

A New Step in the Liquefied Petroleum Gas Separation Process by using a Divided wall distillation column

Sirous Hashemi¹ , Ataallah Kamyabi^{2✉} , Sattar Ghader³ 

1. Department of Chemical Engineering Faculty of Engineering, University of Shahid Bahonar, Kerman, Iran.

E-mail: Seros99@gmail.com

2. Corresponding author Department of Chemical Engineering Faculty of Engineering, University of Shahid Bahonar, Kerman, Iran.

E-mail: kamyabi@uk.ac.ir

3. Department of Chemical Engineering Faculty of Engineering, University of Shahid Bahonar, Kerman, Iran.

E-mail: sattar.ghader@gmail.com

Article Info

Article type: research paper

Article history:

Received 6 April 2024

Received in revised form 20 July 2024

Accepted 13 August 2024

Published online 25 August 2024

Keywords:

Divided wall column,
De-ethanizer column,
De-propanizer column,
shortcut method,
Liquefied Petroleum Gas(LPG).

ABSTRACT

Designing a sustainable and economic distillation system is a major global challenge in the chemical industry. As a new generation of distillation columns, Divided wall columns have attracted a lot of attention with advantages such as reducing energy consumption and occupying less space. This research aims to investigate and simulate the performance of the Divided wall column for the Liquefied Petroleum Gas separation process in order to improve efficiency, increase purity and recover more products. In this regard, first, by using a shortcut method based on valid articles, initial values such as the number of trays and the flow rate of the incoming and outgoing flows are estimated for each part of the column. Then, the efficiency of these initial values has been validated by detailed simulation in Aspen Plus software. The simulation results show that the use of the Divided wall column instead of the two De-ethanizer and De-propanizer columns in the Liquefied Petroleum Gas separation process will bring about 35% energy savings. This significant savings will be a valuable achievement from an economic point of view. In addition, the number of reboilers, condensers, return pumps and heat exchangers will also be reduced. Also, the use of the Divided wall column leads to an increase in the purity of ethane from 0.49 to 0.74 and a 25% increase in propane recovery. This indicates the high efficiency of this type of column in the Liquefied Petroleum Gas separation process. Investigate and simulate the performance of the Divided wall column for the Liquefied Petroleum Gas separation process. Using the shortcut method to obtain design data, then simulating the Divided wall column in the Aspen Plus software. Energy savings, increased ethane purity and increased propane recovery. The results show the effectiveness of the Divided wall column for distillation and Liquefied Petroleum Gas separation, the thermal load of the condenser and reboiler has been greatly reduced.

Cite this article: Hashemi, Kamyabi, Ghader, (2024). A New Step in the Liquefied Petroleum Gas Separation Process by using a Divided wall distillation column, Journal of Separation Science and Engineering, 16 (1), 61-76.

<http://doi.org/10.22103/jsse.2024.4408>



© The Author(s).

Publisher: Shahid Bahonar University of Kerman

گامی نوین در فرآیند جداسازی گازمایع با بکارگیری برج تقطیر دیواره میانی

سیروس هاشمی^۱، عطاالله کامیابی^۲، ستار قادر^۳

۱. گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران. رایانامه: Seros99@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران. رایانامه: kamyabi@uk.ac.ir

۳. گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران. رایانامه: sattar.ghader@gmail.com

چکیده

طراحی یک سیستم تقطیر پایدار و اقتصادی یک چالش بزرگ جهانی در زمینه صنایع شیمیایی است. برج‌های دیواره میانی به عنوان نسل جدیدی از برج‌های تقطیر، با مزایایی همچون کاهش مصرف انرژی و اشغال فضای کمتر، توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند. این تحقیق با هدف بررسی و شبیه‌سازی عملکرد برج دیواره میانی در فرآیند جداسازی گازمایع به دنبال ارتقای راندمان، افزایش خلوص و بازیابی بیشتر محصولات است. در این راستا، ابتدا با استفاده از روشی میانبر مبتنی بر مقالات معتبر، مقادیر اولیه‌ای نظیر تعداد سینی و دبی جریان‌های ورودی و خروجی برای هر بخش از برج برآورد می‌شود. سپس، کارایی این مقادیر اولیه با شبیه‌سازی دقیق در نرم افزار Aspen Plus اعتبارسنجی شده است. نتایج شبیه‌سازی گویای آن است که استفاده از برج دیواره میانی به جای دو برج اتان‌زدا و پروپان‌زدا در فرآیند جداسازی گازمایع، حدود ۳۵ درصد صرفه جویی در مصرف انرژی را به ارمغان خواهد آورد. این صرفه‌جویی قابل توجه، دستاوردی ارزشمند از نظر اقتصادی خواهد بود. علاوه بر این، تعداد جوشاننده، چگالنده، پمپ‌های برگشتی و مبدل‌های حرارتی نیز کاهش خواهد یافت. همچنین استفاده از برج دیواره میانی منجر به افزایش خلوص اتان از ۰/۴۹ به ۰/۷۴ و ۲۵ درصد افزایش بازیابی پروپان می‌شود. این امر نشان دهنده کارایی بالای این نوع برج در فرآیند جداسازی گازمایع است. بررسی و شبیه‌سازی عملکرد برج دیواره میانی در فرآیند جداسازی گازمایع. استفاده از روش میانبر برای بدست آوردن داده‌های طراحی سپس شبیه‌سازی برج دیواره میانی در محیط نرم افزار Aspen Plus. صرفه جویی در مصرف انرژی، افزایش خلوص اتان و افزایش بازیابی پروپان. نتایج نشان دهنده موثر بودن برج دیواره میانی جهت عملیات تقطیر و جداسازی گازمایع است و بار حرارتی چگالنده و جوش‌آور کاهش یافته است.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: علمی پژوهشی

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۴۰۳/۱/۱۸

دریافت پس از اصلاح: ۱۴۰۳/۴/۳۰

پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۵/۲۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۶/۴

کلمات کلیدی:

برج دیواره میانی،

برج اتان‌زدا،

برج پروپان‌زدا،

روش میانبر،

گازمایع.

استناد: هاشمی، کامیابی، قادر، (۱۴۰۳). گامی نوین در فرآیند جداسازی گازمایع با بکارگیری برج تقطیر دیواره میانی. نشریه علوم و مهندسی جداسازی، (۱) ۱۶، ۶۱-۷۶.

<http://doi.org/10.22103/jsse.2024.4408>

ناشر: دانشگاه شهید باهنر کرمان



© نویسندگان.

۱- مقدمه

گازمایع^۱ ترکیبی از دو هیدروکربن پروپان و بوتان (نرمال و ایزوبوتان) با نسبت‌های مختلف است. این محصول ارزشمند پالایشگاه‌های نفت خام کاربردهای مختلفی دارد. واحدهای جداسازی گازمایع در پالایشگاه‌ها اهمیت بسیاری داشته زیرا به تفکیک و جداسازی مخلوط‌های گازی تولیدی از فرآیندهای پالایش نفت می‌پردازند. این گازها شامل اتان، پروپان، بوتان و مواد خام مشابه هستند که باید از یکدیگر جدا شوند تا برای مصارف مختلف مورد استفاده قرار گیرند. در این واحد جداسازی برج‌های اتان‌زدا و پروپان‌زدا به منظور تفکیک و جداسازی اتان و پروپان از سایر مواد گازی استفاده می‌شوند.

در فرآیند تقطیر، به منظور کاهش مصرف انرژی راهکارهای مختلفی ارائه شده است یکی از این راهکارها، برج‌های تقطیر کوپل حرارتی شده (اتصال حرارتی شده) است. در سیستم‌های تقطیر کوپل حرارتی شده که به عنوان جایگزین برج‌های ساده مطرح شده است، اغلب یک چگالنده یا جوش‌آور از سیستم کم می‌شود. برج تقطیر دیواره میانی، یک نمونه از برج‌های تقطیر کوپل حرارتی بوده و ویژگی منحصر به فرد این برج، وجود دیواری است که فضای داخلی برج را به دو قسمت خوراک و جریان جانبی تقسیم می‌کند. این دیواره از اختلاط طرف خوراک و جریان جانبی جلوگیری و از پدیده نامطلوب اختلاط دوباره برای جز میانی جلوگیری می‌کند.

