

## کاهش گازهای گلخانه‌ای و تولید آب شیرین و نمک‌های مفید از دودکش نیروگاه‌ها

فریده عتابی\*<sup>۱</sup>، آبتین عطایی<sup>۲</sup>، محمدحسن پنجه‌شاهی<sup>۳</sup>، هدی قاسمی<sup>۴</sup>

۱. استادیار دانشکده محیط‌زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده محیط‌زیست و انرژی
۲. استادیار دانشکده محیط‌زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده محیط‌زیست و انرژی  
abtinataei@gmail.com
۳. استاد دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تهران، دپارتمان مهندسی شیمی،  
mhpanj@ut.ac.ir
۴. کارشناس ارشد مهندسی محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده محیط‌زیست و انرژی  
hoda\_ghasemi73@yahoo.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۱۲/۱۴

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۰/۵/۲۵

### چکیده

نیروگاه‌های تولید برق با انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده که در ترکیب با آب در گاز داغ به صورت انیدرید از دودکش خارج می‌شوند، این آلاینده‌ها را در اتمسفر افزایش می‌دهند. هدف از انجام این مطالعه، شبیه‌سازی راکتوری بهینه به منظور حذف گازهای گلخانه‌ای و عمدتاً CO<sub>2</sub> از دودکش نیروگاه‌ها با استفاده از باز قوی رقیق شده در آب (مانند NaOH) است که در نتیجه آن، گاز تمیز برای رهاسازی به اتمسفر و مخلوطی از نمک‌ها همراه آب، تولید و در نهایت، آب نمک حاصل، شیرین‌سازی و نمک‌های مفید آن نیز استخراج می‌شوند. تحقیق حاضر در قالب چهار سناریو A, B, C و D با استفاده از نرم‌افزارهای ASPEN PLUS و HYSYS برای شبیه‌سازی راکتوری به منظور کاهش و حذف این آلاینده‌ها در خروجی دودکش نیروگاه رودشور شکل گرفته است. بر اساس نتایج حاصله، در صورت بهره‌گیری از سناریوی A که مدل بهینه شبیه‌سازی شده از راکتور با بازیافت آب از جریان گاز خروجی از دودکش نیروگاه رودشور است، میزان بخار آب در گاز خروجی از دودکش نیروگاه رودشور ۱۰۲/۷۸۰ tons/hr برآورد شده که در خروجی راکتور شبیه‌سازی شده برای رهاسازی به اتمسفر، این مقدار به ۳۶/۶۴۲ tons/hr خواهد رسید. میزان آب در جریان آب نمک خروجی از راکتور ۱۱۱۵/۲۸۰ tons/hr خواهد بود. همچنین، میزان CO<sub>2</sub> در گاز خروجی از دودکش نیروگاه رودشور، از ۱۱۶/۴۳۰ tons/hr به ۵/۲۹۵ × ۱۰<sup>-۱۰</sup> tons/hr در خروجی راکتور شبیه‌سازی شده خواهد رسید و میزان نمک حاصل نیز معادل ۴۰۶/۳۶۵ خواهد بود.

### کلیدواژه

حذف گازهای گلخانه‌ای، راکتور، نیروگاه‌های حرارتی، CO<sub>2</sub>.

### ۱. سرآغاز

(۲۰۰۷ در اثر استفاده از سوخت‌های فسیلی به منظور تأمین برق، مقادیر زیادی از آلاینده‌ها وارد هوا می‌شوند که پس از رسوب‌شدن، آب‌های سطحی، زیرزمینی و خاک را آلوده می‌کند. آثار این گازها عبارتند از پدیده گلخانه‌ای، گرمایش جهانی، باران‌های اسیدی، بیماری‌های تنفسی و از

نیروگاه‌های تولید انرژی یکی از منابع آلوده نامطلوب زیست‌محیطی به شمار می‌روند. تولید برق از سوخت‌های فسیلی موجب افزایش دی‌اکسید کربن به میزان بیش از یک سوم میزان کنونی آن می‌شود (Quadrelli; Peterson,

محلول، رسوب داده شدند (Skelley, et al., 1993). در مطالعه دیگری که ماسومی فوجی و همکاران در سال ۲۰۰۱ میلادی در ژاپن در راستای بازیافت گاز خروجی حاصل از احتراق، انجام دادند، ژنراتوری به وسیله توربین راه‌اندازی شد که در آن، بخار تولیدی از طریق بویلر به کندانسور هدایت و پس از تماس با محلول جاذب مونواتانول آمین،  $CO_2$  از گاز خروجی جدا و به صورت محلول آبی حاوی  $CO_2$  از انتهای ستون جاذب خارج شد (Fujii, et al., 2001). همچنین، در مطالعه دیگری که محمد ار. ام. ابو زهرا و همکاران در سال ۲۰۰۷ در هلند در همین زمینه انجام دادند،  $CO_2$  در جریان گاز داغ خروجی از دودکش نیروگاه از طریق محلول جاذب آبی مونواتانول آمین جذب و در محیط مجازی نرم‌افزار ASPEN PLUS شبیه‌سازی و بهینه‌سازی شد (Abu-zahra, 2007.)

فرایندهای شبیه‌سازی و ارزیابی، گزینه‌های ضروری برای به حداکثر رساندن فرایند جذب‌اند. محققان بسیاری فرایند جذب محلول آبی مونواتانول آمین را مطالعه و مدل‌سازی کرده‌اند (Rao, Rubin, E.S., 2002; Mariz, 1998; Chapel, et al., 1999; Barchas, 1992; Alie, et al., 2005; Singh, et al., 2003; Sander, Mariz, 1992; Suda, Fujii, et al., 1992; Chang, Shih, 2005.) در مطالعه دیگری که در ایتالیا از سوی ا. کورادو و همکاران در سال ۲۰۰۶ میلادی صورت گرفت، واحد آنالیز نیروگاه تغذیه هیدروژنی مدنظر بود که در فرایند تبدیل زغال سنگ به گاز تولید  $H_2$  می‌شد. همچنین، سیستم به دام‌اندازی  $CO_2$  استفاده از فرایند جذب مرطوب استاندارد بود و کربنات کلسیم به‌منزله محصول جانبی تولید شد. فناوری تبدیل زغال سنگ به گاز نمونه‌ای متداول است، در حالی که روش به دام‌اندازی  $CO_2$  و نوع ترکیب‌بندی نیروگاهی در این تحقیق، ابتکاری بودند (Corrado, et al., 2006). فناوری تولید هیدروژن با بازده بالا از جمله فناوری‌های ابتکاری است که به منظور بازیابی هیدروژن از سوخت‌های فسیلی و توسعه روش‌های جداسازی و ذخیره دی‌اکسید کربن هدف‌گذاری شده است (Bertucco, et al., 2003; Meyer, et al., 2003). در مطالعه دیگری که ان.

بین رفتن محصولات کشاورزی (واتقی؛ زیبایی، ۱۳۸۵). روش‌های متداول کاهش آلاینده‌های جوی شامل استفاده از جذب سطحی فیزیکی و شیمیایی برای حذف ترکیبات آلی فرار (VOCs)<sup>۱</sup>، شستشوی تر با استفاده از آهک برای جذب دی‌اکسید گوگرد، احیای کاتالیزوری و غیرکاتالیزوری برای حذف اکسیدهای نیتروژن (Smith, 2005) و جدا و ذخیره‌سازی گاز  $CO_2$  (CCS)<sup>۲</sup> در مخازن و سازنده‌های طبیعی (nioc website, 2009) و استفاده از نانولوله‌های کربنی سنتزی (nano website, 2009) است. فناوری‌های جداسازی  $CO_2$  در مجموع بر اساس جذب سطحی، جذب شیمیایی، غشایی و سایر روش‌های جداسازی زیستی و فیزیکی‌اند (Abu-zahra, 2007).

