

شبیه‌سازی فرآیند تصفیه آب ترش تولیدی در پالایشگاه مبتنی بر تعیین شرایط مناسب عملیاتی

محمد پالار¹، حسین بیکی^{1*2}

1. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی شیمی، دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین قوچان، قوچان، ایران

2. استادیار، مهندسی شیمی، دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین قوچان، قوچان، ایران

دریافت: 95/5/4 پذیرش: 96/6/1

چکیده

آلودگی آب مسئله‌ای است که مربوط به همه انسان‌ها است. با توجه به اهمیت حفظ محیط‌زیست و منابع آب، در این پژوهش شبیه‌سازی واحد تصفیه آب ترش پالایشگاه با تکیه بر تعیین شرایط مناسب عملیاتی مورد بررسی قرار گرفته است. جهت پیش‌بینی رفتار ترمودینامیک سیستم از مدل ضریب فعالیت الکترولیت-NRTL استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که دمای مناسب برای خوراک ورودی به برج حدود 40°C و فاصله مناسب سینی‌ها در برج دفع $0/54\text{ m}$ می‌باشد. در این شرایط غلظت H_2S و آمونیاک در گاز ترش خروجی از برج به حداکثر خود می‌رسد. با توجه به ملاحظات اقتصادی دبی $38\text{ m}^3/\text{h}$ برای برج پیشنهاد می‌شود.

کلمات کلیدی: آب ترش، محیط‌زیست، شبیه‌سازی، گاز ترش

مقدمه

سولفور در پالایشگاه‌هایی که فرایندهای آنها با مواد خام سولفوردار سروکار دارند، در واحدهای مختلف به صورت هیدروژن سولفور آزاد می‌شود. به آب دارای سولفید، آب ترش گفته می‌شود و فرایندی که جهت جداسازی ترکیبات سولفیدی از آب استفاده می‌شود، را دفع یا فرایند جریان سازی می‌گویند. در این فرایند ترکیباتی چون هیدروژن سولفید و آمونیوم که در آب حل شده‌اند توسط بخار آب و حرارت جدا شده و آب تصفیه می‌شود. این فرایند توسط جریان هوا نیز می‌تواند صورت گیرد [1].

فرایند دفع آب ترش در پالایشگاه‌ها و سایر صنایع جهت تصفیه آب حاوی سولفید هیدروژن و آمونیاک انجام می‌شود. در اکثر مواقع این آب علاوه بر ترکیبات ذکر شده، حاوی دی‌اکسیدکربن و سایر ناخالصی‌ها نیز

* hbeiki@qiet.ac.ir

می‌باشد [1]. هدف اصلی از فرایند دفع آب ترش، رساندن غلظت آمونیاک به مقدار کم‌تر از 50 ppm و غلظت سولفید هیدروژن به مقدار کمتر از 10 ppm می‌باشد. در واقع غلظت ناخالصی‌های یاد شده در آب باید به حدی برسد که بتوان دوباره از این آب در پالایشگاه استفاده کرد و یا به عنوان یک جریان بی خطر آنرا به محیط زیست برگرداند [1-3]. به‌طور کلی مقدار وجود هیدروژن سولفید در آب، خیلی بیشتر از آمونیوم می‌باشد و این پتانسیل بالا می‌تواند آب را به شدت ترش و مسموم سازد. اگر این آلودگی از آب جدا نشود مقدار آلودگی آب‌ها می‌تواند غیرقابل کنترل گردد. فرایند تصفیه آب، یک فرایند ساده است که توسط حرارت صورت می‌گیرد. در برج تصفیه، حرارت بین بخار و آب ترش در ریویولر مبادله می‌شود و سبب افزایش دمای آن می‌شود. در اثر وقوع واکنش‌های شیمیایی در برج ترکیباتی نظیر CO_2 ، H_2S و NH_3 از آب جدا می‌شود.

