

آنالیز حساسیت و بهینه‌سازی فرآیند بهبود یافته‌ی تراکم و خالص‌سازی CO₂ با استفاده از روش سطح پاسخ

اسماعیل کوهستانیان*

گروه مهندسی شیمی، واحد ایرانشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ایرانشهر، ایران

فرهاد شهرکی

گروه مهندسی شیمی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

چکیده: امروزه انتشار کربن دی‌اکسید ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی به عنوان یکی از دلایل اصلی گرمایش کره‌ی زمین و مشکلات ناشی از آن شناخته می‌شود. احتراق با اکسیژن به نسبت خالص (OFC) روشی موثر برای جداسازی CO₂ از گاز احتراقی است. واحد تراکم و خالص‌سازی کربن دی‌اکسید (CO₂CPU) یکی از واحدهای صنعتی به نسبت جدید برای جداسازی CO₂ از گاز احتراق حاصل از فرآیند OFC است. با این حال انرژی بالای مورد نیاز جهت انجام فرآیند تراکم و تبرید یکی از چالش‌های این واحد است. از این رو شناسایی و آنالیز حساسیت پارامترهای موثر بر فرآیند مورد نیاز است تا سرانجام بتوان این پارامترها را به نحو مناسبی بهینه‌سازی و کنترل نمود. تحقیق حاضر ضمن معرفی این واحد، به آنالیز حساسیت، بهینه‌سازی و بهبود ساختار این فرآیند اختصاص داده شده است. فرآیند در محیط نرم افزار Aspen Plus شبیه‌سازی شد. مدل ترمودینامیکی Peng-Robinson برای تخمین خصوصیات ترمودینامیکی به کار گرفته شد و به منظور افزایش دقت ضرایب ترمودینامیکی با استفاده از مقادیر موجود در مقالات بهبود یافت. با توجه به اینکه برهمکنش پارامترهای عملیاتی بر نتایج بهینه‌سازی موثر است، روش سطح پاسخ (RSM) به منظور بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد با بهبود شرایط عملیاتی فرآیند در فشار ۲۵ bar قابل انجام است. در حالی که پیشتر فشار عملیاتی این فرآیند ۳۰ bar گزارش شده بود. بدیهی است که کاهش فشار عملیاتی نه تنها سبب کاهش هزینه عملیاتی می‌شود بلکه سبب کاهش هزینه سرمایه‌گذاری و در نتیجه کاهش هزینه‌های کل خواهد شد.

واژگان کلیدی: احتراق با اکسیژن خالص، حصر CO₂، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی، آنالیز حساسیت، فرآیند CO₂CPU.

KEYWORDS: Oxy-fuel combustion, CO₂ capture, Simulation and optimization, Sensitivity analysis, CO₂CPU process.

مقدمه

۳۷۰ ppm افزایش یافت [۱] که سبب افزایش دمای کره‌ی زمین بین ۰/۶ تا ۱ °C گردید [۲]. پیش‌بینی می‌شود که به دلیل افزایش جمعیت

در طی سال‌های ۱۷۶۰ تا ۱۸۴۰ میلادی به خصوص از شروع انقلاب صنعتی انتشار گازهای گلخانه‌ای به ویژه CO₂ از ۲۸۰ به

*E-mail: koohestanian@pgs.usb.ac.ir

*عهدہ‌دار مکاتبات

جدول ۱- مراکز اصلی انتشار CO₂.

فرآیند	تعداد منابع	حجم انتشار آلاینده CO ₂ (میلیون تن در سال)
نیروگاه برق	۴۹۴۲	۱۰۵۳۹
کارخانجات تولید سیمان	۱۱۷۵	۹۳۲
پالایشگاهها	۶۳۸	۷۹۸
صنایع فلزی	۲۶۹	۶۴۶
صنایع پتروشیمی	۴۷۰	۳۷۹
فرآیندهای نفت و گاز	-	۵۰
بیواتانول و بیوانرژی	۳۰۳	۹۱
سایر منابع	-	۳۳
مجموع		۱۳۴۶۶

همچون تقطیر، جذب، جذب سطحی، نانوجاذبها، فرآیندهای زیستی، فرآیندهای غشایی و غیره توسعه یافته است. با این حال بسیاری از صنایع ترجیح می‌دهند از سیستم‌های رایج بر پایه‌ی جذب و تقطیر و یا تراکم و تبرید استفاده نمایند [۱۷]. چراکه در زمینه‌ی طراحی و عملکرد این واحدها تجربه‌ی بیشتری داشته و همچنین شرکت‌های بیشتری در زمینه فروش تجهیزات این فرآیندها در دنیا فعالیت می‌کنند [۱۸]. از جمله‌ی این روش‌ها، فرآیند حذف CO₂ با استفاده از تراکم و خالص‌سازی می‌باشد (CO₂CPU) که اخیراً توسط واحد تحقیقات و توسعه‌ی آژانس بین المللی گازهای گلخانه‌ای (IEAGHG)، پیشنهاد شده که این سیستم، نسبت به فرآیند تقطیر، اقتصادی‌تر گزارش شده است [۱۹]. خصوصاً زمانی که غلظت CO₂ در جریان گاز احتراق بالا باشد (همانند روش OFC) این فرآیند نسبت به سایر روش‌های جداسازی مناسب‌تر به نظر می‌رسد [۱۹، ۲۰]. با توجه به اینکه در فرآیند OFC از اکسیژن با خلوص بالا به جای هوا استفاده می‌شود، غلظت CO₂ بالا بوده که از این‌رو می‌تواند به سادگی پس از فرآیند آزدایی، بوسیله سرمایه‌ی و تراکم، CO₂ جداسازی شود. علاوه بر این در فرآیند OFC بدلیل حذف نیتروژن، دمای گاز احتراق افزایش می‌یابد که منجر به کاهش مصرف سوخت خواهد شد [۲۱].

در روش جداسازی قبل از احتراق، سوخت فسیلی (عموماً زغال سنگ) به گاز سنتز متشکل از CO و H₂ تبدیل شده و سپس با تبدیل CO به CO₂ در راکتور دیگر، هیدروژن از CO₂ جدا می‌شود. در روش OFC به جای هوا از اکسیژن به نسبت خالص در محفظه‌ی احتراق استفاده شده و در نتیجه غلظت CO₂ در جریان گازهای احتراق خروجی بالا

و افزایش مصرف انرژی، میزان CO₂ به طور متوسط ۲/۴٪ در هر سال افزایش یابد که باعث افزایش دمای کره‌ی زمین در حدود ۳/۲ تا سال ۲۱۰۰ میلادی خواهد شد [۳]. از این‌رو در سال‌های اخیر با توجه به الزامات زیست محیطی و به دلیل اثرات گازهای گلخانه‌ای در افزایش دمای کره‌ی زمین، فرآیند حصر و ذخیره‌سازی کربن دی اکسید (CCS) به منظور کاهش گازهای آلاینده‌ی خروجی از مراکز اصلی همچون نیروگاه‌ها، صنایع ریخته‌گری و ذوب فلزات، کارخانجات سیمان، واحدهای شیمیایی و پتروشیمی، پالایشگاهها و غیره توسعه یافته است [۴]. کربن دی اکسید به دلیل میزان انتشار و طول عمر زیاد در اتمسفر، بیشترین تاثیر را بر گرمایش کره‌ی زمین دارد و از این‌رو نگرانی‌های زیست محیطی زیادی را در سال‌های اخیر ایجاد کرده است [۵]. برای کاهش انتشار CO₂ رویکردهای گوناگونی از قبیل توسعه‌ی انرژی‌های تجدیدپذیر [۶]، تغییر سوخت از ذغال سنگ به گاز طبیعی [۷]، اعمال قوانین و مالیات بر روی CO₂ خروجی از مراکز صنعتی [۸]، استفاده از CO₂ به‌عنوان ماده‌ی خام [۹]، افزایش راندمان واحد به منظور کاهش مصرف انرژی [۱۰] و فرآیند CCS [۱۱] پیشنهاد شده است. با این حال به دلیل تقاضای بالای جهانی انرژی و این حقیقت که با توجه به قیمت به نسبت اندک سوخت‌های فسیلی همچنان سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر در مقایسه با سوخت‌های فسیلی از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست، سبب شده نیاز بیشتری به منظور توسعه روش‌های حصر و جداسازی کربن دی اکسید برای کاهش مقدار این آلاینده در اتمسفر احساس شود [۱۲]. جدول ۱ مهم‌ترین منابع انتشار این آلاینده را گزارش می‌کند [۱۳].

مطابق جدول ۱، بیشترین حجم این آلاینده توسط نیروگاه‌ها منتشر می‌شود. از این‌رو، مطالعات بسیاری به منظور جداسازی و حذف این آلاینده از نیروگاه‌ها انجام شده است. اگرچه هدف فرآیند CCS کاهش تشکیل CO₂ نیست [۱۴]، با این حال، این فرآیند موثرترین روش برای کاهش گازهای گلخانه‌ای از مراکز همانند نیروگاه‌ها است که شامل سه مرحله‌ی اصلی جداسازی، انتقال و ذخیره‌سازی CO₂ می‌باشد [۱۵]. در این خصوص عموماً ۴ روش کلی جهت جداسازی CO₂ پیشنهاد شده است. جداسازی قبل از احتراق^۱، جداسازی پس از احتراق^۲، احتراق توسط اکسیژن تقریباً خالص (OFC)^۳ و جداسازی با استفاده از سیکل احتراق شیمیایی^۴ که اغلب به‌عنوان زیر مجموعه‌ی روش OFC در نظر گرفته می‌شود [۱۶]. بر همین مبنای فرآیندهای جداسازی گوناگونی

(۱) CO₂ Capture and Storage

(۳) Post-combustion

(۵) Chemical looping combustion

(۲) Pre-combustion

(۴) Oxy-fuel combustion

گزارش کردند که با افزایش فشار بازده فرآیند افزایش می‌یابد. به هر حال، افزایش فشار بیش از ۳۵ بار سبب حل شدن برخی اجزای دیگر شده که در نتیجه خلوص کاهش می‌یابد [۲۷].

