

طراحی و مدل‌سازی یک فرآیند در حال بهره برداری نم‌زدایی گاز طبیعی به روش جذب سطحی

مهدی مهرپویا*

حسین قاسم زاده

دانشیار، گروه انرژی های نو و محیط زیست دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران
 کارشناسی ارشد مهندسی سیستم های انرژی، گروه انرژی های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین،
 دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله یک فرآیند در حال بهره برداری نم زدایی گاز طبیعی به روش جذب سطحی شبیه سازی و آنالیز می شود. این فرآیند برای حذف آب و رساندن آن به مقدار مجاز در گاز طبیعی طراحی شده است و از ۴ بستر دولایه تشکیل شده که ۳ بستر در حال جذب و بستر دیگر در حال احیا می باشد. از جاذب های غربال مولکولی و آلومینای فعال برای جذب آب موجود در گازها استفاده شده است. گاز ورودی به این فرآیند از آب اشباع بوده و شامل متان، نیتروژن، آب، و کربن دی اکسید در نظر گرفته شده است و با دمای ۴۲ درجه سلسیوس و فشار ۹۰ بار وارد برج می شود. برای طراحی و مدل سازی این فرآیند از نرم افزارهای اسپن و متلب استفاده شده است. در این شبیه سازی مقدار آب موجود در گاز به کمتر از ۰/۰۹ ppm رسیده که مقدار مجاز آن ۰/۱ ppm می باشد. نتایج نشان می دهند که مدل توسعه داده شده قادر است دادهای موجود را با دقت قابل قبولی (۸۸ درصد) پیش بینی کند.

واژه های کلیدی: شبیه سازی، نم زدایی، گاز طبیعی، جذب سطحی.

Design and modeling of the process of natural gas dehydration by adsorption method

M. Mehrpoya

Renewable Energies and Environmental Department, Faculty of New Science and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

H. Ghasemzadeh

Renewable Energies and Environmental Department, Faculty of New Science and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

In this paper, the simulation of the natural gas dehydration process by adsorption method has been studied. This process has been designed to remove water and reaching it to the allowed amount in the natural gas. The process consists of four beds, and each bed has two layers. Three beds are adsorbing and the fourth bed is regenerating. Molecular adsorbents and active alumina have been used to absorb water in gases. The feed gas in this process is saturated from the water and includes methane, nitrogen, water, and carbon dioxide, and is entered to the bed at the temperature of 42 ° C and the pressure of 90 bar. Aspen and Matlab have been used to design and model this process. In this simulation, the amount of water in the gas reaches to less than 0.09 ppm, with an allowable value of 0.1 ppm. The results show the developed model can predict the process outputs with acceptable accuracy.

Keywords: Simulation, Dehydration, Natural gas, Adsorption.

۱- مقدمه

گازی که از میادین استخراج می گردد دارای مقادیری ناخالصی می باشد و برای جداسازی این ناخالصی ها روش هایی وجود دارد، حذف این ناخالصی ها به روش جذب سطحی یکی از این روش ها می باشد. آب، یکی از این ناخالصی ها می باشد که وجود آن در گاز مشکلاتی زیادی را در مراحل بعدی اعم از انتقال و یا به عنوان خوراک یک واحد، به وجود می آورد.

در سال ۲۰۰۱ گاندیداسان و همکاران نم زدایی از گاز طبیعی با جاذب سیلیکاژل را مورد بررسی قرار دادند. و با تغییر شرایط عملیاتی به آنالیز این فرآیند پرداختند [1] وطنی و همکاران در سال ۲۰۰۵ واحد نم زدایی جذب سطحی با جاذب موبیل سوربید را توسط نرم افزار MATLAB شبیه سازی کردند و به مقایسه نتایج حاصل از آن با شرایط عملیاتی پرداختند. [2] ژائو و همکاران، جاذب غربال مولکولی در فرآیند نم زدایی را بررسی کردند. [3] صادق زاده و همکاران، فرآیند حذف از آب از گاز طبیعی را بررسی و با شبیه سازی این فرآیند به کمک نرم افزار Aspen Adsims¹ به آنالیز زمان شکست

پرداختند. [4] رحیم پور و همکاران در سال ۲۰۱۳ با مطالعه موردی واحد نم زدایی سرخون و با بررسی شرایط عملیاتی به بهینه سازی این فرآیند پرداختند و در نتیجه این بهینه سازی نقطه شبنم آب و نقطه شبنم هیدروکربنی آن را به ترتیب از ۱۰- به ۲۶- و از ۵- به ۹- رساندند. [5] در مطالعه ای دیگر به بررسی حذف آب از گاز طبیعی با جاذب (DEG). پرداخته شده است و با آنالیز حساسیت و بهینه سازی، نقطه شبنم آن کاهش یافته است. [6] در سال ۲۰۱۵ قزوینی و همکاران مدل سازی و شبیه سازی واحد حذف مرکاپتان به روش جذب سطحی را مطالعه کردند. گاز طبیعی در این فرآیند شامل آب، کربن دی اکسید، مرکاپتان، هیدروکربن های سنگین و متان بوده است. در نتیجه این شبیه سازی مقدار فشار از ۶/۸ بار به ۶/۱ بار کاهش یافته است. [7] در سال ۲۰۱۷ مهرپویا و همکاران فرآیند حذف مرکاپتان، هیدروکربن های سنگین و کربن دی اکسید از گاز طبیعی با روش جذب سطحی را مورد مطالعه قرار دادند و با بهینه سازی این فرآیند مقدار جریان گاز احیا از ۰/۳۵ کیلومول بر ثانیه به ۰/۲ کیلومول بر ثانیه کاهش یافت. [8]

