

# مدل سازی و بهینه سازی فرآیند آلکیلاسیون با روش پاسخ سطح

سروش مهدی زاده، فرهاد شهرکی\*، کیانوش رزاقی و میرمحمد خلیلی پور  
گروه مهندسی شیمی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۵/۷/۴

تاریخ دریافت: ۹۵/۳/۱۰

## چکیده

در این پژوهش به بهینه سازی واحد آلکیلاسیون با هدف حداکثر کردن تولید محصولات، با حفظ کیفیت و شرایط عملیاتی، بر مبنای اطلاعات یک واحد صنعتی پرداخته شده است. متغیرهای ورودی فرآیند آلکیلاسیون عموماً شامل خوراک‌های ورودی، و متغیرهای خروجی که شامل محصولات (آلکیلایت، نرمال بوتان و پروپان)، مقدار مصرف اسید، عدد اکتان آلکیلایت، مقدار جریان برگشتی ایزوبوتان به راکتور و نسبت ایزوبوتان به اولفین در راکتور است. با استفاده از اطلاعات عملیاتی واحد آلکیلاسیون، مدل ریاضی فرآیند با استفاده از روش پاسخ سطح به دست آمد. این روش در زمینه‌های مختلف از جمله تحقیقات آزمایشگاهی و صنعتی بسیار استفاده شده و نتایج قابل اطمینان ارائه داده است. دقت و صحت مدل‌های ارائه شده به کمک تحلیل واریانس (ANOVA) بررسی شد. پس از بررسی صحت مدل‌های ارائه شده، متغیرهای خروجی فرآیند بر مبنای تغییر در متغیرهای ورودی پیش‌بینی شد. در انتها بهینه‌سازی شرایط عملیاتی فرآیند آلکیلاسیون با روش بهینه‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار Design Expert ۷ انجام و ارائه گردید.

کلمات کلیدی: واحد آلکیلاسیون، بهینه‌سازی، روش پاسخ سطح، آلکیلایت، تولید بنزین.

## مقدمه

باشد [۱]. واحد آلکیلاسیون یکی از واحدهای مهم در پالایشگاه‌های نفت می‌باشد که قابلیت تولید بنزین با این ویژگی‌های ذکر شده را دارد و به نام آلکیلایت شناخته می‌شود. آلکیلایت محصول واکنش ایزوبوتان با اولفین‌های ۳ تا ۵ کربنی در حضور سولفوریک اسید یا هیدروفلوئوریک اسید به عنوان کاتالیزگر می‌باشد. این محصول دارای عدد اکتان بالا بوده و همچنین دوست‌دار محیط زیست می‌باشد [۲]. اهمیت فرآیند آلکیلاسیون در صنعت

در دو دهه اخیر پیشرفت صنعت و همچنین ایجاد قوانین و محدودیت‌های زیست محیطی، پالایشگاه‌ها و صنایع پتروشیمی را ملزم به تولید بنزین باکیفیت بالا کرده است. بر طبق این قوانین بنزین تولید شده باید حاوی ترکیبات اکسیژن‌دار، عاری از آروماتیک‌ها، فراریت کمتر، و فاقد سولفور و اولفین‌ها

بر پژوهش‌های انجام شده، می‌توان دریافت که روش‌های بهینه‌سازی همواره در حال بهبود و گسترش می‌باشند. یکی از روش‌هایی که امروزه مقبولیت زیادی در بین محققان در زمینه‌های صنایع نفت، پالایش و پتروشیمی، کاتالیست، مواد و صنایع غذایی برخوردار است، روش پاسخ سطح (RSM)<sup>۱</sup> می‌باشد. روش پاسخ سطح مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی و آماری است که برای توسعه‌ی مدل فرآیند و بهینه‌سازی پاسخ‌هایی (متغیرهای خروجی) که توسط تعدادی متغیر ورودی تحت تاثیر است استفاده می‌شود [۱۰]. این روش توسط جورج باکس و ویلسون در سال ۱۹۵۱ 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. نوشادی و همکارانش به بهینه‌سازی فرآیند پیوسته تولید بیودیزل از ضایعات روغن آشپزی در برج تقطیر همراه با واکنش و با کاتالیزگر هتروپولیک اسید پرداختند. در این پژوهش طراحی آزمایش با استفاده از روش پاسخ سطح بر پایه طراحی مرکب مرکزی انجام شد و تجزیه و تحلیل ۴ متغیر عملیاتی شامل شدت جریان کلی خوراک، دمای خوراک، توان جوش‌آور و نسبت متانول/روغن مورد مطالعه قرار گرفت. در پژوهشی دیگر، الفقی و امین، تاثیر تعاملی متغیرهای واکنش بر درصد ترکیبات و عدد اکتان محصول رفرمیت در واحد رفرمینگ کاتالیستی نفتا را با استفاده از روش پاسخ سطح بررسی کردند. همچنین آدامیک و همکارانش واکنش ایزومریزاسیون نرمال هگزان در حضور کاتالیزگر زیرکونیوم سولفات را با استفاده از روش پاسخ سطح مطالعه کردند. آتشی و همکارانش تاثیر شرایط فرآیند مانند دما، فشار و نسبت  $H_2/CO$  بر انتخاب‌پذیری محصول فیشر-تروپش را با استفاده از مدل آماری براساس اطلاعات آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. همچنین از روش پاسخ

نفت سبب شده است تا محققان زیادی به تحقیق بر روی این فرآیند بپردازند به طوری که در دهه‌های اخیر یکی از زمینه‌های پژوهشی محققان در صنایع نفتی، بهینه‌سازی فرآیند آلکیلاسیون بوده است.

به‌طور کلی در فرآیندهای شیمیایی بهینه‌سازی به‌منظور افزایش بهره‌وری و سوددهی از یکسو و کاهش مصرف انرژی و مواد اولیه و همچنین کاهش آسیب‌های زیست محیطی از سوی دیگر، دارای جایگاه ویژه‌ای می‌باشد [۳]. از سال‌های گذشته تاکنون تحقیقات گوناگونی در زمینه‌ی ساخت مدل‌های تجربی مختلف و بهینه‌سازی واحدهای آلکیلاسیون ارائه شده است. پاین، متغیرهای فرآیند آلکیلاسیون و روابط آن‌ها با یکدیگر را مطرح و بررسی کرد [۴]. در آن پژوهش، تعدادی از این روابط از طریق رگرسیون خطی و غیرخطی توصیف و ارائه شد. ساور، فرآیند آلکیلاسیون را با استفاده از معادلات تجربی و فرض‌های ساده کننده با ۱۰ متغیر، ۷ قید تساوی و یک تابع هدف فرمول‌بندی کرد [۵]. این مدل غیرخطی با یک روش خطی بهینه شد که دقت بالایی نداشت. این مدل توسط بارکن و مک‌کورمیک با تغییراتی همراه شد. قیده‌ها به ۸ قید نامساوی تبدیل و مسئله بهینه‌سازی، با روش (SUM)<sup>۱</sup> که دقت بالایی داشت حل شد [۶]. فرآیند آلکیلاسیون توسط دمبو به گونه‌ای دیگر فرمول‌بندی شد [۷]. این مدل شامل ۷ متغیر غیرخطی، ۱۲ قید غیرخطی نامساوی و ۲ قید خطی مساوی بود. فرآیند آلکیلاسیون توسط او با هدف بهبود بخشیدن عدد اکتان بهینه شد. رانگا، فرآیند آلکیلاسیون را به صورت چند هدفه با استفاده از روش  $\epsilon$ -constraint بهینه کرد [۳]. فرآیند آلکیلاسیون توسط نوربرتو و همکارانش با هدف افزایش سوددهی و کاهش صدمات زیست محیطی به‌طور همزمان بهینه شد [۸]. بهینه‌سازی این فرآیند با هدف حداقل کردن جریان برگشتی ایزوبوتان توسط پترو انجام گردید [۹]. با مروری

