

Experimental and Numerical Study of Gas Flow in Cylindrical Bin Containing Granular Porous Material with Two Common Duct Inlet Arrangements (H, F)

KAMRAN MALEKI MAJD¹, DARIUSH ZARE^{*1}, HOMAYOUN EMDAD², SAYED MEHDI NASIRI¹, GHOLAMREZA KARIMI³, KHOSROW JAFARPUR⁴

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

2. Department of Fluid and Thermal Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Shiraz University, Iran.

3. Department of Chemical Engineering, Faculty of Chemical, Petroleum and Gas Engineering, Shiraz University, Iran.

4. Department of Fluid and Thermal Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Shiraz University, Iran.

(Received: June. 23, 2019- Revised: Sep. 21, 2019- Accepted: Oct. 8, 2019)

ABSTRACT

In this study pressure drop of bin containing corn as granular porous material with two common inlet duct arrangements (H, F) for a laboratory silage was studied by using experimental method. Higher pressure was obtained for the F arrangement compare to the H arrangement. The Ergun equation was fitted on the pressure drop of empirical data and the correction coefficients of modified Ergun equation for both H and F arrangements were determined. The coefficient of determination, mean root square error and mean relative error were used as indices to investigate the goodness of fitness between the empirical data and Ergun equation, and the equation had good fitness on the empirical data. The numerical simulation was carried out by finite element simulation of COMSOL Multiphysics v5.3 software using the modified Ergun equation. Moreover, distribution of velocity and flow lines within the bin was also presented.

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

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

کامران ملکی مجد^۱، داریوش زارع^{۱*}، همایون امداد^۲، سید مهدی نصیری^۱، غلامرضا کریمی^۲، خسرو جعفرپور^۴

۱. بخش مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، ایران
 ۲. بخش حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، ایران
 ۳. بخش مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، ایران
 ۴. بخش حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، ایران
- (تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۴/۳۱ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۶/۳۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۷/۱۶)

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 گردید. 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 داده های 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 عددی 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.

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

مقدمه

بررسی انتقال اندازه حرکت در محیط متخلخل از اهمیت ویژه در علوم و مهندسی برخوردار است. در مهندسی زیستی مسائل مربوط به محیط‌های متخلخل که معمولا 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 گرمایشی یا تغییر نفوذ سیال روی خود بستر بیوراکتورها گردد که می‌تواند دارای اثرات مخربی روی سوبسترا^۱ یا ماده اولیه خوراک داشته باشد و باعث کاهش بازده تولید محصول آن گردد. در ضد عفونی کردن مخازن این واکنش‌ها شامل رشد میکرواورگانسیم‌ها، حشرات و قارچ‌ها که باعث خود گرمایشی 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 پیشامدهای 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 پهنه‌سازی فرآیندها در بسترهای متخلخل برخوردار است (Thorpe and Whitaker, 1992a, b).

* نویسنده مسئول: dzare@shirazu.ac.ir

(Smith, 1996). 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 (Khatchatourian and Savicki, 2004). مقاومت جریان در روش های مختلف پرکردن مخزن با استفاده از معادله ارگان^۴ توسط مولندا و همکاران تعیین شد، در این پژوهش اثر چگالی توده ای^۵ مختلف روی افت فشار مورد توجه قرار گرفت و ضریب اصطکاک^۶ و شاخص اصطکاک^۷ در اعداد رینولدز^۸ مختلف گزارش شد (Ergun and Orning, 1949; Molenda *et al.*, 2005). هوادهی در سه بعد برای سیلو دانه غلات شبیه سازی شد و نتایج آن با رابطه هاکیل و ایوز (Hukill and Ives, 1955) مقایسه شدند که نتایج شبیه سازی عددی توافق خوبی با نتایج آزمایشی داشت (Khatchatourian and Binelo, 2008). تاثیر شکل و روش بستر سازی روی تغییرات فشار در داخل مخزن دانه غلات توسط لوکازاک و همکاران بررسی شد (Łukaszuk *et al.*, 2009). توزیع سرعت در داخل یک سیلو دانه ذرت با توجه به اندازه دانه غرابال شده و تغییرات دانه بندی جرمی توسط لورنس و مایر در حالت تراز شده تعیین گشت (Lawrence and Maier, 2011). با استفاده از مکانیک سیالات محاسباتی میدان سرعت برای یک مخزن حاوی دانه ذرت در دانه بندی جرمی مختلف توسط اولاتاند و همکاران بررسی شد (Olatunde *et al.*, 2016).

