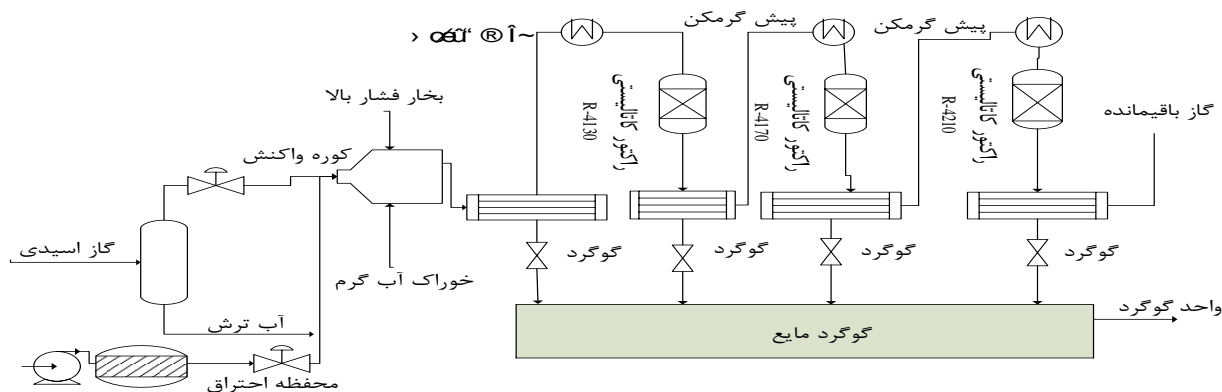
$$K = K_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^n \exp \left\{ \frac{-E}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right\} \quad (۶)$$

## ۵- بخش کاتالیستی

راکتورهای کاتالیستی این واحد نقش مهمی در افزایش درصد جداسازی گوگرد دارند. در مرحله بعد از کوره واکنش ضمن خنک‌سازی، گوگرد تولید شده، مایع شده و از سیستم خارج می‌شود. گازهای باقی‌مانده طی سه مرحله یکسان، ابتدا توسط یک پیش‌گرمکن گرم شده و سپس از راکتورهایی با بسترهای کاتالیستی جهت ادامه واکنش، عبور داده می‌شوند. استفاده از بستر کاتالیستی جهت تسریع در واکنش و بالا بردن درصد تبدیل  $H_2S$  به گوگرد می‌باشد. گوگرد تولید شده در هر راکتور پس از عبور از یک چگالنده به مایع تبدیل شده و از سیستم خارج می‌شود. نمایی از فرآیند جداسازی گوگرد پالایشگاه گاز ایلام در شکل (۱) نمایش داده شده است. طول و قطر راکتورهای کاتالیستی به ترتیب با نام‌های R-4130، R-4170، R-4210 عبارتند از.

جدول (۲) شبکه‌ای از واکنش‌ها و معادلات سینتیکی برای کوره حرارتی

واکنش	عبارت سرعت واکنش	مرجع
$H_2S + \frac{3}{2}O_2 \rightarrow SO_2 + H_2O$	$-r_{H_2S} \left[ \frac{Kmol}{m^3 sec} \right] = 14 \times 10^3 \exp \left[ \frac{-11 \frac{Kcal}{mole}}{RT} \right] \times P_{H_2S}^{-1} P_{O_2}^{1.5} (atm)$	[۱۶]
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	$-r_{CH_4} \left[ \frac{Kmol}{m^3 sec} \right] = 348 \exp \left[ \frac{-3.77 \frac{Kcal}{mole}}{RT} \right] \times C_{CH_4}^{0.62} C_{O_2}^{0.51}$	[۱۷]
$2H_2S + SO_2 \leftrightarrow \frac{3}{2}S_2 + 2H_2O$	$-r_{H_2S} \left[ \frac{mol}{cm^3 sec} \right] = 15762 \exp \left[ \frac{-49.9 \frac{Kcal}{mole}}{RT} \right] \times P_{H_2S}^{-1} P_{SO_2}^{-0.5} (atm) - 560 \exp \left[ \frac{-44.9 \frac{Kcal}{mole}}{RT} \right] \times P_{H_2O}^{-1} P_{S_2}^{-0.75} (atm)$	[۱۸]
$H_2S \leftrightarrow \frac{1}{2}S_2 + H_2$	$-r_{H_2S} \left[ \frac{mol}{cm^3 sec} \right] = 5260 \exp \left[ \frac{-45 \frac{Kcal}{mole}}{RT} \right] \times P_{H_2S}^{-1} (atm) - 14 \exp \left[ \frac{-23.4 \frac{Kcal}{mole}}{RT} \right] \times P_{H_2}^{-1} P_{S_2}^{-1} (atm)$	[۱۸]
$CO + \frac{1}{2}S_2 \leftrightarrow COS$	$-r_{CO} \left[ \frac{Kmol}{m^3 sec} \right] = 3.18 \times 10^{+5} \exp \left[ \frac{-55703.8 \frac{j}{mole}}{RT} \right] \times C_{CO}^{-1} C_{S_2}^{-1} - 4.36 \times 10^{+9} \exp \left[ \frac{-179830 \frac{j}{mole}}{RT} \right] \times C_{COS}^{-1}$	[۱۸]
$CH_4 + S_2 \rightarrow CS_2 + 2H_2$	$-r_{CH_4} \left[ \frac{Kmol}{m^3 sec} \right] = 5.53 \times 10^{+10} \exp \left[ \frac{-160 \frac{j}{mole}}{RT} \right] \times C_{CH_4}^{-1} C_{S_2}^{-1}$	[۱۹]



شکل (۱) دیاگرام ساده از فرآیند جداسازی گوگرد پالایشگاه گاز ایلام

نسبت به کاتالیست‌های دیگر می‌باشد. مشخصات فیزیکی کاتالیست در جدول (۴) آمده است.

جدول (۴) مشخصات فیزیکی کاتالیست [۲۱]

دانسیتته حجمی	۷۹۵ کیلوگرم بر مترمکعب	قطر متوسط ذره ( $d_p$ )	۱۹۵ میکرومتر
دانسیتته حقیقی	۳۱۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب	دانسیتته ذره ( $\rho_p$ )	۱۸۴۳ کیلوگرم بر مترمکعب

فرضیاتی که برای مدل سینتیکی راکتورهای کاتالیستی در نظر گرفته شد به شرح ذیل است:

- ۱- در حالت ناهمگن است
  - ۲- رفتار گاز به صورت ایده‌آل است
  - ۳- انجام عملیات در حالت پایدار است
  - ۴- به دلیل اینکه سیستم واکنشی کاتالیست ناهمگن است از مدل LHHW برای بخش کاتالیستی استفاده شده است.
- متداول‌ترین کاتالیست در واحدهای جداسازی گوگرد، کاتالیست کروی آلومینا ( $Al_2O_3$ ) می‌باشد. علت استفاده از کاتالیست آلومینا سطح تماس بالا و توزیع تخلخل مناسب آن

جدول (۳) واکنش‌ها و پارامترهای سینتیکی برای راکتورهای کاتالیستی [۲۰]