1. Sequential Unconstrained Minimization

2. Response Surface Methodology (RSM)

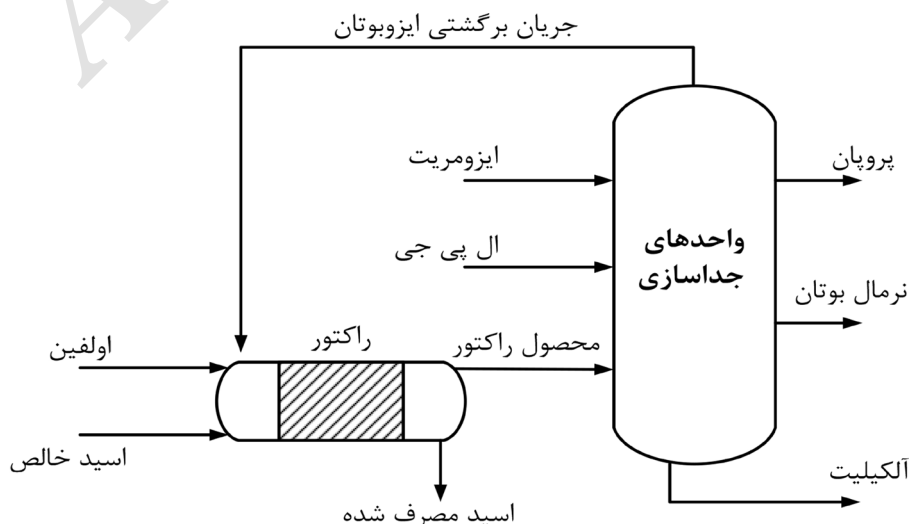
عدد اکتان بالا و کیفیت مطلوب است. نمایی از فرآیند آلکیلاسیون در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که از این شکل قابل مشاهده است، خوراک‌های ورودی به راکتور در این فرآیند شامل جریان‌های اولفین و ایزوبوتان برگشتی است. خوراک اولفین بیشتر شامل آلکن‌های ۴ کربنی، ایزوبوتان و نرمال بوتان است. اسید سولفوریک نیز به عنوان کاتالیزور وارد راکتور می‌شود و پس از حضور در واکنش گرمایز بین اولفین‌ها و ایزوبوتان توسط تجهیزات جداکننده از جریان هیدروکربن‌های محصول جدا می‌شود [۳]. هیدروکربن‌های خروجی از راکتور با خوراک ایزومریت (ایزوبوتان و نرمال بوتان) و ال‌پی‌جی (نرمال بوتان و پروپان) وارد بخش جداسازی می‌شوند. محصولات اصلی فرآیند که در بخش جداسازی تفکیک می‌شوند شامل آلکیل‌یت، نرمال بوتان، پروپان و ایزوبوتان برای جریان برگشتی به راکتورها است. در این تحقیق، متغیرهای ورودی شامل خوراک‌های اولفین، ایزومریت و ال‌پی‌جی بوده و متغیرهای خروجی (پاسخ‌ها) شامل محصولات (آلکیل‌یت، نرمال بوتان و پروپان)، عدد اکتان بنزین، مقدار مصرف اسید سولفوریک، نسبت ایزوبوتان به اولفین در راکتور و مقدار جریان برگشتی ایزوبوتان به راکتور است.

سطح، برای بررسی تاثیر این شرایط عملیاتی بر انتخاب‌پذیری متان، آلکن‌ها و آلکن‌ها استفاده شد. بهینه‌سازی فرآیند آلکیلاسیون به‌طور موردی با استفاده از روش پاسخ سطح انجام نشده است، اما پژوهش‌های صورت گرفته در فرآیندهای شیمیایی مختلف خود دلیلی مبنی بر مناسب بودن این روش در بهینه‌سازی فرآیند آلکیلاسیون بود.

در این تحقیق ابتدا به ارائه مدل ریاضی فرآیند آلکیلاسیون پالایشگاه آبادان از طریق آنالیز رگرسیون غیرخطی بر روی داده‌های صنعتی واحد پرداخته می‌شود. از آنجایی که مدل‌سازی این فرآیند بر روی داده‌های واقعی تاکنون انجام نشده است مدل حاضر دارای برتری‌های مشخصی از نقطه نظر مورد مطالعه خود دارا می‌باشد. این داده‌ها در طی یک دوره مشخص عملیاتی اندازه‌گیری شده است. در مرحله بعد با داشتن مدل ریاضی، بهینه‌سازی فرآیند در جهت مشخص کردن بهترین شرایط عملیاتی با استفاده از روش پاسخ سطح انجام شد. با توجه به کارایی بالای این روش و اطلاعات موجود از واحد، بهینه‌سازی واحد آلکیلاسیون با استفاده از روش پاسخ سطح مناسب و عملی است.

### فرآیند آلکیلاسیون

وظیفه اصلی واحد آلکیلاسیون تولید بنزین با



شکل ۱ نمایی ساده از فرآیند آلکیلاسیون.

شرایطی که متغیرهای ورودی زیادی به عملکرد و ویژگی‌های کیفیت محصول (پاسخ‌ها) در فرآیند تاثیر دارند، استفاده می‌شود. وابستگی یک پاسخ به ورودی‌ها به صورت معادله ۱ است [۱۷].

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k) + \varepsilon \quad (1)$$

در معادله بالا  $Y$  پاسخ،  $X$  ها متغیرهای ورودی و تابع خطا است.

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 [۱۷]:

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

- تخمین زدن عامل‌های (B) در مدل درجه دوم آسان‌تر است.

- آزمایش‌ها و تجربیات زیادی عملکرد مناسب مدل درجه دوم را برای توصیف رفتار پاسخ مناسب بیان می‌کنند.

با توجه به مزیت‌های مدل درجه ۲ و همچنین عملیاتی بودن اطلاعات، بنابراین از این نوع مدل برای بررسی تاثیر متغیرهای ورودی بر متغیرهای خروجی در فرآیند آلکیلاسیون استفاده شد. در واقع از آن جایی که شرایط عملیاتی ممکن است با تغییرات غیر اصولی همراه باشد مدل درجه ۲ غیرخطی قابلیت توصیف آن را دارد. مدل چند جمله‌ای درجه ۲ را می‌توان به شکل رابطه ۲ در نظر گرفت:

$$\eta = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j \chi_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} \chi_j^2 + \sum_{i < j=2}^k \sum \beta_{ij} \chi_i \chi_j + e_i \quad (2)$$

در این معادله  $\eta$  پاسخ،  $\chi_i$  و  $\chi_j$  متغیرهای مستقل،  $\beta_0$  عدد ثابت و  $\beta_j$ ،  $\beta_{jj}$  و  $\beta_{ij}$  به ترتیب ضرایب جملات خطی، درجه ۲ و برهم‌کنش هستند. هم به‌عنوان خطا در نظر گرفته می‌شود [۱۱].

با استفاده از تحلیل واریانس<sup>۱</sup> (ANOVA)، مدل‌های ارائه شده برای پاسخ‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت و

1. Analyze of Variance

متغیرهای خروجی فرآیند آلکیلاسیون از لحاظ اهمیت باهم تفاوت دارند. یکی از مهم‌ترین متغیرها نسبت ایزوبوتان به اولفین در راکتورها است. کم بودن نسبت ایزوبوتان به اولفین باعث پلیمریزاسیون شده که نتیجه آن کاهش کیفیت بنزین می‌باشد [۱۵]. بالا بودن این نسب در راکتور باعث تولید محصولی باکیفیت‌تر می‌شود، اما چون مقدار ایزوبوتان موجود در راکتور زیاد می‌شود، باعث کاهش مقدار تولید محصول می‌شود. بنابراین باتوجه به استانداردهای واحد در پالایشگاه این نسب بین ۸ تا ۱۱ می‌باشد که به عنوان یک قید در بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. متغیر مهم دیگر در فرآیند آلکیلاسیون مقدار جریان برگشتی ایزوبوتان به راکتور می‌باشد. زیاد بودن مقدار جریان برگشتی باعث افزایش هزینه‌ها از جمله هزینه پمپ کردن می‌شود. بنابراین مقدار این جریان باید به نحوی حداقل گردد که نسبت ایزوبوتان به اولفین در محدوده‌ی عملیاتی ثابت نگه‌داشته شود [۹]. مدل فرآیند رابطه‌ی بین متغیرهای ورودی و خروجی فرآیند را بیان می‌کند. با در اختیار داشتن اطلاعات عملیاتی واحد در طول یک دوره مشخص می‌توان مدل واحد را بدست آورده و از آن در جهت توصیف روابط بین متغیرهای ورودی و خروجی استفاده کرد. هدف اصلی در فرآیندهای شیمیایی حداکثر نمودن تولید، با حفظ کیفیت محصولات می‌باشد، بنابراین ارزیابی شرایط عملیاتی واحد آلکیلاسیون را براساس حداکثر کردن تولید محصولات باکیفیت بالا انجام شد.

