

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

مهدی مهرپویا\*

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

حسین قاسم زاده

## چکیده

در این مقاله یک فرآیند در حال بهره برداری نم‌زدایی گاز طبیعی به روش جذب سطحی شبیه‌سازی و آنالیز می‌شود. 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 می‌باشد. از جاذب‌های غریبال 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 دی‌اکسید در نظر گرفته شده است و با دمای ۴۲ درجه سلسیوس و فشار ۹۰ بار وارد برج می‌شود. برای طراحی و مدل‌سازی این فرآیند از نرم افزارهای اسپن و متلب استفاده شده است. در این شبیه‌سازی مقدار آب موجود در گاز به کمتر از ۰/۰۹ ppm رسیده که مقدار مجاز آن ۰/۱ ppm می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که مدل توسعه داده شده قادر است داده‌های موجود را با دقت قابل قبولی (۸۸ درصد) پیش‌بینی کند.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، نم‌زدایی، 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 می‌گردد دارای مقادیری ناخالصی می‌باشد و برای جداسازی این ناخالصی‌ها روش‌هایی وجود دارد، حذف این ناخالصی‌ها به روش جذب سطحی یکی از این روش‌ها می‌باشد. آب، یکی از این ناخالصی‌ها می‌باشد که وجود آن در گاز مشکلاتی زیادی را در مراحل بعدی اعم از انتقال و یا به عنوان خوراک یک واحد، به وجود می‌آورد.

در سال ۲۰۰۱ گاندیداسان و همکاران نم‌زدایی 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 نم‌زدایی جذب سطحی با جاذب موبیل سوربید را توسط نرم افزار MATLAB شبیه‌سازی کردند و به مقایسه نتایج حاصل از آن با شرایط عملیاتی پرداختند. [2] ژائو و همکاران، جاذب غریبال مولکولی در فرآیند نم‌زدایی را بررسی کردند. [3] صادق زاده و همکاران، فرآیند حذف از آب از گاز طبیعی را بررسی و با شبیه‌سازی این فرآیند به کمک نرم افزار Aspen Adsims<sup>1</sup> به آنالیز زمان شکست

پرداختند. [4] رحیم پور و همکاران در سال ۲۰۱۳ با مطالعه موردی واحد نم‌زدایی سرخون و با بررسی شرایط عملیاتی به بهینه‌سازی این فرآیند پرداختند و در نتیجه این بهینه‌سازی نقطه شبنم آب و نقطه شبنم هیدروکربنی آن را به ترتیب از ۱۰- به ۲۶- و از ۵- به ۹- رساندند. [5] در مطالعه‌های دیگر به بررسی حذف آب از گاز طبیعی با جاذب (DEG) پرداخته شده است و با آنالیز حساسیت و بهینه‌سازی، نقطه شبنم آن کاهش یافته است. [6] در سال ۲۰۱۵ قزوینی و همکاران مدل‌سازی و شبیه‌سازی واحد حذف مرکاپتان به روش جذب سطحی را مطالعه کردند. گاز طبیعی در این فرآیند شامل آب، کربن دی‌اکسید، مرکاپتان، هیدروکربن‌های سنگین و متان بوده است. در نتیجه این شبیه‌سازی مقدار فشار از ۶/۸ بار به ۶/۱ بار کاهش یافته است. [7] در سال ۲۰۱۷ مهرپویا و همکاران فرآیند حذف مرکاپتان، هیدروکربن‌های سنگین و کربن دی‌اکسید از گاز طبیعی با روش جذب سطحی را مورد مطالعه قرار دادند و با بهینه‌سازی 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 نم‌زدایی حذف آب از گاز طبیعی می‌باشد. وجود رطوبت می‌تواند مشکلاتی از قبیل تشکیل هیدرات در مسیر انتقال گاز،

