

## شبیه سازی فرآیند جداسازی مستقیم دی اکسید کربن از هوا

حسن طاوسی<sup>۱</sup>، کامیار موقرنژاد<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه علوم و فنون مازندران، ایران

<sup>۲</sup> عضو هیئت علمی گروه ترموسینتیک، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی بابل، ایران

دریافت: ۹۳/۱۲/۱۹ پذیرش: ۹۴/۱۱/۱۸

### چکیده

روش های متعددی جهت جداسازی دی اکسید کربن از خروجی کارخانه های مختلف ارائه شده، لیکن این روش ها نمی توانند برای پایین آوردن میزان دی اکسید کربن موجود در اتمسفر استفاده شوند. برای نیل بدین منظور روش جداسازی مستقیم دی اکسید کربن از هوا، باید به کار گرفته شود. در این تحقیق، شبیه سازی فرآیند توسط نرم افزار صورت گرفته و پارامترهای مختلف موثر بر میزان بازیابی دی اکسید کربن و مصرف انرژی، به منظور دستیابی به بالاترین میزان بازیابی دی اکسید کربن از هوا و کمترین مصرف انرژی بررسی می شوند. بررسی ها نشان می دهد که عواملی چون نوع و میزان حلال مصرفی و شدت جریان حلال در کاهش مصرف انرژی در فرآیند جداسازی مستقیم دی اکسید کربن از هوا مؤثر می باشند. متوسط میزان بازیابی با شرایط در نظر گرفته شده حدود ۸۹ درصد و متوسط انرژی مصرفی نیز حدود ۸ گیگاژول به ازای هر تن دی اکسید کربن بازیافتی محاسبه شده است.

**کلمات کلیدی:** دی اکسید کربن، جداسازی مستقیم از هوا، شبیه سازی، جذب

### مقدمه

دی اکسید کربن در بین گازهای گلخانه ای موجود در اتمسفر دارای بیشترین تاثیر بر پدیده گرمایش کره زمین می باشد. این گاز گلخانه ای عمدتاً از احتراق سوخت های فسیلی در صنایع مختلف حاصل می شود [۱]. بر اساس گزارش رصدخانه مانالوا غلظت دی اکسید کربن در اتمسفر از مقدار ۳۹۱/۶۵ ppm در سال ۲۰۱۱ به مقدار ۳۹۳/۸۴ ppm در سال ۲۰۱۲ افزایش پیدا کرده است. همچنین طبق این گزارش، در طی سالهای (۲۰۱۲-۲۰۰۳) این افزایش سالانه به طور میانگین برابر ۲/۱ ppm در هر سال بوده است در حالی که در دهه قبل (۲۰۰۲-۱۹۹۳) این افزایش به طور متوسط حدود ۱/۷ ppm در هر سال بوده است. شکل ۱ میزان میانگین سالانه غلظت دی اکسید کربن موجود در اتمسفر بین سال های

\*movagharnejad@yahoo.com

۱۹۶۰ تا ۲۰۱۳ را نشان می دهد. از روی این شکل مشخص است که غلظت دی اکسید کربن موجود در جو طی سال های اخیر افزایش نمایانی یافته است [۲]. برخی محققان پیشبینی کرده اند که غلظت گاز دی اکسید کربن در سال ۲۱۰۰ بالغ بر ۷۵۰ ppm گردد [۳].



شکل ۱. میزان دی اکسید کربن اتمسفر در طی سال های اخیر - گزارش رصدخانه مانالوا [۲]

ایران با تولید خالص حدود ۴۵۰ میلیون تن دی اکسید کربن در سال، بیشترین سهم را در انتشار این گاز در بین کشورهای خاورمیانه به خود اختصاص داده است [۴].

