

# بررسی اثر پمپ حرارتی در کاهش مصرف انرژی برج های جداساز C2

مجید عمید پور<sup>i</sup>، میثم کمالی نژاد<sup>ii</sup>، روزبه سالاری<sup>iii</sup>

## چکیده

مقادیر زیادی از انرژی برای پالایش اولفین های سبک، مثل اتیلن، در جداسازی محصولات پلیمری با نقطه جوش نزدیک به هم مصرف می شود. از آنجا که جداسازی اتیلن از اتان از نظر نیازهای حرارتی و فنی از مشکل ترین جداسازی هاست، جای زیادی برای بهبود اقتصادی فرایند اتیلن وجود دارد. هدف این مقاله، ارائه یک طرح صنعتی قابل اجرا برای برج های تقطیر یکپارچه حرارتی (HIDiC) برای جداسازی اتیلن از اتان با به کار گیری پمپ حرارتی است. در این مقاله، روشی برای ترکیب حرارتی برج ها به وسیله پمپ های حرارتی برقی؛ که بین مراحل میانی غنی سازی و عاری سازی برج کار می کنند ارائه می شود. برای این کار از یک سیکل پمپ حرارتی در میانه برج استفاده شده است تا هزینه کل برق مصرفی را کاهش دهد. در این بهینه سازی از مدول معادلاتی Aspen Plus بهره گرفته شده است و در تابع هدف تشکیل شده به تأثیر مفاهیم پنالتی حرارتی و تأثیر گلوگاهی افزایش جریان بخار در بهینه سازی توجه و حالت بهینه آن انتخاب شده است.

## کلمات کلیدی

صرفه جویی انرژی، برج تقطیر، پمپ حرارتی، جدا ساز C2، انتگراسیون انرژی، پنالتی حرارتی

## *Analyzing heat pump effects on energy saving of C2 splitter columns*

M.Amidpour; M.Kamalinejad; R.Salary

### ABSTRACT

Large quantities of energy are required in distillation of light olefins such as ethylene used for polymer grade separations of close boiling mixtures. Since the ethylene/ethane separation is the more difficult separation in terms of energy and requirement, it also provides greater opportunity for altering the economics of the ethylene process. The purpose of this paper is to introduce an industrially viable; internally heat integrated distillation column (HIDiC) version of a state of art C2 splitter by using a heat pump assisted, stand-alone column. In this article, a methodology is proposed for the thermal integration of electrically driven heat pumping systems between intermediate stages in distillation column using the concept of Column Grand Composite Curve (CGCC). To accomplish this goal, Equation Oriented (EO) modular of Aspen plus is applied. This research differs to other's work in term of heat penalty that causes more utility load and hydraulic bottlenecking in a column. An objective function consisting of utility costs and product revenue is established to maximize the net profit obtained from this process. A sensitivity analysis is executed over different electricity and capital cost scenarios. Eventually, the most competing scenarios in term of total annual profit are determined.

### KEYWORDS

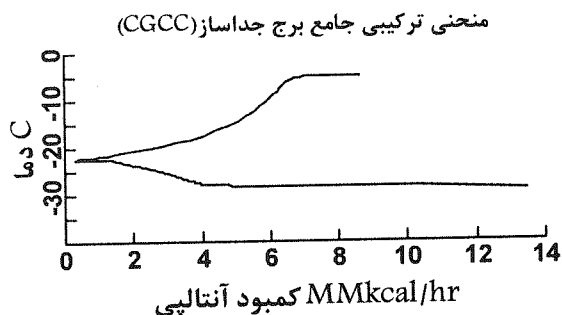
Distillation column; C2 splitter; Heat pump; Energy saving; heat penalty

i استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، amidpour@kntu.ac.ir

ii دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، m\_kamalinejad@sina.kntu.ac.ir

iii دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، r.salary@yahoo.com

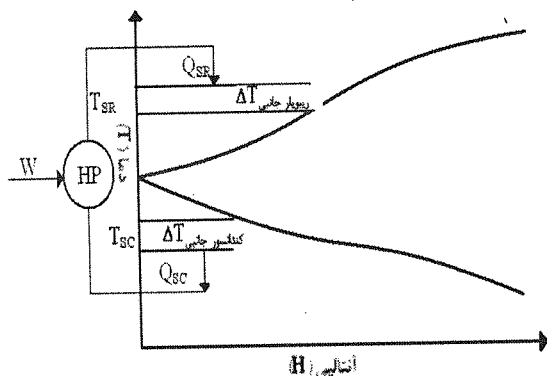
جداسازی مخلوط‌هایی است که نقطه جوش اجزای آن به هم نزدیک باشند. علاوه بر آن، پمپ‌ها را بیشتر در جایی می‌توان به کار برد که پروفایل CGCC آن‌ها صاف و کم شیب باشد. در مورد برج جداساز C2 این فرصت وجود دارد، (شکل ۱).



