

شبیه سازی کامپیوتری جریان هوا در مخزن استوانه‌ای حاوی مواد متخلخل دانه‌ای با دو آرایش مرسوم کانال‌های ورودی (H,F)

داریوش زارع^{۱*}، کامران ملکی مجد^۱

^۱ بخش مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران dzare@shirazu.ac.ir

چکیده

در این تحقیق افت فشار حاصل از هوادهی مخزن حاوی ذرت به عنوان ماده متخلخل دانه‌ای در دو آرایش H و F کانال‌های ورودی هوا برای یک سیلوی آزمایشگاهی با استفاده از روش تجربی مورد مطالعه قرار گرفت، برای آرایش F افت فشار بیشتری نسبت به آرایش H مشاهده گشت. نتایج تجربی با معادله ارگان برازش داده شد و ضرایب ثابت اصلاح کننده معادله ارگان برای هر دو آرایش H و F تعیین شد. میزان تطابق معادله ارگان با داده‌های تجربی با استفاده از شاخص‌های آماری شامل ضریب تبیین، و درصد میانگین نسبی خطاها و مجذور میانگین مربعات خطاها مورد بررسی قرار گرفت که معادله ارگان با توجه به ضرایب اصلاح شده همخوانی خوبی با داده‌های تجربی داشت. با استفاده از معادله اصلاح شده ارگان شبیه سازی جریان در داخل بستر ذرت با روش المان محدود در نرم افزار کامسول ویرایش ۵.۳ انجام گرفت، همچنین توزیع سرعت و خطوط جریان در داخل بستر مخزن نیز ارائه شد.

کلمات کلیدی: هوادهی مخزن، شبیه سازی عددی، مواد متخلخل، آرایش کانال ورودی

*نویسنده مسئول

مدل سازی جریان هوا در مخزن استوانه‌ای حاوی مواد متخلخل دانه‌ای با دو آرایش مرسوم کانال‌های ورودی (H,F)

مقدمه

بررسی انتقال اندازه حرکت در محیط متخلخل از اهمیت ویژه در علوم و مهندسی بر خوردار است، در مهندسی زیستی مسائل مربوط به محیط‌های متخلخل که معمولاً در حال واکنش با خود یا سایر مواد هستند به علت طبیعت متخلخل مواد زیستی بیشتر مطرح است. بررسی حرکت سیال در محیط‌های متخلخل در مطالعات مربوط به بیوراکتورها، فرآوری محصولات غذایی، تخمیر، تصفیه پساب، ذخیره سازی محصولات بیولوژیکی مانند غلات، پسماند و ذغال و همچنین ضد عفونی مخازن و غیره خود را نمایان می کند. واکنش‌های محیط‌های متخلخل ممکن است باعث خود گرمایی یا تغییر نفوذ سیال روی خود بستر بیوراکتورها گردد که می‌تواند دارای اثرات مخربی روی سوبسترا (substrate) یا ماده اولیه خوراک داشته باشد و باعث کاهش بازده تولید محصول آن گردد. در ضد عفونی کردن مخازن این واکنش‌ها شامل رشد میکرواورگانیزمها، حشرات و قارچ‌ها که باعث خود گرمایی و فساد مواد ذخیره شده می‌گردد و یا در ذخیره مواد بازیافتی زیستی باعث اشتعال خود به خودی مواد و بروز خسارات جانی و مالی گردد. به صورت کلی با مطالعه جریان سیال در محیط متخلخل می‌توان انتظار داشت میزان انتقال حرارت، تولید پسماند، کنترل فساد در سیلوها و صرفه جویی در مصرف انرژی را بهبود بخشید.

برای جلوگیری از پشمادهای ناخواسته در بسترهای زیستی متخلخل راه حل‌های مثل هوادهی (خنک کاری)، کنترل شیمیایی به منظور کنترل اسیدیته بستر، تزریق مواد کنترل کننده واکنش به همراه جریان اجباری سیال و یا ترکیبی از این روشها وجود دارد، که روش هوادهی و تزریق مواد کنترل کننده به همراه جریان اجباری هوا (گازدهی-ضد عفونی با گاز) از معمول ترین روش‌ها می باشد. به علت توزیع غیر یکنواخت گاز در دو روش معمول ذکر شده در بستر همواره نقاط کوری وجود دارد که می‌تواند منطقه رشد عوامل مخرب باشد، به این ترتیب تعیین نقاط کور و یا به عبارت دیگر بررسی شکل و توزیع جریان سیال در بستر از اهمیت ویژه در مطالعات مربوط به انتقال گرما، جرم و بهینه‌سازی فرآیندها در بسترهای متخلخل برخوردار است [17,18].