واکنش	$k_{0j}, \frac{\text{kmol}}{\text{kg.h.}(\text{kpa}^{1.5})}$	$E_j, \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$	$K_{0j}, \frac{1}{\text{Kpa}}$	$\Delta H_{H_2O}, \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$	$K_E \cdot \frac{1}{\text{Kpa}}^{0.5}$
$2H_2S + SO_2 \rightarrow 2H_2O + \frac{1}{6}S_2$	۶/۹۱	۳۰/۷۷	۰/۳۳۸	-	$9.502 \times 10^{-7} \exp\left(1.11 \times \frac{10^4}{T}\right)$
$CS_2 + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 2H_2S$	۱۹/۷۵	۴۰/۴۱	۳/۴۳	۹۸/۱۰	-
$COS + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2S$	۲/۳۰	۲۵/۲۷	۱/۲۵	۸۳/۲۲	-

## ۶- روش پاسخ سطح

پارامتر را می‌توان در این روش محاسبه کرد [۲۴، ۲۳، ۲۲]. توصیف کامل یک فرآیند نیازمند مدل کردن آن به صورت تابع چند جمله‌ای عموماً درجه ۲ یا بالاتر است. مدل درجه ۲ برای فرآیندهای صنعتی مناسب است و دارای نقاط قوت زیر می‌باشد:

روش پاسخ سطح مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است که برای تجزیه و تحلیل نتایج تجربی کاربرد دارد و یکی از مهمترین روش‌هایی است که در آن تداخل بین پارامترهای مختلف می‌تواند به طور همزمان ارزیابی شود. در روش پاسخ سطح این امکان وجود دارد که داده‌های زیادی با تعداد آزمایشات کمتری بدست آیند. علاوه بر این مقدار بهینه از هر

در این معادلات  $p$  تعداد عامل‌های مدل و  $n$  تعداد آزمایش‌ها می‌باشند. از لحاظ آماری، مدلی مناسب است که دارای بیشترین مقدار ضریب همبستگی باشد البته باید توجه داشت که این شرط لازم است ولی به تنهایی جهت تشخیص دقت مدل کافی نیست [۲۹، ۲۸، ۲۷].

یکی از قابلیت‌های روش پاسخ سطح، بهینه‌سازی چند هدفه است، بهینه‌سازی چند هدفه جهت بهینه‌سازی مسائلی به کار می‌رود که بیش از یک تابع هدف به طور همزمان بهینه می‌شوند. بهینه‌سازی چند هدفه در بسیاری از زمینه‌ها از جمله مهندسی و اقتصاد جهت برقراری توازن بین بهینه‌کردن دو هدف که معمولاً مخالف هم هستند استفاده می‌شود. بهینه‌سازی انجام بهترین انتخاب از مجموعه‌ای از انتخاب‌های ممکن است. بنابراین بهینه‌سازی چند هدفه یعنی یافتن مجموعه نقاطی که بالاترین سطح سازش را بین توابع هدف متضاد نشان می‌دهد. این مجموعه نقاط، مرزهای Pareto گفته می‌شود. در الگوریتم‌های عددی با در نظر گرفتن ترکیبات ممکن در مجموعه پارامترها، بهینه‌سازی تا حد زیادی پیچیده می‌شود. وجود سیستم‌های مهندسی پیچیده باعث شده بهینه‌سازی چند هدفه نقش اساسی در مهندسی امروز داشته باشد. استفاده از رویکرد بهینه‌سازی چند متغیره برای بهینه‌سازی این امکان را فراهم کرده تا مسائلی را که در دنیای واقعی با آن‌ها مواجه هستیم و معمولاً از پارامترها و الگوهای متفاوتی نشأت می‌گیرند قابل حل باشند. با بهینه‌سازی چند هدفه واژه‌ی راه حل بهینه مفهوم وسیع‌تری پیدا می‌کند چرا که به مجموعه‌ای از توابع هدف اشاره می‌کند که ممکن است در برخی از موارد متضاد هم باشند. به طور خلاصه بهینه‌سازی چند هدفه تلاش می‌کند راه حل میانی برای مسئله پیدا کند. نه اینکه صرفاً یکی از پارامترها را بهینه کند [۳۰].

## ۷- بحث و نتایج

نتایج شبیه‌سازی جریان خروجی از کوره واکنش در جدول (۵) آورده شده است. و همچنین اطلاعات شرایط عملیاتی واحد جداسازی گوگرد پالایشگاه گاز ایلام و همچنین متغیرها و محدوده‌ی تغییرات متغیرها در جدول (۶) ارائه شده است. پس از تحلیل و بررسی‌های انجام شده بر روی داده‌های این واحد مدل ریاضی پاسخ برای میزان تولید گوگرد با رگرسیون درجه ۲ تعیین گردید. نتایج تحلیل واریانس مدل درجه دوم محصول گوگرد تولیدی در جدول (۷) ارائه شده است. ضریب همبستگی ( $R^2_{adj}$ ) برای مدل گوگرد تولیدی، ۹۴/۶۳٪ و مقدار  $F$  برابر ۲۱۲/۳۲ گزارش گردید که نشان

۱- مدل درجه دوم بسیار منعطف است و معمولاً عملکردی مناسب در تقریب صحیح از پاسخ دارد.

۲- آزمایش‌ها و تجربیات قابل توجهی عملکرد مناسب مدل درجه دوم را برای توصیف رفتار پاسخ مناسب بیان می‌کنند [۲۵]. با توجه به مزیت‌های مدل درجه دوم و همچنین عملیاتی بودن اطلاعات، بنابراین از این مدل برای بررسی تأثیر متغیرهای ورودی بر متغیرهای خروجی در فرآیند جداسازی گوگرد استفاده می‌شود. در واقع از آنجایی که شرایط عملیاتی ممکن است با تغییرات غیراصولی همراه باشد مدل درجه دوم غیرخطی قابلیت توصیف آن را دارد. مدل چندجمله‌ای درجه دو را می‌توان به شکل رابطه (۷) بیان کرد.

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j X_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} X_j^2 + \sum_{i < j=2}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon_i \quad (7)$$

در معادله (۷)،  $y$  پاسخ،  $X_j$  و  $X_i$  متغیرهای مستقل،  $\beta_0$  عدد ثابت،  $\beta_j$  و  $\beta_{ij}$  به ترتیب ضرایب جملات خطی، درجه دو و برهم کنش هستند،  $\varepsilon_i$  هم به عنوان خطا در نظر گرفته می‌شود [۲۶]. آنالیز واریانس یک روش آماری کارآمد برای بررسی میانگین در گروه‌ها و توابع وابسته به آن‌ها (مثل واریانس در یک گروه یا بین چند گروه) می‌پردازد. ضریب تعیین یک شاخص آماری است که وجود یا عدم وجود، شدت و جهت رابطه بین دو متغیر را بیان می‌کند و بنابراین یکی از آزمون‌های مورد استفاده در تجزیه و تحلیل واریانس برای شناسایی مدل برتر است. ضریب همبستگی  $R^2$  نشان می‌دهد که چند درصد تغییرات متغیر وابسته به وسیله‌ی متغیر مستقل تعیین می‌شود که این ضریب در رگرسیون کاربرد زیادی دارد، اما  $R^2$  معیار مناسبی برای تعیین میزان تأثیر متغیر مستقل بر متغیر وابسته نیست چون با افزایش مشاهدات و همچنین با افزایش متغیرهای مستقل میزان  $R^2$  افزایش می‌یابد که این افزایش ممکن است کاذب باشد، بنابراین برای رفع این مشکل به  $R^2_{adj}$  که همان ضریب همبستگی اصلاح شده است نیاز داریم که میزان همبستگی را با توجه به متغیرهای مستقل اضافه شده به خط رگرسیون و با توجه به عرض از مبدأهای جدید اصلاح می‌کند. محققان برای سنجش دقت مدل خود از  $R^2_{adj}$  استفاده می‌کنند ضریب همبستگی ( $R^2$ ) همواره با افزایش عامل‌ها به مدل افزایش نمی‌یابد. در واقع اگر عامل‌های غیرضروری به مدل افزوده شود کاهش می‌یابد. محاسبه ضرایب همبستگی با معادله‌های (۸) و (۹) بیان می‌گردد.