شکل (۱): پروفایل CGCC برج جداساز C2

هر برج یکپارچه برای افزایش فشار بخار خروجی از بخش غنی سازی و در نتیجه دمایی بالاتر برای امکان پذیر ساختن انتقال حرارت بین آن و قسمت عاری سازی به یک کمپرسور نیاز دارد [۱]. [۵،۴].

شکل (۲) نحوه استفاده از دی‌گرام CGCC برای هدف گذاری روی بارهای حرارتی را؛ که می‌توان براحتی برای یک برج منتقل کرد، نشان می‌دهد. در این شکل، فاصله دمایی (جوش آور جانبی  $\Delta T$ ، چگالنده جانبی  $\Delta T$ ) نشان دهنده اختلاف دمایی مورد نیاز در هر دو مبدل حرارتی است تا انتقال حرارت مورد نیاز فرایند در آنها انجام شود.



شکل (۲): چگونه استفاده از نمودار CGCC در یکپارچه سازی انرژی در پمپ های حرارتی

اگر همه بار حرارتی از مرحله تعادلی چگالنده جانبی بیرون کشیده شود، پینچ جدیدی ایجاد می‌شود، که برای جلوگیری از این پدیده نباید بیش از ۷۵٪ سرریز حرارتی را استفاده کرد. اگر هیچ سینی‌ای به برج اضافه نشود استفاده از مبدل‌های جانبی باعث پنالتهای حرارتی می‌شود، (شکل ۳). یک مبدل جانبی، نیروی محرکه را کاهش می‌دهد و از کار جداسازی بین مبدل‌ها می‌کاهد. به منظور ثابت نگه داشتن مشخصات محصولات و تعداد سینی‌های

اتیلن در مقادیر زیاد در واحدهای پتروشیمیایی تولید می‌شود. جداسازی الفین‌های سبک از پارافین‌هایی که تعداد کربن‌های برابر دارند جزء انرژی برترین فرایندهای پتروشیمیایی است و علت آن نزدیکی زیاد نسبت فراریت و نیاز به نسبت بازروانی بالاست و هزینه جاری آنها به علت زیر صفر بودن فرایندها بسیار بیشتر از فرایندهای پالایشگاهی است [۱]. [۲].

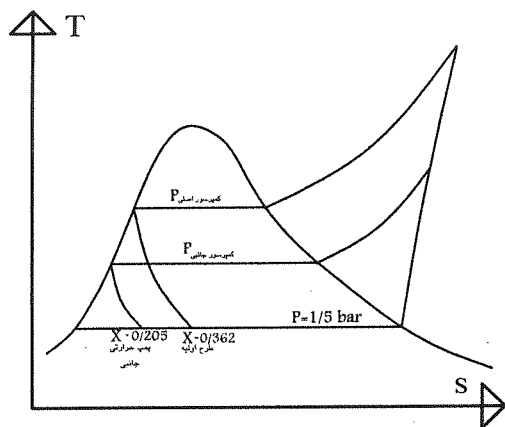
با توجه به این هزینه های بالا، استفاده از پمپ‌های حرارتی مورد بررسی قرار شده است. پمپ‌های حرارتی می‌توانند جذب حرارت دفع شده در دمای پایین را جذب کنند و با دریافت انرژی الکتریکی در کمپرسورها این حرارت را در دمایی بالاتر به برج باز پس دهند.

در سیستم‌های ترمودینامیکی منفردی مثل برج‌های تقطیر؛ که از یک منبع حرارتی (تبخیر کننده یا اواپراتور) و یک مصرف کننده حرارت (چگالنده) تشکیل می‌شوند، می‌توان نمودارهای دما-آنتالپی را تشکیل داد که به CGCC معروفند. برای یک ترکیب محصول مشخص و تعداد مراحل و نرخ بازروانی ثابت، این دی‌گرام، پروفایل کارکرد ترمودینامیکی حالت پایا یک برج و بارهای حرارتی مرتبط با آن را نشان می‌دهد. در کاربردهای سنتی؛ که از پمپ‌های حرارتی در برج‌های تقطیر استفاده می‌شود، غالباً آنها را بین چگالنده به عنوان منبع حرارتی و جوش آور به عنوان مصرف کننده انرژی به کار می‌برند؛ اما از نظر ترمودینامیکی می‌توان چنین پمپ‌هایی را در مراحل میانی بالا و پایین گلوگاه نمودار CGCC<sup>۱</sup> به کار برد.

نمودار CGCC نشان دهنده بار حرارتی است که می‌توان در یک دمای خاص به برج داد و یا از آن گرفت تا بتوان به شرایط ترمودینامیکی تعادلی دست یافت. حال اگر حرارتی بیشتر از آنچه در نمودارهای CGCC به دست آمده است از برج بگیریم تعادل ترمودینامیکی ستون به هم می‌خورد و کیفیت محصولات به دست آمده نیز دگرگون می‌شود. در این مقاله، بر خلاف کارهای گذشته، در کاربرد پمپ‌های حرارتی به موضوع پنالتهای حرارتی و تأثیر آن به طور ویژه توجه شده است [۱]. [۳،۴].

