مدلسازی و شبیه سازی راکتورهای چند فازی برای گوگرد زدائی از سوخت دیزل

سعید شکری قلعه[1]- سعید زرین پاشنه[1]- محمد سلطانیه[2]

۱- پژوهشگاه صنعت نفت، واحد مدل سازی و کنترل فرآیندها

۲- دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی

چکیده

گوگرد موجود در سوخت دیزل باعث بروز مشکلات زیادی در ارتباط با آلودگی محیط زیست و خوردگی اجزاء موتورهای دیزلی می‌گردد. در حال حاضر میزان گوگود در سوخت دیزل ایران حدود ۰/۸ درصد وزنی است که بسیار بالاتر از استاندارد قابل قبول جهانی است (در حدود ۰/۰۵ درصد وزنی). به علاوه در میان فرآورده‌های نفتی، بیشترین میزان تقاضا و مصرف مربوط به برشهای میان تقطیر نفتی از قبیل سوخت دیزل می باشد. لذا کاهش میزان گوگرد این برشها قسمت مهمی از برنامه توسعه پالایشگاههای کشور می‌باشد که این هدف را می‌توان بوسیله فرآیند گوگردزدایی با هیدروژن (HDS) در راکتورهای با بستر قطره‌ای (Trickle bed) که حالت خاصی از راکتورهای سه فازی می باشند تأمین کرد.

با توجه به اینکه در گوگودزدایی عمیق از گازوئیل، باید گوگرد موجود در حلقه‌های تیوفنی جدا شود، لذا در این نوشتار، مدلسازی سینتیکی و شبیه‌سازی راکتور با بستر قطره‌ای، در واکنشهای گوگردزدائی با هیدروژن (HDS) برای ترکیب دی بنزوتیوفن (DBT) موجود در گازوئیل انجام شده‌است. سپس معادلات مدل از نظر سینتیک، هیدرودینامیک و انتقال جرم و حرارت در راکتور تنظیم شده است و با استفاده از پارامترهای سینتیکی و خواص فیزیکی فازها به روش عددی Runge-Kutta رتبه چهار حل شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-09]

۱- مقدمه:

روشهای تصفیه با هیدروژن (Hydrotreating) در پالایش فرآورده‌های نفتی از اهمیت بالایی برخوردارند. به علت گرانی هیدروژن، این روشها تا مدتها توسعهٔ چندانی نیافته بودند ولی از زمانی که توانستند هیدروژن ارزان قیمت از واحد رفرمینگ بدست آورند، بسرعت در پالایشگاهها گسترش پیدا کردند.

در نفت خام و برشهای نفتی، مقداری از ترکیبات حاوی گوگود، نیتروژن ، اکسیژن، فلزات و نیز ترکیبات سیر نشده وجود دارند که می توانند نقش مهمی در آلودگی محیط زیست، مسمومیت، کاتالیزورها، خوردگی دستگاهها و غیره داشته باشند، که هدف عملیات تصفیه با هیدروژن، حذف یا کاهش این گونه ترکیبات مزاحم است[۱].

چنانچه هدف این عملیات صرفاً حذف یا کاهش ترکیبات گوگردی باشد، فرآیند را گوگردزدائی‌باهیدروژن (Hydrodesulfurization) می‌نامند.

عملیات گوگودگیری با هیدروژن در راکتور با بستر قطره‌ای (Trickle bed) انجام می‌شود که شامل یک بستر ثابت از ذرات جامد کاتالیستی است که از میان آن جریان همسوی گاز – مایع به سمت پائین در جریان است. در اکثر راکتورهای قطره‌ای واکنش در سطح و درون حفره‌های کاتالیست صورت می‌گیرد.

برخی مطالعات انجام شده نشان می دهد که افزودن ذرات خنثی و ریز به کاتالیست می‌تواند ضریب خیس شدن کاتالیست‌ها و در نتیجه راندمان کار را بالا ببرد [۲].

