

مجموعه مقالات ششمین کنفرانس انرژی و محیط زیست

دوم دی ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجربان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران

و هم اندیشان انرژی کیمیا

www.Energyconf.ir



## تحلیل انرژی و اکسرژی برج‌های فرایند تولید اتیلن پتروشیمی مروارید

راضیه فریدون رجبی: کارشناسی ارشد مهندسی شیمی دانشکده مهندسی دانشگاه اصفهان

مسعود بهشتی: دانشیار گروه مهندسی شیمی دانشکده مهندسی دانشگاه اصفهان

یونس قلاوند: استادیار گروه مهندسی شیمی دانشکده مهندسی دانشگاه اصفهان

[Pariya\\_rajabi@yahoo.com](mailto:Pariya_rajabi@yahoo.com)

### چکیده

در این پژوهش با استفاده از تحلیل اکسرژی بر روی برج‌ها و روش سطح پاسخ (RSM)، کاهش مصرف انرژی در فرایند تولید اتیلن پتروشیمی مروارید به صورت مطالعه موردی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور ابتدا فرایند تولید اتیلن شبیه‌سازی شده و اعتبارسنجی با داده‌های صنعتی صورت گرفته است، سپس با نوشتن موازنه اکسرژی بر روی برج‌های فرایند، راندمان اکسرژی و برگشت‌ناپذیری برج‌ها محاسبه شده است. روش سطح پاسخ که یک روش آماری شناخته شده جهت بهینه‌سازی و مدل‌سازی فرایندهای شیمیایی می‌باشد به منظور بهینه کردن پارامترهای عملیاتی در برج‌های فرایند بکار گرفته شده است. در این روش هدف، به حداقل رساندن میزان هدررفت اکسرژی در برج‌ها با در نظر گرفتن محدودیت‌های فرایندی و مهندسی در آن‌ها می‌باشد. در نتیجه بهینه‌سازی صورت گرفته شده در برج‌های این فرایند میزان هدررفت اکسرژی ۹۶۹۱۹۲۰ کیلو ژول در ساعت کاهش یافته است.

**واژگان کلیدی:** اتیلن، تحلیل اکسرژی، هدررفت اکسرژی، بازده اکسرژی، روش RSM



## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر بحران انرژی ناشی از کاهش منابع انرژی‌های فسیلی و افزایش قیمت آن، یکی از مسائل مهم و روز دنیا گردیده و پیش‌بینی شده‌است که انرژی فسیلی جهان تا سال‌های آینده به پایان می‌رسد. از این رو کشورهای دارای منابع انرژی فسیلی، در تلاش برای حفظ این منابع می‌باشند. این امر منجر به کاهش تولید نفت و گاز طبیعی می‌شود که در نتیجه افزایش روزافزون قیمت نفت و محصولات صنایع مختلف را در پی دارد. همچنین آلودگی محیط‌زیست، قانون‌های گذاشته‌شده و جریمه‌های سنگین جهت کاهش گازهای گلخانه‌ای لزوم کاهش مصرف انرژی را واضح‌تر نشان می‌دهد. به همین دلیل سیاست‌گذاران و صاحبان صنایع در دنیا به فکر چاره‌ای افتادند که حاصل آن ابداع طرح‌های گوناگون برای روبه‌رو شدن با این موضوع در طی سال‌های اخیر می‌باشد. یک روش مؤثر، صرفه‌جویی و بهینه‌سازی مصرف انرژی است که برای دست یافتن به این هدف راهکارهای گوناگونی ارائه شده است. با توجه به مصرف قابل توجه حامل‌های انرژی در صنایع شیمیایی لازم می‌باشد راهکارهایی برای بهبود مصرف انرژی مدنظر قرار گیرد. یکپارچه‌سازی فرآیند ابزار بسیار مهمی برای بهبود بازده مصرف انرژی برای واحدهای فرآیندهای شیمیایی و تولیدی می‌باشد. از روش‌های یکپارچه‌سازی حرارتی و قدرتی فرآیند می‌توان فناوری پینچ<sup>۱</sup>، تحلیل اکسرژی<sup>۲</sup> و تحلیل ترکیبی پینچ و اکسرژی نام برد. با تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی یک فرآیند، می‌توان راندمان ترمودینامیکی را پیدا کرده و به بهینه‌سازی فرآیند مورد نظر پرداخت [1].

طبق قانون دوم ترمودینامیک در فرآیند واقعی آنتروپی تولید شده متناظر با از دست رفتن اکسرژی و نابودی آن در فرآیند می‌باشد. بنا براین تعریف، اکسرژی حداکثر کار مفیدی است که از مقدار مشخصی از انرژی یا جریانی از مواد، حاصل می‌شود. در تحلیل اکسرژی هدف اصلی تعیین محل و مقدار برگشت ناپذیری‌ها طی فرآیند‌های ترمودینامیکی مختلف و عوامل مؤثر بر تولید این برگشت ناپذیری می‌باشد. در تحلیل اکسرژی سعی می‌شود با به کارگیری همزمان قانون اول و دوم ترمودینامیک و استفاده از محیط پیرامون به عنوان حالت مرجع بیشترین کار تولید شده در سیکل، به دست بیاید. اگر ماده، ضمن یک فرآیند برگشت‌پذیر از حالت اولیه خود به حالت مرده برسد در این صورت حداکثر کار برگشت‌پذیر به دست می‌آید که آن را اکسرژی یا قابلیت انجام کار مفید ماده می‌نامند. حالت مرده به حالتی از ماده گفته می‌شود که در آن ماده با محیط در تعادل حرارتی، مکانیکی و شیمیایی قرار بگیرد. در حالت مرده دمای ماده برابر با دمای محیط، فشار ماده برابر با فشار اتمسفر، سرعت ماده نسبت به محیط صفر و پتانسیل شیمیایی آن نیز صفر باشد.

تحلیل اکسرژی یک فرآیند شیمیایی بعد از موازنه جرم و انرژی سومین مرحله در تحلیل یک فرآیند می‌باشد. به تعبیری دیگر در فرآیندهای واقعی که غیر ایده‌ال هستند همواره مقداری تلفات پتانسیل و کاهش توانایی انجام کار مفید وجود دارد. هدف عمده از محاسبه تلفات اکسرژی، یافتن میزان فاصله یک فرآیند واقعی نسبت به یک فرآیند برگشت‌پذیر ایده‌ال است.