به‌طور خلاصه می‌توان گفت فرایند شیرین سازی آب طی مراحل زیر صورت می‌گیرد:

1- افزایش درجه حرارت آب ترش تا رسیدن به نقطه جوش آن

2- وقوع واکنش‌های شیمیایی رفت و برگشتی

3- کاهش فشار جزئی گازهای آزاد شده توسط جریان بخار و خروج آنها از فاز آب.

آب ترش بسته به پیچیدگی و تنوع فرایندهای موجود در پالایشگاه ممکن است از منابع مختلفی تامین شود. یکی از منابع عمده تولید کننده آب ترش در پالایشگاه‌ها، آب حاصل از بالای برج تقطیر اتمسفری است که در اثر میعان بخار عریان کننده در برج تقطیر تشکیل می‌شود [3]. در واقع آبی که از برج‌های تقطیر حاصل می‌شود، به دلیل در تماس بودن با گاز H_2S حالت اسیدی دارد و یکی از انواع آب‌های آلوده به حساب می‌آید. آب ترش پس از تصفیه در واحدهای دیگر پالایشگاه مانند واحد نمک زدایی از نفت خام، مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین از این آب تصفیه شده که دیگر خطری برای محیط زیست ندارد، می‌توان جهت شستشوی محوطه یا دستگاه‌های موجود در پالایشگاه نیز استفاده کرد.

در این پژوهش واحد تصفیه آب ترش پالایشگاه شبیه‌سازی شده است. در پالایشگاه آب ترش از واحدهایی مانند هیدروکراکینگ¹، سولفورزدایی²، کراکینگ کاتالیزوری بستر سیال³، غلظت شکن⁴ و تصفیه هیدروژنی نفت سفید⁵ گرفته شود. علاوه بر این خروجی قسمت‌هایی مانند سیستم تولید خلا برای برج خلا پالایشگاه نیز ممکن است تولیدکننده آب ترش باشد. آب ترش تولید شده در فرایندهای مختلف توسط پمپ به مخزن ذخیره واحد فرستاده می‌شود. وظیفه این مخزن پایدارسازی خوراک از لحاظ ترکیب درصد و جداسازی هیدروکربن‌های احتمالی همراه با آب می‌باشد. در این مخزن از گاز طبیعی و نیتروژن به منظور ایجاد فشار مثبت و جلوگیری از انتشار بوی نامطبوع به اتمسفر و جلوگیری از اشتعال استفاده می‌شود.

¹ Hydrocracking

² HDS

³ FCC

⁴ Visbreaker

⁵ Kerosene Hydrotreater

مطالعاتی در زمینه تصفیه آب ترش تولیدی در پالایشگاه‌ها انجام شده است [4-8]. ویلند¹ تغییرات راندمان سینی‌های برج دفع آب ترش را در طول برج بررسی کرد. او نشان داد که مقدار H_2S در سرتاسر برج و سینی به سینی متفاوت است. همچنین نتیجه گرفت که میزان دفع H_2S به شدت به تعداد سینی و مقدار بخار تزریقی وابسته است و هنگامی که نمک پایدار حرارتی در آب ترش وجود دارد سطحی از آمونیاک باقی می‌ماند که به سادگی نمی‌توان آمونیاک را از آب حذف کرد [4]. در پژوهش دیگری فرآیند جدیدی جهت حذف آمونیاک و تصفیه گاز ترش با کاهش میزان pH از 9 به 7 و حذف فنول با حلال استخراجی تحت شرایط اسیدی با استفاده از نرم‌افزار ASPEN شبیه‌سازی شد. نتایج حاکی از حذف فنول بیشتر نسبت به فرآیندهای قدیمی بود [5]. حذف فنول با استفاده از روش‌های جذب سطحی [6]، الکترولیز [7] و جداسازی غشائی مایع [8] مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به اینکه ظرفیت عملیاتی بالا است و ترکیب درصد و خصوصیات آب ترش پیچیده است [5]، روش‌های ذکر شده برای حذف فنول موجود در آب مناسب نیستند. روش‌هایی که برای تصفیه آب ترش پیشنهاد شده است تقطیر و استخراج می‌باشد [1, 2, 5].