کاتالیزورهائی که معمولاً در عملیات تصفیه با هیدروژن به کار می‌روند، اکسیدها و یا سولفیدهای فلزاتی چون CO و Ni و Fe و Mo وW بر روی پایه آلومین می باشند.

گوگردزدائی از سوخت دیزل [۳]

گوگرد به فرمهای مختلفی در ترکیبات نفتی وجود دارد که عبارتند از مرکاپتانها (R-SH)، دی‌سولفیدها (R-S-S-R)'، پلی‌سولفیدها (R-S_n-R)' – تیوفن – بنزوتیوفن (BT) و دی بنزوتیوفن (DBT) و دیگر مشتقات آلکیلی آن.

با بررسیهای انجام شده روی واکنشهای گوگردی با هیدروژن مشخص شده است که مرکاپتانها، سولفیدها و دی سولفیدها به سهولت گوگردگیری می‌شوند و هیدروکربن‌های مربوطه را به همراه H_2S تولید می‌کنند، در حالیکه گوگردگیری از تیوفن‌ها و بخصوص مشتقات بنزوتیوفنی و دی‌بنزوتیوفنی دشوار است.

مدلسازی ریاضی

الف – صورتبندی مدل

گوگردزدائی بوسیله هیدروژن از برشهای دیزل در یک راکتور چند فازی انجام می شود. سه فاز در راکتور وجود دارد: بستر ثابت از ذرات کاتالیستی خلل و فرج دار، یک فاز بخار و یک فاز مایع که به

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-09]

صورت همسو به پائین جریان دارند. در اینجا فاز گاز را به صورت ترکیبی از هیدروژن (H_2) و سولفید هیدروژن (H_2S) در نظر می‌گیریم. فاز مایع شامل دیزل، ترکیبات گوگردی (DBT) و مشتقات آن و گازهای حل شده هیدروژن و سولفید هیدروژن و فاز جامد را کاتالیست کبالت مولیبدن بر پایه آلومینا در نظر می‌گیریم ($CoMo/Al_2O_3$) و جریان هم به صورت قطره‌ای (Trickle) در فرض می شود. فاز گاز، فاز پیوسته است که مایع پراکنده (Dispresed) درون آن به صورت یک فیلم یکنواخت و آرام یا همچون جویباری روی ذرات در جریان است. مدلی که در اینجا بیان شده یک مدل ناهمگن (Heterogeneous) و یک بعدی با فاز گاز و مایع به صورت جریان Plug است.

می توان اجزاء واکنش را به صورت زیر شماره گذاری کرد و معادلات واکنشها را نوشت.

1)H_2 (هیدروژن)

2) H_2S (سولفید هیدروژن)

3) DBT $C_{12}H_8S$(دی بنزوتیوفن)

4) BPH , $C_{12}H_{10}$ (بی فنیل)

5) CHB ,$C_{12}H_{16}$ (سیکلو هگزیل بنزن)

6) BCH ,$C_{12}H_{22}$(بی سیکلو هگزیل)

شبکه واکنشهای شیمیائی و ماتریس ضرایب استوکیومتری آنها به صورت زیر است.

۱) $DBT + H_2 \rightarrow BPH + H_2S$ (σ-site) (۱)