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (8)$$

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{n-1}{n-p} (1 - R^2) \quad (9)$$

Archive of SID

تولید گوگرد معنادار بوده و پاسخ‌های پیش بینی شده با اطلاعات واقعی سازگاری دارند. با توجه به جدول (۷) جمله-های خطی  $(X_1)$  و  $(X_2)$  و  $(X_3)$ ، جمله‌های درجه دوم  $(X_1^2)$  و جمله‌های برهم کنش  $(X_1X_3)$  و  $(X_2X_3)$  برای مدل پیشنهاد شده گوگرد تولیدی با اهمیت هستند زیرا مقدار  $p$  آن‌ها کوچکتر از ۰/۰۵ می‌باشد. طبق معادله (۱۰) (معادله بدست آمده از مدل) مقدار گوگرد تولیدی با مقدار خوراک ورودی رابطه مستقیم دارد. طبق معادله (۱۰)، متغیر  $(X_1)$  دارای بیشترین ضریب می‌باشد و در نتیجه بیشترین تأثیر را دارد.

دهنده معنادار بودن مدل رگرسیون می‌باشد. علاوه بر ضریب همبستگی و مقدار  $F$ ، مقدار  $p$  کوچکتر از ۰/۰۵ نیز در مدل رگرسیون از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد علاوه بر موارد فوق، مبنی بر معتبر بودن مدل پیشنهادی، نمودار احتمال نرمال-خطای پاسخ‌ها برای مدل گوگرد تولیدی در شکل (۲) نمایش داده شده است. این نمودار نشان دهنده نحوه پراکنده شدن خطاها می‌باشد. خطاها در واقع اختلاف بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش بینی شده پاسخ توسط مدل می‌باشند. توزیع مناسب و نرمال نقاط اطراف خط راست نشان دهنده توزیع مناسب خطاها هستند با توجه به شکل (۲) و از آنجایی که خطاها به صورت نرمال پراکنده شده‌اند، مدل ارائه شده برای

جدول (۵) نتایج شبیه‌سازی جریان خروجی از کوره واکنش و راکتور کاتالیستی اول

نتایج شبیه‌سازی جریان خروجی از راکتور کاتالیستی اول (R-4130)			نتایج شبیه‌سازی جریان خروجی از کوره واکنش			اطلاعات جریان
درصد خطا	نتایج شبیه‌سازی	داده‌های فرآیند	درصد خطا	نتایج شبیه‌سازی	داده‌های فرآیند	
-	۳۱۶/۹	۳۱۶/۹	-	۳۱۵	۳۱۵	دما (°C)
-	۰/۰۶	۰/۰۶	-	۰/۱۳	۰/۱۳	فشار (barg)
-	۹۲۵/۷۶	۹۲۵/۷۶	-	۹۱۰/۳۹	۹۱۰/۳۹	دبی (kmol/h)
-	-	-	-	-	-	درصد مولی ترکیبات
۱/۴۱	۱/۴۴۶	۱/۴۶	۰/۷	۱/۴۴	۱/۴۵	H <sub>2</sub>
۰/۱۶	۰/۰۰۱۶	۰	۰/۱۰	۰/۰۰۱	۰	O <sub>2</sub>
۳/۰۴	۰/۸۹	۰/۹۳	۲/۸۲	۰/۸۲	۰/۸۶	CO
۰/۱۵	۰	۰/۰۰۲۲	۰/۶۹	۰/۲۴۹	۰/۲۵۸۸	COS
۱/۷۴	۱/۸	۱/۷۶۸۶	۵/۱۱	۴/۵	۴/۲۷۸۶	SO <sub>2</sub>
۰	۰	۰	۰/۲۸	۰/۰۴۶	۰/۰۵۰۱	CS <sub>2</sub>
۰	۰	۰	۰	۰	۰	NH <sub>3</sub>
۰	۰	۰	۰	۰	۰	HCN
۳/۴۵	۴۲/۸۵۹۲	۴۴/۳۴	۰/۲۸	۴۱/۹۳	۴۱/۸۱	N <sub>2</sub>
۹/۴۲	۲۲/۲۸	۲۴/۵۷	۵/۹۱	۱۸/۳۴۵۵	۱۹/۴۳	H <sub>2</sub> O
۴/۹۵	۱/۱۶	۱/۲۳۶۳	۸/۱۰	۵/۴۴۰۷	۵/۸۸۱۷	H <sub>2</sub> S
۷/۶۱	۲۲/۸۴۵۴	۲۴/۵۸۵۳	۹/۹	۲۱/۸۹۲۴	۲۴/۳۰۶۹	CO <sub>2</sub>
۲/۶	۰/۰۲۶	۰	۲/۹	۰/۰۲۹	۰	CH <sub>4</sub>
۰/۷	۰/۰۰۷	۰	۰/۹	۰/۰۰۹	۰	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
۲/۸	۰/۰۲۸	۰	۲/۸	۰/۰۲۸	۰	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
۲/۵۹	۰/۵۴۴۴۳۴	۰/۵۴	۴/۱۶	۰/۷۲	۰/۶۹	S
۱/۴۱	۰/۳۳۲۲	۰/۳۵	۴/۶۸	۰/۰۰۶۱۹	۰/۰۰۵۹	S <sub>2</sub>
۰/۷	۰/۳۹۳۰	۰/۴۰	۰	۰	۰	S <sub>6</sub>
۰/۲۶	۰/۲۵۹۲	۰/۰۵	۸/۶۹	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۲۵	S <sub>8</sub>
۰/۱۱	۰/۱۰۸۴	۰/۱۱	۱/۰۴۱	۰/۰۹۶	۰/۰۹۵	S <sub>3</sub>
۰/۰۰۷	۰/۰۴۲۹	۰/۰۴۳	۳/۴۴	۰/۰۲۹	۰/۰۲۸	S <sub>4</sub>
۰/۰۷	۰/۰۱۷	۰/۰۱۸	۲/۱۷	۰/۰۰۹۲	۰/۰۰۹	S <sub>5</sub>
۰	۰	۰	۰	۰	۰	S <sub>7</sub>

