

# بررسی تجربی و مدل‌سازی برج جذب سولفید هیدروژن در فرایند سولفیران

پژوهش‌نفت

سال بیستم

شماره ۶۲

صفحه ۵۱-۴۴، ۱۳۸۹

خالد فرصت\*، مریم سعدی<sup>۱</sup>، جعفر صادق‌زاده اهری<sup>۱</sup> و مسیح حسینی‌جناب<sup>۱</sup>

۱- پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده گاز

۲- پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده مهندسی و توسعه

forsatk@ripi.ir

واژه‌های کلیدی: برج جذب با بستر ثابت، مدل‌سازی، فرایند سولفیران، کیلات آهن، سولفید هیدروژن

## چکیده

در این تحقیق، مطالعات تجربی و مدل‌سازی ریاضی سولفورزدایی از جریان‌های گازی با استفاده از محلول آبی کیلات آهن به‌عنوان شستشو دهنده جریان گازی حاوی  $H_2S$  مورد بررسی قرار گرفت. سولفورزدایی از جریان گازی به‌واسطه واکنش یون سولفید هیدروژن با یون فریک است که منجر به رسوب گوگرد می‌شود. برج جذب مورد استفاده حاوی آکنه‌های استاتیکی بوده و مطالعات تجربی در شرایط مختلف عملیاتی (دبی گاز ۴/۱-۲/۲ lit/min، دبی محلول کیلات آهن ۲/۰-۰/۲ lit/min، غلظت گاز  $H_2S$  ۲۳۰-۱۳۰ ppm و ارتفاع پرکن ۰/۳-۰/۲ m) انجام پذیرفته است. همچنین یک مدل ریاضی دینامیک به‌منظور پیش‌بینی میزان بازدهی حذف سولفید هیدروژن توسط محلول آبی کیلات آهن در برج جذب ارائه شد. بدین منظور با توجه به موازنه جرم اجزاء در فازهای گاز و مایع، دستگاه معادلات دیفرانسیل جزئی به‌دست آمد که معادلات مورد نظر با استفاده از روش‌های عددی حل و در نتیجه پروفایل غلظت اجزاء در طول برج جذب تعیین شد. صحت مدل با مقایسه نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل و با داده‌های تجربی مورد آزمون قرار گرفت که حاکی از تطابق قابل قبول نتایج مدل‌سازی با داده‌های تجربی است.

## مقدمه

گاز سولفید هیدروژن، یک گاز سمی است که می‌تواند باعث خطرات جسمانی دائمی و همچنین در تجهیزات فرایندی و خطوط انتقال گاز موجب خوردگی شود. از طرفی در اکثر واحدهای صنعتی موجود این گاز سوزاننده شده و  $SO_2$  حاصله موجب باران‌های اسیدی شده که آسیب به محیط زیست را در پی دارد. از میان فرایندهایی که می‌توانند گاز سولفید هیدروژن را به‌طور مستقیم از جریان گازهای ترش حذف کنند، فرایندهای ردکس<sup>۱</sup> که از کمپلکس‌های آهن به‌صورت محلول‌های هموزن استفاده می‌کنند جایگاه مهم تری پیدا کرده‌اند.

در این فرایندها که کمپلکس‌های آهن به‌عنوان کاتالیزور عمل می‌کنند، قابلیت اکسیداسیون سریع و مؤثر  $H_2S$  و تبدیل آن به گوگرد را داشته و خود به راحتی به‌وسیله هوا به حالت اولیه باز می‌گردند. این فرایندها با نام‌های فرایند اکسیداسیون در فاز مایع و فرایند تبدیل تک مرحله‌ای  $H_2S$  به گوگرد نیز معروف هستند.

از آنجا که  $H_2S$  گاز اسیدی است، فاز مایع باید دارای pH قلیایی باشد.  $H_2S$  موجود در گاز ترش در واکنش با محلول قلیایی کمپلکس فلزی به گوگرد تبدیل می شود و گاز ترش عاری شده از  $H_2S$  که گاز شیرین یا تصفیه شده است، باقی می ماند. در این واکنش  $H_2S$  اکسید شده و کمپلکس فلزی احیاء می شود و سپس به کمپلکس فلزی احیاء شده هوا دمیده می شود تا فلز به حالت اولیه خود بازگشته و اکسید شود. از جمله این فرایندها می توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- بیو - اس آر<sup>۱</sup> [۱] ۲- فرایند ژاپنی [۱] ۳- سولفرکس<sup>۲</sup> [۲ و ۱] ۴- لوکت<sup>۳</sup> [۳ و ۱] ۵- سولفیران<sup>۴</sup> [۴].

فرایند سولفیران، یک روش مؤثر برای حذف سولفید هیدروژن است که دانش فنی آن توسط پژوهشگاه صنعت نفت توسعه یافت. این فرایند با استفاده از کاتالیست کیلات آهن، سولفید هیدروژن را به گوگرد تبدیل می کند که شامل سه مرحله جذب، احیا و جداسازی گوگرد می باشد.

در این فرایند برای جذب بیشتر گاز  $H_2S$  توسط محلول کیلات آهن، علاوه بر شستشو دهنده و نچوری از برج آکنده نیز استفاده می شود.