## ۲- یکپارچه سازی گرمایی پمپ حرارتی

برای آنکه به کار گیری پمپ‌های حرارتی در برج‌های منفرد بررسی اقتصادی شود، باید در محدوده‌هایی کار کند که شیفت‌های دمایی کوچک باشد. در برج‌های تقطیر، این به معنای



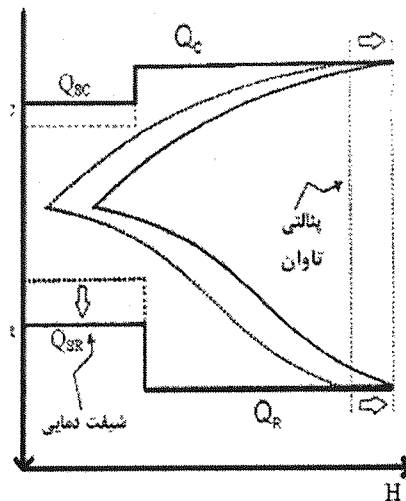
شکل (۴): تأثیر استفاده از کمپرسور جانبی در کیفیت مبرد

همان طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، درصد مایع مبرد خروجی از شیر اختناق در سیکل سرمایش جانبی بیشتر است. این درصد مایع بالا به معنای نرخ جریان جرمی کمتر و در نتیجه کار کمتر کمپرسور است که موجب سوددهی بیشتر برج می‌شود. برای ساده سازی شیبه سازی و فرایند محاسباتی سیستم پمپ حرارتی، فرض شده است که سیال عامل در گستره قابل قبولی از عملکرد دمایی باشد و تحت سیکل رانکین عمل کند.

#### ۴- مطالعه موردی

برای نشان دادن سوددهی سیستم پمپ حرارتی، یک جداساز C2 برای بهینه سازی انتخاب شد. دیاگرام جریان فرایند (PFD) یک برج تقطیر اتان/اتیلن در حالت اولیه در شکل (۵) نمایش داده شده است و در شکل (۶) طرح پیشنهادی برای بهبود هزینه یوتیلیتی مصرفی به همراه نحوه قرارگیری کمپرسور و مبدل‌های جانبی نشان داده شده است.

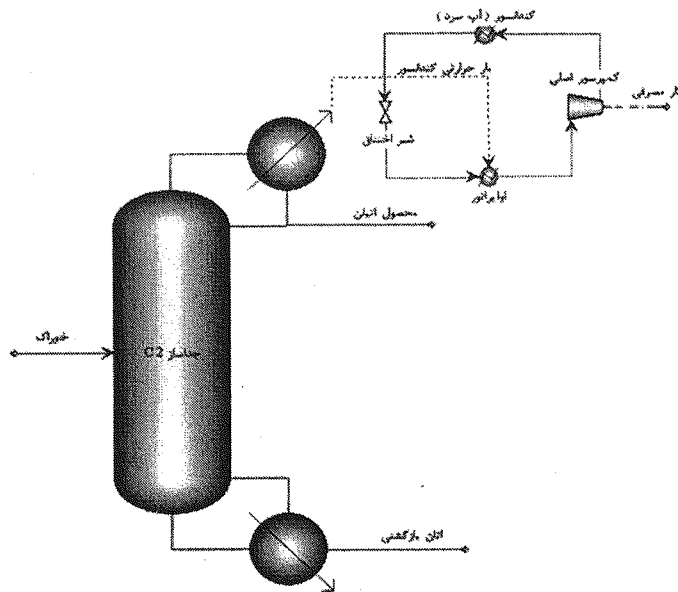
برج، کار جداسازی بیشتری باید در قسمت‌های دیگر برج انجام پذیرد که سبب افزایش اتلاف انرژی و جرمی انرژی یا جریان برگشتی می‌شود. با ثابت نگه داشتن تعداد سینی‌ها، پناکتی انرژی باعث افزایش میزان جریان بخار در برخی قسمت‌ها و در نتیجه افزایش قطر مورد نیاز ستون و افزایش سطح مبدل حرارتی می‌گردد [۱] [۱۰،۹].