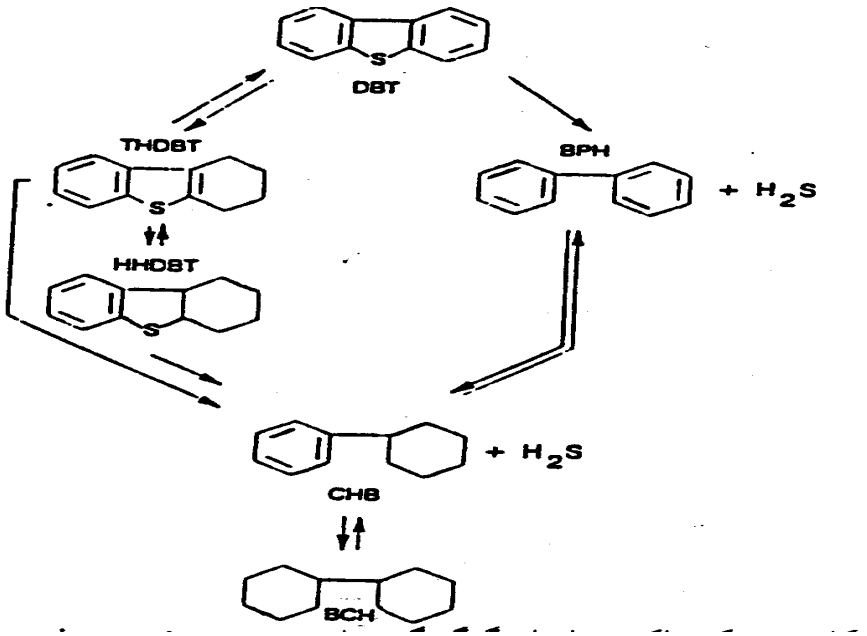
۲) $DBT+4H_2 \rightarrow CHB+H_2S$ (τ-site) (۲)

۳) $BPH+3H_2 \rightarrow CHB$ (τ-site) (۳)

٤) $CHB+3H_2 \rightarrow BCH$ (τ -site) (٤)

$$v = \begin{bmatrix} -1 & -4 & -3 & -3 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-09]



شکل ۱- شبکه واکنش ها برای گوگردگیری از دی بنزوتیوفن توسط هیدروژن

بر اساس مطالعه ای که G.F.Froment و همکارانش[٤] انجام دادند شبکه واکنشهای DBT به دوبخش هیدروژناسیون و هیدروژنولیز تقسیم بندی می شوند که این واکنشها روی دو نوع سایت فعال از کاتالیست انجام می شوند: σ برای هیدروژنولیز و سایت τ برای هیدروژناسیون.

در این مدل همچنین از معادلات سرعتی که اخیراً G.F.Froment و همکارانش [٤] منتشر کرده‌اند استفاده شده است.

معادلات‌مدل

با توجه به شکل (۱) می‌توان معادلات بقای جرم و انرژی را در فازهای مایع و بخار به صورتهای ذیل نوشت:

۱- موازنه جرم برای اجزاء ۱ و ۲ در فاز گاز (بقیه اجزاء در فاز گاز غایب فرض شده اند).

$$u_G = \frac{dc_i^G}{dz} = K_L a_L \left(\frac{C_i^G}{H_t^i} - C_i^L\right) \qquad I=1,2 \qquad (٥)$$

که در آن:

K_L= ضریب کلی انتقال جرم در سطح تماس مایع - گاز $(m_t^3/m_t^2 s)$

C_i^G = غلظت مولار جزء i در توده گاز (mol/m_G^3)

C_i^L = غلظت مولار جزء i در توده گاز $(mol\, m_L^3)$

a_L= گاز- مایع در واحد حجم راکتور سطح تماس (m_t^2/m_r^3)

u_G= (Superficial velocity) سرعت ظاهری گاز $(m_G^3/m_t^2 S)$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-09]

$H'i$ = ضریب هنری

و

$$\left[H'i = \frac{H_i}{RT}\right], H_i(J/mol)$$

۲- موازنه انرژی در فاز گاز:

(٦)

$$u_G \rho_G C_{PG} \frac{dT_G}{dz} = h_L a_L (T_G - T_L) - \sum_{i=1}^{2} N_i a_L C_{pi} G(T_G - T_i)$$

ρ_G= چگالی گاز (Kg/m_G^3)

H= ضریب انتقال حرارت گاز مایع $(J/m_i^2/sk)$

N_i= سرعت انتقال جرم جزء i از توده گاز به توده مایع (mol/mi^2 s)

T= دمای مطلق (°k)

۳- موزانه جرم در فاز مایع

i =1,2,…,6 (۷)

$$u_L \frac{dc_i^L}{dz} = N_i a_L + \sum_{j-1}^{4} (1-\varepsilon_1)\rho_c v_{ij} r_j^s \eta_j$$