امروزه به دلیل تقاضای روزافزون بازار برای دستیابی به واحدهای عملیاتی مقرون به صرفه، طراحی مناسب برج های پر شده و استفاده از پرکن هایی با کارایی بالا ضروری به نظر می رسد. برای این منظور لازم است هیدرودینامیک و عملیات انتقال جرم در برج ها به طور دقیق بررسی و از دیدگاه ریاضی مطالعه و مدل سازی شوند. در زمینه هیدرودینامیک برج های آکنده کارهای مختلفی ارائه شده است [۵-۸]، اما وجود یک مدل ریاضی برای پیش بینی عملکرد این برج ها در جذب گاز سولفید هیدروژن توسط محلول کیلات آهن از ملزومات توسعه و طراحی فرایند سولفیران محسوب می شود. لذا در این تحقیق تلاش شده تا در کنار کارهای آزمایشگاهی مورد نیاز، نسبت به مدل سازی برج آکنده نیز اقدام شود.

فرایند سولفیران، یک روش مؤثر برای حذف سولفید هیدروژن است که دانش فنی آن توسط پژوهشگاه صنعت نفت توسعه یافت. این فرایند با استفاده از کاتالیست کیلات آهن، سولفید هیدروژن را به گوگرد تبدیل می کند که شامل سه مرحله جذب، احیا و جداسازی گوگرد می باشد.

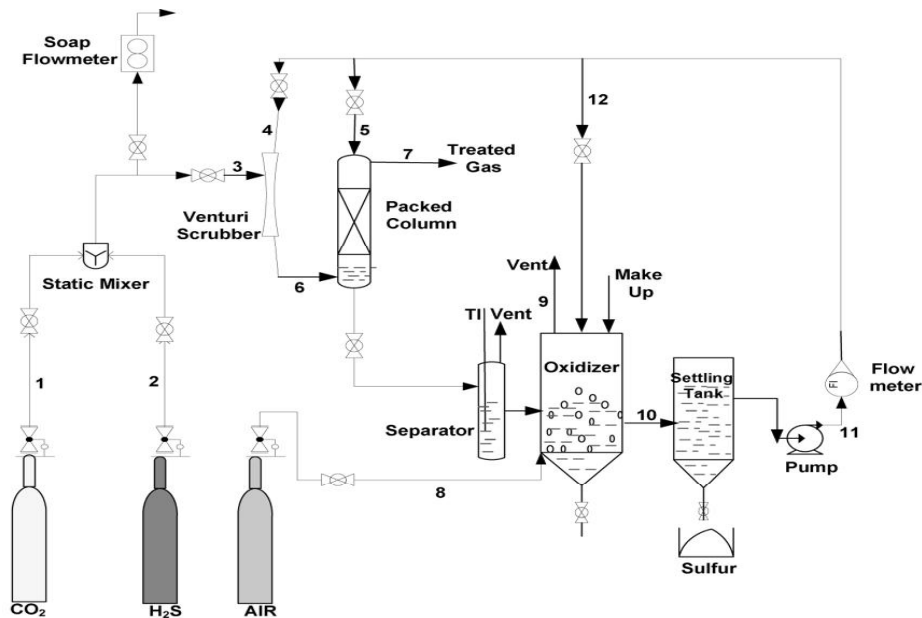
در این فرایند برای جذب بیشتر گاز  $H_2S$  توسط محلول کیلات آهن، علاوه بر شستشو دهنده و نچوری از برج آکنده نیز استفاده می شود.

امروزه به دلیل تقاضای روزافزون بازار برای دستیابی به واحدهای عملیاتی مقرون به صرفه، طراحی مناسب برج های پر شده و استفاده از پرکن هایی با کارایی بالا ضروری به نظر می رسد. برای این منظور لازم است هیدرودینامیک و عملیات انتقال جرم در برج ها به طور دقیق بررسی و از دیدگاه ریاضی مطالعه و مدل سازی شوند. در زمینه هیدرودینامیک برج های آکنده کارهای مختلفی ارائه شده است [۵-۸]، اما وجود یک مدل ریاضی برای پیش بینی عملکرد این برج ها در جذب گاز سولفید هیدروژن توسط محلول کیلات آهن از ملزومات توسعه و طراحی فرایند سولفیران محسوب می شود. لذا در این تحقیق تلاش شده تا در کنار کارهای آزمایشگاهی مورد نیاز، نسبت به مدل سازی برج آکنده نیز اقدام شود.

### سیستم آزمایشگاهی

در آزمایش های انجام شده از محلول کیلات آهن (SUR 03) با غلظت 2000 ppm و با pH=9 استفاده شد. مقدار  $H_2S$  ورودی و خروجی برج جذب مورد نظر با استفاده از یک دستگاه

1. Bio-SR  
2. Sulferox  
3. Lo-Cat  
4. Sulfran



شکل ۱- نمای شماتیک سیستم آزمایشگاهی ساخته شده

از ابتدای برج ( $Z = 0$ ) و فاز مایع از انتهای برج ( $Z = H$ ) وارد می‌شود.

- واکنش جذب گاز  $H_2S$  توسط کاتالیست از نوع واکنش‌های سریع می‌باشد، بنابراین غلظت  $H_2S$  در سطح مشترک فاز گاز برابر صفر و یا به عبارت دیگر مقاومت انتقال جرم در فاز گاز ناچیز است.

