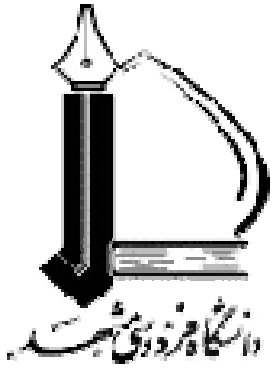

دانشکده مهندسی

گروه مهندسی شیمی

پایان نامه کارشناسی ارشد فرآوری و انتقال گاز

مقایسه فرآیند غشائی نم‌زدایی با سایر فرآیندهای نم‌زدایی گاز طبیعی

استاد راهنما:

دکتر مهدی پورافشاری چنار

نگارش:

مهسان باصفا

دی‌ماه ۱۳۹۰

تشکر و قدردانی

با سپاس و ارادت فراوان نسبت به استاد ارجمندم **جناب آقای دکتر پورافشاری** که نه تنها در پیشبرد این پروژه بلکه در طول دوران تحصیل همواره از پشتیبانی و راهنمایی‌های بی‌دریغ ایشان بهره‌مند بودم.

از مشاور محترم صنعتی پروژه **جناب آقای مهندس کسرائی** به جهت کمک‌های ایشان در امر فراهم نمودن منابع و اطلاعات لازم سپاسگزارم.

همچنین از **جناب آقای مهندس نیکنام** به جهت کمک‌های ارزنده ایشان در طول انجام این پروژه سپاسگزارم.

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم که در تمام مراحل زندگی یار و غمخوار من بوده‌اند.

چکیده

نم‌زدایی گاز طبیعی فرآیندی است که برای حذف بخار آب همراه با گاز طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. حذف رطوبت موجب جلوگیری از تشکیل هیدرات و یخ‌زدگی و نیز کاهش خوردگی در خطوط انتقال گاز می‌شود. روش‌های گوناگونی برای این منظور ارائه شده که می‌توان به جذب با استفاده از حلال، جذب سطحی، غشا و ... اشاره نمود.

هدف از این مطالعه، مقایسه تکنولوژی غشائی با دیگر روش‌های نم‌زدایی گاز طبیعی به منظور ارائه راهکاری مناسب برای استفاده در کشور جهت نم‌زدایی گاز طبیعی می‌باشد. به این منظور به کمک شبیه‌سازی و محاسبات فنی و اقتصادی و پس از ترسیم نمودار مرزهای اقتصادی بین فرآیندهای مختلف نم‌زدایی، فرآیند بهینه در فشار و سرعت‌های مختلف تعیین گردید. شبیه‌سازی واحد جذب به کمک حلال توسط نرم‌افزار Aspen-Hysys و مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های غشائی مختلف در محیط نرم‌افزار MATLAB انجام شد. به منظور حل معادلات حاکم بر غشاء، از روش المان‌های محدود استفاده شد و در ادامه ساختار بهینه غشائی تعیین گردید. بررسی‌های انجام شده نشان دادند که در شرایط عملیاتی متداول در واحدهای نم‌زدایی، هزینه جداسازی سیستم‌های غشائی بهینه تنها در فشارهای بالای خوراک، کمتر از واحدهای جذب به کمک حلال می‌باشد به نحوی که در فشارهای پایین و در سرعت‌های بیشتر از ۳۰ MMSCFD سیستم غشائی قابل رقابت با واحد جذب به کمک حلال نمی‌باشد. همچنین تحت شرایط عملیاتی مورد بررسی در این مطالعه، هزینه واحدهای جذب سطحی در مقایسه با سایر واحدهای نم‌زدایی گاز طبیعی بیشتر بود به نحوی که حتی در فشارهای بالای خوراک و سرعت‌های تقریبی ۲۶۰ MMSCFD (مشابه شرایط موجود در پالایشگاه گاز شهید هاشمی‌نژاد)، واحد جذب سطحی در مقایسه با واحد غشائی بهینه و جذب به کمک حلال توجیه اقتصادی نداشت. در نهایت فرآیند نم‌زدایی بهینه برای آن دسته از پالایشگاه‌های کشور که از فرآیند جذب سطحی بهره می‌گیرند، تعیین گردید. بر طبق نتایج، چنانچه در واحدهای نم‌زدایی به کمک فرآیند جذب سطحی از یک سیستم غشائی بهینه به تنهایی و یا در ترکیب با واحد جذب سطحی استفاده گردد به طوری که بخشی از رطوبت اولیه موجود در جریان گاز توسط سیستم غشائی حذف گردد، صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در هزینه‌های جداسازی کل ایجاد خواهد شد.

کلمات کلیدی: سیستم غشائی، شبیه‌سازی، هزینه‌های جداسازی، نم‌زدایی

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
چکیده	۱
فصل اول - مروری بر انواع فرآیندهای نم‌زدایی گاز طبیعی	۲
۱-۱- مقدمه	۳
۱-۲- نم‌زدایی گاز طبیعی	۳
۱-۳- نم‌زدایی گاز طبیعی به روش سرد کردن مستقیم	۴
۱-۴- جذب آب به کمک حلال	۵
۱-۴-۱- توصیف فرآیند نم‌زدایی به کمک حلال	۶
۱-۵- جذب آب توسط یک جاذب جامد	۱۱
۱-۵-۱- انواع جاذب‌های جامد مورد استفاده در نم‌زدایی	۱۲
۱-۵-۲- توصیف فرآیند جذب سطحی	۱۴
۱-۶- نم‌زدایی گاز طبیعی به کمک غشاء	۱۷
۱-۶-۱- معرفی	۱۷
۱-۶-۲- توصیف یک غشاء	۱۷
۱-۶-۳- فرآیند جداسازی غشائی	۱۸
۱-۶-۴- انواع مدول‌های غشائی	۲۰
۱-۶-۵- خواص غشاهای مورد استفاده در جداسازی گازها	۲۳
۱-۶-۶- حذف آب	۲۴
۱-۷- مزایای فناوری غشائی در مقایسه با سایر سیستم‌های نم‌زدایی	۲۶
فصل دوم - معرفی شرکت‌های فعال در زمینه فرآیندهای جداسازی غشائی گاز	۲۷
۲-۱- شرکت *Air Liquide*	۲۸
۲-۲- شرکت *Air Products*	۲۸
۲-۲-۱- فناوری غشای *PRISM*®	۲۹
۲-۲-۲- نم‌زدایی گاز طبیعی به کمک غشای *PRISM*®	۲۹
۲-۲-۳- نمونه واحدهای غشائی *PRISM*® نصب شده	۳۰
۲-۳- شرکت *MTR*	۳۰
۲-۳-۱- راهکار غشائی *VaporSep*® جهت تصفیه گاز طبیعی	۳۱
۲-۴- شرکت *NATCO*	۳۲