بسته به نوع مواد که از نوع مرطوب یا خشک باشد واکنش‌های مختلفی می‌تواند در بستر سیلو غلات رشد کند. برای مثال در واکنش تنفس در دانه‌های غلات مقداری رطوبت تولید می‌شود که با جریان یافتن هوا در داخل بستر باعث کاهش دمای بستر می‌شود که می‌تواند از فعال سازی واکنش مخرب جلوگیری می‌کند. و همچنین جریان سیال می‌تواند رطوبت را نیز با خود جابه‌جا و از بستر خارج کند تا از کاهش بازده بستر در اثر رشد سایر عوامل مخرب جلوگیری می‌کند. باید توجه داشت در انتقال حرارت به صورت جابه جایی طبیعی (بدون هوادهی)، رطوبت نیز از ناحیه‌ای به ناحیه دیگر جابه جا می‌شود و ممکن است مناطق خشک و مرطوب غیر دلخواه را به وجود آورد به همین خاطر در مخازن بزرگ از مکانیسم جابه‌جایی اجباری استفاده می‌شود [15]. با توجه به مطالب بالا استفاده از هوادهی برای کنترل دما و رطوبت داخل بستر در سیلوهای بزرگ غلات رایج است. با جریان یافتن سیال در داخل بستر متخلخل به علت وجود جریان چرخشی و مغشوش جریان سیال دچار افت انرژی می‌گردد که به اصطلاحاً به آن افت فشار (pressure drop) اطلاق می‌شود، افت فشار عامل تعیین کننده‌ای در بهینه‌سازی انرژی در هوادهی سیلوهای غلات است. افت فشار در بستر متخلخل توسط پژوهشگرهای مختلف بررسی شده است که در ادامه به برخی اشاره می‌شود.

افت فشار در بستر دانه‌های مختلف توسط شد مورد مطالعه قرار گرفت، که داده‌های آن در استاندارد انجمن مهندسی کشاورزی و بیولوژیکی امریکایی (ASABE) انتشار یافته است [14]. با استفاده از مدل سازی رگریسونی روی داده‌ها تجربی شد معادلات تجربی پیش بینی افت فشار برای بسترهای مختلف دانه تعیین شد [6]. توزیع سرعت و فشار برای یک مخزن حاوی دانه جو مجهز به کانال‌های کناری در سطوح بازشدگی مختلف کانال توسط بویس و دیویس تعیین شد [1]. خط‌های ایزوبار (Iso-bar) برای یک مخزن حاوی مواد متخلخل دانه‌ای با استفاده از روش عددی توسط بروکر تعیین گشت [2]. الگوی توزیع فشار برای هوادهی با الگوی غیر خطی سرعت در داخل محیط متخلخل توسط بان و هاکیل محاسبه شد [3]. هوادهی بستر غیر همگون به صورت عددی در سه بعد شبیه‌سازی شد و کانتور سرعت و خطوط ایزوبار نیز گزارش شد [9]. با استفاده از روش المان محدود توزیع سرعت و فشار در داخل مخزن‌های حاوی دانه غلات و کاه به وسیله اسمیت ارائه شد [16]. مدل سازی ریاضی برای یک بستر غیر همگون دانه سویا توسط خاتچوریان و ساویکی انجام شد و در این پژوهش میدان سرعت و فشار در داخل بستر ارائه شد [8]. مقاومت جریان در روش‌های مختلف پر کردن مخزن با استفاده از معادله ارگان (Ergun) توسط مولندا و همکاران تعیین شد، در این پژوهش اثر چگالی توده‌ای مختلف روی افت فشار مورد توجه قرار گرفت و ضریب اصطکاک و شاخص اصطکاک در اعداد رینولدز مختلف گزارش شد [5, 12]. هوادهی در سه بعد برای سیلو دانه غلات شبیه سازی شد و نتایج آن با رابطه هاکیل و ایوز [6] مقایسه شدند که نتایج شبیه سازی عددی توافق خوبی با نتایج آزمایشی داشت [7]. تاثیر شکل و روش بستر سازی روی تغییرات فشار در داخل مخزن دانه غلات توسط لوکازاک و همکاران بررسی شد [11]. توزیع سرعت در داخل یک سیلو دانه ذرت با توجه به اندازه دانه غربال شده و تغییرات دانه‌بندی جرمی توسط لورنس و مایر در حالت تراز شده تعیین گشت [10]. با استفاده از مکانیک سیالات محاسباتی میدان سرعت برای یک مخزن حاوی دانه ذرت در دانه‌بندی جرمی مختلف توسط اولاتاند و همکاران بررسی شد [13].

توزیع همسان هوا داخل بستر در هوادهی محیط متخلخل در حالتی ایجاد می‌گردد که سطح کانال ورودی سیال برابر با مقطع بستر باشد و هوا از کل سطح مقطع مخزن عبور کند (بازشدگی کامل کانال ورودی) ولی در سیلوهای بزرگ این کار عملی نیست، به این دلیل معمولاً آرایشی از کانال‌ها برای هوادهی استفاده می‌شود. به این ترتیب الگوی توزیع هوا در یک سیلو به شدت تحت تاثیر میزان بازشدگی سطح کانال‌ها ورودی یا همان آرایش کانال‌های ورودی است. به عبارت دیگر مهمترین عامل موثر در بررسی توزیع سرعت و فشار در بستر سیلوه‌ها نحوه آرایش کانال‌های ورودی هوا به بستر و اثر آن روی افق سرعت سیال در داخل محیط متخلخل می‌باشد. در تحقیقات پیشین اثر آرایش کانال‌های ورودی هوا به بستر روی توزیع سرعت و فشار مورد توجه قرار نگرفته است، عدم توجه به این مسئله می‌تواند باعث خطا و گزارش نتایج غیر دقیق برای پیش بینی دما، افق سرعت و الگوی توزیع فشار در بستر مخزن گردد. با توجه به نکات پیشین هدف‌های پژوهش حاضر به صورت زیر می‌باشد:

۱- تعیین افت فشار بستر با توجه به آرایش کانال‌های ورودی با استفاده از روش تجربی

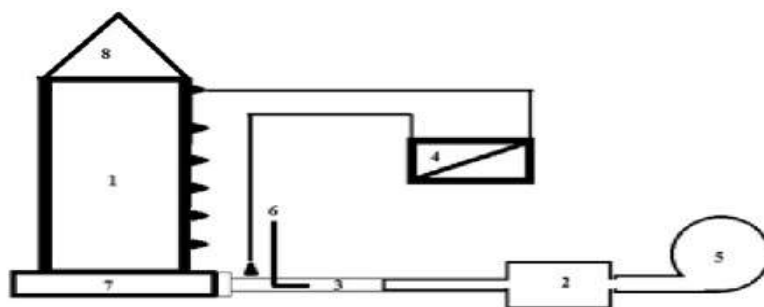
۲- استفاده از نتایج تجربی در شبیه سازی جریان هوا در داخل بستر مخزن حاوی مواد متخلخل با توجه به آرایش

در دو کانال‌های ورودی H و F با استفاده از روش عددی

مواد و روش‌ها

به منظور تعیین افت فشار بستر مخزنی آزمایشگاهی حاوی دانه ذرت (ذرت دانه‌ای با محتوای رطوبتی ۱۰٪ بر پایه تر) مشابه شکل (۱) ساخته شد. این مخزن شامل یک استوانه (لوله) کامپوزیتی به قطر ۵۰ سانتیمتری و طول یک متر (شکل (۱)-قسمت ۱) که با دانه ذرت به قطر متوسط $2/23 \pm 6$ میلی‌متر پر شده است، سرپوشی از جنس ورق فولادی (شکل (۱)-قسمت ۸) و صفحه از جنس تفلون (شکل (۱)-قسمت ۷) به عنوان اتصال زیر استوانه حاوی ذرت دانه‌ای می‌باشد. آرایش‌های مختلف کانال‌های کف با مقطع 3×3 سانتیمتر مربع با استفاده از عملیات ماشینکاری روی این

صفحه تفلون ایجاد شد، هوا از طریق این کانال‌ها به زیر استوانه حاوی مواد دانه‌ای هدایت شد. از یک دمنده گریز از مرکز به قدرت ۰/۵ کیلووات و توانایی ایجاد فشار ۸۰۰ پاسکال به منظور تامین جریان هوای مورد نیاز برای هوادهی بستر استفاده شد (فارس فن مجهز به الکتروموتور سه فاز ساخت شرکت موتوژن ایران، شکل (۱)-قسمت ۵)، و دمنده به یک توزیع کننده (شکل (۱)-قسمت ۲) از جنس ورق گالوانیزه عایق شده با الیاف شیشه متصل شده که توسط کانال‌های شفاف از جنس پلکسی گلاس با مقطع مربع (سانتیمتر مربع ۳×۳- شکل (۱)-قسمت ۳) به صفحه تفلون جهت هدایت جریان هوا اتصال داده شد. سرعت ورودی به وسیله لوله پیتوت (شکل (۱)-قسمت ۶) و مانومتر مایع (Kimo, France) اندازه‌گیری (شکل (۱)-قسمت ۴) شد، سرعت ورودی هوا با استفاده از دستگاه اینورتر (Hyundai, model N50, South Korea) با کنترل فرکانس ورودی به فن کنترل گشت. در این پژوهش دو آرایش مختلف (H و F) برای کانال‌های کف ورودی بستر که در صنعت سیلو رایج است به منظور انجام آزمایش استفاده شد (شکل ۲). برای جلوگیری از جریان یافتن دانه‌ها به داخل کانال‌های کف مخزن، استوانه‌ی حاوی دانه ذرت به وسیله یک دیواره مشبک (قطر سوراخ ۳ میلی‌متر) از صفحه تفلون جدا شده است. با توجه به استاندارد انجمن مهندسين کشاورزی و بیولوژیکی امریکایی (ASABE) [14] برای دبی بر واحد سطح بستر در سیلوی ذرت $(0.0056-0.306 \text{ m}^3/\text{s})/\text{m}^2$ و ابعاد کانال ورودی در مخزن آزمایشگاهی، اندازه‌گیری افت فشار در سرعت‌های $4/3$ ، $6/6$ ، $7/9$ ، $8/9$ و 10 متر بر ثانیه انجام گرفت. با توجه به اینکه آزمایش هوادهی در مدت زمان کمی با هوای محیط اجرا شده است پس از هر بار آزمایش مخزن تخلیه و بعد از مدت زمانی استراحت، لایه‌ها بستر را باهم مخلوط و دوباره بارگیری در داخل مخزن انجام شد از تاثیر رطوبت دانه روی افت فشار چشم پوشی شد.