- تغییرات جرم فاز گاز و مایع در اثر فرایند جذب  $H_2S$  در طول برج جذب ناچیز می‌باشد.

با توجه به فرضیات فوق، مدل ریاضی حاکم بر برج جذب به صورت زیر خواهد بود.

معادله تغییرات غلظت  $H_2S$  در فاز گاز:

$$\varepsilon_G \frac{\partial C_{j,G}}{\partial t} + v_{sG} \frac{\partial C_{j,G}}{\partial z} = D_G \varepsilon_G \frac{\partial^2 C_{j,G}}{\partial z^2} - N_j \Big|_{x=0} a_v, \quad j = H_2S \quad (3)$$

معادله تغییرات غلظت  $H_2S$  در فاز مایع:

$$\varepsilon_L \frac{\partial C_{j,L}}{\partial t} - v_{sL} \frac{\partial C_{j,L}}{\partial z} = D_L \varepsilon_L \frac{\partial^2 C_{j,L}}{\partial z^2} - N_j \Big|_{x=0} a_v, \quad j = H_2S \quad (4)$$

$$\varepsilon_L \frac{\partial C_{j,L}}{\partial t} - v_{sL} \frac{\partial C_{j,L}}{\partial z} = D_L \varepsilon_L \frac{\partial^2 C_{j,L}}{\partial z^2} - 2N_{H_2S} \Big|_{x=0} a_v, \quad j = Fe^{3+} \quad (5)$$

معادله تغییرات غلظت کیلات فرس در فاز مایع:

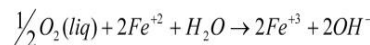
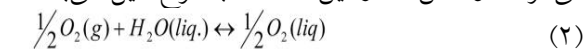
$$\varepsilon_L \frac{\partial C_{j,L}}{\partial t} - v_{sL} \frac{\partial C_{j,L}}{\partial z} = D_L \varepsilon_L \frac{\partial^2 C_{j,L}}{\partial z^2} + 2N_{H_2S} \Big|_{x=0} a_v, \quad j = Fe^{2+} \quad (6)$$

شرایط ابتدایی و مرزی حاکم بر مساله به صورت زیر است:

$$t = 0, \quad z > 0, \quad C_{H_2S,G} = C_{H_2S,G}^0, \quad C_{j,L} = C_{j,L}^0, \quad (7)$$

$$j = H_2S, Fe^{3+} L^-, Fe^{2+} L^-$$

به تدریج از محلول جدا شده و محلول کاتالیست از طریق پمپ و فلومتر و از طریق خط ۱۱ به سیستم جذب باز می‌گردد. واکنش‌ها در این قسمت به شرح ذیل می‌باشند:



### مدل ریاضی

در این تحقیق، برای مدل‌سازی برج جذب یک مدل یک بعدی ناپایدار در دو فاز گاز و مایع در نظر گرفته شده که از طریق نوشتن موازنه جرمی اجزاء مختلف در دو فاز گاز و مایع به دست می‌آید.

فرضیات در نظر گرفته شده در این مدل به شرح زیر است:

- تغییرات دمایی ناشی از جذب گاز  $H_2S$  توسط محلول کیلات آهن ناچیز می‌باشد لذا از تغییرات دمایی در طول برج در دو فاز گاز و مایع صرف نظر شده است.

- در این مدل اختلاط در فازهای گاز و مایع با استفاده از مدل پراکندگی محوری بیان می‌شود [۹].

- برای بیان مدل پراکندگی محوری از شرایط مرزی Danckwerts استفاده شده است [۱۰-۱۲].

- واکنش در توده فاز مایع و همچنین در فیلم مایع روی می‌دهد.

- برج جذب به صورت غیر هم‌جهت می‌باشد که فاز گاز

مورد استفاده برای محاسبه این پارامترها به صورت زیر خواهد بود [۱۳-۱۵]:

$$k_{L,j} = 0.0051 \left( \frac{\rho_L v_{sl}}{a_T \mu_L} \right)^{2/3} \left( \frac{\mu_L}{\rho_L D_{j,L}} \right)^{-1/2} \left( \frac{\rho_L}{\mu_L g} \right)^{-1/3} (a_T d_N)^{4/10} \quad (17)$$

$$k_{G,j} = 2.0 \left( \frac{\rho_G v_{sG}}{a_T \mu_G} \right)^{7/10} \left( \frac{\mu_G}{\rho_G D_{j,G}} \right)^{1/3} \left( \frac{D_{j,G}}{a_T d_N^2} \right) \quad (18)$$

$$\frac{a_v}{a_T} = 1 - \exp \left\{ -1.45 \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_L} \right)^{3/4} \left( \frac{\rho_L v_{sl}}{a_T \mu_L} \right)^{1/10} * \left( \frac{a_T v_{sl}^2}{g} \right)^{-1/20} \left( \frac{\rho_L v_{sl}^2}{a_T \sigma_L} \right)^{2/10} \right\} \quad (19)$$

$$V_L(0) = 0.21 (g d_{bed})^{1/2} \left( \frac{v_{sG}^3 \rho_L}{g \mu_L} \right)^{1/8} \quad (20)$$

$$D_L = 0.31 V_L(0) d_{bed} \quad (21)$$

$$D_G = 0.0585 \text{Re}_G^{-0.668} 10^{-0.00259 \text{Re}_L} * (a_T d_p)^{2.58} \left( \frac{v_{sG} H}{\varepsilon_G} \right) \quad (22)$$