که در آن:

$$N_i = K_L\left(\frac{C_i^G}{H_{i'}} - C_i^L\right) \qquad (۸)$$

r_j^S = سرعت واکنش شماره j براساس غلظتهای تودهٔ فاز مایع

ε_1 = تخلخل بستر کاتالیست $(m^3 l/m^3 p)$

ρ_e = دانسیته کاتالیست $(kg_{cat}/m_3 P)$

V_{ij}= عنصر ij از ماتریس ضرایب استوکیومتری

η_j= ضریب تأثیر واکنش شماره j

۴- موازنه انرژی در فاز مایع

(۹)

$$u_L \rho_L C_{PL} \frac{dT_L}{dz} = \sum_{i=1}^{4}(1-\varepsilon_1)\rho_c \eta_j r_j^s(-\Delta H_j) + h_L a_L (T_G - T_L) + \sum_{i=1}^{2} N_L a_L \Delta H_i^{sol}(T_L)$$

ΔHi^{sol}= گرمای انحلال (J/mol)

ΔHi^{sol}= گرمای انحلال (J/mol)

(-ΔHi)= گرمای واکنش (J/mol)

U_L= سرعت ظاهری مایع $(m_l^3/m_r^2 S)$

۵-موازنه جرم در دانه کاتالیست:

(۱۰)

$$\frac{D_e}{r^2}\frac{d}{d_r}\left(r^2 \frac{dci^s}{dr}\right) = \rho c \sum_{j-1}^{4} v_{ij}$$
$$(c_i^s,...,c_4^S,T_l) i = 1,2,...,6$$

و ضریب تأثیر واکنش j از رابطه زیر محاسبه می شود.

(۱۱)

$$\eta_j = \frac{3\int_O^{RC} r^2\ r_j\ (c_1^S, c_2^S,..., c_4^S, T_L)\, dr}{R_C^3\, rj\,(c_1^S,...,c_4^S,T_L)}$$

که در آن R_C شعاع یک دانه کاتالیست است.

شرایط مرزی (B.C):

At: Z=0 $\quad C_i^G = C_{io}^G, \quad$ I=1,2,

$C_i^L = C_{io}^L$, $T_G = T_{GO}$, $T_L = T_{LO}$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-09]

$$r=R_c \quad C_i^S = C_i^L, r=0 \frac{dc_i^S}{dr} = 0, i=1,2,...6$$

ب – فرضیات مدل:

در صورت مدل فرضیات زیر اعمال شده است:

۱- سرعت های گاز و مایع در سراسر راکتور ثابت هستند (هم در سطح مقطع و هم در طول راکتور)

۲- گرادیان غلظت شعاعی در راکتور وجود ندارد.

۳- فعالیت کاتالیست با زمان تغییر نمی‌کند.

٤- راکتور در شرایط پایدار (Steady state) کار می کند.

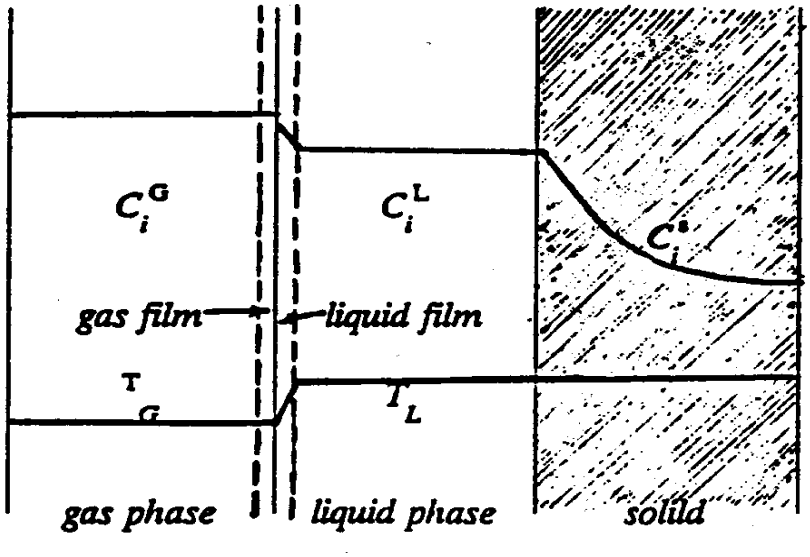
۵-شرایط فرآیند در فشار ثابت می‌باشد ولی در اینجا بر خلاف کار Hoffman فرض ایزوترم بودن برداشته شده است.

