

پیش بینی افت فشار خشک کن بستر سیال سدیم پرورات با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

مجتبی سمناهی رهبر*⁺

تهران، دانشگاه امام حسین (ع)، دانشکده علوم و مهندسی، گروه مهندسی شیمی

اصغر علیزاده داخل

گیلان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رشت، دانشکده فنی، گروه مهندسی شیمی

چکیده: استفاده از خشک کن‌های بستر سیال که به طور معمول برای خشک کردن مواد دانه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند، روش عمده خشک کردن سدیم پرورات است. شناخت هیدرودینامیک سیال در داخل بسترهای سیاله می‌تواند در تنظیم بهینه و نیز طراحی بسترهای با کارایی بالا بسیار سودمند باشد. در این پژوهش یک خشک کن بستر سیال با استفاده از روش محاسباتی حجم محدود مدل شد. در این مدل‌سازی یک منبع مومنتی شامل مقاومت گرانروی و اینرسی به منظور محاسبه افت فشار گاز که به وسیله توزیع کننده و بستریجاد می‌شود، در نظر گرفته شد. آزمایش‌هایی برای یافتن ضریب‌های ثابت معادله‌های مقاومت گرانروی و اینرسی انجام شد. نتیجه‌های حاصل از مدل‌سازی از جمله توزیع سرعت و چگالی گاز در داخل بستر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مقایسه افت فشار پیش بینی شده به وسیله محاسبه‌ها با داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که افت فشار سامانه به ویژه در شرایطی که بستر سیاله است با دقت مطلوبی پیش بینی می‌شود. به طوری که در شرایط سیالی، حداکثر خطا ۳ درصد است.

کلمات کلیدی: دینامیک سیالات محاسباتی، خشک کن بستر سیال، افت فشار، سدیم پرورات.

KEY WORD: Computation fluid dynamic, Fluidized bed dryer, Pressure drop, Sodium perborate.

مقدمه

با سرعت گاز افزایش می‌یابد. در سرعت گاز به اندازه کافی بالا، نیروهای دراگ^(۱) با وزن ذره‌ها برابر می‌شود. با افزایش بیشتر سرعت گاز، بستر شروع به انبساط می‌کند. در این حالت رفتار بستر ذره‌های جامد بسیار شبیه به رفتار سیالات است، مثل قابلیت جاری شدن که به آن سیال شده^(۲) گویند [۳-۱]. از دیدگاه مکانیک سیالات،

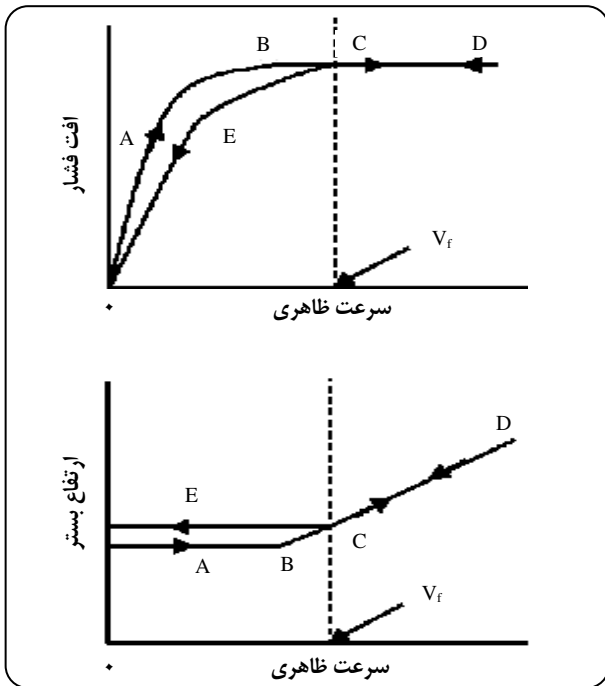
سیال‌سازی یک عملیات رایج در صنایع فرایندی است که در آن از جریان سیال (به طور معمول گاز) جهت اطمینان از اختلاط کامل بستر با ذره‌های جامد استفاده می‌شود. جریان گاز به طور عمودی از پایین به بالا از میان بستر عبور می‌کند. افت فشار میان بستر جامد (یا معادل آن نیروی دراگ رو به بالای ذره‌ها)

*عهد دار مکاتبات

+E-mail: msmmani@mail.ihu.ac.ir

(۱) Drag force

(۲) Fluidized



شکل ۱- تغییرهای افت فشار و ارتفاع یک بستر دانه‌ای با سرعت ظاهری.

سیال شدن، اگر قطر بستر ثابت باشد، تخلخل تابع مستقیمی از ارتفاع بستر خواهد شد [۲]:

$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{1-\varepsilon_1}{1-\varepsilon_2} \quad (6)$$

در بررسی هیدرودینامیک یک بستر دانه‌ای مطابق شکل ۱، در ابتدا وقتی که هوا جریان ندارد، افت فشار صفر است و بستر ارتفاع معینی دارد. با افزایش سرعت هوا، افت فشار به تدریج افزایش می‌یابد درحالی که ارتفاع بستر ثابت است (مسیر ABCD). با رسیدن به نقطه B، بستر شروع به انبساط می‌کند ولی افت فشار ثابت می‌ماند و دیگر با افزایش سرعت زیاد نمی‌شود. این زمانی است که نیروی وارد بر ذره‌ها از طرف سیال با نیروی وزن ذره‌ها برابر می‌شود و ذره‌ها شروع به جدا شدن از یکدیگر می‌کنند و در بستر شناور می‌شوند. با افزایش بیشتر سرعت، بستر افزایش ارتفاع را ادامه می‌دهد ولی افت فشار همچنان ثابت می‌ماند. می‌توان سرعت ظاهری را تا مقدار زیادی افزایش داد بدون اینکه ذره‌ها جامد به همراه سیال از بستر خارج شوند زیرا سرعت‌های نشست^(۱) ذره‌ها به‌طور معمول خیلی بیشتر از سرعت پیشینه ظاهری استفاده شده است.