عمده تفاوت برج دیواره میانی با برج‌های سنتی تقطیر در قابلیت انجام فرآیندهای تقطیر در بخش‌های مختلف آن است. این برج به صورت همزمان می‌تواند فرآیندهای تقطیر، شامل جداسازی مخلوط‌های چندجزئی، فازهای مختلف یک مخلوط و یا تقطیر متناوب را انجام دهد. در یک برج دیواره میانی عملیات تقطیر در مقایسه با برج‌های سنتی با تعداد برج کمتر و به صورت یکپارچه و با کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی انجام می‌شود. مطالعات تئوری نشان داده‌است که به طور متوسط حدود ۳۰ الی ۵۰ درصد کاهش هزینه انرژی در مقایسه با چینش‌های معمولی خواهیم داشت [۱].

مفهوم برج دیواره میانی در ابتدا توسط ریچارد رایت در سال ۱۹۴۹ پیشنهاد شد. وی در آنجا ادعا کرد که یک دیواره‌ای عمودی در حدود بخش میانی برج می‌تواند به طور موثر از ترکیب شدن محصولات جانبی توسط جزءهای سبکتر و

سنگین‌تر جلوگیری کند و از یک برج می‌توان سه محصول نسبتاً خالص به دست آورد.

همچنین برج دیواره میانی در مقایسه با برج جریان جانبی که خلوص محصول میانی آن کم است، توانایی جداسازی برتری داشته، که اصلی‌ترین علت آن، این است که دیواره عمودی به طور موثر از مخلوط شدن قسمت خوراک و محصولات در برج جلوگیری می‌کند [۲].

ژونگ ون سونگ^۲ و همکاران در سال ۲۰۲۴ به تجزیه و تحلیل انرژی، انرژی، اقتصادی و زیست محیطی یک برج دیواره میانی چهار محصولی به کمک فشرده سازی مجدد بخار می‌پردازند نتایج نشان می‌دهد به طور کلی این برج در مقایسه با چینش معمول قادر به کاهش هزینه سالانه ۲۸/۱۳ درصد، مصرف انرژی ۳۲/۵۵ درصد، انتشار گاز ۳۲/۳۹ درصد و بازده انرژی ۱۴/۹۸ درصدی می‌باشد [۳].

یانیک وایبل و همکاران در سال ۲۰۲۳ به طراحی و بهره برداری اولین برج دیواره میانی چهار محصولی می‌پردازند و بیان می‌کنند که توانسته‌اند با طراحی، ساخت و راه‌اندازی اولین برج دیواره میانی چندگانه در مقیاس آزمایشی در دانشگاه اولم، اولین داده‌های عملیاتی در نوع خود را ارائه داده و داده‌های تجربی به دست آمده در طول این تحقیق به عنوان دلیلی جهت پیاده‌سازی عملی مفهوم برج دیواره میانی چندگانه خواهد بود [۴].

ژانگ و همکاران در سال ۲۰۲۲ به بررسی بهینه‌سازی طراحی و کنترل برج دیواره میانی برای خالص‌سازی تری کلروسیلان پرداختند که طی بررسی انجام شده، کیفیت پلی سیلیکون و مصرف انرژی مستقیماً تحت تاثیر فرآیند تصفیه تری کلروسیلان قرار می‌گیرد. در این کار، برج دیواره میانی به عنوان یک فناوری امیدوارکننده در جهت صرفه‌جویی انرژی، برای تصفیه تری کلروسیلان، استفاده و در مقایسه با فرآیند تقطیر معمولی، برج دیواره میانی می‌تواند هزینه کل سالانه، انتشار (CO₂) و تلفات انرژی را به ترتیب تا ۳۵/۸۱ درصد، ۵۳/۵۶ درصد و ۵۴/۱ درصد کاهش دهد [۵].

زینگ و همکاران در سال ۲۰۲۰ از بررسی هایشان این نتایج حاصل گردید که برج‌های دیواره میانی قادر به کاهش هزینه‌های عملیاتی و صرفه‌جویی در هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای برج‌های تقطیر هستند، در واقع از نظر پیشرفت فرآیند تقطیر یک استراتژی مفید بوده و از نظر اقتصادی و زیست

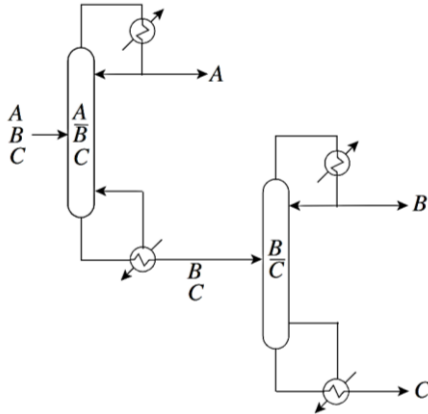
² - Zhong-wen Song

¹ - Liquefied Petroleum Gas (LPG)

هریک از این چیدمان‌ها به صورت خلاصه توضیح داده شده است.

۱-۲ چیدمان مستقیم

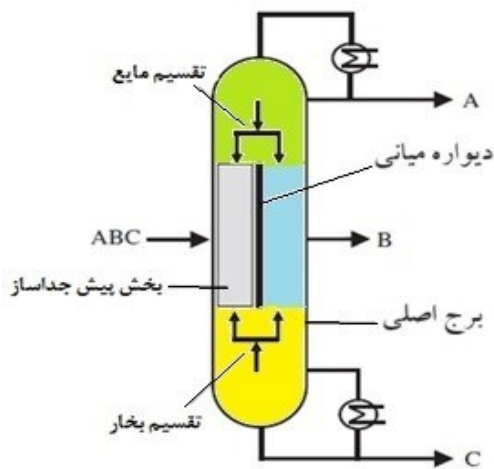
چیدمان مستقیم یکی از روش‌های جداسازی مخلوط‌های سه جزئی است که از دو برج متوالی معمولی تشکیل شده است. در این روش، سبک‌ترین جزء خوراک در برج اول جدا می‌شود و دو جزء دیگر در برج دوم از هم تفکیک می‌شوند [۸].



شکل ۱: چیدمان مستقیم با اقتباس از مرجع [۸].
Figure 1: Direct layout adapted from reference [8].

۲-۲ چیدمان برج با دیواره میانی

با قرار دادن هر دو قسمت پیش جداساز و برج اصلی در یک پوسته و نصب دیواره در داخل آن، می‌توان برج تقطیر دیواره میانی را معرفی نمود. وجود دیواره میانی برج که فضای داخلی برج را به دو قسمت خوراک و جریان جانبی تقسیم می‌کند، از اختلاط خوراک و جریان جانبی جلوگیری می‌کند [۸].



شکل ۲: برج با دیواره میانی با اقتباس از مرجع [۹].
Figure 2: A Divided wall column adapted from reference [9].

محیطی، انتخاب‌های بهتری نسبت به توالی‌های تقطیر معمولی مربوطه هستند که باعث صرفه جویی ۴۰ درصدی در هزینه انرژی می‌شود [۶].

الهی در سال ۱۳۹۶ با بیان اینکه در سال‌های اخیر پیشرفت‌های زیادی در زمینه برج‌های تقطیر انجام گرفته جایگاه ویژه‌ای برای برج‌های پتلیوک و برج با دیواره تقسیم شده در نظر می‌گیرد. همچنین بیان می‌کند یکی از چالش‌های مهم برای برج‌های با دیواره تقسیم شده، طراحی آنها بوده است. و به بررسی دو روش میانبر ستوده و دیگرام حداقل بخار (V_{min}) برای طراحی و شبیه‌سازی برج با دیواره تقسیم شده و امکان جایگزینی آن به جای دو برج پروپان‌زدا و بوتان‌زدا واحد ۱۰۷ از فاز ۱۸ پالایشگاه هفتم پارس جنوبی می‌پردازد [۷].