### تاریخچه فناوری جذب مستقیم (دی اکسید کربن) از هوا<sup>۱</sup>

فناوری جداسازی و حذف دی اکسید کربن از هوا به بیش از ۷۰ سال قبل بر می گردد، اگرچه در آن زمان در مقیاسی کوچک تر نسبت به فناوری های امروزی مورد استفاده قرار می گرفت [۵-۷]. اولین کاربرد صنعتی فرآیند جداسازی دی اکسید کربن از هوا در نیروگاه های اسیژن برودتی گزارش شده است. در این نیروگاه ها برای جلوگیری از تغلیظ دی اکسید کربن در هوا و گرفتگی مبدل های حرارتی، این ماده را از هوا جدا می کردند [۸]. یکی از کاربردهای اصلی و مهم فناوری حذف دی اکسید کربن از هوا صنعت فضایی [۹] و زیر دریایی ها [۱۰] هستند. چنانچه هر فضاورد تنها یک کیلوگرم در روز دی اکسید کربن منتشر کند، غلظت دی اکسید کربن می تواند به سرعت در داخل یک سفینه فضایی بالا رود، به ویژه هنگامی که سفینه فوق دارای بیش از یک فضاورد باشد. بنابراین در برنامه های فضایی اهمیت فراوانی به حذف دی اکسید کربن از هوا داده می شود و تحقیقات فراوانی برای پیدا کردن روش های کارآمدتر حذف دی اکسید کربن از هوا انجام گرفته است.

### مزیت های فناوری جذب مستقیم از هوا

جداسازی مستقیم دی اکسید کربن از هوا دارای مزیت های چندی است که از آن جمله می توان به توانایی حذف انتشارات دی اکسید کربن از همه منابع متحرک و غیرنقطه ای، کاهش نیاز به انتقال دی

<sup>1</sup>Direct Air Capture

اکسید کربن و جبران نشت دی اکسید کربن از مراکز ذخیره زیرزمینی اشاره کرد. علاوه بر آن، جداسازی مستقیم دی اکسید کربن از هوا نیاز به مکان و موقعیت خاصی ندارد و می تواند دی اکسید کربن منتشر شده از منابع مختلف را در هر مقیاسی را جذب کند. منابع کوچک دی اکسید کربن در حدود یک سوم تا نصف کل انتشار دی اکسید کربن در جهان را تشکیل می دهند. بدون استفاده از فرآیند جداسازی مستقیم نمی توان غلظت دی اکسید کربن موجود در هوا را که هم کنون نیز تا حد خطرناکی بالا رفته، به وضعیت پیشین باز گرداند و دی اکسید کربن اضافی را از چرخه خارج کرد. همچنین یکی از مشکلات اصلی روش های جذب دی اکسید کربن متمرکز، استقرار آنها در کنار تاسیسات صنعتی نظیر پالایشگاه ها، نیروگاه ها، کارخانه های تولید سیمان و مانند آنهاست که ایجاد تاسیسات جذب و ذخیره سازی دی اکسید کربن در مقیاس بزرگ، ساخت یک شبکه خطوط لوله ای عریض جهت انتقال دی اکسید کربن جداسازی شده به مکانی مناسب برای ذخیره سازی را ضروری می سازد. برپایی این تاسیسات بسیار پرهزینه است و همچنین خطرات و مشکلات جدیدی مانند مشکل عبور خطوط لوله از مناطق پرجمعیت و یا حساس را پدید می آورد. در حالی که، جداسازی مستقیم دی اکسید کربن از هوا می تواند در همان محل ذخیره دی اکسید کربن انجام شود. از این رو نیاز به انتقال دی اکسید کربن در طول مسیرهای طولانی نمی باشد و این تاسیسات می توانند در کنار مکان های مناسب برای ذخیره سازی دی اکسید کربن (مانند چاه های نفت) مستقر شوند. از طرف دیگر، بیش تر منابع منتشر کننده نقطه ای دی اکسید کربن در جاهایی بسیار دورتر از مکان های مصرف و ذخیره سازی دی اکسید کربن قرار گرفته اند [۱۱]. بر طبق گزارش منتشر شده مکان های بسیاری برای ذخیره سازی ایمن دی اکسید کربن در ایران وجود دارند [۱۲]. اگرچه این مکان های ذخیره سازی مناسب بطور نظری می توانند دی اکسید کربن را در طول هزاران سال نگهداری کنند ولی احتمال نشت دی اکسید کربن حتی در مقادیری در حدود چند درصد، سبب می شود که استفاده از فناوری جذب مستقیم از هوا برای تنظیم مجدد مقدار دی اکسید کربن موجود در هوا گریزناپذیر باشد [۱۳]. فرآیند جداسازی مستقیم دی اکسید کربن از هوا، راهی موثر برای جداسازی دوباره دی اکسید کربن نشت یافته ارائه می دهد و می تواند به عنوان مکمل فرآیندهای جذب نقطه ای مورد استفاده قرار گیرد.