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۲-۴-۱- فناوری غشای *Cynara*	۳۲
۲-۵- شرکت *PoroGen*	۳۳
۲-۵-۱- تصفیه گاز طبیعی توسط غشای *PEEK-SEP*^{TM}	۳۳
۲-۶- شرکت *ProSep*	۳۳
۲-۷- شرکت *UBE*	۳۴
۲-۷-۱- جداسازی گاز توسط غشای پلی‌ایمیدی	۳۴
۲-۸- شرکت *UOP*	۳۵
۲-۸-۱- سیستم‌های غشائی *Separex*	۳۶
۲-۸-۲- سیستم‌های غشائی *Polysep*	۳۷
۲-۹- شرکت *Vaperma*	۳۷
۲-۹-۱- فناوری غشائی *Siftek*^{TM}	۳۷
فصل سوم - مروری بر مطالعات انجام گرفته	۳۸
۳-۱- مروری بر فعالیت‌های انجام شده در زمینه مدل‌سازی غشائی	۳۹
۳-۲- مروری بر انواع پیکربندی‌های غشائی پیشنهادی به منظور نم‌زدایی گاز طبیعی	۵۰
۳-۳- مقایسه فرآیندهای نم‌زدایی گاز طبیعی	۵۴
فصل چهارم - مدل‌سازی فرآیندهای غشائی و بررسی عملکرد پیکربندی‌های غشائی	۶۴
۴-۱- انتقال جرم در غشاء و مدل‌های مربوطه	۶۵
۴-۲- مدل انحلال-نفوذ در غشاهای چگال	۶۵
۴-۳- الگوهای جریانی در مدل‌سازی غشائی	۶۸
۴-۴- مدل‌سازی غشائی	۶۹
۴-۴-۱- روش تقریبی محاسبه سرعت تراوش اجزاء	۷۰
۴-۴-۲- مدل‌سازی دقیق	۷۱
۴-۴-۳- مدل الگوی جریان عرضی	۷۱
۴-۵- ساختارهای فرآیندهای جداسازی غشائی	۷۳
۴-۶- مدل‌سازی سیستم‌های غشائی تک و دو مرحله‌ای در این پروژه	۷۵
۴-۷- بررسی صحت نتایج مدل‌سازی غشائی	۷۷

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل پنجم - ارزیابی اقتصادی فرآیندهای نم‌زدایی غشائی، جذب به کمک حلال گلایکول، جذب سطحی، ترکیبی غشاء- گلایکول و ترکیبی غشاء- جذب سطحی	۸۰
۵-۱- ارزیابی اقتصادی واحد نم‌زدایی با گلایکول	۸۱
۵-۱-۱- طراحی و محاسبه قیمت برج‌های جذب و دفع	۸۱
۵-۱-۲- محاسبه قیمت جداکننده‌ها	۸۸
۵-۱-۳- محاسبه قیمت مبدل‌های حرارتی	۸۹
۵-۱-۴- محاسبه قیمت پمپ	۹۱
۵-۱-۵- نمونه محاسبات طراحی مبدل‌های حرارتی	۹۳
۵-۱-۵-۱- طراحی مبدل حرارتی lean/rich در واحد گلایکول	۹۳
۵-۱-۶- محاسبه ابعاد و پارامترهای مورد نیاز تجهیزات	۹۹
۵-۱-۷- محاسبه هزینه سرمایه‌گذاری	۹۹
۵-۱-۸- هزینه عملیاتی	۱۰۰
۵-۱-۹- نمونه مطالعاتی برای ارزیابی اقتصادی واحد گلایکول	۱۰۱
۵-۱-۹-۱- محاسبه قیمت برج جذب	۱۰۱
۵-۱-۹-۲- محاسبه قیمت برج احیاء	۱۰۲
۵-۱-۹-۳- محاسبه قیمت جداکننده‌ها	۱۰۳
۵-۱-۹-۴- محاسبه قیمت اسکرابر ورودی	۱۰۳
۵-۱-۹-۵- محاسبه قیمت جداکننده تبخیر آنی	۱۰۴
۵-۱-۹-۶- محاسبه قیمت مبدل‌ها	۱۰۴
۵-۱-۹-۷- محاسبه قیمت پمپ گلایکول	۱۰۵
۵-۱-۹-۸- محاسبه هزینه عملیاتی و هزینه نهایی	۱۰۶
۵-۲- ارزیابی اقتصادی واحد نم‌زدایی به روش جذب سطحی بر روی سیلیکاژل	۱۰۷
۵-۲-۱- طراحی بستر جذب سطحی	۱۰۷
۵-۲-۲- محاسبات مربوط به بستر جذب در حالت احیاء	۱۱۰
۵-۲-۳- محاسبه قیمت بسترهای جذب	۱۱۱
۵-۲-۴- محاسبه قیمت گرم‌کن	۱۱۱
۵-۲-۵- محاسبه قیمت کولر هوایی	۱۱۲