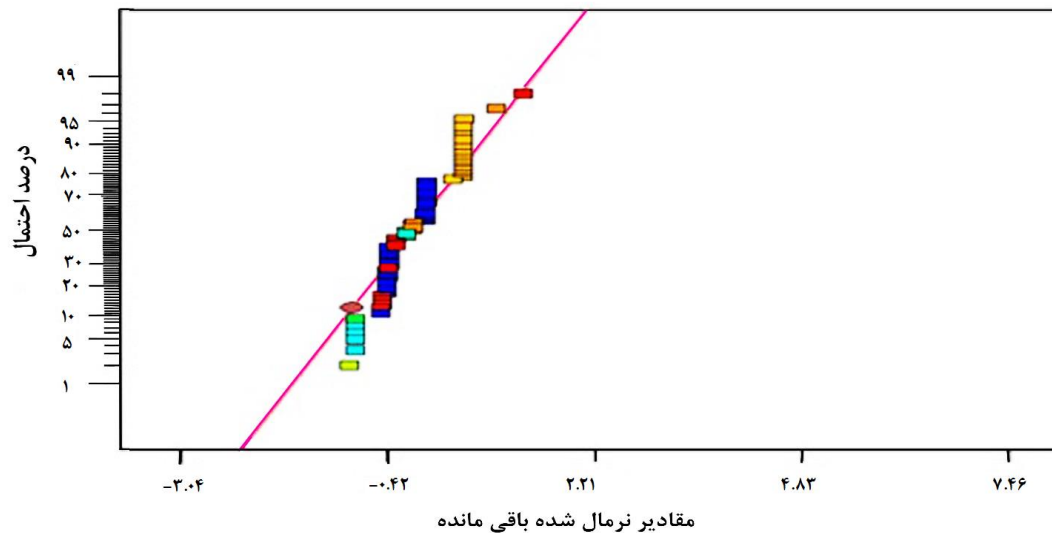
جدول (۶) محدوده‌ی تغییرات متغیرها

فاکتورها	توصیف	مقادیر تجربی محدوده
X <sub>1</sub>	دبی هوا	۴۸۸ Kmol/h < دبی هوا < ۲۴۰۰ kmol/h
X <sub>2</sub>	دبی خوراک ورودی	۴۶۹ kmol/h < دبی خوراک < ۹۴۱ kmol/h
X <sub>3</sub>	دمای کوره	۵۰ °C < دمای خوراک
X <sub>4</sub>	فشار کوره	۰/۶۸ barg < فشار کوره < ۰/۱۳ barg
X <sub>5</sub>	دمای راکتور کاتالیستی اول	۳۱۶ °C < دمای راکتور کاتالیستی اول < ۱۶۰ °C
X <sub>6</sub>	فشار راکتور کاتالیستی اول	۰/۰۹ barg < فشار راکتور کاتالیستی اول < ۰/۰۶ barg

$$S = -23.05153 + 0.053625X_1 - 3.88484E^{-003}X_2 + 0.019464X_3 - 1.74642E^{-005}X_1 \times X_3 + 8.23580E^{-005}X_2 \times X_3 - 1.78197E^{-005}X_1^2 \quad (10)$$

جدول (۷) تحلیل واریانس برای مدل گوگرد

منبع	توصیف	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
مدل	-	۳۷۲۹۷/۲۳	۶	۶۲۱۶/۲۱	۲۱۲/۳۲	۰/۰۰۰۱ <
X <sub>1</sub>	دبی هوا	۲۰۳۱/۳۲	۱	۲۰۳۱/۳۲	۶۹/۳۸	۰/۰۰۰۱ <
X <sub>2</sub>	دبی خوراک	۴۳۹۴/۹۵	۱	۴۳۹۴/۹۵	۱۵۰/۱۱	۰/۰۰۰۱ <
X <sub>3</sub>	دمای کوره	۲۶۹۰/۴۰	۱	۲۶۹۰/۴۰	۹۱۸/۸۰	۰/۰۰۰۱ <
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	دمای کوره × دبی خوراک	۲۵۲۸/۷۸	۱	۲۵۲۸/۷۸	۸۶/۳۷	۰/۲۹۵۸ <
X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	دمای کوره × دبی هوا	۳۹۴۰/۴۲	۱	۳۹۴۰/۴۲	۱۳۴/۵۹	۰/۰۰۰۱ <
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	(دبی هوا) <sup>۲</sup>	۵۰۳۱/۲۱	۱	۵۰۳۱/۲۱	۱۷۱/۸۴	۰/۰۰۰۱ <
R <sup>2</sup> (Pred)	R <sup>2</sup> (adj)	R <sup>2</sup>				
% ۹۲/۶۹	% ۹۴/۶۳	% ۹۵/۰۷				



شکل (۲) نمودار احتمال نرمال خطای پاسخ گوگرد

بالای F و کم بودن p، به خوبی منعکس کننده دقت پاسخ است. در این مدل پیشنهادی، برای میزان تولید دی‌اکسید کربن (معادله ۱۱ که معادله بدست آمده از مدل است) ضرایب متغیرهای (X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub>) و (X<sub>3</sub>, X<sub>4</sub>)، با توجه به بالا بودن مقدار ضرایب آن‌ها بیشتر بر روی مدل اثر

نتایج تحلیل واریانس مدل درجه دوم محصول دی-اکسید کربن تولیدی در جدول (۸) ارائه شده است. برای دی‌اکسید کربن به ترتیب مقدار ضریب همبستگی (R<sup>2</sup>adj) و F برابر با ۹۴/۰۹٪ و ۱۶۴/۸۶ و p کوچکتر از ۰/۰۵ گزارش شده است که توجه به ضریب همبستگی و مقدار



Archive of SID

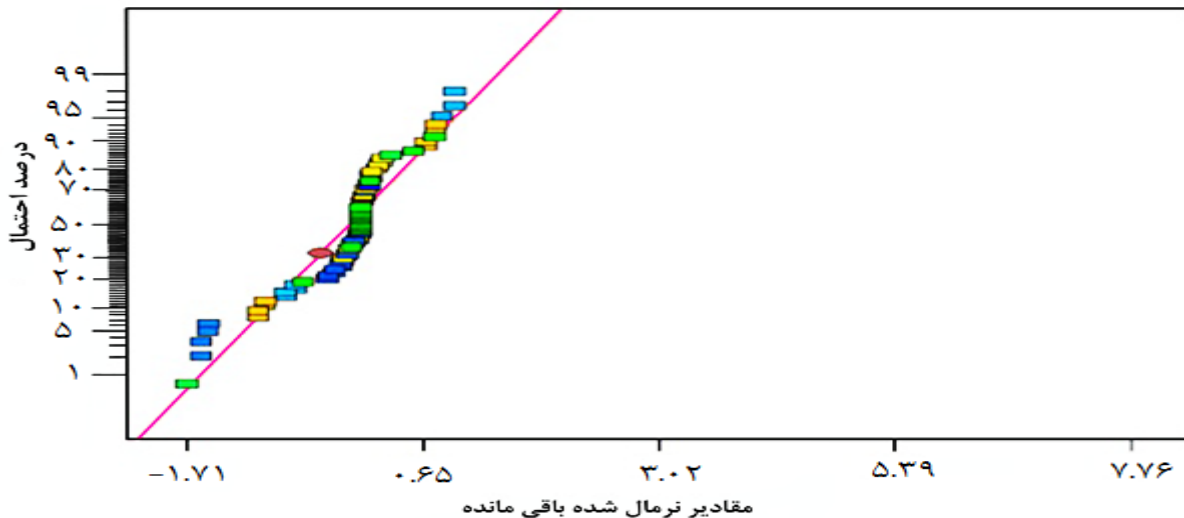
و فشار کوره ( $X_4$ ) تاثیر منفی بر تولید دی‌اکسید کربن دارند. شکل (۳) شامل نمودار احتمال نرمال-خطای پاسخ مربوط به دی‌اکسید کربن بوده است. از آنجایی که خطاها به صورت نرمال پراکنده شده‌اند، مدل معنا دار بوده و پاسخ پیش‌بینی شده با اطلاعات واقعی سازگاری دارد.