<sup>۱</sup> Pinch

<sup>۲</sup> Exergy

## مجموعه مقالات ششمین کنفرانس انرژی و محیط زیست

دوم دی ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران

و هم‌اندیشان انرژی کیمیا

www.Energyconf.ir



پس از آن است که تلاش برای کاهش فاصله مذکور صورت می‌گیرد چرا که در عمل نمی‌توان دقیقاً به اهداف ایده‌آل مورد نظر در یک فرایند برگشت پذیر رسید. بهینه‌سازی یک فرایند واقعی به منظور کاهش فاصله آن نسبت به فرایند ایده‌آل، نیازمند این آگاهی است که هر جزء از تلفات اکسرژی مربوط به کدام قسمت از فرایند می‌باشد. در فرایندهای شیمیایی عوامل برگشت ناپذیری به صورت عمده شامل واکنش‌های شیمیایی برگشت ناپذیر و انتقال حرارت بین جریان‌ها، تجهیزات فرایندی و محیط اطراف می‌باشد.

معمولاً در موازنه انرژی قانون اول را در یک محیط بسته استفاده می‌کنیم بنابراین هیچگاه احتمال اتلاف انرژی بررسی نمی‌شود مگر انرژی منتقل شده به محیط که غیر قابل استفاده می‌باشد. برای دقت در بیان برگشت‌ناپذیری باید از تحلیل اکسرژی استفاده کنیم. بسیاری از کاربردهای مفهوم اکسرژی<sup>۱</sup> را که براساس تکنیک‌های اکسرژی پایه‌ریزی شده‌اند می‌تواند برای کاهش مصرف انرژی در صنایع به کار بروند که باعث کاهش اتلاف انرژی و انعطاف‌پذیری فرایندها از لحاظ اقتصادی و زیست محیطی می‌شوند. از این رو تحلیل اکسرژی می‌تواند اطلاعات بسیار مفیدی را در راستای عملکرد و اصلاح و بهینه‌سازی آنها فراهم سازد. علت استفاده از روش اکسرژی در فرایندهای شیمیایی این است که به کمک آن می‌توان انواع انرژی مانند انرژی الکتریکی و انرژی مکانیکی را به یک مقیاس تبدیل نمود و در نتیجه قابل مقایسه با همدیگر هستند [2].

لیگاف و همکاران به بررسی کاربرد تحلیل اکسرژی در برج‌های تقطیر پرداخته‌اند. با توجه اینکه در برج‌های تقطیر هم انتقال گرما و هم انتقال جرم صورت می‌گیرد، از این رو می‌توان گفت یک برج تقطیر به صورت یک مبدل اکسرژی عمل می‌کند، که اکسرژی حرارتی را تبدیل به اکسرژی شیمیایی می‌کند. آنها برای اینکه بتوانند اثر همزمان انتقال انرژی و انتقال جرم را در موازنه اکسرژی یک برج تقطیر نشان دهند از نمودارهای که آنتالپی ویژه بر حسب فاکتور کارنو ( $\theta$ ) نشان می‌دهد را استفاده کردند. در نهایت این روش را برای تحلیل اکسرژی برج تقطیر مخلوط آمونیاک و آب به کار گرفتند. آنها دو نوع برج تقطیر که در اولی کندانسور و ریپویلر به صورت جدا در بالا و پایین برج قرار می‌گیرند و در دومی کندانسور و ریپویلر به صورت مبدل‌هایی درون برج تعبیه می‌شوند با استفاده از تحلیل اکسرژی با هم مقایسه کردند که در برج دومی نسبت به برج اول اتلاف اکسرژی به نصف کاهش پیدا می‌کند (از ۴۳۱ کیلووات به ۲۵۴ کیلووات) و همچنین مصرف آب خنک‌کننده به میزان ۱۴٪ کم تر می‌شود [3].

ریورو و گارسیا برج تقطیر واکنش موجود در فرایند تولید (MTBE)<sup>۲</sup> در یک واحد پالایش نفت خام را به روش اکسرژی تحلیل کرده‌اند. واکنشی که در این برج تقطیر رخ می‌دهد در سینی‌های میانی برج صورت می‌گیرد. نتایج تحلیل اکسرژی نشان می‌دهد که بیشترین میزان هدررفت اکسرژی در این فرایند مربوط به همین برج تقطیر واکنشی می‌باشد (۶۳٪ از هدررفت اکسرژی کل). محاسبات اکسرژی برای سایر بخش‌های فرایند نیز انجام شده است [4].

آلانکل و همکاران از تحلیل اکسرژی برای بهبود بازده انرژی یک برج دپوتانایزر<sup>۳</sup> استفاده کرده‌اند. آنها ابتدا برج را با استفاده از نرم افزار Aspen Plus شبیه‌سازی کرده و سپس اصلاحات مورد نظر را بر روی آن اعمال کرده‌اند. این اصلاحات عبارتند از:

<sup>۱</sup>Exergy Concept<sup>۲</sup> Methyl Tert-Butyle Ether<sup>۳</sup> Debutanizer



تقسیم جریان خوراک، پیش گرم کردن آن و سپس وارد کردن خوراک به دو سینی مختلف از برج. با اعمال این تغییرات، تلفات اکسرژی به میزان ۱۲ تا ۲۱ درصد کاهش یافته است و همچنین بازده ترمو دینامیکی برج از ۵۸٪ به ۶۶٪ افزایش پیدا کرده است [5].

چانگ در سال ۲۰۰۱ بر روی یک فرآیند تولید اتیلن تحلیل اکسرژی و اکسرژی- اقتصادی انجام داد. نتایج نشان داد که بازده اکسرژی بخش‌های متان‌زدا و بوتان‌زدا کمترین مقدار است و از طرف دیگر هزینه انرژی در بخش‌های تراکم‌سازی و متان‌زدا بالاترین مقدار است. او به این نتیجه رسید که مطالعات اکسرژی- اقتصادی اطلاعات بیشتری نسبت به مطالعات اکسرژی برای بهبود بخشیدن به فرآیند در اختیار ما قرار می‌دهد [6].