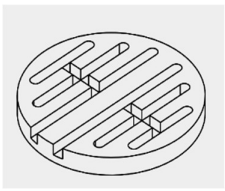

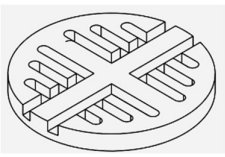
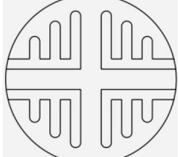


شکل ۱. شکل طرح‌واره دستگاه، مخزن (۱)، توزیع کننده هوا (۲)، کانال هوا (۳)، مانومتر (۴)، فن (۵)، لوله پیتوت (۶)، صفحه تفلون (۷)، سرپوش مخزن (۸)

اختلاف فشار بین ورودی هوا و بستر توسط مانومتر مایع با دقت ± 1 پاسکال اندازه‌گیری شد. به منظور مدل سازی فرآیند هوادهی تعیین الگوی جریان ابتدا باید معادلات حاکم بر پدیده به صورت مناسب مشخص شود. و در ادامه با حل معادله اندازه حرکت شکل جریان در داخل بستر برای آرایش‌های مختلف کانال ورودی تعیین می‌گردد. به منظور تسهیل مدل سازی پدیده حاکم بر فیزیک مسئله فرض‌های در نظر گرفته شده است:

- ۱- خواص فیزیکی بستر همگن و یکنواخت است
- ۲- سیال به صورت غیرقابل تراکم و نیوتنی فرض می‌شود
- ۳- رطوبت اولیه به صورت یکنواخت در بستر پخش شده است
- ۴- تعادل محلی گرمایی بین سیال و بستر برقرار است
- ۵- از افت ناشی از دیواره مشبک بین کانال‌ها ورودی و بستر متخلخل چشم پوشی می‌شود.

به منظور شبیه سازی مخزنی به صورت شکل (۳) در نظر گرفته شد که مشخصات و ابعاد آن مشابه مخزن آزمایشگاهی می باشد. این مخزن شامل کانال های ورودی، استوانه ای حاوی مواد متخلخل دانه ای (ذرت) و سقف مخزن است.

H		
F1		

شکل ۲. آرایش کانالهای هوا (مدل F و H)



شکل ۳ - مخزن آزمایشگاهی (سمت راست) و ناحیه های مختلف مخزن (سمت چپ)

معادله اندازه حرکت سیال:

با استفاده از موازنه اندازه حرکت، معادله انتقال اندازه حرکت سیال برای حالت جابجایی اجباری هوا در کانال ها، سقف مخزن (رابطه ۱) و بستر (رابطه ۲) به ترتیب به صورت زیر است [4]:

$$\partial_i(\rho_f u_i u_j) = -\partial_i P + \partial_j(\tau_{ij}) \quad (1)$$

$$\partial_j\left(\frac{\rho_f}{\varepsilon_s} u_i u_j\right) = -\partial_j P + \partial_j\left(\frac{\tau_{ij}}{\varepsilon_s}\right) - C_1 \frac{\mu}{K} u_i - C_2 \frac{\rho_f F \varepsilon_s}{\sqrt{K}} |u_i| u_i \quad (2)$$

با فرض رفتار نیوتنی برای سیال

$$\tau_{ij} = \mu(\partial_i u_j + \partial_j u_i) - \frac{2}{3} \mu \partial_k u_k \delta_{ij} \quad (3)$$

$$k = \frac{\varepsilon_s^3 d_p^2}{150(1 - \varepsilon_s)^2} \quad (4)$$

$$F = \frac{1.75}{\sqrt{150 \varepsilon_s^3}} \quad (5)$$

کمیت‌ها و متغیرها در جدول (۱) معرفی شده است، معادله (۱) در ناحیه (۱) و (۳) مخزن و معادله (۲) برای ناحیه (۲) مخزن برقرار است که در شکل (۱) نمایش داده شده است. شرایط مرزی برای حل این معادلات به ترتیب صورت زیر خواهد بود:

در ورودی:

$$u_m|_{in} = U_0 n \quad (6)$$

در خروجی:

$$(-PI + \mu(\partial_i u_j + \partial_j u_i))|_{out} = p_0 n \quad (7)$$

P_0 فشار نسبی هوا می‌باشد. باید توجه داشت که ترم‌های سوم و چهارم سمت راست معادله ۲ همان معادله ارگان می‌باشد، این معادله برای حالت ورودی کامل بستر بدست آمده است. به همین دلیل به منظور تلفیق با حالت ورودی کانال‌ها نیاز به ضرایب تصحیح (C_1 و C_2) دارد، این ضرایب به صورت تجربی با استفاده اندازه‌گیری از افت فشار در سرعت‌های مختلف در مرحله قبل تعیین گشت. خواص فیزیکی هوا به عنوان سیال جاری در محیط متخلخل در زیر ارائه شده است:

$$\rho_{air} = 1.225 \text{ kg} / \text{m}^3 \quad (8)$$

$$\mu_{air} = 1.7894 \times 10^{-5} \text{ Pa.s} \quad (9)$$

میزان تغییرات تخلخل بین ۰/۳۸ تا ۰/۴۲ به صورت تابع خطی از شعاع فرض شده است، که به صورت زیر نمایش داده است [10]:

$$\varepsilon_s = 0.38 + a\left(\frac{r}{R}\right) \quad (10)$$

که a برابر با 0.04 است، r شعاع متغیر و R شعاع بستر برابر با 0.25 سانتی متر است. با تعیین معادلات و ضرایب اصلاح شده معادله ارگان برای بستر متخلخل معادلات سیال بر اساس شرایط مرزی با استفاده از روش عددی المان محدود با نرم افزار تجاری کامسول (Comsol Multiphysic V5.3) حل شد. برای مقایسه نتایج تجربی و پذیرش برازش معادله ارگان بر داده‌های تجربی افت فشار از شاخص‌های مجذور میانگین مربعات خطاها RMSE و درصد میانگین نسبی خطاها M_e استفاده شد که به صورت زیر می باشد.

