

شبیه سازی برج تقطیر دیوار میانی جهت جداسازی دی متیل اتر از مخلوط آب و متانول

کیانوش شجاع^۱، میثاق کرامتی^۱، حسین بیکی^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه مهندسی فناوری های نوین قوچان، ایران

^۲ استادیار، دانشگاه مهندسی فناوری های نوین قوچان، ایران

دریافت: ۹۳/۱۲/۱۴ پذیرش: ۹۴/۶/۱۵

چکیده

یکی از روش های صرفه جویی در مصرف انرژی و هزینه ها در برج های تقطیر سه و یا چند جزئی، استفاده از برج های دیواره میانی است. برای جداسازی دی متیل اتر از آب و متانول از دو برج تقطیر استفاده می شود، که به منظور کاهش مصرف انرژی می توان به جای آن ها از یک برج تقطیر دیواره میانی استفاده کرد. در این مقاله ساختار دیواره میانی برای جداسازی دی متیل اتر از آب و اتانول شبیه سازی شد و با دو برج تقطیر معمولی مقایسه شده است. نتایج حاکی از آن بود که ساختار برج دیواره میانی در میزان خلوص محصول جانبی متانول تاثیر مثبتی را به همراه دارد. در این ساختار کاهش بار حرارتی برای چگالنده ها حدود ۲۴٪ و برای ریبولرها حدود ۷٪ مشاهده شد.

کلمات کلیدی: برج های دیواره میانی، دی متیل اتر، بار حرارتی، محصول جانبی

مقدمه

تقطیر یکی از موارد بسیار مهم مصرف انرژی در صنعت عملیاتی جهان و در فرآیند گاز طبیعی می باشد. وجود هر نوع پتانسیلی، برای بهینه سازی مصرف انرژی، به منظور کاهش مصرف انرژی ناشی از عملیات تقطیر در دو دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. برج های دیواره میانی^۱ و برج های پتلیوک^۲ می توانند هزینه های اضافی و همچنین مصرف اضافی انرژی را کاهش دهند. این برج ها معمولاً برای جداسازی خوراک های سه و یا چهار جزئی استفاده می شوند [۱]. در صنایع فرآیندهای شیمیایی، برج های تقطیر بسیار در مصرف انرژی تاثیر گذارند و حدود ۳ درصد از مصرف انرژی جهان را به خود اختصاص می دهند. به همین

* hbeiki@qiet.ac.ir

^۱ Divided Wall Column

^۲ Petlyuk

دلیل امروزه در بسیاری از فرایندهای شیمیایی از برج‌های تقطیر دیواره میانی برای جداسازی‌های چند جزئی استفاده می‌شود. چرا که باعث کاهش هزینه‌ها و مصرف اضافی انرژی می‌شوند [۲]. لازم به ذکر است که علاوه بر برج‌های دیواره میانی، برای بهینه‌سازی بیش‌تر برج‌های تقطیر روش‌های دیگری مانند استفاده از ساختار HIDIC، بررسی قسمت‌های مختلف برج تقطیر، بررسی ترمودینامیکی، بررسی اقتصادی و یا بررسی اثر خوراک وجود دارد [۱،۳،۴،۵]. همچنین می‌توان به بررسی مینیمم نیروی محرکه و اکسرژی از دست رفته برای بهینه‌سازی ترمودینامیکی برج تقطیر اشاره کرد [۳]. بهینه‌سازی برج‌های تقطیر بسیار امر دشواری است؛ چرا که پارامترهای زیادی مانند جریان برگشتی، محل ورود خوراک، کندانسورها و ریبولرها در آن تاثیرگذار هستند. در برج‌های پتلیوک و دیوار میانی می‌توان تا حد قابل قبولی مصرف انرژی را کاهش داد، و تولید گازهای گلخانه‌ای مانند دی‌اکسیدکربن هم به دنبال آن با کاهش مصرف انرژی کاهش می‌یابد [۱]. از جمله دیگر مزایای برج‌های دیواره میانی و پتلیوک می‌توان به کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای مانند دی‌اکسیدکربن و کاهش هزینه‌ها که از بهینه‌سازی مصرف انرژی به دست می‌آید اشاره کرد [۳]. استفاده از برج‌های تقطیر دیواره میانی برای اهداف چند منظوره صنعتی هم مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است [۶].