با توجه به اهمیت حفظ منابع آب و محیط زیست تصفیه آب ترش و استفاده مجدد از آب یک ضرورت است. همچنین با توجه به ترکیبات موجود در آب ترش که عمدتاً شامل آمونیاک، دی‌اکسیدکربن، سولفید هیدروژن، فنول، اسیدهای چرب و غیره می‌باشند [1-2]، نمی‌توان آب ترش را بدون پاک‌سازی در طبیعت رها کرد. از اینرو در این پژوهش فرآیند تصفیه آب ترش پالایشگاه مورد بررسی قرار گرفته است. خوراک پالایشگاه نفت خام سنگین و ترش و میعانات گازی است که با نفتکش و خط لوله به پالایشگاه منتقل می‌شود. محصولات پالایشگاه می‌تواند شامل: بنزین با عدد اکتان بالا، انواع حلال، سوخت جت، انواع مواد اولیه روغن، نفت گاز، نفت کوره گاز مایع، قیر و گوگرد می‌باشد.

شرح فرآیند

تصفیه آب ترش در 2 واحد انجام می‌شود که از نظر طراحی کاملاً یکسان هستند. ظرفیت هر کدام 75 متر مکعب در ساعت است. وظیفه این واحدها جداسازی گازهای هیدروژن سولفور و آمونیاک با غلظت بالا از محلول آب ترش است که در سایر واحدها تولید می‌شود. محصول خروجی این واحدها آب تصفیه شده است که در دستگاه‌های نمک گیر واحدهای تقطیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. گازهای ترش جدا شده نیز به عنوان خوراک واحد گوگرد سازی مصرف می‌شوند.

آب ترش با دمای $33^\circ C$ در ابتدا وارد مخزن تلاطم گیر² می‌شود و پس از تبادل حرارت با آب عریان شده³ و رسیدن به دمای $100^\circ C$ وارد برج دفع می‌شود. پس از جداسازی در برج، گاز ترش که شامل H_2S و NH_3 می‌باشد پس از عبور از فن‌های هوایی و کاهش دما و رسیدن به دمای $98^\circ C$ وارد مخزن دریافت کننده⁴ می‌شود. در این مخزن گاز ترش از بالای مخزن وارد واحد بازیافت گوگرد می‌شود و مایع آن به عنوان جریان

¹ weiland

² Surge drum

³ Strip Water

⁴ Receiver

برگشتی از پایین مخزن به بالای برج تزریق می‌شود. پایین برج که آب عاری از H_2S و NH_3 می‌باشد وارد مبدل های پیش گرم شده و پس از تبادل حرارت به واحدهای مورد نیاز فرستاده می‌شود.

روش تحقیق

هدف از مدل سازی و شبیه سازی ریاضی، ایجاد ارتباط بین پارامترهای موثر در یک فرایند به منظور پیش بینی رفتار و عملکرد آن فرایند می‌باشد [9-10]. شبیه سازی فرآیند به کمک نرم افزار Aspen HYSYS نسخه 8/3 انجام شده است. در شبیه سازی فرض شده است که سولفید هیدروژن و دی اکسید کربن در فاز مایع به صورت یون حضور دارند که در صورت وجود آمونیاک به مقدار اضافی فرض قابل قبولی است. ولی به منظور واقعی تر شدن محاسبات، فرض تعادل شیمیایی بین یونهای حاصل از این ترکیبات و اجزای تجزیه نشده اعمال شده است. از آنجا که آب ترش مخلوطی از الکترولیتهای ضعیف و قوی است، نیاز به یک مدل پیچیده جهت پیش بینی رفتار ترمودینامیک سیستم می‌باشد. در نرم افزار Aspen یک مدل ترمودینامیکی ویژه برای الکترولیت ها وجود دارد [11]. مدل ضریب فعالیت الکترولیت -NRTL که به اختصار با ELEC-NRTL نشان داده می‌شود، برای شبیه سازی مخلوطهای الکترولیتی پیشنهاد شده است [11-12].