چانسوموانگ^۷ و همکاران [۲۸] به مدل‌سازی دینامیکی رفتار فرآیند CO₂CPU پرداختند. آنها گزارش کردند که رفتار این سیستم به شدت غیرخطی است. نتایج آنها نشان داد که شرایط عملیاتی اولین جداکننده فازی نقش کلیدی در عملکرد این فرآیند ایفا می‌کند. آنها همچنین گزارش کردند که میزان بازیافت CO₂ بیشتر به شرایط عملیاتی و میزان خلوص بیشتر به ترکیب اجزای خوراک وابسته است. جین^۸ و همکاران [۲۹] در یک تحقیق جالب توجه، بهینه‌سازی و کنترل فرآیند CO₂CPU را به کمک نرم افزارهای Aspen Plus و Aspen Dynamic انجام دادند. بر این اساس، آنها شرایط عملیاتی بهینه جدیدی را برای فرآیند CO₂CPU اعلام نمودند. با این حال لوئین^۹ گزارش نمود که ساختار کنترلی آنها مضاف بر پیچیدگی بیش از حد، پایدار^{۱۰} نخواهد بود [۳۰]. همچنین برهمکنش پارامترها تاثیر به‌سزایی در نتیجه بهینه‌سازی دارد که در تحقیق آنها لحاظ نشده است. از این رو موارد مذکور در تحقیق‌های جداگانه‌ای توسط لوئین [۳۰] و کوهستانیان و همکاران [۲۷] مورد بررسی قرار گرفت. لوئین [۳۰] ساختار جدیدی برای فرآیند CO₂CPU ارائه کرد. در این ساختار با افزایش تعداد مبدل چند جریانی^{۱۱} به ۳ مورد، درجه آزادی افزایش یافته و توانست ساختار کنترلی ساده‌تری برای فرآیند ارائه دهد. اگرچه استفاده از ساختار کنترلی ساده‌تر همواره با استقبال بیشتری از جنبه کاربردی از سوی مهندسين کنترل و فرآیند برخوردار است، اما افزایش تعداد مبدل‌های چند جریانی سبب افزایش هزینه سرمایه‌گذاری خواهد شد. از طرفی تثبیت دمای جدا کننده فازی اول در کار ارزشمند ایشان انجام نیافته که می‌تواند در زمان طولانی منجر به اشباع شدن شیرهای کنترلی شود. بر اساس استاندارد API RP 521 [۳۱] در یک مجموعه برج‌های سری که جریان خروجی از یک برج به‌عنوان خوراک وارد برج بعدی می‌شود تنظیم بار حرارتی هر یک از این برج‌ها بسیار مهم است. زیرا کاهش دما در یکی از برج‌ها می‌تواند سبب بروز اختلال در برج بعدی گردد. عدم تنظیم دقیق دمای جداکننده فازی اول منجر به کاهش اگرچه بسیار کم،

خواهد بود که عموماً توسط سرمایش و تراکم، این گاز از مخلوط سایر گازها جدا می‌گردد. از طرفی عموماً به دلیل حذف نیتروژن که بخش عمده‌ی جریان هوا را تشکیل می‌دهد و عدم امکان جداسازی سایر آلاینده‌های موجود در گاز، غلظت سایر آلاینده‌ها همچون سولفورها در آن بالاست که می‌تواند، معضلاتی همچون آسیب به تجهیزات واحد به دنبال داشته باشد [۲۲]. در روش OFC، وضعیت آلاینده‌های موجود در هوای مصرفی همانند SO_x و NO_x بر انرژی مصرفی فرآیند تاثیرگذار خواهد بود [۲۲]. در روش سیکل احتراق شیمیایی اکسیژن موجود در هوا به صورت اکسید فلزی جذب (جدا) می‌شود. با واکنش بین اکسیژن موجود در اکسید فلزی و ماده‌ی سوختنی (عموماً متان)، CO₂ و H₂ تشکیل می‌شود [۲۳]. اگرچه در این روش واحد جداسازی هوا^۱ (ASU) مورد نیاز نیست اما به دلیل محدودیت‌هایی همانند سرعت پایین واکنش و احیای مجدد فلز و هزینه‌ی بالا چندان مرسوم نمی‌باشد [۲۴].

نتایج تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که مرحله‌ی جداسازی CO₂ شدیداً نیازمند انرژی بوده و معمولاً ۷۵ تا ۸۰ درصد از کل هزینه‌های فرآیند حصر CO₂ را شامل می‌شود [۲۵]. از این رو مطالعات بسیاری به منظور توسعه روش‌های جدید یا بهبود فرآیندهای موجود، صورت گرفته یا در حال انجام است. فا^۲ و گاندرسن^۳ [۲۶] سه ساختار CO₂CPU شامل یک، دو و سه جداکننده فازی^۴ را طراحی و از جنبه فنی و اقتصادی با یکدیگر مقایسه نمودند. آنها اعلام نمودند با افزایش تعداد مراحل در یک خلوص ثابت، میزان بازیافت افزایش و انرژی مصرفی کاهش و هزینه‌ی کل به نحو چشمگیری افزایش می‌یابد و سرانجام گزارش دادند که فرآیند CO₂CPU با دو جداکننده فازی نسبت به سایر ساختارها اقتصادی‌تر است.

پاش^۵ و هاید^۶ [۱۹] به بهینه‌سازی و مقایسه فرآیند CO₂CPU با این ساختار در حالتی که همراه با یک برج تقطیر باشد، پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان می‌دهد که ساختار CO₂CPU همراه با دو جداکننده فازی سرمایش و انرژی کمتری نیاز دارد. آنها گزارش کردند که ساختار CO₂CPU همراه با برج تقطیر اگرچه سبب افزایش خلوص می‌شود اما باعث افزایش ۳۰٪ هزینه بیشتر در مقایسه با ساختار CO₂CPU همراه با دو جدا کننده فازی خواهد شد. آنها همچنین

(۱) Air separation unit

(۳) Fu

(۵) Posch

(۷) Chansomwong

(۹) Luyben

(۲) Fu

(۴) Separator

(۶) Haider

(۸) Jin

(۱۰) Robust

(۱۱) این دستگاه در نرم افزار Aspen Plus با نام Multi Heat Exchanger شناخته می‌شود. همچنین به آن Cold box نیز می‌گویند.

هستند [۲۹]. علاوه بر این استفاده از برج تقطیر در این فرآیند پیشتر از نقطه نظر اقتصادی مردود شناخته شده بود [۳۴]. همچنین آنها پیشنهاد کردند جریان تخلیه شده به اتمسفر می‌تواند به محفظه احتراق به‌عنوان رقیق کننده ارسال شود که با توجه به داده‌های آنها، انجام این عمل سبب تجمع آرگون و نیتروژن خواهد شد. از این‌رو بررسی رفتار دینامیک فرآیند در این مورد الزامی است.

از دیگر فرآیندهای متداول که از سال ۱۹۳۰ میلادی تاکنون در بیشتر صنایع استفاده می‌شود، فرآیند جذب توسط آمین‌هاست [۳۵]. فرآیند آمین، علی‌رغم مزایای بالایی همچون سادگی، ارزانی، خلوص و بازیافت بالای CO₂، چالش‌های بزرگی همچون مصرف بالای انرژی جهت احیای آمین [۳۶]، از دست رفتن حلال در اثر عدم جداسازی و بازیافت کامل آمین [۲۰]، کاهش راندمان جداسازی آن در طی زمان به دلیل آلودگی آمین [۲۰]، خوردگی و افزایش نرخ خوردگی به دنبال افزایش CO₂ خوراک ورودی [۳۷] و کف‌کنندگی [۳۸] از جمله مهم‌ترین موانع آن بشمار می‌آید در جدول ۲، مقایسه‌ی فرآیند جداسازی بر پایه‌ی آمین و فرآیند CO₂CPU که به طور خلاصه انجام شده است. همان‌طور که گزارش شد، بیشترین مصرف انرژی در فرآیند حذف و ذخیره‌سازی CO₂ در واحد جداسازی اتفاق می‌افتد (بین ۷۵ تا ۸۰ درصد). بنابراین، آنالیز حساسیت برای شناسایی پارامترهای اصلی و تاثیرگذار به منظور بهینه‌کردن پارامترهای عملیاتی فرآیند می‌تواند تاثیر به‌سزایی در بهبود کارایی و رفع گلوگاه‌های فرآیندی این واحد فرآیندی بگذارد. از طرفی اثر متقابل این پارامترها بر روی یکدیگر بسیار حائز اهمیت است، که تا کنون بهینه‌سازی و آنالیز حساسیت فرآیند بهبود یافته مطالعه نشده است. از این‌رو، این تحقیق به شناسایی و آنالیز حساسیت، بهینه‌سازی شرایط عملیاتی، تغییر و بهبود ساختار فرآیند اختصاص دارد.