می‌گذارند. پایین بودن مقدار جملات ( $X_1$ ) و ( $X_4$ ) و ( $X_1 X_2$ ) و ( $X_1 X_3$ ) نشان دهنده کم اهمیت بودن این جملات در این مدل می‌باشند. با توجه به معادله (۱۱) متغیر دبی خوراک ( $X_2$ ) و متغیر دمای کوره ( $X_3$ ) تاثیر مثبت بر تولید دی‌اکسید کربن دارند و متغیر دبی هوا ( $X_1$ )

$$CO_2 = 276.64985 + 1.96063E^{-003}X_1 + 0.47928X_2 + 0.044949X_3 - 3.16674X_4 + 1.64783E^{-006}X_1 \times X_2 - 2.37540E^{-005}X_1 \times X_3 + 0.077356X_3 \times X_4 \quad (11)$$

جدول (۸) تحلیل واریانس برای مدل دی‌اکسید کربن

مقدار P	مقدار F	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	توصیف	منبع
$0.0001 <$	۱۶۴/۸۶	۱۰۲۰۰۰	۷	۷۱۳۸۰۰	-	مدل
$0.0179 <$	۵/۹۱	۳۶۵۳/۵۵	۱	۳۶۵۳/۵۵	دبی هوا	$X_1$
$0.0001 <$	۱۰۲۰/۴۳	۶۳۱۲۰۰	۱	۶۳۱۲۰۰	دبی خوراک	$X_2$
$0.0001 <$	۲۷/۶۱	۱۷۰۷۸/۹۱	۱	۱۷۰۷۸/۹۱	دمای کوره	$X_3$
$0.0029 <$	۹/۵۸	۵۹۲۸/۵۱	۱	۵۹۲۸/۵۱	فشار کوره	$X_4$
$0.022 <$	$0.009909$	۶/۱۳	۱	۶/۱۳	دبی هوا $\times$ دبی خوراک	$X_1 X_2$
$0.0075 <$	۷/۶۳	۴۷۲۰/۵۰	۱	۴۷۲۰/۵۰	دبی هوا $\times$ دمای کوره	$X_1 X_3$
$0.0051 <$	۸/۴۲	۵۲۱۰/۷۵	۱	۵۲۱۰/۷۵	دمای کوره $\times$ فشار کوره	$X_4 X_3$
				$R^2$	$R^2(\text{adj})$	$R^2(\text{Pred})$
				%۹۴/۶۷	%۹۴/۰۹	%۹۰/۸۴



شکل (۳) نمودار احتمال نرمال خطای پاسخ دی‌اکسید کربن

محدوده تغییرات پارامترهای عملیاتی و نتایج بهینه‌سازی فرآیند جداسازی گوگرد در جدول (۱۰) آورده شده است. بنابر نتایج بدست آمده شرایط بهینه برای بیشینه کردن تولید گوگرد با دبی  $kmol/h$  ۵۲/۹۳۳۹ و کمینه کردن تولید دی‌اکسید کربن با دبی  $kmol/h$  ۵۳۳/۹۶۲ در فرآیند جداسازی گوگرد پالایشگاه گاز ایلام بر اساس شرایط عملیاتی برای دمای کوره  $1039^\circ C$ ، نرخ دبی هوا  $469/33 kmol/h$  و نرخ دبی خوراک  $1110/38 kmol/h$  گزارش شد که این نقاط بهینه باعث افزایش تولید گوگرد از ۳۰٪ به ۸۹٪ و

محدوده تغییرات پارامترهای عملیاتی و نتایج بهینه‌سازی فرآیند جداسازی گوگرد در جدول (۱۰) آورده شده است. بنابر نتایج بدست آمده شرایط بهینه برای بیشینه کردن تولید گوگرد با دبی  $kmol/h$  ۵۲/۹۳۳۹ و کمینه کردن تولید دی‌اکسید کربن با دبی  $kmol/h$  ۵۳۳/۹۶۲ در فرآیند جداسازی گوگرد پالایشگاه گاز ایلام بر اساس شرایط عملیاتی برای دمای کوره  $1039^\circ C$ ، نرخ دبی هوا  $469/33 kmol/h$  و نرخ دبی خوراک  $1110/38 kmol/h$  گزارش شد که این نقاط بهینه باعث افزایش تولید گوگرد از ۳۰٪ به ۸۹٪ و

آن است که از بین متغیرهای ورودی واحد جداسازی گوگرد که شامل: دبی جریان خوراک، دبی هوا، دمای کوره، فشار کوره، درجه حرارت راکتور کاتالیستی اول و فشار راکتور کاتالیستی اول می‌باشند، دبی خوراک ورودی و دمای کوره و دبی هوا بیشترین تأثیر را بر روی عملکرد و راندمان دو پاسخ گوگرد و دی‌اکسیدکربن در واحد جداسازی بازیافت گوگرد دارند.

کاهش تولید دی‌اکسید کربن از ۵۵٪ به ۸٪ شده است. واضح است که با بیشینه شدن تولید گوگرد و کمینه شدن تولید دی‌اکسید کربن و با حفظ شرایط عملیاتی واحد و کیفیت آن‌ها نتایج بهینه‌سازی حاضر منجر به افزایش راندمان واحد جداسازی گوگرد و کاهش هزینه‌ها می‌گردد. همچنین اثر متقابل بین پارامترها در جداول ۷ و ۸ و معادلات ۱۰ و ۱۱ و نمودارهای (۴ و ۵ و ۶ و ۷ و ۸) به خوبی نشان داده شده است. که این نتایج حاکی از

جدول (۹) محدوده تغییرات پارامترهای عملیاتی و نتایج بهینه‌سازی فرآیند جداسازی گوگرد

فاکتورها	توصیف	مقادیر تجربی محدوده	نتایج بهینه‌سازی
X <sub>1</sub>	دبی هوا	۲۴۰۰ kmol/h < دبی هوا < ۴۸۸ kmol/h	۱۱۱۰/۳۸
X <sub>2</sub>	دبی خوراک ورودی	۹۴۱ kmol/h < دبی خوراک < ۴۶۹ kmol/h	۴۶۹/۳۳
X <sub>3</sub>	دمای کوره	۵۰ °C < دمای خوراک	۱۰۳۹
X <sub>4</sub>	فشار کوره	۰/۶۸ barg < فشار کوره < ۰/۱۳ barg	۰/۱۳
X <sub>5</sub>	دمای راکتور کاتالیستی اول	۳۱۶ °C < دمای راکتور کاتالیستی اول < ۱۶۰ °C	۲۰۱/۵۷
X <sub>6</sub>	فشار راکتور کاتالیستی اول	۰/۰۹ barg < فشار راکتور کاتالیستی اول < ۰/۰۶ barg	۰/۰۸۳
پاسخ‌ها	شرایط بهینه	-	هدف
گوگرد (kmol/h)	بیشینه	-	۵۲/۹۳۳۹
دی‌اکسید کربن (kmol/h)	کمینه	-	۵۳۳/۹۶۲