۲- توصیف فرآیند

هدف از نم زدایی حذف آب از گاز طبیعی می باشد. وجود رطوبت می تواند مشکلاتی از قبیل تشکیل هیدرات در مسیر انتقال گاز،

¹ Aspen Adsims

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mehrpoya@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۲/۰۵

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۶/۲۵

خوردگی، و کاهش ارزش حرارتی گاز مصرفی را ایجاد کند. در این واحد عملیات نم زدایی گاز از طریق جذب سطحی آب روی بستری از غربال مولکولی (مولکولارسیو) صورت می‌پذیرد. نوع غربال مولکولی موجود در فرآیند Uop Ms می باشد. غربال مولکولی فوق دارای ساختاری کریستالی و متخلخل بوده و لذا قابلیت بالایی در گرفتن مولکولهای آب و سایر مولکولهای هم اندازه آن را دارد. یک روش مرسوم احیا با تناوب دما یا ¹ TSA است. تغییرات دما در این روش نقش اصلی را در جذب و دفع به عهده دارد. به این ترتیب که فرآیند جذب در دمای پایین انجام شده و برای دفع ذرات جذب‌شده دمای بستر را بالا می‌برند. برای گرم کردن بستر معمولاً بخشی از جریان محصول یا جریان خوراک را گرم کرده و از بستر عبور می‌دهند. در اینجا برای احیا از فرآیند TSA یا احیا با ایجاد تناوب در دما استفاده می‌شود که این عمل توسط گاز احیا با دمای ۵۶۱ کلوین صورت می‌پذیرد. این گاز دمای بستر را به حدود ۵۳۳ درجه کلوین می‌رساند که برای احیای آب جذب شده در جاذب دمای مناسبی است، سپس این گاز داغ با عبور از کولر، تا دمای ۵۷ درجه سلسیوس سرد می‌شود. بعد از گرمایش بستر در مرحله احیا، بستر با جریان گاز تا دمای ۵۰ درجه سلسیوس (۳۲۳ K) خنک می‌شود.

جدول ۲- مشخصات گاز ورودی فرض شده

CH4	0.925
C3	0.0336
N2	0.0257
CO2	0.0139
H2O	0.0017

طول بستر حاوی جاذب ۶/۶۳۵ متر می باشد که برای حذف آب از گاز طبیعی به کار می رود. قطر و ارتفاع برج از پالایشگاه و دو مورد دیگر از مقالات به دست آمده است.

جدول ۳- مشخصات کلی بسترها

Bed length (m)	۶/۶۳۵
Bed diameter (m)	۳/۰۵۰
Bed void fraction	۰/۴۲
Bulk density	۷۰۰

در این واحد از جاذب های مولکولارسیو و آلومینای فعال برای جذب آب موجود در گازها استفاده شده است.

جدول ۴- مشخصات جاذب غربال مولکولی 4A

properties	Molecular sieves
Bulk density layer1	۷۲۰ (kg/m ³)
Bulk density layer2	۶۸۰ (kg/m ³)
Heat capacity	۰/۹۶ (kJ/kg/k)
Heat of adsorption	۴۱۸۷ (kJ/kg H ₂ O)
Adsorbent Particle Radius (layer1)	۱/۵۸ (mm)
Adsorbent Particle Radius (layer2)	۳/۱۷ (mm)

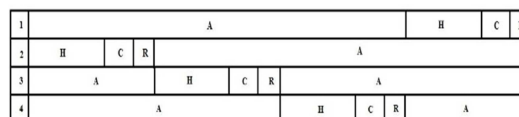
جدول ۵- مشخصات جاذب آلومینای فعال

properties	Activated Alumina
Heat capacity	۳/۸۵ (kJ/kg/k)
Heat of adsorption	۴۱۸۷ (kJ/kg h ₂ o)
Adsorbent Particle Radius	۲/۳ (mm)

۳- مدلسازی فرآیند

برای شبیه سازی فرضیات زیر در نظر گرفته شد:
 گرچه فرآیند شامل گازهای قطبی بوده اما به دلیل غلظت کم این گازها و اجرای فرآیند در دما و فشار بالا معادله‌ی حالت پنگ

زمان جذب برای هر بستر ۸ ساعت می باشد که معادل با ۲۸۸۰۰ ثانیه است و شبیه سازی انجام شده در این نرم افزار برای یک بستر در نظر گرفته می شود زمان گرمایش و سرمایش بستر نیز معادل ۶۰۰۰ ثانیه (برای گرمایش) و ۲۴۰۰ ثانیه (برای سرمایش) می‌باشد. چهار بستر در واحد موجود می باشد که سه بستر در حال جذب و بستر دیگر در حال احیا می باشد.