٦- از اختلاف دما و غلظت بین تودهٔ مایع و سطح کاتالیست صرفنظر شده است.

۷- واکنشهای شیمیائی فقط در کاتالیست انجام می شوند.

۸- بازده خیس شدن (Wetting efficiency) صد در صد فرض شده است.

نیمرخ های غلظت و دما در راکتور سه فازی (Trickle bed) به صورت زیر می باشد.



شکل ۲- نیمرخ های غلظت و دما در سیستم راکتور سه فازی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-09]

نتایج

برای مدل ریاضی معرفی شده، یک روش Runge-Kutta مرتبه چهار [۵] حل شده است.

مدل ارائه شده قابلیت‌های زیادی را در ارائه و پیش بینی رفتار بسترهای قطره‌ای برای ترکیبات دی بنزوتیوفنی در حالت پایدار داراست و پس از اجرای برنامه می‌توان برحسب نیاز نتایج مختلفی از مدل بدست آورد.

برای ارزیابی مدل، آن را با کار Korsten, Hoffmann که یک شبیه‌سازی بر روی گوگردزدائی از گازوئیل خلاء با ترکیبات شامل مرکاپتانها (R-SH) ، سولفیدها (R_2S)، دی‌سولفیدها (RS_2) و تیوفن‌ها (C_4H_4S) بود در شرایط عملیاتی یکسان مقایسه کردیم و از صحت مدل ریاضی اطمینان یافتیم.

Korsten, Hoffmann از یک معادله سینتیکی مبتنی بر مکانیزم Langmuir-Hinshelwood برای محاسبه سرعت گوگردزدائی از ترکیبات گوگردی استفاده شده است ولی در مدل ما از معادله سرعت دقیق‌تری که منحصراً برای ترکیب دی‌بنزوتیوفن (که گوگردگیری از آن بسیار مشکل است) و اخیراً توسط G.F.Froment [٤] منتشر گردید استفاده شده و با در دست داشتن معالات سرعت برای دیگر گروههای الکیل دی بنزوتیوفنی نیز قابل توسعه می باشد.

برنامه ارائه شده در اینجا دارای قابلیت های مختلفی می باشد که عبارتند از:

برنامه کامپیوتری به زبان Fortran تهیه شد و در آن معادلات دیفرانسیل مدل بار محاسبه تغییرات غلظت هر یک از اجزاء و ترکیبات واکنش دهنده در طول راکتور

۱- تغییرات دمای ایجاد شده بر اثر حل شدن مواد از فاز گاز به درون فاز مایع و گرمایی آزاد شده در اثر واکنش
۲- تغییرات درصد وزنی گوگرد به صورت ترکیبات دی بنزوتیوفن موجود در گازوئیل در طول راکتور
۳- میزان گازهای H_2 و H_2S حل شده در گازوئیل
٤- اثرات دما و فشار روی فرآیند گوگردزدائی در حضور هیدروژن (HDS)
٥- تأثیر نوع کاتالیست در میزان گوگردگیری هیدروژنی در راکتور با بستر قطره‌ای (چنانچه معالات سرعت مربوطه در اختیار باشند).

شکلهای (۳) و (٤) بخشی از پیش‌بینی‌های مدل ریاضی ارائه شده را نشان می‌دهند . پارامترهای فیزیکی کاتالیست، خواص فیزیکی فاز گاز و مایع و شرایط اولیه عملیاتی در جداول (۱) تا (۳) نشان داده شده اند.