معرفی واحد CO₂CPU

با توجه به اینکه اساس این فرآیند بر پایه تراکم و تبرید (به منظور میعان و جداسازی CO₂) می‌باشد، لازم است تا گاز احتراق قبل از ورود به این مرحله آبزدایی شود. وجود آب در خوراک ورودی نه تنها میزان خوردگی را در ادوات فرآیندی افزایش خواهد داد، بلکه در صورت تشکیل یخ گاز سبب فرسایش و انسداد لوله‌ها خواهد گردید. از این‌رو حداکثر مقدار آب مجاز در این فرآیند ۵۰۰ ppm توصیه شده است [۱۹]. معادله‌ی ترمودینامیکی Peng-Robinson جهت تخمین خصوصیات ترمودینامیکی در مخلوط‌های غیرقطبی یا اندکی قطبی مناسب است که در این تحقیق استفاده شده است [۳۹].

اما مداوم سطح مایع در برج اول و افزایش سطح مایع جدا کننده فازی دوم می‌شود. با توجه به اینکه ناگزیر به منظور اجتناب از انجماد یا افزایش دما، این شرایط باید تعدیل شود، در زمان طولانی منجر به اشباع شدن شیرهای کنترلی و از دست رفتن کنترل فرآیند خواهد شد. در تحقیق جین و همکاران، برهمکنش پارامترها در بهینه‌سازی فرآیند، لحاظ نشد. از این‌رو کوهستانیان و همکاران به آنالیز حساسیت و بهینه‌سازی فرآیند CO₂CPU با استفاده از روش سطح پاسخ^۱ (RSM) پرداختند [۲۷]. بر این اساس، شرایط عملیاتی بهینه جدیدی، گزارش شد. نتایج آنالیز آماری انجام شده در آن تحقیق نشان داد که دمای جدا کننده فازی اول نقش کلیدی در میزان کار و انرژی فرآیند دارد. بر اساس در نظر گرفتن برهمکنش پارامترها و آنالیز آماری، شرایط عملیاتی جدیدی پیشنهاد شد که سبب کاهش فشار عملیاتی به ۲۵/۳۴ bar گردید که کاهش هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری را به دنبال دارد. با این‌حال ابعاد مبدل‌های چند جریانی تاثیر مهمی در هزینه این عملیات داشته که در آن تحقیق بررسی نشد.

زو^۲ و همکاران [۳۲] با این استدلال که غلظت SO_x در فرآیند OFC بسیار بیشتر از احتراق با هواست و موجب کاهش کارایی تجهیزات حذف NO_x می‌شود، طراحی فرآیند جدیدی را برای جداسازی CO₂ از گاز احتراق فرآیند OFC ارائه دادند. نظر به اینکه نقاط شبنم SO_x و NO_x خیلی بیشتر از CO₂ است، آنها پیشنهاد کردند پس از آب زدایی کامل، بخشی از CO₂ مایع برای جداسازی این آلاینده‌ها از طریق میعان، بازگردانده شود. همچنین آنها سرانجام واحدهای حذف SO_x و NO_x را برای تصفیه‌ی جریان‌های غنی از این آلاینده‌ها طراحی نمودند. همچنین شبیه‌سازی و آنالیز حساسیت شرایط عملیاتی بر عملکرد میزان بازیافت CO₂، خلوص CO₂ و میزان SO_x و NO_x با استفاده از نرم افزار اسپن پلاس انجام شد و نتایج به کمک یک داده‌های حاصل از انجام آنالیز آزمایشگاهی تایید گردید. آنها گزارش کردند که CO₂ با خلوص ۹۹/۹٪ به کمک فرآیند تقطیر پس از تصفیه با استفاده از فرآیند جذب قابل استحصال است [۳۲]. با این‌حال نگرانی جدی در خصوص مقادیر این آلاینده‌ها در گاز احتراق وجود نداشته و مقدار SO_x در گاز احتراق بیشتر اینکه تابع فرآیند احتراق باشد، تابع نوع سوخت مصرفی است [۲۴]. از طرفی، مرحله آب زدایی به کمک سرمایه‌ی و میعان در برج تماس مستقیم، سبب حذف بیش از ۹۹/۹٪ و ۷۰٪ آلاینده‌های SO₂ و NO_x خواهد شد [۳۳]. در انتها واحد CO₂CPU قادر است تا بخش زیادی از این آلاینده‌ها را به تنهایی حذف کند و مقادیر این آلاینده‌ها در محصول نهایی در حد قابل قبول

(۱) Response surface methodology

(۲) Xu

جدول ۲- مقایسه و انتخاب فرآیند جداسازی مناسب.

فرآیند جذب بر پایه آمین		CO ₂ CPU	
مزایا	معایب	مزایا	معایب
۱- خورندگی تجهیزات	۱- خلوص بالای CO ₂	۱- میزان بازیافت نسبت به فرآیند آمین کم است.	۱- خلوص بالای CO ₂
۲- افزایش خوردگی با افزایش غلظت یا جداسازی CO ₂	۲- سادگی	۲- محدود به فرآیند OFC	۲- سادگی
۳- برای فرآیند OFC چندان مناسب نیست.	۳- فرآیند شناخته شده	۳- نیاز به واحد آبیگری	۳- روش ارزان
۴- نیازمند انرژی بالا جهت احیای آمین	۴- مقدار بازیافت بالا	۴- فرآیند جدید بوده و رفتار آن کاملاً شناسایی نشده است.	
۵- تجزیه آمین		۵- نیازمند انرژی بالا جهت تراکم و تبرید	
۶- اتلاف آمین			
۷- کاهش راندمان به دلیل آلودگی آمین			
۸- نیاز به واحد سرمایش گاز احتراق			
۹- کف‌کنندگی			

افت فشار در شیرها امکان پذیر است، اما به دلیل جلوگیری از انجماد CO₂ که در دمای (۵۶/۶°C-) رخ می‌دهد و جلوگیری از تشکیل یخ گاز^۲ و انسداد و فرسایش^۳ لوله‌ها در این تحقیق این دما محتاطانه انتخاب شده است. جریان خروجی از بالای جدا کننده فازی اول نیز (S7) پس از کاهش دما تا ۵۵°C- به منظور جداسازی بیشتر CO₂ وارد جداکننده فازی دوم می‌شود (S8). خلوص CO₂ در محصول نهایی باید بیش از ۹۵٪ باشد [۱۹].

جریان پرفشار خروجی از بالای جدا کننده‌ی فازی دوم S9 وارد مبدل چند جریانی شده و پس از افزایش دما تا حدود ۷۵°C از مبدل چند جریانی خارج می‌شود (S10). کاهش فشار این جریان برای تولید انرژی در یک توربین انجام می‌شود. از آنجا که توربین‌ها تجهیزات گران قیمتی هستند و به منظور کاهش نوسان در جریان ورودی به توربین و افزایش توان تولیدی توربین، این جریان تا دمای ۱۰۰°C افزایش می‌یابد. جریان خروجی از توربین S12 که فشار و دمای آن به ترتیب تا حدود ۲/۲bar و ۳۷°C- کاهش یافته برای استفاده از ظرفیت سرمایشی آن مجدد وارد مبدل چند جریانی شده و در دمای ۲۸°C از آن خارج می‌شود (جریان S13). همچنین این جریان می‌تواند جهت بازیافت بیشتر CO₂ وارد واحد جذب به کمک آمونیاک یا آمین گردد.

جریان خروجی از پایین جدا کننده فازی دوم (S20) که حاوی CO₂ به نسبت خالص است نیز وارد مبدل چند جریانی شده و دمای آن تا حدود ۳۵°C- افزایش یافته و پس از عبور از شیر فشار شکن TCV2 و کاهش فشار و دمای آن به ترتیب تا ۷/۳ bar و ۵۵°C- مجدداً وارد مبدل چند جریانی شده و پس از افزایش دما تا ۵۰°C از مبدل

جدول ۳- ضرایب برهمکنش ترمودینامیکی برای معادله‌ی Peng-Robinson [۱۹].

جزء i	جزء j	k _{ij}
CO ₂	Ar	۰/۱۲۳۰
CO ₂	O ₂	۰/۱۱۶۰
CO ₂	N ₂	-۰/۰۱۱۵
CO ₂	SO ₂	۰/۰۵۵۹
O ₂	N ₂	۰/۰۱۱۹

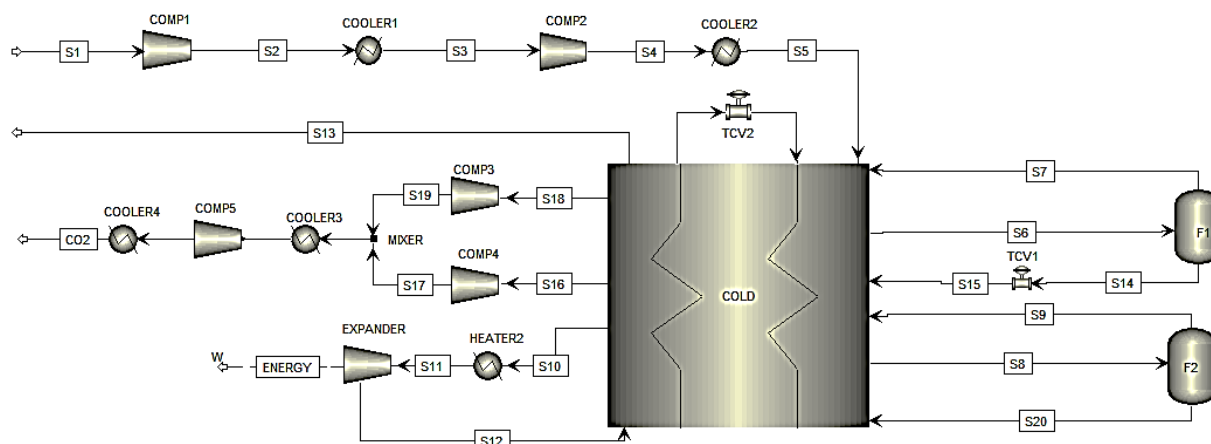
همچنین به منظور افزایش دقت شبیه‌سازی، ضرایب برهمکنش ترمودینامیکی (k_{ij}) با استفاده از داده‌های تجربی ارائه شده در جدول ۳ بهبود داده شد.