شکل ۱- نمودار تداخلی برج‌ها در فرآیند

برای شبیه سازی به اطلاعاتی در مورد جاذب و بستر مورد نظر نیاز است که در جداول زیر نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات گاز ورودی

Flow rate (kmol/s)	11.53
Pressure (bar)	90
Temperature (°C)	42
CH ₄	0.8757
C ₂ H ₆	0.04932
C ₃ H ₈	0.01706
C ₄ H ₁₀	0.009511
C ₃ H ₁₂	0.004245
C ₆ H ₁₄	0.004454
CO ₂	0.01394
N ₂	0.02577

گاز ورودی از آب اشباع بوده است. با استفاده از نمودارهای موجود در کتاب کمپل (Gas conditioning and processing Vol.2) مقدار جزء مولی آب موجود در گاز به دست آمد و مقدار آن در ترکیب جدید

¹ Temperature swing adsorption

$$D_{ki} = \frac{2R_p}{3} \left(\frac{8RT}{\pi M_i} \right)^{0.5} = 97R_p \left(\frac{T}{M_i} \right)^{0.5} \quad (3)$$

که در این رابطه R_p شعاع دانه بر حسب متر، M جرم مولکولی، T دما بر حسب کلوین و D_{ki} ضریب پخشندگی نادسن بر حسب متر مربع بر ثانیه می‌باشد.

هنگامی که هر دو مکانیسم پخشندگی نادسن و مولکولی موثر باشند، ضریب پخشندگی موثر را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$\frac{1}{k_{pi}} = \tau \left(\frac{1}{D_{ki}} + \frac{1}{D_{mi}} \right) \quad (4)$$

موازنه‌ی کلی انتقال جرم به‌صورت:

$$\varepsilon_b \frac{\partial C}{\partial t} + (1 - \varepsilon_b) \rho_s \sum_1^{n_c} \left(\frac{\partial q_i}{\partial t} \right) = - \frac{\partial(uC)}{\partial z} \quad (5)$$

در این حالت تجمع جرم در دانه متناسب است با گرادپان غلظت بین توده گاز و سطح جامد که با توجه به فرضیات مدل نیروی محرکه خطی فرض شد (مدل LDF).

بسط این معادله برای دانه به‌صورت زیر است:

$$\frac{\partial q_i}{\partial t} = k_i (q_i^* - q_i) \quad (6)$$

که در این رابطه k_i ضریب کلی انتقال جرم (MTC) می‌باشد که شامل انتقال جرم فیلمی در اطراف دانه جامد، انتقال جرم از طریق پخشندگی مولکولی و پخشندگی نادسن به درون حفرات بزرگ جامد و انتقال جرم از طریق نفوذ در حفرات کوچک (کریستالی) یا نفوذ سطحی می‌باشد.

با در نظر گرفتن همه مقاومت‌ها به‌صورت سری داریم:

$$\frac{1}{k_i} = \frac{r_p}{3k_{f,i}} + \frac{r_p^2}{15\varepsilon_p k_{p,i}} + \frac{r_c^2}{15\bar{K}_c D_{ci}} \quad (7)$$

$k_{f,i}$ ضریب انتقال جرم فیلمی است $k_{p,i}$ ضریب انتقال جرم ناشی از پخشندگی مولکولی و پخشندگی نادسن. D_{ci} ضریب نفوذ سطحی و \bar{K}_c ضریب هنری بی‌بعد است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\bar{K}_c = K_c \frac{\rho_s}{\varepsilon} \quad (8)$$

تعریف می‌شود. در این مسئله با توجه به زمان کوتاه برای جذب و تاثیر کم انتقال جرم در حفرات کوچک، از جمله سوم معادله صرف نظر می‌کنیم. لذا رابطه انتقال جرم به صورت:

$$\frac{1}{k_i} = \frac{r_p}{3k_{f,i}} + \frac{r_p^2}{15\varepsilon_p k_{p,i}} \quad (9)$$

۳-۱- معادله ایزوترم:

معادله لانگمویر یا ایزوترم لانگمویر یا معادله جذب لانگمویر یکی از ایزوترم‌های جذب است که توسط ایروین لانگمویر در سال ۱۹۱۶ توسعه یافته‌است [17] این معادله بر پایه‌ی فرضیات مدل جذب لانگمویر بدست آمده که برای واکنش جذب $A_g + S \leftrightarrow AA_a$ (A ماده جذب‌شونده و * مکان جذب) به‌صورت زیر بیان می‌شود [18]

$$\theta = \frac{KP}{1 + KP} \quad (10)$$

اگر θ به‌عنوان کسری از سطح جامد که توسط مولکول‌های جذب‌شده پوشیده شده است تعریف شود، می‌توان سرعت جذب و دفع

رایبسون^۱ برای توصیف رفتار ترمودینامیکی گاز در نظر گرفته شد [9]. از تغییرات دما و فشار در جهت شعاعی و زاویه صرف‌نظر می‌شود و برج یک‌بعدی در نظر گرفته می‌شود.