در این دو شکل تغییرات غلظت گوگرد، H_2S و H_2 در طول راکتور نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که غلظت گوگرد در طول راکتور از مقدار اولیه آن کاهش می‌یابد و غلظت هیدروژن در فاز گاز در طول راکتور کم شده و در فاز مایع حل می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-09]

افزایش طول راکتور فشار جزئی سولفید هیدروژن (H_2S) زیاد می شود که این می‌تواند بر فعالیت کاتالیست‌هائی که در شرایط عملیاتی کار می‌کنند تأثیر منفی بگذارد و گوگردزدائی بوسیله هیدروژن به مقدار زیادی بوسیله سولفید هیدروژن کاهش یابد. بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل (۳) معلوم می شود که واکنشهای HDS عملاً در $0/35^m$ طول اولیه راکتور تکمیل می‌شوند و در مابقی راکتور واکنشی انجام نمی شود ولی باید توجه داشت که از فعالیت کاتالیست به مرور زمان کاسته شده و جبهه واکنش به سمت نقاط انتهائی راکتور جابجا می‌شود تا هنگامی که میزان گوگردگیری راکتور افت کند که در این حالت لازم است کاتالیست احیاء شده و یا تعویض گردد.

شکل (۵) تأثیر فشار روی عملکرد گوگردگیری را نشان می دهد، مشاهده می‌شود که درصد تبدیل ترکیب گوگردی با افزایش فشار افزایش می‌یابد و با افزایش فشار روند تأثیر آن روی تبدیل ترکیبات گوگردی کند شده تا به یک نقطه مینیمم می‌رسیم. پس از آن، افزایش فشار باعث کاهش میزان تبدیل ترکیبات گوگردی می‌شود که این امر بخاطر جذب H_2S روی سطوح فعال کاتالیست در فشارهای بالاست که میزان فعالیت کاتالیست را کاهش می‌دهد [٦].

شکل (٦) نیز تأثیر دما روی عملکرد راکتور HDS را نشان می دهد، پارامترهای زیر وابسته به دمای عملیاتی راکتور هستند.

۱- ضریب نفوذ ترکیبات
۲- انتقال جرم در سطح مشترک گاز – مایع و مایع – جامد
۳- ضرایب هنری مربوط به هیدروژن و سولفید هیدروژن در ترکیب نفتی
٤- ویسکوزیته ترکیبات
٥- دانسیته ترکیبات

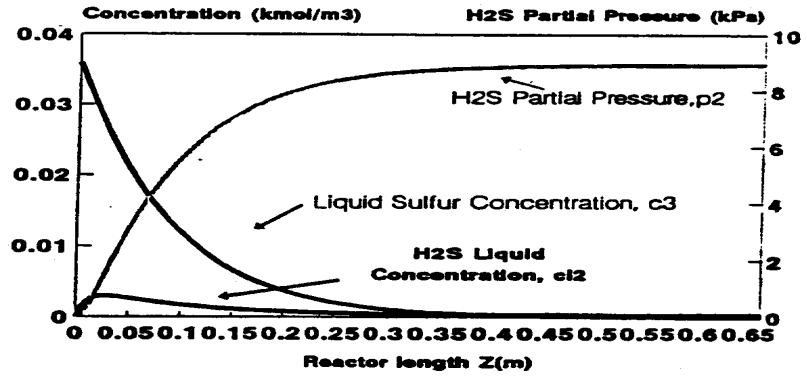
روابط مورد نیاز برای محاسبه پارامترهای فوق بر حسب دما در جای دیگری آورده شده است [۷].

مشاهده می‌شود که افزایش دما باعث کاهش بیشتر درصد وزنی گوگرد می‌شود و این به خاطر این است که با افزایش دما سرعت واکنشهای گوگردگیری افزایش می یابد.