یکی از مهم‌ترین فاکتورها در بستر ذره‌های جامد، افت فشار لازم جهت عبور سیال از بستر، با یک شدت جریان حجمی مشخص است. توزیع مناسب سیال در سطح مقطع بستر و توسعه مدل‌های توزیع سرعت در فیلم اطراف پرکننده برای محاسبه انتقال حرارت و جرم و طراحی پرکن‌ها برای دستیابی به توزیع مناسب سیال در سطح پرکن‌ها است نیز از جمله مواردی است که سعی شده است با روش‌های مکانیک سیالات به آن پرداخته شود. در این پژوهش افت فشار بستر و تغییرهای سرعت و چگالی ناشی از این افت فشار مورد بررسی قرار گرفته است. برای محاسبه افت فشار یک بستر ثابت به‌طور معمول از ضریب اصطکاک ارایه شده به وسیله معادله‌ی ارگان استفاده می‌شود:

$$f_p = 1.75 + \frac{150}{Re_p} \quad (1)$$

که ضریب اصطکاک f_p و عدد رینولدز بستر (Re_p) به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$f_p = \frac{\Delta p}{L} \frac{D_p}{\rho u_s^2} \frac{\varepsilon^3}{1-\varepsilon} \quad (2)$$

$$Re_p = \frac{D_p u_s \rho_f}{(1-\varepsilon)\mu} \quad (3)$$

در این معادله‌ها، Δp افت فشار، L طول بستر، μ گرانیوی دینامیکی، ρ_f چگالی سیال، u_s سرعت ظاهری که برابر با شدت جریان حجمی تقسیم بر سطح مقطع بستر است، D_p قطر کره معادل که برابر با (سطح ذره) / (حجم ذره) $\times 6$ است و ε تخلخل بستر است. تخلخل یک بستر، جزئی از حجم بستر است که به وسیله فضای خالی اشغال شده است:

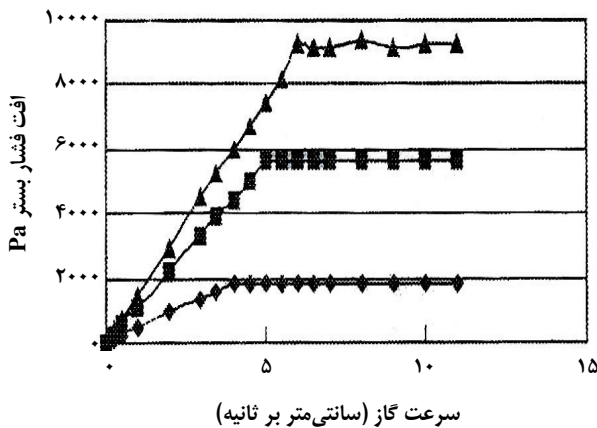
$$\varepsilon = \frac{V_{bed} - V}{V_{bed}} \quad (4)$$

در این معادله V_{bed} حجم کل بستر و V حجم ذره‌ها جامد است. چگالی فضای خالی (هوا) نسبت به چگالی ذره‌ها قابل صرفنظر کردن است بنابراین، می‌توان نوشت:

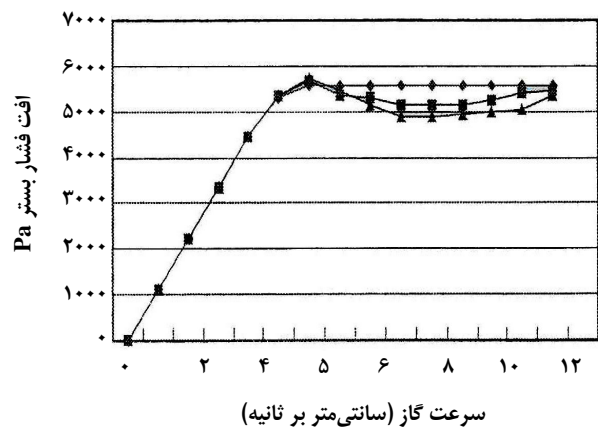
$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{bed}}{\rho_p} \quad (5)$$

که ρ_{bed} چگالی کل بستر (چگالی توده‌ای) و ρ_p چگالی ذره‌های جامد است. با افزایش سرعت گاز به بیش از حداقل سرعت

(1) Setting Velocity



شکل ۳- افت فشار در بستر سیال بر حسب ارتفاع بستر [۸].



شکل ۴- افت فشار در بستر سیال بر حسب سرعت ظاهری گاز [۸].

آنها بیان داشتند که توضیح هیدرودینامیک سامانه در این حالت نیازمند تعیین فاکتور شکل (Φ) و تخلخل بستر (ϵ_{mf}) است. نیروی وارده به وسیله‌ی جریان گاز روی بستر ذره‌ها در سطح مقطع A برابر ΔP است. در نقطه سیال‌سازی، این مقدار برابر با:

$$\Delta P = (1 - \epsilon)(\rho_p - \rho_f)gAL \quad (7)$$

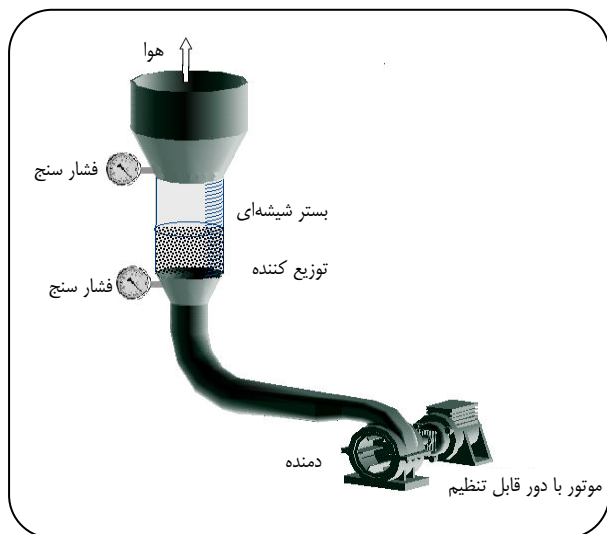
که ΔP برابر مقدار آن در معادله ارگان است.