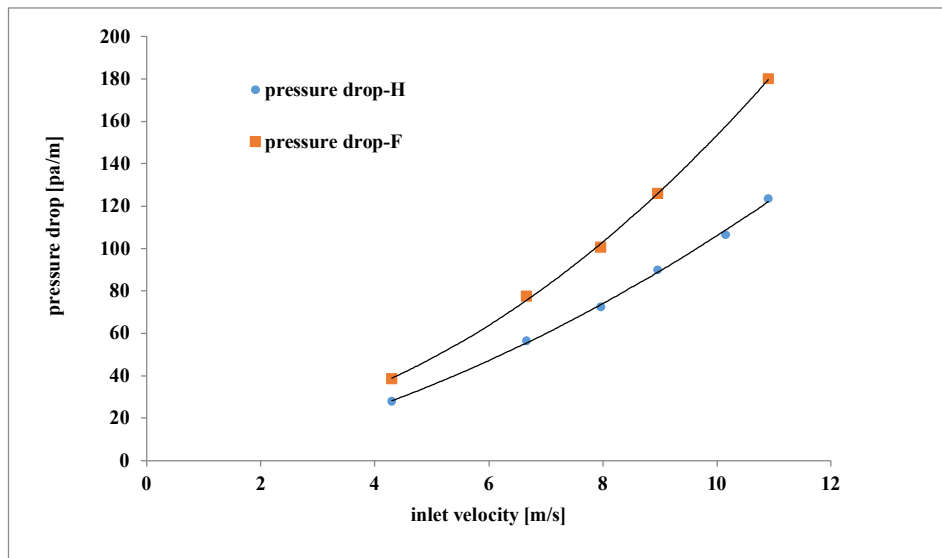
$$RSME = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(y_{i,exp} - y_{i,pre})^2}{N}} \quad (11)$$

$$M_e = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|(y_{i,exp} - y_{i,pre})|}{y_{i,exp}} \quad (12)$$

با استفاده از پردازش نتایج تجربی حاصل از آزمایش معادله اصلاح شده ارگان بدست آمد که برای شبیه سازی جریان هوا در داخل بستر برای هر کدام از آرایش‌های منتخب ورودی سیال استفاده گشت. باید توجه داشت دستگاه معادلات در نظر گرفته شده باید به صورت توأم حل گردد تا میدان سرعت با توجه به اثر متقابل بستر و کانال تعیین گردد.

نتایج و بحث

افت فشار برای آرایش کانال‌های ورودی در سرعت‌های مختلف ورودی در شکل (۴) نمایش داده شده است، با افزایش سرعت افت فشار نیز افزایش می‌یابد، نتایج مشابه برای مخزن جو، سورگم، سویا و مخازن حاوی دانه غلات توسط سایر پژوهشگرها گزارش شده است [1,7,8,15]. افت فشار بیشتری در آرایش F نسبت به آرایش H مشاهده شد، این نتیجه شاید به علت ایجاد جریان چرخشی و مغشوش در داخل بستر باشد. با استفاده از داده‌های تجربی ثوابت معادله ارگان تعیین گشت، شاخص‌های آماری برای تعیین تطابق معادله ارگان با داده‌های تجربی در جدول ۱ نمایش داده شده است. معادله ارگان برای همه آرایش‌ها دارای ضریب تبیین 0.9 است و با توجه به سایر شاخص‌ها این معادله همخوانی خوبی با داده‌های تجربی برای هر دو آرایش داشت.



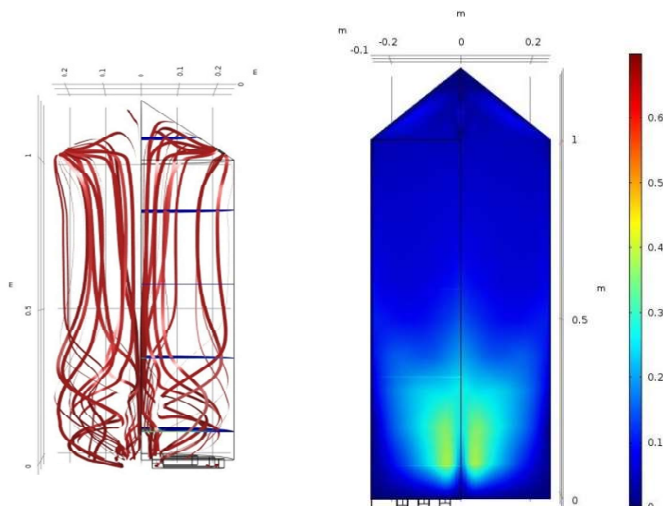
شکل ۴- افت فشار در آرایش های F و H در سرعت های مختلف