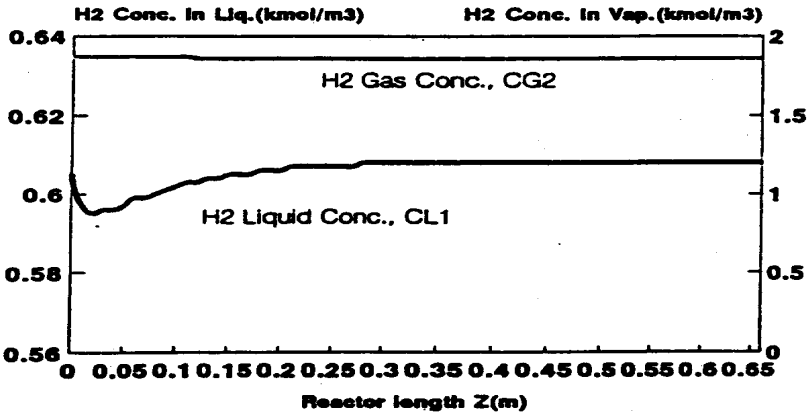
با اینکه افزایش دما اثر مساعدی بر گوگردگیری دارد ولی باید از دماهای بیش از حد اجتناب شود زیرا تولید کک را افزایش می دهند که در نهایت باعث غیرفعال شدن کاتالیست ها می شوند.

نرم افزار حاضر این امکان را فراهم می کند که عملکرد راکتورهای در مقیاس کوچک و بزرگ را به ازاء شرایط هندسی و عملیاتی مختلف از قبل پیش‌بینی نمود و به این ترتیب ابزار مهمی برای طراحی و بهینه‌سازی راکتورهای HDS مخصوصاً برای گوگردزدائی عمیق تهیه شده است

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-09]

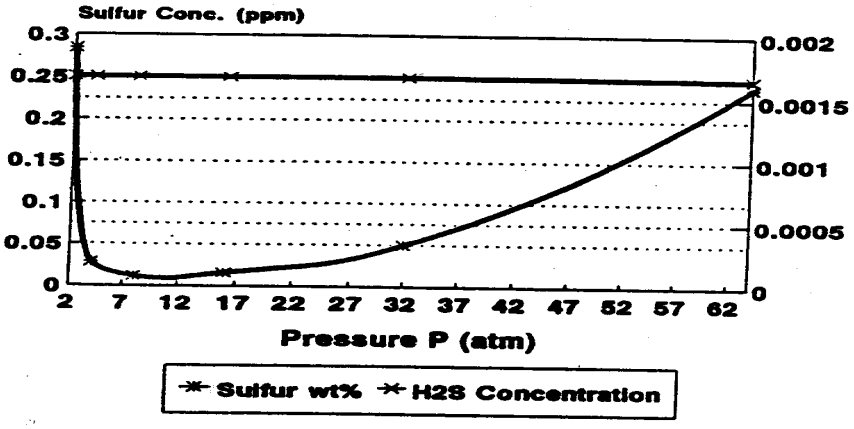


شکل ۳- تغییرات غلظت گوگرد و H_2S در طول راکتور (بر اساس مشخصات ارائه شده در جدول ۲)