توزیع همسان هوا داخل بستر در هوادهی محیط متخلخل در حالتی ایجاد می گردد 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 کانال ها برای هوادهی استفاده می شود. به این ترتیب الگوی توزیع هوا در یک سیلو به شدت تحت تاثیر میزان بازشدگی سطح کانال ها ورودی یا همان آرایش کانال های ورودی است. به عبارت دیگر مهمترین عامل موثر در بررسی توزیع سرعت و فشار در بستر سیلوها نحوه آرایش کانال های ورودی هوا به بستر و اثر آن روی افق سرعت سیال در داخل محیط متخلخل می باشد. در تحقیقات پیشین اثر آرایش کانال های ورودی هوا به بستر روی توزیع سرعت و فشار مورد توجه قرار نگرفته است، عدم توجه به این مسئله می تواند 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 هدف های پژوهش حاضر به صورت زیر می باشد:

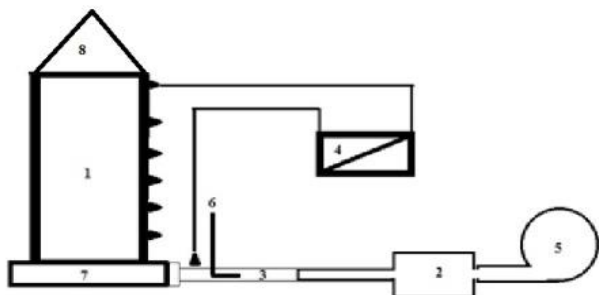
بسته به نوع مواد که از نوع مرطوب یا خشک باشد واکنش های مختلفی می تواند در بستر سیلو غلات رشد کند. برای مثال در واکنش تنفس در دانه های غلات مقداری رطوبت تولید می شود که با جریان یافتن هوا در داخل بستر باعث کاهش دمای بستر می شود که می تواند از فعال سازی واکنش مخرب جلوگیری می کند. و همچنین جریان سیال می تواند رطوبت را نیز با خود جابه جا و از بستر خارج کند تا از کاهش بازده بستر در اثر رشد سایر عوامل مخرب جلوگیری می کند. باید توجه داشت در انتقال حرارت به صورت جابه جایی طبیعی (بدون هوادهی)، رطوبت نیز از ناحیه ای به ناحیه دیگر جابه جا می شود و ممکن است مناطق خشک و مرطوب غیر دلخواه را به وجود آورد به همین خاطر در مخازن بزرگ از مکانیسم جابه جایی اجباری استفاده می شود (Singh *et al.*, 1993). 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 می گردد که اصطلاحاً به آن افت فشار اطلاق می شود، افت فشار عامل تعیین کننده ای در بهینه سازی انرژی در هوادهی سیلوهای غلات است. افت فشار در بستر متخلخل توسط پژوهشگرهای مختلف بررسی شده است که در ادامه به برخی اشاره می شود.

افت فشار در بستر دانه های مختلف توسط شد مورد مطالعه قرار گرفت، که داده های آن در استاندارد انجمن مهندسی کشاورزی و بیولوژیکی امریکایی^۱ انتشار یافته است (Shedd, 1953). با استفاده از مدل سازی رگرسیونی روی داده های تجربی، معادلات تجربی پیش بینی افت فشار برای بسترهای مختلف دانه تعیین شد (Hukill and Ives, 1955). توزیع سرعت و فشار برای یک مخزن حاوی دانه جو مجهز به کانال های کناری در سطوح بازشدگی مختلف کانال توسط بویس و دیویس تعیین شد (Boyce and Davies, 1965). خط های ایزوبار برای یک مخزن حاوی مواد متخلخل دانه ای با استفاده از روش عددی توسط بروکر تعیی گردید (Brooker, 1961). الگوی توزیع فشار برای هوادهی با الگوی غیر خطی سرعت در داخل محیط متخلخل توسط بان و هاکیل محاسبه شد (Bunn and Hukill, 1963). هوادهی بستر غیر همگون به صورت عددی در سه بعد شبیه سازی شد و کانتور سرعت و خطوط ایزوبار نیز گزارش شده است (Lai, 1980). با استفاده از روش المان محدود توزیع سرعت و فشار در داخل مخزن های حاوی دانه غلات و کاه به وسیله اسمیت ارائه شد