دووانی و همکارانش عملکرد فرآیند جداسازی مخلوطی از هیدروکربن‌ها با استفاده از چند برج تقطیر، را از دیدگاه اکسرژی بررسی کرده‌اند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که میزان هدررفت اکسرژی برای برج‌ها بالا می‌باشد. بیشتر اکسرژی هدررفته از هر برج بیشتر از طریق جوش‌آور و چگالنده و سینی خوراک بوده است. آنها همچنین اثر پارامترهای عملیاتی: دبی خوراک، تعداد سینی‌ها و سینی ورود خوراک را بر بازده اکسرژی هر کدام از برج‌ها بررسی کرده‌اند [7].

جینشنگ و همکارانش در سال ۲۰۱۲ بر روی تحلیل انرژی و اکسرژی برج‌های تقطیر واحد متانول پژوهشی را انجام دادند. با استفاده از شبیه‌سازی واحد و تکنولوژی پینچ به این نتیجه رسیدند که مصرف انرژی برج‌ها می‌تواند تا ۱۵/۲۳٪ کاهش یابد، همچنین هدررفت اکسرژی برج‌ها نیز تا ۲۱/۵٪ کاهش می‌یابد [8].

با توجه به کارآمدی بالای این تکنیک‌ها در بحث انتگراسیون فرآیندی انتظار می‌رود تحقیق پیش‌رو بازدهی این فرآیند را به میزان زیادی بالا ببرد و شرایط عملکردی واحد را از لحاظ مصرف انرژی بهینه کند.

## ۲- اکسرژی

برای محاسبه مقادیر کیفیت انرژی‌های مختلف موجود در یک سیستم نیاز به یک استاندارد همگانی مربوط به کیفیت انرژی داریم. همانطور که گفته شد این استاندارد به صورت حداکثر کاری که میتوان از یک شکل انرژی و با توجه به پارامترهای محیطی به صورت حالت مرجع بدست آورد، تعریف می‌شود. این استاندارد کیفیت انرژی، اکسرژی نامیده می‌شود. اگر یک سیستم از حالت (۱) به حالت (۲) تغییر یابد، میزان تغییر اکسرژی آن به شکل ساده به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta Ex_{1-2} = Ex_1 - Ex_2 = \Delta H_{1-2} - T_0 \Delta S_{1-2} \quad (1)$$

اکسرژی موجود در یک جریان ماده معادل با حداکثر کاری است که میتوان از حالت اولیه جریان تا رسیدن به حالت مرگ، در طی فرآیند که تنها با محیط در ارتباط می‌باشد، به دست آورد.

$$Ex = Ex_K + Ex_p + Ex_{ph} + Ex_{ch} \quad (2)$$

اکسرژی جنبشی را می‌توان به صورت  $Ex_K = m \frac{u^2}{2}$  و اکسرژی پتانسیل را به صورت  $Ex_p = mgz$  محاسبه نمود. البته در اکثر فرایندها از تغییرات اکسرژی جنبشی و پتانسیل جریان می‌توان صرف نظر کرد

مجموعه مقالات ششمین کنفرانس انرژی و محیط زیست

دوم دی ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران

و هم‌اندیشان انرژی کیمیا

www.Energyconf.ir



## ۲-۱ اکسرژی فیزیکی

اکسرژی یک جریان ماده شامل حداکثر کاری است که در طی یک فرایند فیزیکی و تبادل حرارتی با محیط مرجع می‌توان از جریان ماده به دست آورد. اکسرژی فیزیکی یک جریان ماده را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد، که  $h_0$  و  $S_0$ ، آنتالپی و آنتروپی جریان در دما و فشار محیط می‌باشد.

$$Ex_{ph1} = (h_1 - T_0 S_1) - (h_0 - T_0 S_0) \quad (۳)$$

## ۲-۲ اکسرژی شیمیایی

اکسرژی شیمیایی برای یک جریان به صورت حداکثر کار قابل حصول از یک واکنش شیمیایی برگشت‌پذیر تعریف می‌شود که ترکیبات تشکیل دهنده‌ی جریان را به مواد موجود در اتمسفر زمین تبدیل می‌کند

$$\varepsilon_{0M} = \sum_i x_i \varepsilon_{0i} + RT_0 \sum_i x_i \ln x_i \quad (۴)$$

$\varepsilon$  در رابطه (۴) نشان دهنده اکسرژی شیمیایی استاندارد برای هر کدام از اجزاء تشکیل دهنده مخلوط می‌باشد.

اکسرژی تبادل شده از طریق انتقال گرما بین سیستم و یک منبع حرارتی با دمای  $T$  به صورت معادله (۵) بیان می‌شود.

$$Ex^Q = Q(1 - T_0/T) \quad (۵)$$

موازنه اکسرژی برای یک حجم کنترلی به صورت رابطه (۶) می‌باشد.  $Irr$  نشان دهنده‌ی میزان اکسرژی هدررفته طی فرایند می‌باشد.

$$\sum(\dot{m}Ex)_{in} - \sum(\dot{m}Ex)_{out} + \dot{w} = \sum Ex^Q + Irr \quad (۶)$$

## ۲-۳ بازده ساده

این نوع از بازده ساده‌ترین نوع بازدهی اکسرژی است. برای تعریف این بازده ابتدا موازنه اکسرژی که شامل اکسرژی جریان‌های ورودی، اکسرژی جریان‌های خروجی و میزان بازگشت‌ناپذیری است تشکیل می‌شود.

$$Ex_{in} = Ex_{out} + Irr \quad (۷)$$

بازده ساده نسبت کل اکسرژی‌های خروجی به کل اکسرژی‌های ورودی می‌باشد:

$$\eta = \frac{Ex_{out}}{Ex_{in}} \quad (۸)$$

## ۲-۴ بازده منطقی

این فرم از بازده را بازده منطقی می‌خوانند و به صورت نسبت اکسرژی مطلوب خروجی به اکسرژی مصرفی تعریف می‌شود.

$$\eta_r = \frac{Ex_{desired\ output}}{Ex_{used}} \quad (۹)$$

مجموعه مقالات ششمین کنفرانس انرژی و محیط زیست

دوم دی ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران

و هم‌اندیشان انرژی کیمیا

www.Energyconf.ir



Exdesired output حاصل جمع تمامی اکسرژی منتقل شده از سیستم است که شامل تمام خروجی‌های مطلوب تشکیل شده به اضافه هر محصول جانبی باشد که توسط سیستم تولید می‌شود. Exused اکسرژی مورد نیاز ورودی فرایند برای برای انجام آن می‌باشد [9].