در این راستا مطالعاتی به منظور کاهش آلاینده‌های مضر در دودکش نیروگاه‌ها صورت گرفته است. در مطالعه جی.سی. بلوس و اف. ال. میتلند در سال ۲۰۰۹ میلادی در ایالات متحده آمریکا، برای بازیافت آب از جریان خروجی توربین احتراقی حاوی اسید سولفوریک از سیستم اصلاح‌شده استفاده شد که در آن، با رساندن دمای گاز داغ به زیر نقطه شبنم گوگرد و ته‌نشینی گوگرد در جریان آب، میزان گوگرد در گاز خروجی کاهش یافت (Bellows; Maitland, 2008). در مطالعه دیگری که ارلیک. کا. بورست در سال ۲۰۰۷ میلادی در ایالات متحده آمریکا انجام داد، فرایندی برای حذف  $CO_2$  از گازهای خروجی، طراحی شد که طی آن گازهای خروجی از دودکش صنایع به آب شیرین تبدیل می‌شدند. این عمل از طریق افزودن آمونیاک صورت گرفت که سبب جداسازی رسوب کربنات سدیم و آمونیوم کلراید شد (Børseth, Tāmāsen, 2007). در مطالعه دیگری که پی. اسکلی و همکاران در سال ۱۹۹۳ میلادی در ایالات متحده آمریکا انجام دادند، فرایندی برای حذف آلاینده‌ها از گاز خروجی فراهم شد که شامل مراحل هدایت گاز خروجی آلوده حاوی اکسیدهای نیتروژن و گوگرد از طریق یک سری مبدل‌های حرارتی در مجرای گاز خروجی برای کاهش و کنترل دما و تماس گاز خروجی با ترکیب اکسیدکننده مانند اوزون بود. آلاینده‌های خروجی در تماس با محلول معرف به صورت نمک در

در حال حاضر، سیستم‌های جداسازی و به دام‌اندازی انتشار  $CO_2$  هنگام خروج از دودکش نیروگاه‌ها در دنیا بسیار محدود است (Miller, Atten Chris, 2004). طبق جزئیات آماری صنعت نیروگاهی در ایران، متوسط بازده نیروگاه‌های بخار، گازی و سیکل ترکیبی کشور، در سال ۲۰۰۸ میلادی به ترتیب معادل ۳۶/۳، ۲۸/۹ و ۴۴/۵ درصد بود (Tavanir company, 2008). بنابراین، نیروگاه‌های سیکل ترکیبی در تولید الکتریسیته بیشترین بازده و پایین‌ترین ضریب انتشار  $CO_2$  را دارند [NRI, 2007]. طبق آمار ارائه‌شده وزارت نیرو سهم نیروگاه‌های کشور نسبت به سایر صنایع در سال ۱۳۸۶ از نظر تولید  $CO_2$  حدود ۲۴/۴۱، از نظر تولید  $NO_x$  حدود ۱۳/۱۵، از نظر تولید  $SO_2$  حدود ۳۲/۸۴ و از لحاظ تولید ذرات  $PM_{10}$  حدود ۵/۹۵ درصد است. این امر، بدان معنی است که سهم نیروگاه‌ها در تولید  $CO_2$  و  $SO_2$  در سال ۱۳۸۶ حدود ۱/۵ برابر کلیه صنایع و به لحاظ تولید سایر گازهای آلاینده، تقریباً معادل سایر صنایع بود (ترازنامه انرژی، ۱۳۸۶). جدول ۱ میزان انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای بخش انرژی کشور در سال ۱۳۸۶ را نشان می‌دهد.

چاکرابورتی و همکاران در سال ۲۰۰۷ در هندوستان انجام دادند، سنجش  $CO_2$ ،  $CO$ ،  $SO_2$  و  $NO$  به صورت آنالیز در بعضی از نیروگاه‌های حرارتی بر پایه زغال سنگ در هندوستان هدایت شد. مطالعات مربوط به سنجش انتشارات و برآورد از نیروگاه‌های حرارتی از سوی محققان، دانشمندان و سازمان‌های مختلفی انجام شده است. پتانسیل بالای خطر سمیت گازهای سنجش‌شده در صنایع هندوستان، به ویژه با توجه به افزایش گرمایش جهانی اثبات شده است (Calabro, et al., 2004; Gillani, et al., 1998; Gurjar, et al., 2004; Mittal, Sharma, 2003b; Ryerson, et al., 1998; Varshney, Aggarawal, 1992; Chakraborty, et al., 2008)

در ایران، بیش از ۹۰ درصد از تولید انرژی الکتریسیته بر پایه سوخت‌های فسیلی گاز، نفت گاز و نفت سنگین است. همچنین، ایران در نظر دارد تا پروژه افزایش تولید برق تا سقف ۷۱۳ TWh را تا سال ۲۰۲۵ میلادی اجرایی کند [DOE, 2009]. بر همین اساس، وزارت نیرو در ایران برآورد کرده است که برای انجام این پروژه، مجموع ظرفیت نیروگاه‌های کشور باید تا سال ۲۰۲۵ میلادی به میزان ۱۳۲/۳۶ GW برسد (Tavanir company, 2008). انتشار  $CO_2$  در نیروگاه سوخت فسیلی تابع میزان کربن در سوخت و بازده تجهیزات در تبدیل آن به الکتریسیته است.

جدول ۱. میزان انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای بخش انرژی کشور در سال ۱۳۸۶ (بر حسب تن)

$N_2O$	$CH_4$	$CO_2$	$SPM$	$CO$	$SO_3$	$SO_2$	$NO_x$	بخش / گاز
۵۹۴	۴۲۴۶	۱۴۲۳۳۵۱۲۵	۱۳۵۰۶	۷۹۷۹۶	۱۸۲۰	۱۴۴۹۹۸	۱۳۰۲۲۷	خانگی، تجاری و عمومی
۳۲۴	۲۰۷۱	۷۹۳۹۸۴۵۸	۱۷۴۳۲	۲۲۷۶۷	۵۱۱۲	۳۴۳۲۱۸	۱۵۶۰۶۶	صنعت
۵۵۸۳	۳۲۴۸۷	۱۱۵۰۲۴۳۸	۲۸۵۴۲۸	۸۳۳۱۴۰۹	۴۴۹۵	۴۰۰۷۲۴	۸۴۷۴۹	حمل و نقل
۴۵۰۸	۷۲۶	۱۲۲۱۰۰۱۹	۲۹۰۲۶	۲۲۲۹۶	۴۱۴	۶۸۰۹۵	۶۶۵۹۹	کشاورزی
۵۸	۴۷۰	۲۲۶۳۹۴۸۶	•	•	•	•	•	پالایشگاهی
۴۵۷	۳۰۰۱	۱۲۰۱۷۹۴۳۱	۲۱۸۴۸	۲۳۴	۳۱۱۰	۴۶۷۹۶۸	۱۸۱۳۱۷	نیروگاهی <sup>(۱)</sup>
۱۱۵۲۵	۴۳۰۰۱	۴۹۲۲۶۴۹۵۷	۳۶۷۲۳۹	۸۴۵۶۵۰۲	۱۴۹۵۱	۱۴۲۴۹۷۳	۱۳۷۸۹۵۷	مجموع

• ارقام در دسترس نیستند.

(۱) با احتساب نیروگاه‌های تجدیدپذیر

منبع: ترازنامه انرژی، ۱۳۸۶

در مجموع استفاده بهینه از کلیه اجزای به‌کاررفته در سیکل انجام پذیرفته است. همچنین، این تحقیق در قالب سناریوهای A, B, C و D با استفاده از نرم‌افزارهای ASPEN PLUS و HYSYS برای شبیه‌سازی راکتوری به

تحقیق حاضر با نگرش بر کاهش هزینه‌های مواد مصرفی و تجهیزات مورد استفاده در سیکل فرایند کاهش گازهای آلاینده خروجی از دودکش نیروگاه‌ها، همچنین بازیابی آب و نمک‌های مفید برای فروش به بازار صنایع و

سوخت اصلی آن گاز طبیعی و سوخت پشتیبان آن گازوئیل است. فاز اول این نیروگاه ۷۹۲ مگاوات و فازهای دوم و سوم از ظرفیتی معادل ۵۴۸ و ۸۲۲ مگاوات برخوردارند (Aftab website, 2009).

در این تحقیق با توجه به اینکه راکتور موردنظر در شبیه‌سازی، باید در انتهایی‌ترین بخش نیروگاه یعنی دودکش خروجی نصب شود، به برخی اطلاعات پایه نیاز است که با توجه به نوع و ظرفیت تولید برق نیروگاه‌ها متفاوت است و از ویژگی‌های اختصاصی هر نیروگاه به شمار می‌رود. این اطلاعات شامل نوع، مقدار و مشخصات ترمودینامیکی گازهای خروجی از دودکش نیروگاه است.

### ۳. مواد و روش‌ها

هدف از انجام این مطالعه شبیه‌سازی راکتور بهینه به منظور حذف انیدریدهای مضر و عمدتاً  $\text{CO}_2$  از دودکش نیروگاه رودشور با استفاده از باز قوی رقیق‌شده در آب (هیدروکسید سدیم) است که در نتیجه آن، نمک بیکربنات سدیم به همراه آب، تولید و آب نمک حاصل، شیرین‌سازی و نمک‌های مفید آن نیز استخراج می‌شود. به منظور حذف و کمینه‌سازی انیدریدهای مضر از دودکش نیروگاه رودشور چهار سناریو در این زمینه در نظر گرفته شده است که در محیط نرم‌افزارهای ASPEN PLUS و HYSYS شبیه‌سازی می‌شود. با استفاده از نرم‌افزار ASPEN PLUS در مجموع سه سناریو به منظور مقایسه و در نهایت انتخاب راکتور بهینه در کلیه ابعاد پاک‌سازی گاز خروجی از دودکش و بازیافت آب و نمک، در نظر گرفته شده است. در محیط HYSYS نیز یک نمونه شبیه‌سازی از برج جذب به منظور حذف انیدریدهای مضر انجام شده است.

آنالیز گازهای حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی خروجی از نیروگاه رودشور در جدول ۲ بیانگر میزان به نسبت بالای گاز  $\text{CO}_2$  و  $\text{H}_2\text{O}$  به‌منزله دو گاز اصلی گلخانه‌ای است.