5 Bulk density
6 Friction coefficient
7 Friction index
8 Reynolds number

1 Pressure drop
2 (ASABE) American Society of Agricultural and Biological Engineer
3 Iso-bar
4 Ergun equation

South Korea) با تغییر فرکانس ورودی به فن تنظیم شد. در این پژوهش دو آرایش مختلف (F و H) 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.



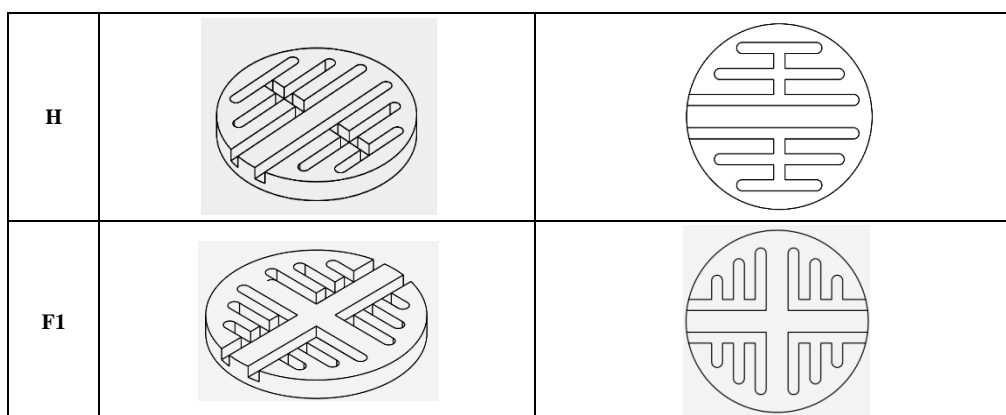
شکل ۱ - شکل طرح‌واره دستگاه، مخزن (۱)، توزیع کننده هوا (۲)، کانال هوا (۳)، مانومتر (۴)، فن (۵)، لوله پیتوت (۶)، صفحه تفلون (۷)، سرپوش مخزن (۸)

با توجه به استاندارد انجمن مهندسين کشاورزي و بيولوژيكي امريكايي براي دبي بر واحد سطح بستر در سيلوي ذرت $(m^3/s)/m^2$ (۰/۰۵۶/۳۰۶-۰/۱) و ابعاد کانال ورودی در مخزن آزمایشگاهی، اندازه‌گیری افت فشار در سرعت‌های ۴/۳، ۶/۶، ۷/۹، ۸/۹ و ۱۰ متر بر ثانیه با سطح بازشدگی یکسان (۰/۰۶۹۳ متر مربع) 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 باهم مخلوط و دوباره بارگیری در داخل مخزن انجام شد و از تاثیر رطوبت دانه روی افت فشار چشم پوشی شد. اختلاف فشار بین ورودی هوا و بستر توسط مانومتر مایع با دقت ± 1 پاسکال اندازه‌گیری شد.

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 $6/2 \pm 0/2$ 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 3×3 - 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,



شکل ۲ - آرایش کانال‌های هوا (مدل H و F)



شکل ۳ - مخزن آزمایشگاهی مجهز به سیستم اندازه گیری (شکل سمت راست)، نواحی مختلف بستر شامل ۱-کانالهای ورودی، ۲-بستر حاوی مواد دانه‌ای و ۳-سقف (شکل سمت چپ)

$$\tau_{ij} = \mu(\partial_i u_j + \partial_j u_i) - \frac{2}{3} \mu \partial_k u_k \delta_{ij} \quad \text{(رابطه ۳)}$$

$$K = \frac{\varepsilon_s^3 d_p^2}{150(1 - \varepsilon_s)^2} \quad \text{(رابطه ۴)}$$