شکل ۱ ساختار بهبود یافته‌ی CO₂CPU را نشان می‌دهد [۴۰]. داده‌های گاز احتراق مورد مطالعه از مقالات استخراج گردید [۳۰]. جریان گاز احتراق (S1) پس از عبور از یک کمپرسور دو مرحله‌ای که در شکل ۱، به صورت باز نشان داده شده است، در دمای ۸۰°C وارد مبدل چند جریانی (COLD) می‌شود. افت فشار برای همه جریان‌های درون وارد مبدل چند جریانی در حدود ۰/۲۱ bar در نظر گرفته شد [۲۹]. جریان S5 پس از کاهش دما تا حدود ۳۰°C- جهت جداسازی بخشی از CO₂ مایع شده وارد اولین جدا کننده فازی (F1) می‌شود. در این تحقیق جداکننده‌های فازی آدیباتیک در نظر گرفته شده و از افت فشار در آنها صرف نظر شده است. جریان خروجی از انتهای این جدا کننده فازی (S14) پس از عبور از یک شیر فشار شکن به دلیل پدیده‌ی ژول تامسون^۱ دمای آن به حدود ۵۵°C- کاهش می‌یابد. اگرچه کاهش بیشتر دما با افزایش

(۱) Joule-Thomson effect

(۲) Hydrate

(۳) Erosion

شکل ۱- واحد تراکم و خالص سازی CO₂ [۲۷].

۵۵°C- و ۳۵°C- می باشد که CO₂ تنها به صورت فاز مایع وجود دارد، لذا این محدودیت هرگز دچار مشکل نخواهد شد. نتایج بررسی های انجام شده نیز موید این مطلب است [۳۰].

✓ حداقل بازیافت از ۹۰٪ کمتر نشود.

✓ محصول خوراک در فشار ۹۷ bar تحویل داده شود.

✓ فشار خروجی از توربین در حدود ۲/۲ bar تنظیم شود. در اینجا فرض شده جریان خروجی از توربین جهت بازیابی بیشتر وارد واحد جذب شود. در غیر این صورت فشار می تواند تا نزدیک فشار اتمسفر کاهش یابد که سبب افزایش انرژی تولیدی و بهتر شدن انتگرالیون حرارتی خواهد شد.

روش تحقیق و نرم افزارهای مورد استفاده

پس از استخراج داده های یک نمونه گاز احتراق حاصل از فرآیند OFC از مقالات [۲۹]، با استفاده از نرم افزار Aspen Plus (ورژن ۸/۶)، جداسازی CO₂ توسط فرآیند CO₂CPU شبیه سازی گردید. با توجه به اینکه فرآیند حذف CO₂ بعنوان قلب این واحد عمل می کند، شبیه سازی هر چه دقیق تر آن مورد نیاز است. از این رو به منظور افزایش دقت شبیه سازی ضرایب ترمودینامیکی موجود در نرم افزارهای شبیه ساز با داده های تجربی موجود در مقالات [۲۱] جایگزین شده و پس از اعتبارسنجی نتایج خروجی از شبیه سازی با مقالات [۲۹]، بهینه سازی فرآیند CO₂CPU صورت گرفت. به این منظور با استفاده از انجام طراحی آزمایش ها و انجام آنالیزهای آماری در محیط Design Expert (ورژن ۷)، آنالیز حساسیت هریک از این پارامترهای مورد نظر به طور دقیق بررسی گردیده و با شناسایی پارامترهای

چند جریانی خارج می شود. جریان های محتوی CO₂ محصول خروجی (جریان های S16 و S18) با یکدیگر ادغام شده و پس از افزایش فشار تا حدود ۹۷ bar به عنوان محصول CO₂ از فرآیند خارج می شوند. به منظور مقایسه عملکرد سه ساختار پیشنهادی توسط جین و همکاران [۲۹]، لوئین [۳۰] و کوهستانیان و همکاران [۴۰] برای داده های یک نمونه گاز احتراق [۳۰] و در یک دبی یکسان مورد مقایسه قرار گرفتند. جهت مقایسه ی دقیق تر هر سه ساختار در یک دبی یکسان (۵۹۶۰۶۹ kg/hr) و شرایط عملیاتی ذکر شده در مقالات انجام پذیرفت. حداکثر فشار عملیاتی^۱ (MOP) برای ایجاد سرمایه، به عنوان معیاری تاثیر گذار بر انرژی مصرفی کمپرسورها و ضخامت تجهیزات فرآیندی مقایسه گردید [۴۱]. همچنین خلوص، بازیافت و سطح مورد نیاز (A) در مبدل های چند جریانی در هر سه ساختار مقایسه شد. جهت افزایش دقت محاسبات و اطمینان از عدم وقوع تقاطع دمایی^۲، هر یک از مبدل های چند جریانی به بیش از ۱۲۰ ناحیه تقسیم و آنالیز انرژی در هر یک از آنها صورت گرفت.

محدودیت های طراحی

✓ دما از حداقل مجاز همواره بیشتر باشد. دمای انجماد ۵۶/۶°C- بوده که در این طراحی حداقل دما به صورت محتاطانه و در حدود ۵۵°C- انتخاب شده است.

✓ بخش عمده ی سرمایه ی فرآیند، توسط جریان های خروجی از شیرهای فشار شکن (S15 و S22) تامین می شود. از این رو دمای این جریان ها باید ثابت باشد.

✓ حداقل خلوص مولی CO₂ در محصول خروجی ۹۵٪ باشد [۴۲]. با توجه به اینکه دمای عملیاتی جداکننده های فازی به ترتیب

(۱) Maximum operating pressure

(۲) Cross temperature

جدول ۴- محدوده انجام طراحی آزمایش‌ها و شبیه‌سازی.

فاکتور فرآیندی	محدوده شبیه‌سازی	
	سطح بالا	سطح پایین
A	۳۵	۲۵
B	-۳۰	-۴۰
C	-۴۱	-۵۵

بهینه‌سازی و آنالیز حساسیت فرآیندها و تحقیقات گوناگون عددی و آزمایشگاهی به دفعات استفاده شده است [۴۵-۴۸]. روش RSM مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آماری مفید برای توسعه، بهبود و بهینه‌سازی فرآیندها است که در حقیقت نموداری از پاسخ‌ها می‌باشد که به عنوان عملکرد یک یا چند فاکتور ارائه می‌شود [۴۹]. علاوه بر آن در این روش، می‌توان بیش از یک پارامتر پاسخ را توسط عملکردهای ترکیبی پاسخ بهینه نمود [۵۰]. این روش همچنین در مواردی که محدوده پاسخ بهینه تقریباً مشخص باشد نتایج بسیار خوبی در بر خواهد داشت [۵۱].

در این تحقیق، مدل مربعی^۳ سطح پاسخ بهینه (D-optimal) برای افزایش نرخ جداسازی گاز کربن دی اکسید (R1) و کاهش کار مصرفی کمپرسورها (R2) در فرآیند CO₂CPU مورد استفاده قرار گرفت. به این منظور ۳ پارامتر و هر یک از پارامترها در ۳ سطح در نقاط گوناگون فرآیند مورد بررسی واقع شد. پارامترهای مورد بررسی عبارت است از: فشار ورودی به مبدل چند جریان‌ی (A)، دمای جدا کننده‌های فازی اول (B) و دوم (C).

این پارامترها همراه با محدوده مورد بررسی در جدول ۴ نشان داده شده‌اند. محدوده مورد بررسی این پارامترها با توجه به تحلیل‌های فرآیندی و مطالعات پیشین انتخاب شد. با توجه به اینکه در دماهای کمتر از ۵۶/۶°C- کربن دی اکسید منجمد شده که سبب انسداد و فرسایش لوله‌ها خواهد شد، از این رو لازم است از رسیدن به این دما و دماهای پایین‌تر از آن اجتناب شود. همچنین در فشارهای کمتر از ۲۰ bar میعان‌سازی چشمگیری اتفاق نیافتاده و از این رو فشارهای کمتر از این مقدار مورد بررسی قرار نگرفت. بر مبنای فاکتورهای انتخاب شده و سطوح آن‌ها، شبیه‌سازی‌های پیشنهادی توسط روش RSM در جدول ۵ خلاصه شده است.

پس از انجام شبیه‌سازی‌های جدول ۵، هر یک از سطوح پاسخ (R) به کمک مدل ریاضی زیر قابل دستیابی است [۲]:

$$R = \alpha_0 + \sum_{i=1}^6 \alpha_i X_i + \sum_{i=1}^6 \alpha_{ii} X_i^2 + \sum_i \sum_j \alpha_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

تاثیرگذار بر فرآیند، بهینه‌سازی شرایط عملیاتی برای کاهش کار کمپرسورها و افزایش خلوص و بازیافت CO₂ تولیدی انجام گرفت. نظر به دمای بالای گازهای احتراق خروجی که لازم است به منظور کار مصرفی در کمپرسور و همچنین میعان در جدا کننده‌های فازی، دمای خوراک گازی تا حد ممکن کاهش یابد، بهینه‌سازی فرآیند به عملی و اقتصادی شدن آن کمک خواهد کرد.

