

بررسی پخش ریزدانه هنگام پر کردن سیلو غلات در آزمایشگاهی

داریوش زارع^{۱*} آرش نورمحمدی مقدمی^۱

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

چکیده

هنگام پر شدن سیلوها، ذرات ریز تو در زیر نقطه پر شدن تجمع می‌یابند و این باعث می‌شود که در فرآیند هوادهی که متعاقبا انجام می‌شود، انرژی بیشتری برای راندن هوا در مناطق با تراکم بالای ریزدانه‌ها صرف گردد. در این پژوهش، توزیع دانه‌های شکسته ذرت و مواد خارجی ($BCFM^1$) در سطوح مختلف پارامترهای تاثیرگذاری چون، $BCFM$ اولیه، دبی ورودی محصول و قطر لوله پرکننده مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌گیری با استفاده از یک رویکرد جدید، در راستای شعاعی و عمودی در یک سیلوی آزمایشی انجام پذیرفت. همچنین یک مدل برای پیش‌بینی مقدار $BCFM$ در راستای شعاعی و عمودی ارائه و بر اساس شاخص‌های آماری از قبیل، R^2 ، $RMSE$ و $MRDM$ ارزیابی گردید و مشخص شد که این مدل با داده‌های تجربی همخوانی دارد.

کلمات کلیدی: پخش ریزدانه‌ها، جریان مواد، روش پرکردن، سیلو غلات
*نویسنده مسئول

¹ broken corn and foreign material

بررسی پخش ریزدانه هنگام پر کردن سیلو غلات در مقیاس آزمایشگاهی

۱. مقدمه

در حین فرآیند پر کردن^۲، کپه‌ای مخروطی شکل در درون سیلوه‌ها تشکیل می‌شود به طوری که مواد در حال سقوط، هنگامی که بر روی این کپه ریخته می‌شوند به صورت شعاعی در درون یک لایه موسوم به لایه جریان^۳ در تمامی جهات (شکل ۱ (a)) به پایین کپه و به سمت دیواره‌های سیلو هدایت می‌شوند [5]. تحقیقات نشان داده است که حین پر کردن سیلوهایی که از وسط پر می‌شوند، ریزدانه‌ها که شامل دانه‌های شکسته و برخی مواد خارجی می‌باشند در مرکز سیلو تجمع می‌یابند [13]. ذرات بزرگتر به دلیل جرم بیشتر، و اصطکاک سطحی کمتر نسبت به ذرات کوچکتر، تمایل به حرکت به سمت دیواره سیلو دارند، در حالی که ذرات کوچکتر در مرکز توده دانه باقی می‌مانند. از نقطه نظر دیگر، ریزدانه‌ها حین انتقال در درون لایه جریان، در حفره‌های موجود در لابلای ذرات بزرگتر باقی می‌ماند در حالی که ذرات بزرگتر عمدتاً به سمت دیواره سیلو هدایت می‌شوند. سطح شیب‌دار کپه تشکیل شده، مانند یک غربال عمل می‌کند که بر اثر آن ذرات کوچکتر به لایه‌های زیرین خود نفوذ می‌کنند. این پدیده به اثر غربالگری^۴ موسوم است [10]. اثر مذکور باعث می‌شود که ستونی از ریزدانه‌ها در مرکز سیلو تشکیل شود [9]. تمرکز ریزدانه‌ها در مرکز سیلو باعث پخش غیریکنواخت هوا در فرآیند هوادهی می‌گردد. در چنین شرایطی نرخ جریان هوا در مرکز سیلو کمتر از اطراف آن می‌گردد [2]. با توجه به درجه حرارت بالا و شرایط مرطوب دانه‌ها در سیلو، خطر ایجاد کپک‌ها و حشرات و سایر آلودگیها در چنین شرایطی اجتناب ناپذیر است. برای طراحی بهینه فرآیندهای صنعتی از قبیل هوادهی محصولات دانه‌ای سیلو شده، پر کردن سیلوه‌ها و هر فرآیندی که شامل انتقال مواد است، لازم است که مطالعه پخش ریزدانه‌ها در دستور کار قرار گیرد. فن و همکاران [7] با استفاده از یک مدل شبه دو بعدی^۵ به مطالعه جریان مواد حین پر شدن یک سیلو آزمایشگاهی پرداختند (شکل

² filling process

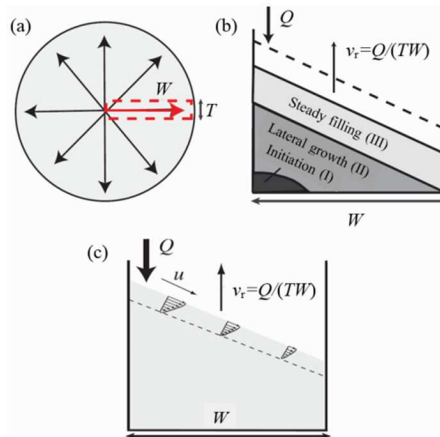
³ flowing layer

⁴ sifting effect

⁵ quasi-two-dimensional apparatus

۱. Q و W ، T به ترتیب نشان دهنده فاصله بین دیواره‌های جانبی دستگاه، عرض دستگاه و دبی حجمی جریان

ورودی مواد به داخل سیلو هستند



شکل ۱- (a) نمای بالا از یک کپه سه بعدی تشکیل شده در داخل سیلو. پیکان‌ها جریان مواد و مستطیل قرمز یک کپه دو بعدی را نشان می‌دهد. (b) نمای کناری از یک کپه دو بعدی که با سرعت $v_r = Q/A$ در حال بالا آمدن است. (c) نمای کناری از یک کپه دو بعدی و پروفیل سرعت جریان مواد

همانطور که در شکل ۱ (b) نشان داده شده است، پر شدن یک مخزن یا سیلو شامل سه مرحله است. در مرحله یک (initiation)، مواد در حال سقوط بعد از رسیدن به ته مخزن تشکیل یک کپه نامنتظم می‌دهند. کمی بعد از آن، کپه به صورت جانبی گسترش می‌یابد و قاعده آن بزرگتر می‌شود تا زمانی که به دیواره سیلو برسد (مرحله دوم یا lateral growth). در مرحله سوم (steady filling)، سطح کپه به طور پیوسته با سرعت ثابت (v_r) به سمت بالا حرکت می‌کند. شکل ۱ (c) نشان می‌دهد که سرعت جریان در درون لایه جریان به طور خطی در طول مسیر حرکت کاهش می‌یابد و در نتیجه یک گرادیان سرعت در جهت جریان پدید می‌آید [6]. طبق مباحث فوق، می‌توان نتیجه گرفت که سرعت مواد در لایه جریان می‌تواند پخش ریزدانه‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. جاباس و همکاران [8] میزان پخش ریزدانه‌ها و پوسته‌های موجود در یک سیلوی کلزا را که با دو روش پر کردن پر شده بود مورد بررسی قرار دادند. فرآیند پر کردن سیلو با دو روش ۱- پر کردن توسط یک لوله واقع در مرکز^۶ و بالای سیلو و ۲-