بر اساس مشاهدات انجام شده چون سولفید هیدروژن در آب حلالیت کمتری دارد به راحتی از آب خارج می‌شود. بنابراین در اثر فرایند دفع، نسبت آمونیاک به سولفید هیدروژن در آب زیاد می‌شود که باعث افزایش پیشرفت واکنش انحلال آمونیاک در آب می‌شود. آمونیاک خواص انحلال پذیری در آب دارد. در قسمت پایین برج میزان آمونیاک زیاد می‌شود و به تبع آن تصفیه آمونیاک موجود در آب مشکل خواهد شد. همین امر جداسازی در سینی های پایین را با مشکل مواجه می‌کند. به منظور طراحی برج دفع، دو پارامتر اساسی وجود دارد که یکی از آنها تعداد مراحل تعادلی و دیگری مقدار بخار تزریقی به برج است. با افزایش مراحل تعادلی مقدار بخار آب مورد نیاز برای یک جداسازی مشخص کاهش می‌یابد. داده های جمع آوری شده از پالایشگاه ها نشان می‌دهد مقدار مجاز آمونیاک در آب خروجی از واحد دفع به عنوان محدود کننده واحد از لحاظ طراحی و عملیات به شمار می‌رود. برج دفع پالایشگاه در فرآیند تصفیه آب ترش، دارای سینی های دریچه ای¹ با ارتفاع بند² معادل 100 mm می‌باشد. در واحد آب ترش پالایشگاه از فن های هوایی به منظور مایع سازی و جریان برگشتی به برج و از ری بویلر به منظور سیستم تزریق بخار از پایین برج استفاده شده است. گاز ترش خروجی از بالای برج به واحد گوگرد سازی فرستاده می‌شود و یا در زباله سوز³ و فلر⁴ سوزانده می‌شود. زباله سوز در واحد بازیافت گوگرد است و گازهای باقیمانده در آن می‌سوزد و سپس به اتمسفر وارد⁵ می‌شود.

به طور کلی می‌توان گفت عواملی که باعث بهبود فرایند واحد تصفیه آب ترش می‌شوند عبارتند از:

¹ Valve Tray

² Weir

³ Incinerator

⁴ Flare

⁵ Vent

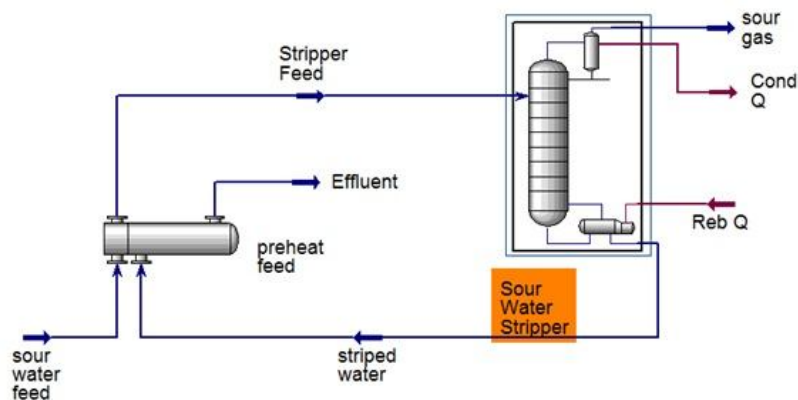
- 1- استفاده کمتر از بخار آب و افزایش تعداد سینی‌ها
- 2- استفاده از جوشاننده به منظور صرفه‌جویی در مصرف آب تمیز و کاهش حجم آب خروجی از سیستم
- 3- استفاده از سیستم مایع کننده و جریان برگشتی در بالای برج بخصوص در مواردی که بخار بالای برج به واحد گوگرد فرستاده می‌شود.