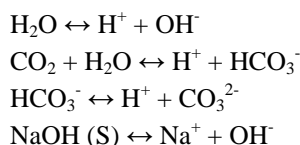
منظور حذف انیدریدهای مضر و عمدتاً  $\text{CO}_2$  از دودکش نیروگاه‌ها با استفاده از باز قوی رقیق‌شده در آب (هیدروکسید سدیم) بدون نیاز به محلول‌های جاذب، که در انتهای خط برای استفاده مجدد به تجهیزات تصفیه و خالص‌سازی ویژه نیاز دارند، است. در نتیجه آن، علاوه بر کمینه‌سازی قابل توجه  $\text{CO}_2$  و  $\text{H}_2\text{O}$  برای رهاسازی به جو، نمک بیکربنات سدیم به همراه آب، تولید و آب نمک حاصل، با استفاده از روش‌های غشایی، شیرین‌سازی و نمک‌های مفید آن نیز استخراج می‌شود. این امر در محیط HYSYS به صورت شبیه‌سازی برج جذب با استفاده از محلول دی‌گلیکول آمین به‌منزله جاذب است که به منظور مقایسه سناریو D با سایر سناریوهای انجام‌شده بر پایه شبیه‌سازی راکتور در محیط ASPEN PLUS (A,B,C) شکل گرفته است.

بدین ترتیب، با توجه به استفاده از انواع جاذب‌های فیزیکی و شیمیایی برای حذف گازهای آلاینده در اغلب مطالعات عنوان‌شده در بالا و عملیات بازیابی پیچیده این گونه جاذب‌ها که به علت ترکیبات شیمیایی خاص خود از آلاینده‌های محیط‌زیست نیز به شمار می‌روند، تحقیق حاضر از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. در این تحقیق علاوه بر کاهش بسیار گازهای گلخانه‌ای با استفاده از باز قوی می‌توان به پسایی ارزشمند دست یافت که کاملاً بازیافتی و بدون مخاطرات زیست‌محیطی است و با توجه به معضل کمبود آب، راهکاری مناسب به منظور تأمین بخشی از آب مورد نیاز برای مصارف کشاورزی یا صنعتی نیز است.

### ۲. معرفی نیروگاه رودشور

رودشور که به‌منزله مطالعه موردی در این تحقیق برگزیده شده، نیروگاه سیکل ترکیبی است که با ۲ هزار مگاوات ظرفیت، در کیلومتر ۴۴ بزرگراه تهران- ساوه و در مساحتی معادل ۵۰ هکتار احداث شده است. این نیروگاه در مجموع از ۸ واحد به قدرت ۲۱۶۲ مگاوات تشکیل شده که

مواد واکنش دهنده و ضرایب استوکیومتری آن‌ها، همچنین بسته به نوع واکنش، ضرایب معادله موردنظر به نرم‌افزار داده شدند. معادلات شیمیایی استفاده شده در این روش به شرح زیرند:



جدول ۳. خصوصیات ترمودینامیکی جریان خروجی از دودکش نیروگاه رودشور

مقادیر ورودی	خصوصیات ترمودینامیکی جریان
۱۵۰	دما (°C)
۱	فشار (atm)
۱۹۹۴	دبی ورودی (tons/hr)

منبع: اطلاعات نیروگاه رودشور، ۱۳۸۸

جدول ۴. مشخصات جریان NaOH ورودی راکتور

مقادیر ورودی	خصوصیات ترمودینامیکی جریان
۲۵	دما (°C)
۱	فشار (atm)
۱۳۵۰	دبی ورودی (tons/hr)

### ۱.۳. سناریوی A

در سناریوی A شبیه‌سازی شده در محیط ASPEN PLUS، ابتدا جریان گاز داغ خروجی از دودکش نیروگاه وارد ظرف فلش درام می‌شود که محیط اصلی انجام واکنش‌ها و در حقیقت، راکتور موردنظر است. پس از آن، محلول آبی ۷۵ درصد هیدروکسید سدیم روی گاز اسیدی تزریق می‌شود. خروجی‌های راکتور شامل گاز تمیز برای رهاسازی به جو و آب نمک غلیظ در نتیجه انجام واکنش بین گازهای اسیدی و باز تزریقی است. خروجی‌های راکتور به صورت میزان جریان جرمی بر حسب tons/hr انتخاب می‌شوند که میزان تغییرات در جریان خروجی نسبت به جریان ورودی در اثر واکنش‌های انجام شده در

با توجه به اطلاعات به دست آمده از نیروگاه رودشور، شبیه‌سازی راکتوری برای حذف انیدریدهای مضر از دودکش این نیروگاه با نرم‌افزار ASPEN PLUS Ver.13.1 انجام شد. در سناریوهای تعریف شده در محیط ASPEN PLUS ابتدا مشخصات جریان گاز داغ خروجی از دودکش و مشخصات جریان بازی موردنظر، هیدروکسید سدیم رقیق شده در آب، (۷۵٪ NaOH) استفاده شد که مشخصات جریان‌ها در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.

جدول ۲. نوع و میزان گازها در جریان خروجی از دودکش نیروگاه رودشور

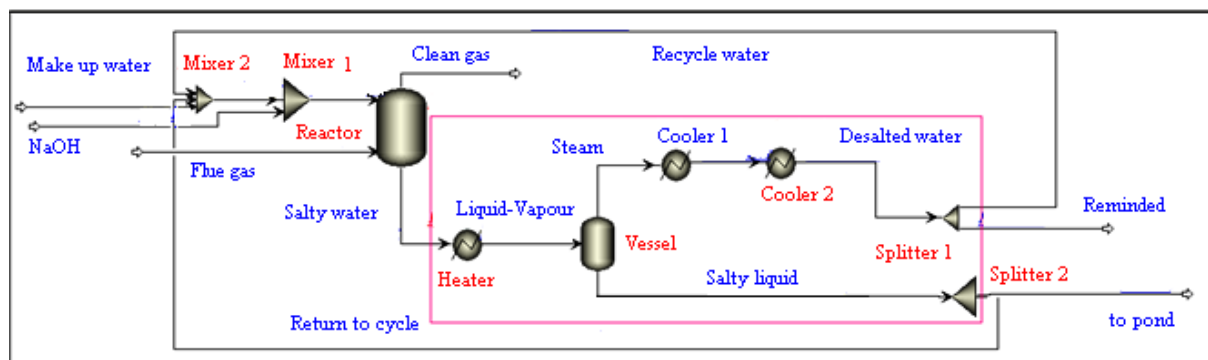
عنصر گازی	درصد مولی (mol/lit)
CO <sub>2</sub>	۳/۷۸
H <sub>2</sub> O	۸/۱۳
O <sub>2</sub>	۱۲/۶۶
SO <sub>2</sub>	۰/۰۰۱۴
N <sub>2</sub>	۷۴/۵۴
CO	۳/۸×۱۰ <sup>-۵</sup>
Ar	۰/۸۹۶۲

منبع: اطلاعات نیروگاه رودشور، ۱۳۸۸

ورودی نرم‌افزار ASPEN PLUS معادلات و خواص شیمیایی مواد است، اما خروجی آن به صورت گرافیکی یا نقشه است که نشان‌دهنده خطوط جریان و واحدهای مختلف است. پس از وارد کردن کلیه ترکیبات و اجزای موجود در جریان‌ها، مواد شیمیایی الکترولیتی و مواد جامد نیز تعیین و با توجه به نوع ترکیبات، که مخلوطی از انیدریدها همراه مقادیری آب است، معادله ترمودینامیکی مناسب انتخاب و جریان‌ها و تجهیزات در صفحه جریان رسم شد. نمک‌ها و یون‌های تشکیل شده در محیط بر اساس ثوابت تعادلی پیش‌بینی شدند. پس از این مراحل، مشخصه‌های مربوط به بخش الکترولیت، مانند pH تعیین و مقادیر نمک‌های سیستم و شرایط محلول از جمله اسیدیته بررسی شدند و با کنترل آن‌ها شرایط بهبود یافت و از این طریق احتمال خوردگی و رسوب در سیستم به حداقل رسید. پس از تعیین مدل ترمودینامیکی، اطلاعات سینتیکی

کولر (۱) ۵۵ درجه سانتی‌گراد و افت فشار، ناچیز انتخاب می‌شود. آب شیرین‌سازی شده خروجی از کولر مشخصاتی شبیه مشخصات جریان بخار خروجی از ظرف جداساز دارد، با این تفاوت که دمای آن کاهش یافته است. آب شیرین‌سازی شده وارد کولر ۲ می‌شود. مشخصات کولر ۲ مشابه کولر ۱ است، با این تفاوت که دما در کولر (۲) ۲۵ درجه سانتی‌گراد تعریف شده تا دمای آب بازگشتی به چرخه با دمای هیدروکسید سدیم تزریقی در مرحله اول یکسان شود. آب شیرین‌سازی شده از طریق جداکننده که با تنظیم دبی جریان، آن را به دو بخش تقسیم می‌کند، می‌تواند به دلخواه دوباره به چرخه وارد یا از آن خارج شود. سپس، جریان آب برگشتی به چرخه وارد و جریان مایع آب نمک غلیظ از بخش انتهایی ظرف جداساز خارج و آب نمک، با استفاده از روش‌های غشایی یا حرارتی شیرین‌سازی می‌شود. برای جبران احتمالی سیال قلیا در چرخه، جریان آب جبرانی نیز در نظر گرفته می‌شود. شکل ۱ طرح شماتیک راکتور با بازیافت آب از چرخه شبیه‌سازی در نیروگاه رودشور را نشان می‌دهد.