### شبیه سازی فرآیند جذب مستقیم

در این تحقیق از نرم افزار برای شبیه سازی فرآیند جداسازی مستقیم دی اکسید کربن موجود در اتمسفر از طریق واحد جذب شیمیایی استفاده شده است. به منظور شبیه سازی واحدهای آمینی در نرم افزار اسپن هایسیس<sup>۱</sup>، بسته ترمودینامیکی مخصوصی تحت عنوان بسته آمینی وجود دارد، که اکثر شرایط ترمودینامیکی مورد نیاز برای شبیه سازی فرآیندهای شامل حلال های آمینی و واکنش های مربوط به آن ها را به صورت پیش فرض در خود جای داده است. مدل ترمودینامیکی کنت-آیزنبرگ<sup>۲</sup>

<sup>1</sup> Aspen hysis

<sup>2</sup> Kent-iesanberg

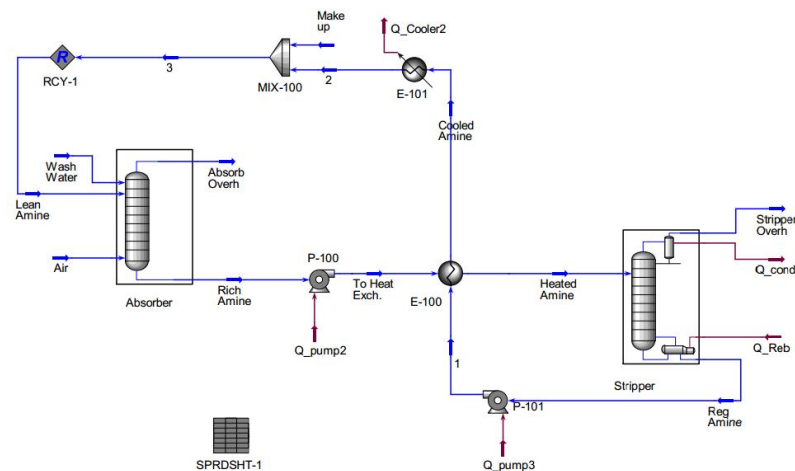
برای پیش بینی و محاسبه موازنه های موجود در شبیه سازی در نظر گرفته شد. غلظت حلال آمین (محلول در آب) ۲۸ درصد وزنی و دبی مولی حلال ۱۶۰۰۰۰ Kmoles/hr فرض گردید. همچنین در این شبیه سازی برای پیش بینی خواص ترمودینامیکی جریان های گازی موجود، از مدل ضرایب مخلوط های گازی غیر ایده آل استفاده شده است. در این شبیه سازی از حضور بقیه ترکیبات موجود در هوا، به دلیل غلظت بسیار اندک آنها چشم پوشی شده و جریان هوای مورد استفاده را تنها شامل ترکیبات نیتروژن، اکسیژن و دی اکسید کربن با غلظت های زیر مطابق جدول ۱ فرض شده است:

جدول ۱. ترکیبات در نظر گرفته شده برای جریان هوا در شبیه سازی

ترکیب	درصد
نیتروژن	۷۸/۹۶
اکسیژن	۲۱
دی اکسید کربن	۰/۰۴

### ساختار کلی نمودار جریانی فرآیند شبیه سازی شده

فرآیند کلی برای فرآیند جداسازی دی اکسید کربن با استفاده از جذب شیمیایی شامل دو ستون اصلی جذب دی اکسید کربن و دفع (به منظور احیاء جاذب) می باشد. ستون جذب عبارت از یک ستون جذب معمولی بدون نیاز به منبع انرژی جانبی است، اما ستون دفع شامل یک ستون تقطیر به همراه تجهیزاتی همچون جوش آور<sup>۱</sup> و کندانسور<sup>۲</sup> برای انجام بهتر بخش احیاء جاذب می باشد. همچنین به منظور صرفه جویی در مصرف انرژی می توان با استفاده از جریان برگشتی از ستون احیاء، دمای جریان ورودی به این ستون را با استفاده از یک مبدل حرارتی افزایش داد. در شکل ۲ نمودار جریانی فرآیند شبیه سازی شده نشان داده شده است.