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۵-۲-۶- محاسبه قیمت جداکننده دوفازی ۱۱۲
۵-۲-۷- نمونه مطالعاتی برای ارزیابی اقتصادی واحد سیلیکاژل ۱۱۲
۵-۲-۷-۱- محاسبه هزینه عملیاتی و هزینه نهایی ۱۱۳
۵-۲-۸- بررسی صحت نتایج طراحی بسترهای جذب سطحی (مقایسه با مقادیر واقعی پالایشگاه) ۱۱۴
۵-۳- محاسبات اقتصادی فرآیندهای غشائی ۱۱۵
۵-۳-۱- محاسبه کار کمپرسور در سمت جریان تراوش‌یافته و کمپرسور میانی در سیستم غشائی دو مرحله‌ای ۱۱۶
۵-۳-۲- محاسبه قیمت کولر هوایی ۱۱۷
۵-۳-۳- محاسبات تبخیر ناگهانی در واحد غشائی ۱۱۷
۵-۳-۳-۱- محاسبه فشار حباب ۱۱۷
۵-۳-۳-۲- محاسبه فشار شبنم ۱۱۸
۵-۳-۳-۳- محاسبات تبخیر ناگهانی ۱۱۸
۵-۳-۴- شرایط عملیاتی مورد استفاده در نمونه مطالعاتی سیستم غشائی ۱۱۹
۵-۳-۵- نمونه محاسبات سیستم غشائی ۱۲۰
۵-۴- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی واحدهای نم‌زدایی به کمک گلایکول و نم‌زدایی غشائی گاز طبیعی با سایر مطالعات انجام شده ۱۲۴
۵-۵- شبیه‌سازی و بهینه‌سازی اقتصادی سیستم ترکیبی غشاء-جذب ۱۲۸
۵-۶- شبیه‌سازی و بهینه‌سازی اقتصادی سیستم ترکیبی غشاء-جذب سطحی ۱۳۰
فصل ششم - ترسیم نمودار مرزهای اقتصادی و انجام آنالیز حساسیت ۱۳۱
۶-۱- نتایج حاصل از شبیه‌سازی و ارزیابی اقتصادی سیستم غشائی ۱۳۲
۶-۱-۱- اثر تعداد المان‌ها در روش المان‌های محدود بر عملکرد سیستم‌های غشائی تک مرحله‌ای و تک مرحله‌ای با جریان برگشتی ۱۳۲
۶-۲- هزینه واحد غشائی تک مرحله‌ای با جریان برگشتی برای نم‌زدایی گاز طبیعی ۱۳۳
۶-۳- هزینه واحد جذب به کمک حلال برای نم‌زدایی گاز طبیعی ۱۳۶
۶-۴- هزینه واحد جذب سطحی برای نم‌زدایی گاز طبیعی ۱۳۶
۶-۵- ترسیم نمودار مرزهای اقتصادی واحدهای نم‌زدایی گاز طبیعی ۱۳۸

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۶-۶- آنالیز حساسیت	۱۴۰
۶-۶-۱- اثر تراوش‌پذیری اجزاء و انتخابگری غشاء بر عملکرد سیستم غشائی تک مرحله‌ای با جریان برگشتی	۱۴۰
۶-۶-۲- اثر قیمت غشاء بر عملکرد فرآیند غشائی	۱۴۳
۶-۶-۳- اثر فشار خوراک بر عملکرد فرآیندهای نم‌زدایی	۱۴۴
۶-۶-۴- اثر قیمت گاز طبیعی بر عملکرد فرآیندهای نم‌زدایی	۱۴۵
فصل هفتم - پالایشگاه‌های گاز منتخب جهت تعیین واحد نم‌زدایی بهینه	۱۴۷
۷-۱- مشخصات واحدهای نم‌زدایی پالایشگاه‌های گاز کشور	۱۴۸
۷-۲- پالایشگاه‌های گاز منتخب جهت تعیین واحد نم‌زدایی بهینه	۱۵۰
۷-۲-۱- پالایشگاه گاز شهید هاشمی‌نژاد	۱۵۰
۷-۲-۲- پالایشگاه گاز بیدبلند	۱۵۵
۷-۲-۳- پالایشگاه گاز پارسیان	۱۵۸
۷-۲-۴- پالایشگاه گاز ایلام	۱۶۱
نتیجه‌گیری و پیشنهاد	۱۶۴
منابع و مراجع	۱۶۶

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱ نمایی از یک واحد سردسازی به همراه تزریق گلایکول برای نم‌زدایی	۵
شکل ۱-۲ نمایی از واحد نم‌زدایی به کمک حلال گلایکول	۶
شکل ۱-۳ نقطه شبنم آبی گاز پس از نم‌زدایی با TEG	۸
شکل ۱-۴ نمایی از واحد نم‌زدایی به کمک جذب سطحی	۱۵
شکل ۱-۵ نحوه عملکرد مدول غشائی جداسازی گاز	۱۸
شکل ۱-۶ شمایی از ساختار غشای نامتقارن	۱۹
شکل ۱-۷ نمونه‌ای از ساختار غشای ترکیبی	۲۰
شکل ۱-۸ مدول حلزونی	۲۱
شکل ۱-۹ مدول الیاف توخالی	۲۲
شکل ۱-۱۰ نمونه ای از محفظه غشائی به همراه مدول‌ها	۲۲
شکل ۱-۱۱ پایه‌های قابل حمل و نقل غشائی	۲۳
شکل ۱-۱۲ تأثیر فشار جریان تراوش‌یافته بر راندمان یک سیستم غشائی نم‌زدایی گاز طبیعی (غظت خوراک: $n_{H2O_0} = 1000 ppm$، غلظت باقیمانده: $n_{H2O_0} = 100 ppm$، فشار خوراک: ۱۰۰۰ psia، انتخابگری آب به متان برای غشاء: ۵۰۰)	۲۵
شکل ۲-۱ سیستم غشائی *PRISM* جهت نم‌زدایی گاز طبیعی	۳۰
شکل ۲-۲ نمودار جریانی یک سیستم غشائی *FGC*	۳۱
شکل ۲-۳ نمونه‌ای از سیستم غشائی *VaporSep* جهت بازیابی *NGL* از گاز طبیعی	۳۲
شکل ۲-۴ فرمول شیمیایی غشای پلی‌ایمیدی *UBE*	۳۴
شکل ۲-۵ نحوه جداسازی بخارآب در یک خشک‌کن هوایی	۳۵
شکل ۲-۶ نحوه عملکرد مدول غشائی $Separex^{TM}$	۳۶
شکل ۳-۱ الگوهای جریانی در تراوشگرهای جداسازی گاز آ) اختلاط کامل ب) همسو ج) ناهمسو د)جریان عرضی	۳۹
شکل ۳-۲ ترکیب جریان‌های تراوش‌یافته و باقیمانده برای آ) جزء ۱ ب) جزء ۲	۴۶
شکل ۳-۳ مقایسه نتایج حاصل از حل دقیق سیستم چند جزئی و فرض سیستم دوجزئی. ترکیب جریان‌های تراوش‌یافته و باقیمانده به صورت تابعی از برش مرحله‌ای	۴۶
شکل ۳-۴ شماتیک دیاگرام مورد استفاده در مطالعه Mellon و همکاران. P_l و P_h به ترتیب فشار سمت تراوش‌یافته و باقیمانده، ΔA سطح هر المان دیفرانسیلی و n تعداد مراحل	۴۸