انتقال جرم بین فاز گاز و فاز جامد از مدل نیروی محرکه خطی (LDF) پیروی می‌کند [10] [11] [1].

الگوی جریان به‌صورت جریان قالبی به همراه پراکندگی محوری در نظر گرفته شد.

فرآیند به‌صورت ادیاباتیک در نظر گرفته شد.

روابط تعادلی جذب به‌صورت روابط لانگ مویر توسعه یافته توصیف می‌شوند.

با توجه به کوچک بودن جاذب از گرادپان دما در جاذب صرف‌نظر شد و انتقال گرما بر اساس جابه‌جایی و رسانش محوری به‌عنوان مکانیزم‌های انتقال گرما در نظر گرفته شد [6,11].

برای محاسبه افت فشار بستر از معادله ارگن^۲ که دقت مناسبی برای جریان استفاده شد [13].

با توجه به اینکه نسبت ارتفاع به قطر در بستر بالاست و همین‌طور اختلاط مناسب در جهت شعاعی و زاویه ای از تغییرات غلظت، دما و فشار در جهت شعاعی و زاویه ای صرف‌نظر شد. (مدل یک بعدی) معادله ارگن به صورت زیر است.

$$\frac{\partial P}{\partial z} = - \left(\frac{37.5 (1 - \varepsilon)^2 \mu u}{(r_p \phi)^2 \varepsilon^3} + 0.875 \rho \frac{(1 - \varepsilon) u^2}{r_p \phi \varepsilon^3} \right) \quad (1)$$

نفوذ درون حفرات جاذب به دو دسته تقسیم می‌شود: [13],[14] نفوذ مولکولی و نفوذ در حفره.

الف- پخشندگی مولکولی^۳: زمانی که اندازه حفرات جاذب بسیار بزرگتر از اندازه مولکول‌های جذب‌شونده باشد، مولکول‌های گاز تماس بسیار کمی با دیواره‌های حفرات جاذب خواهند داشت؛ بنابراین نفوذ درون جاذب همانند نفوذ در توده گاز می‌باشد.

نفوذ در حفره یا (پخشندگی نادسن^۴): اگر قطر حفرات جاذب بسیار کوچک باشد برخورد بین مولکول‌های گاز و دیواره حفرات افزایش می‌یابد. در جاذب با حفرات بسیار ریز نفوذ مولکول‌ها متفاوت است و به‌عنوان نفوذ نودسن نامیده می‌شود [15].

برای ضریب پخشندگی مولکولی دوجزئی معادلات تجربی مختلفی ارائه شده است. فرآیند شامل گازهای قطبی و غیر قطبی است با مراجعه به معادلات نفوذ مولکولی روابط Wilkes-Lee و Fuller گزینش شدند که با توجه به دما و فشار فرآیند در این تحقیق از معادله Wilkes-Lee که برای مخلوط گازهای غیر قطبی یا یک گاز غیر قطبی با یک گاز قطبی مناسب است استفاده شد. این معادله برای مخلوط گازی تا دمای ۱۰۰۰ K و فشار ۰.۷ atm، تنها ۷ درصد خطا را از مقدار تجربی نشان داده است [16].

$$D_{ij} = \frac{T^{1.5}}{p \delta_{AB}^2 \Omega_D} 2 \times 10^{-22} \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{0.5} \left(1.084 - 0.249 \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{0.5} \right) \quad (2)$$

ضریب پخشندگی نادسن از رابطه (۳) بدست می‌آید [16]:

¹ Peng-Robinson

² Ergun

³ Molecular Diffusivity

⁴ Knudsen Diffusivity

مولکول های گاز را بین دو فاز به صورت زیر بیان کرد:

$$\text{سرعت جذب: } kaP(1-\theta)$$

$$\text{سرعت دفع: } kd\theta$$

ka و kd ثابت های سرعت دفع و جذب می باشند. در لحظه ی

تبادل، سرعت دفع و جذب باهم برابر است

که K ثابت تعادلی جذب و θ عبارت به صورت زیر تعریف می شوند:

$$N_a = K_f(C - C_{p(r=r_p)}) \quad (11)$$

فرضیاتی که مدل لانگ مویر بر آن استوار است به صورت

- مولکول یا اتم جذب شده در سایت های مشخصی قرار دارد.
- در هر سایت تنها یک گونه می تواند قرار گیرد.
- انرژی جذب مستقل از کسر پوششی است و تمام سایت ها از نظر انرژی با یکدیگر هم ارزش هستند و بین مولکول ها یا اتم ها در دو سایت مجاور هیچ برهم کنشی وجود ندارد.
- جذب بصورت تک لایه انجام می شود.