شکل ۲. نمودار جریان فرآیند شبیه سازی شده

<sup>1</sup> Reboiler  
<sup>2</sup> Condenser

پارامترهای در نظر گرفته شده برای بخش جذب و دفع به صورت جداول ۲ و ۳ می باشد.

جدول ۲. پارامترهای طراحی برای ستون جذب

برج جذب	
۱۵	تعداد سینی
۱۵/۸۸	ارتفاع ستون (m)
۱/۱	فشار (bar)
۱۲/۱۹	قطر ستون (m)
۲	سینی خوراک

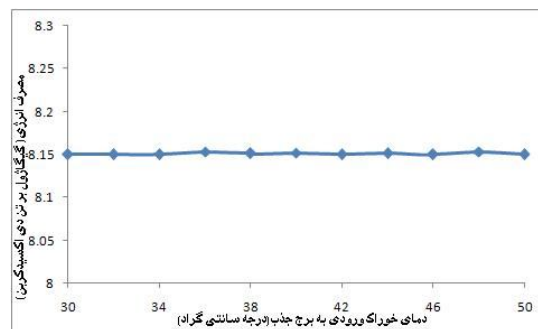
جدول ۳. پارامترهای طراحی برای برج دفع

برج دفع	
۱۸	تعداد سینی
۲۰/۲۵	ارتفاع ستون (m)
۱/۸-۲	فشار (bar)
۱۴/۹۴	قطر ستون (m)
۲	سینی خوراک
۱	نسبت برگشتی

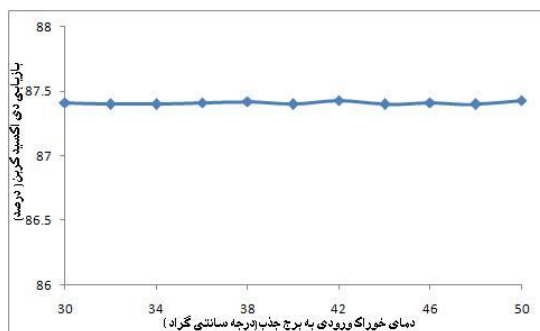
### نتایج و بحث

مهم ترین و اساسی ترین بخش در طراحی و شبیه سازی واحدهای جداسازی و حذف دی اکسید کربن از مخلوط گازها و از جمله هوا، مقدار انرژی مصرفی در جوش آور برج دفع و نیز میزان بازیافت دی اکسید کربن از جریان ورودی مخلوط گاز یا هوا می باشد. تأثیر پارامترهای مختلف بر این موارد در نمودارهای زیر قابل مشاهده می باشد.

همان طوری که از شکل های ۳ و ۴ مشخص است، دمای خوراک ورودی به برج جذب تأثیر چندانی بر مقدار بازیابی دی اکسید کربن و انرژی مصرفی ندارد.