$$F = \frac{1.75}{\sqrt{150\varepsilon_s^3}} \quad \text{(رابطه ۵)}$$

که i, j, k جهت سرعت u نسبت به مختصات عمومی x_r ، x_1 و x_2 است. کمیت K معرف میزان نفوذ یا تراوایی جریان در اثر ویسکوسیته در بستر متخلخل و F نیروی حاصل از اینرسی جریان در داخل بستر می‌باشد و δ دلتای کرونکر^۲ می‌باشد. کمیت‌های C_1 و C_2 ضرایب تصحیح که با اندازه گیری افت فشار به صورت تجربی تعیین می‌شود. سایر کمیت‌ها و متغیرها در جدول علائم 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:

$$u_{in}|_{in} = U_0 n \quad \text{(رابطه ۶)}$$

در خروجی:

$$(-PI + \mu(\partial_i u_j + \partial_j u_i))|_{out} = p_0 n \quad \text{(رابطه ۷)}$$

و روی دیواره‌ها شرط عدم سرش اعمال شد. فشار نسبی هوا می‌باشد. باید توجه داشت که ترم‌های سوم و چهارم سمت راست معادله ۲ بدون ضرایب C_1 و C_2 معرف معادله استاندارد ارگان می‌باشد، معادله ارگان برای حالت ورودی کامل سیال به بستر بدست آمده است و فاقد اثرهای شکل کانال

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 زیر 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 فشار 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 می‌باشد. این مخزن شامل کانال‌های ورودی، استوانه‌ای حاوی مواد متخلخل دانه‌ای (ذرت) و سقف مخزن است.

معادله اندازه حرکت سیال:

با استفاده از موازنه اندازه حرکت، معادله انتقال اندازه حرکت سیال برای حالت جابجایی اجباری هوا در کانال‌ها، سقف مخزن (رابطه ۱) و بستر (رابطه ۲) به ترتیب به صورت زیر است (Civan, 2011; Vafai, 2015):

$$\partial_i (\rho_f u_i u_j) = -\partial_i P + \partial_j (\tau_{ij}) \quad \text{(رابطه ۱)}$$

$$\text{(رابطه ۲)}$$

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

با فرض رفتار نیوتنی برای سیال

که y_{exp} افت فشار تجربی و y_{pre} افت فشار حاصل از معادله اصلاح شده ارگان است (ترم‌های سوم و چهارم سمت راست معادله ۲ با ضرایب C_1 و C_2)، N تعداد داده‌ها می‌باشد. 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 گردید. باید توجه داشت دستگاه معادلات در نظر گرفته شده باید به صورت توأم (کوپل کامل) حل گردد تا میدان سرعت با توجه به اثر متقابل بستر و کانال تعیین گردد. شبیه‌سازی عددی با استفاده از شبکه با 350000 ، 450000 و 500000 المان با شبکه منظم برای بستر و نامنظم برای کانال و سقف انجام شد. همچنین آنالیز استقلال از شبکه نیز در حل مسئله مورد توجه قرار گرفت.

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 (Boyce and Davies, 1965; Khatchatourian and Binelo, 2008; Khatchatourian and Savicki, 2004; Singh et al., 1993). 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 و مدل درجه دوم برازش شده، ثوابت اصلاح کننده معادله ارگان C_1 و C_2 تعیین شد. شاخص‌های آماری برای تعیین تطابق معادله ارگان اصلاح شده با داده‌های تجربی در جدول ۱ نمایش داده شده است. معادله ارگان اصلاح شده برای همه آرایش‌ها دارای ضریب تبیین ۰/۹ است و با توجه به سایر شاخص‌ها این معادله همخوانی خوبی با داده‌های تجربی برای هر دو آرایش داشت.