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۳-۵ تغییرات کسر مولی (آ) متان و (ب) بخارآب در جریان‌های تراوش‌یافته و باقیمانده بر حسب برش مرحله‌ای ۴۹

شکل ۳-۶ سطح غشای مورد نیاز بر حسب فشار جریان تراوش‌یافته برای انتخابگری ۱۰۰ (○)، ۱۰۰۰(◊) و ۱۰۰۰۰ (□) ۵۱

شکل ۳-۷ برش مرحله‌ای بر حسب فشار جریان تراوش‌یافته برای انتخابگری ۱۰۰ (○ در حضور آب و ● بدون حضور آب)، ۱۰۰۰(◊ در حضور آب و ♦ بدون حضور آب) و ۱۰۰۰۰ (□ در حضور آب و ■ بدون حضور آب) ۵۲

شکل ۳-۸ نمونه‌ای از طراحی‌های سیستم‌های غشائی نم‌زدایی گاز طبیعی با استفاده از کمپرسور جریان برگشتی (انتخابگری آب به متان برای غشاء برابر با ۵۰۰، $((p/\ell)_{H2O} = 2000GPU$) ۵۲

شکل ۳-۹ نم‌زدایی با استفاده از جریان گاز sweep در سمت جریان تراوش‌یافته (انتخابگری آب به متان برای غشاء برابر با ۵۰۰، $((p/\ell)_{H2O} = 2000GPU$) ۵۳

شکل ۳-۱۰ واحد غشائی مورد استفاده در مطالعه Binci و همکاران ۵۵

شکل ۳-۱۱ مقایسه هزینه‌های سرمایه‌گذاری مستقیم در واحد گلایکول و غشاء ۵۷

شکل ۳-۱۲ مقایسه هزینه سکوی نگهداری در واحد غشائی و گلایکول ۵۸

شکل ۳-۱۳ مقایسه CAPEX بین واحد غشائی و واحد گلایکول ۵۸

شکل ۳-۱۴ پارامترهای مورد استفاده در CAPEX ۵۹

شکل ۳-۱۵ هزینه‌های مربوط به نگهداری، نیروی انسانی و مواد شیمیایی ۵۹

شکل ۳-۱۶ مقایسه هزینه انرژی بین سیستم غشائی و گلایکول ۶۰

شکل ۳-۱۷ نتایج NPV برای حالت اول واحد غشائی ۶۰

شکل ۳-۱۸ نتایج NPV برای حالت دوم واحد غشائی ۶۱

شکل ۳-۱۹ نتایج NPV برای حالت سوم واحد غشائی ۶۲

شکل ۴-۱ شماتیک الگوی جریان عرضی در مدول غشائی ۶۹

شکل ۴-۲ نمایی از الگوی جریان عرضی برای مدول غشائی در مطالعه حاضر ۷۱

شکل ۴-۳ ساختارهای مورد استفاده در فرآیند جداسازی غشائی آ) تک مرحله‌ای ب) تک مرحله‌ای با جریان برگشتی ج) تک مرحله‌ای با جریان sweep د) دو مرحله‌ای ۷۴

شکل ۴-۴ مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی غشائی نم‌زدایی گاز طبیعی با نتایج مطالعات Weller و Steiner و نیز مطالعه Mellon و همکاران با توجه به شرایط موجود در جدول ۴-۱ ۷۸

