

توضیح سردبیر: اگرچه این مقاله در شماره ۳۴ مجله فرآیند نو چاپ شده ولی به دلیل درج نشدن صحیح اسامی و درخواست نویسنده، مجدد با اسامی درست در این شماره درج شده است. لازم به ذکر است که نویسنده طی نامه‌ای درخواست نموده است که مقاله قبلی از فهرست مقالات درج شده در فرآیند نو حذف شود.

شبه‌سازی فرایند گوگردزدایی در یک رآکتور ثابت بستر به روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

سروش صباغیان^۱، لیلا وفاجو^{۱*}، سعید شیرازیان^۲

۱- تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی

۲- تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی

پیام‌نگار: Vafajoo@azad.ac.ir

چکیده

فرایندهای بسیاری برای کاهش انتشار دی‌اکسید گوگرد توسعه پیدا کرده است. فرایند رایج برای کاهش آلاینده دی‌اکسید گوگرد، استفاده از سنگ آهک است. در این تحقیق، فرایند گوگردزدایی مستقیم به صورت یک واکنش (جامد-گاز) غیر کاتالیزی در یک رآکتور ثابت بستر پر شده از کلوخه‌های آهک به صورت دینامیکی مدل شده است. مشاهده گردید که سه عامل دما، فشار سیستم و غلظت گاز، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در میزان گوگردزدایی دارند. در این بررسی دیده شد که جمله نفوذ در داخل لایه‌های محصول به طور محسوسی تابع دما بوده و به سختی با درجه سولفوردارشدن تغییر می‌کند. به علت آنکه در دماهای بالا کلوخه شدن ذرات سنگ آهک رخ می‌دهد، لایه‌های محصول در این دماها متخلخل می‌باشند. نتایج این مدلسازی تطابق قابل قبولی با اطلاعات تجربی دارد.

کلمات کلیدی: دینامیک سیالات محاسباتی، رآکتور ثابت بستر، گوگردزدایی، واکنش (جامد-گاز)

۱- مقدمه

در میان این روش‌ها، روش تزریق مستقیم جاذب خشک، بسیار ساده و کم هزینه است. در این روش، جاذب که غالباً سنگ آهک است، به طور مستقیم در معرض گاز حاوی دی‌اکسید گوگرد قرار می‌گیرد.

واکنش سولفوردارشدن سنگ آهک به دو طریق مستقیم و غیر مستقیم انجام می‌شود. تفکیک این دو روش معمولاً با توجه به فشار جزئی CO₂ در سیستم تعیین می‌شود. هنگامی که فشار جزئی CO₂ در سیستم کمتر از فشار تعادلی سیستم در یک دمای مشخص باشد، سنگ آهک به CaO و CO₂ تجزیه می‌شود. اگر مرحله آهک زنی اتفاق بیفتد، سنگ آهک ابتدا به CaO و CO₂ تجزیه می‌شود و سپس به دی‌اکسید گوگرد تبدیل می‌گردد. این فرایند، اغلب

انتشار دی‌اکسید گوگرد از منابع مختلف مانند صنایع تولیدکننده انرژی، صنایع تولیدکننده سیمان و منابع دیگر اثرات مخرب و خطرناکی بر روی محیط زیست دارد. بشر از گذشته متوجه تأثیر مخاطرات انتشار دی‌اکسید گوگرد بوده است. در دهه‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای مقابله با انتشار دی‌اکسید گوگرد انجام گرفته و روش‌های بسیاری برای پاک‌سازی گازهای خروجی از دی‌اکسید گوگرد توسعه پیدا کرده است که به طور مثال می‌توان به روش‌هایی همچون شستشوی مرطوب^۱، شستشوی خشک^۲، تزریق مستقیم جاذب خشک^۳، فرایند احیای مجدد^۴، اشاره کرد.

1. Wet Scrubbing
2. Dry Scrubbing
3. Direct Dry sorbent Injection
4. Regenerable Process

پون باسا یا کول و همکارانش [۷] روش‌های ریاضی در ارتباط با فرایند گوگردزدایی که با بیان دینامیکی فرایند است را بسط و گسترش داده اند. همچنین در این تحقیق تأثیرات عواملی مانند اندازه ذرات، دما، در مدل بررسی شده است. لی یو و همکاران [۸] نیز به بررسی رفتار فرایند سولفوردارشدن سنگ آهک در یک رآکتور ثابت بستر پرداخته‌اند.