جدول ۱- شاخص های آماری برازش داده های
تجربی بر معادله ارگان

آرایش	Ergun	P-value
H		
C1	۰/۴۳۵۰۹۲	<٪۱
C2	۰/۴۳۴۰۳۲	<٪۱
RSME	۲/۹۴۹۳۹۵	
Me%	۱/۴۷۶۷۵۷	<٪۱۰
R ²	۰/۹	
F1		
C1	۰/۳۱۲۰۳۳	<٪۱
C2	۰/۱۳۶۸۲۵	<٪۱
RSME	۱/۶۵۳۵۶۸	
Me%	۰/۶۸۵۴۵۴	<٪۱۰
R ²	۰/۹	

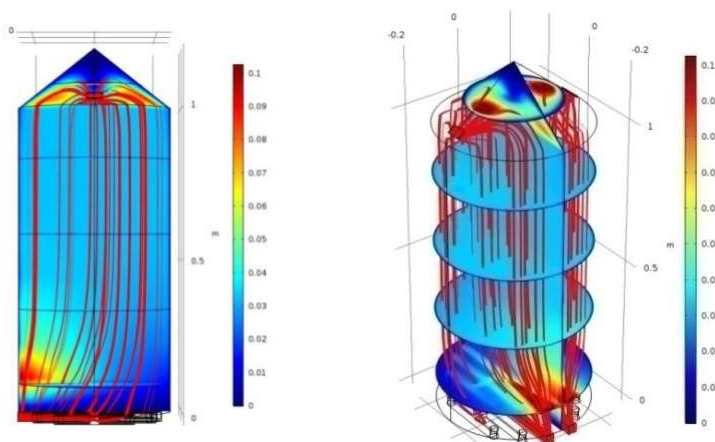
در این مطالعه به عنوان نمونه توزیع سرعت برای آرایش F در داخل بستر در (شکل ۵) در سرعت ۴/۳ متر بر ثانیه کانال ورودی مرکز محیط متخلخل نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است در یک سوم اولیه بستر تغییرات سرعت بیشتر از سایر مناطق بستر می باشد، در وسط ارتفاع بستر توزیع سرعت تقریباً یکنواخت است. خطوط مسیر سرعت نیز در این شکل که نحوه حرکت هوا داخل بستر نشان می دهد نیز ارائه شده است. با توجه با این خطوط

سرعت، چرخش جریان مشاهده می شود که می تواند باعث نفوذ بهتر هوا به یک بستر متخلخل گردد و تاییدی بر وجود چرخش جریان در بستر است.



شکل ۵- توزیع سرعت در آرایش F با سرعت ورودی ۴/۳ متر بر ثانیه در کانال ورودی

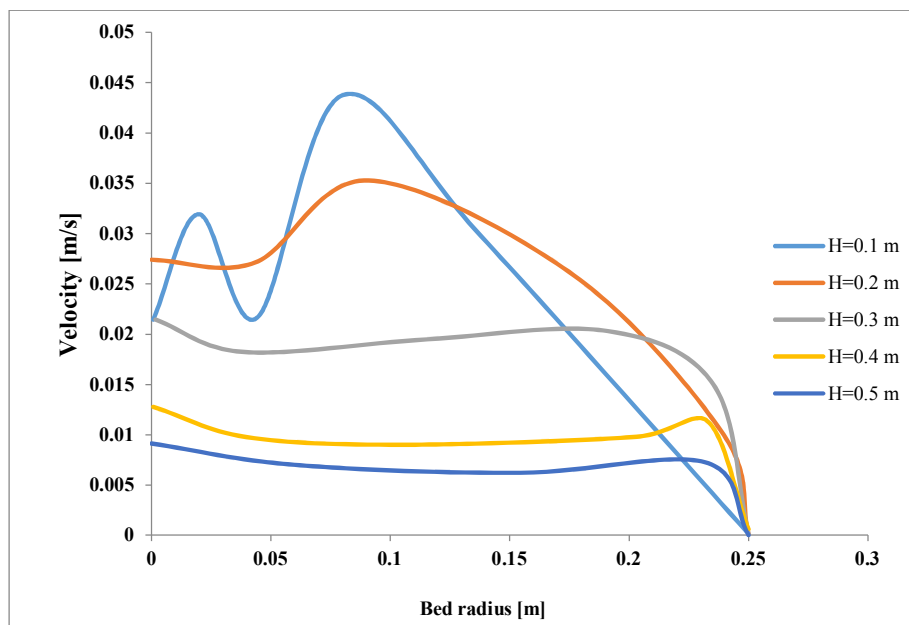
توزیع سرعت برای آرایش H در شکل (۶) ارائه شده است، بیشتر تغییرات سرعت در یک سوم اول بستر شدیدتر از سایر نقاط است که این نتیجه مشابه با آرایش F می باشد. در این شکل خطوط جریان نیز نشان داده شده است، برخلاف آرایش F چرخش و اغتشاش مشاهده نشد.