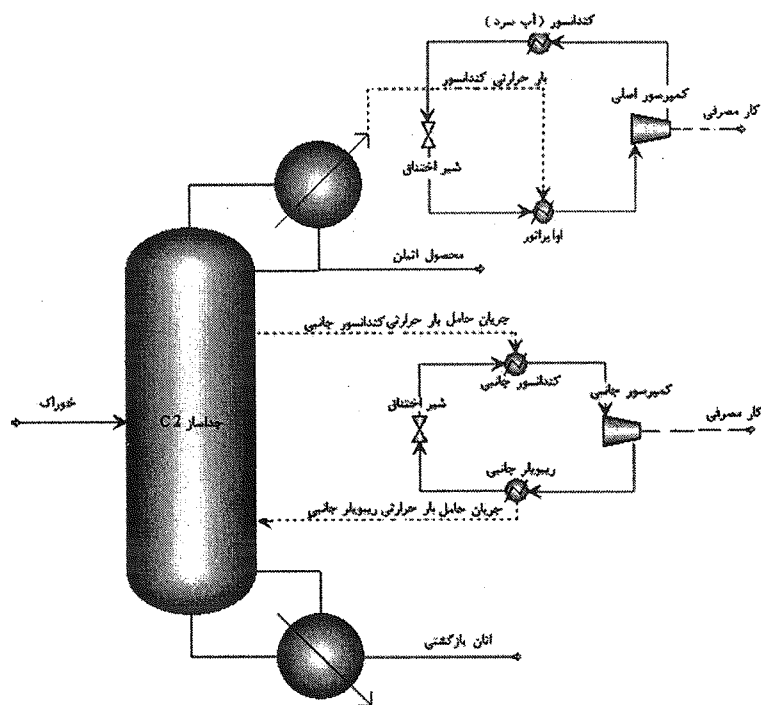
شکل (۳): نحوه تأثیر تاوان حرارتی روی مجموع بار مبدل‌ها

#### ۳- سیکل سرمایش

دو سیکل سرمایشی برای این برج یکپارچه حرارتی استفاده شده است. کمپرسور اصلی باید فشار مبرد را چنان بالا ببرد که دمای اشباع آن لااقل  $10^{\circ}\text{C}$  بیشتر از آب خنک کن موجود باشد؛ و میزان افزایش فشار کمپرسور جانبی نیز چنان است که دمای بخار اشباع  $10^{\circ}\text{C}$  بیش از مایع خروجی از جوش آور جانبی باشد. محدودیت دیگری که بر مقدار حرارت جوش آور جانبی اعمال شده، آن است که با توجه به دما و مقدار حرارت خروجی از کمپرسور جانبی باید حداقل اختلاف دمای  $10^{\circ}\text{C}$  برای مبدل‌ها تأمین شود، (شکل ۴).



شکل(۵): شکل شماتیک طرح اولیه جداساز C2



شکل(۶): شکل شماتیک طرح پیشنهادی برای جداساز C2 به همراه سیکل پمپ حرارتی جانبی

60	سینی خوراک
0/9	بازده سینی
39000Kg/hr	دبی محصول بالای برج
برای طرح اولیه 4	نرخ بازروانی بالای برج
0/9998	کیفیت محصول اتیلن
کمتر از 0/015	کیفیت ناخالصی محصول اتان
پروفایل فشار ستون	
20bar	فشار سینی ۱
20/5bar	فشار سینی ۲
21bar	فشار سینی خوراک
21.5bar	فشار جوش آور

شرایط کارکرد و مشخصات خوراک و محصولات و همچنین هزینه سناریوهای مختلف الکتریسیته در جدول(۱) نشان داده شده است [۱]، [۱۴].

جدول(۱): مشخصات برج و خوراک و محصولات و یوتیلیتی

50000Kg/hr	دبی خوراک
25 °C	دمای خوراک
2bar	فشار خوراک
0.8	C2H4
0/2	C2H6
100	تعداد سینی
ترکیب خوراک (درصد مولی)	

از نوع بازگشتی مطرح شود استراتژی SM برای این مسائل یکپارچه بسیار زمان بر است. رهیافت EO<sup>2</sup>، استراتژی جایگزین برای حل چنین مسائلی است که معادله همه مدل ها را جمع کرده و سپس همه آن ها را به جای آن که به صورت سری حل کند به صورت همزمان حل می کند و به این ترتیب، شبیه سازی بسیار زود تر همگرا می شود [۱۴].

### ۶- فرایند بهینه سازی

برای شبیه سازی برج اولیه، نسبت بازروانی جریان بالای برج و دبی محصول اتیلن، ثابت فرض شده است و بارهای چگالنده و جوش آور جانبی محاسبه می شود. در شبیه سازی مدل پیشنهادی هر دو مقدار نسبت بازروانی و دبی جریان متغیر قرار داده شده اند و بنا به حداقل کیفیت های قابل قبول محصولات بالا و پایین برج، بهینه مقدار آنها به دست آمده است. فاکتور اصلی هزینه عملیاتی؛ که همان هزینه الکتریسیته کمپرسور است، از روی بار سرمایه کمپرسور به دست می آید؛ سپس برای افزایش سوددهی برج از یک کمپرسور، یک چگالنده و یک جوش آور جانبی برای یکپارچه سازی حرارتی بخش های عاری سازی و غنی سازی برج استفاده شد. از آنجا که دماها و دیگر متغیرها در برج به صورت دینامیک تغییر می کردند از انتقال دهنده های اطلاعاتی برای در نظر گرفتن هر تغییر در تکرارها استفاده شد و با توجه به آن که در هر شبیه سازی با متغیرهای ثابت، تنها با تغییر هزینه الکتریسیته شاهد بارهای حرارتی متفاوتی برای چگالنده و جوش آور جانبی هستیم، باید بررسی خود را روی شرایط مختلفی از بهای الکتریسیته انجام دهیم. تأثیر اصلاحات پیشنهادی روی هزینه سالانه یوتیلیتی بنا به سه سناریوی قیمت برق در شکل (۷) نشان داده شده است.