برای مدل سازی عملکرد برج جذب، لازم است که دستگاه معادلات مشتقات جزئی<sup>۲</sup> حاکم بر مسأله به صورت همزمان حل شوند. برای حل دستگاه معادلات حاکم بر سیستم، معادلات مورد نظر با استفاده از روش تطبیق متعامد<sup>۳</sup> به مجموعه ای از معادلات مشتقات اولیه<sup>۴</sup> تبدیل شده و سپس با کد نویسی در محیط نرم افزار Matlab و با استفاده از روش رانگ - کوتای<sup>۵</sup> درجه چهارم، دستگاه معادلات مورد نظر حل می شود. به منظور استفاده از روش تطبیق متعامد، ۱۵ نقطه میانی در برج جذب در نظر گرفته شد. به منظور امکان مقایسه تغییرات غلظتی اجزاء مختلف، متغیرهای به کار رفته در برنامه کامپیوتری نرمالایز شد (برای این منظور غلظت H<sub>2</sub>S در طول برج در هر فاز به غلظت ورودی H<sub>2</sub>S در همان فاز و غلظت کیلات فروس و فریک در طول برج در فاز مایع به غلظت ابتدایی کیلات فریک تقسیم می شود).

### بحث و نتیجه گیری

برنامه شبیه ساز عملکرد برج آکنده در جذب سولفید هیدروژن

1. Film Penetration Theory
2. PDE
3. Orthogonal Collocation
4. ODE
5. Rung-Kutta

$$t > 0, \quad z = 0, \quad \left. \frac{dC_{j,L}}{dz} \right|_{z=0} = 0, \quad (8)$$

$$v_{sG} C_{j,G} \Big|_{z=0^-} = v_{sG} C_{j,G} \Big|_{z=0^+} - D_G \left. \frac{dC_{j,G}}{dz} \right|_{z=0}$$

$$t > 0, \quad z = H, \quad \left. \frac{dC_{j,G}}{dz} \right|_{z=H} = 0, \quad (9)$$

$$v_{sL} C_{j,L} \Big|_{z=H^-} = v_{sL} C_{j,L} \Big|_{z=H^+} - D_L \left. \frac{dC_{j,L}}{dz} \right|_{z=H}$$

فلاکس عبوری جزء حل شده z که در معادلات (۳) تا (۶) با عبارت  $N_j \Big|_{x=0}$  نشان داده شده را می توان از طریق توزیع غلظت گاز حل شده در فیلم مایع به دست آورد که معادله آن به شکل زیر است:

$$N_j \Big|_{x=0} = -D_{j,L} \left. \frac{dC_j}{dx} \right|_{x=0} \quad (10)$$

با استفاده از رسوخ فیلمی<sup>۱</sup>، تغییرات غلظتی اجزاء در فیلم مایع متشکل از دو ترم نفوذ و واکنش را می توان به صورت دستگامی از معادلات دیفرانسیلی غیرخطی بیان کرد. معادلات حاکم در این حالت به صورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{\partial C_j}{\partial t} = D_{j,L} \frac{\partial^2 C_j}{\partial x^2} - R_j, \quad j = H_2S \quad (11)$$

$$\frac{\partial C_{Fe^{3+}}}{\partial t} = (D_{Fe^{3+},L}) \frac{\partial^2 C_{Fe^{3+}}}{\partial x^2} - 2R_{H_2S} \quad (12)$$

$$\frac{\partial C_{Fe^{2+}}}{\partial t} = (D_{Fe^{2+},L}) \frac{\partial^2 C_{Fe^{2+}}}{\partial x^2} + 2R_{H_2S} \quad (13)$$

شرایط ابتدایی و مرزی در فیلم مایع را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$t = 0, \quad x > 0, \quad C_j = C_{j,L}^0, \quad j = H_2S, Fe^{3+}, Fe^{2+} \quad (14)$$

$$t > 0, \quad x = 0, \quad \frac{k_{G,j}(P_j - P_{j,i})}{RT} = -D_{j,L} \left. \frac{dC_j}{dx} \right|_{x=0}, \quad j = H_2S \quad (15)$$

$$\left. \frac{dC_j}{dx} \right|_{x=0} = 0, \quad j = Fe^{3+}, Fe^{2+}$$

$$t > 0, \quad x = \delta_L, \quad -D_{j,L} \left. \frac{dC_j}{dx} \right|_{x=\delta_L} = a_v = R_j(\varepsilon_L - a_v \delta_L), \quad j = H_2S \quad (16)$$

$$C_j \Big|_{x=\delta_L} = C_{j,L}, \quad j = Fe^{3+}, Fe^{2+}$$

برای حل معادلات فوق لازم است پارامترهای مربوط به انتقال جرم و هیدرودینامیک سیستم تعیین شود که روابط