<sup>1</sup> Aspen Adsims

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

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 می پذیرد. 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 <sup>1</sup> 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 جذب شده دمای بستر را بالا می برند. برای گرم کردن بستر معمولاً بخشی از جریان محصول یا جریان خوراک را گرم کرده و از بستر عبور می دهند. در اینجا برای احیا از فرآیند TSA یا احیا با ایجاد تناوب در دما استفاده می شود که این عمل توسط گاز احیا با دمای ۵۶۱ کلوین صورت می پذیرد. این گاز دمای بستر را به حدود ۵۳۳ درجه کلوین می رساند 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 می شود. بعد از گرمایش بستر در مرحله احیا، بستر با جریان گاز تا دمای ۵۰ درجه سلسیوس (۳۲۳ K) خنک می شود.

جدول ۲- مشخصات گاز ورودی فرض شده

CH4	0.925
C3	0.0336
N2	0.0257
CO2	0.0139
H2O	0.0017

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) می باشد. چهار بستر در واحد موجود می باشد که سه بستر در حال جذب و بستر دیگر در حال احیا می باشد.

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 <sup>3</sup> )
Bulk density layer2	۶۸۰ (kg/m <sup>3</sup> )
Heat capacity	۰/۹۶ (kJ/kg/k)
Heat of adsorption	۴۱۸۷ (kJ/kg H <sub>2</sub> O)
Adsorbent Particle Radius (layer1)	۱/۵۸ (mm)
Adsorbent Particle Radius (layer2)	۳/۱۷ (mm)

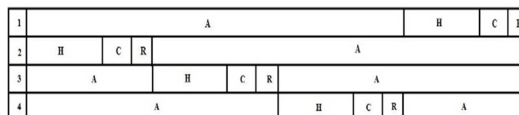
جدول ۵- مشخصات جاذب آلومینای فعال

properties	Activated Alumina
Heat capacity	۳/۸۵ (kJ/kg/k)
Heat of adsorption	۴۱۸۷ (kJ/kg h <sub>2</sub> 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 معادله ی حالت پنگ

شکل ۱- نمودار تداخلی برج ها 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 <sub>4</sub>	0.8757
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.04932
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.01706
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.009511
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.004245
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0.004454
CO <sub>2</sub>	0.01394
N <sub>2</sub>	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

<sup>1</sup> 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 گرادیان 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 جاذب، انتقال جرم از طریق پخشندگی مولکولی و پخشندگی نادسن به درون حفرات بزرگ جاذب 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  $\theta$  به‌عنوان کسری از سطح جاذب که توسط مولکول‌های جذب‌شده پوشیده شده است تعریف شود، می‌توان سرعت جذب و دفع

رایبسون<sup>۱</sup> 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 گرادیان 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<sup>۲</sup> 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<sup>۳</sup>: 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): 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]:

<sup>1</sup> Peng-Robinson

<sup>2</sup> Ergun

<sup>3</sup> Molecular Diffusivity

<sup>4</sup> 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  $\theta$  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:

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

$\Delta H_i$  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 برازش 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	$3.3 \times 10^{-7}$	62
4A MS	0.022	$4.2 \times 10^{-7}$	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  $j = 0.983 \text{ Re}^{-0.41}$  می باشد.

### ۳-۳- موازنه انرژی برای بستر

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

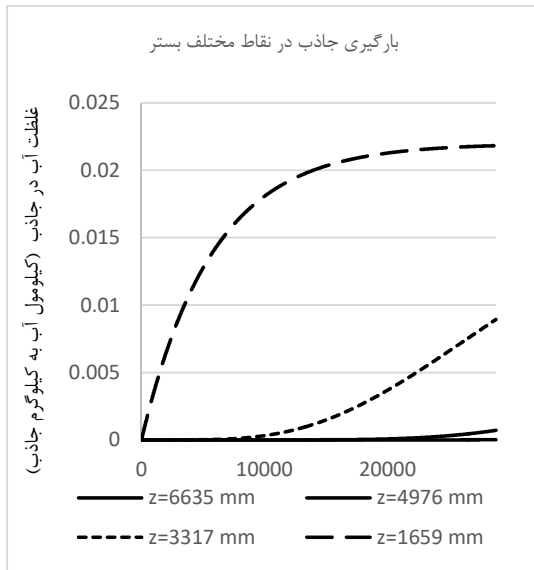
$$\rho_s C_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \rho_s \sum_{i=1}^{n_c} (-\Delta H_i) \frac{\partial q_i}{\partial t} + a_p HTC (T - T_s) \quad (17)$$

در این رابطه  $\rho_s$  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].