## روش کار

روش پاسخ سطح مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است که برای تجزیه و تحلیل نتایج تجربی کاربرد دارد [۱۶]. این روش در طراحی، بهبود و فرمول‌بندی محصولات جدید نیز بسیار کاربردی است. گسترده‌ترین کاربرد روش پاسخ سطح در زمینه‌های صنعتی است. از روش پاسخ سطح در

(۹) (مجموع مربعات خطا)  $SS_E = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2$   
 در معادلات بالا  $Y_i$  مقدار پاسخ،  $\bar{Y}_i$  میانگین پاسخ‌ها و  $\hat{Y}_i$  مقدار پاسخ حاصل از مدل رگرسیون است. مقدار ارزش  $P$  در واقع معنادار بودن مدل و همچنین اثربخشی عامل‌ها در مدل را بیان می‌کند [۱۷]. بدین منظور ابتدا باید مقدار  $P$  تعیین شود و سپس با مقدار  $\alpha$  مقایسه شود. مقدار  $P$  زمانی بیان کننده دقت مناسب مدل است که از  $\alpha$  کمتر باشد و مقدار  $\alpha$  معمولاً برابر با ۰/۰۵ می‌باشد. بنابراین زمانی که  $P$  کمتر از ۰/۰۵ باشد مدل معنادار است. هم‌چنین مقدار  $P$  و مقدار  $F$  برای هر یک از عوامل نشان دهنده تاثیر آنها در مدل است.

### نتایج و بحث

اطلاعات شرایط عملیاتی واحد آلکیلاسیون پالایشگاه آبادان در جدول ۱ ارائه می‌گردد. این اطلاعات برای یک دوره ۳۶ روزه بوده که توسط سیستم‌های پالایشگاهی که در زمان داده‌گیری کالیبره بوده است؛ اندازه‌گیری گردید. بنابراین در این پژوهش نیازی به استفاده از روش‌های طراحی آزمایش نبوده است. این اطلاعات در قسمت Historical data نرم‌افزار دیزاین‌اکسپرت وارد شده و علت نوسان زیاد در بعضی جریان‌ها از کار افتادن واحد و راه‌اندازی مجدد آن در طی این دوره زمانی بوده است. مقدار جریان‌ها در این جدول برحسب کیلوگرم بر ساعت است و پس از تحلیل و بررسی‌های انجام شده بر روی داده‌های این واحد مدل ریاضی پاسخ‌ها با رگرسیون درجه ۲ تعیین گردید. همچنین دقت و قابل قبول بودن مدل‌های رگرسیون با استفاده از تحلیل واریانس بررسی شد.

نتایج تحلیل واریانس مدل درجه دوم محصول آلکیلیت در جدول ۲ ارائه می‌گردد. ضریب همگرایی ( $R^2$ ) این مدل، ۹۶/۸۴٪ و مقدار  $F$  برابر ۱۲۰/۲ گزارش گردید که نشان دهنده معنادار بودن مدل رگرسیون می‌باشد.

ضرایب رگرسیون برای جمله‌های خطی، برهم‌کنش و درجه ۲ تخمین زده شد و با استفاده از ضریب همگرایی ( $R^2$ ) کیفیت برازش معادله مدل‌ها بیان شد. ضریب تعیین یا برازش یکی از آزمون‌های مورد استفاده در تجزیه و تحلیل واریانس برای شناسایی مدل برتر است [۱۷]. محققان برای سنجش دقت مدل خود از  $R^2_{adj}$  استفاده می‌کنند. ضریب برازش  $R^2_{adj}$  حالت اصلاح شده‌ی ضریب تعیین  $R^2$  است و همواره با افزایش عامل‌ها به مدل افزایش نمی‌یابد. در واقع اگر عامل‌های غیر ضروری به مدل افزوده شود کاهش می‌یابد. محاسبه‌ی ضرایب تعیین با روابط ۳ و ۴ بیان می‌گردد.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad (3)$$

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{n-1}{n-p} (1 - R^2) \quad (4)$$

در این معادلات  $P$  تعداد عامل‌های مدل و  $n$  تعداد آزمایش‌ها می‌باشد. از لحاظ آماری مدلی مناسب است که دارای بیشترین مقدار ضریب برازش باشد. البته باید توجه داشت که این شرط لازم است ولی به تنهایی جهت تشخیص دقت مدل کافی نیست. از لحاظ آماری نیز معنی‌دار بودن مدل‌ها با مقدار  $P$  و مقدار  $F$  بررسی شد. مقدار  $F$  ایا مجذور ارزش  $T$  معادل است. در واقع بزرگتر بودن این عامل نشان دهنده اعتبار بیشتر مدل است. این عامل از طریق معادلات ۵ تا ۷ محاسبه می‌شود [۱۷].

$$F_0 = \frac{MS_R}{MS_E} \quad (5)$$

$$MS_R = \frac{SS_R}{P-1} \quad (6)$$

$$MS_E = \frac{SS_E}{n-P} \quad (7)$$

در معادلات بالا  $SS_R$  مجموع مربعات رگرسیون و  $SS_E$  مجموع مربعات خطا می‌باشند که به ترتیب از طریق معادلات ۸ و ۹ محاسبه می‌شوند.

$$SS_R = \sum (\hat{Y}_i - \bar{Y}_i)^2 \quad (8) \quad \text{(مجموع مربعات رگرسیون)}$$

جدول ۱ اطلاعات فرایندی واحد آلکیلاسیون.