افت فشار، یکنواختی بستر و پایداری آن از عامل‌هایی هستند که کیفیت خشک‌کن بستر سیال را تعیین می‌کنند. عامل‌های تأثیرگذار بر ناپایداری بستر سیال را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد. دسته نخست ناپایداری ذاتی است که مربوط به محیط سیال‌کننده (مانند گاز یا هوا) و محیط جامد است. دسته دوم ناپایداری مرتبط با ساختار و ابعاد دستگاه است که شامل توزیع‌کننده گاز، نسبت ارتفاع به قطر و مانند آنها است. قسمت اعظم افت فشار گاز (هوا) مربوط به توزیع‌کننده است. لو و همکارانش تأثیر سه نوع توزیع‌کننده متفاوت بر روی افت فشار گاز را در یک بستر سیال حاوی دانه‌های (گلوله‌های) شیشه‌ای مورد بررسی قرار دادند. شکل ۲ افت فشار حاصل در توزیع‌کننده را بر حسب سرعت ظاهری گاز ارایه می‌کند. آنان همچنین نشان دادند که با افزایش ارتفاع بستر، افت فشار نیز افزایش می‌یابد (شکل ۳) [۸].

چاندل و آلاپات افت فشار در یک نوع خاص از بستر سیال (با سیرکولاسیون مجدد) را بررسی نمودند. آنها به صورت آزمایشگاهی اطلاعات افت فشار را با تغییر شدت جریان گاز، ابعاد جامد و توزیع‌کننده گاز به دست آورده، مدلی ریاضی

در مسیر برگشت (DCE) با کاهش تدریجی سرعت، ابتدا درحالی که ارتفاع بستر به تدریج کم می‌شود، افت فشار ثابت می‌ماند. با گذشتن از نقطه C افت فشار شروع به کاهش کرده و ارتفاع بستر ثابت می‌شود. علت اینکه ارتفاع ثابت بستر در چرخه برگشت بیشتر از حالت اولیه است این می‌باشد که وقتی یک بستر از ذره‌ها برای مدتی به صورت راکد می‌ماند، نشست می‌کند. بعد از سیال شدن بستر وقتی سرعت هوا کاهش می‌یابد ذره‌ها در جای خود ثابت شده و کمتر در هم می‌روند و تخلخل بستر بیشتر از حالت اولیه می‌شود. اکنون اگر آزمایش تکرار شود، الگوی ECD در هر دو مسیر دنبال خواهد شد. سرعت در نقطه C را سرعت حداقل سیال شدن تعریف می‌کنند. سرعت حداقل سیال شدن ذره‌ها یک عامل هیدرودینامیکی است که تأثیر زیادی در رفتار هیدرودینامیکی بستر سیال دارد. بنابراین، پیش‌بینی دقیق مقدار آن برای طراحی چنین دستگاهی از اهمیت بالایی برخوردار است.

مسائل صنعتی بستر سیال به طور معمول با سیال‌سازی جامدات در بازه وسیعی از اندازه‌ی ذره‌ها و یا سامانه‌های شامل دو یا چند جزء سروکار دارد. در این حالت هر ذره حداقل سرعت سیال شدن مخصوص به خود را دارد. به طور معمول یک مقدار ظاهری برای کل بستر تعریف می‌شود. ون و یو [۴]، رو و نینو [۵] و ریبا و همکارانش [۶] این‌گونه سامانه‌ها و چگونگی تعریف سرعت ظاهری در آنها را مورد مطالعه و بررسی قرار داده‌اند. لیپنس و مولدر معادله‌های متفاوتی را که توسط پژوهشگران دیگر برای مشخص کردن حداقل سرعت سیال شدن ارایه شده بود تصحیح کردند [۷]. آنان اظهار داشتند که معادله ارگان می‌تواند رفتار بستر سیال را در سرعت حداقل سیال‌سازی به درستی پیش‌بینی کند.



شکل ۴- بستر خشک‌کن سدیم پرپورات و متعلقات آن.

مدل‌سازی شد. در این مدل‌سازی برای به دست آوردن ضریب‌های ثابت معادله‌های چاه مومنتومی توزیع‌کننده و بستر از داده‌های آزمایشگاهی استفاده شد. روش محاسبه‌های دینامیکی سیال یکی از بهترین شیوه‌ها برای پیش‌بینی هیدرودینامیک و سایر مشخصه‌های بستر سیال است که در آن معادله‌های مشتقات جزئی مربوط به پیوستگی و معادله‌های حاکم دیگر به وسیله‌ی روش‌های عددی تفاضل محدود، جزء محدود و روش‌های طیفی حل می‌شوند [۱۳].

بخش تجربی

جهت بررسی افت فشار بستر سدیم پرپورات، آزمایش‌هایی در شرایط متفاوت هوای ورودی انجام گردید. شمای دستگاه استفاده شده در شکل ۴ نشان داده شده است. دستگاه آزمایشگاهی استفاده شده شامل یک دمنده با دور قابل تنظیم، یک توزیع‌کننده برای هوای ورودی، یک بستر شفاف و دو فشارسنج که یکی در زیر توزیع‌کننده و دیگری در انتهای بستر نصب شده است، است. ویژگی‌های بستر و محتویات آن در جدول ۱ درج شده است. توزیع‌کننده هوا مورد استفاده یک توری سیمی است که ویژگی‌های آن در جدول ۲ آمده است.