از این رو به طور خلاصه مراحل و نرم افزارهای مورد استفاده به شرح زیر است:

- شبیه‌سازی نرم افزاری، مقایسه و اعتبارسنجی با داده‌های مقالات
- شبیه‌سازی و مدل‌سازی پایای فرآیند به کمک نرم افزار اسپن پلاس
- انجام آنالیز آماری جهت آنالیز حساسیت و بهینه‌سازی به کمک نرم افزار Design Expert

بهینه‌سازی و آنالیز حساسیت شرایط عملیاتی فرآیند به کمک روش سطح پاسخ

امروزه استفاده از فنون گوناگون برای شناسایی و آنالیز پارامترهای موثر بر سیستم به منظور بهینه نمودن فرآیند، استفاده‌ی کارآمدتر از منابع انرژی، افزایش راندمان سیستم و سرانجام کاهش هزینه‌های کل، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است [۴۳]. بدین منظور، طراحی و آنالیز آماری آزمایش‌ها^۱ یک روش قدرتمند به منظور مطالعه اثر هم‌زمان چندین فاکتور بر روی یک پاسخ معین می‌باشد که کاربرد وسیعی در علوم گوناگون پیدا کرده است [۴۴]. در این روش با ایجاد تغییرات هدفمند و سیستماتیک در فاکتورهای موثر در یک فرآیند یا محصول و سپس بررسی تغییرات بدست آمده در خروجی، اطلاعات و درک وسیعی از فرآیند و محصول بدست می‌آید. استفاده از این روش می‌تواند اهداف گوناگونی از جمله موارد زیر را برآورده سازد [۲]:

- ✓ کاهش زمان و هزینه انجام آنالیزها همراه با افزایش دقت
 - ✓ فهم چگونگی ارتباط بین متغیرها و پاسخ‌ها
 - ✓ تشخیص اینکه کدامیک از متغیرها، تأثیر معنادار از لحاظ آماری بر روی پاسخ فرآیند داشته و کدامیک بی‌تأثیرند.
 - ✓ بررسی و تعیین اثرات متقابل بین متغیرها، نسبت به پاسخ فرآیند
 - ✓ انجام مطالعات بهینه‌سازی و آنالیز حساسیت
 - ✓ بدست آوردن مدل ریاضی بین متغیرهای مورد بررسی و پاسخ
- در این تحقیق از روش‌های طراحی آزمایش به منظور مطالعات آنالیز حساسیت و بهینه‌سازی فرآیند استفاده شد. یکی از این روش‌ها، روش پاسخ سطح^۲ (RSM) می‌باشد که در سال‌های اخیر به منظور

(۱) Design of experiment

(۳) quadratic

(۲) Response surface methodology (RSM)

جدول ۵- طراحی آزمایش انجام یافته توسط روش RSM.

اجرا	A	B	C	R1	R2
۱	۳۰	-۴۰	-۴۸	۹۱/۹۰۶	۱۰۱/۳۲۹
۲	۳۰	-۴۰	-۴۸	۹۱/۹۰۶	۱۰۱/۳۲۹
۳	۲۵	-۴۰	-۵۵	۹۲/۸۷۳	۹۷/۵۲۱
۴	۲۵	-۳۰	-۴۸	۸۹/۲۶۱	۹۴/۶۰۳
۵	۳۵	-۳۵	-۴۸	۹۳/۳۳۲	۱۰۵/۹۳۱
۶	۲۷/۵	-۳۵	-۵۱/۵	۹۲/۳۱۵	۹۹/۱۵
۷	۲۵	-۴۰	-۴۱	۸۴/۱۱۲	۹۲/۱۷۹
۸	۳۵	-۴۰	-۴۱	۹۰/۶۷۷	۱۰۴/۴۹۵
۹	۳۵	-۳۰	-۴۱	۹۰/۳۲۷	۱۰۳/۶۵۲
۱۰	۳۰	-۳۵	-۴۱	۸۸/۰۰۵	۹۸/۵۷۴
۱۱	۳۵	-۴۰	-۵۵	۹۵/۳۵۲	۱۰۷/۵۲۸
۱۲	۳۰	-۳۰	-۵۵	۹۴/۱۹۹	۱۰۲/۱۸۳

جدول ۶- آنالیز ANOVA برای انتخاب مدل مناسب برای R1

	مجموع مربعات	df	F-Value	P-Value
مدل	۱۰۱/۰۵۷۱	۹	۱۰۹۶۵/۰۷	<۰/۰۰۰۱
A	۲۱/۹۱۳۱۹	۱	۲۱۳۹۸/۹۴	<۰/۰۰۰۱
B	۰/۰۸۷۱۶۵	۱	۸۵/۱۱۹۵۸	۰/۰۱۱۵
C	۵۳/۱۵۵۶۴	۱	۵۱۹۰۸/۲۱	<۰/۰۰۰۱
AB	۰/۱۵۱۱۳۳	۱	۱۴۷/۵۸۶۳	۰/۰۰۶۷
AC	۴/۳۳۰۳۷۳	۱	۲۸/۷۵۴۲	۰/۰۰۰۲
BC	۰/۰۶۷۶۴۶	۱	۶۶/۰۵۸۹۲	۰/۰۱۴۸
A ²	۰/۶۵۳۳۵۳	۱	۶۳۸/۰۲۰۶	۰/۰۰۱۶
C ²	۰/۷۳۰۲۶۶	۱	۷۱۳/۱۲۸۲	۰/۰۰۱۴

به منظور بررسی بیشتر این برهم کنش‌ها نمودارهای سه بعدی در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق نمودارهای ارائه شده، پارامترهای A و C بیشترین اثر را بر روی پاسخ R1 دارد. همانطور که در شکل ۴a مشاهده می‌شود، با کاهش دمای جدا کننده فازی دوم از ۴۱-°C به ۵۵-°C مقدار R1 به دلیل افزایش نرخ میعان افزایش می‌یابد. با اینحال دمای ورودی به کمپرسور تأثیری در میزان باز یافت CO₂ باز یافت شده ندارد. مطابق شکل ۱b، با افزایش فشار تا حدود ۳۵bar نرخ تولید CO₂ با شیب به نسبت تندی افزایش یافته که سرانجام به دلیل کاهش محتوی CO₂ موجود در فرآیند این شیب در بخش‌های انتهایی نمودار کاهش می‌یابد. بر اساس این شکل محدوده موثر تغییر فشار می‌تواند به بازه ۲۰-۳۵bar محدود شود. در حالیکه پارامتر B تأثیر چشمگیری بر روی نرخ تولید CO₂ ندارد.

که در رابطه بالا R پاسخ پیش‌بینی شده همراه با در نظر گرفتن برهمکنش پارامترها، X_i سطوح متغیرهای مستقل، و α ضریب رگرسیون گیری متغیرهای مستقل می‌باشد که i معرف اثرات خطی و j معرف اثرات متقابل است.

نتایج و بحث

نتایج بهینه‌سازی و آنالیز حساسیت

نتایج شرایط فرآیندی پیشنهادی توسط روش RSM در جدول ۵ خلاصه شده است. داده‌های حاصل از شبیه‌سازی برای هر یک از پاسخ‌های R1 و R2 با استفاده از مدل‌های خطی، مربعی، مکعبی و 2FI مورد بررسی قرار گرفت. معیار $P_{value} < 0.05$ در انتخاب مدل مناسب مورد استفاده قرار گرفت. این به آن معنا است که احتمال اینکه مدل ناسازگار باشد کمتر از ۵٪ است. در بخش بعدی مدل پیش‌بینی شده توسط روش RSM برای هر یک از پاسخ‌های R1 و R2 ارائه شده است. با توجه به اینکه بر اساس نتایج تحقیق قبلی [۲۷] فشار عملیاتی ۲۵/۴۴ bar انتخاب شد که این فشار نسبت به سایر تحقیقات انجام شده پایین‌تر است که در این دما و فشار CO₂ به صورت فاز مایع بوده و لذا نگرانی در خصوص خلوص محصول CO₂ خروجی وجود ندارد. نتایج خلوص CO₂ در محصول خروجی نیز موید این مطلب است (۹۷/۳۶٪). جریان محصول خروجی دارای خلوص بیش از ۹۷٪ بوده (۹۷/۳۶٪) و در حدود ۹۳ درصد از CO₂ طی این فرآیند بازیابی می‌شود که در حد مطلوب است.

میزان باز یافت CO₂ تولید شده تحت تأثیر متغیرها

نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) برای انتخاب مدل مناسب برای R1 در جدول ۶ گزارش شده است. در صورتی که مقدار $P_{value} < 0.05$ متغیرهای مستقل و برهمکنش آنها حائز اهمیت بوده و در مدل در نظر گرفته می‌شود. با توجه به جدول ۶ نتایج آنالیز آماری نشان می‌دهد که پارامترهای A، B و C مستقلاً اثر چشمگیری بر روی پاسخ R1 دارند. همچنین برهمکنش آنها همچون AB، AC و BC با توجه به مقادیر P_{value} آنها همان‌طور که در معادله ۲ مشاهده می‌شود، در پاسخ سیستم حائز اهمیت است.