ایزوترم جذب لانگمویر دوم با توجه به اینکه تغییرات دمایی را مدنظر دارد مورد استفاده قرار گرفته است که معادله آن در زیر آمده است.

$$\frac{q_i^*}{q_{m,i}} = \frac{B_i p_i}{1 + B_j p_j} \quad (12)$$

در این رابطه p_i فشار جزئی جز i ، $q_{m,i}$ مقدار بیشینه غلظت جز i در فاز جامد است. از تغییرات $q_{m,i}$ با دما به علت ناچیز بودن صرف نظر شد و به صورت ثابت در نظر گرفته شد. همانطور که اشاره شد B ضریب جذب بوده و دارای اشکال گوناگون می باشد. در این کار ما فرض کردیم ضریب جذب با دما به صورت نمایی تغییر می کند و از رابطه زیر برای هر جز بدست می آید:

$$k_i = k_{0,i} \exp\left(-\frac{\Delta H_i}{RT}\right) \quad (13)$$

ΔH_i آنتالپی جذب می باشد که مقدار آن از رابطه ی (14)

بدست می آید:

$$\Delta H_i = -R \frac{\partial \ln p}{\partial \left(\frac{1}{T}\right)} \Big|_{q_i^*} \quad (14)$$

در این رابطه p فشار جزئی گاز در حالت تعادلی و q_i^* نیز مقدار غلظت فاز جذب شده در حالت تعادلی می باشد. در واقع با توجه به این رابطه مقدار آنتالپی جذب با برآزش منحنی ایزوترم تعادلی به ازای مقادیر ثابت q_i^* بدست می آید. (با توجه به عدم دسترسی به اطلاعات دقیق دو جاذب، چون هر دو از خانواده 4A بودند لذا از خصوصیات مشترک برای دو جاذب مولکولارسیو استفاده شد)

جدول ۶- مشخصات اطلاعات ایزوترم تعادلی برای جاذب های مختلف

Adsorbent	$q_{m,i} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{kg}}\right)$	$B_{0,i} (1/\text{MPa})$	$\Delta H_i (\text{kJ/mol})$
Activated alumina	0.019	3.3×10^{-7}	62
4A MS	0.022	4.2×10^{-7}	75

۲-۳- موازنه انرژی برای فاز گاز:

معادله انرژی در فاز گاز نیز با در نظر گرفتن فرضیات از رابطه ۱۵

بدست آمد:

$$\varepsilon K_{ax} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \rho C_{pg} \frac{\partial(uT)}{\partial z} - \varepsilon \rho C_{pg} \frac{\partial T}{\partial t} - a_p (1 - \varepsilon) HTC (T - T_s) = 0 \quad (15)$$

در این معادله T دمای گاز و T_s دمای جاذب، a_p سطح ویژه جاذب، h ضریب انتقال گرما بین سیال و دانه های جاذب، C_g ظرفیت گرمایی گاز و K_{ax} ضریب اختلاط محوری برای گاز می باشد. از انتقال حرارت درون دانه های جاذب با توجه به فرضیات و ضریب انتقال حرارت هدایتی بالا صرف نظر می شود.

ضریب انتقال حرارت (HTC) نیز بین دو فاز با رابطه ۱۶ محاسبه

می شود:

$$HTC = j C_{pg} V_g \rho_g Pr^{-\frac{2}{3}} \quad (16)$$

با توجه به میزان عدد رینولدز موجود در مسئله $j = 0.983 Re^{-0.41}$ می باشد.

۳-۳- موازنه انرژی برای بستر

معادله موازنه حرارت برای بستر از رابطه ۱۷ بدست می آید:

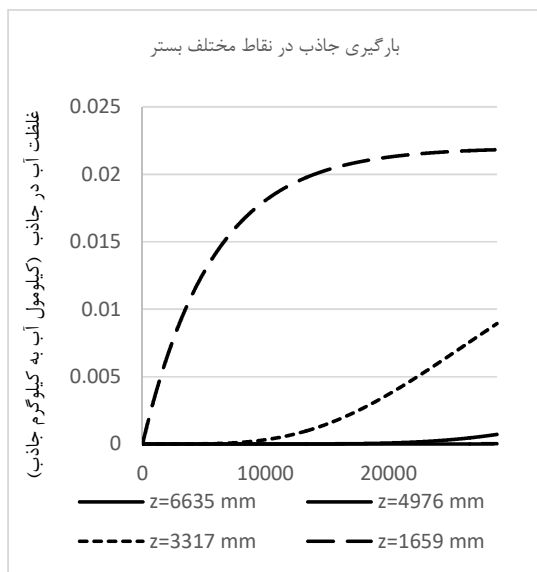
$$\rho_s C_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \rho_s \sum_{i=1}^{n_c} (-\Delta H_i) \frac{\partial q_i}{\partial t} + a_p HTC (T - T_s) \quad (17)$$

در این رابطه ρ_s چگالی جاذب و C_{ps} ظرفیت گرمایی دانه های جاذب می باشد [11]