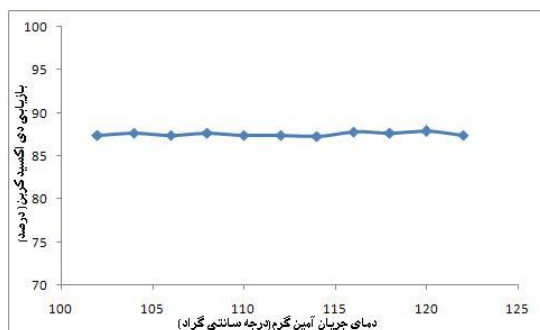


شکل ۳. تغییرات مصرف انرژی بر اساس دمای خوراک ورودی به برج جذب

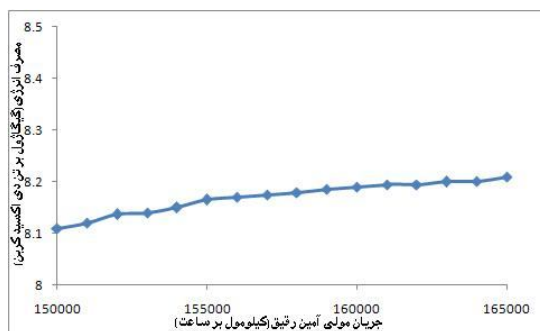


شکل ۴. تغییرات میزان بازایی دی اکسید کربن بر اساس دمای خوراک ورودی به برج جذب

شکل ۵ نشان می دهد که تغییر دمای جریان ورودی به برج دفع تاثیر چندانی بر میزان بازایی دی اکسید کربن ندارد، در حالی که بنا بر شکل ۶ افزایش دبی ورودی حلال به برج جذب سبب افزایش قابل توجه ای در میزان انرژی مصرفی می گردد.

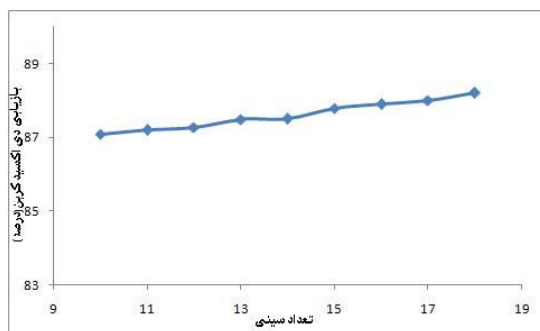


شکل ۵. تغییرات دمای جریان ورودی به برج دفع بر میزان بازایی دی اکسید کربن



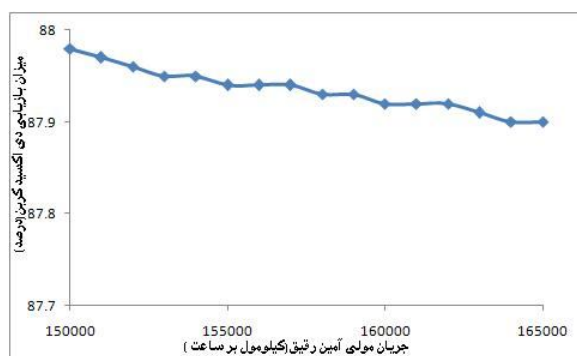
شکل ۶. تغییرات انرژی مصرفی بر حسب دبی های مختلف حلال ورودی به برج جذب

با توجه به شکل ۷ مشخص می شود که با افزایش شمار سینی های برج جذب از ۱۰ به ۱۸ میزان بازایی دی اکسید کربن از ۰.۸۷٪ به حدود ۰.۸۸٪ افزایش می یابد.



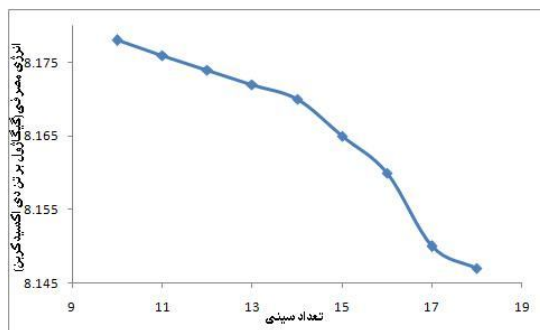
شکل ۷. تغییرات بازایی دی اکسید کربن بر اساس ارتفاع برج جذب

بنا بر شکل ۸ درصد بازایی دی اکسید کربن در همین شرایط به میزان اندکی کاهش می یابد.



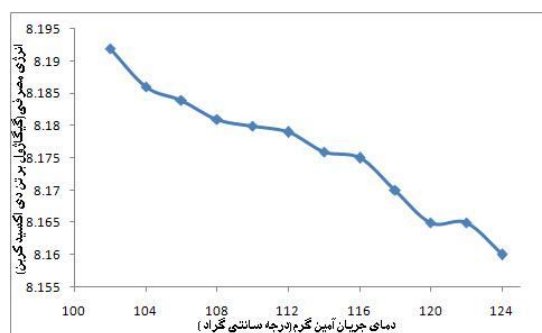
شکل ۸. تغییرات دبی حلال ورودی به برج جذب بر میزان بازایی دی اکسید کربن

از شکل ۹ مشخص است که با افزایش تعداد سینی های برج جذب از ۱۰ به ۱۸ میزان انرژی مصرفی به مقدار قابل توجهی کاهش می یابد.