شماره داده	اولفین (A)	ال بی جی (B)	ایزومریت (C)	آلکیلیت	ایزوبوتان/اولفین	عدد اکتان	ایزوبوتان برگشتی	نرمال بوتان	پروپان	اسید سولفوریک
۱	۱۲۰۰۱	۱۶۰۰۰	۲۴۴۲۶	۱۶۷۶۳	۱۲/۰۳	۹۶/۱	۸۸۵۴۲	۲۷۸۲۲	۲۳۸۱	۱۲۵۰
۲	۱۲۰۰۰	۱۶۰۰۱	۲۵۳۳۴	۱۶۷۸۴	۱۱/۶	۹۶/۲	۸۶۲۰۷	۲۸۱۲۹	۲۳۴۹	۱۲۵۰
۳	۱۰۰۷۱۴	۱۶۰۰۱	۲۴۳۹۵	۱۵۶۶۶	۱۳/۶	۹۶/۲	۸۹۹۳۴	۲۶۸۹۱	۲۱۱۶	۱۱۹۱
۴	۸۶۹۷	۱۸۰۱۱	۲۴۰۶۴	۱۲۳۸۸	۱۵/۱	۹۶/۱	۸۰۶۸۰	۲۷۹۴۹	۲۳۳۶	۱۱۴۳
۵	۹۲۶۹	۱۹۹۹۹	۲۵۳۱۶	۱۲۹۳۴	۱۳/۴	۹۵/۷	۷۶۰۸۷	۳۰۶۶۳	۲۶۷۰	۱۱۲۳
۶	۱۱۵۲۷	۲۵۰۰۰	۲۳۶۴۶	۱۵۹۴۹	۱۱/۳	۹۵/۷	۷۹۱۳۰	۳۷۲۷۲	۲۸۷۰	۱۱۶۸
۷	۱۱۹۹۹	۲۴۰۱۶	۲۳۳۶۲	۱۶۶۶۶	۱۱/۹	۹۶/۲	۸۱۹۴۹	۳۴۷۸۸	۲۴۳۷	۱۰۰۰
۸	۱۲۰۰۰	۲۲۸۰۲	۲۵۳۰۹	۱۶۷۸۹	۱۰/۸	۹۶	۷۷۹۹۶	۳۳۴۴۰	۲۶۹۵	۱۰۶۴
۹	۱۱۸۲۳	۱۹۲۱۴	۲۴۳۵۱	۱۷۰۶۸	۱۰/۹	۹۵/۸	۷۷۹۸۳	۳۱۳۰۳	۲۰۸۶	۱۰۹۷
۱۰	۱۲۰۰۰	۱۷۹۹۶	۲۴۰۰۳	۱۷۳۴۷	۱۰/۹	۹۵/۹	۸۷۰۱۳	۲۸۲۸۶	۱۹۳۵	۱۱۰۰
۱۱	۱۲۰۰۱	۱۶۱۸۴	۲۵۰۶۶	۱۶۸۸۴	۱۱	۹۵/۹	۸۰۶۱۷	۲۶۷۸۰	۲۳۷۳	۱۱۵۶
۱۲	۹۹۷۵	۱۵۷۶۶	۲۴۳۵۸	۱۳۰۶۸	۱۳/۳	۹۶/۵	۷۹۹۸۷	۲۸۵۰۳	۲۵۸۷	۱۳۲۷
۱۳	۸۷۱۹	۱۵۰۰۳	۲۷۰۸۶	۱۰۹۹۱	۱۶	۹۶/۲	۸۲۲۲۱	۲۵۴۶۳	۱۹۲۴	۱۰۷۳
۱۴	۱۱۸۴۴	۱۴۹۹۸	۲۵۵۸۷	۱۶۷۶۲	۱۱/۹	۹۵/۵	۸۴۱۶۰	۲۸۰۴۶	۲۱۲۲	۱۳۱۶
۱۵	۱۲۰۰۱	۱۵۰۰۱	۲۵۲۰۹	۱۶۷۴۱	۱۱/۸	۹۵/۷	۸۴۳۵۳	۲۸۴۳۲	۱۹۹۶	۱۳۷۰
۱۶	۱۱۱۹۲	۱۵۰۰۳	۲۵۷۴۹	۱۵۶۵۱	۱۲/۶	۹۵/۷	۷۹۷۴۳	۲۹۳۷۲	۲۰۳۵	۱۳۹۱
۱۷	۷۳۶۹	۱۵۰۰۰	۲۸۱۵۷	۱۰۴۶۴	۱۶/۱	۹۵/۷	۶۰۱۷۱	۲۸۹۰۸	۱۷۲۷	۱۳۲۰
۱۸	۱۱۸۸۳	۱۴۹۹۹	۲۷۶۱۱	۱۶۱۵۱	۱۱/۶	۹۶/۱	۸۴۷۱۸	۳۳۷۴۶	۲۳۲۴	۱۴۳۸
۱۹	۱۱۹۴۸	۱۵۰۰۲	۲۷۰۸۶	۱۶۴۶۹	۱۱/۸	۹۵/۹	۸۷۱۴۶	۲۹۰۵۰	۲۳۲۳	۱۲۹۲
۲۰	۱۲۰۰۰	۱۶۱۱۸	۲۸۰۳۸	۱۶۶۴۳	۱۱/۶	۹۵/۵	۹۰۳۸۴	۳۱۰۴۶	۱۹۴۸	۱۳۰۰
۲۱	۱۲۰۰۰	۱۷۶۴۴	۲۶۴۴۶	۱۶۴۵۴	۱۲/۷	۹۵/۸	۹۴۷۰۸	۳۳۰۶۳	۲۰۰۷	۱۳۰۰
۲۲	۱۲۰۰۰	۱۸۰۰۵	۳۰۳۴۴	۱۶۴۵۰	۱۱/۹	۹۵/۹	۹۱۶۲۸	۳۳۵۳۶	۲۰۹۲	۱۳۶۱
۲۳	۱۱۹۹۹	۱۸۰۰۳	۳۱۴۲۵	۱۶۴۴۸	۱۲/۵	۹۵/۷	۹۰۰۰۹	۳۶۶۱۷	۲۲۸۰	۱۳۷۸
۲۴	۶۷۹۸	۱۸۰۰۱	۳۹۴۹۸	۱۱۸۲۶	۱۷/۹	۹۴/۲	۲۸۰۷۵	۳۴۸۸۶	۲۲۶۳	۱۰۷۸
۲۵	۱۱۳۰۵	۱۸۰۰۶	۳۲۷۶۳	۱۵۰۸۴	۱۲/۸	۹۶/۱	۸۸۲۴۲	۳۷۷۷۷	۲۳۹۵	۱۱۵۰
۲۶	۱۱۸۵۷	۱۸۰۰۱	۳۴۶۶۱	۱۶۳۸۷	۱۲/۶	۹۶	۸۵۱۸۸	۳۸۵۵۹	۱۹۹۲	۱۱۸۲
۲۷	۱۲۰۰۱	۱۹۸۶۲	۳۴۷۰۲	۱۶۳۸۱	۱۲/۳	۹۵/۹	۸۴۹۹۶	۴۲۸۱۱	۲۲۱۴	۱۱۵۲
۲۸	۷۱۹۴	۲۶۳۸۸	۳۰۱۰۹	۹۵۷۹	۱۱/۵	۹۲/۹	۵۴۹۷۰	۴۱۱۹۶	۴۴۹۰	۱۷۴۳
۲۹	۱۲۰۰۰	۲۷۰۰۰	۳۱۷۰۳	۱۷۱۶۷	۱۱/۷	۹۵/۸	۹۰۸۰۳	۴۴۷۲۲	۳۷۵۳	۱۱۸۱
۳۰	۱۲۰۰۰	۲۶۹۷۷	۳۳۵۹۱	۱۶۹۶۳	۱۰/۸	۹۵/۹	۹۹۳۴۳	۴۳۴۲۵	۴۰۱۱	۱۰۸۸
۳۱	۱۲۰۰۱	۲۷۰۰۱	۲۸۱۲۹	۱۷۳۰۸	۹/۸	۹۵/۸	۹۵۴۲۴	۴۲۶۰۵	۳۵۲۶	۹۳۵
۳۲	۱۱۹۹۰	۲۴۹۷۶	۳۸۵۸۰	۱۷۴۴۸	۱۰/۵	۹۵/۸	۱۰۸۹۹	۴۷۰۹۵	۳۵۵۱	۱۰۳۱
۳۳	۱۱۸۷۱	۱۸۰۸۱	۳۸۰۸۴	۱۶۸۰۵	۱۳/۵	۹۵/۵	۱۰۱۱۰	۴۲۳۹۵	۲۶۰۲	۱۴۳۵
۳۴	۱۱۹۹۶	۱۹۷۹۹	۳۷۲۰۸	۱۶۶۳۷	۱۲/۴	۹۶/۲	۹۹۳۲۴	۴۱۷۸۸	۲۶۹۷	۱۴۵۰
۳۵	۱۱۸۵۱	۲۱۸۳۹	۳۵۸۰۳	۱۶۵۵۳	۱۲/۲	۹۶/۱	۹۲۹۹۶	۴۱۲۱۷	۲۸۶۰	۱۲۰۳
۳۶	۱۱۵۲۶	۲۱۹۹۹	۲۶۷۴۴	۱۶۲۵۸	۱۲/۵	۹۶/۱	۹۱۳۱۴	۳۶۷۳۰	۲۵۴۵	۱۱۵۶

\* مقدار جریان‌ها در این جدول بر حسب کیلوگرم بر ساعت هستند.

جدول ۲ جدول تحلیل واریانس برای مدل آلکیلیت.