۴- نتایج

۴-۱- میزان غلظت آب در جریان خروجی

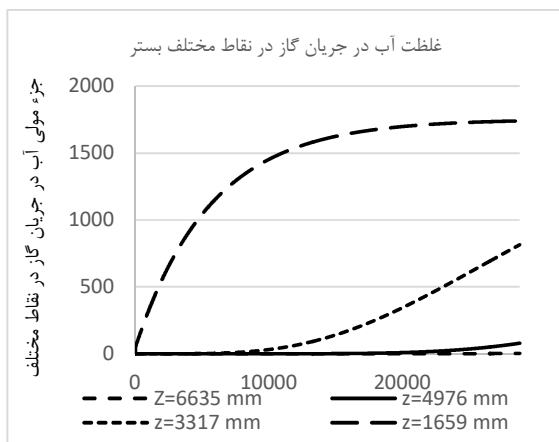
مقدار آب خروجی در گاز طبیعی بر اساس شرایط طراحی در شکل زیر نشان داده شده است، بر این اساس همانطور که از شکل مشخص است. در آخرین لحظه از فرآیند جذب غلظت آب در گاز خروجی از برج به حدود ۲۵۵ ppm می رسد که این بدترین حالت برای یک بستر است. در ادامه این گاز با خروجی از سه بستر دیگر که با تاخیر زمانی ۹۵۴۰ ثانیه از این بستر کار می کنند ترکیب می شود که جمع غلظت آب حدود کمتر از ۰/۰۱ ppm است ترکیب می شود که غلظت آب در گاز خروجی را به عددی کمتر از ۰/۰۹ ppm می رساند که زیر محدوده استاندارد طراحی ۰/۱ ppm است [19].



شکل ۴- بارگیری جاذب از آب در نقاط مختلف بستر

۴-۴- غلظت آب در جریان گاز در نقاط مختلف درون بستر

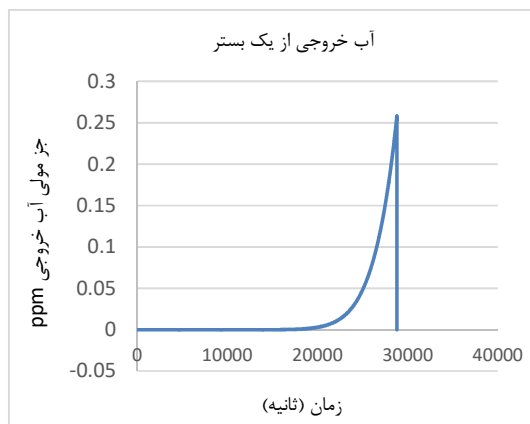
در بالای برج خصوصا لایه‌ی الومینا و مولکولارسیو بالایی چون زمان ماند در ناحیه انتقال جرم بالاست، برج به حالت تعادلی می‌رسد. به عبارتی گاز در تمام ساعات جذب با قسمت‌های بالایی در حال انتقال جرم است و به مرور که ناحیه انتقال جرم به سمت پایین حرکت می‌کند در تماس با قسمت‌های پایینی قرار می‌گیرد. در اینجا در چهار نقطه از بستر غلظت گاز بررسی می‌شود. در بررسی ابعاد دقت شود نقطه $Z=0$ در بالای برج تعریف شده و راستای عمودی مطابق با جهت حرکت در بستر می‌باشد لذا نقطه $Z=6635$ mm معرف نقطه پایینی بستر است.



شکل ۵- جز مولی آب در جریان گاز در نقاط مختلف بستر در مرحله جذب

۴-۵- غلظت آب در جریان گاز در نقاط مختلف برج در مرحله احیا

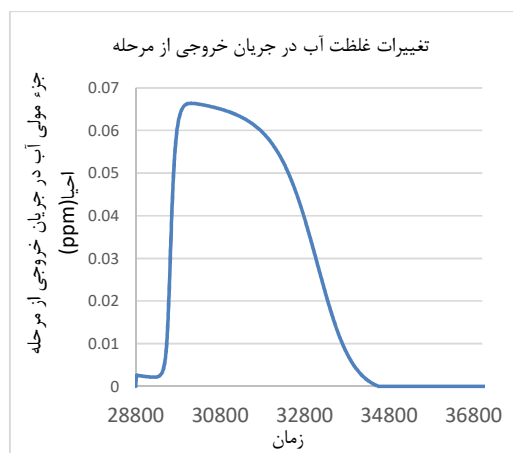
در مرحله گرمایش احیا، به مرور نقاط مختلف بستر از ترکیبات



شکل ۲- جز مولی آب خروجی از بستر جذب

۴-۲- نمودار غلظت آب در جریان احیا خروجی از برج

در نمودار زیر غلظت آب در جریان های خروجی در مرحله احیا (شامل گرمایش و سرمایش)، نشان داده شده است. بستر با گرم شدن توسط جریان گازی که تا ۲۸۸ درجه سانتی گراد (۵۶۱ K) گرم دارد احیا می‌شود. طبق نمودار این میزان دما قابلیت جداسازی ذرات آب جذب شده در بستر را به خوبی فراهم می‌کند. زمان انتهای احیا ثانیه ۳۴۵۶۰ است. بستر هم در زمان حدود ۳۴۵۰۰ ثانیه کاملا احیا می‌شود.