در این تحقیق، مدل‌سازی دینامیکی فرایند گوگردزدایی به روش مستقیم به کمک ذرات آهک در زمان‌های مختلف انجام شده و تأثیر پارامترهایی مانند غلظت گاز، فشار سیستم و دما در زمان‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

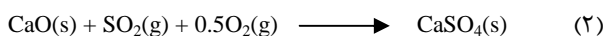
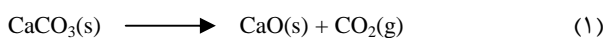
۲- مدل‌سازی

۲-۱ فرضیات

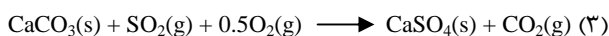
در این تحقیق یک مدل ریاضی دو بعدی برای بررسی راکتور ثابت بستر سولفوردارشدن مستقیم دی اکسید گوگرد توسعه داده شده است. این مدل، دارای فرضیات زیر است:

- دما و فشار، در طول راکتور، ثابت است.
 - واکنش سولفوردارشدن به صورت برگشت ناپذیر و از درجه اول نسبت به SO_2 در داخل ذرات انجام می‌گیرد.
 - ضریب نفوذ در داخل ذرات آهک یکنواخت در نظر گرفته شده است.
 - ذرات به صورت کروی و متخلخل و بدون تغییر اندازه در نظر گرفته شده اند.
 - هنگامی که غلظت اکسیژن بالاتر از ۵٪ حجمی باشد غلظت این ماده هیچ تأثیری بر روند فرایند سولفوردارشدن سنگ آهک ندارد.
 - جریان گاز، آرام است.
- در جدول (۱) مقادیر پارامترهای شیمی فیزیکی و در جدول (۲) پارامترهای فیزیکی بستر ارائه شده است.
- مدل ارائه شده معادلات بقای جرم را برای دو ناحیه شامل جریان آزاد و ذرات کروی متخلخل آهک در نظر می‌گیرد. در شکل (۱) نمایی از تعدادی ذره کروی به عنوان نمونه‌هایی از کل ذرات داخل راکتور نشان داده شده است.

گوگردزنی غیر مستقیم نامیده می‌شود. واکنش‌های این فرایند به شرح زیر می‌باشد:



اگر فشار جزئی CO_2 در سیستم بالاتر از فشار تعادلی CO_2 روی سنگ آهک باشد، سنگ آهک به‌طور مستقیم با دی اکسید گوگرد واکنش می‌دهد. این فرایند، سولفوردارشدن مستقیم سنگ آهک نامیده می‌شود که واکنش آن به‌صورت زیر است:



واکنش سولفوردارشدن مستقیم سنگ آهک تحت تأثیر چندین پارامتر از قبیل دما، فشار سیستم و غلظت گاز قرار دارد. تأثیر هر یک از پارامترهای مذکور بر واکنش سولفوردارشدن مستقیم سنگ آهک با توجه به شرایط واکنش متفاوت است. [۲]

همانطور که اشاره شد در دهه‌های اخیر تحقیقات بسیاری بر روی این فرایند انجام گرفته است. از مهمترین تحقیقات صورت گرفته می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

لیسا و همکاران [۳] به بررسی و تعیین درجه واکنش سولفوردارشدن در شرایط مختلف واکنش پرداخته و به این نتیجه رسیده اند که مرتبه پایین واکنش نسبت به SO_2 به‌دلیل مرحله کنترل کننده نفوذ گاز در فاز جامد می‌باشد.