دی متیل اتر به عنوان یک سوخت مناسب و دوست‌دار محیط زیست و با توجه به کاربردهای فراوانش بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۷]. از دیگر ویژگی‌های دی متیل اتر که جزء ساده‌ترین اترآلیفاتیک است، می‌توان به بی‌رنگی آن، غیرسمی بودن آن، غیرخورنده و غیرسرطان‌زا بودن آن اشاره کرد [۷]. در این مقاله اطلاعات صنعتی مورد نیاز برای دو برج تقطیر شرکت دریافت از مرجع [۷] استخراج شده است. در این پژوهش از مدل برج‌های سه‌گانه برای شبیه‌سازی دو برج تقطیر معمولی به صورت یک برج دیواره میانی برای جداسازی دی متیل اتر استفاده شده است. برای شبیه‌سازی از نرم افزار Aspen-hysys استفاده شد. در این زمینه شبیه‌سازی‌های دیگری با بهره‌گیری از روش برج‌های سه‌گانه انجام شده است [۸،۹]. در مرجع [۱۰] به بررسی ترمودینامیکی فرآیند تقطیر و خالص‌سازی ۱ و ۹ بوتادین جهت جایگزینی آن با یک برج دیواره میانی پرداخته شده است. در این مقاله به دلیل نبود برج دیواره میانی در نرم افزار HYSYS از روش میانبر استفاده شده که در ادامه این روش توضیح داده خواهد شد. برای جداسازی‌های مختلف خوراک سه و یا چند جزئی در صورت مثبت بودن امکان سنجی اقتصادی برای این ساختار معمولاً بهتر است از برج‌های دیواره میانی استفاده شود.

روش تحقیق

در نرم افزارهای مهندسی شیمی مانند Aspen-plus و Aspen-hysys آیکونی به نام برج دیواره میانی تعریف نشده است. به همین دلیل از روش‌های دیگر برای شبیه‌سازی این برج‌ها استفاده می‌شود. از آنجایی که برج‌های پتلیوک را می‌توان از لحاظ ترمودینامیکی معادل برج دیواره میانی نامید، بر این اساس می‌توان با طراحی یک برج پتلیوک که از یک قسمت پیش‌جداساز و برج اصلی تشکیل شده است به یک برج دیواره میانی دست یافت، و شبیه‌سازی می‌تواند با استفاده از روش میانبر آغاز می‌شود [۹]. به وسیله

روش میانبر می توان N ، N_{min} و محل بهینه ورود خوراک را برای هر سه برج تعیین کرد. روش میانبر توسط فنسک، آندرود، گیلیند معرفی شده است که به وسیله این روش می توان پارامترهای مورد نیاز مانند تعداد مراحل و مینیمم جریان برگشتی را تخمین زد [۸]. این روش در نرم افزار Hysys به عنوان ابزاری با نام روش میانبر^۱ قابل استفاده است. اصولاً روش میانبر تخمینی از نتایج اولیه را به ما می دهد، که در ادامه از این تخمین می توان برای شبیه سازی برج پتلیوک و معادل ترمودینامیکی آن یعنی برج دیواره میانی استفاده کرد. در مرجع [۷] برای جداسازی سه جز از دو برج تقطیر برای خالص سازی دی متیل اتر استفاده شده است [۷]. در اینجا هدف مقایسه و شبیه سازی ساختار برج دیوار میانی و بررسی عملکرد این برج ها نسبت به دو برج تقطیر معمولی است.