معادله نهایی برای میزان باز یافت CO₂ خروجی از واحد CPU CO₂ بر حسب فاکتورهای واقعی از معادله ۲ بدست می‌آید:

$$\text{Recovery} = -19.14244 + 2.87791 \times \text{Pressure} + 0.37183 \times \text{TF1} - 2.36014 \times \text{TF2} - 7.78898 \times 10^{-3} \times \text{Pressure} \times \text{TF1} + 0.029048 \times \text{Pressure} \times \text{TF2} + 3.72216 \times 10^{-3} \times \text{TF1} \times \text{TF2} - 0.022369 \times \text{Pressure}^2 - 2.72592 \times 10^{-4} \times \text{TF1}^2 - 0.012066 \times \text{TF2}^2 \quad (2)$$

(۱) two-factor interaction

جدول ۷- آنالیز ANOVA برای انتخاب مدل مناسب برای R2

مدل	مجموع مربعات	df	F-Value	P-Value
مدل	۲۲۶/۹۰۰۵	۹	۳۰۶۹۲/۵	<۰/۰۰۰۱
A	۱۵۴/۴۷۲۸	۱	۱۸۸۰۵۷۷	<۰/۰۰۰۱
B	۱/۱۴۴۰۶۷	۱	۱۳۹۲۷/۹	<۰/۰۰۰۱
C	۲۱/۲۷۷۴۸	۱	۲۵۹۰۳۲/۶	<۰/۰۰۰۱
AB	۰/۰۲۸۷۲۸	۱	۳۴۹/۷۴۰۱	۰/۰۰۲۸
AC	۱/۳۸۹۳۹	۱	۱۶۹۱۴/۴۸	<۰/۰۰۰۱
BC	۰/۰۱۰۹۵۹	۱	۱۳۳/۴۱۵۱	۰/۰۰۷۴
A ²	۰/۶۰۶۷۷۴	۱	۷۳۸۶/۸۸۱	۰/۰۰۰۱
B ²	۰/۰۰۱۴۵۲	۱	۱۷/۶۷۳۲۹	۰/۰۰۵۲۲
C ²	۰/۲۶۸۸۸۵	۱	۳۲۷۳/۴۱۸	۰/۰۰۰۳

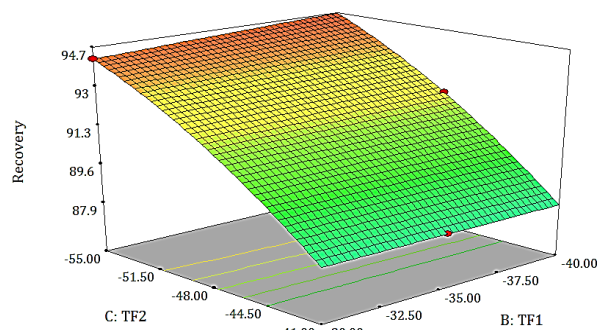
بررسی کار مورد نیاز فرآیند (R2) تحت تغییر متغیرها

نتایج آنالیز واریانس برای R2 در جدول ۷ نشان داده شده است که با توجه به نتایج ارائه شده، کلیه پارامترها تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی R2 دارد. بر این اساس باید در مدل ریاضی لحاظ شود که مدل پیشنهادی در معادله ۳ نشان داده شده است. معادله نهایی برای کار مصرفی توسط کمپرسورها بر حسب فاکتورهای واقعی از معادله ۳ بدست می‌آید:

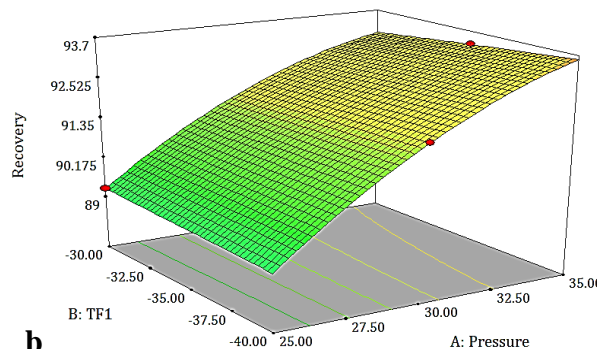
$$\text{Work} = -3.95676 + 3.06373 \times \text{Pressure} + 0.018676 \times \text{TF1} - 1.43549 \times \text{TF2} - 3.39591 \times 10^{-3} \times \text{Pressure} \times \text{TF1} + 0.016454 \times \text{Pressure} \times \text{TF2} + 1.49816 \times 10^{-3} \times \text{TF1} \times \text{TF2} - 0.021557 \times \text{Pressure}^2 - 1.10714 \times 10^{-3} \times \text{TF1}^2 - 7.32142 \times 10^{-3} \times \text{TF2}^2 \quad (3)$$

با توجه به شکل ۳ پاسخ R2 با افزایش فاکتور A یا کاهش C افزایش می‌یابد. مطابق شکل ۵b کاهش دمای جدا کننده‌ی فازی دوم سبب افزایش دبی CO₂ در خروجی جداکننده‌ی فازی دوم می‌شود. در نتیجه دبی گاز ورودی به کمپرسور دوم افزایش می‌یابد که سرانجام سبب افزایش R2 خواهد شد. شکل ۳c نیز موید این توضیح است. همچنین با افزایش دمای گاز ورودی (فاکتور A) حجم گاز ورودی به کمپرسور افزایش یافته و در نتیجه کار مورد نیاز برای انجام فرآیند تراکم و در نتیجه R2 افزایش می‌یابد این اثر در مورد گاز بین مراحل تراکم نیز صادق است. بنابراین دمای جدا کننده‌ی فازی دوم در کمترین مقدار ممکن تنظیم می‌شود.

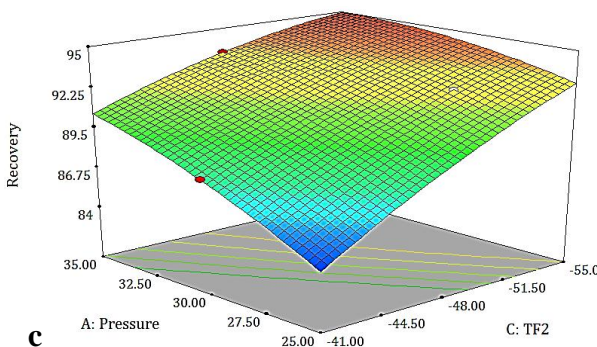
سرانجام شرایط بهینه برای افزایش بازبافت و خلوص محصول نهایی و کاهش کار کمپرسورها با استفاده از روش سطح پاسخ فشار ۲۵bar و دمای ۳۰°C- و ۵۵°C- به ترتیب برای جداکننده‌ی فازی اول و دوم



a



b



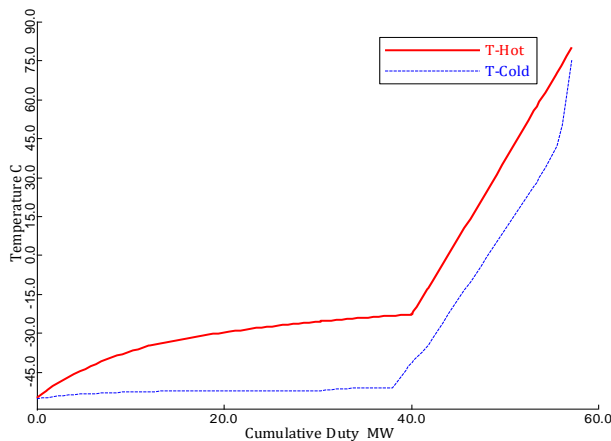
c

شکل ۲- عملکرد سیستم تحت تغییر پارامترهای گوناگون بر حسب میزان بازبافت CO₂.

در انتها همچنان که به وضوح در شکل ۳c نشان داده شده است، پارامترهای A و C بیشترین تاثیر را در روی پاسخ R1 دارند. مطابق این شکل افزایش فشار ورودی و کاهش دمای جدا کننده‌ی فازی دوم، منجر به افزایش قابل توجه R1 خواهد شد. اگرچه فشارهای بیش از ۳۵ bar سبب مایع شدن سایر اجزا نیز شده که از این رو عملاً جداسازی خاصی اتفاق نخواهد افتاد. همچنین چنانچه CO₂ خالص سازی شده، در فرآیندهای همچون ازدیاد برداشت از مخازن نفتی، تولید اوره یا تولید متانول استفاده شود، بدلیل برخی ملاحظات فنی، فرآیندی و اقتصادی همچون تغییر راندمان، موارد ایمنی، مسائل زیست محیطی و کاهش خوردگی لازم است حداقل خلوص CO₂ در محصول خروجی ۹۵% باشد [۵۲، ۵۳] که این مورد بعنوان یکی از قیود در تابع هدف اعمال گردید.

جدول ۸- مقایسه سه ساختار اخیر برای فرآیند CO₂CPU.

		ساختار لوئین [۳۰]	ساختار جین [۲۹]	ساختار پیشنهادی این تحقیق
Cold Box 1	بار حرارتی (MW)	۵/۱۰۸	۲۷/۵۲۵	۵۶/۸۵۸
	LMTD (K)	۱۱/۰۴	۴/۹۴	۱۷/۰۰
	A (m ²)	۲۷۲۱	۳۲۷۸۶	۱۹۶۷۴
Cold Box 2	بار حرارتی (MW)	۲۵/۹۱۰	۲۲/۰۰۷	-
	LMTD (K)	۴/۷۱	۴/۱	-
	A(m ²)	۳۳۳۲۰	۳۱۷۵۰	-
Cold Box 3	بار حرارتی (MW)	۲۱/۴۰۰	-	-
	LMTD (K)	۵/۷۱	-	-
	A(m ²)	۲۲۰۰۰	-	-
سطح کل (m ²)		۵۷۰۴۱	۶۴۵۳۶	۱۹۶۷۴
خلوص %		۹۵/۱۷	۹۶/۶۵	۹۶/۷۴
بازیافت %		۹۰/۲۹	۹۰/۸۲	۹۰/۰۸
بیشینه فشار عملیاتی (bar)		۳۰	۳۰	۲۹