⁶ central spout

توسط یک پخش کن^۷ مخروطی صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که استفاده از پخش کن دانه منجر به بهبود اندکی در پخش یکنواخت ریزدانه‌ها شد. نویسندگان همچنین یک معادله درجه دوم را برای پخش ریزدانه‌ها پیشنهاد دادند. به دلیل مشکلات عدیده‌ای که در کنترل شرایط آزمایشگاهی وجود داشت، اثرات پارامترهای دیگر مانند محتوای اولیه ریزدانه‌ها^۸، دبی ورودی محصول و قطر لوله پرکننده را (برای حالت پرکردن از وسط) در پخش ریزدانه‌ها در نظر نگرفتند. شینوهورا و همکاران (Shinohora *et al.*, 2001) اثرات پارامترها مانند محتوای اولیه ریزدانه و دبی ورودی محصول را حین پرکردن یک مخزن مخروطی شکل دو بعدی بررسی کردند. نتایج نشان داد که میزان پخش ریزدانه‌ها با افزایش محتوای اولیه ریزدانه و افزایش دبی پخش ریزدانه‌ها یکنواخت تر می‌شود. اسکولز [10] اظهار داشت که هرچه دبی ورودی محصول به داخل سیلو افزایش یابد لایه جریان ضخیم تر می‌شود. بنابراین، ذرات کوچکتر قبل از اینکه بتوانند به لایه‌های زیرین خود نفوذ کنند، به سمت دیواره‌های سیلو هدایت می‌شوند (در فاصله دورتری از مرکز سیلو قرار می‌گیرند). انگلوم و همکاران [4] به بررسی پخش ذرات شن و ماسه حین فرایندهای پرکردن و خالی کردن پرداختند و در این مورد مدل یک ابعادی ارائه دادند. پارامترهای موثر در پخش ذرات در طی فرآیند پرکردن، درصد جرمی ذرات، نسبت اندازه ذرات (درشت / ریز)، فاصله سقوط آزاد، قطر سیلو و قطر لوله پرکننده بود. مدل ارائه شده با نتایج تجربی همخوانی خوبی داشت. کمبروس و همکاران [3] به بررسی پخش ذرات شن و ماسه در یک سیلو آزمایشی در طی فرایند پرکردن و تخلیه پرداختند. پخش ذرات در امتداد عرض و ارتفاع سیلو مورد بررسی قرار گرفت. آزمایشات نشان داد که تمرکز ذرات درشت یک تابع درجه دوم از عرض سیلو است و به صورت خطی با ارتفاع سیلو افزایش می‌یابد. با مروری بر مطالعات گذشته، خلا یک تحقیق که به بررسی سه بعدی پخش ریزدانه‌ها در امتداد شعاعی و عمودی یک سیلو ذخیره کننده مواد دانه‌ای کشاورزی تحت تاثیر پارامترهای تاثیرگذاری چون، محتوای اولیه ریزدانه‌ها، دبی ورودی محصول و قطر لوله پرکننده ورودی احساس می‌گردد. با توجه به مطالب یاد شده اهداف این تحقیق عبارتند از: الف) بررسی پخش

⁷ spreader

⁸ initial BCFM

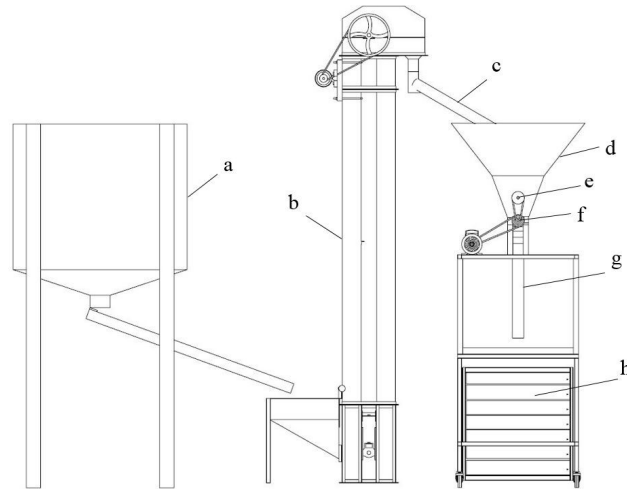
ریز دانه‌ها در یک سیلو آزمایشگاهی تحت تاثیر پارامترهای تاثیر گذاری چون، محتوای اولیه ریز دانه‌ها، دبی جریان ورودی محصول و قطر لوله پرکننده ورودی

(ب) ارائه یک مدل برای تعیین میزان ریز دانه‌ها در راستای شعاع و ارتفاع سیلو

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. تجهیزات آزمایشگاهی

شکل ۲ تجهیزات آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده در بخش مهندسی بیوسیستم دانشگاه شیراز را نشان می‌دهد که در تحقیق حاضر مورد استفاده قرار گرفته است. این تجهیزات شامل یک مخزن اصلی دانه، بالابر، مخزن دوزنقه - ای شکل، یک سیلو آزمایشگاهی می‌شدند. بالابر برای انتقال مواد از مخزن اصلی به مخزن دوزنقه‌ای استفاده می‌شد. برای کاهش خطا در اندازه گیری، دانه های ذرت (ذرت، ذرت شکسته و مواد خارجی) باید در داخل مخزن دوزنقه‌ای به خوبی مخلوط شوند. برای این منظور، یک لوله دو راهه در خروجی الواتور (جهت تقسیم جریان مواد به دو جریان هنگام پر کردن مخزن دوزنقه‌ای) نصب شد. علاوه بر این، یک همزن به صورت افقی در کف مخزن دوزنقه‌ای قرار داده شد. دبی خروجی مواد از مخزن دوزنقه‌ای توسط یک مکانیزم غلتکی شیاردار کنترل میگردید. سیلو آزمایشگاهی (شکل ۳) شامل هفت حلقه بود که با استفاده از یک شاسی بر روی یکدیگر قرار می‌گرفتند. فاصله عمودی بین حلقه‌ها ۴ میلی‌متر در نظر گرفته شد. ارتفاع و قطر هر حلقه به ترتیب ۰/۱۴ و ۱ متر بود.



شکل ۲- تجهیزات آزمایشگاهی (a) مخزن اصلی، (b) بالابر، (c) لوله دوراها، (d) مخزن دوزنقه‌ای، (e) محور همزن، (f) محور مکانیزم غلتکی شیاردار، (g) لوله پرکننده، (h) سیلو آزمایشگاهی متشکل از هفت حلقه

۲.۲. روند انجام آزمایش‌ها

مطالعه موردی در این تحقیق ذرت دانه‌ای رقم ۷۰۴ بود که از یک موسسه کشاورزی واقع در شهرستان شیراز تهیه گردید. طبق استاندارد ASABE [1]، رطوبت اولیه ذرت در یک آون آزمایشگاهی (گرمایش در دمای ۱۰۳ درجه سانتیگراد به مدت ۷۲ ساعت) اندازه‌گیری شد. رطوبت اولیه ذرت 14 ± 0.5 گزارش گردید. از شاخص BCFM (ذرت شکسته و مواد خارجی) برای تعیین میزان ریزدانه‌ها استفاده گردید. BCFM مقدار موادی است که از یک الک متشکل از سوراخهای دایره‌ای با قطر $4/8$ میلی‌متر عبور می‌کند. در این مطالعه، از روش دستی برای تعیین میزان ریزدانه‌ها استفاده گردید [15]. آزمایش‌ها در سه سطح ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد برای محتوای اولیه ریزدانه‌ها (BC_I)، سه سطح ۸۴، ۱۰۵ و ۱۲۰ میلی‌متر برای قطر لوله پرکننده (D_F) و سه سطح ۰/۵، ۱ و ۱/۵ لیتر بر ثانیه برای دبی جریان ورودی محصول (Q) انتخاب شدند. آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شد. با در نظر گرفتن تمام سطوح تیمارها و تکرارها جمعا ۸۱ تست انجام شد. برای تنظیم میزان BC_I قبل از انجام آزمایش‌ها، دانه ذرت با درصد مشخصی از ریزدانه‌ها مخلوط می‌شد. در میان پارامترهای فیزیکی تأثیرگذار بر پخش ریزدانه‌ها، چگالی توده‌ای^۹

^۹ bulk density

و زاویه انباشتگی^{۱۰} برای هر سه سطح BC_I اندازه گیری شد (جدول ۱). اندازه گیری چگالی توده‌ای مطابق با روشی که استروشان [14] بیان داشته انجام پذیرفت. در ابتدا مقداری ذرت با محتوای اولیه ریزدانه مشخص در داخل یک بشر با حجم مشخص ریخته می‌شد. سپس با استفاده از یک تخته چوبی صاف سطح ذرت ریخته شده در بشر مسطح می‌گردید (به گونه‌ای که تخته چوبی در تماس با لبه بشر حرکت داده می‌شد). چگالی توده‌ای با تقسیم وزن ذرت موجود در بشر بر حجم بشر محاسبه می‌شد. برای اندازه‌گیری زاویه انباشتگی از یک جعبه چوبی مکعبی شکل استفاده شد. در داخل این مکعب یک ستون دایروی شکل با شعاع مشخص قرار داشت. بعد از اینکه جعبه مذکور با ذرت پر می‌شد یکی از دیواره‌های آن برداشته می‌شد. با این کار ذرت‌های موجود در مکعب تخلیه و فقط مقداری ذرت روی ستون دایروی شکل باقی می‌ماند. با دانستن شعاع ستون و اندازه‌گیری ارتفاع مخروطی شکل مواد روی ستون، زاویه انباشتگی محاسبه می‌گردد.