ورودی است. به همین دلیل به منظور تلفیق با حالت ورودی کانال‌ها H و F نیاز به ضرایب تصحیح (C_1 و C_2) دارد که در این تحقیق در معادله جریان (۲) آورده شده است. این ضرایب به صورت تجربی با استفاده اندازه‌گیری افت فشار در سرعت‌های مختلف در مرحله آزمایش تجربی و برازش مدل چند جمله‌ای درجه دوم نسبت به سرعت تعیین گشت. خواص فیزیکی هوا به عنوان سیال جاری در محیط متخلخل در زیر ارائه شده است:

$$\rho_f = 1.225 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$\mu_f = 1.7894 \times 10^{-5} \text{ Pa.s} \quad (\text{رابطه ۹})$$

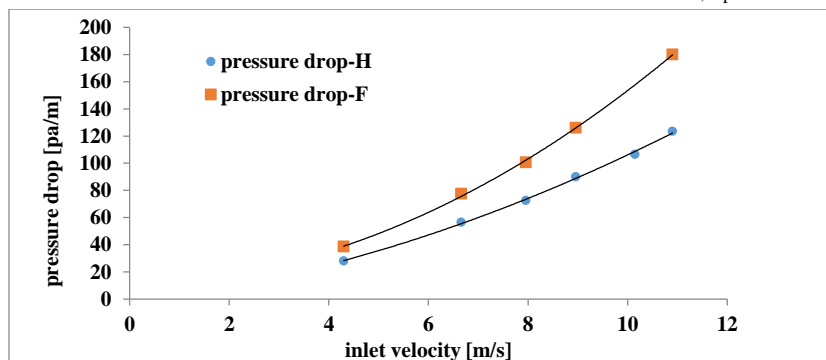
میزان تغییرات تخلخل بین ۰/۳۸ تا ۰/۴۲ به صورت تابع خطی از شعاع فرض شده است، که به صورت زیر نمایش داده است (Lawrence and Maier, 2011):

$$\varepsilon_s = 0.38 + a\left(\frac{r}{R}\right) \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

که a برابر با ۰/۰۴ است، r شعاع متغیر و R شعاع بستر برابر با ۰/۲۵ 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) با استفاده از مدل جریان مغشوش جبری Y^+ (که کمترین حساسیت به اندازه شبکه دارد) 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 می‌باشد.

$$RSME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_{i,exp} - y_{i,pre})^2}{N}} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

$$M_e = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{(y_{i,exp} - y_{i,pre})}{y_{i,exp}} \right| \quad (\text{رابطه ۱۲})$$



شکل ۴- افت فشار در آرایش‌های H و F در سرعت‌های مختلف (نقاط نشان دهنده داده‌های تجربی و خطوط نشان دهنده مدل برازش شده درجه دوم نسبت به سرعت است)

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.

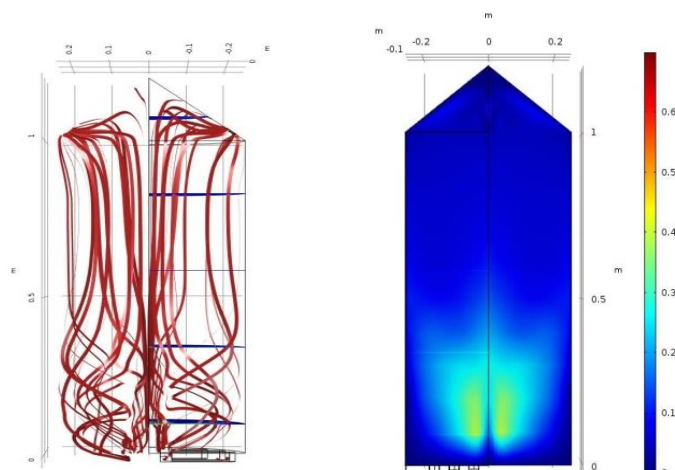
توزیع سرعت برای آرایش H در شکل (۶) ارائه شده است، بیشتر تغییرات سرعت در یک سوم اول بستر شدیدتر از سایر نقاط است که این نتیجه مشابه با آرایش F می باشد. در این شکل خطوط جریان نیز نشان داده شده است، برخلاف آرایش F چرخش و اغتشاش مشاهده نشد.