### ۳- شرح و شبیه‌سازی برج‌های فرآیند تولید اتیلن

گاز اتان شامل خوراک همراه با اتان برگشتی حاصل از برج تفکیک اتیلن T-403 با دمای ۵۵ درجه سانتیگراد و فشاری معادل ۶/۱ بار وارد ناحیه کوره‌ها می‌شود. اتان قبل از ورود به هر کوره به دو جریان تقسیم شده و جهت پیش‌گرم شدن وارد بخش فوقانی کوره موسوم به پیش‌گرم‌کن خوراک می‌شود و از آن‌جا با دمای ۲۲۳ درجه سانتیگراد خارج شده و با بخار رقیق-کننده مخلوط می‌شود. این مخلوط سپس وارد کوره شده و پس از انجام فرآیند شکست با دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد و فشار ۰/۸ بار به طرف مبدل‌های سردکننده هدایت می‌شود. شرح و شبیه‌سازی سه برج بهینه شده در فرآیند اتیلن در ادامه آورده شده‌است.

#### ۳-۱-۱ برج جداکننده ترکیبات سنگین (T-201)

گاز از میانه برج T-201 وارد شده و بعد از تماس با سینی‌های ۹۰ درجه‌ای (که جهت جلوگیری از حرکت ترکیبات سنگین تار به طرف بالا تعبیه شده‌اند) و نیز یک بسته از مواد پرکننده، از بالای برج خارج می‌شود. تماس جریان گاز با آب در گردش که از بالا به پایین جریان دارد و عبور گاز از درون پرکننده‌ها، جداسازی ترکیبات سنگین و نیز مایع شدن بخار رقیق-کننده‌ی همراه با گاز را میسر می‌کند. این طراحی طوری صورت گرفته که دمای گاز همراه، حداکثر ۲/۵ درجه سانتیگراد بالاتر از دمای آب ورودی برج باشد.

جدول ۱ مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های طراحی جریان‌های ورودی به برج (T-201)

نام جریان	101			102			208-		
	شبیه سازی	طراحی	درصد انحراف	شبیه سازی	طراحی	درصد انحراف	شبیه سازی	طراحی	درصد انحراف
دما (C)	162	162	0	73.4	73.4	0	116.1	116.1	0
فشار (bar)	0.59	0.59	0	0.56	0.56	0	0.75	0.75	0
دبی (kmol/hr)	8938	8934.1	0.04	3687	3686.7	0.008	76.27	76.3	5.28
درصد مولی									
H <sub>2</sub> O	0.26	0.26	0	1	1	0	1	1	0
H <sub>2</sub>	0.27	0.27	0	0	0	0	0	0	0
METHANE	0.044	0.044	0	0	0	0	0	0	0
CO	0.0005	0.0005	0	0	0	0	0	0	0

مجموعه مقالات ششمین کنفرانس انرژی و محیط زیست

دوم دی ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران

و هم اندیشان انرژی کیمیا

www.Energyconf.ir



CO <sub>2</sub>	0.0001	0.0001	0	0	0	0	0	0	0
H <sub>2</sub> S	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ACETYLENE	0.002	0.002	0	0	0	0	0	0	0
ETHYLENE	0.2533	0.2533	0	0	0	0	0	0	0
ETHANE	0.1542	0.1543	0	0	0	0	0	0	0
M-ACETYLENE	0.0001	0.0001	0	0	0	0	0	0	0
PROPENE	0.0038	0.0038	0	0	0	0	0	0	0
PROPANE	0.0008	0.0008	0	0	0	0	0	0	0
N-BUTANE	0.0043	0.0046	-6.5	0	0	0	0	0	0
N-PENTANE	0.0015	0.0013	15.38	0	0	0	0	0	0
I-PENTANE	0.0015	0.0013	15.38	0	0	0	0	0	0

جدول ۲ مقایسه نتایج شبیه سازی با داده‌های طراحی جریان‌های خروجی از برج (T-201)

نام جریان	113			201			200		
	شبیه سازی	طراحی	درصد انحراف	شبیه سازی	طراحی	درصد انحراف	شبیه سازی	طراحی	درصد انحراف
دما (C)	37.9	40	-5.2	62	79	-21.5	78.8	79	-0.2
فشار (bar)	0.5	0.5	0	0.55	0.56	-1.7	0.56	0.56	0
دبی (kmol/hr)	6903	6940	-0.5	2598	2594	0.1	44150	44105.6	0.1
درصد مولی									
H <sub>2</sub> O	0.043	0.049	13.9	1	0.9979	0.2	1	1	0
H <sub>2</sub>	0.352	0.349	-0.85	0	0	0	0	0	0
METHANE	0.058	0.058	0	0	0	0	0	0	0
CO	0.0007	0.0007	0	0	0	0	0	0	0
CO <sub>2</sub>	0.0002	0.0002	0	0	0	0	0	0	0
H <sub>2</sub> S	0.0001	0.0001	0	0	0	0	0	0	0
ACETYLENE	0.0026	0.0026	0	0	0	0	0	0	0
ETHYLENE	0.3279	0.3261	0.5	0	0	0	0	0	0
ETHANE	0.1997	0.1986	0.5	0	0	0	0	0	0
M-ACETYLENE	0	0.0001	-100	0	0	0	0	0	0
PROPENE	0.0049	0.0048	2.0	0	0	0	0	0	0
PROPANE	0.001	0.001	0	0	0	0	0	0	0
N-BUTANE	0.0056	0.0059	-5.0	0	0	0	0	0	0
N-PENTANE	0.002	0.0017	17.6	0	0	0	0	0	0
I-PENTANE	0.002	0.0017	17.6	0	0.002	-100	0	0	0

۲-۳ برج تفکیک ترکیبات C<sub>2</sub> (T-402)

در برج T-402 یک تفکیک بین مجموعه ترکیبات C<sub>2</sub> (اتان، اتیلن و استیلن) و ترکیبات C<sub>3</sub><sup>+</sup> انجام می‌شود. مایع انتهایی برج متان بعد از عبور از Cold-box و مبدل پیش گرم‌کن با دمای ۸/۹- درجه سانتیگراد و فشار ۲۵/۳ بار وارد برج T-402 می‌شود. در اثر اعمال گرما در جوش آورنده و انجام عمل تقطیر در طول سینی‌های برج، جریان‌های C<sub>2</sub> به‌طور کامل تفکیک می‌شوند.