یکی دیگر از پارامترهای مهم در طراحی این واحد، دمای خوراک ورودی به برج دفع است. بخار آب ورودی به برج به دو قسمت بخار گرم کننده و بخار دفع کننده تقسیم می‌شود. کل بخار مورد استفاده همراه با مایع حاصل از خوراک، تعیین کننده قطر برج خواهد بود. ولی بخار دفع کننده، سطح مبدل حرارتی بالای برج را تحت تاثیر قرار می‌دهد. اگر دمای خوراک به اندازه‌ای باشد که بیش از 70% بخار آب بجای بالای برج در داخل برج مایع شود دارای شرایط وخیمی است. در این شرایط اگر مقدار جریان بخار آب ثابت باشد کاهش دمای خوراک باعث تاثیر بر روی عملکرد فرایند می‌شود. آب ترش قبل از ورود به برج دفع درون مبدل حرارتی (در سمت لوله) پیش گرم می‌شود. درون پوسته مبدل آب تصفیه شده که از پایین برج با دمای نزدیک به 126°C خارج می‌شود وارد شده و پیش گرم آب ترش ورودی را انجام می‌دهد. این پیش گرم سبب کاهش بار حرارتی ریپویلر و کاهش هزینه‌های عملیاتی می‌شود.

به دلیل اینکه آمونیاک در اثر حضور اسیدهای قوی و یا غیر فرار در محلول ثابت می‌ماند به راحتی توسط بخار از محلول خارج نمی‌شود. یکی از منابع تشکیل اسید، اکسید شدن ترکیبات گوگردی در آب ترش و تشکیل اسیدهایی مانند تیوسولفوریک اسید است. یکی از راه‌های جلوگیری از تشکیل این اسیدها ممانعت از تماس آب ترش با اکسیژن در زمان جمع‌آوری و انتقال آن می‌باشد.

شبیه‌سازی فرآیند

در این پژوهش واحد آب ترش پالایشگاه به کمک نرم‌افزار Aspen HYSYS شبیه‌سازی شده است. در فرآیند تصفیه آب ترش، عملیات اصلی و مهم فرآیند شامل واحد پیش گرم کن خوراک و واحد جداسازی (برج دفع) می‌شود. در شکل (نمودار جریان فرآیند نشان داده شده است.



شکل 1. نمودار جریان واحد آب ترش پالایشگاه نفت

ترکیب درصد مولی اجزاء موجود در جریان خوراک¹، در جدول (نشان داده شده است. اطلاعات مربوط به جریان خوراک و مشخصات برج موجود در نمودار جریان فرآیند در جدول (ارائه شده است.

جدول 1. ترکیب درصد خوراک

درصد مولی	جزء
99/97	H ₂ O
0/02	H ₂ S
0/01	NH ₃

جدول 2. اطلاعات جریان خوراک و برج دفع

مقدار	نام
48 (m ³ /h)	Sour water feed
100 (°C)	دمای خوراک برج
2/75 (bar)	فشار خوراک
1/5 (bar)	فشار ریویولر
1/05 (bar)	فشار مخزن دریافت کننده
40	تعداد سینی
2/2 (m)	قطر سینی‌ها
0/5 (m)	فاصله سینی‌ها

نتایج و بحث

جهت اعتبار سنجی مدل استفاده شده در نرم‌افزار، فرآیند با شرایط واقعی (اطلاعات جدول‌های 1 و 2) در نرم‌افزار اجرا شد و نتایج با اطلاعات موجود در واحد تصفیه پالایشگاه مقایسه شدند. با توجه به اینکه در این مقاله هدف تصفیه آب ترش است، خلوص آب تصفیه شده به عنوان معیار اعتبار سنجی در نظر گرفته شده است. با توجه به شرایط حاکم عملیاتی در واحد تصفیه آب ترش، انحراف بین داده‌های شبیه‌سازی و اطلاعات واحد بسیار کم می‌باشد. با توجه به تطابق خوب مدل با واحد تصفیه پالایشگاه، در ادامه شبیه‌سازی واحد تصفیه آب ترش پالایشگاه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