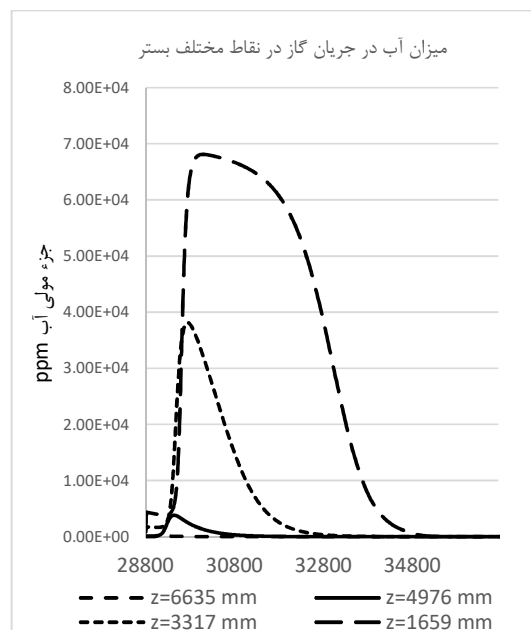


شکل ۳- جز مولی آب در جریان خروجی از مرحله احیا

۴-۳- بارگیری جاذب در نقاط مختلف برج در مرحله جذب

در شکل ۴ میزان غلظت آب در جاذب در نقاط مختلف بستر مشاهده می‌شود.

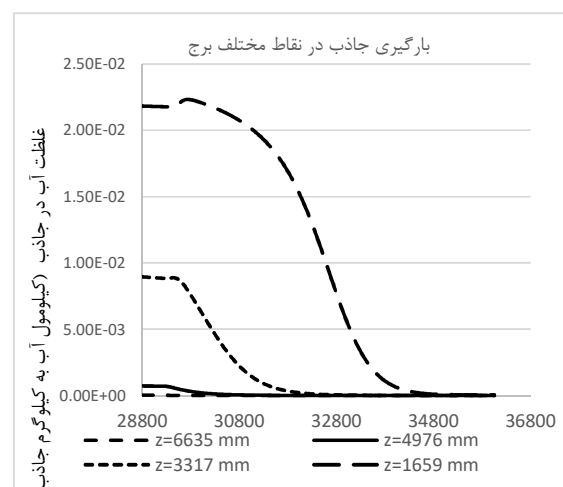
جذب شده عاری می‌شود. دبی گاز احیا کم و دارای دمایی زیادی است و غلظت آلاینده‌ها در آن بالاست. نمودار میزان غلظت آب در جریان گاز در ۴ نقطه مختلف از برج در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۶- جز مولی آب در جریان گاز در نقاط مختلف بستر در مرحله احیا

۴-۶- بارگیری جاذب در نقاط مختلف برج در مرحله احیا

در مرحله احیا با گرمایش بستر به مرور بستر از جذب شونده عاری می‌شود. نتایج شبیه ساز در زمان‌های مختلف در نقاط مختلف برج مشخص می‌کند نقاط بالایی برج که بیشترین جذب را در مرحله جذب داشته‌اند و بیشتر بارگیری شده‌اند به دلیل جریان معکوس احیا نسبت به جریان جذب، دیرتر از مواد جذب شونده عاری می‌شوند.

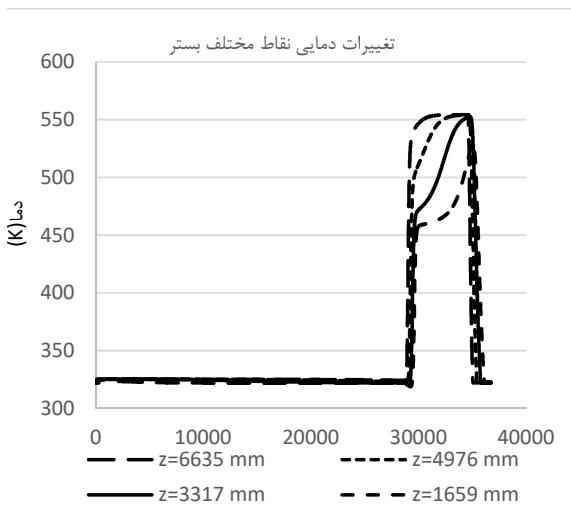


شکل ۷- بارگیری جاذب در نقاط مختلف بستر در مرحله احیا

۴-۷- تغییرات دمایی نقاط مختلف بستر

در طول فرآیند حین فرآیند جذب و گرمایش و سرمایش، بستر

تغییرات دمایی مختلفی را تجربه می‌کند. عامل اصلی در احیای بستر نیز در این فرآیند، گرمایش بستر و جدا شدن جذب شونده از روی آن است. لذا با این توصیفات بررسی تغییرات دمایی در طول بستر کمک به بررسی رفتار بستر در مراحل جذب و دفع می‌کند. نمودار تغییرات دمایی در چهار نقطه مختلف از بستر در شکل زیر نشان داده است.



شکل ۸- تغییرات دمایی در نقاط مختلف بستر

۵- نتیجه‌گیری

طراحی و مدلسازی فرآیند مورد نظر به روش جذب سطحی با جاذب‌های مولکولارسیو و آلومینای فعال برای حذف آب انجام شده است. برای مدلسازی و طراحی این فرآیند از نرم افزارهای Aspen و MATLAB استفاده شد. نتایج حاصل از شبیه سازی مقدار آب موجود در گاز را به کمتر از ۰/۰۹ ppm رسانده که مقدار مجاز آن (۰/۸ ppm) کمتر است و در نتیجه قابل قبول می‌باشد [19]. در ادامه نتایج دیگری از این مدلسازی استخراج شده نمودارهای آن ارائه شده است.