0/4 \$/hr	قیمت محصول اتیلن
0/1 \$/hr	قیمت محصول اتان
0/16 \$	سناریوی هزینه بالای الکتریسیته
0/1 \$ / $\frac{KWh}{m^3}$	سناریوی هزینه متوسط الکتریسیته
0/04 \$ / $\frac{KWh}{m^3}$	سناریوی هزینه پایین الکتریسیته

برای تعیین هزینه سرمایه گذاری مورد نیاز فرض شده است که پمپ حرارتی و چگالنده و جوش آور مبدل هایی از نوع لوله-پوسته ای و جنس آنها کربن استیل باشد. در این مثال، ضریب انتقال حرارت کلی ثابت و برای تعیین ابعاد واحد مورد نظر به کار خواهد رفت. ضریب انتقال حرارت کلی چگالنده جانبی  $30000 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$  و برای جوش آور جانبی  $32000 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$  است. تراکم در پمپ به وسیله یک کمپرسور سانتریفیوژی با کارایی ۰/۷۲ صورت گرفته است. معادله هزینه برای کمپرسور و مبدل های لوله-پوسته ای از روابط زیر به دست می آید [۱۲].

$$CC=377.22 \cdot P + 36709 \quad (3)$$

$$Cex=0.0003 A2 + 27.778 A + 1951.1 \quad (4)$$

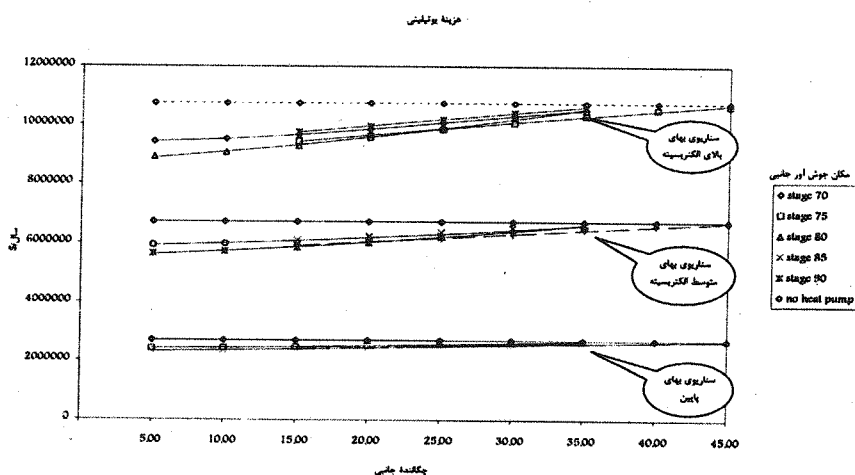
### ۵- تکنیک شبیه سازی

برای شبیه سازی این فرایند از مدل های معادلاتی Aspen plus استفاده شده است. برای تخمین زدن خواص ترمودینامیکی نیز مدل SRK به کار گرفته شده است. مدل سازی بر پایه معادلات، راهی نو و بسیار موثر برای حل انواع خاصی از مسائل است. دو گونه مهم از این مسائل عبارتند از:

الف) شبیه سازی فرایند های بازگشتی با یکپارچگی بالا

ب) فرایند های بهینه سازی

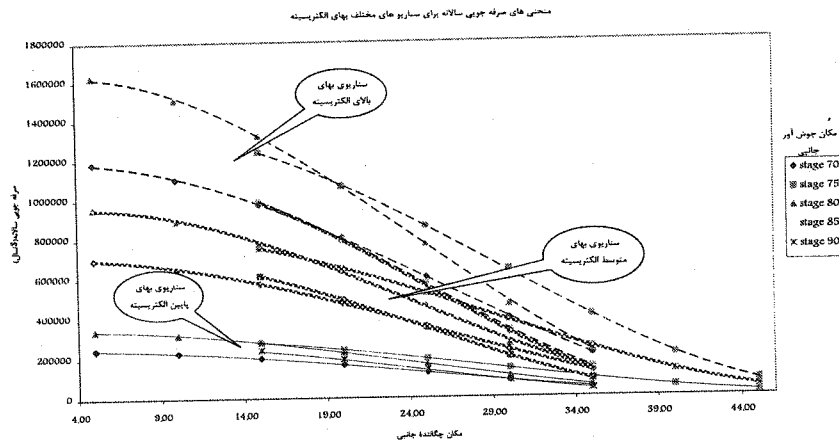
در Aspen Plus رهیافت اصلی مدل سازی، مدل متوالی (SM) است. در استراتژی SM، هر واحدی در صفحه جریان به صورت سری و پشت سر هم حل می شود. وقتی مسائلی