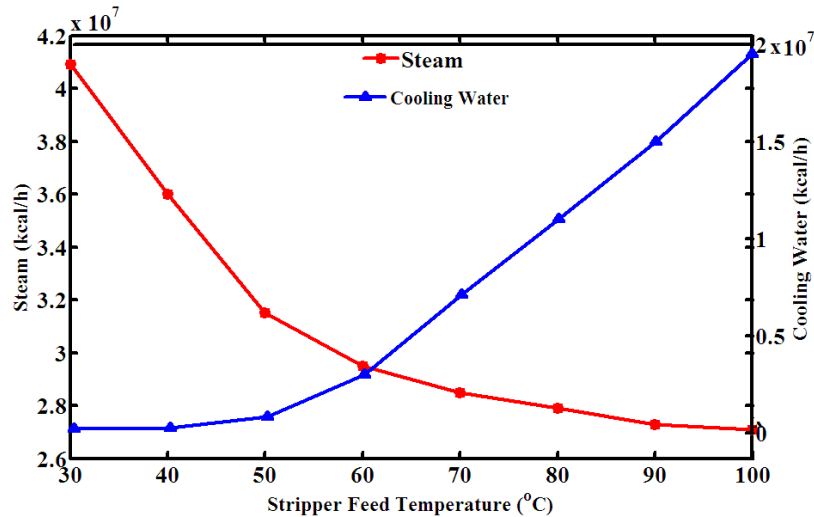
جدول 3. اعتبارسنجی مدل

اجزاء	جزء مولی در آب تصفیه واحد	جزء مولی در شبیه‌سازی
آلاینده‌ها	0/00017	0

¹Sour water feed

1	0/99983	آب
---	---------	----

در شبیه‌سازی اثر دمای و دبی خوراک برج² و فاصله بین سینی‌های برج تقطیر بر عملکرد فرآیند تصفیه آب ترش مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (2) تغییرات انرژی مربوط به بخار ریپویلر و آب کندانسور را با دمای خوراک برج برای دبی ثابت $48 \text{ m}^3/\text{h}$ نشان می‌دهد. با توجه به شکل (2)، با افزایش دمای خوراک ورودی، میزان انرژی گرمایی و به تبع آن بخار تزریقی به ریپویلر کاهش می‌یابد، در حالی که بار حرارتی کندانسور رو به افزایش است.



شکل 2. تغییرات انرژی ری‌بویلر و کندانسور با دمای خوراک برج در دبی ثابت

با افزایش دمای خوراک ورودی میزان غلظت H_2S و NH_3 در گاز ترش کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش دمای خوراک میزان تبخیر آب افزایش می‌یابد و وارد گاز ترش می‌شود. در جدول (4) تغییرات غلظت H_2S و NH_3 بر حسب جزء مولی با افزایش دمای گاز ترش نشان داده شده است.

جدول 4. تغییرات ترکیب درصد گاز ترش خروجی از بالای برج با دمای خوراک

کسر مولی NH_3	کسر مولی H_2S	دمای خوراک (°C)
0/4004	0/5996	40
0/0933	0/1397	60
0/0284	0/0425	80
0/0161	0/0241	100

اثر فاصله بین سینی‌های برج بر کسر مولی اجزاء موجود در گاز اسیدی (گاز ترش) خروجی از بالای برج در جدول (5) ارائه شده است. با توجه به جدول (5) چنانچه فاصله بین سینی‌ها $0/54 \text{ m}$ باشد، بیشترین میزان H_2S و آمونیاک در گاز اسیدی وجود دارد. این در حالی است که بخار آب در این حالت درون گاز اسیدی