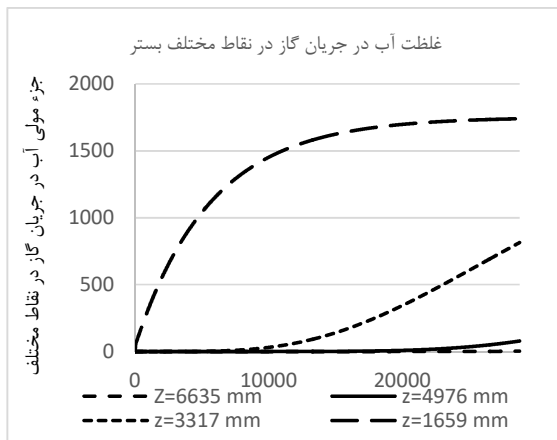
شکل ۴- بارگیری جاذب از آب در نقاط مختلف بستر

#### 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  $Z=6635$  معرف نقطه پایینی بستر است.

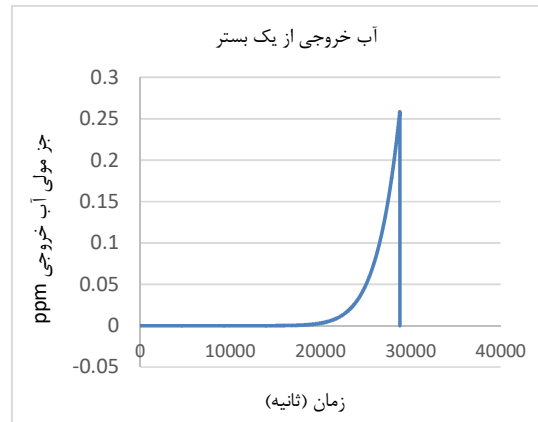


شکل ۵- جز مولی آب در جریان گاز در نقاط مختلف بستر در مرحله جذب

#### ۴-۵- غلظت آب در جریان گاز در نقاط مختلف برج در

##### مرحله احیا

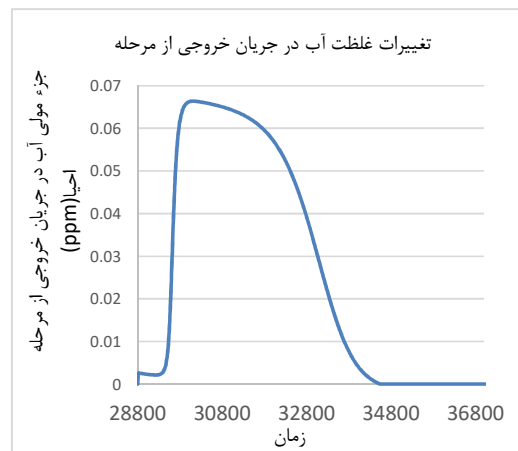
در مرحله گرمایش احیا، به مرور نقاط مختلف بستر از ترکیبات