## ۸- بهینه‌سازی

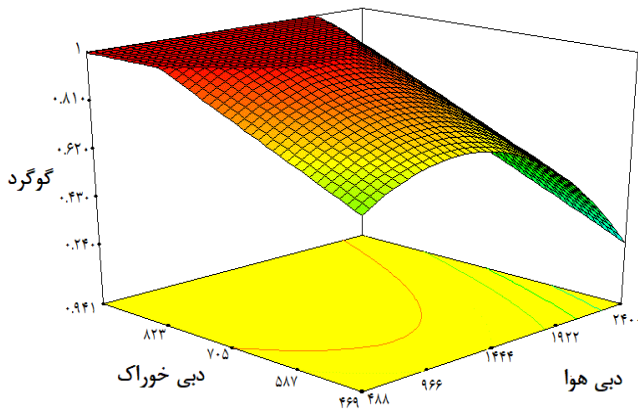
بهینه‌سازی فرآیندهای صنعتی به دلیل تأثیر مستقیم بر روی کیفیت محصول و شرایط اقتصادی فرآیند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در بهینه‌سازی می‌توان هر پاسخ را به طور جداگانه بهینه کرد اما انتخاب شرایط بهینه فقط برای یک پاسخ، ممکن است اثر منفی بر پاسخ یا پاسخ‌های دیگر داشته باشد [۲۳]. با استفاده از بهینه‌سازی عددی شرایط بهینه برای ۶ متغیر پاسخ در محدوده متغیرهای مستقل انجام شد که نتایج حاصل از آن در جدول (۱۰) ارائه شده است. در واقع در این پژوهش هدف بیشینه کردن تولید گوگرد (نمودارهای ۴ و ۵ و ۶) و به طور همزمان کمینه کردن دی‌اکسید کربن تولیدی (نمودارهای ۷ و ۸) نشان داده شده است و با توجه به محدوده‌ی متغیرها مستقل بوده است. شکل (۴) تأثیر پارامترهای دبی هوا و دمای کوره را بر روی میزان تولید گوگرد نشان می‌دهد، و همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود با افزایش هر دو پارامتر، تولید گوگرد در دبی ۱۴۴۴ کیلو مول بر ساعت و دمای ۵۴۴/۵۰ درجه سانتیگراد مقدار بیشینه را دارد، اما تأثیر دمای کوره بر روی پاسخ خیلی شدیدتر است. و طبق معادله (۱۰) اثر متقابل بین دو پارامتر دبی هوا و دمای کوره وجود دارد که مقدار آن کم و معادل (۰/۰۱۱۷۶۷۲۸۵۴-) می‌باشد.

جدول (۱۰) نتایج بهینه‌سازی فرآیند جداسازی گوگرد

فاکتورها	توصیف	محدوده
X <sub>1</sub>	دبی هوا (kmol/h)	۱۱۱۰/۳۸
X <sub>2</sub>	دبی خوراک (kmol/h)	۴۶۹/۳۳
X <sub>3</sub>	دمای کوره (°C)	۱۰۳۹
X <sub>4</sub>	فشار کوره (barg)	۰/۱۳
X <sub>5</sub>	دمای راکتور کاتالیستی اول (°C)	۲۰۱/۵۷
X <sub>6</sub>	فشار راکتور کاتالیستی اول (barg)	۰/۰۸۳
پاسخ‌ها	شرایط بهینه	هدف
گوگرد (kmol/h)	بیشینه	۵۲/۹۳۳۹
دی‌اکسید کربن (kmol/h)	کمینه	۵۳۳/۹۶۲

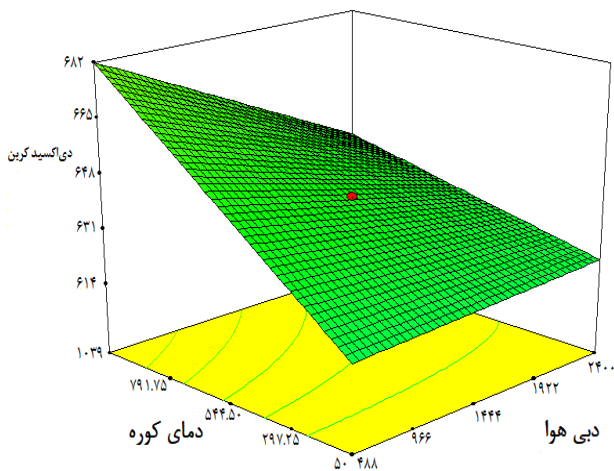
Archive of SID

متقابلی بین دو پارامتر روی پاسخ مشاهده نشده است و در اینجا اثر دبی خوراک روی پاسخ خیلی بیشتر است.



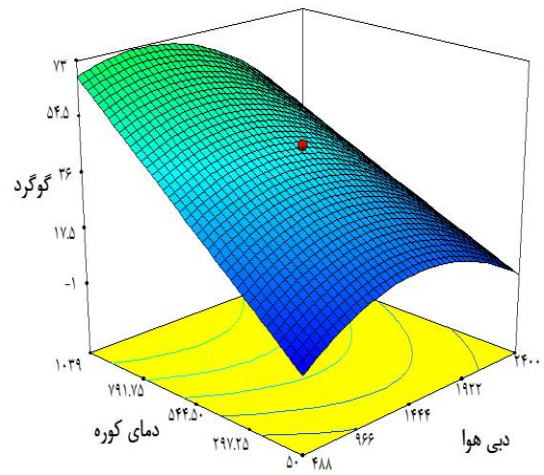
شکل (۶) مدل پیشنهاد شده برای تولید گوگرد

با توجه به شکل (۷)، مشاهده می‌شود دی‌اکسید کربن تولیدی در دبی هوا ۹۶۶ کیلو مول بر ساعت و دمای ۲۹۷/۲۵ درجه سانتیگراد دارای مقدار کمینه است و طبق معادله ۱۱ اثر متقابل بین هر دو پارامتر روی پاسخ نیز بسیار کم و برابر (-) می‌باشد. (۰/۰۰۰۰۲۳۷۵۴)



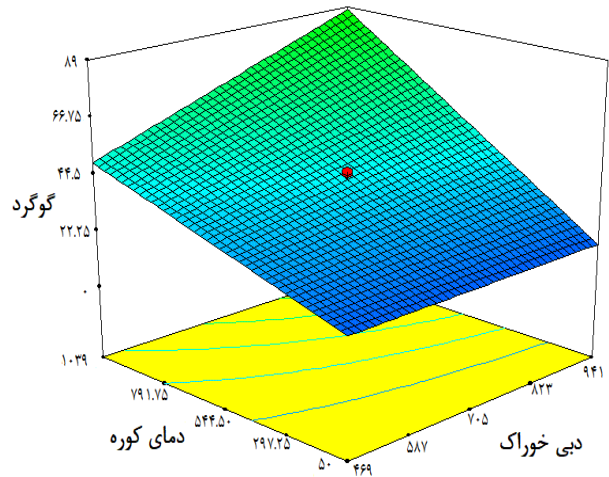
شکل (۷) بررسی تأثیر پارامترهای دبی هوا و دمای کوره بر میزان تولید دی‌اکسید کربن

با توجه به شکل (۸)، مشاهده می‌شود دی‌اکسید کربن تولیدی در دمای ۲۹۷/۲۵ درجه سانتیگراد و فشار ۰/۲۷ barg دارای مقدار کمینه است و طبق معادله (۱۱) اثر متقابل بین هر دو پارامتر روی پاسخ مقدار (۰/۰۷۷۳۵۶) می‌باشد.