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۴-۵ مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی غشائی نم‌زدایی گاز طبیعی با نتایج مطالعات Ohlrogge و همکاران بر مبنای شرایط عملیاتی موجود در جدول ۴-۲	۷۹
شکل ۵-۱ دیاگرام فرآیندی واحد جذب شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار *Aspen-Hysys*	۸۱
شکل ۵-۲ راندمان جداسازی آب بر حسب دبی در گردش گلایکول در غلظت‌های مختلف محلول گلایکول برای N=۱	۸۲
شکل ۵-۳ راندمان جداسازی آب بر حسب دبی در گردش گلایکول در غلظت‌های مختلف محلول گلایکول برای N=۱/۵	۸۲
شکل ۵-۴ راندمان جداسازی آب بر حسب دبی در گردش گلایکول در غلظت‌های مختلف محلول گلایکول برای N=۲	۸۳
شکل ۵-۵ راندمان جداسازی آب بر حسب دبی در گردش گلایکول در غلظت‌های مختلف محلول گلایکول برای N=۲/۵	۸۳
شکل ۵-۶ راندمان جداسازی آب بر حسب دبی در گردش گلایکول در غلظت‌های مختلف محلول گلایکول برای N=۳	۸۴
شکل ۵-۷ راندمان جداسازی آب بر حسب دبی در گردش گلایکول در غلظت‌های مختلف محلول گلایکول برای N=۴	۸۴
شکل ۵-۸ نمونه‌ای از یک مبدل حرارتی پوسته و لوله	۹۳
شکل ۵-۹ ضریب انتقال حرارت جابجایی در درون لوله	۹۶
شکل ۵-۱۰ ضریب انتقال حرارت جابجایی در درون پوسته	۹۷
شکل ۵-۱۱ دیاگرام فرآیندی واحد جذب سطحی با نوسانات دمایی	۱۰۷
شکل ۵-۱۲ ضرایب تصحیح برای جاذب برای رابطه (۳-۲) (آ) محاسبه C_{ss} (ب) محاسبه C_T	۱۰۹
شکل ۵-۱۳ اثر نسبت سطوح غشائی بر روی هزینه‌های جداسازی کل در ساختار غشائی دو مرحله‌ای با جریان برگشتی (دبی خوراک: MMSCMD ۱، فشار: psi ۷۵۰، دمای ورودی: $^{\circ}F$ ۸۶)	۱۲۴
شکل ۵-۱۴ هزینه‌های سرمایه‌گذاری مستقیم بر حسب دبی خوراک در واحدهای نم‌زدایی گلایکول و غشائی. مقایسه نتایج با مطالعه Binci و همکاران	۱۲۶
شکل ۵-۱۵ مقایسه هزینه‌های عملیاتی در واحدهای غشائی و گلایکول. مقایسه نتایج با مطالعه Binci و همکاران	۱۲۶

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۵-۱۶ مقایسه هزینه‌های سرمایه‌گذاری کل در واحدهای غشائی و گلایکول. مقایسه نتایج با مطالعه Binci و همکاران ۱۲۷

شکل ۵-۱۷ بهینه‌سازی سیستم ترکیبی غشاء-جذب برای نم‌زدایی گاز با شرایط عملیاتی جدول (۵-۳۴) ۱۲۸

شکل ۵-۱۸ بهینه‌سازی سیستم ترکیبی غشاء-جذب سطحی برای نم‌زدایی گاز با شرایط عملیاتی جدول (۲-۳) ۱۳۰

شکل ۶-۱ اثر تعداد المان‌ها در روش تفاضل‌های محدود بر هزینه جداسازی سیستم‌های غشائی تک مرحله‌ای و تک مرحله‌ای با جریان برگشتی (دبی ۷۰ MMSCFD و فشار ۷۵۰psia) ۱۳۲

شکل ۶-۲ هزینه واحد غشائی بر حسب دبی و فشار خوراک (دمای ورودی: ۸۶ °F) ۱۳۴

شکل ۶-۳ اثر دبی جریان خوراک بر هزینه‌های جداسازی سیستم‌های غشائی تک مرحله‌ای و تک مرحله‌ای با جریان برگشتی (فشار خوراک: ۷۵۰ psia، دمای ورودی: ۸۶ °F) ۱۳۵

شکل ۶-۴ اثر ترکیب خوراک بر هزینه‌های جداسازی سیستم‌های غشائی تک مرحله‌ای و تک مرحله‌ای با جریان برگشتی (فشار خوراک: ۷۵۰ psia، دمای ورودی: ۸۶ °F، دبی خوراک: ۳۵ MMSCFD) ۱۳۵

شکل ۶-۵ هزینه واحد جذب به کمک حلال گلایکول بر حسب دبی و فشار خوراک (دمای ورودی: ۸۶ °F) ۱۳۶

شکل ۶-۶ هزینه واحد جذب سطحی بر روی سیلیکاژل بر حسب دبی و فشار خوراک (دمای ورودی: ۸۶ °F) ۱۳۷

شکل ۶-۷ مقایسه هزینه‌های جداسازی کل در واحدهای مختلف نم‌زدایی بر حسب دبی خوراک (فشار خوراک: ۸۰۰ psia، دمای ورودی: ۸۶ °F) ۱۳۸

شکل ۶-۸ مقایسه هزینه جداسازی واحدهای مختلف نم‌زدایی بر حسب فشار خوراک ورودی (دمای ورودی: ۸۶ °F) ۱۳۹

شکل ۶-۹ مرزهای اقتصادی تقریبی واحدهای مختلف نم‌زدایی گاز طبیعی (دمای خوراک: ۸۶ °F، خوراک دوجزئی حاوی متان اشباع از بخارآب، مقدار رطوبت خروجی: ۴ lb/MMSCF) ۱۴۰

شکل ۶-۱۰ تأثیر انتخابگری غشاء بر هزینه‌های جداسازی سیستم غشائی تک مرحله‌ای با جریان برگشتی (دبی خوراک: ۱۰۰ MMSCFD و فشار ورودی: ۸۰۰ psia، دمای ورودی: ۸۶ °F) ۱۴۲

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۶-۱۱ تأثیر انتخابگری غشاء بر هزینه جداسازی سیستم غشائی تک مرحله‌ای با جریان برگشتی و مقایسه با عملکرد واحدهای جذب و جذب سطحی (فشار خوراک: psia ۸۰۰، دمای ورودی: $^{\circ}$F ۸۶) ۱۴۲

شکل ۶-۱۲ تأثیر تراوش‌پذیری غشاء بر هزینه جداسازی سیستم غشائی تک مرحله‌ای با جریان برگشتی و مقایسه با عملکرد واحدهای جذب و جذب سطحی (فشار خوراک: psia ۸۰۰، دمای ورودی: $^{\circ}$F ۸۶) ۱۴۳

شکل ۶-۱۳ تأثیر قیمت غشاء بر هزینه جداسازی سیستم غشائی تک مرحله‌ای در مقایسه با واحدهای جذب و جذب سطحی (فشار خوراک: psia ۸۰۰، دمای ورودی: $^{\circ}$F ۸۶) ۱۴۴