شکل (۷): تغییرات هزینه یوتیلیتی با تغییر شیفیت های دمایی بین چگالنده و جوش آور جانبی در سناریوهای مختلف بهای الکتریسیته

همان طور که قبلاً بحث شد، دو قید بار حرارتی بر روی مبدل های جانبی اعمال می شود و به مقدار این بار اجازه داده می شود که چنان تغییر کند که هزینه کلی عملیاتی کمینه شود. برای پیدا کردن سودآورترین سناریو، یک تابع هدف بهینه سازی تشکیل شده است که شامل هزینه های تجهیزاتی و عملیاتی (برق مصرفی) است. علاوه بر آن، قید دیگری نیز بر روی معادله هدف؛ که بیشینه سازی سود است، اعمال می شود، که این قید باید وجود حداقل اختلاف دمایی  $10^{\circ}C$  برای مبدل های جانبی را تضمین کند. برای پاسخ گویی به وابستگی مقدار بار حرارتی چگالنده جانبی به تغییرات قیمت الکتریسیته، سه سناریوی قیمت برای بهینه سازی به کار گرفته می شود. اقتصادی ترین حالت برای برج این نیست که بار حرارتی استفاده شده در چگالنده جانبی بیشینه شود، چرا که این کار باعث پنالتهای حرارتی و در نتیجه، افزایش کار کمپرسور می شود. در هر مورد مکان یابی پمپ حرارتی، به این نکته توجه شده و بسته نرم افزاری، سودآورترین بار حرارتی برای

هر چگالنده جانبی را پیدا می کند. [۹-۱۲]. سناریوهای زیادی از شیفت های حرارتی بین مبدل های جانبی بررسی شده است تا اقتصادی ترین مکان پمپ حرارتی یافته شود. در شکل (۸)، صرفه جویی سالانه حاصل از این تحقیق آورده شده است. در این شکل نیز سه سناریوی قیمت الکتریسیته بررسی شده است، هزینه کم الکتریسیته در مورد واحدهای پتروشیمیایی است که در نزدیکی میادین گازی هستند و به این دلیل هزینه تولید الکتریسیته در آنها پایین است و هزینه بالای الکتریسیته در مورد واحدهایی است که مجبورند انرژی خود را از طریق کشتی های حامل LNG تهیه کنند. برای مقایسه این سناریوها مرحله جوش آور جانبی، ثابت در نظر گرفته شده و جایابی چگالنده جانبی بررسی شده است. رقابتی ترین گزینه ها در جدول (۲) آمده است. این موارد برای بررسی دقیق تر و رفع سایر مسائل همچون تعادل هیدرولیکی انتخاب می شوند.



شکل (۸): تغییرات صرفه جویی سالانه با تغییر شیفت های دمایی بین چگالنده و جوش آور جانبی در سناریوهای مختلف بهای الکتریسیته

## ۷- تحلیل اقتصادی

روابط قیمت (۳) و (۴) تعیین می شود. مقدار سرمایه گذاری نهایی فرایند اتیلن از روش نسبت هزینه تجهیزات به هزینه نهایی تخمین زده می شود [۱۰]، [۱۳]. نسبت های سرمایه گذاری به صورت زیر هستند:

ارزیابی اقتصادی یک فرایند جداسازی اتیلن برای مقایسه سوددهی طرح های پیشنهادی پمپ های حرارتی و طرح اولیه ضروری است. هزینه خرید هر کدام از تجهیزات اصلی با

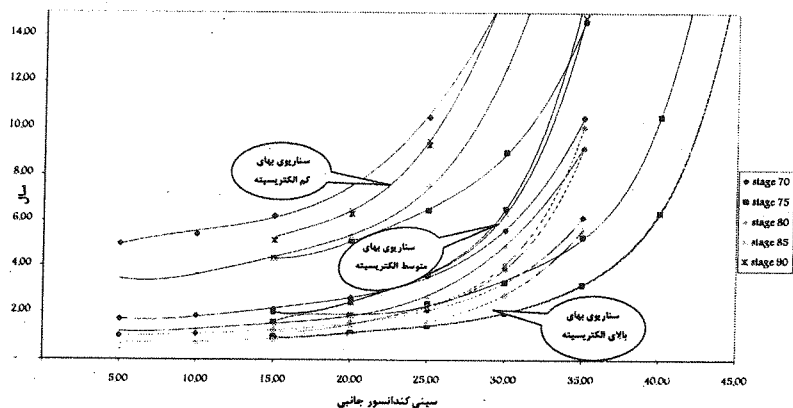
(۵)	0/25.	هزینه کل قطعات خریداری شده	=	هزینه نصب تجهیزات
(۶)	۰/۳۰.	هزینه کل قطعات خریداری شده	=	هزینه لوله کشی (نصب شده)
(۷)	۰/۱۵.	هزینه کل قطعات خریداری شده	=	هزینه سیستم های کنترلی و قطعات آن
(۸)	۰/۰۷.	هزینه کل قطعات خریداری شده	=	هزینه سیستم های الکتریکی
(۹)	۰/۳۰.	هزینه کل قطعات خریداری شده	=	هزینه های دیگر