مقدار P	مقدار F	متوسط مجموع مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	منبع
<۰/۰۰۱	۱۲۰/۰۲	۱۷۰۵۸۶۴۵	۹	۱۵۳۵۲۷۸۰۸	مدل
۰/۰۰۱>	۱۷۷/۷۷	۲۵۲۲۸۳۸۹	۳	۷۵۶۸۵۱۶۸	جمله‌های خطی
۰/۰۰۱>	۴۷۲/۰۶	۶۷۰۶۸۳۱۷	۱	۶۷۰۶۸۳۱۷	A-Olefin
۰/۵۶۷	۰/۳۴	۴۷۷۷۹	۱	۴۷۷۷۹	B-LPG
۰/۰۰۸	۸/۱۹	۱۱۶۲۴۹۰	۱	۱۱۶۲۴۹۰	C-ISO
۰/۰۳۹	۳/۲۳	۴۵۷۹۵۲	۳	۱۳۷۳۸۵۵	جمله‌های درجه دوم
۰/۲۷۵	۱/۲۴	۱۷۶۴۳۶	۱	۱۷۶۴۳۶	A <sup>2</sup>
۰/۳۵۸	۰/۸۸	۱۲۴۳۰۱	۱	۱۲۴۳۰۱	B <sup>2</sup>
۰/۰۳۰	۵/۲۵	۷۴۴۹۸۱	۱	۷۴۴۹۸۱	C <sup>2</sup>
۰/۰۱۹	۳/۹۳	۵۵۷۳۸۶	۳	۱۶۷۲۱۵۸	جمله‌های برهم‌کنش
۰/۰۶۷	۳/۶۶	۵۱۸۹۴۸	۱	۵۱۸۹۴۸	AB
۰/۰۱۱	۷/۶	۱۰۷۸۱۸۸	۱	۱۰۷۸۱۸۸	AC
۰/۰۵۶	۴/۰۱	۵۶۸۸۳۸	۱	۵۶۸۸۳۸	BC
		۱۴۱۹۱۵	۲۶	۳۶۸۹۷۷۷	باقیمانده

در این مدل جمله‌هایی که مقدار p آنها کوچکتر از ۰/۰۵ است در مدل رگرسیون اهمیت بیشتری دارند. با توجه به جدول ۲ جمله‌های خطی (A) و (C)؛ جمله‌ی درجه دوم (C<sup>2</sup>) و جمله‌های برهم‌کنش (A.C) و (B.C) برای مدل آلکیلیت با اهمیت هستند. بنابراین جمله خطی (B)؛ جمله‌های درجه دوم (A<sup>2</sup>)، (B<sup>2</sup>) و جمله برهم‌کنش (A.C) کم‌اهمیت هستند. جمله‌های خطی با اهمیت‌ترین، سپس جمله‌های برهم‌کنش و در آخر جمله‌های درجه ۲ با اهمیت هستند. همچنین تولید آلکیلیت با مقدار اولفین ورودی به راکتور رابطه مستقیم دارد. اولفین در واقع یکی از واکنش دهنده‌های تولید محصول آلکیلیت است و بنابراین تاثیر مثبت آن قابل انتظار است. تاثیر مثبت جریان اولفین به صورت خطی در مدل مشاهده شد. مدل ارائه شده برای آلکیلیت در معادله ۱۰ به خوبی نشان دهنده این موضوع است.

$$IC_4/O = 12.6649 + 1.448E - 04 A - 2.95E - 04 B + 5.707E - 04 C - 1.15E - 07 A^2 + 7.077E - 08 A \times B - 2.37E - 08 B \times C$$

(۱۱)

در این مدل جمله‌هایی که مقدار p آنها کوچکتر از ۰/۰۵ است در مدل رگرسیون اهمیت بیشتری دارند. با توجه به جدول ۲ جمله‌های خطی (A) و (C)؛ جمله‌ی درجه دوم (C<sup>2</sup>) و جمله‌های برهم‌کنش (A.C) و (B.C) برای مدل آلکیلیت با اهمیت هستند. بنابراین جمله خطی (B)؛ جمله‌های درجه دوم (A<sup>2</sup>)، (B<sup>2</sup>) و جمله برهم‌کنش (A.C) کم‌اهمیت هستند. جمله‌های خطی با اهمیت‌ترین، سپس جمله‌های برهم‌کنش و در آخر جمله‌های درجه ۲ با اهمیت هستند. همچنین تولید آلکیلیت با مقدار اولفین ورودی به راکتور رابطه مستقیم دارد. اولفین در واقع یکی از واکنش دهنده‌های تولید محصول آلکیلیت است و بنابراین تاثیر مثبت آن قابل انتظار است. تاثیر مثبت جریان اولفین به صورت خطی در مدل مشاهده شد. مدل ارائه شده برای آلکیلیت در معادله ۱۰ به خوبی نشان دهنده این موضوع است.

جدول ۳ مربوط به نتایج تحلیل واریانس برای نسبت

جدول ۳ جدول تحلیل واریانس برای مدل نسبت ایزوبوتان به اولفین، عدد اکتان، ایزوبوتان برگشتی.

ایزوبوتان برگشتی		عدد اکتان		ایزوبوتان/اولفین		عواملها
مقدار P	مقدار F	مقدار P	مقدار F	مقدار P	مقدار F	
>0.001	۵۸/۱۴	>0.001	۶۲/۰۶	>0.001	۸۳/۳۴	جمله های خطی
>0.001	۱۲۳/۸	>0.001	۱۲۲/۹۴	>0.001	۴۶/۳۶	A- Olefin
۰/۵۲۹	۰/۴۱	>0.001	۵۸/۷۳	>0.001	۹۲/۳۴	B-LPG
۰/۲۴۳	۱/۴۳	۰/۰۷۵	۳/۴۴	۰/۰۱۴	۷/۰۱	C-Iso
۰/۴۶۴	۰/۸۸	۰/۰۰۷	۵/۰۶	۰/۰۹۱	۲/۴	جمله های درجه ۲
۰/۱۷۵	۱/۹۴	۰/۰۲۲	۵/۹۵	۰/۰۷۱	۳/۵۴	A <sup>2</sup>
۰/۴۷۱	۰/۵۴	۰/۰۳۷	۴/۸۲	۰/۳۸۲	۰/۷۹	B <sup>2</sup>
۰/۶۰۲	۰/۲۸	۰/۸۶۳	۰/۰۳	۰/۶۵۹	۰/۲	C <sup>2</sup>
>0.001	۰/۱۲	>0.001	۲۷/۸۶	>0.001	۱۳/۲۸	جمله های برهم کنش
۰/۵۲۲	۰/۴۲	>0.001	۸۱/۳	>0.001	۲۵/۵۲	AB
>0.001	۱۸/۹۷	۰/۲۵۶	۱/۳۵	۰/۴۱۶	۰/۶۸	AC
۰/۲۳۲	۱/۵	۰/۳۱۹	۱/۰۳	۰/۰۱۸	۶/۷۳	BC
R <sub>adj</sub> = ۰.۸۷/۷۵		R <sub>adj</sub> = ۰.۸۱		R <sub>adj</sub> = ۰.۹۱/۱۱		
F <sub>reg</sub> = ۲۸/۸۵		F <sub>reg</sub> = ۲۹		F <sub>reg</sub> = ۸۴/۴۰		

$$\text{Octane number} = 99.2727 + 4.552E - 04 A - 3.6E - 04 B - 1.27E - 04 C - 7.91E - 08 A^2 - 6.19E - 09 B^2 + 5.24E - 08 A \times B + 9.844E - 09 A \times C$$

(۱۲)

جدول ۳ نتایج تحلیل واریانس ایزوبوتان برگشتی به راکتور ارائه می دهد. با توجه به ضریب همگرایی (R<sup>2</sup> ۰.۸۷/۷۵) و مقدار F برابر با ۲۵/۸۵ مدل رگرسیون منعکس کننده پاسخها بوده و معنادار است. طبق جدول ۴ فقط جمله خطی (A) و جمله برهم کنش (A.C) با اهمیت هستند. جمله های دیگر مدل رگرسیون که شامل جمله های خطی (B) و (C)، جمله های درجه دوم (A<sup>2</sup>، B<sup>2</sup>، C<sup>2</sup>) و جمله های برهم کنش (A.B) و (B.C) تاثیر کمتری دارند. با توجه به این نتایج جمله های خطی و برهم کنش اهمیت بالاتری نسبت به جمله های درجه دوم دارند. مقدار ایزوبوتان برگشتی تحت تاثیر جریان های اولفین و ایزومریت است. جریان خوراک ایزومریت بر مقدار جریان برگشتی ایزوبوتان به راکتورها تاثیر مستقیم دارد.