تجهیزات مختلف را نشان می‌دهد. سایر تجهیزات از قبیل گرم‌کننده، کولر، ظرف جداساز و مخلوط‌کن برای بهبود فرایندهای جانبی مانند تولید نمک و آب در مسیر قرار داده می‌شوند. از این مرحله به بعد کلیه تجهیزات لحاظ‌شده در صفحه جریان، مجازی است و صرفاً به منظور نمایش نوع چرخه فرایند و تفهیم صوری چرخه ایجاد شده‌اند، زیرا هنگام اجرای واقعی چرخه شبیه‌سازی در صنعت، از روش‌های غشایی که دامنه وسیع‌تری در شیرین‌سازی آب‌های شور دارند، برای بازیافت آب و نمک استفاده می‌شوند. در مرحله بعد، به منظور تبخیر آب موجود در گاز خروجی از راکتور، یک مبدل حرارتی در مسیر جریان گاز خروجی از راکتور قرار داده می‌شود. دما در مبدل حرارتی ۹۰ درجه سانتی‌گراد و افت فشار ناچیز انتخاب می‌شود. با گزینش این شرایط برای مبدل حرارتی، جریان خروجی از مبدل، دوفازی و پس از آن، به منظور جداکردن فازهای مایع و بخار وارد وسل می‌شود. افت فشار در ظرف جداساز، ناچیز است و جزء بخار ۰/۲ انتخاب می‌شود. پس از آن بخار وارد کولر و سرد می‌شود. دما در



شکل ۱. طرح شماتیک راکتور شبیه‌سازی شده با بازیافت آب و نمک از چرخه در نیروگاه رودشور در سناریوی A

جرمی بر حسب tons/hr انتخاب می‌شود. ابتدا گاز داغ خروجی از دودکش به راکتور وارد و محلول آبی ۷۵ درصد هیدروکسید سدیم همراه جریان آب اضافی روی آن تزریق می‌شود. در نتیجه انجام واکنش‌های اسید-باز در راکتور، میزان  $CO_2$  و آب در خروجی فوقانی کاهش می‌یابد و آب و نمک از خروجی انتهایی راکتور وارد مبدل حرارتی می‌شود. کلیه مشخصات جریان گاز و بازی

### ۲.۳. سناریوی B

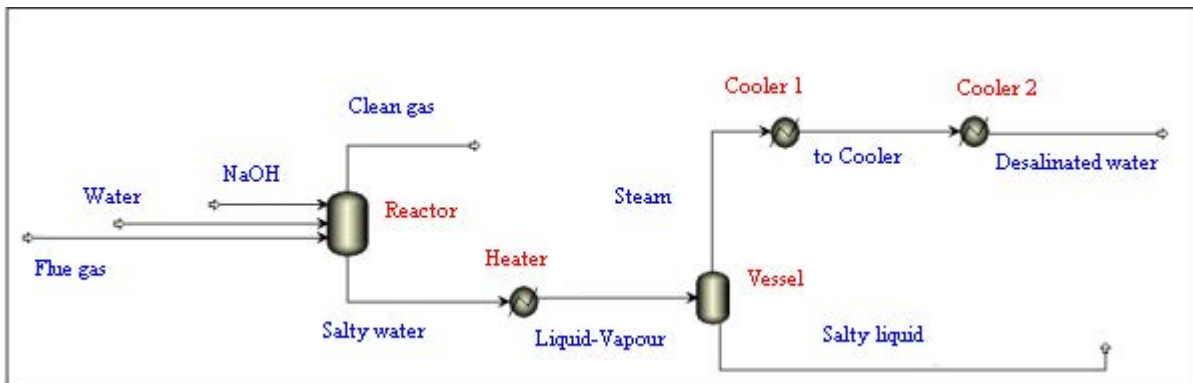
در سناریوی B شبیه‌سازی شده در محیط ASPEN PLUS نیز مانند سناریوی A ظرف فلش درام، به‌منزله راکتور در نظر گرفته می‌شود و سایر تجهیزات از قبیل گرم‌کننده، کولر، ظرف جداساز و مخلوط‌کن برای بهبود فرایندهای جانبی مانند تولید نمک و آب در مسیر قرار داده می‌شوند. در این سناریو نیز خروجی مدل به صورت میزان جریان

خروجی مایع- بخار به ظرف فلش درام راکتور ۱، در نهایت دو جریان از ظرف فلش خارج می‌شوند که جریان مایع از قسمت انتهایی ظرف و جریان بخار از قسمت بالای ظرف خارج می‌شود. مشخصات ترمودینامیکی راکتور ۱ شامل افت فشار ناچیز و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد است. پس از آن، جریان بخار همراه جریان بازی (۷۵٪ NaOH) وارد راکتور ۲ که دارای مشخصاتی مشابه مشخصات راکتور ۱ است، می‌شود و جریان گاز تمیز برای رهاسازی به اتمسفر و آب نمک برای شیرین‌سازی و بازگشت به چرخه از آن خارج می‌شود. شکل ۳ طرح شماتیک استفاده از ۲ راکتور با بازیافت آب و نمک در چرخه شبیه‌سازی شده در نیروگاه رودشور در محیط ASPEN PLUS را نشان می‌دهد.

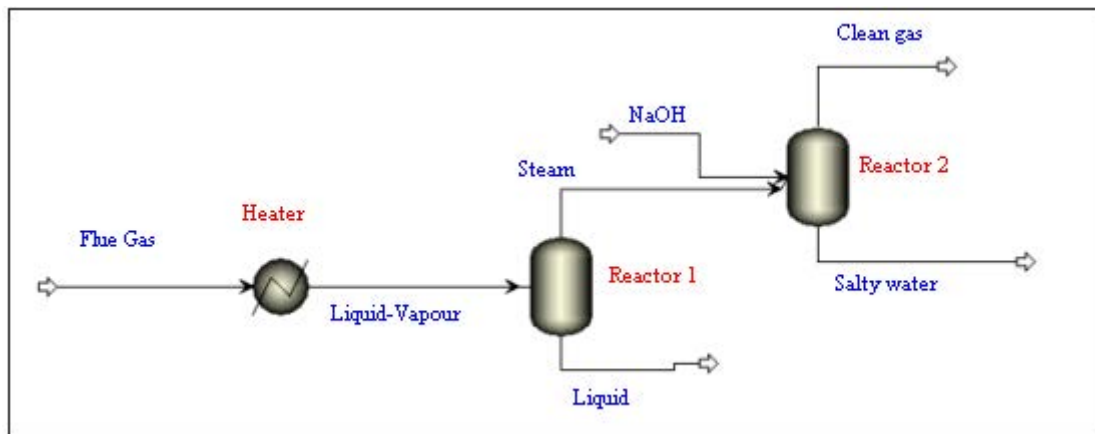
موردنظر، همچنین مشخصات تجهیزات به‌کاررفته در چرخه، مطابق سناریوی A است، با این تفاوت که جزء جرمی جریان آب اضافی به تنهایی برابر ۱ است. به جای چرخش مداوم آب در چرخه، آب در راکتور جدا و به حوضچه تبخیر وارد و به جای آن آب شیرین وارد سیستم می‌شود. شکل ۲ طرح شماتیک سیکل راکتور با استفاده از ظرف فلش با تزریق آب به چرخه شبیه‌سازی با بازیافت آب و نمک از چرخه در نیروگاه رودشور را نشان می‌دهد.