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

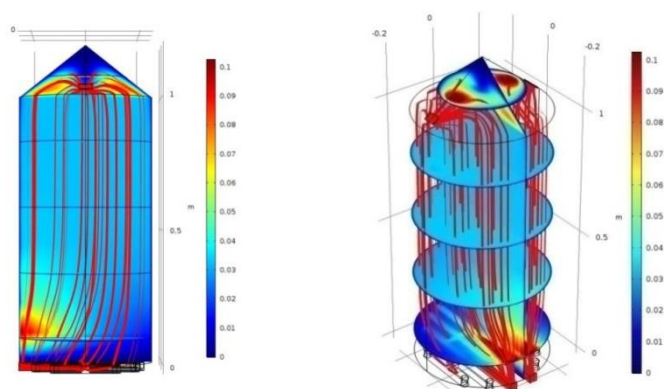
آرایش H	Ergun	P-value
C1	۰/۴۳۵۰۹۲	</.۱
C2	۰/۴۳۴۰۳۲	</.۱
RSME	۲/۹۴۹۳۹۵	
Me%	۱/۴۷۶۷۵۷	</.۱۰
R ²	۰/۹	

آرایش FI	Ergun	P-value
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 (شکل ۵) در سرعت ۴/۳ متر بر ثانیه کانال ورودی



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



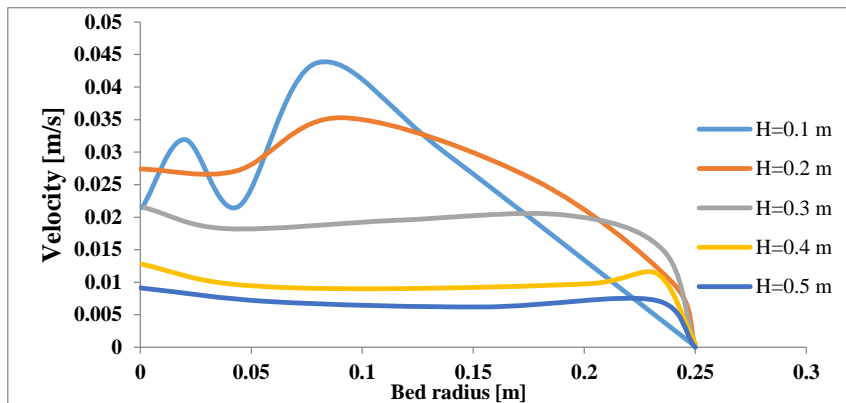
شکل ۶- توزیع سرعت در آرایش H با سرعت ورودی ۴/۳ متر بر ثانیه در کانال ورودی

یکنواخت تر شده و تغییرات آن کمتر می باشد. تغییرات کمتر شکل پروفایل سرعت با افزایش ارتفاع بستر شاید به این دلیل

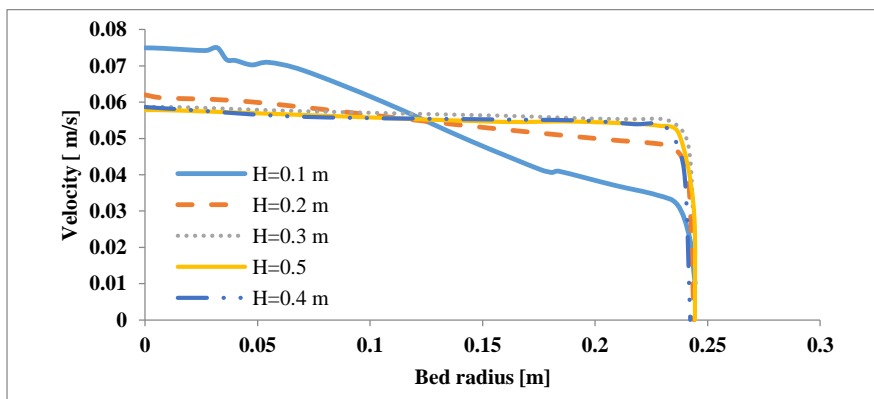
نمودار پروفایل سرعت در ارتفاع های مختلف برای آرایش F در شکل (۷) ارائه شده است. با افزایش ارتفاع، پروفایل سرعت

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 یاد شده می‌توان این نتیجه را گرفت که در آرایش H، پروفایل سرعت سریعتر درون بستر یکنواخت می‌گردد یا همان طور که گفته شد جریان زودتر به گسترش یافتگی می‌رسد، ولی در آرایش F به علت وجود چرخش جریان توانایی نفوذ هوادهی به تمام بستر را دارد. شرایط آرایش F برای حالتی مناسب است که نیاز به هوادهی فوری به تمام نقاط بستر وجود دارد مانند هجوم عوامل میکروبی یا حشرات، ولی آرایش H برای هوادهی ممتد مناسب‌تر است چرا که تمامی نقاط بستر در نهایت در طول زمان به صورت یکسانی به تعادل می‌رسد.