چون هیچ بسته نرم افزاری، شبیه‌سازی این برج را به عنوان یک ماژول استاندارد ارائه نمی‌دهد. از این رو مهندسان از مدل‌های چند ستونی برای شبیه‌سازی چنین برج‌هایی استفاده می‌کنند. در چنین شبیه‌سازی‌هایی، برج دیواره میانی به بخش‌های مستقل مختلف تقسیم می‌شود و هر بخش با استفاده از یک مدل برج معمولی مدل‌سازی می‌شود. با این حال، این رویکرد حل متوالی، گاهی اوقات چالش برانگیز است. با توجه به این‌که تاکنون طراحی و شبیه‌سازی این برج برای واحد جداسازی گازمایع به طور گسترده مورد مطالعه قرار نگرفته است، مطالعه در این مورد منجر به ایجاد بینشی نو در راستای استفاده از این برج در صنایع خواهد شد.

در این تحقیق از روش میانبر هوسانا^۳ و همکاران برای طراحی این برج جهت بدست آوردن پارامترهای طراحی استفاده می‌گردد، که شرایط ذکر شده با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز Aspen Plus برای واحد جداسازی گازمایع پالایشگاهی شبیه‌سازی شده و انتظار می‌رود با استفاده از نتایج حاصل از شبیه‌سازی و جایگزینی این برج با دو برج اتان‌زدا و پروپان‌زدا، میزان بار حرارتی چگالنده و جوش آور به میزان قابل توجهی کاهش یافته، که در نتیجه باعث کاهش هزینه عملیاتی گردد.

۲- تئوری تحقیق

برای جداسازی مخلوط‌های سه جزئی با توجه به نوع خوراک می‌توان چیدمان‌هایی نظیر چیدمان مستقیم برج‌های معمولی یا چیدمان برج‌های کوپل حرارتی استفاده کرد. در ادامه

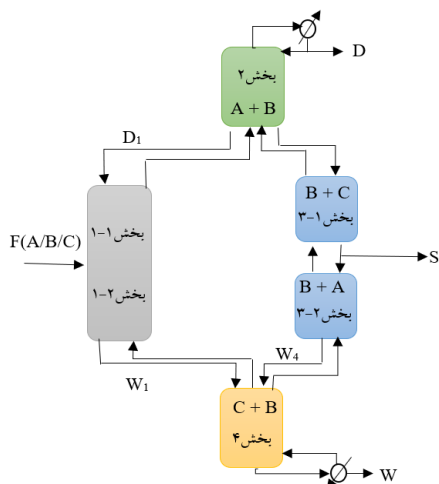
³ - Hosanna

۳-۲ روش‌های میانبر

این روش‌ها به هدف شبیه‌سازی رفتار برج دیواره میانی با استفاده از مدل‌های ریاضی ساده‌تر یا روش‌های میانبر که رفتار دقیق را تقریب می‌زنند، ارائه شده‌اند. این روش‌ها بر اصول و معادلات اساسی تکیه دارند و با انجام کمترین محاسبات، دقت قابل قبولی را ارائه می‌دهند.

۴-۲ طراحی برج دیواره میانی با استفاده از روش میانبر:

در این روش طراحی براساس مقاله ارائه شده هوسانا و همکاران [۱۱،۱۰] برای طراحی میانبر برج دیواره میانی، این برج را به صورت شکل ۳ به پنج بخش تقسیم کرده و سپس با استفاده از معادلات ارائه شده و همچنین معادلات آندروود-فنسکه طراحی این برج انجام می‌شود.

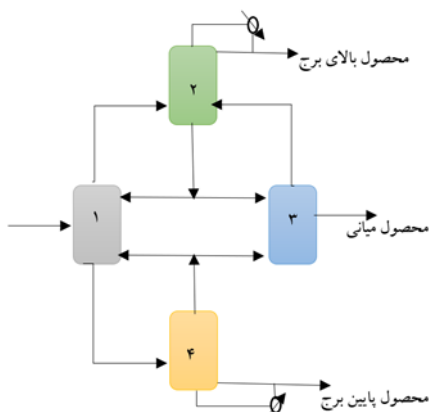


شکل ۴: جریان خالص جزء در برج تقطیر کوپل کامل حرارتی با اقتباس از مرجع [۱۲].

Figure 4: The net flow of the component in the full thermal coupler distillation column, adapted from reference [12].

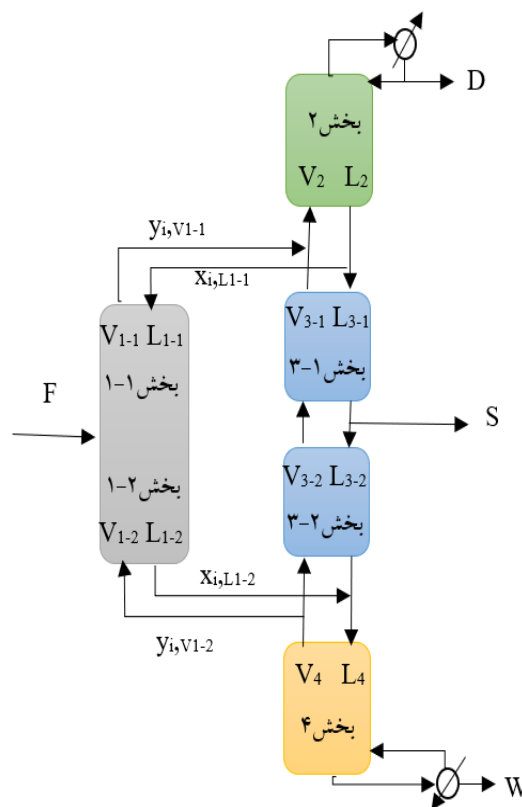
۵-۲ شبیه‌سازی برج دیواره میانی

هر روش شبیه‌سازی مزایا و محدودیت‌های خود را دارد، مهم است روش شبیه‌سازی انتخاب شده را به دقت ارزیابی کرد تا نتایج قابل اعتمادی برای طراحی و بهینه‌سازی برج‌های دیواره میانی به دست آید. مدل چهار برجی به عنوان بهترین ساختار مناسب برای مطالعه شبیه‌سازی‌های پویا و کنترل فرآیند در نظر گرفته شده است. تقسیم یک برج دیواره میانی معمولی به چهار بخش ستونی مجزا، که دو ستون در بخش میانی یکی به عنوان پیش جداکننده و دیگری بخش محصول جانبی است که به صورت موازی متصل شده‌اند. این مدل به چهار حدس اولیه برای چهار جریان ترکیبی نیاز دارد، بنابراین برای جلوگیری از مشکل همگرایی در نرم افزار ابتدا از روش میانبر پارامترهای طراحی را بدست آورده و سپس شبیه‌سازی برج دیواره میانی انجام می‌شود [۱۳].



شکل ۵: مدل برج دیواره میانی چهار برجی با اقتباس از مرجع [۱۳].

Figure 5: Model of the Divided wall column with four towers adapted from reference [13].



شکل ۳: شماتیک مدل برج دیواره میانی اعمال شده با اقتباس از مرجع [۱۲].

Figure 3: Schematic of the applied Divided wall column model adapted from reference [12].

۳- روش تحقیق

برای بررسی امکان‌سنجی جایگزینی برج تقطیر دیواره میانی با دو برج اتان‌زدا و پروپان‌زدا، در واحد جداسازی گازمایع مراحل زیر دنبال شده است:

۱. شبیه‌سازی برج‌های اتان‌زدا و پروپان‌زدا: در این مرحله، دو برج اتان‌زدا و پروپان‌زدا که در حال حاضر در واحد گازمایع استفاده می‌شوند، با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز Aspen Plus شبیه‌سازی شده است. هدف از این کار، جمع‌آوری داده‌های عملکردی، درصد خلوص و میزان بازیابی محصولات این برج‌ها برای مقایسه با برج تقطیر دیواره میانی در مراحل بعدی است.