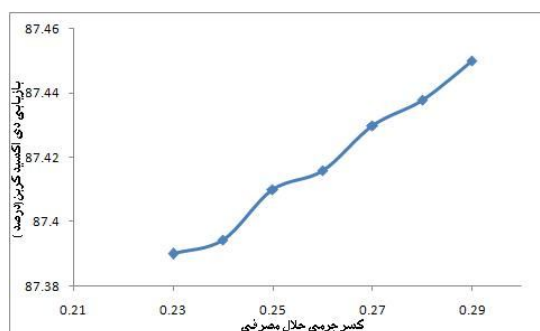
شکل ۹. تغییرات مصرف انرژی بر اساس ارتفاع برج جذب

شکل ۱۰ آشکار می سازد که کاهش دمای ورودی به برج دفع تاثیر قابل توجهی در کاهش انرژی مصرفی دارد.

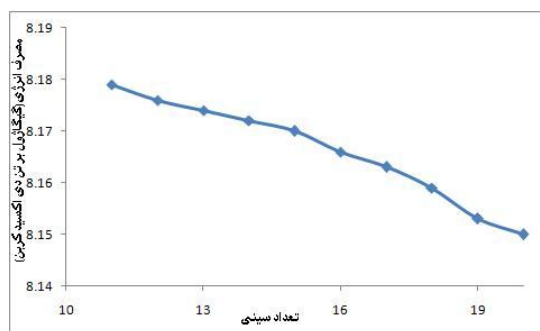


شکل ۱۰. تغییرات دمای جریان ورودی به برج دفع بر میزان مصرف انرژی

با توجه به شکل ۱۱ مشخص می شود که درصد بازیابی دی اکسید کربن متناسب با کسر جرمی حلال مصرفی است و بنا بر شکل ۱۲ با افزایش تعداد سینی های برج دفع میزان انرژی مصرفی کاهش می یابد.



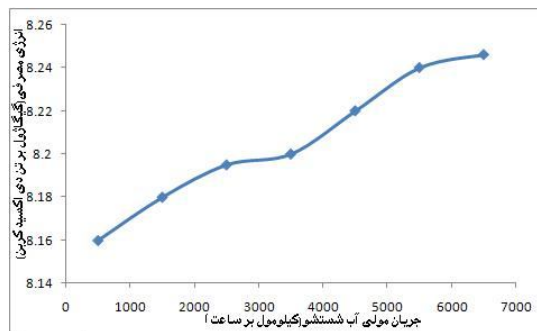
شکل ۱۱. تغییرات بازیابی دی اکسید کربن بر اساس حلال مصرفی



شکل ۱۲. تغییرات مصرف انرژی بر اساس ارتفاع برج دفع

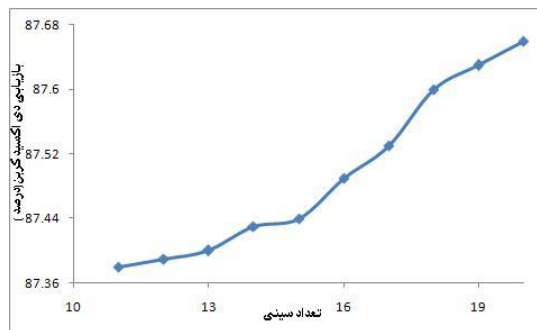
شکل ۱۳ نشان می دهد که با افزایش جریان آب شستشو، میزان انرژی مصرفی به طور کلی افزایش می یابد.





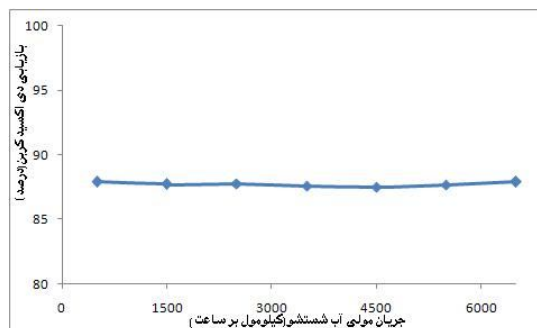
شکل ۱۳. تغییرات مصرف انرژی بر اساس دبی جریان آب شستشو برای برج جذب

بنا بر شکل ۱۴ میزان درصد بازیابی دی اکسید کربن افزایش قابل ملاحظه ای می یابد.