تولین و همکاران [۲] به بررسی تأثیر غلظت‌های مختلف CO_2 در شرایط واکنش پرداختند و به این نتیجه رسیدند که تأثیر منفی غلظت‌های بالای دی اکسید کربن با تجزیه برگشت پذیر سنگ آهک در ارتباط است. در تحقیقی که توسط گوآردوآ و همکارانش [۵] انجام گرفت، هر سه معادله موازنه نکانه، جرم و انرژی در سه جهت برای شبیه‌سازی یک رآکتور ثابت بستر در نظر گرفته شده است. هدف این تحقیق به‌دست آوردن نمودار دما و سرعت در طول رآکتور است. در بحث سینتیک واکنش سولفوردارشدن می‌توان به مطالعه و بررسی زون هو وون و همکاران و آلوارز و همکاران [۲] در بررسی سینتیک واکنش سولفوردارشدن برای سنگ آهک‌های مختلف در گستره دمایی ۱۱۲۳ کلوین تا ۱۲۲۳ کلوین اشاره کرد.

۲-۲ معادلات مدل

همان‌طور که اشاره شد، مدل شامل دو بخش جریان آزاد گاز و ذرات کروی متخلخل آهک می‌باشد. بنابراین معادلات مدل به دو بخش اصلی تقسیم می‌گردد:

۲-۲-۱ معادلات جریان آزاد گاز

معادله اصلی انتقال جرم (معادله پیوستگی) در یک جریان واکنشی گاز به صورت زیر است:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_i \nabla C_i + C_i U) = R_i \quad (4)$$

C_i : غلظت گاز،

t : زمان واکنش، U : سرعت گاز،

D : ضریب نفوذ گاز در داخل بستر،

R : سرعت واکنش

شرایط مرزی و اولیه معادله پیوستگی به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \text{At } y = L & \quad C = C_0 \\ \text{At } y = 0 & \quad n \cdot (-D_i \nabla C_i) = 0 \end{aligned}$$

$$\text{At } x = 0 \quad \frac{\partial C_i}{\partial x} = 0$$

$$\text{At } x = w \quad \frac{\partial C_i}{\partial x} = 0$$

با حل این معادله، توزیع غلظت گاز (SO_2) در جریان آزاد داخل رآکتور تعیین می‌گردد. برای حل معادله پیوستگی نیاز به معادله تکانه برای تعیین توزیع سرعت می‌باشد. معادله (ناویر-استوک)، توزیع سرعت در جریان گاز را تعیین می‌کند:

$$\frac{\rho \partial U}{\partial t} - \nabla \cdot [-pI + \eta(\nabla U + (\nabla U)^T)] + \rho(U \cdot \nabla)U + \nabla P = F \quad (5)$$

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (6)$$

P : فشار سیستم،

U : سرعت گاز،

t : زمان،

η : گرانیوی دینامیکی،

F : نیروی حجمی.

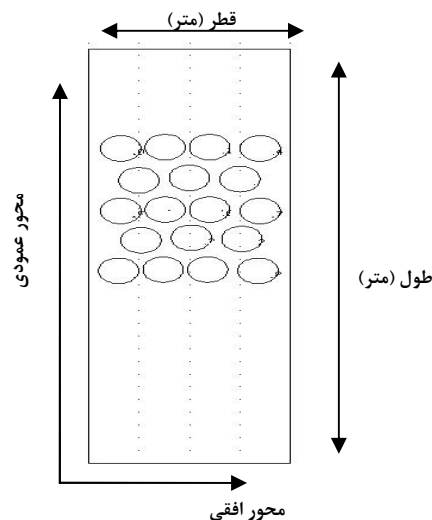
1. Volume Force

جدول ۱- مقادیر پارامترهای استفاده شده در این تحقیق [۱]

پارامتر	مقدار	واحد
چگالی گاز (SO_2)	۰/۶۶	(Kg/m ³)
گرانیوی گاز (SO_2)	$2/6 \times 10^{-5}$	(Pa.s)
ضریب نفوذ گاز در داخل ذرات	$6/71 \times 10^{-6} \exp(-1000/T)$	(m ² /s)
ضریب نفوذ گاز در داخل بستر	$2/49 \times 10^{-8}$	(m ² /s)
غلظت اکسیژن در خوراک گازی	۰/۲	m ³
شدت جریان گاز	1×10^{-4}	(m ³ /s)
فشار کل	$1/13 \times 10^5$	Pa
نمونه وزنی	۰/۲	g
دما	۱۱۲۳،۱۰۲۳،۹۹۳،۸۸۳	K