برای بررسی اثر توزیع‌کننده بر روی افت فشار، آزمایش انجام گرفت. بدین صورت که افت فشار توزیع‌کننده در سرعت‌های متفاوت هوای ورودی اندازه‌گیری شد.

برای تخمین افت فشار ارایه کردند نتیجه‌های نشان می‌دهند که با افزایش منافذ در توزیع‌کننده گاز افت فشار افزایش می‌یابد. ذره‌های ریزتر هم افت فشار بیشتری نسبت به ذره‌های درشت‌تر ایجاد می‌کنند [۹].

سدیم پرپورات (NaBO_3) به شکل بلورهای سفید رنگ با قابلیت جریان خودبه‌خودی^(۱) و قابل حل در آب، پایدار و ماده جامد منبع ایجاد اکسیژن فعال است. سدیم پرپورات در انواع چهارآبه، سه‌آبه، یک‌آبه و بدون آب^(۲) یافت می‌شود که نوع‌های چهارآبه و یک‌آبه آن کاربرد صنعتی بیشتر و مهم‌تری دارند. با انحلال پرپورات‌ها در آب، هیدروژن پراکسید آزاد می‌شود و به همین دلیل می‌توان آن را شکل جامد هیدروژن پراکسید دانست که عامل اکسیدکننده بسیار فعالی به ویژه در صنایع شوینده است. در مقایسه با هیدروژن پراکسید، ترکیبات سدیم پرپورات دارای پایداری بیشتر و راحتی حمل و نقل هستند. سدیم پرپورات یک‌آبه دارای اکسیژن فعال بیشتری است و اکسیژن فعال آن معادل با اکسیژن فعال محلول ۳۲ درصد هیدروژن پراکسید و ۱/۵ برابر اکسیژن فعال سدیم پرپورات چهارآبه هم‌وزن خود است. این امر باعث می‌شود که این ماده در صنایع متفاوت کاربرد بیشتری داشته باشد به طوری که در صنایع شوینده از سدیم پرپورات یک‌آبه به مقدار حداکثر ۱۰ درصد وزنی و از سدیم پرپورات چهارآبه به مقدار حداکثر ۱۵ درصد وزنی استفاده می‌شود. البته به دلیل سرعت انحلال بالاتر و پایداری بیشتر سدیم پرپورات یک‌آبه در دمای بالا، استفاده از آن ترجیح داده می‌شود. سدیم پرپورات یک‌آبه با آگیری از سدیم پرپورات چهارآبه به دست می‌آید. عمل خشک‌کردن در خشک‌کن بستر سیال انجام می‌شود که امکان اعمال درجه حرارت بالا بدون تجزیه سدیم پرپورات چهارآبه و یکنواختی فرآورده را فراهم می‌سازد. خشک‌کن‌های بستر سیال از اهمیت و جایگاه ویژه در میان خشک‌کن‌ها برخوردارند. از این نوع خشک‌کن‌ها به‌طور معمول برای مواد دانه‌ای استفاده می‌شود. می‌توان از روش خشک‌کردن دیگری مانند نوار نقاله که در معرض هوای گرم قرار می‌گیرد نیز استفاده کرد که در این صورت باید دما زیر ۵۰ درجه سانتی‌گراد کنترل شود تا سدیم پرپورات چهارآبه تجزیه نشود [۱۲ - ۱۰].

در این پژوهش آزمایش‌هایی برای بررسی افت فشار یک بستر خشک‌کن سیال پرپورات سدیم انجام شد. هیدرودینامیک گاز در داخل بستر سیال با استفاده از روش محاسبات دینامیکی

(۱) Free-flowing

(۲) Anhydrous

ارتفاع بستر به تدریج افزایش می‌یابد. ارتفاع بستر در سرعت‌های متفاوت اندازه‌گیری شده و با توجه به معادله‌ی (۶) مقدارهای تخلخل بستر متناظر با آن محاسبه شد. جدول (۴) ارتفاع بستر در سرعت‌های متفاوت هوای ورودی و مقدارهای تخلخل متناظر با آن‌ها را نشان می‌دهد.

تغییرهای افت فشار بستر پر بورات (افت فشار کل منهای افت فشار توزیع‌کننده) به ازای سرعت‌های متفاوت هوای ورودی در شکل ۶ نشان داده شده است. هم‌چنان که مشاهده می‌شود این نمودار شامل دو قسمت است: خطی با شیب ثابت (افت فشار بستر ثابت) و خطی با مقدارها به تقریب ثابت (افت فشار بستر سیال). محل تقاطع این دو خط، نقطه حداقل سرعت سیال شدن است که این کمیت برای بستر مورد آزمایش 0.34 m/s به دست آمد.

بخش نظری

روش حجم محدود که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت، به‌طور پایه‌ای به‌عنوان یک فرمول‌بندی ویژه تفاضل محدود بسط داده شده است [۱۴]. برای انجام محاسبات در مدل، دامنه محاسباتی از 8 cm زیر توزیع‌کننده تا 7 cm بالای بستر (استوانه با قطر ثابت) در نظر گرفته شد. این دامنه به 50×200 سطح کنترلی تقسیم شد و محاسبات به‌روش حجم محدود انجام گرفت. معادله‌های حاکم بر جریان سیال برای یک سیال نیوتنی تراکم‌پذیر به صورت زیر قابل بیان است:

قانون بقای جرم سیال

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

معادله‌های ناویر-استوکس (مومنوم)

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{ grad } u) + S_{Mx} \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v u) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{ grad } v) + S_{My} \quad (10)$$

معادله انرژی

$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \text{div}(\rho i u) = -p \text{div} u + \text{div}(k \text{ grad } T) + \Phi + S_i \quad (11)$$

جدول ۱- ویژگی‌های بستر و محتویات آن.

| | |
|-------------|-----------------------------------|
| ۱۰ | ارتفاع بستر شیشه‌ای (cm) |
| ۵ | ارتفاع پر شده بستر (cm) |
| ۶۵۰ | چگالی پربورات (kg/m^3) |
| ۰.۴۹۵-۰.۴۱۷ | قطر متوسط ذره‌ها (mm) |

جدول ۲- ویژگی‌های مکانیکی توزیع‌کننده.

| ضخامت (μm) | قطر بزرگترین ذره‌ای که از توری می‌گذرد (μm) | تعداد سیم در یک اینچ (در امتداد مستقیم) | تعداد سیم در یک اینچ (در امتداد قطری) |
|-------------------------|--|---|---------------------------------------|
| ۶۵۰ | ۱۰۰ | ۱۷۲ | ۳۶ |

جدول ۳- مقدارهای افت فشار توزیع‌کننده.