برای تخمین دوره های بازگشت سرمایه طرح های پیشنهادی، باید همه هزینه های ذکر شده در بالا با هم جمع و سپس سالانه شوند تا بتوان صرفه جویی سالانه سناریوهای منتخب را مقایسه کرد. در این روابط نرخ سود سرمایه سالانه (i) ۱۰٪ منظور و دوره عمر تجهیزات (n) نیز ۱۰ سال برآورد شده است. از هزینه یوتیلیتی گرمایشی در مقایسه با هزینه سرمایه چشم پوشی شده است.

هزینه کلی سالانه بنا به فرمول‌های زیر محاسبه می‌شوند: محاسبه و در شکل (۹) ارائه شده است.  
دوره‌های زمانی بازگشت سرمایه برای همه سناریوها

(۱۰) هزینه سالانه سرمایه = هزینه کل سرمایه  $\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$

(۱۱) هزینه سالانه کل = هزینه سالانه عملیاتی + هزینه سالانه سرمایه دوره بازگشت سرمایه



شکل (۹): تغییرات دوره بازگشت سالانه با تغییر شیفیت‌های دمایی بین چگالنده و ریبویلر جانبی در سناریوهای مختلف بهای الکتریسیته

2.61	70-20	470635.2	752940.3	
1.57	75-15	749188.8	711702.9	
1.87	75-20	642406.4	725347.4	
1.23	70-15	971811.2	724050	سناریوی هزینه بالا الکتریسیته
1.52	70-20	801896	738048	
1.13	75-20	1059357	722486	
1.43	75-25	855459.2	738448	
0.87	80-15	1318200	722486.3	
1.09	80-20	1070378	716950	

موارد رقابت پذیر در جدول (۲) همراه با جزئیات سرمایه گذاری و دوره‌های بازگشت سرمایه آورده شده‌اند. از بین کلیه مواردی که از نظر سود اقتصادی و زمان بازگشت سرمایه مناسب بودند، مواردی انتخاب شدند که از نظر تعادل هیدرولیکی و میزان جریان بخار در بخش غنی سازی برج به ظرفیت مجاز برج اولیه نزدیک باشند و بتوان آنها را براحتی اصلاح کرد. تحلیل و استنتاجی مشابه آنچه کاهش نیروی محرکه در ایجاد پنالتهای حرارتی برج داشت، موجب افزایش جریان بخار در ستون و در نتیجه باعث کاهش ظرفیت برج می‌شود. برای رفع این گلوگاه هیدرولیکی می‌توان از دو راهکار زیر استفاده کرد:

- (الف) افزایش تعداد سینی‌های بالای چگالنده جانبی و پایین جوش آور جانبی به تعدادی که بتواند کمبود کار جداسازی ناشی از کم شدن نیروی محرکه را جبران کند.  
(ب) اگر موقعیت برای افزایش تعداد سینی‌ها وجود ندارد، یا باید از سینی‌های پر بازده تر یا از آکنه‌ها استفاده کنیم [۱].
- [۱۱، ۱۲]

جدول (۲): گزینه‌های برتر بین شیفیت‌های دمایی بین چگالنده و جوش آور جانبی در سناریوهای مختلف بهای الکتریسیته

هزینه الکتریسیته	هزینه سالانه صرفه جویی سرمایه گذاری (\$/سال)		دوره بازگشت سرمایه (سال)
	مراحل	سرمایه (سال)	
سناریوی هزینه پایین الکتریسیته	75-15	276912	4.31
	80-10	314565.6	3.71
	80-15	276846.4	4.29
سناریوی هزینه متوسط	70-15	571052	2.11

۸- نتیجه گیری  
پروفایل دما-آنتالپی یک برج تقطیر نشان دهنده امکانپذیری ترمودینامیکی یک پمپ حرارتی در عملیات جداسازی است. کاربرد پمپ‌های حرارتی در مراحل میانی یک برج برتری‌هایی برای آن در بازیابی حرارت از چگالنده برای استفاده مجدد در جوش آور نسبت به برج‌های ساده فراهم می‌کند. یکی از علت‌ها آن است که بین مراحل میانی یک برج، نیازهای حرارتی در اختلاف دماهای کوچک تری شیفیت پیدا می‌کنند، پس نیاز کمتری به کار خارجی دارند و نرخ بازگشت داخلی سرمایه را بهبود می‌بخشند. صرفه جویی انرژی از راه بازیابی حرارت کم کیفیت با استفاده از پمپ حرارتی، در بسیاری از کارها به خصوص در جاهایی که با بار حرارتی زیاد، اختلاف دمای کم دارند مفید واقع می‌شود. یکی از عوامل محدود کننده استفاده از سیستم‌های پمپ حرارتی مسائل ناشی از پنالتهای حرارتی است که باعث افزایش مصرف حرارت