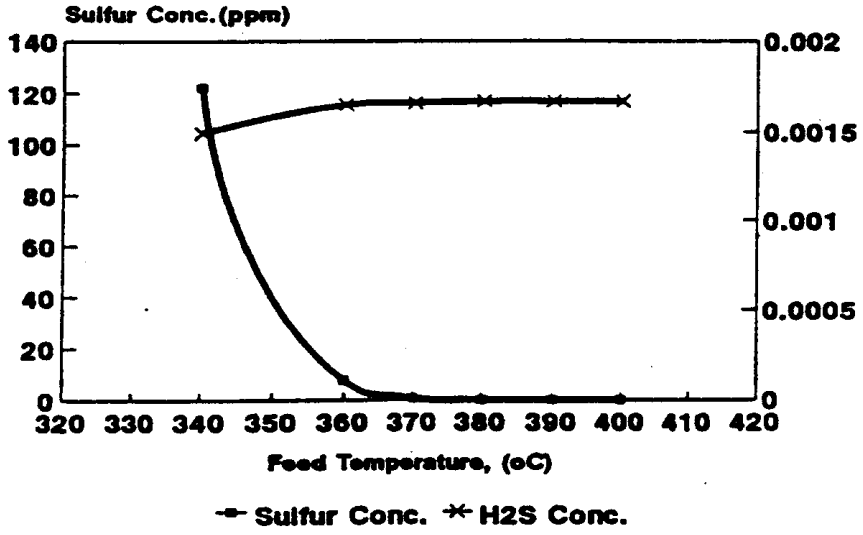


شکل ۴- تغییرات غلظت H_2 در طول راکتور (بر اساس مشخصات ارائه شده در جدول ۲)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-09]



شکل ۵- تأثیر فشار روی میزان گوگردزدائی توسط هیدروژن



شکل ۶- تأثیر دما روی میزان گوگردزدائی توسط هیدروژن

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-09]

جدول ۱- مشخصات هندسی کاتالیست و راکتور بررسی شده در مدل

طول راکتور که با کاتالیست پرشده(m)	قطر راکتور (m)	قطر کاتالیست (m)	حجم خالی بستر (m_f^3 / m_r^3)	حجم خالی ذره کاتالیست (m_f^3 / m_p^3)	دانسیته کاتالیست (Kg/m^3)
$٦/٦٧\times١٠^{-١}$	٣×١٠^{-٢}	$١/٣\times١٠^{-٣}$	٠/٥	٠/٦	١٤٢٠

جدول ۲- شرایط عملیاتی مربوط به کار Korsten, Hoffmann [5]

دمای گاز TG(°c)	دمای مایع TL(°c)	دبی گاز $QG(m^3/hr)$	دبی مایع $QL(m^3/hr)$	فشار PT(atm)
٣٧٠	٣٧٠	$٤/٠٨\times١٠^{-٣}$	$١/٩١٤\times١٠^{-٤}$	٩٨/٧

.جدول ۳- شرایط اولیه خوراک ورودی به راکتور HDS

وزن مولکولی خوراک(MW)	٤٢٠
دانسیته خوراک در ١٥/٦ °c (Kg/m^3)	٩١٤/٦
نقطه جوش متوسط MeABP(°c)	٤٥١
API خوراک	٢٢/٧
درصد مولی هیدروژن در خوراک گازی	٪١٠٠
درصد مولی سولفید هیدروژن در خوراک گازی	٪٠
درصد مولی گاز بی اثر در خوراک گازی	٪٠
درصد مولی گوگرد در خوراک گازوئیل	٠/١٢٦

مراجع

١- ابوالحمد، گیتی "مبانی پالایش نفت"، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ اول، بهار (١٣٧٥)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-09]

2- M,H.AL-dahhan, M.P. dudukovic. “Catalyst bed dilution for improving Catalyst Wetting in laboratory trickle-bed reactor,.” AICHE.J,VOL 42, NO.9,September, (1996)
3- Gilbert F.Froment, cuy A. Depauw, V.vanrysselberghe “Kinetic Modeling and “reactor simulation in hydrodesulfurization of oil fractions”. Ind. Eng. Chem. Res, 33, P.2975-2988. (1994)
4- V. Vanrysselbergne, G.F.Froment. “Hydrodesulfurization of dibenzothiophene on a Co.Mo/Al2O3 catalyst: reaction network and kinetics”. Ind. Eng. Chem . Res, 35, 3311-3318, (1996)
5- R.G. Rice, D. DO. “Applied mathematics and modeling for chemical engineers.” John Wiley & Sons, Canada, (1995).
6- Hans. Korsten and u. Hoffmann “Three-phase reactor model for hydrotreating in pilot trickle-bed reactors” AICHE.J,Vol, 42,NO.5, May(1996)
۷- شکری قلعه، سعید. ”شبیه سازی راکتورهای چندفازی برای گوگردزدائی از سوخت دیزل“، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم و فنون مازندران ، مهر ۱۳۷۸

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-09]