در جدول ۳ نتایج تحلیل واریانس برای عدد اکتان مشاهده می گردد. مقدار ضریب همگرایی (R<sup>2</sup>) برابر ۰.۸۷/۸۱ حاکی از مناسب بودن مدل است. مقدار F برابر ۲۹ نیز معنادار بودن مدل را بیان می کند. جمله های خطی (A) و (B)، جمله های درجه دوم (A<sup>2</sup>)، (B<sup>2</sup>) و جمله برهم کنش (A.B) در این مدل با اهمیت هستند. همچنین جمله خطی (C)، درجه دوم (C<sup>2</sup>) و جمله های برهم کنش (A.C) و (B.C) بی اهمیت هستند. در این مدل جمله های (A) و (B) نقش و اهمیت بالاتری نسبت به جمله های مربوط به (C) دارند. همچنین از نظر اهمیت به ترتیب جمله های خطی، درجه دوم و برهم کنش در اولویت هستند. مدل پاسخ عدد اکتان که با معادله ۱۲ ارائه می شود، تحت تاثیر مستقیم مقدار جریان اولفین است. در واقع هرچه مقدار جریان اولفین بیشتر شود تاثیر مستقیم بر کیفیت و عدد اکتان آلکیلیت دارد. با توجه به مدل ارائه شده، اثر اولفین به صورت خطی بوده و جمله های برهم کنش (AB) و (AC) در مدل وجود دارد.



جدول ۴ جدول نتایج بهینه‌سازی فرآیند آلکیلاسیون.

شرایط بهینه	هدف	پاسخ
۶/۱۶۲۶۲	بیشینه	آلکیلیت (kg/h)
۸۶۸۴/۱۰	۸ تا ۱۱	نسبت ایزوبوتان به اولفین
۶۹۳۲/۹۵	بیشینه	عدد اکتان
۱/۹۰۶۰۴	کمینه	ایزوبوتان برگشتی (kg/h)
۷/۴۳۸۹۸	بیشینه	نرمال بوتان (kg/h)
۷۱/۳۸۹۳	بیشینه	پروپان (kg/h)
۸۴/۱۱۴۰	کمینه	سولفوریک اسید (kg/h)
		عامل‌ها
۱۱۶۰۳/۶	در محدوده	اولفین (kg/h)
۲۷۰۰۰/۹	در محدوده	ال‌پی‌جی (kg/h)
۳۳۰۱۸/۵۴	در محدوده	ایزومریت (kg/h)

به وجود نرمال بوتان در خود، بیشترین تاثیر را در مدل حاصل برای جریان نرمال بوتان دارا می‌باشد. مدل حاصل برای این پاسخ که با رابطه ۱۴ بیان می‌شود، به خوبی بیان کننده این مطلب است که اثر مستقیم این خوراک به صورت جمله‌های خطی و درجه دوم است.

$$nC_4 = 9144.33 - 2.357 A + 0.5313 B + 0.6846 C + 4.437E - 05 B^2 + 1.024E - 04 A \times C - 5.1E - 05 B \times C \quad (14)$$

جدول شماره ۴ نتایج واریانس برای محصول پروپان را ارائه می‌دهد. طبق این اطلاعات مدل رگرسیون با  $(R^2 = 91/48\%)$  به خوبی با پاسخ‌ها متناسب است. مقدار F نیز برابر  $42/75$  است که معنادار بودن مدل را بیان می‌کند. با توجه به این نتایج جمله‌های خطی (B) و (C)، جمله‌ی درجه دوم  $(B^2)$  و جمله‌های برهم‌کنش (A.B) و (B.C) در مدل رگرسیون تاثیرگذار هستند. در این مدل جمله خطی (B)، جمله‌های درجه دوم  $(C^2)$ ،  $(A^2)$  و جمله برهم‌کنش (A.C) نیز بی‌اهمیت‌اند. جمله‌های خطی سپس

این تاثیر به علت وجود درصد قابل توجهی از ایزوبوتان در جریان خوراک ایزومریت است. تاثیر مستقیم این خوراک به صورت جمله‌های خطی و برهم‌کنش (AC) در مدل وجود دارد که توسط رابطه ۱۳ بیان می‌گردد.

$$iC_4 = 3.21E - 05 - 16.9452 A - 3.0485 B - 10.4021 C + 7.79E - 04 A \times C + 1.081E - 04 B \times C \quad (13)$$

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل واریانس برای جریان محصول نرمال بوتان واحد آلکیلاسیون در جدول ۵ ارائه شده است. طبق این نتایج، با ضریب همگرایی  $(R^2)$  برابر  $94/86\%$  و مقدار F برابر  $72/76$  مدل رگرسیون مناسب بوده و معنادار است. طبق این مدل تمام جمله‌های درجه اول، جمله درجه دوم  $(B^2)$  و جمله‌های برهم‌کنش (A.C) و (B.C) در مدل تاثیرگذارند. همچنین جمله‌های درجه دوم  $(C^2)$ ،  $(A^2)$  و جمله‌ی برهم‌کنش (A.B) بی‌اهمیت هستند. با اهمیت‌ترین جمله‌ها ابتدا جمله خطی، سپس جمله برهم‌کنش و در آخر جمله‌های درجه دوم هستند. مقدار دبی خوراک ال‌پی‌جی با توجه

جدول ۵ جدول تحلیل واریانس برای مدل نرمال بوتان، پروپان، اسید سولفوریک.

اسید سولفوریک		پروپان		نرمال بوتان		عامل ها
مقدار P	مقدار F	مقدار P	مقدار F	مقدار P	مقدار F	
۰/۱۹۲	۱/۷	۰/۰۰۱ >	۷۷/۲۱	۰/۰۰۱ >	۳۳/۴۶	جمله های خطی
۰/۶۰۹	۰/۲۷	۰/۰۹۷	۲/۹۷	۰/۰۰۱ >	۱۳/۶۳	A- Olefin
۰/۱۶۱	۲/۰۹	۰/۰۰۱ >	۲۲۸/۸۴	۰/۰۰۱ >	۷۶/۱۷	B-LPG
۰/۷۷۹	۰/۰۸	۰/۰۱۴	۶/۹۵	۰/۰۰۱ >	۳۱/۸۳	C-ISO
۰/۰۰۲	۶/۹	۰/۰۰۲	۶/۷۵	۰/۲۰۹	۱/۶۲	جمله های درجه ۲
۰/۶۵۱	۰/۲۱	۰/۱۰۴	۲/۸۵	۰/۷۰۶	۰/۱۵	A <sup>2</sup>
۰/۰۰۱ >	۱۳/۹۱	۰/۰۰۱ >	۱۸/۶۷	۰/۰۵۳	۴/۱۱	B <sup>2</sup>
۰/۲۶	۱/۳۳	۰/۳۰۳	۱/۱	۰/۹۳۹	۰/۰۱	C <sup>2</sup>
۰/۰۰۷	۵/۱۱	۰/۰۰۱ >	۱۴/۸۱	۰/۰۲۳	۳/۷۷	جمله های برهم کنش
۰/۲۷	۱/۲۷	۰/۰۰۱ >	۳۲/۵۹	۰/۰۸۸	۳/۱۴	AB
۰/۰۴۲	۴/۵۸	۰/۸۳۵	۰/۰۴	۰/۰۳۴	۴/۹۹	AC
۰/۰۰۱ >	۱۴/۱۶		۵/۶۸	۰/۰۱۲	۷/۲۳	BC
R <sub>adj</sub> = ۰/۸۶/۱۳		R <sub>adj</sub> = ۰/۹۱/۴۸		R <sub>adj</sub> = ۰/۹۴/۸۶		
F <sub>reg</sub> = ۱۲/۸۱		F <sub>reg</sub> = ۴۲/۷۵		F <sub>reg</sub> = ۷۲/۷۶		

برهم کنش و در آخر درجه دوم به ترتیب با اهمیت هستند. با توجه به وجود پروپان در جریان خوراک ال پی جی، این محصول بیشتر تحت تاثیر مقدار جریان خوراک ال پی جی ورودی به فرآیند است. این تاثیر مستقیم به به صورت جمله های درجه دوم و برهم کنش (BC) در مدل رابطه ۱۵ ظاهر می شود. تایج ارائه شده برای مدل پروپان به خوبی تاثیر خوراک ال پی جی را بر محصول پروپان بیان می کند.