شکل ۲- جز مولی آب خروجی از بستر جذب

#### ۲-۴- 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.



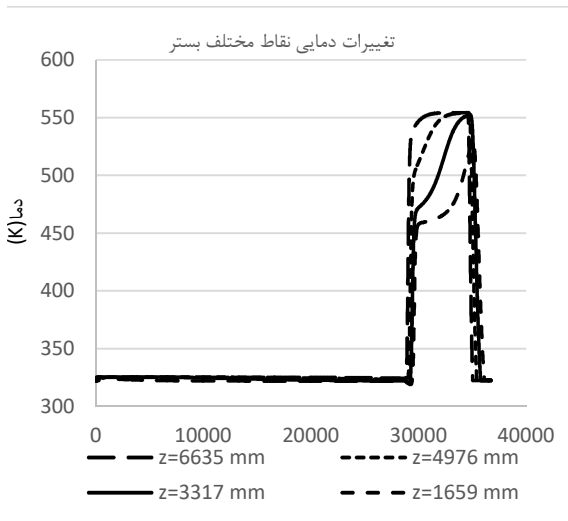
شکل ۳- جز مولی آب در جریان خروجی از مرحله احیا

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

##### جذب

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

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

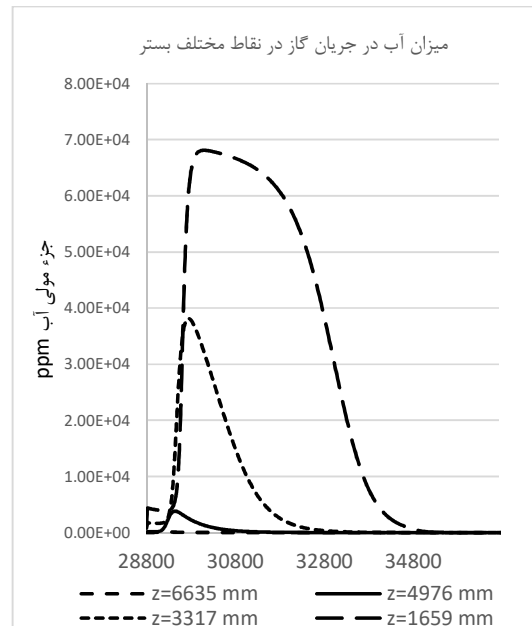
#### ۵- نتیجه‌گیری

طراحی و مدلسازی فرآیند مورد نظر به روش جذب سطحی با جذب های 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 ۰/۰۹ppm رسانده که مقدار مجاز آن (۰/۸ppm) 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
$\Delta H$	گرمای جذب (J/mol)
$k_i$	ضریب انتقال جرم (m/s)
$\Delta H_i$	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 پراوتل
$\Omega_D$	پارامتر وابستگی نفوذ ویک لی
$\rho_S$	چگالی جاذب ( $kg.m^{-3}$ )

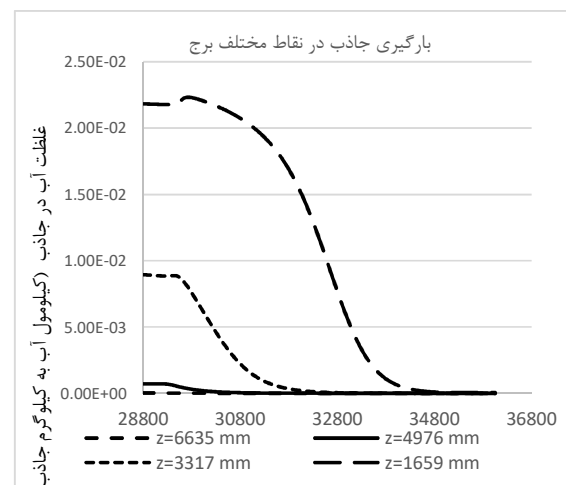
جذب شده عاری می‌شود. دبی گاز احیا کم و دارای دمایی زیادی است و غلظت آلاینده ها در آن بالاست. نمودار میزان غلظت آب در جریان گاز در ۴ نقطه مختلف از برج در شکل زیر نشان داده شده است.



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 زمان های مختلف در نقاط مختلف برج مشخص می‌کند نقاط بالایی برج که بیشترین جذب را در مرحله جذب داشته اند و بیشتر بارگیری شده اند 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

- [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.