برای شبیه سازی از معادله NRTL استفاده شده است. از معادله NRTL زمانی استفاده می شود که فاصله زیادی بین نقطه جوش اجزا وجود داشته باشد و برای سیستم های تعادلی VLE، LLE و VLLE توصیه می شود. برای فاز بخار از معادله حالت SRK استفاده شده است [۷]. برای یافتن تخمینی از تعداد سینی ها، هر سه برج تقطیر هم به روش میانبر شبیه سازی شد و نتایج حاصل از آن برای شبیه سازی برج تقطیر پتلیوک مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش نتایج برای شبیه سازی نهایی از این روش استخراج استفاده شد. در مرجع [۹] برای شبیه سازی از معادله Peng-Robinson استفاده شده است، که این معادله حالت برای فاز مایع ممکن است در صورت اختلاف ترکیب درصدها و یا اختلاف در ساختار شیمیایی چندان مناسب نباشد و دارای خطا باشد. چه بسا بهتر است به جای معادله های حالت Cubic، virial، mixing rule و ... برای فاز مایع در صورت وجود ضرایب و ثوابت آزمایشگاهی لازم از معادله های ضریب فعالیت مانند NRTL استفاده شود. باید در نظر داشت که ممکن است در سیستم آزوتروپ وجود داشته باشد، یک معادله حالت نمی تواند برای حالت آزوتروپی مناسب باشد و آن را به درستی تشخیص دهد.

شبیه سازی با استفاده از نرم افزار Aspen hysys

برای شبیه سازی مدل برج های سه گانه در ابتدا از سه برج تقطیر میانبر استفاده شد. تعداد مراحل مورد نیاز استخراج شد و در سه برج تقطیر معمولی که در شکل ۱ هم مشاهده می شود استفاده شدند. در این شبیه سازی از ریویولر برج دوم و کندانسور برج سوم، متانول با مقدار کمی آب خارج می شود، که می توان با استفاده از یک مخلوط کننده این دو جریان را با هم مخلوط کرد و به عنوان یک محصول جانبی از برج استخراج کرد. در شبیه سازی این نوع برج ها باید دقت شود که متغیرهایی که برای رساندن درجه آزادی برج های تقطیر به صفر استفاده می شود نباید خطای بالایی را ایجاد کند.

اطلاعاتی که از روش میانبر بدست آمده خام است و مستقیماً مورد استفاده قرار نمی گیرد. با اطلاعات سه برج میانبر نمی توان شبیه سازی را کامل دانست و باید خطاها تا حد امکان تصحیح شوند. از این رو بهینه سازی هایی در این زمینه باید صورت گیرد که در قسمت مربوط به بهینه سازی به طور کامل این موارد ذکر شده است [۸].

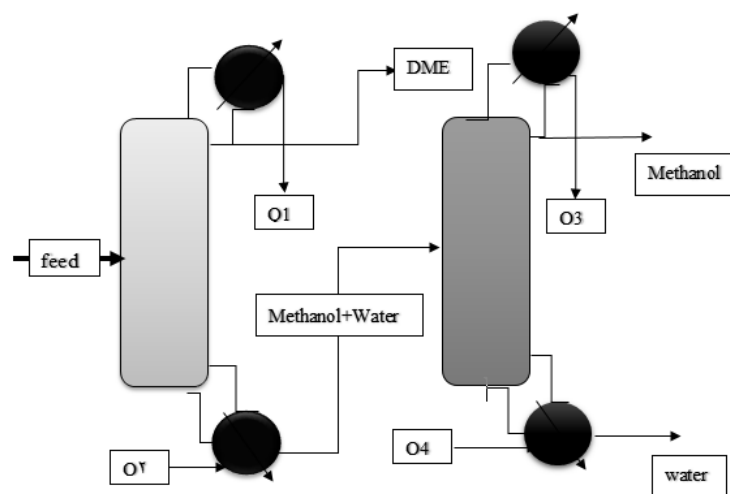
¹Shortcut method

بهینه سازی

از آنجایی که داده های مسئله از سه برج جداگانه میانبر گرفته شده است، اطلاعات به دست آمده خام بوده و نیاز به اعمال بهینه سازی هایی می باشد. هدف بهینه سازی مینیمم کردن جمع جبری بارهای حرارتی جوش آور برج دوم و چگالنده برج سوم می باشد، این بهینه سازی به صورت موارد زیر اعمال می گردد [۸]:

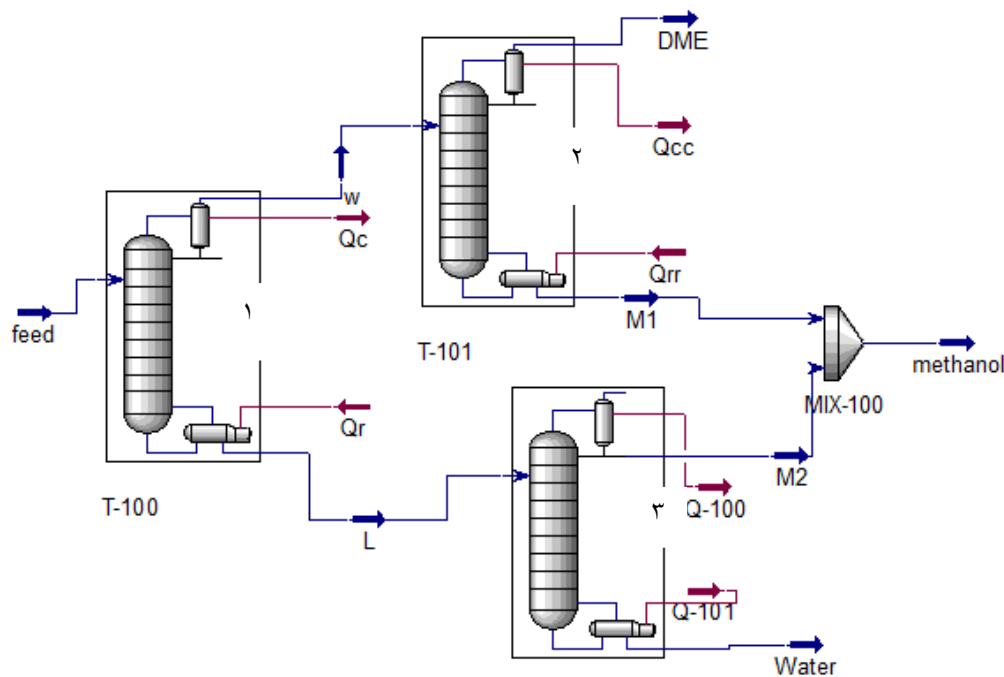
- مینیمم کردن اختلاف دبی بخار قسمت غنی ساز برج اصلی ۳ با قسمت عاری ساز برج اصلی ۲
- فشار چگالنده برج اصلی ۳ و جوش آور برج اصلی ۲ یکسان باشد.
- مجموع تمام بارهای حرارتی چگالنده مدل برج های سه گانه از حالت چینش معمولی باید کم تر باشد.
- مجموع تمام بارهای حرارتی جوش آور مدل برج های سه گانه از حالت چینش معمولی باید کم تر باشد.
- فشار چگالنده برج اصلی ۲ از جوش آور آن کم تر باشد.
- در برج پیش جداساز فشار چگالنده باید از جوش آور آن کم تر باشد.
- اختلاف بین، فشار چگالنده پیش جداساز و خوراک ورودی برج اصلی ۲ مینیمم شود.
- فشار ریویولر برج پیش جداساز از فشار چگالنده برج اصلی ۳ بیش تر و از فشار جوش آور آن کم تر باشد.
- از آنجایی دو برج اصلی ۲ و ۳ در واقع یک برج هستند، باید به منظور ثابت نگه داشتن نسبت مایع برگشتی به مینیمم نسبت مایع برگشتی، باید افت فشار در هر سینی برج اصلی ۲ برابر با افت فشار در هر سینی برج اصلی ۳ باشد. با این وجود فشار در جوش آور برج اصلی ۳ تصحیح می شود.
- فشار در جوش آور برج پیش جداساز ۱ باید برابر با فشار سینی ورودی خوراک برج اصلی ۳ شود تا از افت فشار در انتهای دیواره برج دیوار میانی جلوگیری شود.

در شکل ۱ شماتیکی از دو برج تقطیر که برای جداسازی دی متیل اتر از آب و اتانول استفاده می شود، نشان داده شده است.



شکل ۱. ساختار معمولی دو برج تقطیر برای جداسازی دی متیل اتر از متانول و آب

همان طور که در شکل ۲ دیده می شود، یک برج پتلیوک که معمولاً به صورت یک قسمت پیش جداساز و قسمت اصلی برج است، به سه برج معمولی تقسیم شده است.