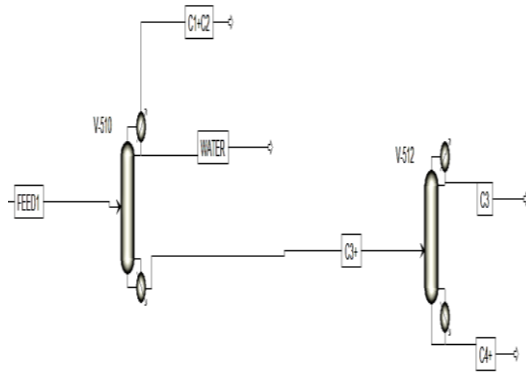
۲. طراحی برج تقطیر دیواره میانی: در این مرحله، برج تقطیر دیواره میانی با توجه به خوراک واحد، درصد خلوص و بازیابی مورد انتظار محصولات، طراحی شده است. برای این کار از یک روش طراحی میانبر (روش طراحی میانبر برج تقطیر دیواره میانی براساس مقاله هوسانا و همکاران) استفاده شده است.

۳. شبیه‌سازی برج تقطیر دیواره میانی: در این مرحله، برج تقطیر دیواره میانی با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز Aspen Plus شبیه‌سازی شده است. برای شبیه‌سازی از مدل‌های چند برجی استفاده می‌شود، به این صورت که برج دیواره میانی به بخش‌های مستقل مختلف تقسیم و هر بخش با استفاده از یک مدل برج معمولی مدل‌سازی می‌شود. به همین علت مبتنی بر مقالات معتبر از روش چهار برجی، جهت شبیه‌سازی برج تقطیر دیواره میانی استفاده شده است.

۴. مقایسه نتایج: در نهایت، نتایج شبیه‌سازی برج تقطیر دیواره میانی با نتایج شبیه‌سازی برج‌های اتان‌زدا و پروپان‌زدا مقایسه می‌شوند.

۴- شبیه‌سازی برج اتان‌زدا و پروپان‌زدا

در ابتدا جهت مطالعه دقیق واحد جداسازی گازمایع، برج اتان‌زدا و پروپان‌زدا در محیط نرم افزار Aspen Plus شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل جهت مقایسه در انتهای تحقیق آورده شده است.



شکل ۶: برج اتان‌زدا و پروپان‌زدا
Figure 6: Ethanizer and propanizer column

۵- معادلات حاکم

۵-۱ طراحی با استفاده از روش میانبر هوسانا

براساس مراجع [۱۰-۱۲] در این طراحی، با توجه به بخش اعظم خوراک، که از اتان، پروپان و بوتان تشکیل شده است، به ترتیب به عنوان سازنده‌های کلیدی سبک، میانی و سنگین نام‌گذاری شده‌اند. مشخصات خوراک مورد استفاده در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

جدول ۱. مشخصات خوراک.

Table 1. Feed specifications.

α_i	Kvalue	Z_i	دبی مولی (کیلو مول بر ساعت)	خوراک	جزء
		جزء مولی			
۲/۸۹	۱/۵۹۸	۰/۱۵۷	۵۴/۰۹	اتان (جزء کلیدی سبک)	A
۱/۵۵	۰/۸۵۷	۰/۳۷۸	۱۳۱/۷۷	پروپان (جزء میانی)	B
۱	۰/۵۴۹۹	۰/۴۶۵	۱۶۱/۱۴	بوتان (جزء کلیدی سنگین)	C
			۳۴۷	مجموع	

جز مولی جزء ماده B در محصول میانی برج $X_{B,S}$

جز مولی جزء ماده C در محصول پایینی برج $X_{CW,4}$

علاوه بر سه آیتم فوق نسبت تقسیم اجزا سبک و سنگین

در محصول میانی برج نیز مشخص است. $\frac{X_{A,S}}{X_{C,S}}$ نسبت جزء مولی

یک خوراک سه جزئی شامل اجزاء A, B, C در نظر گرفته

شده است. با فرض اینکه جزء A فرارترین جزء و جزء C سنگین‌ترین جزء باشد. مشخصات محصولات خروجی از هر سه برج معلوم است به صورتیکه:

جز مولی جزء ماده A در محصول بالای برج $X_{A,D,2}$

که در بالای برج، مقدار بازیابی جزء C صفر ($X_{C,D_2} = 0$) و در پایین برج نیز مقدار بازیابی جزء A صفر ($X_{A,W_4} = 0$) در نظر گرفته می‌شود. (این فرضیات در روش میانبر پیشنهاد شده است).

ماده A به جز مولی ماده C در محصول میانی برج است. در این مقاله میزان بازیابی جزء A در محصول بالای برج ۹۸ درصد، میزان بازیابی جزء B در محصول میانی برج ۹۸ درصد و میزان بازیابی جزء C در محصول پایینی برج ۹۶ درصد در نظر گرفته شده است. دو فرض اولیه مهمی که باید در نظر گرفت این است

جدول ۲. مقدار بازیابی اجزاء.

Table 2. Component recovery amount.

۰	X_{AW4}	۰/۰۱	X_{AS}	۰/۹۸	X_{AD2}
۰/۰۴	X_{BW4}	۰/۹۸	X_{BS}	۰/۰۲	X_{BD2}
۰/۹۶	X_{CW4}	۰/۰۱	X_{CS}	۰	X_{CD2}

موازنه برای ماده B :

$$FZ_B = D_2 X_{B,D_2} + S X_{B,S} + W_4 X_{B,W_4} \quad (۳)$$

موازنه برای ماده C :

$$FZ_C = D_2 X_{C,D_2} + S X_{C,S} + W_4 X_{C,W_4} \quad (۴)$$

پارامتر دیگر نیز باید معلوم و مشخص گردند تا معادلات حل و مجهولات مشخص گردند (معادله ۸).

$$X_{C,D_2} = 0 ; X_{A,W_4} = 0 \quad (۸)$$

نتایج حاصل در جدول ۳ قابل مشاهده است.

با توجه به شکل ۳ معادلات مربوط به موازنه مواد به صورت زیر خواهد بود:

$$(۱)$$

$$F = D_2 + S + W_4$$

موازنه برای ماده A :

$$FZ_A = D_2 X_{A,D_2} + S X_{A,S} + W_4 X_{A,W_4} \quad (۲)$$

F و Z_i ها مشخصات خوراک اند و مشخص D_2, S, W_4 نیز به ترتیب نرخ جریان بالایی، میانی و پایینی برج هستند. با توجه به اینکه تعداد مجهولات از تعداد معادلات بیشتر است، چند

$$X_{A,D_2} + X_{B,D_2} + X_{C,D_2} = 1 \quad (۵)$$

$$X_{A,S} + X_{B,S} + X_{C,S} = 1 \quad (۶)$$

$$X_{A,W_4} + X_{B,W_4} + X_{C,W_4} = 1 \quad (۷)$$

جدول ۳. دبی مولی بدست آمده برای جریان خروجی (محصولات) از برج.

Table 3. Molar flow rate obtained for the output stream (products) from the column.

محصول بالایی برج (D_2)	محصول جانبی (S)	محصول پایینی برج (W_4)	جزء
(kmol/h)	(kmol/h)	(kmol/h)	
۵۱/۳۴	۲/۷۵	۰	A
۰/۶۱	۱۲۹/۳۳	۱/۸۲	B
۰	۴/۸۷	۱۵۶/۲۵	C
۵۱/۹۵	۱۳۶/۹۵	۱۵۸/۰۷	مجموع

$$\beta = \frac{\alpha_B - \alpha_C}{\alpha_A - \alpha_C} \quad (9)$$

$$D_1 = FZ_A + FZ_B\beta \quad (10)$$

$$W_1 = FZ_B(1 - \beta) + FZ_C \quad (11)$$

$$y_{CD_1} = 1 - y_{AD_1} - y_{BD_1} \quad (14)$$

$$x_{AW_1} = \frac{Sx_{AS}}{W_1} \quad (15)$$

$$x_{BW_1} = \frac{(1-\beta)Z_{BF}}{W_1} \quad (16)$$

$$x_{CW_1} = 1 - x_{AW_1} - x_{BW_1} \quad (17)$$

جدول ۴ ترکیب درصد جریان‌های خروجی از برج اول را نشان می‌دهد.