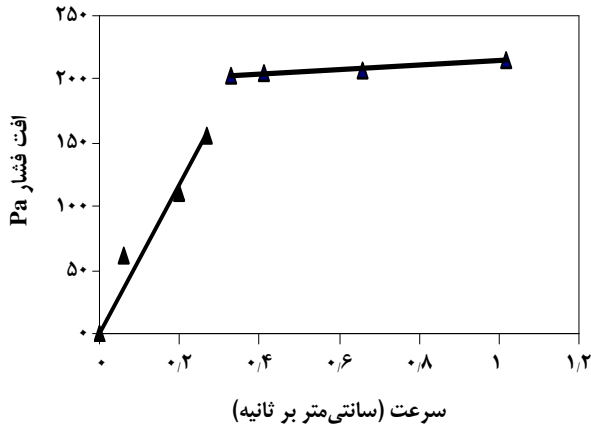
| افت فشار (Pa) | سرعت (m/s) |
|---------------|------------|
| ۲۷۰ | ۰.۵ |
| ۵۷.۵ | ۱ |
| ۹۶.۵ | ۱.۵ |
| ۱۳۹.۳ | ۲ |
| ۱۹۰.۳ | ۲.۵ |

جدول ۴- تخلخل و ارتفاع بستر در سرعت‌های متفاوت هوا.

| تخلخل بستر | ارتفاع بستر (cm) | سرعت هوا (m/s) |
|------------|------------------|----------------|
| ۰.۳۸ | ۵ | کمتر از ۰.۳۴ |
| ۰.۴۰ | ۵.۱ | ۰.۳۴ |
| ۰.۵۲ | ۶.۵ | ۰.۶۶ |
| ۰.۶۱ | ۷.۹ | ۱.۰۲ |

مقدارهای این افت فشارها در جدول ۳ آمده است. نمودار ترسیم‌ی مقدارهای این جدول به همراه معادله انطباقی در شکل ۵ نشان داده شده است.

پس از اندازه‌گیری افت فشار توزیع‌کننده، آزمایش‌هایی جهت اندازه‌گیری افت فشار بستر در سرعت‌های متفاوت هوای ورودی انجام گرفت. بستر تا ارتفاع 5 cm از سدیم پربورات پر شده و افت فشار هوا در توان‌های متفاوت دمنده اندازه‌گیری و مشاهده شد که با افزایش سرعت هوا به بیش از حداقل سرعت سیال شدن،



شکل ۶- نمودار تغییرهای افت فشار بستر بر حسب سرعت هوا.

K_1 و K_2 در این معادله‌های ضریب‌های ثابتی هستند که مقدار آن‌ها به ویژگی‌های بستر (به ویژه اندازه‌ی ذره‌ها) بستگی دارد. چگونگی محاسبه مقدارهای عددی نفوذپذیری و مقاومت اینرسی توزیع‌کننده، بستر ثابت و بستر سیال شده در زیر تشریح شده است.

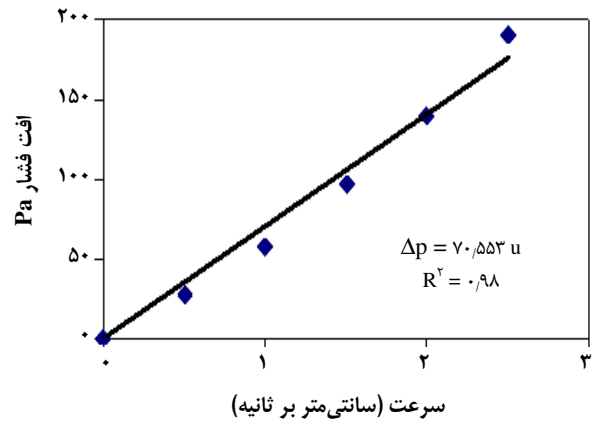
نفوذپذیری و مقاومت اینرسی توزیع‌کننده

توزیع‌کننده به عنوان یک بستر ثابت به ارتفاع ۶ میلی‌متر در نظر گرفته شد. به عبارت دیگر افت فشار حاصل از توزیع‌کننده (که ضخامت آن حدود ۰/۶ میلی‌متر است) در ضخامت بیشتری تقسیم شده است تا معادله‌های مومنتوم آسان‌تر همگرا شوند. برای توزیع‌کننده با توجه به ثابت بودن تخلخل و سایر ویژگی‌ها، مقدارهای α و C_2 عددی ثابتی هستند:

$$C_2 = 3,80 \times 10^{-8} \text{ m}^{-1}$$

$$\alpha = 3,85 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

این مقدارها با سعی و خطا به گونه‌ای به دست آمد که افت فشار حاصل کمترین خطا را نسبت به داده‌های آزمایشگاهی داشته باشد. مقدارهای پیش‌بینی شده افت فشار توزیع‌کننده با منظور کردن ضریب‌های بالا برای چاه مومنتومی در جدول ۵ با مقدارهای آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. برای بستر ذره‌ها با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و محاسبه‌ها و نیز سعی و خطا، ضریب‌های K_1 و K_2 در معادله‌های (۱۵) و (۱۶) به دست آمد.