### ۳.۳. سناریوی C

در سناریوی C شبیه‌سازی شده در محیط ASPEN PLUS ابتدا جریان گاز داغ خروجی از دودکش نیروگاه، وارد مبدل حرارتی با مشخصاتی مشابه مشخصات مبدل حرارتی در سناریوهای قبل می‌شود. پس از وارد شدن جریان



شکل ۲. طرح شماتیک راکتور شبیه‌سازی شده با تزریق آب به چرخه، با بازیافت آب و نمک در نیروگاه رودشور در سناریوی B



شکل ۳. طرح شماتیک استفاده از ۲ راکتور با بازیافت آب و نمک در چرخه شبیه‌سازی نیروگاه رودشور در سناریوی C

### ۴.۳. سناریوی D

در سناریوی D شبیه‌سازی در محیط HYSYS است. بر این اساس یک نمونه شبیه‌سازی از برج جذب به منظور حذف گازهای گلخانه‌ای انجام می‌گیرد. ابتدا جریان گاز داغ خروجی از دودکش نیروگاه آنقدر سرد می‌شود تا به درجه حرارت مناسب برای جذب برسد، سپس جریان گاز (جریان ۱) از قسمت فوقانی برج جذب و جریان آمین از قسمت انتهایی وارد می‌شوند. برای انجام عمل جذب به صورت بهینه در این سناریو، تعداد سینی‌ها در برج جذب ۱۰ عدد انتخاب می‌شوند. پس از آن، ترکیبات در گاز داغ و جریان آمین، همچنین معادله حالت در برج جذب با توجه به جاذب دی‌گلیکول آمین (DG Amin) تعیین می‌شود. مشخصات جریان گاز داغ، دی‌گلیکول آمین و مشخصات ترمودینامیکی آن‌ها مطابق جدول‌های ۵ تا ۸ تعیین می‌شود. در نهایت، جریان Sweet، که شامل گاز تمیز است، از بخش فوقانی برج جذب و جریان Rich، که محتوی جاذب غنی از دی‌اکسید کربن جذب شده است، از بخش انتهایی برج خارج می‌شوند. در سناریوی D به علت نبود واکنش‌های اسید-باز هیچ‌گونه نمکی تولید نمی‌شود. جاذب غنی از دی‌اکسید کربن باید در انتهای خط تصفیه و به چرخه بازگردانده شود. شکل ۴ طرح شماتیک برج جذب انیدریدهای مضر از دودکش نیروگاه رودشور را نشان می‌دهد.

جدول ۵. مشخصات ترکیبات جریان گاز داغ خروجی (جریان ۱)

از دودکش نیروگاه رودشور در سناریوی D

ترکیبات	دبی ورودی (tons/hr)
H <sub>2</sub> O	۱۰۲/۷۸۰
CO <sub>2</sub>	۱۱۶/۴۳۰

جدول ۶. مشخصات ترکیبات آمین ورودی به برج

جذب در سناریوی D

ترکیبات	دبی ورودی (tons/hr)
H <sub>2</sub> O	$1/500 \times 10^3$
DG AMIN	$1/500 \times 10^3$

جدول ۷. مشخصات ترمودینامیکی جریان گاز داغ خروجی

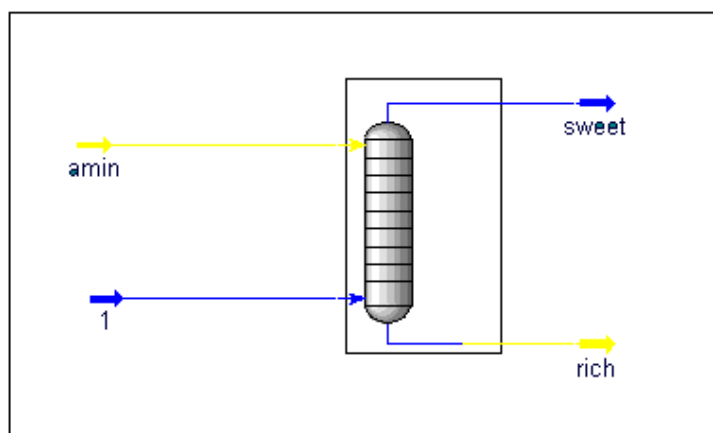
(جریان ۱) از دودکش نیروگاه رودشور در سناریوی D

جزء بخار	۱/۰۰۰
دما (°C)	۵۰
فشار (atm)	۱

جدول ۸. مشخصات ترمودینامیکی جریان آمین ورودی به برج

جذب در سناریوی D

جزء مایع	۱/۰۰۰
دما (°C)	۲۰
فشار (atm)	۱



شکل ۴. طرح شماتیک برج جذب گازهای گلخانه‌ای از دودکش نیروگاه رودشور در سناریوی D



است. میزان نمک حاصل نیز که مخلوطی از نمک‌های کربنات، بیکربنات و هیدروکسید سدیم است، معادل  $408/800 \text{ tons/hr}$  است. همچنین، میزان  $\text{CO}_2$  در گاز خروجی از دودکش نیروگاه رودشور از  $116/4301 \text{ tons/hr}$  به  $2/840 \times 10^{-4} \text{ tons/hr}$  در خروجی راکتور به منظور رهاسازی به جو تقلیل می‌یابد.

در سناریوی C مشخصات جریان‌های خروجی در جدول ۱۱ ارائه شده‌اند.

با توجه به نتایج به دست آمده در سناریوی C، میزان آب در گاز خروجی از دودکش نیروگاه رودشور از  $102/780 \text{ tons/hr}$  به  $65/049 \text{ tons/hr}$  در خروجی راکتور برای رهاسازی به جو رسیده است. میزان آب در جریان آب نمک خروجی از پایین راکتور  $1085/829 \text{ tons/hr}$  است. میزان نمک حاصل نیز که مخلوطی از نمک‌های کربنات، بیکربنات و هیدروکسید سدیم است، معادل  $398/345 \text{ tons/hr}$  است. همچنین، میزان  $\text{CO}_2$  در گاز خروجی از دودکش نیروگاه رودشور از  $116/430 \text{ tons/hr}$  به  $5/295 \times 10^{-10} \text{ tons/hr}$  در خروجی راکتور به منظور رهاسازی به جو کاهش خواهد یافت.

با توجه به شبیه‌سازی برج جذب گازهای گلخانه‌ای خروجی از دودکش نیروگاه رودشور در محیط HYSYS در سناریوی D خروجی‌های مدل در جدول ۱۲ ارائه شده‌اند.

### ۵.۳. بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده در محیط‌های نرم‌افزاری ASPEN PLUS و HYSYS نتایج نهایی هر سناریو در قالب جداولی به صورت زیر ارائه می‌شوند. مشخصات جریان‌های خروجی از راکتور در سناریوی A در جدول ۹ ارائه شده است.

با بررسی نتایج سناریوی A مشاهده می‌شود که میزان آب در گاز خروجی از دودکش نیروگاه رودشور از  $102/780 \text{ tons/hr}$  به  $36/642 \text{ tons/hr}$  در خروجی راکتور برای رهاسازی به جو کاهش خواهد یافت. میزان آب در جریان آب نمک خروجی از پایین راکتور  $1115/280 \text{ tons/hr}$  و میزان نمک حاصل نیز که مخلوطی از نمک‌های کربنات، بیکربنات و هیدروکسید سدیم است، معادل  $406/365 \text{ tons/hr}$  خواهد بود. میزان  $\text{CO}_2$  در گاز خروجی از دودکش نیروگاه رودشور از  $116/430 \text{ tons/hr}$  به  $5/295 \times 10^{-10} \text{ tons/hr}$  در خروجی راکتور به منظور رهاسازی به جو رسیده است.

در سناریوی B مشخصات جریان‌های خروجی از راکتور در جدول ۱۰ ارائه شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده در سناریوی B، میزان آب در گاز خروجی از دودکش نیروگاه رودشور از  $102/780 \text{ tons/hr}$  به  $136/970 \text{ tons/hr}$  در خروجی راکتور برای رهاسازی به جو کاهش خواهد یافت. میزان آب در جریان آب نمک خروجی از پایین راکتور  $2033/467 \text{ tons/hr}$

جدول ۹. داده‌های خروجی شبیه‌سازی راکتور با بازیافت آب و نمک از چرخه در نیروگاه رودشور در سناریوی A

ترکیبات در گاز داغ	میزان جریان گاز خروجی از دودکش (tons/hr)	میزان جریان گاز خروجی از راکتور (tons/hr)	میزان جریان آب نمک خروجی از راکتور (tons/hr)
H <sub>2</sub> O	102/780	36/642	1115/280
CO <sub>2</sub>	116/430	$5/295 \times 10^{-10}$	$1/026 \times 10^{-11}$
CO	0/074	0/074	$4/500 \times 10^{-5}$
H <sup>+</sup>	.	.	$9/691 \times 10^{-15}$
Na <sup>+</sup>	.	.	193/985
OH <sup>-</sup>	.	.	53/524
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	.	.	$1/485 \times 10^{-3}$
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	.	.	158/758

جدول ۱۰. داده‌های خروجی شبیه‌سازی راکتور با تزریق آب به چرخه، با بازیافت آب و نمک در نیروگاه رودشور در سناریوی B

ترکیبات در گاز داغ	میزان جریان گاز خروجی از دودکش (tons/hr)	میزان جریان گاز خروجی از راکتور (tons/hr)	میزان جریان آب نمک خروجی از راکتور (tons/hr)
H <sub>2</sub> O	۱۰۲/۷۸۰	۱۳۶/۹۷۰	۲۰۳۳/۴۶۷
CO <sub>2</sub>	۱۱۶/۴۳۰	$۲/۸۴۰ \times 10^{-۸}$	$۵/۱۸۶ \times 10^{-۱۰}$
CO	۰/۰۷۴	۰/۰۷۴	۰/۰۷۴
H <sup>+</sup>	.	.	$۳/۳۹۱ \times 10^{-۱۳}$
Na <sup>+</sup>	.	.	۱۹۵/۴۲۲
OH <sup>-</sup>	.	.	۵۴/۵۹۱
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	.	.	۰/۰۱۴
CO <sub>3</sub> <sup>-۲</sup>	.	.	۱۵۸/۷۴۶