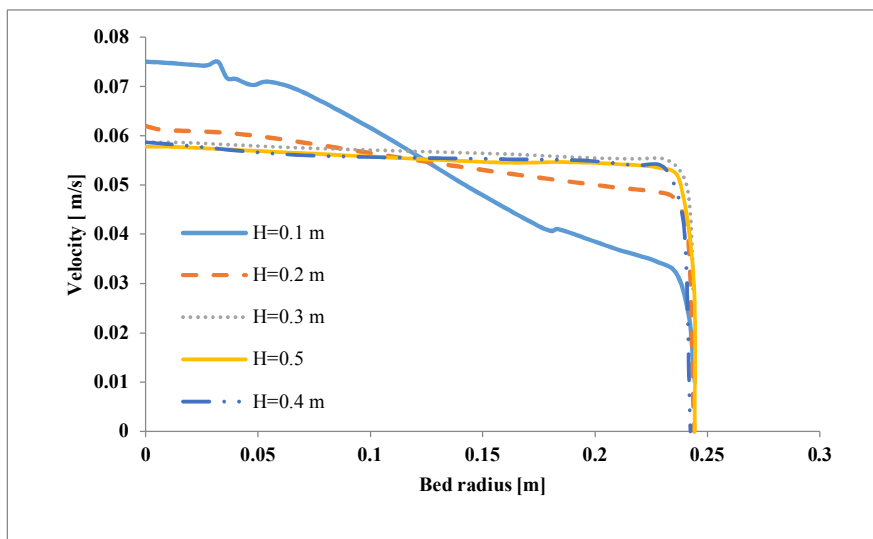
شکل ۶- توزیع سرعت در آرایش H با سرعت ورودی ۴/۳ متر بر ثانیه در کانال ورودی

نمودار پروفایل سرعت در ارتفاع های مختلف برای آرایش F در شکل (۷) ارائه شده است، با افزایش ارتفاع پروفایل سرعت یکنواخت تر شده و تغییرات آن کمتر می باشد. تغییرات کمتر شکل پروفایل سرعت با افزایش ارتفاع بستر شاید به این دلیل باشد که جریان در داخل بستر گسترش یافته است. برای آرایش H تغییرات سرعت به صورت تابعی از شعاع مخزن در ارتفاع های مختلف نشان داده شده است، با افزایش ارتفاع پروفایل ثابت و تغییر شکل آن محدودتر می شود (شکل ۸). در واقع می توان گفت که بعد از یک سوم اول ارتفاع بستر جریان گسترش می یابد، باید توجه داشت که توزیع سرعت یکنواخت تر باشد به حالت بازشدگی کامل کانال ورودی (هوای ورودی از کل سطح

مقطع بستر بگذرد) نزدیک‌تر است که حالت ایده‌آل برای هوادهی مخزن است. در سیلوهای بزرگ صنعتی به علت فشردگی بستر در راستای ارتفاع به علت وزن زیاد دانه‌ها یک هسته متراکم‌تر با تخلخل پایین‌تری شکل می‌گیرد، مسئله اصلی نفوذ جریان سیال (هوا) در داخل این هسته متراکم است. پس جریان باید در مرکز و پایین مخزن به شکلی باشد توانایی نفوذ در این هسته متراکم را داشته باشد، در آرایش F به علت وجود چرخش در جریان شاید توانایی بهتری در نفوذ به هسته متراکم داشته باشد. البته این چرخش جریان در این آرایش دارای معایبی نیز هست به علت افت فشار بالاتر نیاز به دمنده قوی‌تر و نیاز به هزینه بالاتر اجرایی دارد. با مقایسه پروفایل سرعت در دو آرایش این نتیجه گرفته می‌شود که آرایش H پروفایل سرعت سریعتر یکنواخت می‌گردد یا همان طور که گفته شد جریان زودتر به گسترش یافتگی می‌رسد، ولی در آرایش F به علت وجود چرخش جریان توانای نفوذ هوادهی به تمام بستر را دارد. شرایط آرایش F برای حالتی مناسب است که نیاز هوادهی و فوری به تمام نقاط بستر وجود دارد مانند هجوم عوامل میکروبی یا حشرات، ولی آرایش H برای هوادهی ممتد مناسب‌تر است چونکه تمامی نقاط بستر در نهایت در طول زمان به صورت یکسانی به تعادل می‌رسد.



شکل ۷- پروفایل سرعت در آرایش F در سرعت ورودی ۴/۳ متر بر ثانیه



شکل ۸- پروفایل سرعت در آرایش H در سرعت ورودی ۴/۳ متر بر ثانیه

نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از روش عددی توزیع هوا داخل بستر دانه ذرت شبیه سازی شد. ضرایب اصلاح شده برای معادله نیمه تجربی ارگان تعیین گشت و شاخص آماری برای تایید برازش این معادله با داده‌های تجربی ارائه شد که تطابق خوبی بین داده‌های تجربی و معادله ارگان را نشان داد. با استفاده از معادله اصلاح شده ارگان شبیه‌سازی جریان در داخل بستر انجام گرفت، کانتورهای توزیع سرعت برای دو آرایش F و H نیز ارائه شد، در آرایش F جریان چرخشی مشاهده شد ولی در آرایش H این اثر مشاهده نشد. افت فشار در دو آرایش به صورت تجربی اندازه‌گیری شد که برای آرایش F افت بیشتری نسبت به آرایش H گزارش شد.