شکل ۶-۱۴ اثر فشار بر هزینه جداسازی سیستم غشائی تک مرحله‌ای در مقایسه با واحدهای جذب و جذب سطحی (دبی خوراک: MMSCFD ۱۰۰، دمای ورودی: $^{\circ}$F ۸۶) ۱۴۵

شکل ۶-۱۵ تأثیر قیمت متان بر هزینه جداسازی سیستم غشائی تک مرحله‌ای در مقایسه با واحدهای جذب و جذب سطحی (دبی خوراک: MMSCFD ۱۰۰، دمای ورودی: $^{\circ}$F ۸۶) ۱۴۶

شکل ۶-۱۶ تأثیر قیمت متان بر هزینه جداسازی سیستم غشائی تک مرحله‌ای در مقایسه با واحدهای جذب و جذب سطحی (فشار خوراک: psia ۸۰۰، دمای ورودی: $^{\circ}$F ۸۶) ۱۴۶

شکل ۷-۱ بهینه‌سازی سیستم ترکیبی غشاء-جذب سطحی برای نم‌زدایی گاز در واحد جمالی‌نیای پالایشگاه گاز شهید هاشمی‌نژاد ۱۵۳

شکل ۷-۲ بهینه‌سازی سیستم ترکیبی غشاء-جذب سطحی برای نم‌زدایی گاز در پالایشگاه گاز شهید هاشمی‌نژاد ۱۵۴

شکل ۷-۳ بهینه‌سازی سیستم ترکیبی غشاء-جذب سطحی برای نم‌زدایی گاز در پالایشگاه گاز بیدبلند ۱۵۷

شکل ۷-۴ بهینه‌سازی سیستم ترکیبی غشاء-جذب سطحی برای نم‌زدایی گاز در پالایشگاه گاز پارسیان ۱۶۰

شکل ۷-۵ بهینه‌سازی سیستم ترکیبی غشاء-جذب سطحی برای نم‌زدایی گاز در پالایشگاه گاز ایلام ۱۶۳

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۱ خواص جاذب‌های جامد متداول	۱۴
جدول ۳-۱ پارامترهای مورد استفاده برای شبیه‌سازی در مطالعه Mellon	۴۷
جدول ۳-۲ شرایط عملیاتی در نظر گرفته شده برای واحد گلایکول	۵۶
جدول ۳-۳ ضرایب هزینه سکوها	۵۷
جدول ۳-۴ محاسبات هزینه‌های نگهداری، مواد شیمیایی و نیروی انسانی	۵۹
جدول ۴-۱ شرایط عملیاتی جهت مدل‌سازی و شبیه‌سازی غشای تک مرحله‌ای و مقایسه با مطالعه Mellon و همکاران و Weller و Steiner	۷۷
جدول ۴-۲ شرایط عملیاتی جهت مدل‌سازی و شبیه‌سازی غشای تک مرحله‌ای و مقایسه با مطالعه Ohlrogge و همکاران	۷۹
جدول ۵-۱ کمترین ضخامت مجاز دیواره	۸۵
جدول ۵-۲ مقادیر F_M برای ظروف تحت فشار بر حسب نوع ماده سازنده	۸۶
جدول ۵-۳ مقادیر F_{TT} بر حسب نوع سینی	۸۷
جدول ۵-۴ مقادیر F_{TM} بر حسب جنس سینی و قطر	۸۷
جدول ۵-۵ مقادیر C_{PK} بر حسب نوع و اندازه پرکن	۸۸
جدول ۵-۶ ثابت‌های a و b برای استفاده در رابطه (۱۹-۱)	۹۰
جدول ۵-۷ مقادیر F_L بر حسب طول لوله‌ها	۹۰
جدول ۵-۸ مقادیر مختلف F_T بر حسب محدوده دبی و هد پمپ	۹۲
جدول ۵-۹ مقادیر F_M برای پمپ‌های سانتریفوژ	۹۲
جدول ۵-۱۰ مقادیر F_T بر حسب نوع موتور الکتریکی	۹۳
جدول ۵-۱۱ نتایج حاصل از طراحی مبدل‌ها، کندانسور و ریبویلر برج احیا	۹۸
جدول ۵-۱۲ پارامترهای مربوط به هزینه سرمایه‌گذاری واحد به صورت درصدی از قیمت کل تجهیزات	۹۹
جدول ۵-۱۳ پارامترهای مربوط به هزینه عملیاتی کل	۱۰۰
جدول ۵-۱۴ شرایط گاز ورودی نمونه برای استفاده در شبیه‌سازی واحد گلایکول	۱۰۱
جدول ۵-۱۵ مشخصات برج جذب (خروجی نرم‌افزار *Aspen Hysys*)	۱۰۱
جدول ۵-۱۶ مشخصات برج احیاء (خروجی نرم‌افزار *Aspen Hysys*)	۱۰۲
جدول ۵-۱۷ مشخصات اسکرابر ورودی (خروجی نرم‌افزار *Aspen Hysys*)	۱۰۳