شکل ۵- نمودار تغییرهای افت فشار توزیع‌کننده بر حسب سرعت هوا.

افت فشار توزیع‌کننده و بستر سیال با منظور کردن یک منبع مومنتومی شامل یک جمله دارسی^(۱) برای مقاومت گرانی و یک جمله افت اینرسی قابل محاسبه است:

$$S_i = -\left(\sum_{j=1}^2 D_{ij} \mu u_j + \sum_{j=1}^2 C_{ij} \frac{1}{\gamma} \rho |u_j| |u_i|\right) \quad (12)$$

که S_i جمله منبع مومنتوم برای معادله‌های اندازه‌ی حرکت در جهت i (x یا y) و C و D به ترتیب ماتریس‌های بیانگر مقاومت اینرسی و نفوذپذیری در دو بعد هستند. با فرض همگن بودن بستر خواهیم داشت:

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} u_i + C_2 \frac{1}{\gamma} \rho |u_i| |u_i|\right) \quad (13)$$

که α نفوذپذیری و C_2 فاکتور مقاومت اینرسی است. با توجه به معادله‌های (۱ تا ۳)، معادله ارگان افت فشار بستر پر شده را به صورت زیر بدست می‌دهد:

$$\Delta P = \frac{150 \mu (1-\varepsilon)^2}{D_p^2 \varepsilon^3} u + \frac{1,75 (1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^3} u^2 \quad (14)$$

با مقایسه معادله‌های (۱۳) و (۱۴) می‌توان α و C_2 را به صورت زیر نوشت:

$$\alpha = K_1 \frac{\varepsilon^2}{(1-\varepsilon)^2} \quad (15)$$

$$C_2 = K_2 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (16)$$

(۱) Darcy

$$K_1 = 1,13 \times 10^{-4}$$

$$K_2 = 26,092$$

مقدارهای نفوذ پذیری و مقاومت اینرسی محاسبه شده از روی این ضریب‌ها و معادله‌های (۱۵) و (۱۶) در چند سرعت متفاوت در جدول ۶ آمده است.

در حل معادله‌های ناویر استوکس به روش حجم محدود برای همگرایی بهتر پاسخ فشار ورودی و خروجی به‌عنوان شرایط مرزی قرار داده شد. بنابراین، برای محاسبه شرایط در سرعت ورودی هوا $u_1 = u_2$ ، با سعی و خطا مساله در فشارهای ورودی متفاوت حل شد تا پاسخ همگرا شده، سرعت ورودی مدنظر را به‌دست دهد.

نتیجه‌ها و بحث

شکل ۷ نمودار تغییرهای فشار در طول بستر را برای حالتی که سرعت هوای ورودی $u = 0,33 \text{ m/s}$ بوده و هنوز بستر سیالی نشده است نشان می‌دهد. هوای ورودی با رسیدن به توزیع‌کننده دچار افت فشار شده و این افت فشار تا خروج از بستر به صورت به تقریب خطی ادامه می‌یابد. هم‌چنان که ملاحظه می‌شود، افت فشار توزیع‌کننده به صورت جهش ظاهر نشده است، علت این است که هم‌چنان که ذکر شد برای هم‌گرایی بیشتر پاسخ، چاه مومنتی توزیع‌کننده در ارتفاع ۶ میلی‌متر منظور شده است. به عبارت دیگر به جای $0,65$ میلی‌متر که ضخامت توزیع‌کننده است، افت فشار آن در ۱ سانتی‌متر تقسیم شده است.

شکل‌های ۸ و ۹ برای بستر در شرایط مشابه رسم شده‌اند. نمودار تغییرهای چگالی و سرعت هوا در شرایط مشابه، به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. هم‌چنان که انتظار می‌رود با افزایش ارتفاع و افت فشار چگالی هوا در بستر از بیشترین مقدار خود در ورودی ($1,292 \text{ kg/m}^3$) به کمترین مقدار خود در خروجی ($1,267 \text{ kg/m}^3$) کاهش می‌یابد.

هم‌چنین سرعت هوا با رسیدن به توزیع‌کننده به تدریج افزایش می‌یابد. اما این افزایش سرعت، با توجه به اینکه تخلخل بستر $0,38$ است، خیلی کمتر از افزایش سرعت حقیقی هوا است. در حقیقت افزایش سرعت به‌دست آمده به دقت متناسب با کاهش (افت) فشار هوا طبق روابط گاز ایده‌آل می‌است. علت این امر، منظور نشدن کاهش سطح مقطع در محاسبه‌هاست. به عبارت دیگر اضافه نمودن چاه مومنتی به معادله‌ها فقط می‌تواند میزان افزایش سرعت به علت افت فشار را به دست دهد.

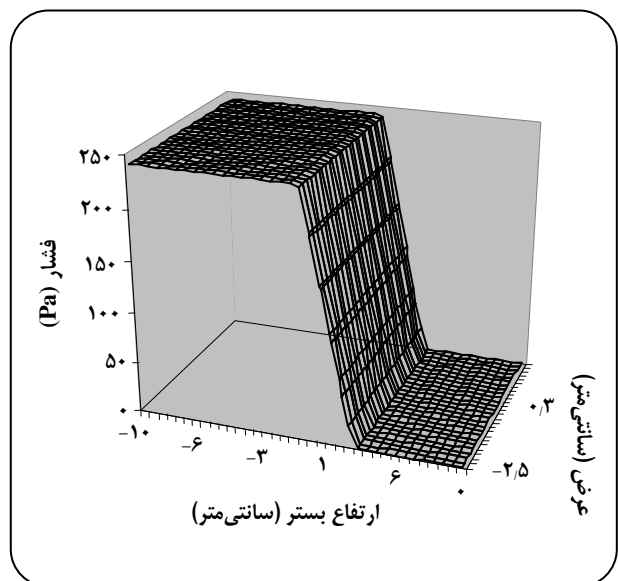
به منظور بررسی و مقایسه نتیجه‌های مدل با داده‌های تجربی حاصل از آزمایش‌ها، نمودار تغییرهای افت فشار سامانه (شامل

جدول ۵- افت فشار توزیع‌کننده.