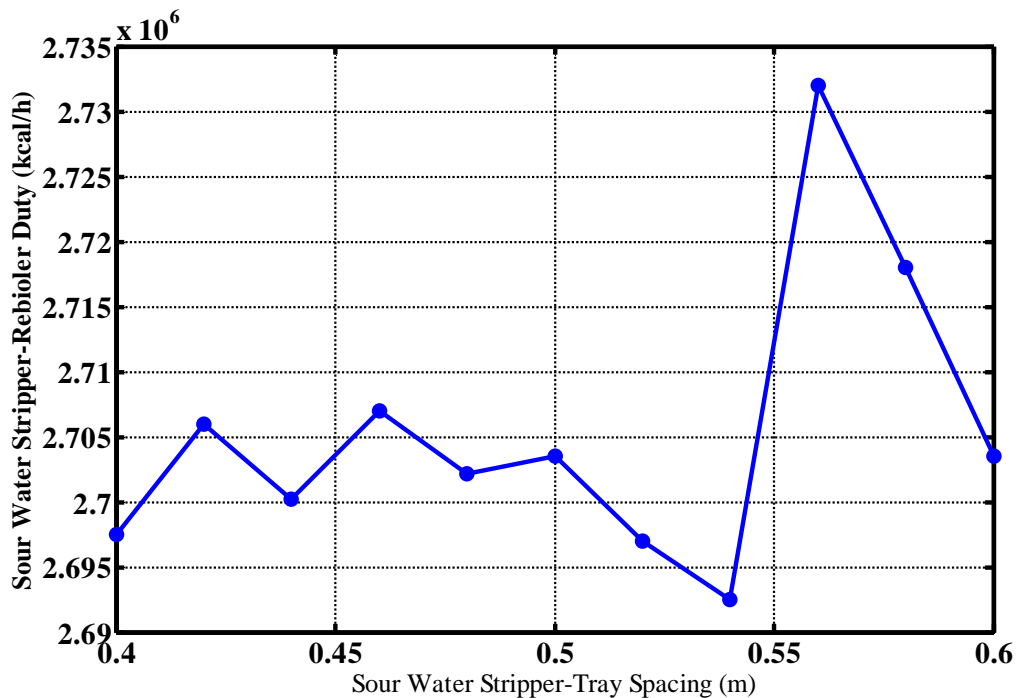
² Stripper Feed

کمترین مقدار را دارد. در واقع فرآیند دفع H_2S و آمونیاک در برجی با فاصله سینی‌های 0/54 m بیشترین میزان است.

جدول 5. اثر فاصله بین سینی‌ها بر فرآیند دفع برای خوراک با دمای $100^\circ C$

فاصله بین سینی‌ها (m)	جزء مولی H_2S ($\times 10^2$)	جزء مولی آمونیاک ($\times 10^2$)	جزء مولی آب
0/46	2/403	1/6035	0/95993
0/48	2/408	1/6075	0/95985
0/50	2/406	1/6070	0/95986
0/52	2/413	1/6120	0/95975
0/54	2/418	1/6150	0/95967
0/56	2/380	1/5855	0/96040
0/58	2/390	1/5960	0/96014
0/60	2/407	1/6063	0/95986

تغییرات بار حرارتی ری‌بویلر با فاصله بین سینی‌ها در شکل (3) نشان داده شده است. در این شکل نیز در فاصله بین سینی‌های 0/54 m میزان بار حرارتی ری‌بویلر برابر $2/693 \times 10^6$ kcal/h است که کمترین مقدار بار حرارتی ری‌بویلر می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که فاصله مناسب بین سینی‌ها جهت فرآیند دفع آمونیاک و H_2S و همچنین بار حرارتی ری‌بویلر در برج دفع آب ترش، 0/54 می‌باشد.



شکل 3. تغییرات بار حرارتی ری‌بویلر با فضای بین سینی‌ها



تغییرات دبی خوراک ورودی به برج بر ترکیب درصد اجزاء خروجی از آن در جریان گاز اسیدی (میزان تصفیه آب ترش) در جدول (6) ارائه شده است. با توجه به جدول با تغییر دبی ورودی آب ترش تغییر قابل ملاحظه ای در میزان H_2S و آمونیاک در گاز اسیدی دیده نمی شود. اگرچه افزایش دبی خوراک ورودی به برج سبب افزایش ابعاد برج و همچنین افزایش توان مورد نیاز پمپاژ می شود و به تبع آن افزایش هزینه های ثابت و عملیاتی خواهد شد.