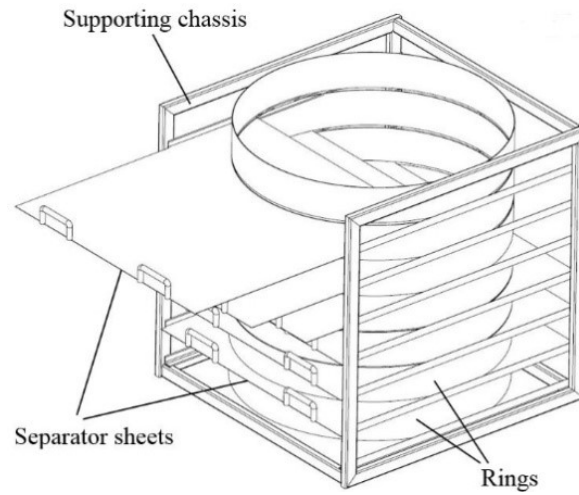
جدول ۱- خصوصیات فیزیکی مواد مورد آزمایش در سه سطح از میزان ریزی اولیه

	Initial BCFM (BC_I)			
	0%	5%	7.5%	10%
چگالی توده (kg m^{-3})	718±1.6	732±1.8	741±1.8	751±1.9
زاویه استقرار (°)	22.5	24.5	26.2	28

قبل از پر کردن سیلو، از یک نوار چسب برای درزگیری فاصله بین حلقه‌های استفاده شد تا از خروج مواد جلوگیری شود. برای تقسیم ستون مواد به هفت قسمت، پس از پر شدن سیلو، شش ورق جداکننده (شکل ۳) در فاصله بین حلقه‌ها (از پایین به بالا برای حفظ فشار بر لایه‌های پایین به علت وزن ستون مواد) به صورت کشویی وارد می‌شد. به دلیل شکل کپه مخروطی تشکیل شده در بالای سیلو، نمونه‌گیری برای اولین حلقه از بالا انجام نگرفت. همچنین برای جلوگیری از اثر مراحل initiation و lateral growth در کف مخزن پائین‌ترین حلقه نیز

¹⁰ angle of repose

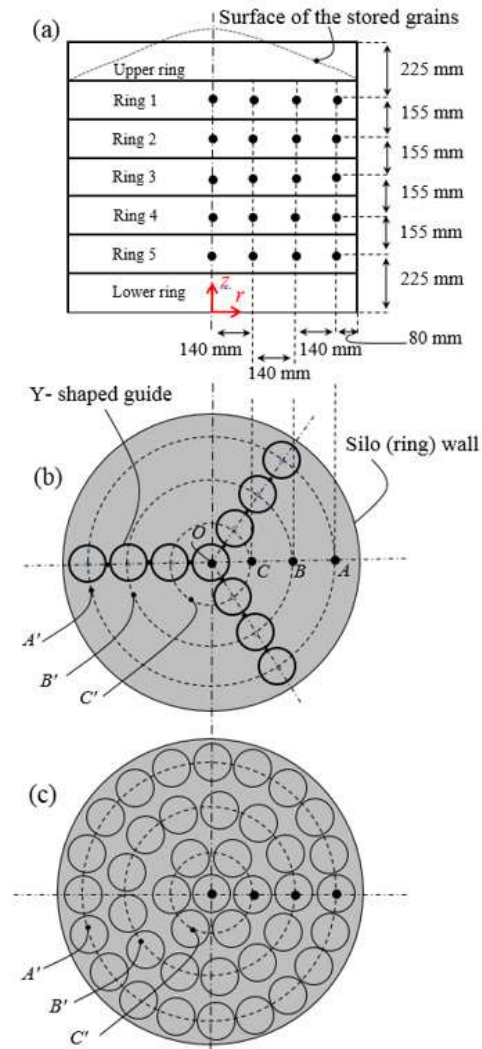
در آزمایش‌ها مد نظر قرار نگرفت. برای تعیین محل نمونه‌گیری در راستای شعاعی از یک راهنمای Y شکل (شکل ۴ و شکل ۵ (b)) شامل ده حلقه کوچک استفاده گردید بطوریکه استوانه‌های نمونه‌برداری از طریق حلقه‌های این راهنما به داخل محصول وارد می‌شد. شکل ۵ (a) موقعیت نمونه‌گیری را در سیلو آزمایشی نشان می‌دهد. موقعیت هر نقطه نمونه‌گیری با دو عدد بدون بعد R (فاصله از مرکز سیلو که با تقسیم بر شعاع سیلو بدون بعد شده است) و Z (فاصله از کف سیلو که با تقسیم بر ارتفاع سیلو بدون بعد شده است) نشان داده می‌شود. در تحقیق حاضر میزان BCFM مربوط به هر موقعیت نمونه‌گیری با BC_L نشان داده می‌شود. لازم به ذکر است که گرچه نمونه‌برداری در سه تکرار انجام گردید، مقدار BC_L در نقاط نمونه‌برداری A ، B و C (شکل ۵ (b)) میانگین BC_L سه نمونه است که در همان فاصله از مرکز قرار دارد. به عنوان مثال، مقدار BC_L در نقطه A به طور متوسط از سه نقطه نمونه‌برداری است که روی دایره A' واقع شده‌اند. با اجرای این روش، جریان مواد روی پشته تشکیل شده درون سیلو در سه جهت شعاعی در نظر گرفته خواهد شد. مواد داخل سیلندر نمونه‌گیری توسط یک مکنده تخلیه می‌شد و با استفاده از یک ترازوی دیجیتالی (Japan, A & D Company, GF-600، دقت ۰/۰۱ گرم) میزان ریزدانه‌های آن وزن و BC_L تعیین می‌شد. این روش برای سایر حلقه‌ها از بالا به پایین تکرار شد. این روش برای اولین بار در تعیین BC_L در جهت شعاعی و عمودی در یک سیلوی آزمایشی بکار گرفته شد. از مزایای این روش این است که نمونه‌گیری بدون ایجاد برهم خوردگی نقطه نمونه‌گیری انجام می‌شود. در روش‌هایی که با پراب نمونه‌برداری صورت می‌گیرد مشکل ایجاد برهم خوردگی در نقطه نمونه‌گیری وجود دارد که باعث خطا در آزمایش‌ها می‌شود.