شکل (۴) تأثیر پارامتر دبی هوا و دمای ورودی کوره در تولید گوگرد

شکل (۵) تأثیر پارامترهای دبی خوراک و دمای کوره را بر روی میزان تولید گوگرد بررسی می‌کنند. و همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش دمای کوره و دبی خوراک، میزان تولید گوگرد در دبی ۷۰۵ کیلو مول بر ساعت و دمای ۵۴۴/۵۰ درجه سانتیگراد به مقدار بیشینه خود می‌رسد که اثر افزایش دبی خوراک بر روی پاسخ بصورت خطی و کمتر از اثر دمای کوره بر روی پاسخ می‌باشد و مطابق با معادله (۱۰) اثر متقابل بین دو پارامتر وجود دارد که مقدار آن نیز ناچیز و برابر (۰/۰۰۰۰۸۲۳۵۸) می‌باشد.



شکل (۵) تأثیر پارامتر دبی خوراک و دمای ورودی کوره در تولید گوگرد

شکل (۶) تأثیر پارامترهای دبی هوا و دبی خوراک را بر روی میزان گوگرد تولیدی نشان می‌دهد و همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش دبی خوراک و دبی هوا، تولید گوگرد افزایش می‌یابد اما طبق معادله (۱۰) هیچ اثر

کمیته شدن تولید دی اکسید کربن و با حفظ شرایط عملیاتی واحد و کیفیت آن‌ها نتایج بهینه‌سازی حاضر منجر به افزایش راندمان واحد جداسازی گوگرد و کاهش هزینه‌ها می‌گردد.

## مراجع

[۱]- ح. کریم، الف. عامری (۱۳۹۴) "بررسی اثرات تغلیظ گاز اسیدی در واحد بازیافت گوگرد با رویکرد کاهش مصرف انرژی"، پنجمین کنفرانس بین‌المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی، تهران، ایران. [۲]- ع. گرمودی اصیل، ش. میرزایی (۱۳۸۳) "تعدیل ساختار واحد تصفیه گاز جهت غنی‌سازی جریان گاز اسیدی ورودی به واحد بازیافت گوگرد پالایشگاه خانگیران"، اولین کنفرانس ملی فرآیندهای گاز و پتروشیمی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.

[۳]- ر. حجازی (۱۳۹۶) "جستاری دینی بر پیمان‌های محیط زیستی بین‌المللی مطالعه موردی: پیمان کیوتو"، فصلنامه حقوقی محیط زیست، سال دوم، شماره یک، ۳۰-۳۷.

[4]- G.P. Rangaiah. (Editor). (2009) "Multi-objective optimization: techniques and applications in chemical engineering", World Scientific Inc, 1.

[5]- W.D. Monnery, W.Y. Svrcek., L.A. Behie (1993) "Modeling the modified Claus process re- action furnace and the implications on plant design and recovery", Can. J. Chem. Eng., 71(5), 711-724.

[6]- F. Manenti, D. Papasidero, A. Frassoldati, G. Bozzano, S. Pierucci, E. Ranzi (2013) "Multi-scale modeling of Claus thermal furnace and waste heat boiler using detailed kinetics", Comp. Chem. Eng., 59, 219-225.

[7]- F. Manenti, D. Papasidero, G. Bozzano, E. Ranzi (2014) "Model-based optimization of sulfur recovery units", Comp. Chem. Eng., 66, 244-51.

[8]- L.V. Nasato, K. Karan, A.K. Mehrotra, L.A. Behie. (2016) "Modeling reaction quench times in the waste heat boiler of a Claus plant", Ind Eng Chem Res, 33(1), 7-13.

[9]- J. De Deken, E. Devos, G. Froment (1982) "Steam Reforming of Natural Gas: Intrinsic Kinetics, Diffusional Influences, and Reactor Design", 181-197.

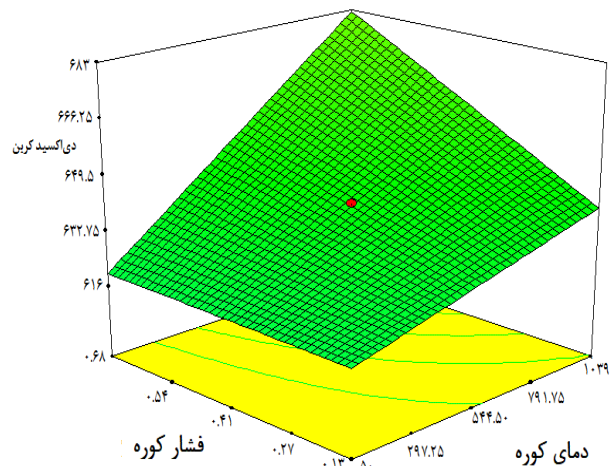
[10]- J. Pooralhosini, M. Ghaedi, M.A. Zanjanchi, A. Asfaram (2017) "The choice of ultrasound assisted extraction coupled with spectro-photometric for rapid determination of gallic acid in water samples: central composite design for optimization of process variables", Ultrason. Sonochemistry, 34, 692-699.

[11]- I. Salisu, R. Abhijeet (2016). "Kinetic Simulation of Acid Gas (H<sub>2</sub>S and CO<sub>2</sub>) Destruction for Simultaneous Syngas and Sulfur Recovery", Ind. Eng. Chem. Res., 55 (24), 6743-6752.

[12]- H. Kazempour, F. Pourfayaz, M. Mehrpooya (2017) "Modeling and multi-optimization of thermal section of Claus process based on kinetic model", Journal of Natural Gas Science and Engineering, 38, 235-244.

[۱۳]- ف. شکوه‌علایی، ع. حقیقی اصل (۱۳۹۷)،

"مدلسازی سینتیکی راکتورهای کاتالیستی فرآیند کلاوس واحد بازیافت گوگرد پالایشگاه گاز ایلام، کنگره ایده‌های نوین