جدول ۲- مقادیر پارامترهای فیزیکی بستر [۱]

پارامتر	مقدار	واحد
اندازه ذرات جامد	۵۴	μm
قطر رآکتور	۰/۰۲	m
طول رآکتور	۰/۶۵	m
تخلخل قسمت پر شده بستر	۰/۴۱	—

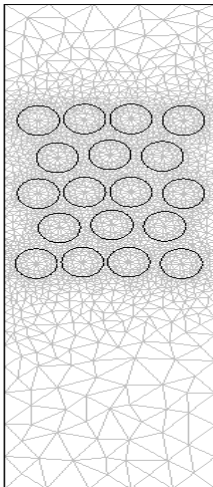


شکل ۱- نمایی از بستر مدل شده در این تحقیق

خطا و استفاده از حل کننده عددی UMFPACK صورت گرفته است. این حل کننده بر اساس بازه‌های زمانی ضمنی^۱ و برای حل مسائل با شرایط ناخطی، بسیار مناسب است. همچنین این حل کننده برای محیط‌های یک‌بعدی، دوبعدی و همچنین سه بعدی با درجه آزادی کم، مناسب است. شکل (۲) شبکه‌بندی ایجاد شده را نشان می‌دهد. تعداد مش‌های مثلثی ایجاد شده ۲۳۹۶۷ عدد است. در این تحقیق از مش‌بندی مثلثی به منظور رسیدن به یک فضای شبکه‌بندی یکنواخت و همگن استفاده شده است.

جدول ۳- پارامترهای سینتیکی مدل [۱]

واحد	مقدار	پارامتر
(m/s)	۱۹	k_0
(J/mol)	۹۰۰۰	E
(J/mol.K)	۸,۳۱۴	R
K	۱۱۲۳,۱۰۲۳,۹۹۳,۸۸۳	T



شکل ۲- شبکه‌بندی بستر پر شده از ذرات آهک

۳- نتایج مدل‌سازی

۱-۳ توزیع سرعت جریان گاز در داخل بستر

شکل (۳) توزیع سرعت جریان گاز در توده سیال را نشان می‌دهد. توزیع سرعت در توده سیال با استفاده از حل معادله

1. An Implicit Time-Stepping

شرایط مرزی معادله ناویر استوکس به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{At } y = L & \quad U = U_0 \\ \text{At } y = 0 & \quad P = P_{\text{atm}} \\ \text{At } x = 0 & \quad U = 0 \\ \text{At } x = w & \quad U = 0 \end{aligned}$$

با حل کردن همزمان معادلات پیوستگی و (ناویر- استوک)، توزیع غلظت در توده گاز مشخص می‌شود.

۲-۲-۲ معادلات جریان داخل ذرات کروی متخلخل آهک

معادله پیوستگی داخل ذرات کروی نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_j \nabla C_j + C_j U) = R_j \quad (7)$$

شرایط مرزی معادله پیوستگی:

$$\text{At } r = r_0 \quad C = C_{\text{توده}}$$

در داخل ذرات کروی، واکنش شیمیایی بین دی اکسید گوگرد و ذرات کروی (CaCO_3) رخ می‌دهد. این واکنش شیمیایی (R_j) نسبت به دی اکسید گوگرد از درجه اول است و موجب کاهش دی اکسید گوگرد در جریان گاز خروجی می‌گردد. سینتیک این واکنش به صورت زیر است [۱].

$$-r_a = k * C_{so2} \quad (8)$$

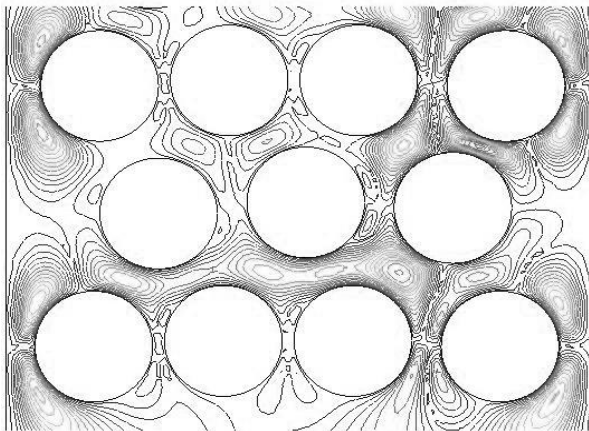
مقدار ثابت سرعت واکنش با استفاده از معادله آرنیوس به صورت زیر تعیین می‌شود: [۱]

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (9)$$

مقادیر پارامترهای سینتیکی در جدول (۳) ارائه شده است.