فهرست علائم

d	قطر (m)	ρ	چگالی (kg/m^3)
F	ضریب نیروی درگ اینرسی	ε	تخلخل
I	ماتریس واحد	τ	تنش برشی (Pa)
k	تراوایی محیط متخلخل (m^4)	μ	ویسکوزیته (Pa.s)
M_e	میانگین نسبی خط	C1	ضریب تصحیح ویسکوز
n	بردار یکه	C2	ضریب تصحیح اینرسی

N	تعداد داده‌ها	زیر نویس	
P ₀	فشار هوا (Pa)	0	اولیه
P	فشار (Pa)	ch	کانال
U ₀	سرعت در ورودی (m/s)	i	۳، ۲، ۱
u	میانگین حجمی سرعت (m/s)	in	ورودی
Y _{i,exp}	داده‌های تجربی	j	۳، ۲، ۱
Y _{i,pre}	داده‌های تئوری	k	۳، ۲، ۱
RMSE	مجدور میانگین مربعات خطا	out	خروجی
		s	بستر

REFERENCE

1. Boyce, D. and Davies, J., 1965. Air distribution from a lateral duct with different escape areas in barley. *Journal of Agricultural Engineering Research* 10, 230-234.
2. Brooker, D., 1961. Pressure patterns in grain-drying systems established by numerical methods. *Transactions of the ASAE* 4, 72-74.
3. Bunn, J. and Hukill, W. 1963. Pressure pattern predictions for non-linear air flow through porous media. *Transactions of the ASAE* 6, 32-0036.
4. Civan, F. 2011. Porous media transport phenomena. John Wiley & Sons.
5. Ergun, S. and Orning, A.A. 1949. Fluid Flow through Randomly Packed Columns and Fluidized Beds. *Industrial & Engineering Chemistry* 41, 1179-1184.
6. Hukill, W. and Ives, N. 1955. Radial airflow resistance of grain. *Agricultural Engineering* 36, 332-335.
7. Khatchaturian, O. and Binelo, M. 2008. Simulation of three-dimensional airflow in grain storage bins. *Biosystems Engineering* 101, 225-238.
8. Khatchaturian, O. and Savicki, D., 2004. Mathematical modelling of airflow in an aerated soya bean store under non-uniform conditions. *Biosystems Engineering* 88, 201-211.
9. Lai, F. 1980. Three-dimensional flow of air through nonuniform grain beds. *Transactions of the ASAE* 23, 729-0734.
10. Lawrence, J. and Maier, D.E. 2011. Three-dimensional airflow distribution in a maize silo with peaked, levelled and cored grain mass configurations. *Biosystems Engineering* 110, 321-329.
11. Łukaszuk, J., Molenda, M., Horabik, J., and Montross, M.D. 2009. Variability of pressure drops in grain generated by kernel shape and bedding method. *Journal of Stored Products Research* 45, 112-118.
12. Molenda, M., Montross, M.D., McNeill, S.G., and Horabik, J. 2005. Airflow resistance of

- seeds at different bulk densities using Ergun's equation. *Transactions of the ASAE* 48, 1137-1145.
13. Olatunde, G., Atungulu, G.G., and Sadaka, S., 2016. CFD modeling of air flow distribution in rice bin storage system with different grain mass configurations. *Biosystems Engineering* 151, 286-297.
 14. Shedd, C.K. 1953. Resistance of grains and seeds to air flow. *Agricultural Engineering* 34, 616-619.
 15. Singh, A., Leonardi, E., and Thorpe, G. 1993. A solution procedure for the equations that govern three-dimensional free convection in bulk stored grains. *Transactions of the ASAE* 36, 1159-1173.
 16. Smith, E. 1996. Pressure and velocity of air during drying and storage of cereal grains. *Transport in porous media*, 23, 197-218.
 17. Thorpe, G. and Whitaker, S. 1992a. Local mass and thermal equilibria in ventilated grain bulks. Part I: The development of heat and mass conservation equations. *Journal of stored products research* 28, 15-27.
 18. Thorpe, G., and Whitaker, S. 1992b. Local mass and thermal equilibria in ventilated grain bulks. Part II: The development of constraints. *Journal of stored products research* 28, 29-54.

Computer Simulation of Gas Flow in Cylindrical Bin Containing Granular Porous Material with Two Common Duct Inlet Arrangements (H, F)

Dariush Zare^{1*}, Kamran Maleki Majd¹

1. Biosystems Engineering Department, School of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran.

ABSTRACT

In this study pressure drop of bin containing corn with two common inlet duct arrangements (H, F) was determined by empirical method. The modify Ergun equation was fitted on experimental data and coefficient of determination, mean root square error and mean relative error were used as indices were used to investigate the goodness of fitness between the empirical data and Ergun equation. Based on statistical indices there was a good agreement between experimental data and Ergun equation. The F arrangement duct had higher pressure drop than H arrangement duct. Moreover, the velocity distribution was simulated by finite element methods using COMSOL Multiphysics-5.3 for the experimental cylindrical silo having H and F inlet duct arrangements and then the velocity profile was plotted for different bin radius at different bin heights.

Keyword: Bin Aeration, Numerical Simulation, Granular Material, Duct inlet arrangement

*Corresponding author
E-mail: dzare@shirazu.ac.ir