شکل ۲. شبیه سازی برج های سه گانه با بهره گیری از نتایج روش میانبر

در واقع برج اصلی در اینجا به دو قسمت تقسیم شده است، که از برج اصلی ۲ دی متیل اتر نسبتاً خالص خارج می شود و از پایین برج اصلی ۲ متانول همراه با کمی آب وارد یک مخلوط کننده شده است. در برج اصلی ۳ از بالای برج متانول به همراه مقداری آب استخراج می شود، و از پایین برج اصلی ۳ نیز آب خارج شده است که جریان های متانول خروجی برج اصلی ۲ و برج اصلی ۳ در یک مخلوط کننده با هم مخلوط می شوند، و متانول به همراه مقدار اندکی آب به عنوان یک محصول جانبی خارج می شود. این ساختار همان طور که گفته شد با توجه به نبود چنین ابزاری در نرم افزار Hysys طراحی شده است. قسمت اصلی برج پتلیوک به دو برج تقطیر معمولی تقسیم شده و با توجه به شباهت ترمودینامیکی برج پتلیوک با برج دیوار میانی می توان این ساختار را معادل یک برج دیوار میانی در نظر گرفت [۹].

نتایج و بحث

در جدول ۱ محل بهینه ی ورود خوراک با استفاده از روش میانبر برای هر کدام از برج های سه گانه تعیین شده است و در جدول ۲ هم تعداد مراحل مورد نیاز برای هر برج به روش میانبر ذکر شده است. در جدول ۳ با مشاهده بارهای حرارتی بازدهی مناسب حرارتی مدل برج های سه گانه نسبت به دو برج

معمولی بسیار مشهود است. این جدول نشان می‌دهد که با استفاده از یک برج DWC^۱ برای این واحد در چگالنده تا حدود ۲۴٪ و در ریپویلر تا حدود ۷٪ می‌توان از مصرف انرژی صرفه جویی کرد. باید در نظر داشت که این مقادیر به دلیل استفاده از روش میانبر تقریبی است. در جدول ۴ با شبیه سازی حاصل تنها برای محصول جانبی متانول خلوص بیش‌تر مشاهده می‌شود؛ درحالی که برای ترکیبات دیگر تفاوت در خلوص برای هر دو ساختار چندان مشهود نمی‌باشد.

جدول ۱. محل ورود خوراک، به‌دست آمده از روش میانبر

سینی بهینه ورود خوراک	برج های سه گانه
۲	برج پیش جداساز
۳	برج اصلی (۲)
۶	برج اصلی (۳)

جدول ۲. تعداد مراحل بدست آمده از روش میانبر

۲/۵۶۸	پیش جداساز
۱۰/۱۲۲	برج اصلی (۱)
۱۳/۴۷۸	برج اصلی (۲)

جدول ۳. میزان مصرف انرژی برای ساختار معمولی، دیوارمیانی و صرفه جویی انرژی بر مبنای داده های روش میانبر

بار حرارتی (kJ/h)	برج های سه گانه	دو برج معمولی جداسازی	میزان صرفه جویی .٪
چگالنده	$7/1093 \times 10^6$	$9/378 \times 10^6$	۲۴/۱۹
ریپویلر	$9/444 \times 10^6$	$10/203 \times 10^6$	۷/۴۴

جدول ۴. بررسی خلوص برای هر دو ساختار معمولی و مدل برج های سه‌گانه

ماده	خلوص محصولات در دو برج معمولی	خلوص محصولات در برج های سه گانه
دی متیل اتر	۰/۹۹۹	۰/۹۹۷۴
متانول	۰/۶۴	۰/۷۷۶۴
آب	۰/۹۹۹	۰/۹۹۶۷

¹Divided Wall Column

در جدول ۵ ترکیب درصد قسمت های مختلف برج پیش جداساز برای هر سه سینی، کندانسور و ریویلر قابل مشاهده می باشد، برج پیش جداساز در برج های DWC در داخل ستون اصلی قرار می گیرد.