جدول ۳ مقایسه نتایج شبیه‌سازی جریان‌های ورودی و خروجی با داده‌های طراحی برج تفکیک C<sub>2</sub> (T-402)

نام جریان	475R			451A			457			453		
	شبیه سازی	طراحی	درصد انحراف	شبیه سازی	طراحی	درصد انحراف	شبیه سازی	طراحی	درصد انحراف	شبیه سازی	طراحی	درصد انحراف

مجموعه مقالات ششمین کنفرانس انرژی و محیط زیست

دوم دی ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران

و هم اندیشان انرژی کیمیا

www.Energyconf.ir



دما (C)	-14	-14	0	-10.6	-10.5	0	7.1	7	1.4	79	82	-3.6
فشار (bar)	22.2	22.2	0	24.3	24.3	0	23.9	23.9	0	24.2	24.2	0
دبی (kmol/hr)	326.8	326.8	0	3830	3770.3	1.5	4037	3981	1.4	119.3	116	2.8
درصد مولی												
H <sub>2</sub> O	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
METHANE	0	0	0	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0	0	0	0
CO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H <sub>2</sub> S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ACETYLENE	0	0	0	0.0047	0.0047	0	0.0044	0.0045	-2.2	0.0002	0.0002	0
ETHYLENE	0.5394	0.539	0.07	0.59	0.6024	-2.05	0.6025	0.6147	-1.9	0.002	0.002	0
ETHANE	0.4606	0.4601	0.1	0.36	0.36	0.539	0.3712	0.3804	-2.4	0.251	0.1194	4.5
M-ACETYLENE	0	0	0	0.0002	0.0002	0.4601	0	0	0	0.006	0.006	0
PROPENE	0	0	0	0.0087	0.0089	-2.2	0.004	0.004	0	0.182	0.2806	-35
PROPANE	0	0	0	0.0017	0.0017	0	0.0005	0	-	0.05	0.05	0
N-BUTANE	0	0	0	0.0107	0.0108	0.9	0	0	0	0.342	0.352	-2.8
N-PENTANE	0	0	0	0.0027	0.0027	0.539	0	0	0	0.09	0.09	0
I-PENTANE	0	0	0	0.0027	0.0027	0.4601	0	0	0	0.09	0.09	0

۳-۳ برج غنی‌سازی اتیلن (T-403)

جریان گاز واکنش داده شده از بالای درام جریان برگشتی برج T-402 جهت تفکیک به طرف برج T-403 هدایت می‌شود. جریان گاز شامل اتان، اتیلن، اندکی H<sub>2</sub> و مقدار کمی CO می‌باشد، جهت تفکیک اتیلن و اتان از برج T-403 با ۱۲۷ سینی بهره می‌گیریم، عمل تفکیک جرمی در ۱۱۸ سینی انجام شده و سینی‌های بالایی به عنوان بخش پاستوریزه کردن اتیلن عمل می‌کنند. محصول اتیلن بعد از تبادل جرمی از سینی ۹ برج خارج می‌شود، مقداری از کل جریان برگشتی ورودی به برج تحت عنوان محصول خارج می‌شود و مابقی به سینی‌های پایینی می‌ریزد.

جدول ۴ مقایسه نتایج شبیه سازی با داده‌های طراحی جریان های ورودی به برج (T-403)

نام جریان	474B			474D-		
	شبیه سازی	طراحی	درصد انحراف	شبیه سازی	طراحی	درصد انحراف
دما (C)	-16.1	-16.1	0	-27.9	-27.9	0
فشار (bar)	21.5	21.5	0	20.4	20.4	0
دبی (kmol/hr)	3655	3654.7	0.008	12959	12951.8	0.05
درصد مولی						
H <sub>2</sub> O	0	0	0	0	0	0
H <sub>2</sub>	0.0001	0.0001	0	0.0014	0.0008	75
METHANE	0.0001	0.0001	0	0.0033	0.0034	-2.9
CO	0	0	0	0	0	0
CO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0
H <sub>2</sub> S	0	0	0	0	0	0
ACETYLENE	0	0	0	0	0	0
ETHYLENE	0.6224	0.6224	0	0.9952	0.9957	-0.05
ETHANE	0.3771	0.3771	0	0.0001	0.0001	0
M-ACETYLENE	0	0	0	0	0	0
PROPENE	0.0003	0.0003	0	0	0	0
PROPANE	0	0	0	0	0	0
N-BUTANE	0	0	0	0	0	0



مجموعه مقالات ششمین کنفرانس انرژی و محیط زیست

دوم دی ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجربان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران

و هم‌اندیشان انرژی کیمیا

www.Energyconf.ir



N-PENTANE	0	0	0	0	0	0
I-PENTANE	0	0	0	0	0	0

جدول ۵ مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های طراحی جریان‌های خروجی از برج (T-403)

نام جریان	474C			497			484		
	شبیه‌سازی	طراحی	درصد انحراف	شبیه‌سازی	طراحی	درصد انحراف	شبیه‌سازی	طراحی	درصد انحراف
دما (C)	-26.2	-25.9	-1.1	-25.7	-25.7	0	-2.7	-2.2	0.22
فشار (bar)	20.8	20.8	0	20.88	20.8	0	21.8	21.8	0
دبی (kmol/hr)	12630	12624.5	0.04	2595	2596.3	-0.05	1387	1385.6	0.1
درصد مولی									
H <sub>2</sub> O	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H <sub>2</sub>	0.0015	0.0008	87	0	0	0	0	0	0
METHANE	0.0034	0.0035	-2.8	0	0	0	0	0	0
CO	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H <sub>2</sub> S	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ACETYLENE	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ETHYLENE	0.9949	0.9955	-0.06	0.9917	0.9995	-0.78	0.02	0.0054	270
ETHANE	0.0002	0.0001	100	0.008	0.0005	100	0.977	0.9938	-1.6
M-ACETYLENE	0	0	0	0	0	0	0.0001	0	-
PROPENE	0	0	0	0	0	0	0.0008	0.0008	0
PROPANE	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N-BUTANE	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N-PENTANE	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I-PENTANE	0	0	0	0	0	0	0	0	0

نتایج نشان داده‌شده در جداول ۱ تا ۵ نشان داد که شبیه‌سازی داده‌های طراحی را با تقریب خوبی پیش‌بینی کرده‌است.