۶- نمادها

T	دما (°C)
D_{ki}	ضریب پخشندگی ناسن (m^2/s)
P	فشار
ΔH	گرمای جذب (J/mol)
k_i	ضریب انتقال جرم (m/s)
ΔH_i	گرمای جذب هر جز (J/mol)
$D_{m,i}$	ضریب پخشندگی مولکولی هر جزء (m^2/s)
R	ثابت جهانی گاز ($J.mol^{-1}K^{-1}$)
C_i	غلظت هر جز i در فاز گاز ($mol.m^{-3}$)
M	جرم مولکولی ($kg/kmol$)
Pr	عدد پرانتل
Ω_D	پارامتر وابستگی نفوذ ویک لی
ρ_S	چگالی جاذب ($kg.m^{-3}$)

- [15] Welty J. R., Wicks C. E., Rorrer G., and Wilson R. E., Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer: John Wiley & Sons, 2009.
- [16] Perry R. H. and Green D. W., Perry's chemical engineers' handbook: McGraw-Hill Professional, 1999.
- [17] Langmuir I., The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical society*, Vol. 40, pp. 1361-1403, 1918.
- [18] PAUL M. Manual of symbols and terminology for physicochemical quantities and units. 1979.

[۱۹] حسین قاسم زاده، مهدی مهرپویا، فتح اله پورفیاض، حامد کاظم پور، عارف عزوجی، سومین همایش بین المللی نفت، گاز و پتروشیمی، شبیه سازی فرآیند حذف آب و هیدرو کربن های سنگین از گاز طبیعی به روش جذب سطحی، تهران، ایران، ۱۳۹۴.

$$\rho_g \text{ چگالی گاز } (kg.m^{-3})$$

$$q_i^* \text{ غلظت فاز جذب شده تعادلی } (mol.kg^{-3})$$

۷- تقدیر و تشکر

این کار با حمایت پالایشگاه گاز پارسیان انجام شده است. نویسندگان این مقاله بدین وسیله تشکر و قدردانی خود را از پالایشگاه گاز پارسیان به سبب حمایت از این پژوهش ابراز می نمایند

۸- مراجع

- [1] Gandhidasan P., Al-farayedhi A. A., and A. A. Al-mubarak, Dehydration of natural gas using solid desiccants. Vol. 26, pp. 855-868, 2001.
- [۲] علی وطنی، نیما نویدی، شبیه سازی و بهینه سازی واحد نم زدایی پالایشگاه گاز شهید هاشمی نژاد خانگیران، ۲۰۰۵.
- [3] Zou C., Zhao P., Wang M., Liu D., Wang H., and Wen Z., Failure analysis and faults diagnosis of molecular sieve in natural gas dehydration. *Eng. Fail. Anal.*, Vol. 34, no. 8, pp. 115-120, 2013.
- [۴] محمدجعفر صادق زاده، مهران نصیربد محمود مشفقیان، مطالعه تأثیر پسماند در محاسبه زمان شکست بستر در فرآیند نم زدایی با غربال مولکولی، ۲۰۱۳.
- [5] Rahimpour M. R., Saidi M., and Seifi M., Improvement of natural gas dehydration performance by optimization of operating conditions: A case study in Sarkhun gas processing plant, *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, Vol. 15, pp. 118-126, 2013.
- [6] Rouzbahani A. N., Bahmani M., J. Shariati, T. Tohidian, and Rahimpour M. R., *Journal of Natural Gas Science and Engineering Simulation*, optimization, and sensitivity analysis of a natural gas dehydration unit. Vol. 21, 2014.
- [7] Qazvini O. T. and Fatemi S., Modeling and Simulation Pressure - Temperature Swing Adsorption Process to Remove Mercaptan from Humid Natural Gas; A Commercial Case Study, *Sep. Purif. Technol.*, 2014.
- [8] Yousefi H., Mehrpooya M., Naeiji and E., Modeling and optimization of currently in operation natural gas desulfurization process using adsorption separation method. *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 120, No. June, pp. 220-233, 2017.
- [9] Amooy A. A., A Modified Peng-Robinson Equation State for Prediction of Gas Adsorption Isotherm. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Vol. 22, pp. 628-633, 2014.
- [10] Shirani B., Kaghazchi T., and Beheshti M., Water and mercaptan adsorption on 13X zeolite in natural gas purification process. *Korean journal of chemical engineering*, Vol. 27, pp. 253-260, 2010.
- [11] Qazvini O. T. and Fatemi S. Modeling and simulation pressure-temperature swing adsorption process to remove mercaptan from humid natural gas; a commercial case study. *Separation and Purification Technology*, Vol. 139, pp. 88-103, 2015.
- [12] F Da Silva. A., Silva J. A., and Rodrigues A. E. A general package for the simulation of cyclic adsorption processes. *Adsorption*, Vol. 5, pp. 229-244, 1999.
- [13] Yang R. T., *Adsorbents: fundamentals and applications*: John Wiley & Sons, 2003.
- [14] Do D. D., *Adsorption Analysis: Equilibria and Kinetics*: (With CD Containing Computer Matlab Programs) Vol. 2: World Scientific, 1998.