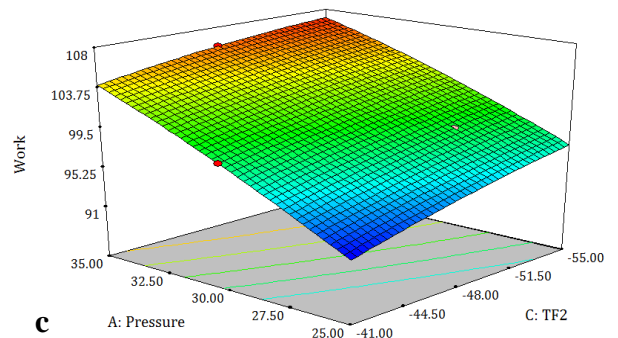
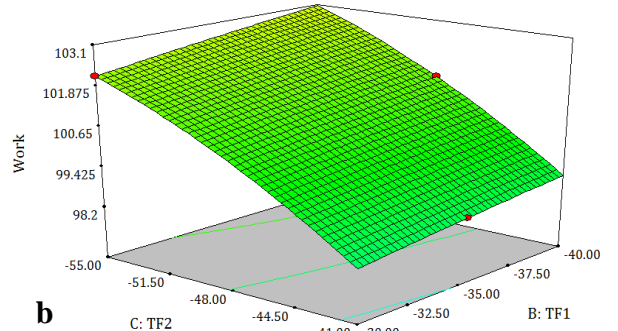
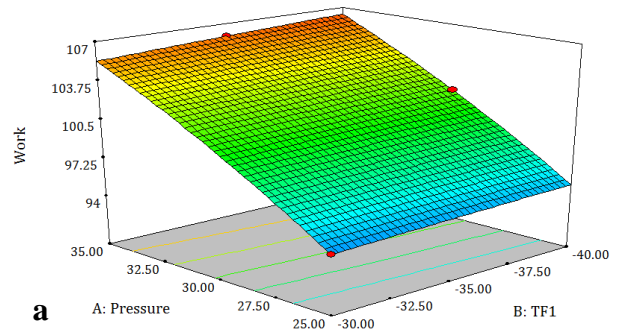


شکل ۴- دیاگرام ترکیبی جریان‌های داخل مبدل چند جریانی در ساختار جدید.

خواهد شد. میزان بازیافت در حد بسیار اندکی نسبت به دو ساختار دیگر کمتر می‌باشد که در مقایسه با سایر موارد ذکر شده از این موضوع می‌توان صرف نظر کرد.

نتیجه گیری

در این تحقیق به منظور شناسایی پارامترهای موثر و گلوگاه‌های فرآیندی آنالیز حساسیت فرآیند تراکم و تبرید CO₂ به کمک شبیه‌سازی رایانه‌ای در محیط نرم افزار اسپن پلاس انجام پذیرفت. در ادامه به منظور



شکل ۳- عملکرد سیستم تحت تغییر پارامترهای گوناگون بر حسب کار مصرفی کمپرسورها.

گزارش شد. نمودار ترکیبی دمایی^۱ جریان‌های داخل مبدل چند جریانی در شکل ۴ نشان داده شده است که موید عدم رخ دادن پدیده‌ی تقاطع دمایی می‌باشد. به جز بخش ابتدایی و انتهایی نمودار که فاصله نمودارها به ترتیب ۵ و ۱°C است، نمودارها فاصله کافی از یکدیگر داشته که از این رو تقاطع دمایی رخ نخواهد داد. بنابراین در صورت کنترل مناسب بخش‌های ابتدا و انتهای، ساختار پیشنهادی در صورت بروز اغتشاش^۲ می‌تواند در وضعیت پایداری باقی بماند. نتایج نشان می‌دهد ساختار ارائه شده در این تحقیق ضمن داشتن MOP و سطح تبادل گرمایی (A) کمتر، خلوص بیشتری دارد. واضح است که کاهش MOP و A سبب کاهش هزینه‌ی عملیاتی و سرمایه‌گذاری

(۱) Composite curve

(۲) Disturbance

- ✓ مطالعه‌ی آماری و انجام آنالیز حساسیت فرآیند CO₂CPU
- ✓ بررسی برهمکنش پارامترهای عملیاتی بر روی پاسخ سیستم
- ✓ بهینه‌سازی چند هدفه‌ی فرآیند CO₂CPU به منظور کاهش انرژی مصرفی، افزایش خلوص و افزایش بازیافت CO₂

پیشنهادات

- بهینه‌سازی ساختار جدید ارائه شده در حالیکه سطح مبدل نیز به‌عنوان یک هدف علاوه بر اهداف پیشین در نظر گرفته شود.
- بررسی رفتار دینامیک و کنترل یکپارچه واحد.
- بررسی قابلیت اطمینان فرآیند.
- انجام فرآیند در مقیاس آزمایشگاهی، شناسایی و رفع گلوگاه‌های فرآیندی در حالت عملیاتی و سرانجام افزایش مقیاس به ابعاد صنعتی.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از آقای دکتر آرمان کوهستانیان به جهت ویرایش ادبی این مقاله تشکر و قدردانی نمایند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۴ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۸

یافتن شرایط بهینه عملیاتی فرآیند CO₂CPU، بهینه‌سازی همزمان چندهدفه به منظور کاهش کار و افزایش نرخ جداسازی به کمک روش RSM انجام گرفت. در شرایط عملیاتی جدید فشار بهینه ۲۵ bar بدست آمد در حالیکه فشار عملیاتی فرآیند پیشتر ۳۰ bar طراحی شده بود. در شرایط بهینه جدید به دلیل کاهش فشار عملیاتی فرآیند هزینه‌های تجهیزات و عملیاتی کاهش می‌یابد. با توجه به آنالیزهای آماری صورت گرفته مشاهده می‌شود که برای کاهش کار و بار حرارتی، دمای جدا کننده‌ی فازی اول باید تا حد امکان کاهش یابد. در ادامه به بررسی تغییر و بهبود ساختار فرآیند پرداخته شد. نتایج تحقیق انجام یافته در این بخش نشان می‌دهد که ساختار جدید ارائه شده ضمن کاهش تجهیزات که سبب کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری در مقایسه با کلیه تحقیقات پیشین خواهد شد، به سادگی قابل کنترل بوده و از نظر عملیاتی قابل اجرا است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که دلیل انتخاب بهینه پارامترهای عملیاتی LMTD افزایش یافته و از این رو سطح مورد نیاز در مقایسه با ساختارهای قبلی به مقدار چشمگیری کاهش می‌یابد. به دلیل کاهش مبدل‌های چند جریانی و بهبود سطح انتگراسیون حرارتی ساختار پیشنهادی هزینه کمتری دارد. جریان محصول خروجی دارای خلوص ۹۶/۷۴٪ بوده و در حدود ۹۰ درصد از CO₂ طی این فرآیند بازیابی می‌شود که در حد مطلوب است.

نوآوری

- ✓ تغییر و بهبود ساختار فرآیند CO₂CPU
- ✓ ارائه فرآیند و راهکار مناسب به منظور استفاده از CO₂ جداسازی شده

منابع:

- [1] Li L., Zhao N., Wei, W., Sun Y., **A Review of Research Progress on CO₂ Capture, Storage, and Utilization in Chinese Academy of Sciences**. *Fuel*, **108**: 112-130 (2013).
- [2] Stewart C., Hessami M., **A Study of Methods of Carbon Dioxide Capture and Sequestration-the Sustainability of a Photosynthetic Bioreactor Approach**. *Energy Conversion and management*, **46(3)**: 403-420 (2005).
- [3] Raftery A.E., Zimmer A., Frierson D.M.W., Startz R., Liu P., **Less Than 2 °C Warming by 2100 Unlikely**. *Nature climate change*, **7(9)**: 637-641 (2017).
- [4] Shavaliyeva G., Kazepidis P., Papadopoulos A.I., Seferlis P., Papadokonstantakis S., **Environmental, Health and Safety Assessment of Post-Combustion CO₂ Capture Processes with Phase-Change Solvents**. *Sustainable Production and Consumption*, **25**: 60-76 (2021).

- [5] Al-Ghussain L., *Global Warming: Review on Driving Forces and Mitigation. Environmental Progress & Sustainable Energy*, **38(1)**: 13-21 (2019).
- [6] O’Ryan R., Nasirov S., Álvarez-Espinosa A., *Renewable Energy Expansion in the Chilean Power Market: A Dynamic General Equilibrium Modeling Approach to Determine CO₂ Emission Baselines. Journal of Cleaner Production*, **247**: 119645 (2020).
- [7] Wilson I.G., Staffell I., *Rapid Fuel Switching from Coal to Natural Gas Through Effective Carbon Pricing. Nature Energy*, **3(5)**: 365-372 (2018).
- [8] Hashmi R., Alam, K., *Dynamic Relationship Among Environmental Regulation, Innovation, CO₂ Emissions, Population, and Economic Growth in OECD Countries: A Panel Investigation. Journal of cleaner production*, **231**: 1100-1109 (2019).
- [9] Baena-Moreno F.M., Rodríguez-Galán M., Vega F., Alonso-Fariñas B., Luis F., Arenas V., Navarrete B., *Carbon Capture and Utilization Technologies: A Literature Review and Recent Advances. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, **41(12)**: 1403-1433 (2019).
- [10] Gopan A., Kumfer B. M., Phillips J., Thimsen D., Smith R., Axelbaum R.L., *Process Design and Performance Analysis of a Staged, Pressurized Oxy-Combustion (SPOC) Power Plant for Carbon Capture. Applied energy*, **125**: 179-188 (2014).
- [11] Guan G., *Clean Coal Technologies in Japan: A Review. Chinese journal of chemical engineering*, **25(6)**: 689-697 (2017).
- [12] Alkadhém A.M., Elgzoly M.A., Onaizi S.A., *Novel Amine-Functionalized Magnesium Oxide Adsorbents for CO₂ Capture at Ambient Conditions. Journal of Environmental Chemical Engineering*, **8(4)**: 103968 (2020).
- [13] Metz B., Davidson O., Coninck H., Loos M., Meyer L., *Carbon Dioxide Capture and Storage. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*, (2005).
- [14] Rolfe A., Huang Y., Haaf M., Pita A., Rezvani S., Dave A., Hewitt N.J., *Technical and Environmental Study of Calcium Carbonate Looping Versus Oxy-Fuel Options For Low CO₂ Emission Cement Plants. International Journal of Greenhouse Gas Control*, **75**: 85-97 (2018).
- [15] Middleton R.S., Yaw S.P., Hoover B.A., Ellett K.M., *SimCCS: An Open-Source Tool for Optimizing CO₂ Capture, Transport, and Storage Infrastructure. Environmental Modelling & Software*, **124**: 104560 (2020).