با تعریف پارامتر β به عنوان نسبت تقسیم جزء B در بالا و پایین برج اول که برای این پارامتر معادله (۹) را برای بالای برج اول داریم و همچنین تعریف فراریت‌های نسبی $\alpha_A, \alpha_B, \alpha_C$ که نسبت به جزء C می‌باشند ($\alpha_{AC}, \alpha_{BC}, \alpha_{CC}$) می‌توان از معادلات (۱۰) و (۱۱) نرخ D_1 و W_1 را بدست آورد.

با حل معادلات فوق، مقادیر β, D_1 و W_1 به ترتیب ۰/۲۹۴، ۹۲/۶۵۳ و ۲۵۴/۳۴۶ بدست آمده است. سپس برای بدست آوردن ترکیب درصد مولی برای برج اول از معادلات زیر استفاده می‌شود:

$$y_{AD_1} = \frac{Z_{AF} - Sx_{AS}}{D_1} \quad (12)$$

$$y_{BD_1} = \frac{\beta Z_{BF}}{D_1} \quad (13)$$

جدول ۴. ترکیب درصد مولی بدست آمده برای جریان‌های خروجی از برج اول.

Table 4. The molar component composition obtained for the outflows from the first column.

۰/۰۰۷	X_{AW_1}	۰/۵۶۷	y_{AD_1}
۰/۳۶۴	X_{BW_1}	۰/۴۱۷	y_{BD_1}
۰/۶۲۹	X_{CW_1}	۰/۰۱۶	y_{CD_1}

$$R_{min1} = \frac{V_{min1}}{D_1} - 1 \quad (20)$$

$$R = aR_{min} \quad (21)$$

برای نسبت جریان برگشتی با اشاره به پیشنهاد تریبال (۱/۲ - ۱/۵) برابر، حداقل جریان برگشتی در نظر گرفته، که در این مقاله (۱/۳) در نظر گرفته شده است.

$$R = \frac{L}{D} \quad (22)$$

$$R_{min} = \frac{L_{min}}{D} \quad (23)$$

$$L_{1-2} = L_{1-1} + qF \quad (24)$$

برای برج دوم:

$$q' = - \frac{L_{min1}}{D_1} \quad (25)$$

با استفاده از معادلات آندروود نرخ جریان بخار حداقل برج اول ($V_{min,1}$) محاسبه می‌شود. ابتدا باید ریشه‌های معادله آندروود بدست آیند که برای این کار از معادله (۱۸) استفاده می‌شود.

برای محاسبه حداقل نسبت برگشتی ابتدا θ (ریشه معادله) از رابطه زیر بدست آورده می‌شود:

$$1 - q = \frac{\sum \alpha_i z_i}{(\alpha_i - \theta)}, \quad q=1 \quad \text{برای مایع اشباع} \quad (18)$$

پس از حدس و خطا دو ریشه‌ای مورد قبول اند که در معادله (۱۸) صدق کنند. با جای‌گذاری دو ریشه بدست آمده در معادله (۱۹) دو مقدار برای نرخ جریان بخار حداقل بدست می‌آیند که حداکثر مقدار این دو نرخ جریان بخار حداقل، به عنوان نرخ جریان بخار حداقل برج اول در نظر گرفته می‌شود.

$$V_{min i} = \frac{\sum \alpha_i x_i D_i D_i}{(\alpha_i - \theta)} \quad (19)$$

برای محاسبه حداقل نسبت برگشتی ابتدا θ' (ریشه معادله) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V_{3-1} = V_2 \quad (32)$$

$$L_{3-2} = L_2 - L_{1-1} - S \quad (33)$$

$$V_{3-2} = V_{3-1} \quad (34) \quad D_1(1 - q') = \sum \frac{\alpha_i x_{iD2} D_2}{\alpha_i - \theta'} \quad (26)$$

$$L_4 = L_2 + F - S \quad (35) \quad V_{\min 2} = \sum \frac{\alpha_i x_{iD2} D_2}{\alpha_i - \theta'} \quad (27)$$

$$V_4 = L_4 - W_4 = V_2 \quad (36) \quad R_{\min 2} = \frac{V_{\min 2}}{D_2} - 1 \quad (28)$$

آنگاه برای محاسبه بقیه پارامترها از معادلات زیر استفاده می‌گردد:

$$D_{3-1} = L_{3-1} - V_{3-1} \quad (37)$$

$$D_{3-2} = L_{3-2} - V_{3-2} \quad (38) \quad L_2 = R_2 D_2 \quad (29)$$

$$W_3 = W_1 - W_4 \quad (39) \quad V_2 = L_2 + D_2 \quad (30)$$

جدول ۵ مقادیر دبی‌های حاصل از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

$$L_{3-1} = L_2 \quad (31)$$

جدول ۵. مقادیر بدست آمده از معادلات برای بخش‌های مختلف برج دیواره میانی.

Table 5. The values obtained from the equations for different sections of the Divided wall column.

۲۳۴	L_4 (kmol/h)	۲۳۴	V_2 (kmol/h)	۲۲۵	L_{1-1} (kmol/h)
۲۳۴	V_4 (kmol/h)	۲۳۴	V_{3-1} (kmol/h)	۳۱۷	V_{1-1} (kmol/h)
۹۲	D_1 (kmol/h)	۱۸۲	L_{3-1} (kmol/h)	۳۱۷	V_{1-2} (kmol/h)
۲۵۴	W_1 (kmol/h)	۲۳۴	V_{3-2} (kmol/h)	۵۷۲	L_{1-2} (kmol/h)
۹۶	W_3 (kmol/h)	۴۵	L_{3-2} (kmol/h)	۱۸۲	L_2 (kmol/h)

$$X_{i,L1-1} = \frac{y_{i,D1}(R_2+1) - X_{i,D2} \left(\frac{L_{1-1}}{D_1} + 1 \right)}{R_2 - \frac{L_{1-1}}{D_1}} \quad (42)$$

$$y_{i,V1-2} = \frac{X_{i,W4} \left(1 + \frac{V_{1-2}}{W_1} \right) - X_{i,W1} \left(1 + \frac{V_4}{W_4} \right)}{\frac{V_{1-2}}{W_1} - \frac{V_4}{W_4}} \quad (43)$$

$$X_{i,L1-2} = \frac{X_{i,W4} \left(\frac{V_{1-2}}{W_1} \right) - X_{i,W1} \left(\frac{V_4}{W_4} \right)}{\frac{V_{1-2}}{W_1} - \frac{V_4}{W_4}} \quad (44)$$

سپس بعد از آوردن مقادیر بالا، ترکیب درصد‌های مربوط به برج اول از معادلات زیر بدست می‌آید: (این مقادیر در جدول ۶ نشان داده شده است).

$$y_{i,V1-1} = \frac{y_{i,D1} R_2 - X_{i,D2} \frac{L_{1-1}}{D_1}}{R_2 - \frac{L_{1-1}}{D_1}} \quad (41)$$

جدول ۶. ترکیب درصد مولی بدست آمده برای هر دو بخش برج اول.

Table 6. Molar component obtained for both parts of the first tower.