جدول ۱۱. داده‌های خروجی استفاده از ۲ راکتور با بازیافت آب و نمک در چرخه شبیه‌سازی نیروگاه رودشور در سناریوی C

ترکیبات در گاز داغ	میزان جریان گاز خروجی از دودکش (tons/hr)	میزان جریان گاز خروجی از راکتور (tons/hr)	میزان جریان آب نمک خروجی از راکتور (tons/hr)
H <sub>2</sub> O	۱۰۲/۷۸۰	۶۵/۰۴۹	۱۰۸۵/۸۲۹
CO <sub>2</sub>	۱۱۶/۴۳۰	$۱/۶۵۵ \times 10^{-۹}$	$۱/۹۶۴ \times 10^{-۱۱}$
CO	۰/۰۷۴	۰/۰۷۴	$۳/۵۱۲ \times 10^{-۵}$
H <sup>+</sup>	.	.	$۱/۹۴۵ \times 10^{-۱۴}$
Na <sup>+</sup>	.	.	۱۹۰/۵۳۶
OH <sup>-</sup>	.	.	۵۳/۵۶۴
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	.	.	$۲/۲۸۳ \times 10^{-۳}$
CO <sub>3</sub> <sup>-۲</sup>	.	.	۱۵۴/۱۸۵

جدول ۱۲. داده‌های خروجی برج جذب گازهای گلخانه‌ای از دودکش نیروگاه رودشور

در جریان‌های Rich و Sweet در سناریوی D

ترکیبات	جریان گاز خروجی از برج جذب (Sweet) (tons/hr)	جریان انتهایی خروجی از برج جذب (Rich) (tons/hr)
H <sub>2</sub> O	۹۱/۵۴۴	$۱/۵۲۱ \times 10^{-۳}$
DG AMIN	۰/۱۳۰	۱۵۰۰
CO <sub>2</sub>	۹/۸۲۱	-

خروجی از انتهای راکتور  $1/521 \times 10^{-3}$  tons/hr است. همچنین، میزان CO<sub>2</sub> در گاز خروجی از دودکش نیروگاه رودشور از ۱۱۶/۴۳۰ tons/hr به ۹/۸۲۱ tons/hr در خروجی راکتور به منظور رهاسازی به جو کاهش خواهد

با توجه به نتایج به دست آمده در سناریوی D، میزان آب در گاز خروجی از دودکش نیروگاه رودشور از ۱۰۲/۷۸۰ tons/hr به ۹۱/۵۴۴ tons/hr در خروجی راکتور برای رهاسازی به جو تقلیل خواهد یافت. میزان آب در جریان

باشد (مانند میزان حرارت لازم در کوره‌ها) که قیمت خرید بر اساس آن تعیین می‌شود. برای تعیین اندازه این دستگاه و انجام محاسبه‌ها از نرم‌افزار Aspen Plus استفاده شده است. برای این کار در طراحی جداگانه‌ای جریان‌های مذکور به برجی با ۵ سینی وارد و بر اساس دبی گاز قطر این برج تعیین شده است. بر اساس نتایج به دست آمده از نرم‌افزار قطر مورد نیاز برای چنین برجی با ۵ سینی از نوع غربالی، حدود ۲۸ متر خواهد بود که این قطر بالا به خاطر دبی بسیار بالای گاز ورودی به برج است، زیرا معمولاً قطر برج‌ها با استفاده از دبی گاز ورودی به آن‌ها تعیین می‌شود. با توجه به اصول طراحی و محدودیت‌های در آن امکان ساخت و عملیات چنین برجی وجود ندارد. معمولاً بر اساس قواعد سرانگشتی حداکثر قطر برج را ۲ متر در نظر می‌گیرند. بنابراین، برای داشتن واحد مناسب باید گاز ورودی به جای وارد شدن به راکتور، تقسیم و به تعداد بیشتری راکتور وارد شود. برای یافتن تعداد راکتورهای بهینه بر اساس جدول ۱۳ جریان‌های ورودی به راکتور با نسبت مساوی تقسیم شدند و برای هر مورد قطر برج محاسبه شد.

یافت. در این سناریو هیچ‌گونه نمکی تولید نمی‌شود و جریان آمین در انتهای مسیر باید تصفیه و به چرخه بازگردانده شود.

#### ۴. تحلیل اقتصادی

در این بخش، بر اساس نیاز تنها به محاسبه قیمت‌های مربوط به تجهیزات اصلی واحد، بر اساس اطلاعات در کتاب‌های مرجع و در نظر گرفتن ضرائب تبدیل مربوط به سال محاسبه قیمت پرداخته می‌شود. شایان ذکر است که با توجه به اینکه نگارش مقاله در سال ۲۰۱۰ میلادی صورت گرفته، مبنای محاسبه‌های اقتصادی نیز بر اساس هزینه‌های آن سال در نظر گرفته شده است. دستگاه اصلی استفاده شده در این واحد راکتور آن است، زیرا برای فرایند جداسازی محصولات خروجی از راکتور از روش اسمز معکوس استفاده می‌شود که شبیه‌سازی آن در Aspen Plus غیرممکن است. بنابراین، به جز راکتور سایر دستگاه‌های استفاده شده در فایل شبیه‌سازی مجازی‌اند و در عمل به کار نمی‌روند.

برای تخمین قیمت یک دستگاه به ضریب تعیین اندازه نیاز است. این ضریب همیشه شامل اندازه و ابعاد دستگاه نیست و می‌تواند بر اساس نوع دستگاه مشخصه‌ای از آن

جدول ۱۳. نسبت دبی‌ها با قطر برج

۰/۰۰۷۸	۰/۰۱۵۶	۰/۰۳۱۲	۰/۰۶۲۵	۰/۱۲۵	۰/۲۵	۰/۵	۱	ضریب اعمال شده روی دبی‌ها
۱/۹	۲/۷	۳/۹	۵/۷	۸/۳	۱۲/۳	۱۸/۵	۲۸	قطر محاسبه شده (m)
۱۰/۵۴	۲۱/۰۹	۴۲/۱۸	۸۴/۳۷	۱۶۸/۷۵	۳۳۷/۵	۶۷۵	۱۳۵۰	دبی فلو گاز (ton/hr)
۱۵/۵۷	۳۱/۱۵	۶۲/۳۱	۱۲۴/۶۲	۲۴۹/۲۵	۴۹۸/۵	۹۹۷	۱۹۹۴	دبی محلول سود (ton/hr)
۱۲۸	۶۴	۳۲	۱۶	۸	۴	۲	۱	تعداد راکتورهای لازم

با توجه به این اطلاعات برای یک ستون مایع در برج، ارتفاع کل برج ۴ متر تخمین زده می‌شود. بر اساس اطلاعات کتاب‌های راهنمای مهندسی شیمی، قیمت برج‌ها همراه با قیمت تجهیزات و نصب، بر اساس قطر و ارتفاع آن‌ها محاسبه می‌شود.

همان‌طور که در جدول بالا مشاهده می‌شود، در نسبت ۰/۰۰۷۵ از جریان‌های ورودی، قطر برج ۱/۹ متر خواهد بود که بر اساس استانداردها می‌تواند قابل قبول باشد. با در نظر گرفتن تعداد ۵ سینی برای برج و با فرض اینکه فاصله هر سینی ۵/۰ متر باشد، ۲/۵ متر ارتفاع سینی‌ها خواهد بود.

روش مورد استفاده برای تخمین هزینه سرمایه‌گذاری در این پروژه، از زیرمجموعه بخش برآورد مطالعاتی، روش لانگ با دقت  $\pm 30\%$  است که از رابطه زیر به منظور تخمین هزینه سرمایه‌گذاری در این روش استفاده می‌شود:

$$C_{TCI} = 1.05 f_{LTCI} \sum_i C_{Pi}$$

در این رابطه،  $f_{LTCI}$  ضریب لانگ برای سیالات برابر ۵/۷ و  $C_{Pi}$  نیز هزینه خرید هر دستگاه است. بنابراین، میزان هزینه سرمایه‌گذاری بر مبنای سال ۲۰۱۰ به صورت زیر خواهد بود:

$$C_{TCI} = 1.05(5.7)(34422500) = 206018680\$$$

همچنین، برای محاسبه میزان سرمایه‌گذاری ثابت به کمک این روش، می‌توان از فرمول زیر استفاده کرد:

$$C_{TCI} = 1.05 f_{LTPi} \sum_i C_{Pi}$$

که در این رابطه،  $f_{LTPi}$  ضریب لانگ و برای فرایندهای سیالاتی برابر ۴/۶ است. بنابراین، میزان سرمایه‌گذاری ثابت بر مبنای سال ۲۰۱۰ برابر ۱۶۶۲۶۰۶۹۲ دلار است. در نتیجه سرمایه در گردش برابر اختلاف دو مقدار بالا، یعنی ۳۹۷۵۷۹۹۱ دلار است.