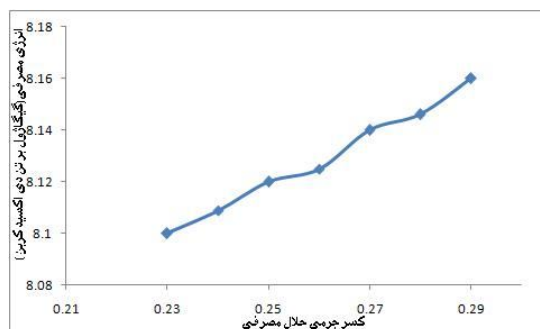


شکل ۱۴. تغییرات بازیابی دی اکسید کربن بر اساس ارتفاع برج دفع

از شکل ۱۵ مشخص می شود که تغییرات جریان مولی شستشو تاثیر چندانی بر میزان بازیابی ندارد و شکل ۱۶ به روشنی نشان می دهد که با افزایش کسر جرمی حلال مصرفی، میزان انرژی مصرفی افزایش می یابد.



شکل ۱۵. تغییرات درصد بازیابی دی اکسید کربن بر اساس جریان مولی آب شستشو



شکل ۱۶. تغییرات مصرف انرژی بر اساس حلال مصرفی

در حالت کلی با توجه به داده های موجود و نتایج به دست آمده، برای ادامه کارهای مشابه در زمینه جداسازی و حذف دی اکسید کربن از هوا، بهترین مقادیر برای پارامترهای بررسی شده در این تحقیق به صورت جدول ۴ قابل پیش بینی خواهند بود.

جدول ۴. خلاصه نتایج این تحقیق

حدود ۸۹ درصد	متوسط میزان بازیابی
حدود ۴۰	دمای خوراک ستون جذب (°C)
حدود ۱۶۰۰۰۰	دبی مولی حلال (K mole/hr)
حدود ۱۲۰	دمای گاز ورودی به برج دفع (°C)
حدود ۶۰۰	دبی آب شستشو (K mole/hr)
۱۵	ارتفاع برج جذب (تعداد سینی)
۱۸	ارتفاع برج دفع (تعداد سینی)
حدود ۲۸ درصد وزنی	غلظت حلال (محلول در آب)
حدود ۸ GJ	متوسط انرژی مصرفی

البته این مقادیر با توجه به شرایط موجود در شبیه سازی با استفاده از نرم افزار مورد استفاده بوده، اما می توانند به عنوان داده های مبنا برای شبیه سازی ها و یا حتی کارهای آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گیرد.

### ارزیابی اقتصادی

یکی از شاخص های مناسب برای بررسی قابلیت اقتصادی طراحی یک فرآیند، تخمین هزینه های ساخت فرآیند و تولید محصول می باشد. هزینه های مرتبط با یک فرآیند صنعتی معمولاً شامل هزینه های سرمایه گذاری اولیه و هزینه های بهره برداری می باشد که هزینه های سرمایه گذاری اولیه شامل هزینه های خرید تجهیزات و هزینه های مربوط به ساخت و نصب است. بر اساس نتایج و پیش بینی های

انجام شده، هزینه سرمایه گذاری اولیه برای ایجاد واحد فرآیند جداسازی مستقیم دی اکسید کربن از هوا حدود ۱۳۰ میلیون دلار است که اغلب آن هزینه های ساخت و نصب می باشد. هزینه های بهره برداری برای این فرآیند بیش از ۸۵ میلیون دلار پیش بینی شده است که این خود به دلیل مصرف انرژی بالا در مراحل دفع فرآیند شبیه سازی شده می باشد. البته این هزینه ها در کشور ما، با توجه به ایجاد شرایط مختلف، همیشه صادق نیست و پیش بینی هزینه ها در هر کشوری به شرایط آن کشور از قبیل میزان دسترسی آن به علم و فناوری و مواد و تجهیزات مورد نیاز و میزان ارتباط آن کشور با کشورهای سازنده و دارای تجهیزات صنعتی مورد نیاز و همچنین تحریم های مختلفی که گاهی علیه برخی دولت ها صورت می پذیرد، بستگی دارد.