۰/۰۱۲	$y_{A V1-2}$	۰/۴۵۵	$y_{A V1-1}$	۰/۰۰۹	$X_{A L1-2}$	۰/۴۱	$X_{A L1-1}$
۰/۴۶۸	$y_{B V1-2}$	۰/۵۱۸	$y_{B V1-1}$	۰/۴۲۲	$X_{B L1-2}$	۰/۵۶	$X_{B L1-1}$
۰/۵۲	$y_{C V1-2}$	۰/۰۲۷	$y_{C V1-1}$	۰/۵۶۹	$X_{C L1-2}$	۰/۰۳	$X_{C L1-1}$

همچنین با تعریف $y_{C,V_{1-1}}$ به عنوان ترکیب درصد مولی جز C در پایین ترین سینی قسمت ۱-۱ از برج اول:

$$y_{C,V_{1-1}} = X_{C,L_{1-1}} + \frac{W_{A_{1-1}}}{V_{1-1}} X_{C,L_{1-1}} + \frac{W_{B_{1-1}}}{V_{1-1}} X_{C,L_{1-1}} - \frac{W_{C_{1-1}}}{V_{1-1}} (1 - X_{C,L_{1-1}}) \quad (48)$$

$$a_{3-2} = \frac{K_{A,3-1} V_{3-1}}{L_{3-1}} \geq 1 \quad (52)$$

$$N_{3-1} = \frac{\ln \left(\frac{(X_{A,S} - a_{3-1}) (X_{A,S} - \frac{X_{A,S}}{K_{A,S} V_{3-1} / L_{3-1}}) + X_{A,L} (a_{3-1} - 1)}{X_{A,S} - \frac{X_{A,S}}{K_{A,S} V_{3-1} / L_{3-1}}} \right)}{\ln a_{3-1}} - 1 \quad (53)$$

$$a_{3-2} = \frac{L_{3-2}}{K_{C,3-2} V_{3-2}} \geq 1 \quad (54)$$

$$N_{3-2} = \frac{\ln \left(\frac{(y_{C,S} \frac{L_{3-2}}{K_{C,S} V_{3-2}} - a_{3-2} y_{C,S}) + y_{C,V} (a_{3-2} - 1)}{(y_{C,S} \frac{L_{3-2}}{K_{C,S} V_{3-2}} - y_{C,S})} \right)}{\ln a_{3-2}} - 1 \quad (55)$$

$$N_3 = N_{3-1} + N_{3-2} \quad (56)$$

تعداد سینی های مربوط به بخش چهارم از برج دیواره میانی:

$$a_4 = \frac{K_{B,4} V_4}{L_4} \geq 1 \quad (57)$$

$$N_4 = \frac{\ln \left(\frac{(X_{B,W_4} \frac{K_{B,W_4} V_4}{L_4} - a_4 X_{B,W_4}) + X_{B,1-2} (a_4 - 1)}{(X_{B,W_4} \frac{K_{B,W_4} V_4}{L_4} - X_{B,W_4})} \right)}{\ln a_4} - 1 \quad (58)$$

در مجموع، برای انجام این عملیات تقطیر در برج دیواره میانی به ۴۰ سینی نیاز است.

با تعیین تعداد سینی های برج و همچنین مقدار دبی جریان های ورودی و خروجی به هر بخش، این پارامترها به عنوان مقادیر اولیه برای شبیه سازی دقیق در محیط نرم افزار Aspen Plus مورد استفاده قرار گرفته است.

سه پارامتر $W_{A_{1-1}}$ و $W_{B_{1-1}}$ و $W_{C_{1-1}}$ را به عنوان جریان خالص مواد در قسمت ۱-۱ برج اول تعریف می شود که برابر است با:

$$W_{A_{1-1}} = V_{1-1} y_{A,V_{1-1}} - L_{1-1} X_{A,L_{1-1}} \quad (45)$$

$$W_{B_{1-1}} = V_{1-1} y_{B,V_{1-1}} - L_{1-1} X_{B,L_{1-1}} \quad (46)$$

$$W_{C_{1-1}} = V_{1-1} y_{C,V_{1-1}} - L_{1-1} X_{C,L_{1-1}} \quad (47)$$

با حل معادلات فوق، پارامترهای $W_{A_{1-1}}$ ، $W_{B_{1-1}}$ و $W_{C_{1-1}}$ و $y_{C,V_{1-1}}$ به ترتیب $۵۲/۶۰$ ، $۳۸/۶۷$ ، $۱/۳۶$ و $۰/۳۵$ بدست آمده است.

تعداد سینی های مربوط به بخش اول از برج دیواره میانی:

$$a_{1-1} = \frac{L_{1-1}}{K_{C_{1-1}} V_{1-1}} \geq 1 \quad (45)$$

$$N_{1-1} = \frac{\ln \left(\frac{(y_{C,V_{1-1}} - a_{1-1} y_{C,V_{1-1}}) + y_{C,F} (a_{1-1} - 1)}{(y_{C,V_{1-1}} - y_{C,V_{1-1}})} \right)}{\ln a_{1-1}} + 1 \quad (46)$$

$$a_{1-2} = \frac{K_{A_{1-2}} V_{1-2}}{L_{1-2}} \geq 1 \quad (47)$$

$$N_{1-2} = \frac{\ln \left(\frac{(X_{A,L_{1-2}} - a_{1-2} \frac{y_{A,V_{1-2}}}{K_{A_{1-2}} V_{1-2}}) + X_{A,F} (a_{1-2} - 1)}{(X_{A,L_{1-2}} - \frac{y_{A,V_{1-2}}}{K_{A_{1-2}} V_{1-2}})} \right)}{\ln a_{1-2}} \quad (48)$$

$$N_1 = N_{1-1} + N_{1-2} \quad (49)$$

تعداد سینی های مربوط به بخش دوم از برج دیواره میانی:

$$a_2 = \frac{L_2}{K_{B,2} V_2} \quad (50)$$

$$N_2 = \frac{\ln \left(\frac{(X_{B,D_2} \frac{L_2}{K_{B,D_2} V_2} - a_2 X_{B,D_2}) + X_{B,V_{1-1}} (a_2 - 1)}{(X_{B,D_2} \frac{L_2}{K_{B,D_2} V_2} - X_{B,D_2})} \right)}{\ln a_2} \quad (51)$$

تعداد سینی های مربوط به بخش سوم از برج دیواره میانی:

بعد از حل معادلات فوق، تعداد سینی های هر بخش از برج دیواره میانی تعیین می شود. برای بخش های ۱ و ۳ که بخش میانی برج دیواره میانی را تشکیل می دهند، ۲۰ سینی، برای بخش ۲ که بخش بالایی برج دیواره میانی محسوب می شود، ۵ سینی و برای بخش ۴ که بخش پایینی برج دیواره میانی است، ۱۵ سینی در نظر گرفته شده است.

جدول ۷. مشخصات خوراک ورودی به برج دیواره میانی

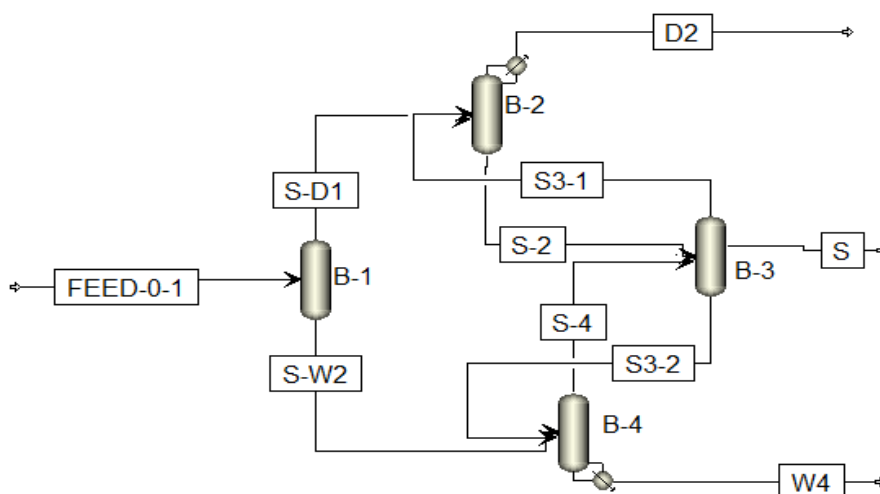
Table 7. Characteristics of the input feed to the Divided wall column

لیست مواد	واحد	دبی مولی
متان	<i>kmol/hr</i>	۹/۸۹
اتان	<i>kmol/hr</i>	۴۴/۲۰
پروپان	<i>kmol/hr</i>	۱۳۱/۷۷
ایزو بوتان	<i>kmol/hr</i>	۵۳/۲۹
نرمال بوتان	<i>kmol/hr</i>	۹۳/۴۵
ایزو پنتان	<i>kmol/hr</i>	۸/۹۰
نرمال پنتان	<i>kmol/hr</i>	۴/۸۹
دما	°C	۶۴
فشار	bar	۳۴/۳
مجموع	<i>kmol/hr</i>	۳۴۶/۳۹

RadFrac یک برج از نوع RECT جایگزین برج ۲، یک برج از نوع STRIP جایگزین برج ۴ و دو برج از نوع ABSBR جهت جایگزین برج های ۱ و ۳ در محیط نرم افزار انتخاب شده است. جریان های ارتباطی آن مطابق شکل ۷ به برج ها متصل و تعداد سینی های هر برج و دبی مولی های بدست آمده برای جریان های خروجی از هر برج در نرم افزار وارد کرده و سپس نرم افزار را اجرا می کنیم.