جدول 6. اثر دبی خوراک برج بر میزان تصفیه خوراک $100^\circ C$

دبی خوراک (m^3/h)	38	48	58
جزء مولی آمونیاک	0/0161	0/016	0/0136
جزء مولی آب	0/9597	0/96	0/9661
جزء مولی H_2S	0/0241	0/024	0/0203

نتیجه گیری

باتوجه به اهمیت حفظ منابع آبی و محیط زیست در این پژوهش واحد تصفیه آب ترش پالایشگاه با استفاده از نرم افزار Aspen Hysys شبیه سازی شده است و شرایط مناسب عملیاتی مشخص شده است. جهت پیش بینی رفتار ترمودینامیک سیستم، مدل ضریب فعالیت الکترولیت-NRTL که به اختصار با ELECNRTL در نرم افزار نشان داده می شود، برای شبیه سازی واحد تصفیه آب ترش استفاده شده است. نتایج شبیه سازی ها حاکی از آن بود که برای محدوده دبی خوراک بین $38 m^3/h$ تا $58 m^3/h$ تغییر محسوسی در عملکرد تصفیه ای برج ایجاد نمی شود در حالی که افزایش دبی موجب افزایش هزینه های واحد خواهد شد. از اینرو دبی خوراک $38 m^3/h$ پیشنهاد می شود. همچنین برای بالا بردن عملکرد واحد تصفیه آب ترش بهتر است، فاصله بین سینی ها $0/54$ متر و دمای خوراک ورودی حدود $40^\circ C$ باشد. در این شرایط ترکیب درصد اجزاء خروجی از بالای برج شامل 35% آمونیاک H_2S 53% و 12% بخار آب می باشد.

منابع

1. Arthur Kohl, Richard Nielsen, Gas Purification, fifth edition, Gulf publishing company, 1997.
2. Chris Higman, Maarten van der Burgt, Gasification, Elsevier, 2003.
3. Walkrt, G. J. Design of sour water strippers quickly, hydrocarbon processing, 1969, 48 (6): pp 121-124.
4. Ralph H. Weiland, SOUR WATER STRIPPERS EXPOSED, Paper presented at the Laurence Reid Gas Conditioning Conference, Norman, Oklahoma, February 28, 2012.
5. Zhenjiang Yu, Yun Chen, Dachun Feng, and Yu Qian, Process Development, Simulation, and Industrial Implementation of a New Coal-Gasification Wastewater Treatment Installation for Phenol and Ammonia Removal, School of Chemical

- Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, P.R. China
 Ind. Eng. Chem. Res. 2010, 49, pp 2874–2881.
6. Lin, S. H.; Wang, C. S., Treatment of high-strength phenolic wastewater by a new two-step method. J. Hazard. Mater. 2002, 90, pp 205–216.
 7. Ko'rbahiti, B. K.; Tanyolac, A., Continuous electrochemical treatment of phenolic wastewater in a tubular reactor. Water Res. 2003, 37, pp 1505–1514.
 8. Venkateswaran, P.; Palanivelu, K., Recovery of phenol from aqueous solution by supported liquid membrane using vegetable oils as liquid membrane, J. Hazard. Mater. 2006, 131, pp 146–152.
9. حسین بیکی، مرتضی اسفندیاری، محاسبات عددی برای مهندسی شیمی، دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین قوچان، 1394.
10. حسین بیکی، میترا دادور، روئین حلاج، شبیه‌سازی فرآیند و راکتور تولید دی متیل اتر از متانول به کمک نرم‌افزار Hysys، مجله مهندسی شیمی ایران، 1386، دوره 6، شماره 28، صفحه 51-59.
11. Aspen Technology. Aspen plus Electrolytes Manual; Aspen Technology Inc.: Cambridge, MA, 1998.
12. کیانوش شجاع، میثاق کرامتی، حسین بیکی، شبیه‌سازی برج تقطیر دیوار میانی جهت جداسازی دی متیل اتر از مخلوط آب و متانول، فرآیند نو، 1394، شماره 50، صفحه 67-75.