جدول ۵. ترکیب درصد ها در قسمت های مختلف برج پیش جداساز (برای فاز مایع) با بهره گیری از روش میانبر

مرحله	آب	دی متیل اتر	متانول
کندانسور	۰/۲۷۴۵	۰/۳۳۷۷	۰/۳۸۷۹
سینی ۱	۰/۳۵۱۹	۰/۳۰۲۱	۰/۳۴۶۰
سینی ۲	۰/۴۶۵۶	۰/۲۱۷۲	۰/۳۱۷۲
سینی ۳	۰/۶۱۶۸	۰/۰۴۱۴	۰/۳۳۹۸
ریویلر	۰/۷۸۲۳	۰/۰۰۷۰	۰/۲۱۰۷

در جدول ۶ ترکیب درصدها برای تک تک سینی ها، ریویلر و کندانسور برج اصلی ۲ قابل مشاهده است. برج اصلی ۲ و ۳ بعد از انجام بهینه سازی ها معادل همان برج اصلی در مدل برج های پتلیوک هستند.

جدول ۶. ترکیب درصد ها در قسمت های مختلف برج اصلی ۲ (برای فاز مایع) با بهره گیری از روش میانبر

مرحله	آب	دی متیل اتر	متانول
کندانسور	۰/۰۰۲۱	۰/۷۴۶۸	۰/۲۵۱۱
سینی ۱	۰/۰۱۴۹	۰/۳۴۵۵	۰/۶۳۹۶
سینی ۲	۰/۰۴۲۳	۰/۲۲۱۶	۰/۷۳۶۱
سینی ۳	۰/۱۰۰۱	۰/۲۰۳۹	۰/۶۹۶۱
سینی ۴	۰/۱۰۷۷	۰/۰۸۶۱	۰/۸۰۶۲
سینی ۵	۰/۱۱۱۱	۰/۰۳۴۷	۰/۸۵۴۱
سینی ۶	۰/۱۱۳۶	۰/۰۰۵۹	۰/۸۷۳۲
سینی ۷	۰/۱۱۳۶	۰/۰۰۵۹	۰/۸۸۰۵
سینی ۸	۰/۱۱۵۵	۰/۰۰۲۶	۰/۸۸۲۰
سینی ۹	۰/۱۲۰۸	۰/۰۰۱۱	۰/۸۷۸۰
سینی ۱۰	۰/۱۳۷۴	۰/۰۰۰۵	۰/۸۶۲۱
ریویلر	۰/۱۸۹۸	۰/۰۰۰۲	۰/۸۱۰۰

در جدول ۷ ترکیب درصد ها برای تک تک سینی ها، ریویلر و کندانسور برج اصلی ۳ قابل مشاهده است. همان طور که مشاهده می شود به جای حدود ۱۲ سینی که از نتایج حاصل از روش میانبر برای برج اصلی ۳ به دست آمده ۱۰ سینی قرار داده شده است، و این به خاطر فرضی است که برای طراحی برج های سه گانه می بایست صورت گیرد، و تاثیری زیادی هم در نتایج نهایی ندارد.

جدول ۷. ترکیب درصد ها در قسمت های مختلف برج اصلی ۳ (برای فاز مایع) با بهره گیری از روش میانبر

مرحله	آب	دی متیل اتر	متانول
کندانسور	۰/۲۲۴۲	۰/۰۲۵۹	۰/۷۴۹۹
سینی ۱	۰/۴۳۲۴	۰/۰۰۷۶	۰/۵۶۰۰
سینی ۲	۰/۵۹۸۷	۰/۰۰۴۹	۰/۳۹۶۵
سینی ۳	۰/۶۹۷۶	۰/۰۰۴۴	۰/۲۹۸۰
سینی ۴	۰/۷۴۳۵	۰/۰۰۴۳	۰/۲۵۲۲
سینی ۵	۰/۷۶۱۹	۰/۰۰۴۳	۰/۲۳۳۹
سینی ۶	۰/۷۶۸۵	۰/۰۰۴۳	۰/۲۲۷۲
سینی ۷	۰/۸۱۵۶	۰/۰۰۲۳	۰/۱۸۲۱
سینی ۸	۰/۸۷۲۹	۰/۰۰۱۲	۰/۱۲۵۹
سینی ۹	۰/۹۲۵۸	۰/۰۰۰۶	۰/۰۷۳۶
سینی ۱۰	۰/۹۶۳۳	۰/۰۰۰۲	۰/۰۳۶۵
ریبویلر	۰/۹۸۵۲	۰/۰۰۰۱	۰/۰۱۴۷