۶- شبیه سازی مدل چهار برجی در Aspen Plus

برای شبیه سازی ابتدا مشخصات خوراک مطابق جدول ۷ که بر اساس اطلاعات یکی از واحدهای پالایشگاهی می باشد در محیط نرم افزار به عنوان جریان خوراک تعریف شده است. سپس با انتخاب معادله ترمودینامیکی پنگ رابینسون وارد قسمت شبیه سازی می شویم. در قسمت برج ها و مدل



شکل ۷: شماتیک برج دیواره میانی طراحی شده بر اساس مدل چهار برجی.

Figure 7: Schematic of the Divided wall column designed based on the four-column model.

چهار برج، مطابق شکل ۷ که شامل چهار برج و یک چگالنده و یک جوش آور است که قسمت بالای برج و پایین برج و قسمت جریان جانبی و قسمت ورودی خوراک با برج‌های مجزا مشخص شده‌اند.

همان‌طور که بیان شد این الگو بهترین و کامل‌ترین الگویی است که تاکنون ارائه شده است و دارای بیشترین انعطاف در مقداردهی و طراحی قسمت‌های مختلف برج دیواره میانی است و البته لازم به یادآوری است که پیچیدگی‌هایی نیز دارد. برای شبیه‌سازی برج تقطیر دیواره میانی با استفاده از ساختار معادل

۷- نتایج و بحث

جهت اعتبارسنجی در محیط Aspen Plus شبیه‌سازی شده و نتایج در جدول‌های زیر آورده شده است.

پارامترهای طراحی بدست آمده با استفاده از روش میانبر که در جدول‌های ۲ الی ۶ خلاصه شده است،

جدول ۸. دبی مولی جریان‌های خروجی

Table 8. Molar flow rate of output streams

W ₄ جریان پایین برج	S جریان میانی	D ₂ جریان بالای برج		
۱۲۳/۱۵	۷۰/۶	۴/۲	C	دما
۲۵	۲۵	۲۵	bar	فشار
۱۵۱/۴	۱۳۷	۵۸	kmol/hr	دبی مولی
۰	۰	۹/۹	kmol/hr	متان
۰	۱/۴	۴۲/۷	kmol/hr	اتان
۴/۴	۱۲۲	۵/۳۵	kmol/hr	پروپان
۴۴	۹/۱	۰/۰۰۸	kmol/hr	ایزو بوتان
۸۹	۴/۴	۰/۰۰۲	kmol/hr	نرمال بوتان
۸/۹	۰/۰۰۰۹	۰	kmol/hr	ایزو پنتان
۴/۹	۰	۰	kmol/hr	نرمال پنتان

می‌گیرند به همین علت هرچقدر این گاز خالص‌تر و فقط شامل متان و اتان باشد، عملیات هیدروژن‌سازی در این واحد بهتر انجام می‌شود. همچنین چون گازمایع با اختلاط پروپان و بوتان به نسبت‌های مناسب تهیه می‌شود، هرچه پروپان بیشتر بازیابی شود در عمل میزان تولید گازمایع افزایش پیدا می‌کند.

همان‌طور که در جدول ۸ مشاهده می‌شود بازیابی محصولات نهایی بسیار مطلوب بوده است، به طوری که از خروج پروپان در جریان بالای برج جلوگیری شده است. در واحدهای گازمایع پالایشگاهی گازهای خروجی از بالای برج به عنوان خوراک واحد هیدروژن‌سازی مورد استفاده قرار

جدول ۹. ترکیب درصد مولی جریان‌های خروجی

Table 9. Molar component of the outflow streams

W ₄ جریان پایین برج	S جریان میانی	D ₂ جریان بالای برج	جزء مولی
۰	۰	۰/۱۷	متان
۰	۰/۰۱	۰/۷۴	اتان
۰/۰۲	۰/۸۹	۰/۰۹	پروپان
۰/۲۹	۰/۰۶	۰	ایزو بوتان
۰/۵۸	۰/۰۳	۰	نرمال بوتان
۰/۰۶	۰	۰	ایزو پنتان
۰/۰۳	۰	۰	نرمال پنتان

بالا به خوبی انجام شده است. علاوه بر موارد فوق، بار حرارتی مورد نیاز کندانسور و ریپویلر در این شبیه‌سازی توسط نرم افزار Aspen Plus به ترتیب ۱۸۱۸ و ۱۷۸۵ کیلووات (kW) محاسبه شده است.

طبق جدول ۹ مشاهده می‌شود که خلوص محصولات در حد انتظارات بوده که نشان دهنده موثر بودن برج دیواره میانی جهت عملیات تقطیر و جداسازی است. همچنین عملیات جداسازی سه محصول اتان، پروپان و بوتان با درصد خلوص

جدول ۱۰. مقایسه نتایج روش میانبر با شبیه‌سازی انجام شده در محیط Aspen plus

Table 10. Comparison of the results of the shortcut method with the simulation performed in the Aspen plus environment

نتایج شبیه‌سازی	نتایج روش میانبر	
۵۸	۵۱/۹۵	محصول بالای برج (D ₂) (kmol/h)
۱۳۷	۱۳۶/۹۵	محصول جانبی (S) (kmol/h)
۱۵۱/۴	۱۵۸/۰۷	محصول پایین برج (W ₄) (kmol/h)
۰/۷۴	با فرض خلوص ۰/۹۸	جزء مولی اتان در محصول بالای برج
۰/۹۰	با فرض خلوص ۰/۹۸	جزء مولی پروپان در محصول جانبی
۰/۸۸	با فرض خلوص ۰/۹۶	جزء مولی بوتان در محصول پایین برج
۲۰	۲۰	تعداد سینی بخش ۱ و ۳
۵	۵	تعداد سینی بخش ۲
۱۵	۱۵	تعداد سینی بخش ۴

محاسبات، خوراک به صورت سه جزئی در نظر گرفته شده است اما در واقعیت خوراک تقریباً شش جزء دارد و در شبیه‌سازی، خلوص سه جزء اصلی مقداری کمتر از فرضیات شده است.

همان‌طور که در جدول ۱۰ مشاهده می‌شود دقت روش میانبر استفاده شده جهت طراحی برج دیواره میانی، بسیار بالا بوده و به نتایج بدست آمده در شبیه‌سازی، نزدیک است. تنها اختلاف، مربوط به جزء مولی‌های اتان، پروپان و بوتان می‌باشد که علت آن این است که در روش میانبر برای راحتی

جدول ۱۱. مقایسه نتایج بدست آمده

Table 11. Comparison of the obtained results

برج دیواره میانی	چیدمان مستقیم			
	مجموع	برج پروپان زدا	برج اتان زدا	
۲۵		۱۷	۳۲	فشار (بار)
۴۰	۶۰	۳۰	۳۰	تعداد سینی
۱۴		۱۶	۱۱	سینی خوراک
۱۵				محل سینی جانبی
۹/۸۷		۴/۴۸	۲/۹۷	نسبت برگشتی
۱۸۱۸	۲۶۴۴	۱۸۳۷	۸۰۷	بار حرارتی چگالنده (کیلو وات)
۱۷۸۵	۳۰۵۸	۱۴۵۲	۱۶۰۶	بار حرارتی جوش آور (کیلو وات)
۴۳			۴۳	نرخ خروجی اتان (کیلو مول بر ساعت)
۱۲۲		۹۳		نرخ خروجی پروپان (کیلو مول بر ساعت)
۱۳۴		۱۴۳		نرخ خروجی بوتان (کیلو مول بر ساعت)
۰/۷۴			۰/۴۹	خلوص اتان
۰/۹۰		۰/۹۷		خلوص پروپان
۰/۸۸		۰/۸۹		خلوص بوتان

۴. کاهش تعداد سینی‌ها: تعداد سینی‌های مورد نیاز در برج دیواره میانی در مقایسه با چیدمان‌های سنتی (مانند چیدمان مستقیم) به طور قابل توجهی (۲۰ سینی) کمتر شده است.