شکل ۳- شماتیکی از سیلو آزمایشگاهی



شکل ۴- راهنمای Y شکل و استوانه‌های نمونه برداری



شکل ۴. (a) موقعیت نقاط نمونه برداری، (b) و (c) نمای بالا از محل نقاط نمونه برداری

۳.۲. تحلیل داده‌ها

داده‌های به دست آمده از آزمایشات با استفاده از روش ANOVA و توسط نرم افزار آماری SPSS 22 (2012) تجزیه و تحلیل شد [12]. روش تحلیل بر اساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تیمار و سه تکرار در سطح معنی داری ۵٪ انجام گردید. همچنین از تکنیک رگرسیون غیر خطی برای ارائه مدل جهت پیش بینی الگوی پخش ریزدانه‌ها استفاده شد. توانایی پیش بینی مدل‌های مختلف در یک فرآیند سعی و خطا با

استفاده از شاخص‌های آماری چون R^2 ، χ^2 ، میانگین مربعات خطا ($RMSE$) و میانگین انحرافات نسبی ($MRDM$) مورد ارزیابی قرار گرفت. مناسب‌ترین مدل بر اساس بیشترین مقدار R^2 و کمترین مقدار χ^2 ، $RMSE$ و $MRDM$ انتخاب شد. شاخص‌های آماری مذکور در معادلات (۱) تا (۴) آمده‌اند.

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (\Phi_{exp,i} - \Phi_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^n (\Phi_{exp,i} - \Phi_{exp,a})^2} \right) \quad (1)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\Phi_{exp,i} - \Phi_{pre,i})^2}{n-m} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Phi_{exp,i} - \Phi_{pre,i})^2} \quad (3)$$

$$MRDM = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|\Phi_{exp,i} - \Phi_{pre,i}|}{\Phi_{exp,i}} \right) \quad (4)$$

که n تعداد مشاهدات، $\Phi_{exp,i}$ آمین داده تجربی، $\Phi_{pre,i}$ آمین داده پیش‌بینی شده، $\Phi_{exp,a}$ میانگین داده‌های تجربی و m تعداد ثابت‌های مدل می‌باشد. در این مطالعه برای بررسی پخش ریزدانه‌ها در راستای شعاعی در یک ارتفاع مشخص (برای یک حلقه) از یک ضریب غیر یکنواختی^{۱۱} (NUF) توسط شینوهورا و همکاران [11] نیز بکار گرفته شده بود استفاده شد:

$$NUF_R = \frac{\sigma}{BC_I} \quad (5)$$

که

$$\sigma^2 = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^4 (BC_{L,i} - BC_I)^2 \quad (6)$$

σ میزان انحراف BC_L در نقاط مختلف نمونه برداری ($BC_{L,i}$) از میزان محتوای اولیه ریزدانه‌ها (BC_I) می‌باشد.

همچنین برای یک سیلو (که شامل پنج حلقه می‌باشد) ضریب غیر یکنواختی عبارت است از:

$$NUF_S = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 NUF_{R,j} \quad (7)$$

¹¹ nonuniformity factor

۳. بحث و نتایج

جدول ۲ نتایج حاصل از ANOVA را برای ارزیابی تاثیر تیمارها نشان می‌دهد. مشخص شد که اثرات همه پارامترها (و همچنین همه تعاملات) در احتمال ۵٪ معنی دار بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که BC_L تابعی از BC_I ، D_F ، Q ، R و Z است.

جدول ۲- نتایج حاصل از آنالیز واریانس برای ارزیابی تاثیر تیمارها

Source of variation	Degree of freedom	Sum of Squares	Mean Square	F value
BC_I	2	7462.171	3731.086	20072.984*
Q	2	447.219	223.609	1203.003*
D_F	2	50.214	25.107	135.074*
Z	4	1051.478	262.869	1414.220*
R	3	18486.283	6162.094	33151.644*
Error	1540	286.249	.186	
Total	1620	209167.535		

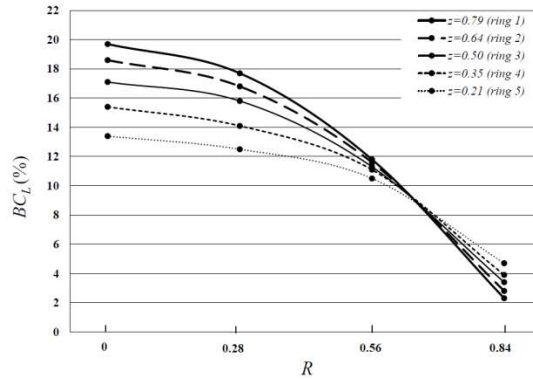
* Significant at $P < 0.05$.

۳.۱. پخش ریزدانه‌ها در راستای شعاعی سیلو

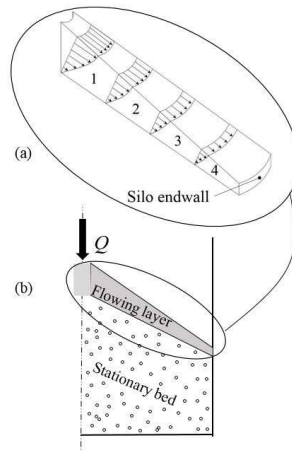
شکل ۶ (a) نشان دهنده نمای سه بعدی یک قطاع از لایه جریان بر روی سطح شیبدار کپه (شکل ۶ (b)) در داخل یک سیلو است. همانطور که در شکل دیده می‌شود، لایه جریان مشابه جریان در یک "کانال به تدریج گسترش یافته"^{۱۲} است. همان طور که R افزایش می‌یابد، ضخامت لایه جریان کاهش می‌یابد و این امر موجب

¹² gradually expanded channel

کاهش سرعت مواد در امتداد مسیر خود روی سطح کپه می‌شود. چنین مصداقی برای تحلیل دو بعدی لایه جریان وجود ندارد. شکل ۵ نمودار تغییرات BC_L را در طول شعاع سیلو (نقاط O به A در شکل ۴ (b)) برای حلقه ۱ (۲۱/۰ $Z =$) تا حلقه ۵ ($Z = ۰/۷۹$) نشان می‌دهد. محتوای ریزدانه‌ها (BC_L) در امتداد لایه جریان، به دلیل اثر غربالگری، به طور غیر خطی با روند کاهنده‌ای کاهش می‌یابد. مقدار BC_L در ابتدای لایه جریان (مرکز سیلو) بالاست و مادامیکه خطوط جریان به صورت شعاعی از یکدیگر فاصله می‌گیرند ریزدانه‌ها نیز از یکدیگر دور می‌شوند. به علت اثر غربالگری، بیشترین مقدار ریزدانه‌ها در قسمتهای نزدیک به مرکز سیلو باقی می‌ماند و این باعث می‌شود که میزان تغییر BC_L بین بخش‌های ۱ و ۲ کمتر از میزان تغییر بین بخش‌های ۲ و ۳ و همچنین بین بخش‌های ۳ و ۴ باشد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در آنالیزهای سه بعدی فرآیند پر شدن سیلو، میزان BC_L تقریباً میانگین وزنی از مقادیر BC_L نقاط نمونه برداری است که در طول شعاع سیلو اندازه‌گیری می‌شود. نقاط نمونه برداری که از مرکز سیلو دورتر هستند وزن بیشتری نسبت به سایر نقاط دارند (به عنوان مثال در شکل ۴ (b))، نقطه A دارای بالاترین وزن است و نقطه O دارای کمترین وزن است). با توجه به شکل ۴ (c)، وزن نقاط نمونه برداری C ، B و A تعداد حلقه‌های کوچک (هم اندازه با شعاع ظرف نمونه‌گیر) است که می‌توانند بر روی دایره‌های نقطه‌چین C' ، B' و A' چیده شوند. بنابراین، وزن در نقطه O ، C ، B و A به ترتیب ۱، ۶، ۱۳ و ۲۰ خواهد بود. به عنوان مثال، در شکل ۵، میانگین وزنی BC_L برای حلقه ۱ برابر است با: $۸/۱\% = ۴۰ \times (۲\%/۳ \times ۲۰) + (۱۱\%/۸ \times ۱۳) + (۱۷\%/۷ \times ۶) + (۱۹\%/۱ \times ۲۰)$ که تقریباً برابر با میزان BC_L ، یعنی ۷/۵٪ است. می‌توان نتیجه گرفت که در یک سیلو که از وسط پر می‌شود، می‌توان از میانگین وزنی مقادیر BC_L نقاط نمونه برداری که در طول شعاع سیلو اندازه‌گیری می‌شود برای تعیین محتوای اولیه ریزدانه‌ها استفاده نمود.