مجموعه مقالات ششمین کنفرانس انرژی و محیط زیست

دوم دی ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجربان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران

و هم‌اندیشان انرژی کیمیا

www.Energyconf.ir



#### ۴- تحلیل اکسرژی و بهینه‌سازی

پس از شبیه‌سازی فرآیند تولید اتیلن به کمک نتایج حاصل از شبیه‌سازی میزان اکسرژی برای هرکدام از جریان‌های ورودی و خروجی برج‌ها محاسبه شده‌اند. به منظور محاسبه میزان هدررفت اکسرژی و راندمان اکسرژی در برج‌ها بر روی آن‌ها موازنه اکسرژی بسته شده‌است. نتایج محاسبات اکسرژی در جدول زیر آمده است:

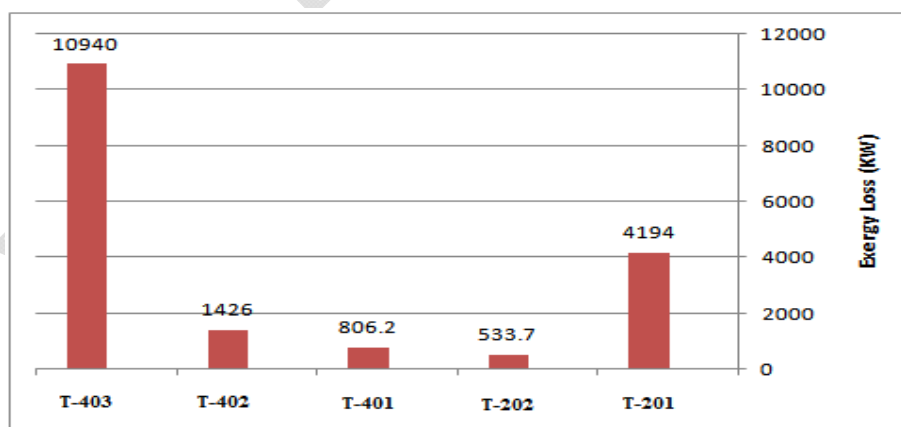
جدول ۹ محاسبات میزان اتلاف و راندمان اکسرژی برج‌های واحد اتیلن

نام برج	برگشت ناپذیری (KW)	راندمان اکسرژی (قبل از بهینه‌سازی)
T-201	4194	0.485
T-202	533.7	0.572
T-401	806.2	0.937
T-402	1426	0.874
T-403	10940	0.737

مهمترین دلایل افت اکسرژی در برج‌ها عبارت‌اند از:

- افت فشار در طول برج
- اتلاف گرما از بدنه به محیط بیرون
- اختلاط جریان‌ها
- انتقال جرم بین فازی
- اختلاف دمای نامناسب در چگالنده و جوش‌آور

هدررفت اکسرژی برای هریک از برج‌ها در شکل ۱ نشان داده شده‌است.



شکل ۱ هدررفت اکسرژی برج‌ها

## مجموعه مقالات ششمین کنفرانس انرژی و محیط زیست

دوم دی ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران

و هم‌اندیشان انرژی کیمیا

www.Energyconf.ir



## ۵- بهینه‌سازی به روش RSM

این روش مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضی می‌باشد که هدف آن توسعه دادن یک مدل ریاضی برای تابع هدف بر اساس نتایج به دست آمده از طراحی آزمایش صورت گرفته بر روی متغیرهای مستقل می‌باشد. برای این منظور توابع چندجمله‌ای خطی و درجه دوم برای توصیف رفتار سیستم مورد مطالعه استفاده می‌شود. در نهایت به کمک مدل تهیه شده برای تابع هدف، پارامترهای عملیاتی بهینه یافته می‌شوند [10].

اولین قدم در بهینه‌سازی به روش RSM انتخاب پارامترهای عملیاتی برای هرکدام از تجهیزات است. در این مرحله پارامترهایی که قابل تغییر می‌باشند و بر تابع هدف تاثیر می‌گذارند برای هرکدام از برج‌ها انتخاب می‌شوند. پارامترهای بررسی شده در هرکدام از برج‌ها و حدود بالا و پایین آنها در جدول زیر آورده شده است.

جدول ۱۰ پارامترهای بررسی شده برج‌ها

نام برج	پارامتر	حد بالا	حد پایین
برج جداسازی ترکیبات سنگین از گاز (T-201)	سینی خوراک جریان 208	29	2
	دمای خوراک جریان 101 (K)	450	400
	دمای جریان برگشتی 1 (K)	330	300
برج تفکیک ترکیبات C <sub>2</sub> (T-) (402)	دمای خوراک جریان 451A (K)	270	260
	دمای جریان برگشتی 475R (K)	270	250
	سینی خوراک جریان 451A	20	5
برج غنی‌سازی اتیلن (T-403)	دمای خوراک جریان 474B (K)	265	253
	سینی خوراک جریان 44	60	30
	سینی خوراک جریان 45	67	40

دو برج T-202 و T-401 در این بررسی قرار نگرفتند زیرا برج T-202 دارای برگشت‌ناپذیری اندکی است و مصرف انرژی در آن صفر است، به همین دلیل مصرف انرژی برای کاهش برگشت‌ناپذیری در آن منطقی نیست، برج T-401 نیز دارای برگشت‌ناپذیری پایین و راندمان بالای ۰/۹۳ است و باید انرژی بالایی برای افزایش راندمان و کاهش برگشت‌ناپذیری آن مصرف شود. از این رو این دو برج از چرخه بهینه‌سازی خارج می‌شوند. مراحل بهینه‌سازی برای یکی از برج‌ها به صورت نمونه آورده شده است.