نتیجه گیری

در این پژوهش جداسازی دی متیل اتر از آب و اتانول در یک برج دیوارمیانی شبیه سازی شده است و نتایج حاصل با ساختار تقطیر معمولی مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد برج های دیوار میانی برای جداسازی بسیار مناسب می باشند، و باعث صرفه جویی قابل توجهی در مصرف انرژی می شوند. در این مورد مطالعاتی که سیستم جداسازی دی متیل اتر از متانول و آب می باشد، در مجموع برای کندانسورها و ریبویلرها حدود ۳۱٪ در مصرف انرژی صرفه جویی شده است. به دلیل این که برای این شبیه سازی از روش میانبر استفاده شده است، میزان درصد صرفه جویی تقریبی است. اما در مجموع این ساختار باعث صرفه جویی چشمگیری در مصرف انرژی می شود. در موارد مشابه نیز تقریباً همین مقدار صرفه جویی گزارش شده است. با توجه به ضرورت استفاده صحیح انرژی، به نظر می رسد این میزان صرفه جویی در مصرف انرژی آنقدر قابل توجه هست که بتواند توجه محققین و صنایع را به خود جلب کند.

منابع

1. Ivar J. Halvorsen , SigurdSkogestad, Energy efficient distillation, Journal of Natural Gas Science and Engineering 3 (2011), 571-580
2. Nguyen Van Duc Long, Seunghyun Lee, Moonyong Lee, Design and optimization of a dividing wall column for debottlenecking of the acetic acid purification process, Chemical Engineering and Processing 49 (2010), 825-835
3. Filipe Soares Pinto, Roger Zemp, Megan Jobson, Robin Smith, Thermodynamic optimisation of distillation columns, Chemical Engineering Science 66 (2011), 2920-2934

4. SantanuBandyopadhyay, Effect of feed on optimal thermodynamic performance of a distillation column, *Chemical Engineering Journal* 88 (2002), 175–186
5. Ivonne Rodriguez-Donis, Noslen Hernandez-Gonzalez, Vincent Gerbaud, Xavier Joulia, Thermodynamic efficiency and cost-effective optimization of heterogeneous batch distillation, *Proceedings of the 22nd European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, 17 - 20 June 2012, London
6. Daniel Staak, Thomas Grützner, Brian Schwegler, DetlefRoedererb, Dividing wall column for industrial multi purpose use Daniel, *Chemical Engineering and Processing* 75 (2014), 48–57
۷. حسین بیکی، میترا دادور، روئین حلاج. شبیه سازی فرآیند و راکتور تولید دی متیل اتر از متانول به کمک نرم افزار Hysys، *مجله مهندسی شیمی ایران*، ۱۳۸۶، دوره ۶، شماره ۲۸، صفحه ۵۱-۵۹
۸. مرتضی زیو دار، مرتضی محمدی. مدل سازی و شبیه سازی برج های تقطیر از DWC برای خوراک موجود در واحد ۱- بوتن پتروشیمی تبریز، *مجله ی مهندسی شیمی ایران*، سال پنجم، شماره ی بیست و چهارم، ۱۳۸۵
۹. گلناز ویس کرمی، رهبر رحیمی، شبیه سازی جایگزینی دو برج تقطیر بوتان زدا و پروپان زدا واحد الفین پتروشیمی ها با یک برج تقطیر دیوار میانی با نرم افزار Aspen-plus، *فصل نامه ی تخصصی علمی ترویجی فرآیند نو*، بهار ۱۳۹۳ / شماره ی ۴۵
۱۰. رهبر رحیمی، محمد علی موسویان، فرخنده صدرزاده مقدم. بررسی ترمودینامیکی برج های تقطیر خالص سازی ۳و۱ بوتادین، *چهاردهمین کنگره ی مهندسی شیمی ایران*، ۲۷-۲۵ مهر ۱۳۹۱، دانشگاه شریف، تهران