شکل ۵. پروفیل توزیع BC_L در راستای شعاعی سیلو در ارتفاع‌های مختلف درون سیلو ($D_F = 84 \text{ mm}$ و $Q = 0.5 \text{ lit s}^{-1}$, $BC_I = 7.5\%$)



شکل ۶- (a) نمای سه بعدی یک قطاع از لایه جریان، (b) نمای کناری از لایه جریان. پیکان‌ها بزرگی بردارهای سرعت را نشان می‌دهند

جدول ۳- مقادیر NUF_R و NUF_S در شرایط مختلف آزمایشگاهی

No.	BC_I (%)	Q ($kg\ m^{-3}$)	D_F (mm)	Z	NUF_R	NUF_S
1	5	0.5	84	0.79	162.87	122.16 ^a
				0.64	144.02	
				0.50	124.13	
				0.35	101.83	
				0.21	77.95	
2	5	0.5	105	0.79	159.64	119.57
				0.64	142.05	
				0.50	123.64	
				0.35	98.22	
				0.21	74.31	
3	5	0.5	120	0.79	145.44	110.35
				0.64	135.48	

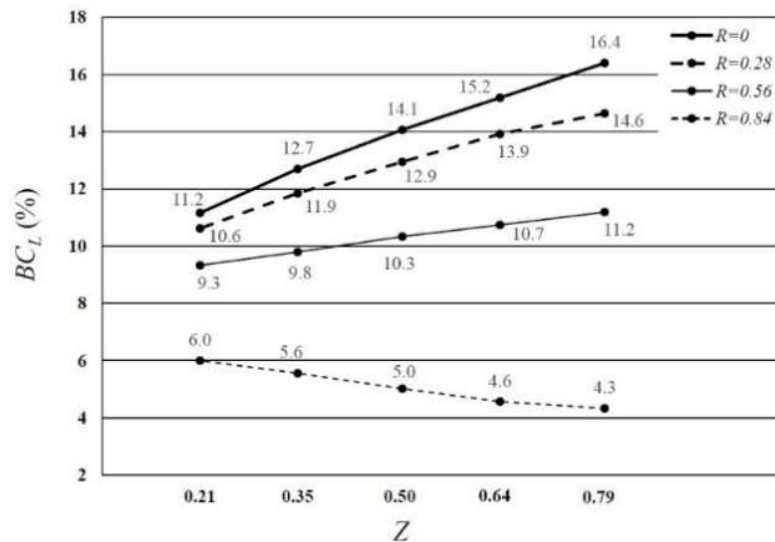
				0.50	116.89	
				0.35	92.15	
				0.21	61.81	
4	7.5	0.5	105	0.79	100.45	78.80
				0.64	91.57	
				0.50	80.88	
				0.35	67.28	
				0.21	53.81	
5	7.5	1	105	0.79	94.23	72.61
				0.64	85.98	
				0.50	74.89	
				0.35	61.26	
				0.21	46.71	
6	7.5	1.5	105	0.79	78.23	53.57
				0.64	67.98	
				0.50	55.19	
				0.35	40.47	
				0.21	26.00	
7	5	1.5	84	0.79	111.92	80.77

					0.64	98.91	
					0.50	83.01	
					0.35	65.90	
					0.21	44.10	
8	7.5	1.5	84	0.79	82.33	56.56	
					0.64	71.96	
					0.50	57.62	
					0.35	42.68	
					0.21	28.23	
9	10	1.5	84	0.79	63.17	47.15	
					0.64	56.01	
					0.50	47.74	
					0.35	38.53	
					0.21	30.28	
10	7.5	1	84	0.79	100.45	78.80	
					0.64	91.57	
					0.50	80.88	
					0.35	67.28	
					0.21	53.81	
11	7.5	1	120	0.79	86.62	59.53	

				0.64	74.24	
				0.50	59.77	
				0.35	45.96	
				0.21	31.09	
12	10	0.5	120	0.79	84.61	63.71
				0.64	79.71	
				0.50	70.53	
				0.35	51.72	
				0.21	31.96	
13	10	1	120	0.79	67.40	45.33
				0.64	56.57	
				0.50	44.77	
				0.35	34.62	
				0.21	24.29	
14	10	1.5	120	0.79	50.40	36.97 ^b
				0.64	45.11	
				0.50	38.73	
				0.35	29.39	
				0.21	21.22	

۲.۳. تاثیر ارتفاع (Z)

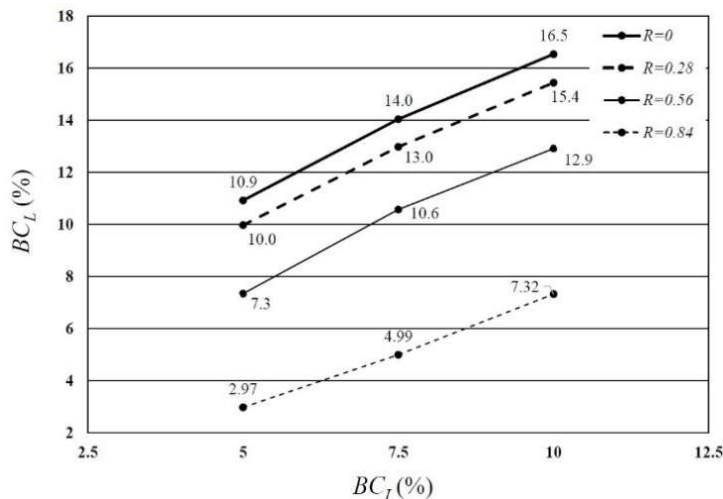
همانطور که در شکل ۵ دیده می‌شود، هنگامی که Z کاهش می‌یابد، روند کاهش نمودارهای پخش ریزدانه‌ها کاهش می‌یابد (تقریباً به سمت خطی بودن میل می‌کنند). شکل ۷ نشان می‌دهد که در $R=0$ ، $R=0/28$ و $R=0/56$ با افزایش Z میزان BC_L به طور خطی افزایش می‌یابد. روند متفاوتی برای نقطه $R=0/84$ وجود دارد. در نقطه مذکور BC_L با افزایش Z کاهش می‌یابد. بر اساس داده‌های جدول ۳، NUF_R با افزایش ارتفاع (Z) افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، در آزمایش ۱، تغییر Z از ۰/۲۱ به ۰/۷۹ باعث افزایش NUF_R از ۷۷/۹۵٪ تا ۱۶۲/۸۷٪ می‌شود. این بدان معنی است که در ارتفاع‌های بالاتر مواد داخل سیلو، مقدار کمتری از ریزدانه‌ها به سمت دیواره‌های سیلو منتقل می‌شود. دلیل این امر این است مادامیکه سیلو در حال پر شدن است ارتفاع مواد ریخته شده در درون سیلو افزایش می‌یابد در نتیجه فاصله سقوط آزاد مواد در حال ریزش کمتر می‌شود و این امر باعث می‌شود که سرعت مواد در طول لایه جریان کمتر شود و در نتیجه ذرات ریز کمتری به دیواره سیلو برسد. بر این اساس، می‌توان اظهار داشت که در ارتفاع‌های بالاتر میزان کمتری از ریزدانه‌ها می‌توانند به انتهای لایه جریان برسند و این امر موجب کاهش یکنواختی پخش ریزدانه‌ها در امتداد شعاع سیلو می‌شود.