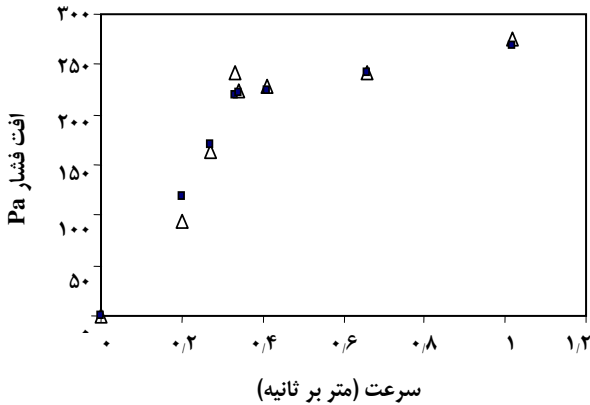
| سرعت (m/s) | افت فشار توزیع‌کننده (Pa) | | |
|------------|---------------------------|----------|------------|
| | آزمایشگاهی | پیش‌بینی | خطا (درصد) |
| ۰,۵ | ۲۷,۰ | ۲۶,۷ | -۱,۱ |
| ۱ | ۵۷,۵ | ۵۹,۰ | ۲,۶ |
| ۱,۵ | ۹۶,۵ | ۹۶,۹ | ۰,۴ |
| ۲ | ۱۳۹,۳ | ۱۴۰,۳ | ۰,۷ |
| ۲,۵ | ۱۹۰,۳ | ۱۸۹,۴ | -۰,۴ |

جدول ۶- مقدارهای نفوذ پذیری و مقاومت اینرسی بستر.

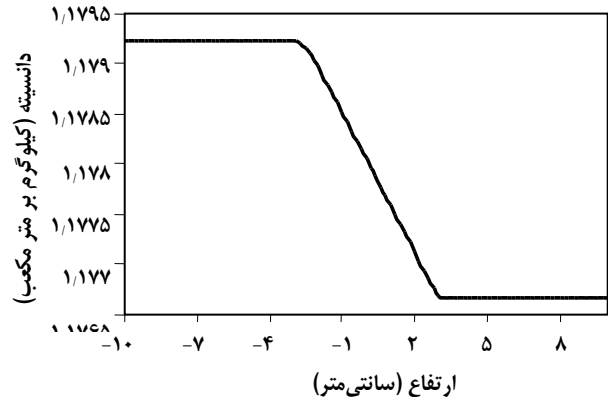
| سرعت (m/s) | تخلخل | $C_2 \text{ (m}^{-1}\text{)}$ | $\alpha \text{ (m}^2\text{)}$ |
|--------------|-------|-------------------------------|-------------------------------|
| کمتر از ۰,۳۴ | ۰,۳۸ | ۲۷,۰ | $1,61 \times 10^{-5}$ |
| ۰,۳۴ | ۰,۴۰ | ۵۷,۵ | $1,87 \times 10^{-5}$ |
| ۰,۴۱ | ۰,۴۳ | ۱۹۴,۷ | $2,73 \times 10^{-5}$ |
| ۰,۶۶ | ۰,۵۲ | ۹۶,۵ | $7,08 \times 10^{-5}$ |
| ۱,۰۲ | ۰,۶۱ | ۱۳۹,۳ | $1,62 \times 10^{-4}$ |



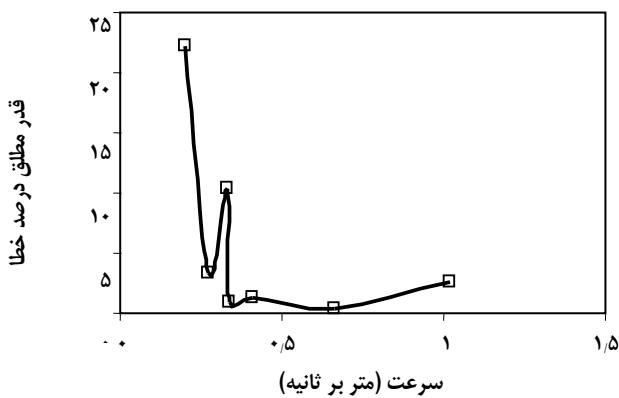
شکل ۷- نمودار تغییرهای فشار هوا در بستر.



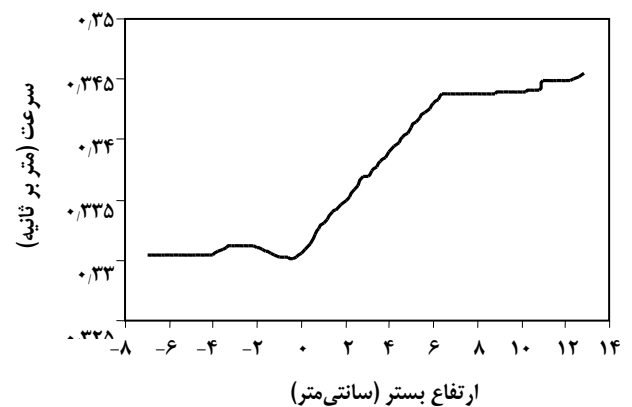
شکل ۱۰- مقادارهای تجربی (■) و پیش‌بینی شده (Δ) افت فشار سامانه.



شکل ۸- نمودار تغییرهای چگالی هوا در بستر.



شکل ۱۱- نمودار در صد خطای نتیجه‌های به دست آمده از مدل در سرعت‌های متفاوت هوا.



شکل ۹- نمودار تغییرهای سرعت هوا در بستر.