جدول ۱۱ نتایج هدررفت اکسرژی، مصرف انرژی و راندمان اکسرژی برج T-201 با آزمایشات پیشنهادی RSM

Run	دمای خوراک جریان 101 (K)	دمای جریان برگشتی 1 (K)	سینی خوراک جریان 208	مصرف انرژی (KW)	برگشت‌ناپذیری (KW)	راندمان اکسرژی (%)
1	425	330	2	15833	3536	64.72
2	450	330	15.5	19054	4387	60.29
3	425	300	2	-10710	4210	51.16
4	425	315	15.5	2550	3401	62.3
5	450	315	29	5771	3991	60.28
6	400	315	2	-584	2944	63.9
7	425	300	29	-10710	4208	51.19
8	450	300	15.5	-7489	4858	49.64



9	425	315	15.5	2550	3401	62.3
10	425	315	15.5	2550	3401	62.3
11	400	330	15.5	-10907	2800	65.88
12	425	315	15.5	2550	3401	62.3
13	400	315	29	-584	2942	63.92
14	425	330	29	15833	3534	64.74
15	400	300	15.5	-13844	3687	52.44
16	450	315	2	5771	3993	60.26
17	425	315	15.5	2550	3401	62.3

در روش RSM میزان اثرگذاری هر کدام از پارامترهای عملیاتی و یا ترکیب این پارامترها بر تابع هدف به صورت پارامتری به نام P-Value تعیین می‌شود. هر چقدر میزان P-Value برای یک پارامتر کمتر باشد نشان می‌دهد که اثرگذاری آن پارامتر بر تابع هدف بیشتر بوده‌است. در روش RSM می‌توان تابع هدف را به صورت یک چندجمله‌ای که تابعی از پارامترهای عملیاتی می‌باشد مدل کرد و رابطه‌ای را بین پارامترهای بررسی شده و تابع هدف برقرار کرد. نتایج بررسی میزان اثرگذاری پارامترهای عملیاتی بر روی هدررفت اکسرژی در برج T-201 در جدول زیر آورده شده‌است.

جدول ۱۲ نتایج بررسی اثرگذاری پارامترهای عملیاتی بر هدررفت اکسرژی در برج T-201

پارامتر	P-Value	F-Value	ضرایب ثابت
عدد ثابت چند جمله‌ای	-	-	3401
دمای خوراک جریان 101 (A)	< 0.0001	378.85	607
دمای جریان برگشتی 1 (B)	< 0.0001	117.64	-338.25
سینی خوراک جریان 208 (C)	0.9753	0.00102	-1
(دمای خوراک جریان 101) × (دمای جریان برگشتی 1) (AB)	0.0505	5.56	104
(دمای خوراک جریان 101) × (سینی خوراک جریان 208) (AC)	1.0000	0.000	0.000
(دمای جریان برگشتی 1) × (سینی خوراک جریان 208) (BC)	1.0000	0.000	0.000
<sup>۲</sup> (دمای خوراک جریان 101) (A <sup>2</sup> )	0.1816	2.2	63.75
<sup>۲</sup> (دمای جریان برگشتی 1) (B <sup>2</sup> )	< 0.0001	118.66	468.25
<sup>۲</sup> (سینی خوراک جریان 208) (C <sup>2</sup> )	0.9508	0.00409	2.75

رابطه ارائه شده برای مدل کردن هدررفت اکسرژی در برج به صورت معادله زیر می‌باشد:

$$Irr. = +3401.00 + 607.00A - 338.25B - 1.00C + 104.0 AB + 0.000 AC + 0.000 BC + 0.000 BC + 63.75 A^2 + 468.25B^2 + 2.75C^2 \quad (10)$$

میزان ضریب همبستگی (R<sup>2</sup>) برای این رابطه ۹۷/۴۷ می‌باشد. با توجه به مقادیر P-Value از میان پارامترهای بررسی شده دمای خوراک جریان ۱۰۱ و دمای جریان برگشتی جریان ۱ تاثیر زیادی بر روی کاهش هدررفت اکسرژی برج T-201 دارد.

نتایج بررسی میزان اثرگذاری پارامترهای عملیاتی بر روی مصرف انرژی برج T-201 در جدول زیر آورده شده‌است.



جدول ۱۳ نتایج بررسی اثرگذاری پارامترهای عملیاتی بر مصرف انرژی در برج T-201

پارامتر	P-Value	F-Value	ضرایب ثابت
عدد ثابت چند جمله‌ای	-	-	2550
دمای خوراک جریان 101 (A)	0.0065	7.8	6128.2
دمای جریان برگشتی 1 (B)	0.006	15.1	10320.75
سینی خوراک جریان 208 (C)	0.0003	42.82	0.00
(دمای خوراک جریان 101) × (دمای جریان برگشتی 1) (AB)	1.00	0.00	5901.5
(دمای خوراک جریان 101) × (سینی خوراک جریان 208) (AC)	0.033	7.00	0.00
(دمای جریان برگشتی 1) × (سینی خوراک جریان 208) (BC)	1.00	0.00	0.00
<sup>۲</sup> (دمای خوراک جریان 101) (A <sup>2</sup> )	1.00	0.00	-2907.25
<sup>۲</sup> (دمای جریان برگشتی 1) (B <sup>2</sup> )	0.2230	1.79	-2939.25
<sup>۲</sup> (سینی خوراک جریان 208) (C <sup>2</sup> )	0.2184	1.83	2950.75

رابطه ارائه شده برای مدل کردن هدررفت اکسرژی در برج به صورت معادله زیر می‌باشد:

$$Energy = 2550.00 + 6128.25A + 10320.75B + 0.000C + 5901.50AB + 0.000AC + 0.000BC - 2907.25A^2 - 2939.25B^2 + 2950.75C^2 \quad (11)$$

میزان ضریب همبستگی ( $R^2$ ) برای این رابطه ۹۰/۹۳ می‌باشد. با توجه به مقادیر P-Value هر سه پارامتر دمای جریان های ۱۰۱ و ۱ و همچنین سینی خوراک ۲۰۸ بر روی کاهش مصرف انرژی تاثیر بسزایی دارند.

مقادیر بهینه پارامترهای فرآیندی برای برج T-201 به شرح زیر است:

جدول ۱۴ مقادیر بهینه پارامترهای فرآیندی برج T-201

پارامتر	میزان بهینه شده
سینی خوراک جریان 208	16
دمای خوراک جریان 101 (K)	400
دمای جریان برگشتی 1 (K)	330

با استفاده از مقادیر بهینه شده در برج T-201 میزان هدررفت اکسرژی ۲/۳۳٪ و میزان مصرف انرژی ۴/۵۳٪ کاهش می‌یابد.