۲-۳ حل عددی معادلات

معادلات مدل ابتدا بدون بعد شده و سپس با توجه به شرایط مرزی با استفاده از روش عددی بر مبنای المان (عنصر) محدود حل شده اند. این آنالیز با روش عنصر محدود با ترکیب مش انطباقی و کنترل



شکل ۴- تغییرات کانتور غلظت در طول رآکتور و مابین ذرات

۳-۳ توزیع غلظت SO₂ در داخل ذرات کروی متخلخل

چگونگی توزیع غلظت گاز (SO₂) در داخل ذرات کروی در شکل (۵) نمایش داده شده است. در این نمودار، توزیع غلظت دی اکسید گوگرد در یک ذره کروی نمونه که به ترتیب در بالا، وسط و پایین بستر قرار دارد در بازه زمانی ۰ تا ۵۰۰۰ ثانیه نمایش داده شده است. این نمودارها به خوبی کاهش غلظت دی اکسید گوگرد در زمان‌های مختلف و در عبور از فضای متخلخل داخلی ذرات کروی را نشان می‌دهند.

جهت اطمینان از صحت مدل‌سازی صورت گرفته، نتایج به دست آمده در تحقیق با داده‌های گزارش شده توسط محققان مختلف مقایسه شده است. روند و نتایج مدل‌سازی انجام شده در مقایسه با اطلاعات تجربی گزارش شده، مطابقت نسبتاً خوبی را نشان می‌دهد. در شکل (۶) نمودار درجه سولفوردارشدن حاصل از مدل‌سازی با اطلاعات تجربی مقایسه شده است. درجه سولفوردارشدن بر حسب زمان انجام واکنش به صورت زیر محاسبه شده است:

$$X = \varepsilon_0 \frac{\varepsilon}{(z-1)(1-\varepsilon_0)} \quad (10)$$

X: درجه سولفوردارشدن (کسر تبدیل مولی کلسیم در CaCO₃ به (CaSO₄،

ε: تخلخل،

ε₀: تخلخل اولیه،

z: نرخ حجم مولی فاز جامد بعد از واکنش سولفوردارشدن به قبل از واکنش

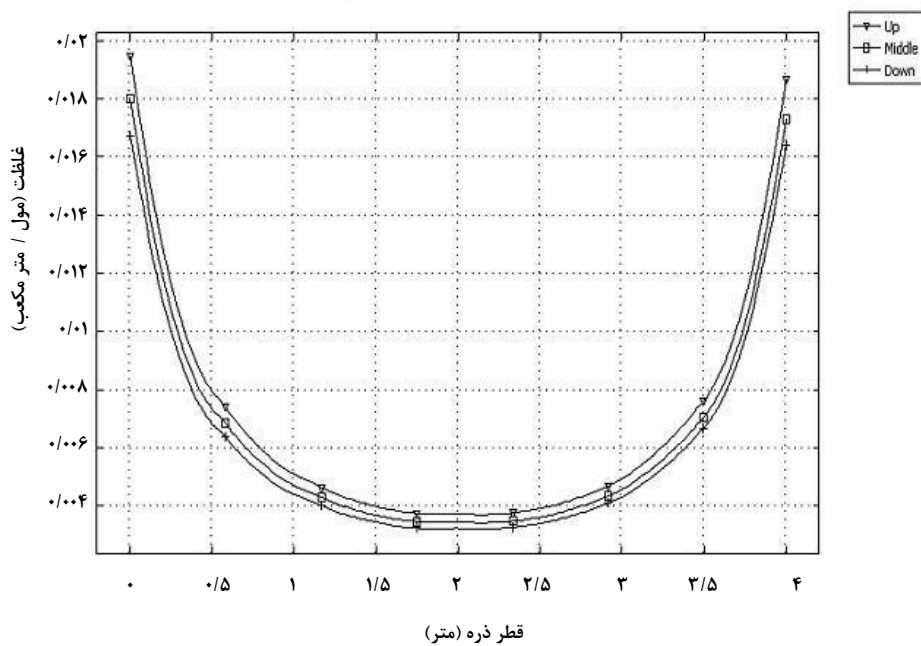
(ناویر- استوکس) به دست آمده است. همانطور که از شکل، نمایان است، تغییرات سرعت در جریان آزاد محسوس نیست اما تغییرات سرعت در نزدیکی دیواره‌های جامد ذرات کروی متخلخل، شدید است. این امر، به دلیل نیروهای گرانشی اعمال شده توسط دیواره جامد است که منجر به به وجود آمدن گرادیان سرعت شدید و همچنین نقاط مرده در اطراف برخی از ذرات کروی متخلخل می‌گردد.