حجم محدود مدل‌سازی شد. ویژگی‌های هیدرودینامیکی بستر از جمله سرعت و چگالی گاز و همچنین افت فشار پیش‌بینی شده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مقایسه‌ی نتیجه‌های محاسبه‌ها با داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که روش ارائه شده می‌تواند افت فشار بستر را به ویژه در شرایط سیاله شده به نحو مطلوبی پیش‌بینی نماید. لازم به ذکر است که این روش نیاز به ضریب‌های ثابتی دارد که برای هر ماده سیال شونده و هر توزیع‌کننده باید با استفاده از آزمایش به دست آید. بنابراین، برای پیش‌بینی رفتار هیدرودینامیکی و عملکرد بسترهای سیاله بزرگ صنعتی باید ابتدا آزمایش‌هایی در مقیاس آزمایشگاهی انجام داد تا ضریب‌های مربوط به دست آیند و آنگاه با استفاده از ضرایب به دست آمده می‌توان بستر مورد نظر صنعتی را مدل‌سازی کرد.

همچنین مدل‌سازی انجام شده در این پژوهش در دو بعد انجام شده است که برای بسترهای با شکل‌های هندسی نامتقارن این مدل‌سازی در سه بعد نیز قابل انجام است.

بستر و توزیع‌کننده) بر حسب سرعت هوای ورودی در شکل ۱۰ با مقادارهای تجربی آن مورد مقایسه قرار گرفته است. همچنان که در این شکل مشاهده می‌شود، مقادارهای افت فشار با دقت خوبی توسط مدل پیش‌بینی شده است. برای بررسی دقیق‌تر، نتیجه‌های به دست آمده از مدل و آزمایش‌ها در سرعت‌های متفاوت هوا در جدول ۷ اریه شده است. درصد خطای مقادارهای حاصل از مدل در سرعت‌های متفاوت هوا در شکل ۱۱ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که افت فشار با دقت قابل قبولی به وسیله‌ی محاسبه‌های پیش‌بینی شده است. به ویژه خطای محاسبه‌ها در سرعت‌های بالاتر که بستر به صورت سیاله درآمد و بیشتر مد نظر است ناچیز (کوچکتر از ۳ درصد) است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش هیدرو دینامیک یک بستر سیال به روش

جدول ۷- مقادارهای افت فشار به دست آمده از مدل و آزمایش‌ها در سرعت‌های متفاوت هوا.

| سرعت (m/s) | افت فشار (Pa) | | خطا (درصد) |
|------------|---------------|----------|------------|
| | آزمایشگاهی | پیش‌بینی | |
| ۰/۲ | ۱۱۹/۷ | ۹۳ | ۲۲/۳ |
| ۰/۲۷ | ۱۶۹۰/۱۵۳ | ۱۶۳/۸ | ۳/۳ |
| ۰/۳۳ | ۲۱۹/۵ | ۲۴۲/۱ | ۱۰/۳ |
| ۰/۳۴ | ۲۲۱/۱ | ۲۲۳/۳ | ۱/۰ |
| ۰/۴۱ | ۲۲۴/۹ | ۲۲۷/۷ | ۱/۲ |
| ۰/۶۶ | ۲۴۲/۷ | ۲۴۱/۶ | ۰/۴ |
| ۱/۰۲ | ۲۶۹/۵ | ۲۷۶/۴ | ۲/۶ |

تاریخ دریافت: ۸۶/۷/۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۸۷/۱۲/۵

مراجع

- [1] Ullmann, G., "Encyclopedia of Industrial Chemistry", 3rd Ed., Wiley-VCH, vol. 14, pp. 383-405 (2003).
- [2] Kunii, D. and Levenspiel, O., "Fluidization Engineering", Butterworth-Heiemann, Boston pp.153-170 (1991).
- [3] Davidson, J. F., and Harrison, D., "Fluidized Particles", Cambridge University Press, pp.130-155(1963).
- [4] Wen, C. Y. and Yu, Y. H., A Generalized Method for Predicting the Minimum Fluidization Velocity, *AIChE J.*, **12**, p. 610 (1966).
- [5] Rowe, P. N. and Nienow, A. W., Minimum Fluidization Velocities of Multicomponent Particle Mixtures, *Chem. Eng. Sci.*, **30**, p. 1365 (1975).
- [6] Reina, J., Velo, E. and Puigjaner, L., Predicting the Minimum Fluidization Velocity of Polydisperse Mixtures of Scrap-Wood Partices, *Powder technology*, p. 245 (2000).
- [7] Lippens, B. C. and Mulder, J., Prediction of the Minimum Fluidization Velocity, *Powder technology*, **75**, p. 67 (1993).
- [8] Grace, J. R. and Taghipour, F., Verification and Validation of CFD Models and Dynamic Similarity for Fluidized Beds, *Powder technology*, **139**, p. 99 (2004).
- [9] Chen Q., Effect of Gas Distributor on Performance of Dense High Density Fluidized Bed, *International journal of mineral processing*, **74**, pp. 337-341 (2004).
- [10] Carduck, F. J., Pawelczyk, H., Raehse, W., Jacobs, J., Smulders, E. and Vogt, G., Production of Compacted Granules for Detergents, U.S. Pat. 5,318,733 (June 7, 1994).
- [11] Condo, A. and Ferrario, R., Process for the Manufacture of Granular Monohydrated Sodium Perborate, U.S. Pat. 4,942,025 (July 17, 1990).

- [12] Bertsch-Frank, B., Mueller, K. and Lieser, T., High Active Oxygen Content Granulated Sodium Perborate product and Method of Making the Same, U.S. Pat., 5,094,827 (March 10, 1992).
- [13] Chandel K.M., Alappat J.B., Pressure Drop and Gas Bypassing in Recirculating Fluidized Beds, *Chemical Engineering Science*, **61**, pp. 1489-1499 (2006).
- [14] Smith, G. D., "Numerical Solution of Partial Differential Equations: Finite Difference Methods", Oxford University Press, pp. 325-362 (1992).