## ۱-۵ نتایج

با بکارگیری روش بهینه‌سازی RSM مقادیر بهینه برای پارامترهای عملیاتی در برج‌ها بررسی شده پیدا شده‌اند. با تغییر هر کدام از پارامترهای عملیاتی به مقادیر بهینه که از روش RSM پیدا شده‌اند میزان هدررفت اکسرژی برای برج‌های فرآیند دوباره محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات اعمالی توانسته است که هدررفت اکسرژی را برای برج‌های مطالعه شده به میزان قابل توجهی کاهش دهد. میزان هدررفت اکسرژی قبل و بعد از بهینه سازی در قالب نمودار در ادامه آورده شده است.

مجموعه مقالات ششمین کنفرانس انرژی و محیط زیست

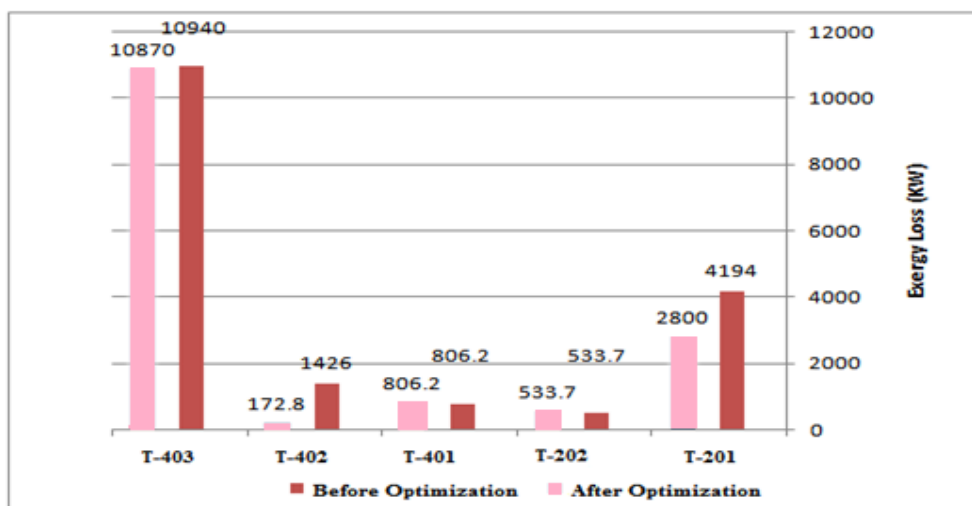
دوم دی ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران

و هم‌اندیشان انرژی کیمیا

www.Energyconf.ir



شکل ۲ مقایسه هدررفت اکسرژی قبل و بعد از بهینه‌سازی

در نتیجه بهینه سازی صورت گرفته هدررفت اکسرژی این واحد  $22/55\%$  و انرژی مصرفی به میزان  $32/06\%$  کاهش یافته است.

## ۶- نتیجه گیری

به منظور شناسایی برگشت ناپذیری‌ها و همچنین بهبود بازده انرژی فرایند تولید اتیلن از روش تحلیل اکسرژی برای برج-های این فرآیند استفاده شده‌است. برای این منظور ابتدا فرایند مورد نظر شبیه‌سازی شده و به منظور راستی آزمایی شبیه سازی صورت گرفته شده نتایج حاصل از شبیه سازی برای داده های خروجی از برج‌ها با داده های طراحی مقایسه شده‌است. به کمک نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی میزان اکسرژی هر جریان و سپس هدررفت اکسرژی در هرکدام از برج‌ها محاسبه شد. نتایج تحلیل اکسرژی نشان می‌دهد که در میان برج‌ها به ترتیب T-403 و T-201 دارای بیشترین هدررفت اکسرژی می‌باشند. در نهایت از روش RSM بمنظور بهینه سازی پارامترهای عملیاتی استفاده شده‌است نتایج نشان می‌دهد که در نتیجه بهینه کردن پارامترهای عملیاتی هدررفت اکسرژی به میزان  $9691920 \text{ kJ/hr}$  کاهش یافته است، همچنین انرژی مصرفی نیز به میزان  $35651124 \text{ kJ/hr}$  کاهش یافته‌است.

## مراجع

- 1- Linnhoff, M. (1983). Introduction to pinch technology. *Northwich, Cheshire:Gadbrook Park.*
- 2- Gadalla, M. A., Ratlamwala, T. A. H., & Dincer, I. (2010). Energy and exergy analyses of an integrated fuel cell and absorption cooling system. *Int. J. Exergy, 7*, 731-754.
- 3- Le Goff, P., Cachot, T., & Rivero, R. (1996). Exergy analysis of distillation processes. *Chemical engineering & technology, 19*, 478-485.
- 4- Rivero, R., & Garcia, M. (2001). Exergy analysis of a reactive distillation MTBE unit. *International Journal of Applied Thermodynamics, 4(2)*, 85-92.

مجموعه مقالات ششمین کنفرانس انرژی و محیط زیست

دوم دی ۱۳۹۵، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجربان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران

و هم اندیشان انرژی کیمیا

www.Energyconf.ir



- 5- Olakunle, M. S., Oluyemi, Z., Olawale, A. S., & Adefila, S. S. (2011). Distillation operation modification with exergy analysis. *Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences*, 2, 56-63.
- 6- Chang, H. (2001). Exergy analysis and exergoeconomic analysis of an ethylene process. *Ariti library*, 95-104.
- 7- Douani, M., Terkhi, S., & Ouadjenia, F. (2007). Distillation of a Complex Mixture. Part II: Performance Analysis of a Distillation Column Using Exergy. *entropy*, 9, 137-151.
- 8- Sun, J., Wang, F., Ma, T., Gao, H., Wu, P., & Liu, L. (2012). Energy and exergy analysis of a five-column methanol distillation scheme. *Energy*, 45, 696-703.
- 9- Kotas, T. J. (1995). The exergy method of thermal plant analysis. *Elsevier*.
- 10- Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2009). *Response surface methodology* (Vol. 705): John Wiley & Sons.

www.Energyconf.ir