برای محاسبه میزان هزینه کل تولید، ابتدا باید میزان هزینه کل تولید در هر سال محاسبه شود، که بدین منظور از فرمول زیر استفاده می‌شود:

هزینه کل تولید = (هزینه متغیر تولید سالیانه) (ظرفیت تولید) + (هزینه ثابت تولید سالیانه) + (هزینه استهلاك سالیانه) + (هزینه اضافی واحد به ازای هر سال)

بنابراین، میزان کل هزینه تولید (مخارج) طی ۱۲ سال برابر ۷۰۹۶۰۵۸۸۲ دلار است. به دلیل در نظر گرفتن هزینه‌های سالیانه ثابت برای استهلاك، هزینه‌های تولید نیز طی ۱۲ سال عمر مفید کارخانه ثابت خواهند بود.

میزان کل سوددهی فرایند به طور مستقیم وابسته به میزان دبی گاز شیرین‌سازی شده و  $CO_2$  حذف‌شده از آن است که به عنوان محصول واحد است. همان‌طور که به آن اشاره شد، بنا بر نتایج شبیه‌سازی میزان حذف سالیانه  $CO_2$  در ۱۰۰ درصد ظرفیت واحد، برابر ۹۱۹۰۹۴/۴ ton/year و

برای این کار قطر برج موردنظر قیمت به ازای واحد طول تعیین می‌شود. جنس برج از نوع استنلیس استیل انتخاب می‌شود تا از خوردگی آن در مجاورت گازهای اسیدی جلوگیری شود. نوع سینی‌ها غربالی انتخاب می‌شوند که ارزان‌ترین نوع ممکن‌اند. بر این اساس مطابق با نمودار مذکور که در سال ۱۹۷۹ میلادی تهیه شده است قیمت هر برج ۱۷۵۵۰ دلار خواهد بود که با در نظر گرفتن ضرائب تبدیل مناسب قیمت در سال ۲۰۱۰ میلادی ۴۰۶۰۰ دلار خواهد بود.

با در نظر گرفتن ۱۲۸ راکتور برای این مقدار گاز، ورودی قیمت تمام راکتورها در حدود ۵۱۹۷۰۴۹ دلار خواهد شد. سایر تجهیزاتی که در این واحد استفاده می‌شوند و باید قیمت آن‌ها جزو لیست تجهیزات آورده شود، به قسمت جداسازی محصولات راکتور، که آب و نمک‌های تشکیل‌شده‌اند، مربوط می‌شوند.

با توجه به هزینه‌های اسمز معکوس (که جایگزین فرایندهای حرارتی طراحی است) برای تصفیه هر متر مکعب از آب شور با استفاده از این سیستم ۳ میلیون تومان سرمایه‌گذاری اولیه (در سال ۲۰۱۰) مورد نیاز است. بنابراین، با توجه به دبی حجمی خروجی از راکتور که ۱۰۷۱/۶ متر مکعب در ساعت است هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای تصفیه حجم مذکور مبلغ ۳۲۱۵ میلیون تومان خواهد بود که معادل ۲۹۲۲۵۰۰ دلار است.

بنابراین، هزینه کل تجهیزاتی که در این واحد استفاده می‌شود ۳۴۴۲۲۵۰۰ دلار خواهد بود. این عدد معیاری برای انجام تمامی محاسبه‌های اقتصادی آتی است.

هزینه سرمایه‌گذاری از دو بخش سرمایه‌گذاری ثابت و سرمایه در گردش تشکیل شده است که هر بخش نیز شامل انواع مختلفی از هزینه‌ها می‌شود. برای محاسبه دقیق هزینه سرمایه‌گذاری باید تمامی موارد آن به طور جداگانه مشخص شوند. اما به منظور تخمین هزینه سرمایه‌گذاری روش‌های مختلفی با دقت‌های متفاوتی وجود دارد که هر یک بنا به اطلاعات در دسترس، می‌توانند مفید واقع شوند.

در سناریوی A (مدل شبیه‌سازی شده راکتور با بازیافت آب و نمک از جریان گاز خروجی از دودکش نیروگاه رودشور) به منزله سناریوی بهینه، مشاهده شد که در صورت اجرا، میزان آب در گاز خروجی از راکتور برای رهاسازی به جو به  $10^{-8}$  tons/hr خواهد رسید و در جریان بازگشتی به چرخه نسبت به آب در گاز داغ خروجی از دودکش برای بازیابی حدود ۱۰ برابر افزایش خواهد داشت. همچنین، راکتور قادر به کمینه‌سازی CO<sub>2</sub> تا مقدار  $10^{-13}$  tons/hr برابر نسبت به دی اکسید کربن در گازهای خروجی از دودکش نیروگاه رودشور خواهد بود. میزان نمک حاصل نیز که مخلوطی از نمک‌های کربنات، بیکربنات و هیدروکسید سدیم است معادل tons/hr  $406/365$  خواهد بود. جریان آب نمک خروجی از راکتور به شدت بازی خواهد بود که برای تبلور و استخراج نمک وارد حوضچه تبخیر خواهد شد و جریان بازگردشی به چرخه دارای pH تقریباً خنثی خواهد بود که این ویژگی مانع از خوردگی ابزارها و دستگاه‌های مورد استفاده در چرخه خواهد شد. آب شیرین‌سازی شده در این فرایند با توجه به میزان بسیار پایین مجموع جامدات محلول (TDS)<sup>۱</sup> در آن می‌تواند برای فعالیت‌های کشاورزی، آشامیدنی یا در چرخه استفاده شود. نمک بیکربنات سدیم نیز می‌تواند پس از انجام فرایندهای استخراج، تصفیه و خالص‌سازی، برای عرضه به صنایع مختلف استفاده شود.

در جدول ۱۴ مقایسه کلی بین چهار سناریوی مطرح شده انجام گرفته است. با توجه به اینکه کلیه جریان‌های ترسیم شده در طراحی، به علت محدودیت نرم‌افزار ASPEN PLUS به صورت فرضی بوده است و در واقعیت، فرایندهای غشایی جایگزین فرایندهای حرارتی خواهند شد، بنابراین در تمام موارد تنها دیدگاه‌های اقتصادی و اجرایی راکتور (به منزله محل اصلی واکنش‌ها) محاسبه شده و سایر هزینه‌ها لحاظ نشده است. در نتیجه، برای تمام سناریوهای تعریف شده، تحلیل اقتصادی و اجرایی، یکسان خواهد بود.

قیمت حذف هر تن CO<sub>2</sub> از گاز ورودی ۱۸/۵ دلار است. بنابراین، میزان کل سوددهی برابر خواهد شد با:

$$\text{\$ } 204038957 = 18/5 \times 12 \times 919094/4 = \text{میزان کل سود}$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان کل سود از کل هزینه‌های واحد کمتر خواهد شد. بنابراین، اجرای این طرح توجیه اقتصادی ندارد.

## ۶. نتیجه‌گیری

برای شبیه‌سازی راکتوری بهینه برای کاهش و حذف گازهای گلخانه‌ای در جریان خروجی از دودکش نیروگاه رودشور چهار سناریو (A,B,C,D) در محیط‌های نرم‌افزار PLUS ASPEN و HYSYS در نظر گرفته شد. در سناریوی A گازهای آلاینده خروجی از دودکش نیروگاه رودشور با باز قوی (۷۵٪ NaOH) در راکتور شبیه‌سازی شده در محیط ASPEN PLUS به واکنش شیمیایی وارد و در نهایت جریان گاز تمیز برای رهاسازی به جو و آب و نمک تولید شد. در سناریوی B طراحی شده در محیط ASPEN PLUS با در نظر گرفتن شرایط سینتیکی و ترمودینامیکی در سناریوی A به جای چرخش مداوم آب در چرخه، آب در راکتور جداسازی و به حوضچه تبخیر وارد و به جای آن، به طور مداوم، آب اضافی وارد سیستم می‌شود. در سناریوی C طراحی شده در محیط ASPEN PLUS با در نظر گرفتن شرایط سینتیکی و ترمودینامیکی سابق، از ۲ راکتور برای حذف گازهای گلخانه‌ای استفاده شد و به منظور جداسازی فازهای مایع و بخار، یک مبدل حرارتی در ابتدای خروجی دودکش نیروگاه قرار گرفت. در سناریوی D با شبیه‌سازی برج جذب در محیط HYSYS و استفاده از دی گلیکول آمین، CO<sub>2</sub> و آب در گاز خروجی از دودکش نیروگاه کاهش یافت، اما به علت نبود واکنش اسید-باز، هیچ‌گونه نمکی تولید نشد. بررسی نتایج حاصل از اجرای چهار سناریو نشان داد که سناریوی A در شبیه‌سازی راکتور برای کاهش قابل ملاحظه آلودگی‌های مضر از دودکش نیروگاه رودشور با بازیافت آب و نمک موفق‌تر از سایر سناریوهاست.

نیروگاهی شامل اکسیدهای گوگرد و نیتروژن که به میزان بسیار پایین‌تری در گاز داغ خروجی از دودکش یافت می‌شوند، پیشنهاد می‌شود.