جنس سرامیک با قطر اسمی (۰/۰۲۵ m) در ادامه ارائه شده

است:

$$\varepsilon_G = \varepsilon - \varepsilon_L \quad (23)$$

$$\varepsilon_L = \varphi_{L_s} + \varphi_{L_0} \quad (24)$$

$$\varphi_{L_0} = \varphi_{L_{0W}} H_E \quad (25)$$

$$\varphi_{L_s} = \frac{4.23 * 10^{-3} \mu_L^{0.04} \sigma_L^{0.55}}{d_s^{1.56} \rho_L^{0.37}} \quad (26)$$

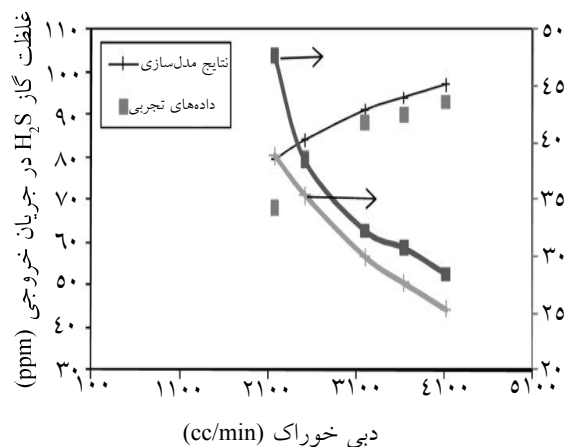
$$H_s = \begin{cases} \frac{1404(v_{sl}\rho_L)^{0.57} \mu_L^{0.13}}{\rho_L^{0.84} (3.24(v_{sl}\rho_L)^{0.413} - 1)} * \left(\frac{\sigma_L}{0.073}\right)^{0.2817-0.262\log(v_{sl}\rho)} & \text{if } \mu_L < 0.020 \\ \frac{2830(v_{sl}\rho_L)^{0.57} \mu_L^{0.31}}{\rho_L^{0.84} (3.24(v_{sl}\rho_L)^{0.413} - 1)} * \left(\frac{\sigma_L}{0.073}\right)^{0.28177-0.262\log(v_{sl}\rho)} & \text{if } \mu_L > 0.020 \end{cases} \quad (27)$$

$$\varphi_{L_{sw}} = \frac{5.014 * 10^{-5}}{(d_s)^{1.56}} \quad (28)$$

$$\varphi_{L_{w}} = \frac{2.32 * 10^{-6} (737.5 v_{sl} \rho_L)^{1.508} (d_s)^{0.376}}{(d_s)^2} \quad (29)$$

$$\varphi_{L_{0W}} = \varphi_{L_{tW}} - \varphi_{L_{sw}} \quad (30)$$

نتایج مدل‌سازی عملکرد برج جذب در فرایند حذف سولفید هیدروژن با استفاده از محلول کیلات آهن و مقایسه آن با نتایج اخذ شده در سامانه آزمایشگاهی، در شکل‌های ۲ تا ۶ نشان داده شده است.



شکل ۳- تاثیر تغییرات دبی خوراک بر میزان جذب (غلظت گاز سولفید هیدروژن در خوراک: ۱۳۰ ppm، دبی کاتالیست: ۱ lit/min)

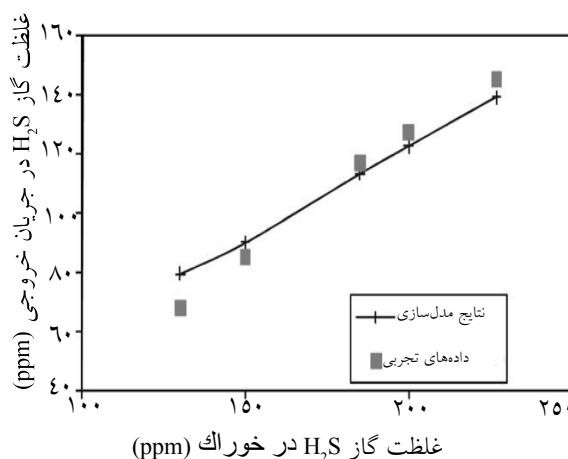
توسط محلول کیلات آهن، برای موارد متفاوت با ورودی‌های مختلف اجرا شده و نتایج مدل‌سازی با داده‌های اخذ شده در مقیاس آزمایشگاهی مقایسه شدند.

برای اجرای برنامه لازم است که اطلاعات ورودی نظیر دما، فشار، اندازه برج جذب و مشخصات پرکن به عنوان ورودی برنامه وارد شود. اطلاعات ورودی بر اساس اطلاعات و داده‌های سامانه آزمایشگاهی ساخته شده، در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- اطلاعات ورودی برنامه بر اساس شرایط آزمایشگاهی برای مدل‌سازی برج جذب

۲۲ °C	دما
۱ atm	فشار
۰/۰۵ m	قطر برج
۰/۳ m	ارتفاع برج
۰/۰۲۵ m	قطر اسمی پرکن (Berl Saddle)
۰/۶۹۵	تخلخل برج
۲۰۰۰ ppm	غلظت محلول کیلات آهن

برای حل همزمان معادلات بیان شده (۱ تا ۲۲) لازم است تا کسر حجمی فاز گاز در برج محاسبه شود و از آنجایی که کسر حجمی فاز گاز وابسته به نوع و اندازه پرکن می‌باشد لذا با توجه به مراجع موجود [۱۶]، روابط مورد نظر برای پرکن مورد استفاده در سامانه آزمایشگاهی (زین اسپری از