شکل (۸) بررسی تأثیر پارامترهای دمای و فشار کوره بر میزان تولید دی‌اکسید کربن

## ۹- نتیجه گیری

در این پژوهش شبیه‌سازی پایا واحد جداسازی گوگرد پالایشگاه گاز ایلام انجام شد و پس از مقایسه نتایج شبیه‌سازی با اطلاعات فرآیندی واحد مذکور مشاهده گردید که شبیه‌سازی، توانایی پیش‌بینی عملکرد فرآیند را با خطای کمتر از ۴٪ دارا می‌باشد. سپس واحد جداسازی گوگرد پالایشگاه گاز ایلام با استفاده از روش پاسخ سطح بهینه‌سازی شد. دبی خوراک ورودی، دبی هوا، دمای کوره، فشار کوره، دمای راکتور کاتالیستی اول و فشار راکتور کاتالیستی اول بعنوان فاکتورهای مستقل و مؤثر بر دو پاسخ گوگرد و دی‌اکسید کربن تولیدی در نظر گرفته شده‌اند. که با توجه به ضرایب همبستگی ( $R^2_{adj}$ ) و مقدار  $F$  برای گوگرد تولیدی که برابر ۹۴/۶۳٪ و ۲۱۲/۳۲ و ضرایب همبستگی ( $R^2_{adj}$ ) و مقدار  $F$  برای دی‌اکسید کربن تولیدی برابر ۹۴/۰۹٪، ۱۶۴/۸۶، مدل‌های بدست آمده برای توصیف رفتار پاسخ‌ها در مقابل تغییرات متغیرهای مستقل، اعتبار سنجی گردیدند. بنابر نتایج بدست آمده شرایط بهینه برای بیشینه کردن تولید گوگرد با دبی ۵۲/۹۳۳۹ کیلو مول بر ساعت و کمیته کردن تولید دی‌اکسید کربن با دبی ۵۳۳/۹۶۲ کیلو مول بر ساعت در فرآیند جداسازی گوگرد پالایشگاه گاز ایلام بر اساس شرایط عملیاتی برای دمای کوره ۱۰۳۹ درجه سانتیگراد، نرخ دبی هوا ۴۶۹/۳۳ کیلو مول بر ساعت و نرخ دبی خوراک ۱۱۱۰/۳۸ کیلو مول بر ساعت گزارش شد که این نقاط بهینه باعث افزایش تولید گوگرد از ۳۰٪ به ۸۹٪ و کاهش تولید دی‌اکسید کربن از ۵۵٪ به ۸٪ شده است. واضح است که با بیشینه شدن تولید گوگرد و

[21]- E.M.Besher, A.Meisen (1990) "Low-temperature Fluidized-bed Claus reactor performance", Chem. Eng. Sci., 45, 10, 3035-3045.

[22]- B.Manohar (2014) "Optimization of supercritical carbon dioxide extraction of phenolic compounds from mango ginger rhizome (*Curcuma Amada Roxb.*) Using response surface methodology", Biomed. Biotechnol. 2, 14-19.

[23]- D. Krishnaiah, A.Bono, R. Sarbatly, R.Nithyanandam, S. Anisuzzaman (2015) "Optimization of spray drying operating conditions of *Morinda citrifolia* L. fruit extract using response surface methodology", J. King Saud Univ. Eng. Sci., 27, 26-36.

[24]- D.O.Aksoy, E. Sagol (2016) "Application of central composite design method to coal flotation: modeling, optimization and verification", Fuel 183, 609-616.

[25]- P.Naik, P.S.R.Reddy, V. Misra (2005) "Interpretation of interaction effects and optimization of reagent dosage for fine coal flotation", Int. J. Mineral Processing, 75, 83-90.

[26]- S.L.C. Ferreira, R.E. Bruns, E.G.P.da Silva, W.N.L. dos Santos, C.M. Quintella., J.M.David, J.B.de Andrade, M.C.Breitkreitz, I.C.S.F.Jardim., B.B. Neto (2007) "Statistical designs and response surface techniques for the optimization of chromatographic systems", J. Chromatography A., 1158, 2-14.

[27]- M.Khayet, C.Cojocar (2012) "Air gap membrane distillation: desalination, modeling and optimization", Desalination, 138-145.

[28]- C.P.Papaneophytou, D.A.Kyriakidis (2012) "Optimization of polyhydroxyalkanoates production from thermophilic HB8 using response surface methodology", J. Poly. Environ. 20, 760-773.

[29]- G.G Vining, R.H Myers (1991) "A graphical approach for evaluating response surface designs in terms of the mean squared error of prediction", Technometrics, 33, 315-326.

[30]- N. Gunantara, (2018), "A review of multi-objective optimization: Methods and its applications", This open access article is distributed under a Creative Commons Attribution (CC-BY) 4.0 license. Cogent Engineering, 5, 1-16.

پژوهشی در علوم مهندسی و تکنولوژی، برق و کامپیوتر، ساری، ایران.

[۱۴]- م.ح شفیعی، الف. اکبری داهویی، م. صفا میرزایی (۱۳۹۷)، "مدلسازی سینتیکی راکتورهای کاتالیستی فرآیند کلوس واحد بازیافت گوگرد پالایشگاه گاز ایلام"، کنفرانس بین‌المللی نوآوری و تحقیق در علوم مهندسی، گرجستان-تفلیس

[۱۵]- الف. کوهستانیان، ج.صادقی، د. محبی‌کلهری (۱۳۹۶) "شبیه‌سازی و طراحی فرآیندهای نفت، گاز و شیمیایی با Aspen Plus"، چاپ اول، سازمان انتشارات جهاد دانشگاهی تهران.

[۱۶]- س.زارعی محمودآبادی، ح.گنجی، م.سعدی، م.رشیدزاده (۱۳۹۶)، "مروری بر مدلسازی سینتیکی و بهینه‌سازی کوره واکنش واحد بازیافت گوگرد"، پژوهش نفت، پژوهشگاه نفت تهران، ایران، ۹۴، ۲۰۴-۲۱۳.

[17]- M.Pahlavan, M.A. Fanaei (2015) "Modeling and Simulation of Claus of Mashhad Unit Reaction Furnace", Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran, August 19, 5( 1), 42-52.

[18]- W.D.Monnerly, K.A.Hawboldt, A.Pollock, W.Y.Svrcek (2000) "New experimental data and kinetic rate expression for Claus reaction", Chem. Eng. Sci., 55, 5141-5148.

[19]- K.Karan, and L.A Behie (2004) "CS<sub>2</sub> Formation in the Claus Reaction Furnace Kinetic Study of Methane-Sulfur and Methane-Hydrogen Sulfide Reactions", Ind. Eng. Chem. 43, 13, 3304-3313.

[20]- Sh.Tong, I. G. Dalla Lana., K. T.Chuang (1997) "Effect of Catalyst Shape on the Hydrolysis of COS and CS<sub>2</sub> in a Simulated Claus Converter", Ind. Eng. Chem Res, 36, 4087-4093.

## Simulation and optimization of sulfur recovery unit in Ilam gas refinery by response surface methodology

Asma Taherinia, Farhad Shahraki\*, Mir Mohammad Khalili Pour Langrodi, Mohammad Reza Sardashti Birjandi

Department of Chemical Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

### ABSTRACT

The aim of current paper is to optimize the sulfur recovery unit in order to increase sulfur production and simultaneously reduce the production of carbon dioxide based on the information of the unit for the separation of sulfur in the Ilam refinery. The input variables of the sulfur recovery unit are the feed flow rate, airflow, furnace temperature, furnace pressure, first catalytic reactor temperature and the first catalytic reactor pressure. The mathematical model of the process was obtained using the surface response method (RSM) and the accuracy of the model was investigated by analysis of variance. Finally, the operating conditions of the sulfur separation process were performed with numerical optimization method. The results showed that the most effective parameters are furnace temperature, air flow rate, and feed rate. The optimum points for the furnace temperature of 1039 °C, the airflow rate 469.38 kmol/h, flow rate 1110.38 kmol/h were obtained which increased the sulfur production from 30% to 89% and decreased the production of dioxide Carbon from 55% to 8%.

All right reserved.

### ARTICLE INFO

Article history:

Received: January 5, 2019

Received in revised form: May 16, 2019

Accepted: September 8, 2019

#### Key words:

Sulfur Separation Unit

Optimization

Claus method

Response Surface Method

Analysis of Variance

\* Corresponding author  
fshahraki@eng.usb.ac.ir