شکل ۷- میانگین BC_L در ارتفاع‌های مختلف

۳.۳. تاثیر میزان محتوای اولیه ریزدانه‌ها (BC_I)

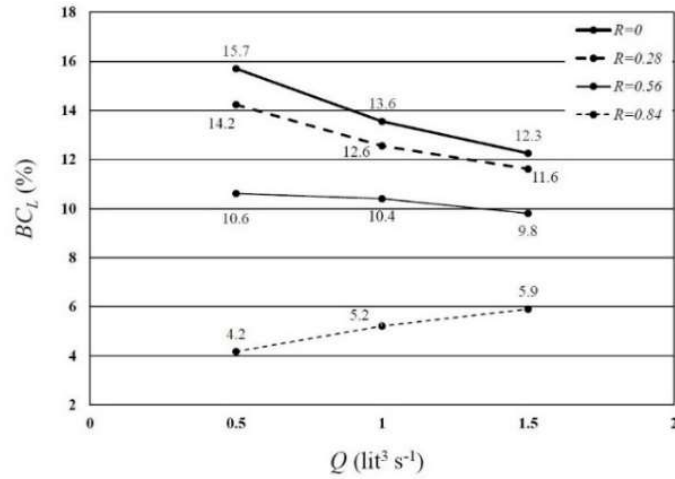
شکل ۸ تغییرات BC_L را از $R=0$ تا $R=0/۸۴$ در سه سطح BC_I نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود میزان BC_L با افزایش BC_I افزایش می‌یابد. اما نکته اینجاست: NUFs با افزایش BC_I کاهش می‌یابد (در جدول ۳، آزمایش ۷ تا ۹، افزایش BC_I از ۵٪ به ۱۰٪ منجر به کاهش NUFs از ۸۰/۷۷٪ به ۴۷/۱۵٪ می‌شود). دلیل این امر این است که در BC_I بالاتر (کثرت ریزدانه‌ها)، تمام ریزدانه‌ها در لایه جریان نمی‌توانند به لایه‌های زیرین (فضای موجود بین ذرات درشت‌تر) نفوذ کنند و بسیاری از آنها همراه با مواد درشت‌تر به سمت دیواره سیلو هدایت می‌شوند. به عبارت دیگر، در مقادیر بالای BC_I اثر غربالگری کمتر است. علاوه بر مطالب یادشده می‌توان به موضوع دیگر نیز اشاره نمود: هر چه ذرات داخل سیلو ریز تر باشد (یا میزان ریزدانه‌ها بیشتر باشد) کپه تشکیل شده شیب تند تری به خود خواهد گرفت، و این باعث جریان روان‌تر مواد در طول لایه جریان می‌شود. بنابراین، ریزدانه‌ها لابلای مواد درشت‌تر می‌توانند به فاصله دورتری از مرکز سیلو هدایت شوند. از مطالب فوق می‌توان نتیجه گرفت که اثر غربالگری در مقادیر کمتر BC_I ، بیشتر از اثر غربالگری در مقادیر بیشتر BC_I است. این نتایج با نتایج بدست آمده توسط شینوهورا و همکاران (Shinohora et al., 2001) همخوانی دارد. بطور کلی می‌توان گفت که پخش ریزدانه‌ها در سیلوهای دارای مقادیر بیشتر BC_I ، نسبت به سیلوهای دارای مقادیر کمتر BC_I ، یکنواخت‌تر است. اما لازم به ذکر است که علیرغم نتایج فوق، وجود مقادیر زیاد ریزدانه‌ها در داخل سیلوهای نگهداری محصولات دانه‌ای کشاورزی بسیار نامطلوب است.



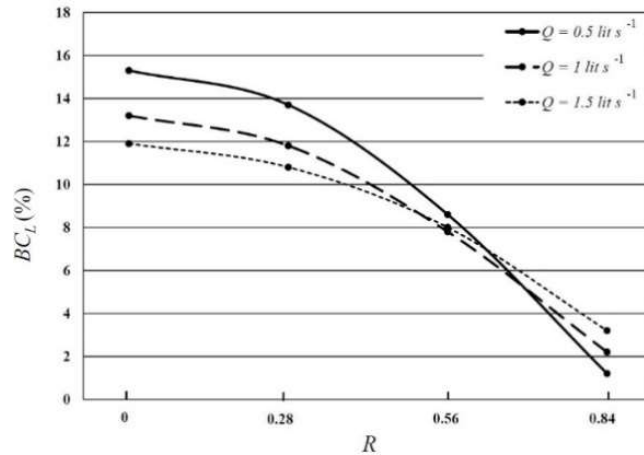
شکل ۸- میانگین BC_L در سطوح مختلف از میزان ریزی اولیه

۳. ۴. تاثیر دبی ورودی

شکل ۹ نشان می‌دهد چگونگی تاثیر دبی ورودی محصول را بر BC_L نشان می‌دهد. در $R=0$ ، $R=0.28$ و $R=0.56$ با افزایش دبی ورودی محصول کاهش می‌یابد، اما در $R=0.84$ با افزایش دبی ورودی محصول افزایش می‌یابد. این بدان معنی است که در دبی‌های بالاتر مقادیر زیادی از ریزدانه‌ها به سمت دیواره‌های سیلو منتقل می‌شود. همانطور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، با افزایش دبی، پخش ریزدانه‌ها یکنواخت‌تر می‌شود. نتایج نشان داد که NUFs با افزایش دبی کاهش می‌یابد (به عنوان مثال در جدول ۳، آزمایش ۴ تا ۶، با افزایش دبی ورودی از ۰/۵ تا ۱/۵ لیتر بر ثانیه، NUFs از ۷۸/۸۰٪ به ۵۳/۵۷٪ کاهش می‌یابد). فن و همکاران [5] اظهار داشتند که ذرات ریز در هنگام برخورد با ذرات بزرگتر (مانند زمانی که یک توپ تنیس با یک توپ بسکتبال برخورد می‌کند) به سمت دیواره سیلو پرتاب می‌شوند. این امر در دبی‌های بالاتر بیشتر به چشم می‌خورد. هرچه دبی افزایش یابد لایه جریان ضخیم‌تر می‌شود و باعث می‌شود ریزدانه‌ها قبل از اینکه بتوانند به لایه‌های زیرین نفوذ کنند، در حین حرکت در درون لایه جریان به سمت دیواره‌های سیلو هدایت شوند.



شکل ۹- میانگین BC_L در سطوح مختلف از دبی ورودی محصول

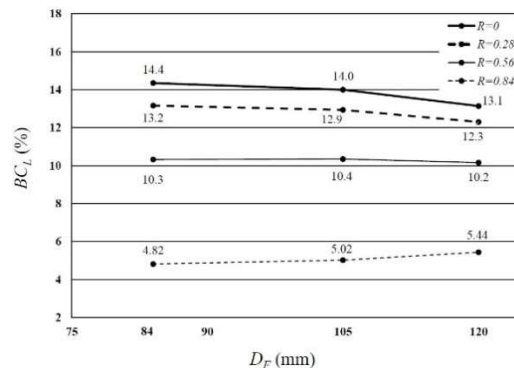


شکل ۱۰- پروفیل توزیع BC_L در راستای شعاعی سیلو در سطوح مختلف از دبی ورودی محصول ($D_F = 84 \text{ mm}$, $BC_I = 5\%$ و $Z = 0.79$)

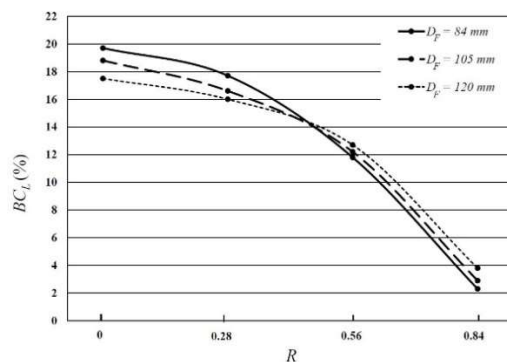
۳.۵. تاثیر قطر لوله پرکننده

همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده در $R=0$ ، $R=0/28$ و $R=0/56$ به صورت خطی با افزایش قطر لوله پرکننده کاهش پیدا می کند، اما در $R=0/84$ با افزایش قطر لوله به صورت خطی افزایش می یابد. شکل ۱۵ نشان می دهد که پخش ریزدانه ها در لوله های بزرگتر یکنواخت تر است. به عبارت دیگر، با افزایش قطر لوله کاهش می یابد (به عنوان مثال در جدول ۳، آزمایش ۱ تا ۳، با افزایش قطر لوله پرکننده از ۸۴ تا ۱۲۰ میلی متر،