است که جریان در داخل بستر گسترش یافته است. برای آرایش H تغییرات سرعت به صورت تابعی از شعاع مخزن در ارتفاع‌های مختلف نشان داده شده است، با افزایش ارتفاع پروفایل ثابت و تغییر شکل آن محدودتر می‌شود (شکل ۸). در واقع می‌توان گفت که بعد از یک سوم اول ارتفاع بستر جریان گسترش می‌یابد. باید توجه داشت که هر میزان توزیع سرعت یکنواخت‌تر باشد به حالت بازشدگی کامل کانال ورودی (هوای ورودی از کل سطح مقطع بستر بگذرد) نزدیک‌تر است. در واقع توزیع یکنواخت سرعت، 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 که توانایی نفوذ در این هسته متراکم را داشته باشد، در آرایش F به



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

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

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 شد و شاخص آماری برای تایید برازش این

آرایش F جریان چرخشی مشاهده شد ولی در آرایش H این اثر مشاهده نشد. افت فشار در دو آرایش به صورت تجربی اندازه گیری شد که برای آرایش F افت بیشتری نسبت به آرایش H گزارش شد.

فهرست علائم

	د	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	سرعت (m/s)	in	ورودی
	$Y_{i,exp}$	داده‌های افت فشار تجربی	j	۳، ۲، ۱
	$Y_{i,pre}$	داده‌های افت فشار تئوری	k	۳، ۲، ۱
	RMSE	مجذور میانگین مربعات خطا	out	خروجی
			s	بستر

REFERENCES

- Boyce, D., Davies, J., (1965). Air distribution from a lateral duct with different escape areas in barley. *Journal of Agricultural Engineering Research* 10, 230-234.
- Brooker, D., (1961). Pressure patterns in grain-drying systems established by numerical methods. *Transactions of the ASAE* 4, 72-74.
- Bunn, J., Hukill, W., (1963). Pressure pattern predictions for non-linear air flow through porous media. *Transactions of the ASAE* 6, 32-0036.
- Civan, F., (2011). Porous media transport phenomena. John Wiley & Sons.
- Ergun, S., Orning, A.A., (1949). Fluid Flowthrough Randomly Packed Columns and Fluidized Beds. *Industrial & Engineering Chemistry* 41, 1179-1184.
- Hukill, W., Ives, N., (1955). Radial airflow resistance of grain. *Agricultural Engineering* 36, 332-335.
- Khatchatourian, O., Binelo, M., (2008). Simulation of three-dimensional airflow in grain storage bins. *Biosystems Engineering* 101, 225-238.
- Khatchatourian, O., Savicki, D., (2004). Mathematical modelling of airflow in an aerated soya bean store under non-uniform conditions. *Biosystems Engineering* 88, 201-211.
- Lai, F., (1980). Three-dimensional flow of air through nonuniform grain beds. *Transactions of the ASAE* 23, 729-0734.
- Lawrence, J., 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.
- Lukaszuk, J., Molenda, M., Horabik, J., 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.
- Molenda, M., Montross, M.D., McNeill, S.G., Horabik, J., (2005). Airflow resistance of seeds at different bulk densities using Ergun's equation. *Transactions of the ASAE* 48, 1137-1145.
- Olatunde, G., Atungulu, G.G., Sadaka, S., (2016). CFD modeling of air flow distribution in rice bin storage system with different grain mass configurations. *Biosystems Engineering* 151, 286-297.
- Shedd, C.K., (1953). Resistance of grains and seeds to air flow. *Agricultural Engineering* 34, 616-619.
- Singh, A., Leonardi, E., 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.
- Smith, E., (1996). Pressure and velocity of air during drying and storage of cereal grains. *Transport in porous media* 23, 197-218.
- Thorpe, G., 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
- Thorpe, G., 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
- Vafai, K., (2015). *Handbook of porous media*. Crc Press