### نتیجه گیری

با توجه به شرایط و نتایج حاصل از طراحی و شبیه سازی صورت گرفته در می یابیم، هرچه غلظت دی اکسید کربن در خوراک ورودی بیشتر باشد، میزان بازیابی دی اکسید کربن نیز به مراتب بیشتر خواهد شد. دمای جریان هوای ورودی به برج جذب به عنوان خوراک، تأثیر محسوسی روی مصرف انرژی و میزان بازیابی دی اکسید کربن نداشته است. با افزایش دبی حلال مصرفی، از آنجایی که حجم بالاتری از حلال مصرف شده در برج دفع نیازمند مصرف مقادیر بیشتری از انرژی خواهد بود، به همین علت با افزایش دبی حلال میزان انرژی مورد نیاز بیشتر خواهد شد. با افزایش تعداد سینی های برج جذب، درصد بازیابی به دلیل افزایش سطح انتقال جرم و در نتیجه بهبود فرآیند جذب افزایش می یابد. همچنین با افزایش ارتفاع برج، میزان مصرف انرژی نیز کاهش می یابد. تغییرات غلظت حلال مصرفی بر میزان انرژی مصرفی و میزان بازیابی دی اکسید کربن تأثیرگذار است. به طوری که با افزایش غلظت حلال، مقادیر انرژی مصرف شده توسط جوش آور و نیز میزان بازیابی دی اکسید کربن افزایش می یابد. با بررسی نتایج تحقیقات دیگر و شبیه سازی حاصل، در دبی های پایین و غلظت های اندک دی اکسید کربن در خوراک، حلال مونو اتانول آمین برای جذب شیمیایی دی اکسید کربن مناسب است، البته در دبی های بالاتر با توجه به مصرف انرژی و میزان بازیابی مورد نظر می توان از دیگر حلال های آمینی نیز استفاده کرد.

### منابع

1. Metz B., Davidson O., De Coninck H.C., Loos M., Meyer L.A., IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Cambridge University Press, 2005.
2. <http://co2now.org> - Mauna Loa Observatory.
3. Wanga M., Lawala A., Stephenson P., Siddersb, J., Ramshawa C., Post-combustion CO<sub>2</sub> capture with chemical absorption: A state-of-the-art review, Chemical Engineering Research and Design, Vol. 89, 2011, pp.1609–1624.
4. IEA, CO<sub>2</sub> Emission from Fuel Combustion. IEA Statistics (2009). Available at: <http://www.iea.org> [May 1, 2008].



5. Payne J.W., Dodge B.F., Rate of absorption of carbon dioxide in water and in alkaline media, *IndEngChem*, Vol. 24, 1932 pp.630–637.
6. Spector N.A., Dodge B.F., (1946) Removal of carbon dioxide from atmospheric air. *Trans Am Inst Chem Eng.*, Vol. 42, 1946, pp. 827–848.
7. Astarita G., *Mass Transfer with Chemical Reactions*, Elsevier, New York, 1967.
8. Castle W.F., Fifty-years' development of cryogenic liquefaction processes, *Cryogenic Engineering: Fifty years of progress*, eds Timmerhaus KD, Reed RP, Rizzuto C, Springer, New York, pp 146–160, 2007.
9. Dall Bauman L., Finn J., Adsorption processes in spacecraft environmental control and life support systems. *Adsorption and Its Applications in Industry and Environmental Protection: Applications in Environmental Protection*, ed Dabrowski A, Elsevier, New York, Vol II, pp 455–471, 1999.
10. Carey R., Gomezplata A., Sarich A., An overview into submarine CO<sub>2</sub> scrubber development, *Ocean Eng.*, Vol. 10, 1983, pp.227–233.
11. Van Noorden R., Carbon sequestration: Buried trouble, *Nature*, Vol.463, 2010, pp.871–873.
12. Movagharnjad K., Emamgholivand A., Mousavi H., Sheikhi Kordkheili M., Preliminary country-scale assessment of carbon dioxide storage potential in Iran, *Greenhouse Gases Science and Technology*, Vol. 2, 2012, pp.151-161.
13. Stern N., *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, MA, 2006.