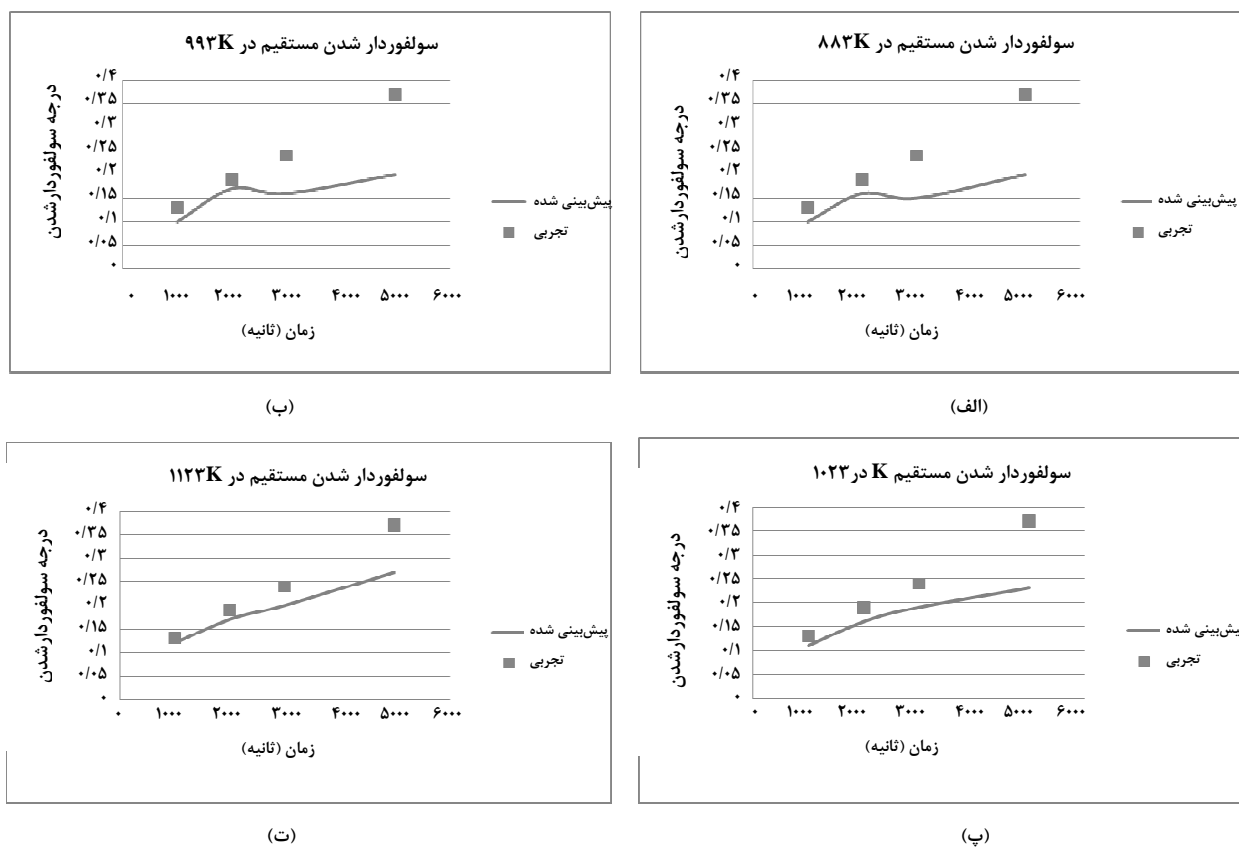
شکل ۳- توزیع سرعت در توده جریان گاز

۲-۳ توزیع غلظت جریان گاز در داخل بستر

شکل (۴) کانتور غلظت را در داخل بستر شامل جریان گاز و ذرات کروی متخلخل نشان می‌دهد. همانطور که گاز SO₂ در بستر جریان می‌یابد به دلیل اختلاف غلظت از توده سیال با دو مکانیزم نفوذ و جابجایی به سمت سطح ذرات کروی حرکت می‌کند و در سطح ذره، واکنش شیمیایی بین SO₂ و آهک رخ می‌دهد که این امر منجر به مصرف SO₂ و تولید سولفات کلسیم و گاز دی اکسید کربن می‌گردد. گرادیان غلظت ایجاد شده در توده سیال به دلیل واکنش شیمیایی SO₂ و کاهش غلظت آن می‌باشد. همچنین این شکل، نشان می‌دهد که واکنش شیمیایی در سطح ذرات کروی نسبتاً سریع است به طوری که غلظت گاز دی اکسید گوگرد در مرکز ذرات کروی تقریباً صفر می‌باشد.



شکل ۵- نمودار تغییرات غلظت در داخل سه نمونه از ذرات کروی به ترتیب در بالا، وسط و پایین بستر در بازه زمانی ۰ تا ۵۰۰۰ ثانیه



شکل ۶- مقایسه شبیه سازی انجام شده و داده های تجربی [۱]

تأثیر محسوسی در فرایند نفوذ در دو فاز گاز و جامد دارد. همچنین دیده شد که درصد تبدیل در فرایند به‌طور قابل ملاحظه‌ای تابع انتخاب ذرات جامد و فرض سطح مقطعی است که برای این ذرات در نظر گرفته می‌شود. با توجه به نتایجی که از این تحقیق حاصل شده است می‌توان گفت که، فرایند سولفوردارشدن مستقیم سنگ آهک برای رسیدن به درجه سولفوردارشدن بالا مناسب است. همچنین می‌توان برای دقیق کردن مدل، تابعیت سرعت واکنش را فقط برای یک جزء بخصوص تعریف نکرد و تأثیر همه واکنشگرها را در معادله سرعت لحاظ کرد. همچنین در این فرایند دیده شد که گازهای واکنش‌دهنده و تولید شده در محصولات، تأثیر محسوسی در روند فرایند دارند. البته درجه تأثیر هر یک از این گازها بر اساس شرایط واکنش متفاوت است.