۵. افزایش خلوص اتان: خلوص اتان در محصول نهایی به طور قابل توجهی از ۰/۴۹ به ۰/۷۴ افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده جداسازی دقیق‌تر اجزای مخلوط و تولید اتان با ارزش بالاتر برای کاربردهای خاص است.

۶. افزایش بازیابی پروپان: بازیابی پروپان ۲۵ درصد افزایش یافته و از ۹۳ کیلومول بر ساعت به ۱۲۲ کیلومول بر ساعت رسیده است. این امر منجر به افزایش تولید گازمایع و بهبود کیفیت جداسازی در فرآیند جداسازی گاز مایع می‌شود.

همان طور که در نتایج جدول ۱۱ مشاهده می‌شود با جایگزینی برج دیواره میانی در این واحد جداسازی، کاهش ۳۱ درصد بار حرارتی چگالنده و کاهش ۴۱ درصدی بار حرارتی جوش‌آور داشته‌ایم. تعداد سینی‌های برج دیواره میانی حدود ۲۰ عدد کاهش را نسبت به حالت معمولی نشان می‌دهد. این کاهش تعداد سینی در کاهش هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری موثر می‌باشد. همچنین استفاده از برج دیواره میانی به طور چشمگیری در میزان بازیابی پروپان و خلوص اتان موثر بوده است.

۸- نتیجه‌گیری

مشکلات امروزی تامین منابع انرژی برای فرآیندهای پر مصرف مانند فرآیند تقطیر و همچنین زوال پذیری منابع فسیلی، مدیریت بیش از پیش منابع و لزوم بازیابی فرآیندهای قدیمی را انکار ناپذیر می‌کند. برج تقطیر دیواره میانی به عنوان راهکاری عملی برای پیاده سازی راهبرد کوپل حرارتی برج‌های تقطیر با هدف کاهش مصرف انرژی است.

با استناد به یافته‌های این تحقیق، جایگزینی برج تقطیر دیواره میانی با برج‌های اتان‌زدا و پروپان‌زدا در واحد جداسازی گازمایع مزایای قابل توجهی از جمله:

۱. صرفه‌جویی چشمگیر در مصرف انرژی: برج دیواره میانی به طور قابل توجهی (حدود ۳۵ درصد) مصرف انرژی را در مقایسه با ساختار سنتی توالی مستقیم کاهش می‌دهد. این امر ناشی از نیاز به یک برج، یک جوش‌آور و یک چگالنده به جای دو برج، دو چگالنده و دو جوش‌آور در فرآیند جداسازی با برج دیواره میانی است.
۲. کاهش فضای اشغالی: فشرده‌تر شدن فرآیند و کاهش تعداد تجهیزات در برج دیواره میانی، منجر به اشغال فضای کمتر و بهینه‌سازی چیدمان پالایشگاه می‌شود.
۳. نیاز به چگالنده و جوش‌آور با ظرفیت پایین‌تر: به دلیل کارایی بالاتر برج دیواره میانی، چگالنده و جوش‌آور مورد نیاز در این روش به ظرفیت پایین‌تر و در نتیجه به تجهیزات کم هزینه‌تر نیاز دارند.

۹- علائم اختصاری

فهرست علائم اختصاری					
واحد	علامت	توضیح	واحد	علامت	توضیح
-	β	نسبت تقسیم جزء B در برج دیواره میانی	(kmol/h)	F	نرخ جریان خوراک
-	x	ترکیب درصد مولی	(kmol/h)	S	نرخ جریان میانی برج
-	N_K	تعداد سینی های هر بخش	(kmol/h)	D_2	نرخ جریان بالای برج
-	R_K	مقدار جریان برگشتی هر بخش	(kmol/h)	W_4	نرخ جریان پایین برج
-	$R_{K,min}$	مقدار حداقل جریان برگشتی هر بخش	(kmol/h)	D_K	نرخ جریان بالای برج برای هر بخش
-	q	شرایط خوراک	(kmol/h)	W_K	نرخ جریان پایین برج برای هر بخش
-	LK	جزء کلیدی سبک	(kmol/h)	L_K	نرخ جریان مایع برای هر بخش
-	K	ضریب تعادلی	(kmol/h)	V_K	مقدار جریان بخار هر بخش
-	HK	جزء کلیدی سنگین	(kmol/h)	$L_{min,K}$	نرخ جریان حداقل مایع برای هر بخش
-	X_{ij}	ترکیب درصد مولی مایع جزء i در جریان j	(kmol/h)	$V_{min,K}$	مقدار جریان حداقل بخار هر بخش
-	y_{ij}	ترکیب درصد مولی بخار جزء i در جریان j	-	α	فراریت نسبی
-	Z_i	ترکیب درصد مولی جزء i در خوراک	-	θ	ریشه های معادله آندروود

References

- [1] Gómez-Castro, F.I.; Rodríguez-Ángeles, M.A.; Segovia-Hernández, J.G.; Gutiérrez-Antonio, C.; Briones-Ramírez. (2011). A. Optimal Designs of Multiple Dividing Wall Columns. *Chem. Eng. Technol*, volume 34, p. 2051–2058.
- [2] Petlyuk, F.B., Platonov, V.M., and Slavinskii, D.M., 1965. Thermodynamically optimal method for separating multicomponent mixtures. *Int. Chem. Eng.*, 5(3), pp.555–561.
- [3] Song, Z.W., Cui, W., Wu, Y.Y., Wu, B., Chen, K. and Ji, L.J., 2024. Energy, exergy, economic, and environmental analysis of a novel liquid-only transfer dividing wall column with vapor recompression. *Separation and Purification Technology*, 329, p.125122.
- [4] Waibel, Y., Trescher, L., Ränger, L.M. and Grütznert, T., 2023. First multiple dividing wall column: Design and operation. *Chemical Engineering Research and Design*, 193, pp.132-144.
- [5] Zhang, H., Lu, P., Ding, Z., Li, Y., Li, H., Hua, C. and Wu, Z.(2022). Design Optimization and Control of Dividing Wall Column for Purification of Trichlorosilane. *Chemical Engineering Science*, Volume 1, p.117716.
- [6] Xing Q., Shengkun J., Kejin H., Haisheng C., Yang Y., and Liang Zh.(2020). Optimal design of Kaibel dividing wall columns based on improved particle swarm optimization methods, *Journal of Cleaner Production*, Volume 273, p.123041.
- [7] Jalil Elahi Choran. (2016). investigation of the shortcut method in the design of a column with a divided wall in a gas-liquid separation unit, Master's thesis, Ferdowsi University of Mashhad, (in persian).
- [8] B. Kaibel. (2014). “Dividing-Wall Columns,” in *Distillation: Equipment and Processes*, Elsevier, p. 183–199.
- [9] Kiss. (2013). A. Dividing-wall column. In: *Advanced distillation technologies: design, control and applications*. John Wiley & Sons ,volume 2, p.67–110.
- [10] Hosanna, U.; Han, S., Kim, S. K.; Hwang, K. S. (2014). Structural design of fully thermally coupled distillation column using approximate group methods. *Chem.Eng.Proc.Des*,p.85,155.
- [11] Hosanna, U.; Han, S.; Hwang, K. S. (2014). New design method for fully thermally coupled distillation column using group and approximate methods. *Ind. Eng. Chem.Res*, volume 53,p.11979-11988.
- [12] Seihoub, Fatima-Zohra and Benyounes, Hassiba and Shen, Weifeng and Gerbaud, Vincent . (2017). An Improved Shortcut Design Method of Divided Wall Columns Exemplified by a Liquefied Petroleum Gas Process, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, volume 56 ,p.9710 – 9720
- [13] Abdolohpour, S., Ahmadian Behrooz, H., Fazeli, A. (2020). 'The Optimal Design of the Dividing Wall Distillation Columns - Case Study of Benzene, Toluene and Xylene Separation', *Iranian Chemical Engineering Journal*, 19(110), pp. 66-80, (in persian).