شکل ۴- تاثیر تغییرات غلظت گاز سولفید هیدروژن در خوراک بر میزان جذب (دبی گاز: ۲/۱۸ lit/min، دبی کاتالیست: ۱ lit/min)

همان‌طور که مشاهده می‌شود در شرایط عملیاتی مختلف، همخوانی مناسبی بین پیش‌بینی مدل تهیه شده و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد و این امر مؤید دقت مناسب مدل ارائه شده است. همچنین با توجه به اشکال رسم شده می‌توان به نتایج ذیل نیز اشاره کرد:

الف- در شرایط عملیاتی ثابت و با افزایش غلظت گاز سولفید هیدروژن در خوراک، همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود عملاً به دلیل افزایش مول گاز سولفید هیدروژن و در نتیجه کاهش نسبت مولی  $Fe^{3+}/H_2S$  (با توجه به ثابت بودن دبی و غلظت کاتالیست) از شدت میزان جذب کاسته شده و در نتیجه غلظت گاز سولفید هیدروژن در خروجی برج افزایش می‌یابد.

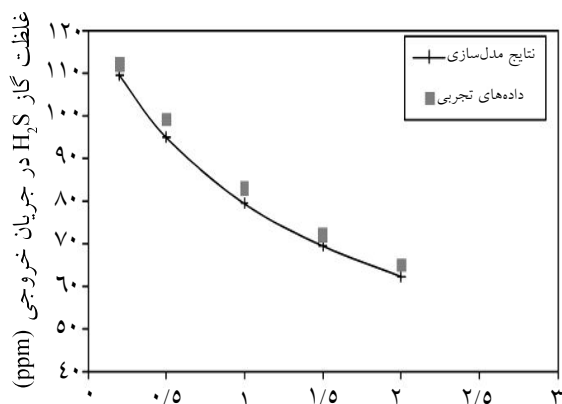
ب- با افزایش دبی خوراک و با ثابت بودن سایر شرایط عملیاتی از آنجایی که زمان تماس بین فاز گاز و مایع به شدت کاهش می‌یابد، لذا باید انتظار کاهش بازده جذب و در نتیجه افزایش غلظت گاز سولفید هیدروژن در جریان خروجی برج جذب را داشته باشیم که این امر نیز با توجه به شکل ۳، هم در نتایج تجربی و هم در نتایج مدل‌سازی حاصل شده است.

ج- مطابق شکل ۴، نتایج تجربی و مدل‌سازی بیان می‌کنند که در شرایط عملیاتی ثابت، میزان جذب با افزایش دبی کاتالیست افزایش یافته و در نتیجه غلظت گاز سولفید هیدروژن در خروجی برج کاهش می‌یابد. دلیل این رفتار را می‌توان به افزایش نسبت مولی  $Fe^{3+}/H_2S$  با افزایش دبی کاتالیست نسبت داد.

د- افزایش ارتفاع پرکن به دلیل افزایش سطح تماس و همچنین زمان تماس، سبب افزایش میزان جذب خواهد شد (شکل ۵).

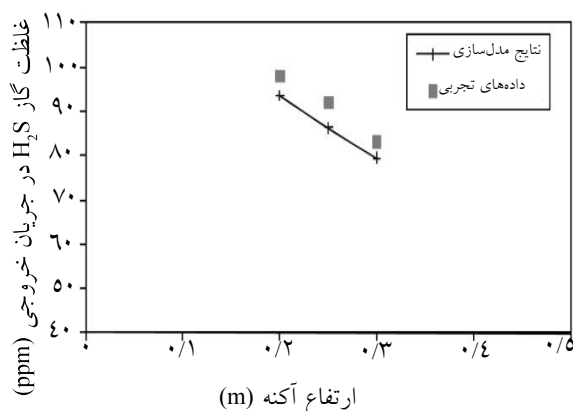
ه- تغییرات غلظت  $H_2S$  در فاز گاز در طول برج جذب کاهش می‌یابد این تغییرات در شکل (۶) آورده شده است.

و- تغییرات غلظت  $H_2S$  در فاز گاز نسبت به زمان در مقاطع مختلفی از طول برج جذب در شکل ۷ رسم شده است. با توجه به شکل، در ابتدا با افزایش زمان، میزان غلظت  $H_2S$  در فاز گاز کاهش می‌یابد ولی در ادامه با گذشت زمان تغییراتی در غلظت  $H_2S$  در فاز گاز مشاهده نمی‌شود. عدم تغییر محسوس غلظت  $H_2S$  در فاز گاز پس از سپری شدن زمانی معین، به این معناست که با گذشت زمان سیستم

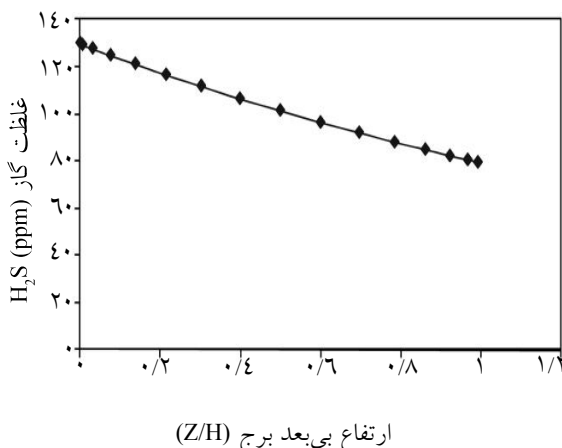


دبی کاتالیست (lit/min)