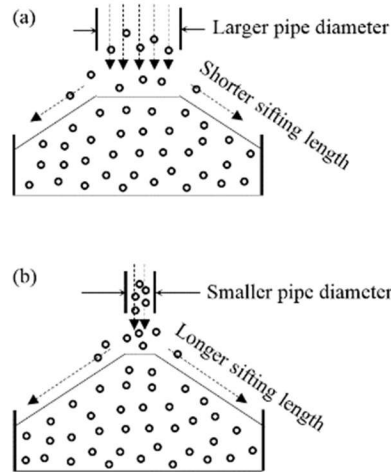
از $NUFs$ از ۱۲۲/۱۶٪ به ۱۱۰/۳۵٪ کاهش می‌یابد). با توجه به شکل ۱۳، لوله بزرگتر باعث می‌شود که ضلع بالایی کپه تشکیل شده بزرگتر (بدلیل سطح ریزش بزرگتر محصول) و ارتفاع آن کوتاهتر شود. به بیان دیگر هرچه قطر لوله افزایش یابد طول غربالگری کمتر می‌شود و باعث پخش یکنواخت تر ریزدانه‌ها می‌شود. از نقطه نظر دیگر، جریان مواد در لوله‌های بزرگتر روان تر است (تلفات انرژی کمتر)، بنابراین جریان مواد در حین حرکت در لایه جریان، انرژی بیشتری برای رسیدن به دیواره سیلو دارند که منجر به یکنواختی بیشتر در پخش ریزدانه‌ها می‌شود. از دیگر نکات مشهود در شکل ۱۱ و مقادیر $NUFs$ در جدول ۱۳ این است که میزان تغییر در BCL تحت تاثیر تغییر در قطر از ۸۴ به ۱۰۵ میلی متر کمتر از میزان تغییر در BCL تحت تاثیر تغییر در قطر از ۱۰۵ به ۱۲۰ میلی متر است. این نشان می‌دهد که یکنواختی در پخش ریزدانه‌ها به طور فزاینده‌ای با افزایش قطر لوله افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش قطر لوله، سطح مقطع لوله (سطح ریزش محصول بر روی پشته) به طور فزاینده‌ای افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱- میانگین BCL در قطرهای مختلف لوله پرکننده



شکل ۱۲- پروفیل توزیع BCL در قطرهای مختلف لوله پرکننده ($Z = 0.79$ و $Q = 0.5 \text{ lit s}^{-1}$, $BCI = 7.5\%$)



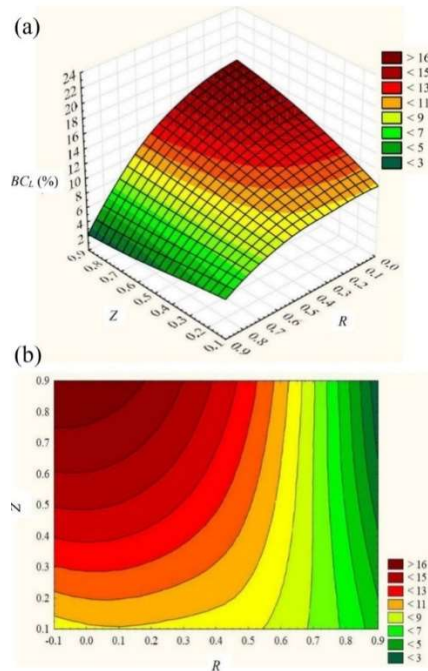
شکل ۱۳- تاثیر قطر لوله پرکننده بر توزیع ریزدانه‌ها

همانطور که در جدول ۳ گزارش شده است، یکنواخت ترین حالت در پخش ریزدانه‌ها در آزمایش شماره ۱۴ رخ داده است که در آن حداقل مقدار NUFs (۳۶٪/۹۷) به دست آمده است. همچنین حداکثر مقدار NUFs مربوط به آزمایش ۱ یعنی ۱۲۲/۱۶٪ می‌باشد. همچنانکه که قبلاً هم اشاره شد، اگرچه NUFs با افزایش BC_I کاهش می‌یابد، ولی وجود مقادیر زیاد BC_I در سیلوهای نگهداری محصولات دانه‌ای کشاورزی نامطلوب است.

شکل ۱۴ پخش ریزدانه‌ها در تمامی آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. برای تجسم بهتر تعامل بین R و Z ، داده‌ها به دو صورت، نمودار روبه‌ای^{۱۳} (شکل ۱۴ (a)) و نمودار کانتور^{۱۴} (شکل ۱۴ (b)) ترسیم شده‌اند. نمودارها نشان می‌دهند که چگونه BC_L با تغییر تک به تک یا همزمان R و Z تغییر می‌کند. همانطور که در نمودارها نیز قابل مشاهده است، تمرکز قابل توجه ریزدانه‌ها در مرکز سیلو رخ داده است که این تمرکز نیز با افزایش Z افزایش می‌یابد. کمترین میزان تمرکز ریزدانه‌ها در دیواره سیلو به خصوص در سطوح بالاتر Z رخ داده است این بدان معنی است که حداکثر غیریکنواختی در پخش ریزدانه‌ها در سطوح بالاتر Z رخ می‌دهد.

¹³ surface plot

¹⁴ contour plot



شکل ۱۴- نحوه توزیع ریزدانه‌ها در سیلو بعد از پرشدن، (a) نمودار رویه‌ای (b) نمودار کانتور

۶.۳. مدلسازی پخش ریزدانه‌ها

با توجه به تمام مباحثی که در بخش‌های ۱.۳ تا ۵.۳ آمده است اثر پارامترهای تاثیرگذار BC_L ، Q ، D_F ، Z و

R بر روی پخش ریزدانه‌ها را می‌توان از طریق معادله زیر بیان نمود:

$$BC_L = a_1 BC_L + a_2 Q + a_3 D_F + a_4 R + a_5 Z + a_5 \exp(R) + a_7 ZR + a_8$$

ثوابت معادله در جدول ۴ ارائه شده است. از میان تمامی مدل‌هایی که به روش سعی و خطا مورد بررسی

قرار گرفتند، مدل مذکور به عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب شد. مقادیر بدست آمده برای شاخص‌های آماری

R^2 ، χ^2 ، $RMSE$ و $MRDM$ به ترتیب ۰/۹۴، ۱/۱۴، ۱/۰۶، ۱۱/۳۹ گزارش شد. همانطور قبلاً ذکر شده BC_L تابعی

غیرخطی از R و تابعی خطی از Z ، BC_L ، Q و D_F است. گرچه اضافه نمودن جمله‌های بیشتر و پیچیده‌تر پیچیدگی

مدل را افزایش می‌دهد، اما در مطالعه حاضر در نظر گرفتن BC_L به عنوان تابع نمایی از R و تابعی ضمنی Z و