[۱۶] اسماعیل کوهستانیان، جعفر صادقی، داود محبی کلهری، عبدالرضا صمیمی و فرهاد شهرکی، بهینه سازی و کنترل فرآیند CO₂CPU، پروژه دکتری، گروه مهندسی شیمی دانشگاه سیستان و بلوچستان، تابستان (۱۳۹۷).

[۱۷] اسماعیل کوهستانیان، جعفر صادقی و داود محبی کلهری، شبیه‌سازی و طراحی فرآیندهای نفت، گاز و شیمیایی با Aspen Plus، انتشارات جهاد دانشگاهی، چاپ اول، (۱۳۹۶).

- [18] Song C., Liu Q., Deng S., Li H., Kitamura Y., [Cryogenic-Based CO₂ Capture Technologies: State-of-the-Art Developments and Current Challenges](#). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **101**: 265-278 (2019).
- [19] Posch S., Haider M., [Optimization of CO₂ Compression and Purification Units \(CO₂CPU\) for CCS Power Plants](#). *Fuel*, **101**: 254-263 (2012).
- [20] Mofarahi M., Khojasteh Y., Khaledi H., Farahnak A., [Design of CO₂ Absorption Plant for Recovery of CO₂ from Flue Gases of Gas Turbine](#). *Energy*, **33(8)**: 1311-1319 (2008).
- [21] Koohestanian E., Sadeghi, J., Mohebbi-Kalhari D., Shahraki F., Samimi A., [A Novel Process for CO₂ Capture from the Flue Gases to Produce Urea and Ammonia](#). *Energy*, **144**: 279-285 (2018).
- [22] Wall T., Stanger R., Liu Y., [Gas Cleaning Challenges for Coal-Fired Oxy-Fuel Technology with Carbon Capture and Storage](#). *Fuel*, **108**: 85-90 (2013).
- [23] Osman M., Khan M.N., Zaabout A., Cloete S., Amini S., [Review of Pressurized Chemical Looping Processes for Power Generation and Chemical Production with Integrated CO₂ Capture](#). *Fuel Processing Technology*, **214**: 106684 (2021).
- [24] Koohestanian E., Shahraki F., [Review on Principles, Recent Progress, and Future Challenges for Oxy-Fuel Combustion CO₂ Capture Using Compression and Purification Unit](#). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **9(4)**: 105777 (2021).
- [25] Wang, M., Lawal A., Stephenson P., Sidders J., Ramshaw C., [Post-Combustion CO₂ Capture with Chemical Absorption: A State-of-the-Art Review](#). *Chemical Engineering Research and Design*, **89(9)**: 1609-1624 (2011).
- [26] Fu C., Gundersen T., [Techno-Economic Analysis of CO₂ Conditioning Processes in a Coal Based Oxy-Combustion Power Plant](#). *International journal of greenhouse gas control*, **9**: 419-427 (2012).
- [27] Koohestanian E., Samimi A., Mohebbi-Kalhari D., Sadeghi J., [Sensitivity Analysis and Multi-Objective Optimization of CO₂CPU Process Using Response Surface Methodology](#). *Energy*, **122**: 570-578 (2017).
- [28] Chansomwong A., Zanganeh K.E., Shafeen A., Douglas P.L., Croiset E., Ricardez-Sandoval L.A., [Dynamic Modelling of a CO₂ Capture and Purification Unit for an Oxy-Coal-Fired Power Plant](#). *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **22**: 111-122 (2014).
- [29] Jin, B., Zhao H., Zheng C., [Optimization and Control for CO₂ Compression and Purification Unit in Oxy-Combustion Power Plants](#). *Energy*, **83**: 416-430 (2015).
- [30] Luyben W.L., [Simple Control Structure for a Compression Purification Process in an Oxy-Combustion Power Plant](#). *AIChE Journal*, **61(5)**: 1581-1588 (2015).
- [31] API, R., [521. Recommended Practice](#), **521** (1997).
- [32] Xu M.-X., Wu H.B., Wu Y.C., Wang H.X., Ouyang H.D., Lu Q., [Design and Evaluation of a Novel System for the Flue Gas Compression and Purification from the Oxy-Fuel Combustion Process](#). *Applied energy*, **285**: 116388 (2021).

- [33] Tumsa T.Z., Lee S.H., Normann F., Andersson K., Ajdari S., Yang W., [Concomitant Removal of NO_x and SO_x from a Pressurized Oxy-Fuel Combustion Process Using a Direct Contact Column](#). *Chemical Engineering Research and Design*, **131**: 626-634 (2018).
- [34] Kolster C., Mechleri E., Krevor S., Dowell N.M., [The Role of CO₂ Purification and Transport Networks in Carbon Capture and Storage Cost Reduction](#). *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **58**: 127-141 (2017).
- [35] Rochelle, G.T., [Amine Scrubbing for CO₂ Capture](#). *Science*, **325(5948)**: 1652-1654 (2009).
- [36] Jung J., Jeong Y.S., Lee U., Lim Y., Han C., [New Configuration of the CO₂ Capture Process Using Aqueous Monoethanolamine for Coal-Fired Power Plants](#). *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **54(15)**: 3865-3878 (2015).
- [37] Veawab A., Tontiwachwuthikul P., Chakma A., [Corrosion Behavior of Carbon Steel in the CO₂ Absorption Process Using Aqueous Amine Solutions](#). *Industrial & engineering chemistry research*, **38(10)**: 3917-3924 (1999).
- [38] Gomes J., Santos S., Bordado J., [Choosing Amine-Based Absorbents for CO₂ Capture](#). *Environmental technology*, **36**: 19-25 (2015).
- [39] Aspen Plus, [Aspen Plus Documentation Version V7. 3](#). *Aspen Tech, Cambridge, MA, USA*, (2011).
- [40] Koohestanian E., Sadeghi J., Mohebbi Kalhori D., Shahraki F., Samimi A., [New Process Flowsheet for CO₂ Compression and Purification Unit; Dynamic Investigation and Control](#). *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, **40(2)**: 593-604 (2021).
- [41] ASME Code, [ASME Section VIII, Division 1. Rules for Construction of Pressure Vessels](#), *The American Society of Mechanical Engineers*, (2013).
- [42] Aresta M., Dibenedetto A., Angelini A., [The Changing Paradigm in CO₂ Utilization](#). *Journal of CO₂ Utilization*, **3**: 65-73 (2013).
- [43] Zare V., Mahmoudi S.M.S., Yari M., Amidpour M., [Thermoeconomic Analysis and Optimization of an Ammonia-Water Power/Cooling Cogeneration Cycle](#). *Energy*, **47(1)**: 271-283 (2012).
- [44] Omidvar M., Koohestanian E., Ramezani Azghandi O., [Synthesis and Statistical Analysis of Changing Size of Nano-structured PbO₂ during Mechanical Milling Using Taguchi Methodology](#). *Journal of Particle Science & Technology*, **2(1)**: 49-54 (2016).
- [45] Azad F.N., Ghaedi M., Asfaram A., Jamshidi A., Hassanid G., Goudarzie A., Azqhandif M.H.A., Ghaedig A., [Optimization of the Process Parameters for the Adsorption of Ternary Dyes by Ni Doped FeO \(OH\)-NWs-AC Using Response Surface Methodology and an Artificial Neural Network](#). *RSC Advances*, **6(24)**: 19768-19779 (2016).
- [46] Mamourian M., Shirvan K.M., Mirzakhani S., Rahimi A.B., [Vortex Generators Position Effect on Heat Transfer and Nanofluid Homogeneity: A Numerical Investigation and Sensitivity Analysis](#). *Applied Thermal Engineering*, **107**: 1233-1247 (2016).

- [47] Shirvan K.M., Mirzakhani S., Chamkha A.J., Mamourian M., [Numerical Simulation and Sensitivity Analysis of Effective Parameters on Natural Convection and Entropy Generation in a Wavy Surface Cavity Filled with a Nanofluid Using RSM](#). *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 1-21 (2016).
- [48] Sun Y., Wei J., Zhang J.P., Yang G., [Optimization Using Response Surface Methodology and Kinetic Study of Fischer-Tropsch Synthesis Using SiO₂ Supported Bimetallic Co-Ni Catalyst](#). *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **28**: 173-183 (2016).
- [49] Myers R.H., Montgomery D.C., Anderson-Cook C.M., [Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments](#), *John Wiley & Sons* (2016)
- [50] Morgan E., [Chemometrics: Experimental Design](#). **41**: *John Wiley & Son Ltd* (1995).
- [51] Montgomery D.C., [Design and Analysis of Experiments](#), *John Wiley & Sons* (2008).
- [52] De Visser E., Hendriks C., Barrio M., Mølnevik M.J., Koeijer G., Liljemark S., Gallo Y.L., [Dynamis CO₂ Quality Recommendations](#). *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **2(4)**: 478-484 (2008).
- [53] Pipitone G., Bolland O., [Power Generation with CO₂ Capture: Technology for CO₂ Purification](#). *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **3(5)**: 528-534 (2009).