شکل ۴- تاثیر تغییرات دبی کاتالیست بر میزان جذب غلظت گاز سولفید هیدروژن در خوراک: ۱۳۰ ppm، دبی خوراک: ۲/۱۸ lit/min



شکل ۵- تاثیر تغییر ارتفاع پرکن بر میزان جذب (غلظت گاز سولفید هیدروژن در خوراک: ۱۳۰ ppm، دبی خوراک: ۲/۱۸ lit/min، دبی کاتالیست: ۱ lit/min)



شکل ۶- تغییرات غلظت گاز سولفید هیدروژن در فاز گاز بر حسب ارتفاع برج (غلظت گاز سولفید هیدروژن در خوراک: ۱۳۰ ppm، دبی خوراک: ۲/۱۸ lit/min، دبی کاتالیست: ۱ lit/min)

$C_{p_a}$ : غلظت جزء  $j$  در فاز  $\alpha$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$d_{bed}$ : قطر برج (m)

$d_N$ : قطر اسمی پرکن (m)

$d_p$ : قطر معادل ذرات (m)

$D_{f_a}$ : ضریب نفوذ جزء  $j$  در فاز  $\alpha$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$D_a$ : ضریب پراکندگی محوری فاز  $\alpha$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$g$ : شتاب جاذبه ( $9/807 \text{ m/s}^2$ )

$G$ : فاز گاز

$H$ : ارتفاع برج (m)

$He_j$ : ضریب هنری جزء  $j$  ( $\text{m}^3\text{atm}/\text{kmol}$ )

$He_{j0}$ : ضریب هنری جزء  $j$  در آب ( $\text{m}^3\text{atm}/\text{kmol}$ )

$K_{a_j}$ : ضریب انتقال جرم فیلمی فاز  $\alpha$  ( $\text{m}/\text{s}$ )

$K_I$ : ثابت واکنش ( $\text{m}^3/\text{kmol}\cdot\text{s}$ )

$K_A$ : ثابت تعادلی واکنش هیدروکسیلاسیون اول ( $\text{m}^3/\text{kmol}$ )

$L$ : فاز مایع

$N_j$ : فلاکس جذب جزء  $i$  ( $\text{kmol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ )

$p_j$ : فشار جزئی جزء  $i$  (atm)

$P_{f_i}$ : فشار جزئی جزء  $i$  در سطح مشترک (atm)

$R$ : ثابت گازها ( $0/083145 \text{ bar}\cdot\text{m}^3/\text{kmol}\cdot\text{K}$ )

$R_j$ : شدت واکنش ( $\text{kmol}/\text{m}^3\text{atm}$ )

$Re_\alpha = \frac{v_{sa}\rho_\alpha d_p}{\mu_n}$ : عدد بی بعد رینولدز در فاز  $\alpha$

$Re'_L = \frac{v_{sL}\rho_L d_N}{\mu_L}$ : عدد بی بعد رینولدز در فاز مایع

$T$ : دما (K)

$t$ : زمان (s)

$V_j(0)$ : سرعت فاز مایع در خط مرکزی ( $\text{m}/\text{s}$ )

$v_{sa}$ : سرعت ظاهری فاز  $\alpha$  ( $\text{m}/\text{s}$ )

$x$ : فاصله در فیلم مایع (m)

$Z$ : مختصات طولی در راکتور (m)

$\delta_L$ : ضخامت فیلم مایع (m)

$\varepsilon$ : تخلخل برج ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )

$\varepsilon_G$ : کسر حجمی فاز گاز ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )

$\varepsilon_L$ : کسر حجمی فاز مایع ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )

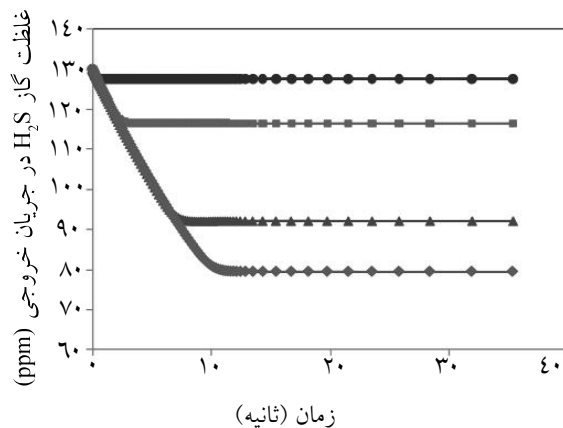
$\mu_a$ : ویسکوزیته فاز  $\alpha$  ( $\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$ )

$\rho_a$ : دانسیته فاز  $\alpha$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\sigma_L$ : کشش سطحی مایع (N/m)

$\sigma_c$ : کشش سطحی بحرانی پرکن (N/m)

تقریباً به حالت پایا می‌رسد. برای درک بهتر اتفاقات روی داده درون برج جذب، تغییرات غلظت  $\text{H}_2\text{S}$  در فاز گاز در طول‌های مختلفی از برج جذب در این شکل رسم شده است. کاملاً بدیهی است که در زمان‌های مختلف، با افزایش طول برج جذب از غلظت  $\text{H}_2\text{S}$  در فاز گاز کاسته می‌شود که این مساله به معنای روی دادن واکنش جذب  $\text{H}_2\text{S}$  در طول راکتور می‌باشد.