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۵-۱۸ نتایج محاسبات برای Inlet Scrubber	۱۰۳
جدول ۵-۱۹ مشخصات جداکننده تبخیر آنی (خروجی نرم‌افزار *Aspen Hysys*)	۱۰۴
جدول ۵-۲۰ نتایج محاسبات برای جداکننده تبخیر آنی	۱۰۴
جدول ۵-۲۱ نتایج محاسبات برای مبدل Lean/Rich	۱۰۴
جدول ۵-۲۲ نتایج محاسبات برای مبدل دوم	۱۰۵
جدول ۵-۲۳ نتایج محاسبات برای ریبویلر برج احیاء	۱۰۵
جدول ۵-۲۴ نتایج محاسبات برای کندانسور برج احیاء	۱۰۵
جدول ۵-۲۵ نتایج حاصل برای پمپ گلایکول	۱۰۵
جدول ۵-۲۶ نتایج حاصل برای موتور الکتریکی پمپ گلایکول	۱۰۵
جدول ۵-۲۷ نتایج محاسبه پارامترهای هزینه عملیاتی	۱۰۶
جدول ۵-۲۸ ثوابت B و C برای معادله (۱-۲)	۱۰۸
جدول ۵-۲۹ خواص انواع جاذب‌های مورد استفاده برای جذب سطحی	۱۱۰
جدول ۵-۳۰ نتایج محاسبات اقتصادی تجهیزات واحد سیلیکاژل نمونه	۱۱۳
جدول ۵-۳۱ نتایج محاسبه پارامترهای هزینه عملیاتی	۱۱۳
جدول ۵-۳۲ مقایسه نتایج حاصل از طراحی بسترهای جذب سطحی با مقدار واقعی در پالایشگاه شهید هاشمی‌نژاد (فشار: ۱۰۰۰ psi، دما: ۱۰۰ °F، دبی خوراک: ۲۶۰ MMSCFD)	۱۱۴
جدول ۵-۳۳ پارامترهای محاسبات اقتصادی و فرضیات به کار گرفته شده برای واحدهای غشائی	۱۱۵
جدول ۵-۳۴ شرایط عملیاتی مبنا برای واحدهای نم‌زدایی	۱۱۹
جدول ۵-۳۵ خواص غشای مورد مطالعه	۱۱۹
جدول ۵-۳۶ نتایج مدل‌سازی واحد غشائی تک مرحله‌ای	۱۲۰
جدول ۵-۳۷ نتایج مدل‌سازی واحد غشائی دو مرحله‌ای	۱۲۰
جدول ۵-۳۸ نتایج مدل‌سازی واحد غشائی تک مرحله‌ای با جریان گاز sweep	۱۲۱
جدول ۵-۳۹ نتایج مدل‌سازی واحد غشائی تک مرحله‌ای با جریان برگشتی	۱۲۱
جدول ۵-۴۰ نتایج مدل‌سازی واحدهای مختلف غشائی در نم‌زدایی گاز طبیعی	۱۲۱
جدول ۵-۴۱ نتایج حاصل از محاسبه نیرومحرکه جداسازی در ساختار غشائی تک مرحله‌ای	۱۲۲
جدول ۵-۴۲ شرایط عملیاتی مورد استفاده برای ارزیابی‌های اقتصادی بر مبنای مطالعه Binci و همکاران	۱۲۵

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۵-۴۳ نتایج نهایی ارزیابی اقتصادی فرآیندهای جذب، غشائی و ترکیبی برای نمونه مطالعاتی	۱۲۹
جدول ۵-۴۴ نتایج نهایی ارزیابی اقتصادی فرآیندهای جذب سطحی، غشائی و ترکیبی برای نمونه مطالعاتی	۱۳۰
جدول ۷-۱ مشخصات واحدهای نم‌زدایی پالایشگاه‌های گاز کشور	۱۴۹
جدول ۷-۲ آنالیز گاز ورودی به واحد نم‌زدایی جمالی‌نیا	۱۵۱
جدول ۷-۳ آنالیز گاز ورودی به هر یک از واحدهای تنظیم نقطه شبنم موجود در واحدهای شیرین‌سازی پالایشگاه شهید هاشمی‌نژاد	۱۵۲
جدول ۷-۴ نتایج نهایی ارزیابی اقتصادی فرآیندهای جذب سطحی، غشائی و ترکیبی برای واحد نم‌زدایی جمالی‌نیا	۱۵۳
جدول ۷-۵ نتایج نهایی ارزیابی اقتصادی فرآیندهای جذب سطحی، غشائی و ترکیبی برای هر یک از واحدهای نم‌زدایی پالایشگاه شهید هاشمی‌نژاد	۱۵۴
جدول ۷-۶ آنالیز گاز ورودی به واحد نم‌زدایی پالایشگاه گاز بیدبلند	۱۵۶
جدول ۷-۷ نتایج نهایی ارزیابی اقتصادی فرآیندهای جذب سطحی، غشائی و ترکیبی برای واحد نم‌زدایی پالایشگاه گاز بیدبلند	۱۵۷
جدول ۷-۸ آنالیز گاز ورودی به واحد نم‌زدایی پالایشگاه گاز پارسیان	۱۵۹
جدول ۷-۹ نتایج نهایی ارزیابی اقتصادی فرآیندهای جذب سطحی، غشائی و ترکیبی برای واحد نم‌زدایی پالایشگاه گاز پارسیان	۱۶۰
جدول ۷-۱۰ آنالیز گاز ورودی به واحد نم‌زدایی پالایشگاه گاز ایلام	۱۶۲
جدول ۷-۱۱ نتایج نهایی ارزیابی اقتصادی فرآیندهای جذب سطحی، غشائی و ترکیبی برای واحد نم‌زدایی پالایشگاه گاز ایلام	۱۶۳

فصل اول

مروری بر انواع فرآیندهای نم‌زدایی گاز طبیعی

۱-۱- مقدمه

گاز طبیعی که از مخزن تا سرچشمه بالا آورده می‌شود کاملاً با گاز طبیعی مصرف‌کنندگان متفاوت است. اگرچه تصفیه گاز طبیعی در بسیاری از جنبه‌ها ساده‌تر از تصفیه و پالایش نفت خام است، اما به اندازه نفت، تصفیه آن قبل از استفاده توسط مصرف‌کنندگان ضروری است. گاز طبیعی که توسط مصرف‌کنندگان استفاده می‌شود، بیشتر از متان تشکیل شده است. همچنین گاز طبیعی حاوی مقادیری از اتان، پروپان، بوتان و هیدروکربن‌های سنگین‌تر می‌باشد. علاوه بر این اغلب گازهای طبیعی شامل ناخالصی‌هایی مانند آب، دی‌اکسیدکربن، نیتروژن و سولفید هیدروژن می‌باشند که این ناخالصی‌ها باید قبل از تحویل گاز طبیعی به خطوط لوله حذف شده و به مقدار استاندارد برسند. تصفیه گاز طبیعی شامل جداسازی تمام هیدروکربن‌های سنگین و مایعات مختلف و همچنین گازهای اسیدی و بخار آب از گاز طبیعی خالص است.