برهم کنش و در آخر درجه دوم به ترتیب با اهمیت هستند. با توجه به وجود پروپان در جریان خوراک ال پی جی، این محصول بیشتر تحت تاثیر مقدار جریان خوراک ال پی جی ورودی به فرآیند است. این تاثیر مستقیم به به صورت جمله های درجه دوم و برهم کنش (BC) در مدل رابطه ۱۵ ظاهر می شود. تایج ارائه شده برای مدل پروپان به خوبی تاثیر خوراک ال پی جی را بر محصول پروپان بیان می کند.

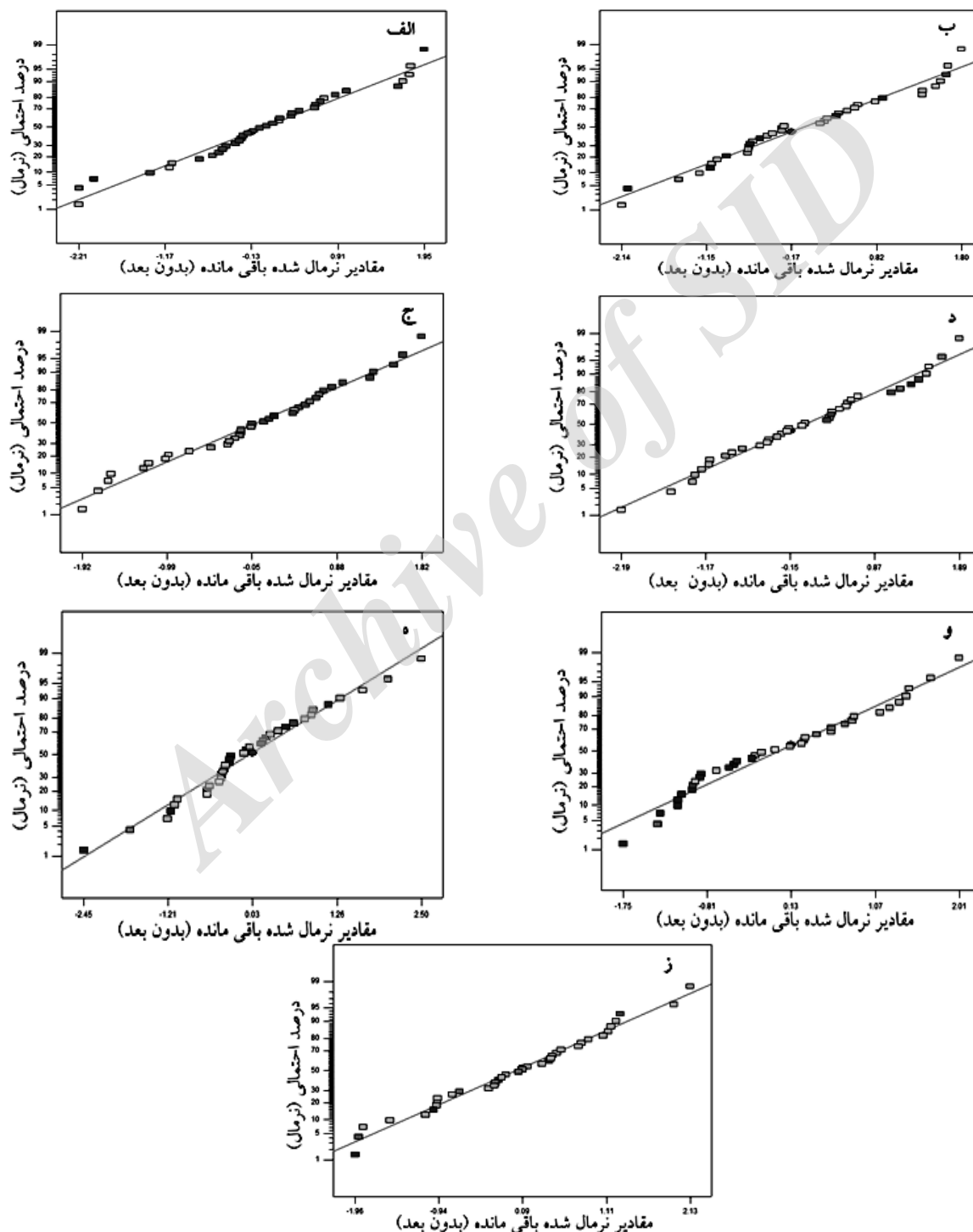
$$C_3 = -1492.14 + 1.4192 A - 0.2821 B - 0.1102 C - 4.72E-05 A^2 + 1.261E-05 B^2 - 2.78E-05 A \times B + 6.955E-06 B \times C \quad (14)$$

خوبی بیان کننده این مورد است. Acid = 96.9815 + 0.1389 A + 0.0628 B - 7.66E-03 C + 4.42E-06 B<sup>2</sup> - 1.72E-05 A × B + 6.089E-06 A × C - 2.44E-06 B × C (۱۶)

نتایج تحلیل واریانس کاتالیزور اسید سولفوریک در جدول ۴ ارائه شده است. مدل رگرسیون این پاسخ دارای ضریب همگرایی R<sup>2</sup> برابر با ۰/۷۵/۷۷ و مقدار F برابر با ۱۲/۸۱ است. با وجود اینکه دقت این مدل

بعضی مقالات، مدل با ضریب برازش در حدود ۰/۷۸ نیز معتبر اعلام شده است [۱۸]. همچنین طبق گزارش نرم‌افزار این مدل‌ها به خوبی منعکس کننده پاسخ‌ها بوده‌اند. شکل ۲ شامل نمودارهای احتمال نرمال - خطای پاسخ‌ها بوده است.

مدل‌هایی که برای فرآیند آلکیلاسیون به دست آمد برای پیش‌بینی مقادیر پاسخ‌ها در محدوده تغییرات متغیرهای ورودی قابل استفاده است. میانگین ضرایب برازش برای پاسخ‌های مختلف در حدود ۰/۹ بوده که با توجه به صنعتی و واقعی بودن اطلاعات فرآیندی طبیعی است. ضمن اینکه در



شکل ۲ نمودار احتمال نرمال - خطای پاسخ‌ها برای مدل: (الف) مقدار آلکیلیت، (ب) نسبت ایزوبوتان به اولفین، (ج) عدد اکتان، (د) جریان ایزوبوتان برگشتی، (ه) جریان نرمال بوتان، (و) جریان پروپان، (ز) مقدار اسید سولفوریک مصرفی.

داشته باشند. همچنین در بهینه‌سازی انجام شده همزمان با بیشینه شدن مقدار محصولات ایزوبوتان برگشتی و مصرف اسید سولفوریک کمینه شده است. از آن جایی که بهینه‌سازی انجام شده بر مبنای اطلاعات صنعتی و بر روی مدل پاسخ سطح با درصد اطمینان ۹۹٪ به دست آمده است؛ این بهینه‌سازی در این واحد قابلیت اجرایی شدن را دارا است.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش تاثیر متغیرهای ورودی بر متغیرهای خروجی در فرآیند آلکیلاسیون با استفاده از روش پاسخ سطح مطالعه شد. با توجه به ضریب همگرایی برازش ( $R^2$ ) برای همه مدل‌ها و با استفاده از تحلیل واریانس، مدل ریاضی چند جمله‌ای درجه دوم ارائه شده برای توصیف رفتار پاسخ‌ها در مقابل تغییرات متغیرهای ورودی مناسب است. یکی دیگر از نتایج این مطالعه بهینه‌سازی هم زمان پاسخ‌ها در فرآیند آلکیلاسیون به کمک روش پاسخ سطح می‌باشد. طبق نتایج حاصل از بهینه‌سازی، متغیرهای ورودی و خروجی (پاسخ‌ها) در شرایط مناسب عملیاتی قرار گرفته‌اند. با توجه به این نتایج، مقدار محصول آلکیلیت  $16262/6 \text{ kg/h}$ ، نسبت ایزوبوتان به اولفین در راکتور  $10/8684$ ، عدد اکتان  $95/6932$ ، مقدار جریان ایزوبوتان برگشتی  $90604/1 \text{ kg/h}$ ، مقدار جریان نرمال بوتان  $43898/7 \text{ kg/h}$ ، مقدار جریان پروپان  $3893/71 \text{ kg/h}$  و مقدار جریان سولفوریک اسید  $1140/84 \text{ kg/h}$  است. مقدار جریان برگشتی ایزوبوتان به راکتور با حفظ محدوده مناسب برای نسبت ایزوبوتان به اولفین در راکتور، حداقل شد که باعث کاهش هزینه‌ها از جمله هزینه پمپ کردن آن می‌شود. همچنین محصول آلکیلیت با عدد اکتان بالای ۹۵ و محصولات دیگر حاضر در فرآیند حداکثر شد. واضح است که با حداکثر شدن تولید این محصولات با حفظ شرایط عملیاتی واحد آلکیلاسیون و کیفیت آن‌ها نتایج