جهت اطمینان از صحت مدل‌سازی صورت گرفته، نتایج به‌دست آمده با داده‌های گزارش شده توسط محققان مقایسه شده‌اند. روند و نتایج مدل‌سازی انجام شده در مقایسه با اطلاعات تجربی گزارش شده، مطابقت نسبتاً خوبی نشان می‌دهند.

مراجع

- [1] Liu. H., Katagiri. S., Kaneko. U., Okazaki. K., "Sulfation behavior of limestone under high CO₂ concentration in O₂/CO₂ coal combustion"- Fuel 79 945-953 (2000).
- [2] Hu. G, Johansen. K, Wedel. S, Hansen. J, "Review of the direct sulfation reaction of limestone"- Progress in Energy and Combustion Science 32 386-407 (2006).
- [3] Iisa. K., Hupa. M., Yrjas. P., "Twenty-Fourth Symposium (International) On Combustion"/ The combustion Institute, p.1349-56 (1992).
- [4] Niksiar. A., Rahimi. A., "A study on deviation of non-catalytic gas-solid reaction models due to heat effects and changing of solid structure", Powder Technology 193 101-109 (2009).
- [5] Guardoa. A., Coussiratb. M., Recasensa. F., Larrayoza. M.A., Escaler. X., "CFD study on particle-to-fluid heat transfer in fixed bed reactors: Convective heat transfer at low and high pressure", Chemical Engineering Science 61 4341 - 4353 (2006).
- [6] Ropelatoa. K., Meierb. H.F., Cremasco. A.M., "CFD study of gas-solid behavior in downer reactors: An Eulerian-Eulerian approach", Powder Technology 154 179 - 184 (2005).

همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، با توجه به روند تغییرات در دماهای مختلف می‌توان به این نتیجه رسید که مدل ارائه شده در دماهای بالا (۱۰۲۳ و ۱۱۲۳ درجه کلوین) انطباق بهتری با نتایج تجربی دارد و همان‌طور که در مقدمه تحقیق نیز آورده شد، واکنش سولفوردارشدن مستقیم سنگ آهک در دماهای بالا اتفاق می‌افتد و در نتیجه مدل ارائه شده می‌تواند پیش‌بینی قابل قبولی از این فرایند داشته باشد. دلایل اصلی انحراف نتایج شبه‌سازی در شکل (۶) را می‌توان در ۲ محور زیر خلاصه کرد.

۱- تعداد کلوخه‌های آهک در داخل بستر در حالت شبه‌سازی کمتر از حالت تجربی است.

۲- در طول بستر از جمله نفوذ صرف نظر شده و جمله جابجایی فقط در نظر گرفته شده است.

همچنین می‌توان با توجه به نتایجی که از این تحقیق به عمل آمده است گفت که، فرایند سولفوردارشدن مستقیم سنگ آهک برای رسیدن به درجه سولفوردارشدن بالا، مناسب است. همچنین برای بالا بردن دقت مدل می‌توان تابعیت سرعت واکنش را فقط برای یک جزء به خصوص در نظر نگرفت و تأثیر همه واکنشگرها را در معادله سرعت لحاظ کرد.

۴- جمع‌بندی

یک مدل انتقال جرم دو بعدی برای بررسی فرایند سولفوردارشدن مستقیم سنگ آهک که در یک رآکتور ثابت بستر اتفاق می‌افتد، بسط و گسترش داده شد. مدل ارائه شده بر اساس حل معادلات انتقال جرم و تکانه استوار است. این مدل به‌صورت ریاضی و با استفاده از فن دینامیک سیالات محاسباتی و بر اساس روش تفاضل محدود حل شده است. در بررسی صورت گرفته دیده شد که فرایند سولفوردارشدن مستقیم سنگ آهک با واکنش شیمیایی و عامل نفوذ کنترل می‌شود. در این بررسی دیده شد که جمله نفوذ در داخل لایه‌های محصول به‌طور محسوسی تابع دما بوده و به سختی با درجه سولفوردارشدن تغییر می‌کند. به علت آنکه در دماهای بالا کلوخه شدن ذرات سنگ آهک رخ می‌دهد، لایه‌های محصول در این دماها نیز متخلخل است. در این تحقیق، فشار سیستم، فشار اتمسفریک در نظر گرفته شده است اما در فشارهای بالا، این جمله

- [7] Punbusayakul. N., Charoensuk. J., Fungtammasan. B., "Modified sulfation model for simulation of pulverized coal combustion", Energy Conversion and Management 47 253–272 (2006).
- [8] Nijemeisland. M. and Dixon. A.G., "CFD Study of Fluid Flow and Wall Heat Transfer in a Fixed Bed of Spheres", Published online in Wiley Inter Science (2004).
- [9] Cheng. J., Zhou. J., Liu. J., Zhou. Z., Huang. Z., Cao. X., Zhao. X., Cen. K., "Sulfur removal at high temperature during coal combustion in furnaces: a review", Progress in Energy and Combustion Science 29 381–405 (2003).
- [10] Anthony. G., Dixon A.G., Nijemeisland. M., Hugh Stitt, "CFD Simulation of Reaction and Heat Transfer Near the Wall of a Fixed Bed", International Journal Of Chemical Reactor Engineering (2003).