B.E.A. Terranova, W. Westberg, "Temperature-heat diagrams for complex columns. 1. Intercooler / inter heated distillation columns", Int. Engng. Chem. Res. 28 (1989) 1374 - 1379.

Z. Olujic, L. Sun, A. de rijke, P.J. Jansens, "Conceptual design of an internally heat integrated propylene-propane splitter", Energy 1(2006) 859-873.

D.L. Hodgett, "The assessment of heat pump assisted distillation using thermodynamic criteria", Second International Symposium on Large Scale Applications of Heat Pumps. York, England, Capenhurst Electricity.

S. Gopichand, S. Devotta, T. Omidheyi, F.A. Holland, "Heat pump assisted distillation: potential for industrial applications", Int. J. Energy Res. 12 (1982) 569-582.

J.R. Flower, R. Jackson, "Energy requirements in the separation of mixtures by distillation", Trans. Instr. Chem. Engrs. 42 (1964) T249 - T258.

H.J. Sauer Jr, R.H. Howell, "Heat Pump Systems". 1st edn, Krieger, New York, 1991.

Max S. Peters, "Plant Design and Economical Engineers, Fifth edition". McGraw-Hill chemical engineering series, 2003, pp. 891-898.

APLUS 111 Getting Started EO Modeling, 2001, Aspen Technology, Cambridge.

## ۱۱- زیر نویس ها

<sup>1</sup> Column Grand composite Curve

<sup>2</sup> Sequential Equation

<sup>3</sup> Equation Oriented

در چگالنده و جوش آور جانبی می‌شود. در نمونه‌ای که بررسی شد، این پدیده باعث افزایش کار خارجی سیستم می‌شود. اثر دیگر آن، ایجاد گلوگاه هیدرولیکی است که به علت افزایش نرخ بازروانی برلی جبران کاهش نیروی محرکه ایجاد می‌شود. اثرات این پدیده را می‌توان با افزایش تعداد سینی‌ها و یا مراحل پر بازده تر تعادلی اصلاح کرد.

با توجه به تمام محدودیت‌ها و قابلیت‌هایی که در مقاله به آنها اشاره شد، برای هر سناریوی هزینه الکتریسیته موارد زیر از نظر صنعتی قابلیت اجرایی بیشتری دارند:

قراردهی چگالنده و جوش آور در سینی‌های ۸۰ و ۱۰۰ برای هزینه پایین و سینی ۱۵ و ۷۵ برای هزینه متوسط و ۱۵ و ۸۰ برای هزینه الکتریسیته بالا، هم قابلیت اقتصادی بالایی به طرح می‌دهد، هم از نظر قابل حل بودن مشکلات پناهی حرارتی و هیدرولیکی، قابلیت اجرایی بالایی دارد.

## ۹- فهرست علائم

A	سطح انتقال حرارت مبدل‌ها
n	طول عمر مفید تجهیزات
P	توان کمپرسور
T <sub>SR</sub>	دمای سیال عامل در جوش آور جانبی
T <sub>SC</sub>	دمای سیال عامل در چگالنده جانبی
Q <sub>SR</sub>	بار حرارتی جوش آور جانبی
Q <sub>SC</sub>	بار حرارتی چگالنده جانبی
W	کار کمپرسور

## ۱۰- مراجع

- میثم کمالی نژاد، بهینه سازی اکزرژی- پینچ برج های تقطیر، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده مکانیک دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی، ۱۳۸۶.
- James G Gebbie, Micheal K. Jensen, piotr A. Domanski, "Experimental transient performance of a heat pump equipped with a distillation column", International journal of refrigeration 30(2007) 499-505.
- R. Bernstead, F.W. Sharman, "Heat pumps and pinch technology", Heat Recovery Systems & CHP 10 (4) (1990) 387-398.
- E. Wallin, P.A. Franck, T. Bertson, "Heat pumps in industrial processes an optimization methodology", Heat Recovery Systems & CHP 10 (4) (1990) 437- 446.
- P. Rivera-Ortega et al. "thermal integration of heat pumping systems in distillation columns" / Applied Thermal Engineering 19 (1999) 819-829.
- S. Bandyopadhyay et al, "Temperature-enthalpy curve for energy targeting of distillation columns", Computers Chem.Engng vol.22, pp. 1733-1744, 1998.