۱-۲- نم‌زدایی گاز طبیعی [۱]

گاز طبیعی حاصل از تولید طبیعی و یا موجود در مخازن نگهداری، حاوی مقادیری آب است که می‌تواند میعان شده و تشکیل هیدرات‌های گازی جامد داده و موجب گرفتگی خطوط لوله و به‌ویژه سیستم‌های کنترل گردد. گاز طبیعی که به خطوط لوله انتقال گاز فرستاده می‌شود بایستی نم‌زدایی گردد. نم‌زدایی گاز طبیعی عبارتست از حذف آب همراه با گاز طبیعی که به شکل بخار است. حذف آب موجب کاهش خوردگی، کاهش احتمال تشکیل هیدرات و یخ‌زدگی در خطوط لوله می‌گردد. همچنین رطوبت موجود بایستی برای رساندن نقطه شبنم گاز محصول به حد مطلوب خارج گردد. حداکثر مقدار مجاز آب، ۷ پوند به ازای یک میلیون استاندارد فوت مکعب از گاز طبیعی است. روش‌های مختلفی برای نم‌زدایی گاز در مقیاس صنعتی ارائه شده است که عبارتند از:

۱) سرد کردن مستقیم
۲) جذب به کمک حلال
۳) جذب سطحی
۴) استفاده از غشاء

غربال‌های مولکولی (زئولیت‌ها)، سیلیکاژل و بوکسیت از جمله جاذب‌های مورد استفاده در فرآیندهای جذب سطحی می‌باشند. در فرآیندهای جذب با حلال، متداول‌ترین جاذب‌ها دی‌اتیلن گلایکول[1] و تری‌اتیلن گلایکول[2] می‌باشند.

[1] Diethylene Glycol (DEG)
[2] Triethylene Glycol (TEG)

انتخاب نوع فرآیند نم‌زدایی وابسته به میزان رطوبت موجود در گاز طبیعی، میزان خلوص مورد نیاز و نیز عوامل اقتصادی می‌باشد. معمولاً برای حذف مقادیر زیادی از آب از فرآیند جذب با حلال و برای رسیدن به خلوص بالا از فرآیند جذب سطحی استفاده می‌گردد.

۱-۳- نم‌زدایی گاز طبیعی به روش سرد کردن مستقیم

در این روش، محتوی بخار آب موجود در گاز طبیعی با کاهش دما و افزایش فشار کاهش می‌یابد. در نتیجه گازهای گرم اشباع از آب می‌توانند به صورت جزئی توسط سردسازی مستقیم، نم‌زدایی گردند. هدف اصلی در فرآیند سردسازی، حذف هیدروکربن‌های سنگین از جریان گاز طبیعی جهت رسیدن به نقطه شبنم هیدروکربنی تعیین شده برای خط لوله می‌باشد. در این فرآیند همچنین مقداری از رطوبت موجود در جریان گاز خارج می‌گردد. در این فرآیند ابتدا گازها متراکم شده و سپس سرد می‌شوند. فرآیند سردسازی بایستی دما را به کمترین حدی کاهش دهد که از میعان بیشتر آب در فشار موجود در خطوط لوله انتقال، جلوگیری شود. در این روش در اثر سردسازی و به دنبال آن میعان بخار آب، احتمال تشکیل هیدرات می‌رود. به همین دلیل معمولاً در سیستم سردسازی از یک ضد هیدرات، استفاده می‌گردد. این روش برای سیستم‌هایی که به خط لوله زیردریایی مربوط می‌شوند و گاز پس از سرد شدن وارد لوله‌های زیردریایی طولانی می‌شود، مفید نبوده و پیشنهاد نمی‌گردد [۲].

شماتیک یک فرآیند سردسازی در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. در این فرآیند، ابتدا گاز ورودی وارد یک مبدل گاز/گاز شده و سرد می‌شود. سردسازی بیشتر از طریق فرآیند سردسازی صورت می‌گیرد. گاز خروجی از مبدل وارد چیلر می‌شود که در آن ماده سردساز گرم شده و بخار فرآیندی سرد می‌گردد. برای جلوگیری از ایجاد یخ و یا هیدرات و نیز جداسازی آب مایع شده، به داخل چیلر و مبدل گاز/گاز، گلایکول تزریق می‌شود. گلایکول مورد استفاده برای این منظور، معمولاً اتیلن گلایکول[1] می‌باشد. مخلوط حاصل وارد یک جداکننده دما پایین می‌شود که در آن گاز از قسمت بالایی، هیدروکربن‌های مایع از قسمت میانی و مخلوط آب و گلایکول از پایین خارج می‌گردند. هیدروکربن‌های مایع جهت فرآورش بیشتر فرستاده می‌شوند. مخلوط آب و گلایکول نیز در یک برج احیاء از یکدیگر جدا می‌گردند.

گاز خروجی نیز که جریان محصول می‌باشد، پیش از ورود به خط لوله، برای پیش‌سرد نمودن گاز خوراک و نیز گرم شدن وارد مبدل گاز/گاز می‌گردد.

در این فرآیند اغلب از پروپان برای سردسازی استفاده شده و دمای چیلر بین $-10^{\circ}C$ و $-40^{\circ}C$ می‌باشد [۳]. از طرفی در این فرآیند، مقدار رطوبتی که از جریان گاز خارج می‌گردد، بسیار پایین می‌باشد. به دلیل کاهش هزینه‌ها، معمولاً فرآیند سردسازی پیش از یک فرآیند نم‌زدایی دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

[1] Ethylene Glycol (EG)