در این نمودار، پاسخ‌ها ( $Y_{(i)}$ ) در مقابل تابع نرمال استاندارد کوانتیل  $\phi^{-1}(c_i)$  رسم می‌شود و نشان دهنده نحوه پراکنده شدن خطاها است. خطاها اختلاف بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده پاسخ‌ها توسط مدل هستند. توزیع مناسب و نرمال نقاط اطراف خط راست نشان دهنده توزیع مناسب خطاها هستند. با توجه به این نمودارها از آنجایی که خطاها به صورت نرمال پراکنده شده‌اند، مدل‌ها معنادار بوده و پاسخ‌های پیش‌بینی شده با اطلاعات واقعی سازگاری دارد.

### بهینه‌سازی

بهینه‌سازی فرآیندهای صنعتی به دلیل تاثیر مستقیم بر روی کیفیت محصول و شرایط اقتصادی فرآیند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در خلال 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 [۱۸]. با استفاده از بهینه‌سازی عددی شرایط بهینه برای ۷ متغیر پاسخ در محدوده متغیرهای مستقل انجام شد که نتایج حاصل از آن در جدول ۵ ارائه می‌شود. در این روش عامل‌هایی که در سودآوری واحد تاثیر مثبت دارند بیشینه و هم‌زمان عامل‌هایی که تاثیر منفی دارند کمینه می‌شوند. بنابراین توابع هدف و قیدها به گونه‌ای تعیین شده‌اند که سودآوری واحد حداکثر شود. در واقع در این پژوهش هدف به حداکثر رساندن یک تابع هدف ریالی نبوده، بلکه با بشینه و کمینه کردن عامل‌های مثبت و منفی به طور هم‌زمان سودآوری واحد حداکثر شد. بهینه‌سازی با استفاده از بخش بهینه‌سازی عددی در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت انجام شد. این روش بهینه‌سازی در بسیاری از پژوهش‌های دیگر انجام شده و نتایج معتبری دارا می‌باشد. در جدول ۵ بیشینه مقدار محصولات به نحوی محاسبه شده است که مقادیر اولفین، ال پی جی و ایزومریت در محدوده عملیاتی خود قرار

1. Standard Normal Quantile Function

$e_i$ : خطا در مدل پاسخ سطح	بهینه‌سازی حاضر منجر به حداکثر شدن سودآوری در واحد می‌شود.
$R^2$ : ضریب تعیین مدل	
$\beta_0$ : عدد ثابت در مدل پاسخ سطح	<b>علائم و نشانه‌ها</b>
$\beta_i$ : ضریب خطی در مدل پاسخ سطح	$A$ : مقدار جریان اولفین
$\beta_{ii}$ : ضریب درجه دوم در مدل پاسخ سطح	$B$ : مقدار جریان ال پی جی
$\beta_{ij}$ : ضریب برهمکنش در مدل پاسخ سطح	$C$ : مقدار جریان ایزومریت
$\eta$ : تابع پاسخ در روش پاسخ سطح	$n$ : تعداد آزمایش‌ها
$\phi_i$ : تابع نرمال استاندارد کوانتیل	$P$ : تعداد عامل‌های مدل

### مراجع

- [1]. Sun W., Shi Y., Chen J., Xi z. and Zhao L., "Alkylation kinetics of isobutane by  $C_4$  olefins using sulfuric acid as catalyst", Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 52, pp. 15262-15269, 2013.
- [2]. Albright L. F., "Alkylation of isobutane with  $C_3$ - $C_5$  olefins to produce high-quality gasoline: Physicochemical sequence of events", Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 42, pp. 4283-4289, 2003.
- [3]. Rangaiah G. P., "Multi-objective optimization: techniques and applications in chemical engineering", Vol. 1, worlds scientific Inc., 2009.
- [4]. Payne R. E., "Alkylation - what you should know about this process", Petroleum Refiner, Vol. 37, pp. 316-329, 1958.
- [5]. Sauer R. N., Colville A. R. and Burwick C. W., "Computer points way to more profits", Hydrocarbon Processing, Vol. 84, 1964.
- [6]. Bracken J. and McCormick G. P., "Selected applications of nonlinear programming", Research Analysis Corp Mclean va, 1968.
- [7]. Dembo R. S., "A set of geometrie programming test problems and theirsolutions", Math.Program., Vol. 10, PP. 192-213, 1976.
- [8]. Torres F., José M., García N. and Antonio J., "Isobutane alkylation process synthesis by means of hybrid simulation-multiobjective optimization", Proceedings of the 24<sup>th</sup> European Symposium on Computer Aided Process Engineering, Budapest, Hungary, 2014.
- [9]. Dragnea P. and Bildea C. S., "Process optimization of a butane-butene alkylation plant", U.P.B. Sci. Bull., Vol. 76, ISSN. 1454 – 2331, 2014.
- [10]. Ahmad Rasyid M. F., Salim H. M. Akil. and Ishak Z. A. M., "Optimization of processing conditions via response surfacemethodology (RSM) of nonwoven flax fibre reinforced acrodurbiocomposites", 5<sup>th</sup> International Conference on Recent Advances in Materials, Minerals and Environment(RAMM) & 2<sup>nd</sup> International Postgraduate Conference on Materials, Mineral and Polymer(MAMIP), Universiti Sains Malaysia, PP. 469 – 476, 2016.
- [11]. Noshadi I., Amin N. A. S. and Parnas R. S., "Continuous production of biodiesel from waste cooking oil in a reactive distillation column catalyzed by solid heteropolyacid: optimization using response surface methodology

(RSM)", Fuel., Vol. 94, pp. 156-164, 2012.

[12]. Elfghi F. M. and Amin N. A. S., "Applying response surface methodology to assess the combined effect of process variables on the composition and octane number of reformat in the process of reducing aromatization activity in catalytic naphtha reforming", React. Kinet. Mech. Cat., Vol. 111, pp. 89-106, 2014.

[13]. Adzamic Z., Adzamic T., Muzic M. and Bionda K. S., "Optimization of the n-hexane isomerization process using response surface methodology", Chemical Engineering Research and Design, Vol. 91, No. 1, pp. 100-105, 2013.

[14]. Atashi H., Razmjooei, S., Khorashadizadeh, M., Shiva, M., Tabrizi, F. F., and Mousavi, S. A. H. S., "Effects of operating conditions on selectivity of Fe-Co-Mn/MgO at high temperature CO hydrogenation", Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, Vol. 54, pp. 83-90, 2015.

[15]. Holbrook D. L., "Handbook of petroleum refining processes", Meyers RA. (Eds), McGraw Hill Inc., 1996.

[16]. Han H. Z., Li B. X., Wu H. and Shao W., "Multi-objective shape optimization of double pipe heat exchanger with inner corrugated tube using RSM method", Int. J. Therm. Sci., Vol. 90, PP. 173-186, 2015.

[17]. Montgomery D. C., and Myers R. H., "Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments", Raymond H. Meyers and Douglas C. Montgomery, A Wiley-Interscience Publications, 1995.

[18] Šumić Z., Vakula A., Tepić A., Čakarević J., Vitas J. and Pavlić B., "Modeling and optimization of red currants vacuum drying process by response surface methodology (RSM)", Food Chem., Vol. 203, PP. 465-475, 2016.

Archive of SID