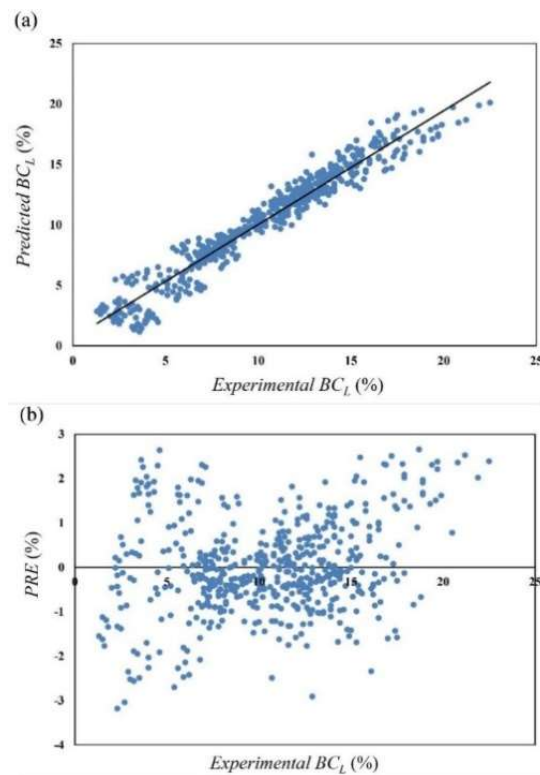
R (ZR) کیفیت مدل را به طور قابل توجهی بهبود بخشید. جمله $a_7 ZR$ نشان دهنده تعامل قابل توجه از ارتفاع و شعاع

سیلو است. شکل ۱۵ (a) برازش بین داده‌های تجربی و داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل را نشان می‌دهد که

حاکی از کیفیت بالای مدل است. شکل ۱۵ (b) توزیع خطای باقی مانده پیش بینی^{۱۵} (PRE) را برای مدل نشان می دهد. همانطور که از شکل برمی آید، مقادیر PRE به طور تصادفی توزیع شده اند و برای بخش آنها هیچ الگوی خاص و منظمی (حساسیت) یافت نمی شود.

جدول ۴- ثوابت مدل پیشنهادی برای توزیع ذرات

	Constant							
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8
Value	1.05	-	-	23.335	9.624	-	-	20.727
		1.283	0.011			17.17	13.577	



شکل ۱۵- (a) مقایسه بین مدل پیشنهادی و داده های تجربی (b) توزیع خطای باقیمانده پیش بینی مدل جهت تخمین BC_L

۴. نتیجه گیری کلی

¹⁵ Prediction residual error

در این تحقیق پخش ریزدانه‌ها در فرآیند پر کردن سیلو تحت تاثیر عوامل مهمی چون، محتوای اولیه ریزدانه - ها، دبی ورودی محصول به سیلو و قطر لوله پرکننده سیلو در یک محیط آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. یک رویکرد جدید برای اندازه‌گیری ریزدانه‌ها در امتداد شعاع و ارتفاع سیلو ارائه گردید. به کمک این روش، نمونه‌گیری بدون برهمزنی مواد در منطقه نمونه برداری انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در آنالیزهای سه بعدی فرآیند پر شدن سیلو، میزان BC_I تقریباً میانگین وزنی از مقادیر BC_L نقاط نمونه برداری است که در طول شعاع سیلو اندازه‌گیری می‌شود. مشخص شد که با افزایش میزان محتوای اولیه ریزدانه‌ها، دبی ورودی محصول و قطر لوله پرکننده سیلو، میزان یکنواختی پخش ریزدانه‌ها افزایش می‌یابد. با در نظر گرفتن عوامل عوامل یاد شده، پخش ریزدانه‌ها با استفاده از یک مدل ریاضی شبیه‌سازی گردید که نتایج بدست آمده از شاخص‌های آماری حاکی از کیفیت بالای مدل بود. آزمایش‌ها نشان داد که تمرکز قابل توجه ریزدانه‌ها در مرکز سیلوها رخ می‌دهد و این تمرکز با افزایش Z بیشتر می‌شود. کمترین میزان تمرکز ریزدانه‌ها به قسمتهای نزدیک به دیواره سیلوهاست به خصوص در سطوح بالاتر Z . این بدان معنی است که حداکثر غیر یکنواختی در پخش ریزدانه‌ها در سطوح بالاتر Z رخ می‌دهد.

منابع

1. ASABE. 2008. Moisture measurement- Unground grain and seeds. ASABE S352.2. St. Joseph, Michigan, USA: American Society of Agricultural and Biological Engineers.
2. Bartosik, R. E., and D. E. Maier. 2006. Effect of airflow distribution on the performance of NA/LT in-bin drying of corn. Transactions of the ASABE 49(4): 1095-1104.
3. Combarros, M. G., H. J. Feise, S. Strege, and A. Kwade. 2016. Segregation in heaps and silos: Comparison between experiment, simulation and continuum model. Powder Technology 293: 26-36.
4. Engblom, N., H. Saxen, R. Zevenhoven, H. Nylander, and G. G. Enstad. 2012. Segregation of powder mixtures at filling and complete discharge of silos. Powder Technology 215-216: 104-116.

5. Fan, Y., K. V. Jacob, B. Freireich, and R. M. Lueptow. 2017. Segregation of granular materials in bounded heap flow: A review. *Powder Technology*: 312, 67–88.
6. Fan, Y., P. B. Umbanhowar, J. M. Ottino, and R. M. Lueptow. 2013. Kinematics of monodisperse and bidisperse granular flows in quasi-two-dimensional bounded heaps. *Proceedings of The Royal Society A*, 469, 20130235.
7. Fan, Y., Y. Boukerkour, T. Blanc, P. B. Umbanhowar, J. M. Ottino, and R. M. Lueptow. 2012. Stratification, segregation, and mixing granular materials in quasi-two-dimensional bounded heaps. *Physical Review E* 86, 051305.
8. Jayas, D. S., S. Sokhansanj, E. B. Moyseyand E. M. Barber. 1987. Distribution of foreign material in canola bins using a spreader or spout. *Canadian Agricultural Engineering* 29: 183-188.
9. Noyes, R., S. Navarro, and D. Armitage. 2002. Supplemental aeration systems. PP 413-488 in S. Navarro, & R. Noyes eds. *The mechanics and physics of modern grain aeration management*. Boca Raton: CRC Press.
10. Schulze, D. 2008. *Powders and Bulk Solids - Behaviour, Characterization, Storage and Flow* (chapter 13). Springer. Verlag Berlin Heidelberg.
11. Shinohara, K., B. Golman, and T. Nakata. 2001. Size segregation of multicomponent particles during the filling of a hopper, *Advanced Powder Technology* 10(1): 333-343
12. SPSS. (2012). *SPSS/PC for IBM PC/XT, Version 1.10*. SPSS Inc., Chicago, IL, USA,
13. Stephens, L. E., and G. H. Foster. 1976. Grain bulk properties as affected by mechanical grain spreaders, *Transactions of ASAE* 19(2): 354–358.
14. Strohshine, R. 2004. *Physical properties of agricultural materials and food products* (Chapter 2). West Lafayette, Indiana.
15. USDA. 2013. *Grain inspection handbook*. Book II. Chapter 4. Corn. U.S. Department of Agriculture, Grain inspection, Packers and Stockyards Administration, Federal Grain Inspection Service.

Investigation of Fine distribution in a pilot-scale grain silo

Dariush Zare^{1*}, Arash Nourmohamadi-Moghadami¹

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

Abstract

During filling a silo, granular material containing a range of particle sizes, the fine material accumulates under the filling point. In the present study an experimental setup consist of a main container, elevator, trapezoidal container and experimental silo was designed and built. By applying a new approach, sampling was performed in radial and vertical direction. Local BCFM (BCL) was defined as the value of BCFM in each sampling point. Influential parameters namely, initial BCFM (BCI), volume flow rate (Q) and fill pipe diameter (DF) were considered as treatments. Non-linear regression technique was applied on the experimental data to predict the distribution pattern of fines into the pilot scale silo. The appropriate model was developed based on highest value of R^2 and least value of χ^2 , RMSE and MRDM. There was a good agreement between experimental data and developed model for fine material distribution.



سیزدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک
بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران
(مکانیک بیوسیستم ۱۴۰۰)
۲۶-۲۴ شهریور ۱۴۰۰



Key words: *Fine distribution, Material flow, Filling Method, Grain Silo*

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