با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول ۱۴ مشخص می‌شود که سناریو A گزینه بهینه در میان سایر گزینه‌های مطرح شده است.

برای ادامه تحقیق حاضر، حذف سایر گازهای آلاینده

جدول ۱۴. مقایسه کلی سناریوهای A,B,C,D

سناریو D	سناریو C	سناریو B	سناریو A	ترکیبات
۹۱/۵۴۴	۶۵/۰۴۹	۱۳۶/۹۷۰	۳۶/۶۴۲	میزان آب در گاز خروجی از دودکش (tons/hr)
۹/۸۲۱	$۵/۲۹۵ \times ۱۰^{-۱۰}$	$۲/۸۴۰ \times ۱۰^{-۸}$	$۵/۲۹۵ \times ۱۰^{-۱۰}$	میزان CO <sub>2</sub> در گاز خروجی از دودکش (tons/hr)
$۱/۵۲۱ \times ۱۰^۳$	۱۰۸۵/۸۲۹	۲۰۳۳/۴۶۷	۱۱۱۵/۲۸۰	میزان آب در جریان خروجی از راکتور (tons/hr)
-	۳۹۸/۳۴۵	۴۰۸/۸۰۰	۴۰۶/۳۶۵	میزان نمک حاصل (tons/hr)

## یادداشت

- 1- Volatile Organic Compounds
- 2- Carbon Capture and Storage
- 3- Particulate Matter in size 10 micro meter
- 4- Solid Particulate Matter
- 5- Sodium Hydroxide
- 6- Diglycol Amin
- 7- Total Dissolved Solids

## منابع

- معاونت امور انرژی. ۱۳۸۶. *ترازنامه انرژی*، وزارت نیرو، صص ۲۴۳-۲۴۶.
- معاونت امور انرژی. ۱۳۸۶. *ترازنامه انرژی*، وزارت نیرو، صص ۱۲۹-۱۳۶.
- واتقی، ا.؛ م. زیبایی. (۱۳۸۵)، *پیش‌بینی آلودگی هوای شیراز*، محیط‌شناسی، سال سی و چهارم، شماره ۴۷، صص ۶۵-۷۲.
- Abu-zahra, R.M.M., et al. 2007. CO<sub>2</sub> Capture from Power Plants. Part 1: A Parametric Study of the Technical Performance Based on Monoethanolamine, International Journal of Greenhouse Gas Control I (2007), pages: 37-46.
- Alie, C., et al. 2005. Simulation of CO<sub>2</sub> Capture Using MEA Scrubbing: A Flow Sheet Decomposition Method. Energy Convers. Manage, No: 46, pages: 475-478.
- Barchas, R. 1992. The Kerr-McGee/ABB Lummus Crest Technology for Recovery of CO<sub>2</sub> from Stack Gases. Energy Convers. Manage, No.: 33, pages: 333-340.
- Bellows, J.C., F., Maitland. 2008. Water and Sulfur Removal from Combustion Turbine Exhaust, US Patent Documents, Patent No. : US 7,431,757, B2, pages:1-10.
- Bertucco, A., et al. 2003. Assessment of technical feasibility of CO<sub>2</sub> capture and sequestration from flue gases by process simulation. IcheapP-6, sixth Italian conference on chemical processes & engineering. Pisa, Italy: DIPIC, pages: 2-10.
- Børseth, E.K., A., Tãmåsen . 2007. Method for Desalination of Water and Removal of Carbon Dioxide from Exhaust Gases, US Patent Documents, Patent No. : US 7,309,440 B2, pages:1-11.
- Calabro, A., et al. 2004. Exergy Analysis of a "CO<sub>2</sub> Zero Emission "High Efficiency Plant. Proceedings of the ECOS, Mexico: Guanajuato, pages;1-9.
- Chakraborty, N., et al. 2008. Measurement of CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub> and NO Emissions from Coal-based Thermal Power Plants in India, Atmospheric Environmental, No: 42 (2008), pages: 1073-1082.

- Chang, H., C., Shih. 2005. Simulation and Optimization for Power Plant Flue Gas CO<sub>2</sub> Absorption-Stripping Systems. Sep. Sci. Technol., No: 40, pages: 877-909.
- Chapel, D., J., Ernest, C., Mariz. 1999. Recovery of CO<sub>2</sub> from Flue Gases: Commercial Trends. Can. Soc. Chem. En, pages:3-7.
- Corrado, A.P., et al. 2006. Environmental Assessment and Extended Exergy Analysis of a "Zero Emission ", High-Efficiency Steam Power Plant, Department of Mechanical & Aeronautical Engineering. University of Romal "La Sapienza ", Italy, Energy No.: 31 (2006), pages: 3186-3198.
- Fujii, M., et al. 2001. Recovery Of Carbon Dioxide from Combustion Exhaust Gas, US Patent Documents, Patent No. : US 6,274,108 B1, pages: 1-12.
- Gillani, N.V., et al. 1998. Relative Production of Ozone and Nitrates in Urban and Rural Power Plant Plumes, 1. Composite results based on data from 10 field measurement days. Journal of Geophysical Research, No: 103, pages: 22593-22615.
- Gurjar, R.B., et al. 2004. Emission Estimate and Trends (1990-2000) for Mega City Delhi and Implication. Atmospheric Environment, No: 38, pages: 5663-5681. <http://indiabudget.nic.in>.
- Mariz, C. 1998. Carbon Dioxide Recovery: Large Scale Design Trends, Technical, No.: 37, pages: 42-47.
- Meyer, J., et al. 2003. Hydrogen Production by Integrated Reforming and CO<sub>2</sub> Capture. 1st European Hydrogen Conference, France, pages:1-10. Also: <http://www.waterstof.org/20030725EHECP1-124.pdf>
- Miller, P., V., Atten Chris. 2004. North American Power Plant Air Emissions. Montreal, Quebec, Canada: Commission for Environment Cooperation of North America, pages:1-11, Report available on: <http://www.cec.org>;
- Mittal, M.L., C., Sharma. 2003b. Anthropogenic Emissions from Energy Activities in India: Generation and Source Characterization. Part I: Emission from Thermal Power Generation in India, pages:1-21, URL: <http://www.osc.edu/research/pcrm/emissions/India.pdf>.
- NRI (Niroo Research Institute) .2007. Statistical Reports of Electric Power Industry in Iran, Air & physical pollution laboratory, Tehran: NRI, pages:120-130, See also <http://www.nri.ac.irEn/AirLab-En.asp>.
- Skelley, P.A., et al. 1993. Process for Removing SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> from Exhaust Gases, US Patent Documents, Patent No. : 5,206,002, pages: 1-10.
- Quadrelli R., S., Peterson .2007. The Energy – Climate Change: Recent Trends in GHG Emission from Fuel Combustion, Energy Policy; 35:5938 – 52, pages:1-11.
- Rao, A.B., E.S., Rubin. 2002. A Technical, Economic and Environmental Assessment of Amine-based CO<sub>2</sub> Technology for Power Plant Greenhouse Gas Control. Environ. Sci. Technol. No: 36, pages: 4467-4475.
- Ryerson, T.B., et al. 1998. Emissions Lifetimes and Ozone Formation in Power Plant Plumes. Journal of Geophysical Research, No: 103, pages: 22569-22583.
- Sander, M., C., Mariz. 1992. The Flour Daniel Econamine FG Process: Past Experience and Present Day Focus. Energy Convers. Manage, No: 33 (5-8), pages: 341-348.
- Singh, D., et al. 2003. Techno-Economic Study of CO<sub>2</sub> Capture from an Existing Coal-fired Power Plant: MEA Scrubbing vs. O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> Recycle Combustion. Energy Convers. Manage, No: 44, pages: 3073-3091.
- Smith, R. 2005. Chemical Process And Design Integration, First Edition, Published by Center for Process Integration, School Of Chemical Engineering And Analytical Science, University Of Manchester,pages:104-159.
- Suda, T., et al. 1992. Development of Flue Gas Carbon Dioxide Recovery Technology. Energy Convers. Manage, No: 33(5-8), pages: 317-324.
- Tavanir Company. 2008. Statistical Reports of Electric Power Industry in Iran for 1968-2008, Tehran: Information and Statistical Department, pages:120-135, See also <http://statisticalpublications>.
- DOE (U.S. Department of Energy). 2009. Iran Energy Data, Statistics and Analysis – Oil, Gas, Electricity, Washington DC: Development of Energy, pages:134-156.

Varshney, K.C., M., Aggarawal. 1992. Ozone Pollution in the Urban Environment of Delhi. Atmospheric Environment, No: 3, pages: 291-294.

[http://www.aftab.ir/news.2007.jun/07/c2c1181212070\\_economy\\_marketing\\_business\\_force\\_power\\_plant.php](http://www.aftab.ir/news.2007.jun/07/c2c1181212070_economy_marketing_business_force_power_plant.php)

<http://www.nioc.ir/fpublications/mashal/404/pdf/MAIN.pdf>, 2009.

<http://www.nano.ir/papers/attach/nano-enviro-energy.pdf>, 2009.