شکل ۷- تغییرات غلظت گاز سولفید هیدروژن در فاز گاز بر حسب زمان و ارتفاع‌های مختلف برج جذب (غلظت گاز سولفید هیدروژن در خوراک: ۱۳۰ ppm، دبی خوراک: ۲/۱۸ lit/min، دبی کاتالیست: ۱ lit/min)

### جمع‌بندی

هدف نهایی از انجام این تحقیق، مدل‌سازی برج آکنده مورد استفاده در فرایند سولفیران می‌باشد. از آنجایی که هیچ کار آزمایشگاهی در زمینه جذب گاز  $\text{H}_2\text{S}$  توسط محلول کیلات آهن و با استفاده از برج آکنده در منابع مختلف وجود ندارد، لذا ابتدا نتایج تجربی مورد نیاز در شرایط مختلف غلظت  $\text{H}_2\text{S}$  و فلوی گاز، در سیستم آزمایشگاهی که به این منظور ایجاد شده بود، کسب شد. سپس بعد از تهیه موازنه‌های جرم مورد نظر، معادلات توسعه داده شده با استفاده از روش‌های عددی رایج، حل و نتایج مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفتند. مقایسه نتایج مدل‌سازی و آزمایشگاهی حاکی از دقت کافی مدل در پیشگویی طرز رفتار برج آکنده مورد استفاده در فرایند سولفیران بود.

### علائم و نشانه‌ها

$a_v$ : سطح مخصوص بستر ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )

$a_T$ : مساحت سطح تماس دو فاز گاز و مایع ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )

## منابع

- [1] Kohl A. L., & Nielsen R. B., *Gas Purification*, 5th Ed., Gulf Publishing Company, 1997.
- [2] Pandey R. A., & Malhotra S., "Desulfurization of gaseous fuels with recovery of elemental sulfur: an overview", *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* Vol. 29, pp. 229-268, 1999.
- [3] LO-CAT® H2S Removal Process, <http://www.gtp-merichem.com>, 2010.
- [4] Khattaty M.R., Forsat Kh., Hashemi R., & Manafi Varkiani H., "Process for removing sulfur particles from an aqueous catalyst solution and removing hydrogen sulfide and recovering sulfur from a gas stream", U.S. Patent: Vol 7, PP 419,652 B2 ,2008.
- [5] Stichlmair J., Bravo L., & Fair J. R., "General model for prediction of pressure drop and capacity of counter-current Gas/Liquid Packed columns", *Gas Sep. Purif.*, Vol. 3, No. 1, pp. 19-28, 1989.
- [6] Piche S., Larachi F., & Grandjean B. P. A., "Improved liquid hold-up correlation for randomly packed towers", *Chem. Eng. Res. Des.*, Vol. 79, No. 1, pp. 71-80, 2001.
- [7] Billet R., & Schultes M., "Modeling of pressure drop in packed columns", *Chem. Eng. Technol.* Vol. 14, No. 2, pp. 89-95, 1991.
- [8] Kolev N., *Packed Bed Column for Absorption, Desorption, Rectification and Direct Heat Transfer*, First edition, Elsevier, 2006.
- [9] Wang J., Han S., Wei F., Yu Z., & Y. Jin, "An Axial dispersion model for gas-liquid reactors based on the Penetration theory", *Chem. Eng. Proc.*, Vol. 36, pp. 291- 299, 1997.
- [10] Danckwerts, P.V., "Continuous flow systems", *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 2, pp. 1-13, 1953.
- [11] Kudrna V., Jahoda M., Siyakatshana N., Cermakova J., & Machon V., "General solution of the dispersion model for a one-dimensional stirred flow system using danckwerts' boundary conditions", *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 59, pp. 3013-3020, 2004.
- [12] Siyakatshana N., Kudrna V., & Machon V., "Incorporating danckwerts' boundary conditions into the solution of the stochastic differential equation", *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 60, pp. 1987-1994, 2005.
- [13] Onda K., Sada E., & Takeuchi H., "Gas absorption with chemical reaction in packed bed", *J. Chem. Eng. of Japan*, Vol. 1, pp. 56-62, 1968.
- [14] Krishna R., "A Scale-up strategy for a commercial scale bubble column slurry reactor for fischer-tropsch synthesis", *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, Vol. 55, No. 4, pp. 359-393, 55, 359, 2000.
- [15] Sater V. E., & Levenspiel O., "Two-Phase flow in packed beds: evaluation of axial dispersion and holdup by moment analysis", *Ind. Eng. Chem. Fund.*, Vol. 5, No. 1, pp. 86-92, 1966.

[۱۶]. تریبال رای، انتقال جرم، ترجمه: سهرابی م، کاغذچی ط، ویرایش سوم، مترجمین، ۱۳۷۰.