

بررسی خواص فیزیکی دانه و بستر لیموترش به عنوان تابعی از رطوبت

حامد دارابی^۱ - علی زمردیان^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۸/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۳/۲

چکیده

لیموترش یکی از مهمترین اقلام مصرفی به صورت تر و خشک می‌باشد. خشک کردن، درجه بندی و انبارداری از مهمترین مراحل پس از برداشت است که برای انجام مراحل فوق آگاهی از خواص فیزیکی این محصول ضروری می‌باشد. در این تحقیق اثر پنج سطح رطوبتی (۸۴٪، ۶۴٪، ۴۴٪، ۲۴٪ و ۱۰٪ بر پایه تر) رطوبت بر روی ابعاد، کرویت، میانگین هندسی قطرها و جرم حجمی واقعی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین جرم حجمی توده‌ای و تخلخل در سه چیدمان مختلف (A, B, و تصادفی) ارزیابی شد. آزمایشات افت فشار به دو صورت انجام گرفت، آزمایش اول افت فشار در بستر لیموترش در ارتفاع ۱ متر در حالت پر کردن تصادفی در ۴ عمق بستر (۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰) سانتیمتر، ۴ دمای هوای عبوری (۲۵، ۳۵، ۴۵، ۵۰) درجه سانتیگراد و ۱۱ سرعت عبور جریان هوا ($m^3 m^{-2} s^{-1}$) (۱/۱-۰/۱) مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش دوم به منظور ارزیابی افت فشار در حالت لایه نازک لیموترش در ۵ سطح رطوبتی (۸۴، ۶۴، ۴۴، ۲۴، ۱۰) درصد، ۳ طرز قرارگیری (A, B, و تصادفی) و ۱۱ سرعت عبور جریان هوا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج خواص فیزیکی نشان داد کلیه پارامترهای ذکر شده با کاهش رطوبت، کاهش پیدا کردند. همچنین مشاهده شد با افزایش عمق بستر و سرعت جریان هوا، افت فشار افزایش می‌یابد. دما در این آزمایش اثر معنی داری بر روی افت فشار نداشت. در حالت لایه نازک مشاهده شد با کاهش رطوبت، افت فشار کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد چیدمان B اثر افزایشی بیشتری بر روی افت فشار نسبت به دو چیدمان دیگر داشته است. برای پیش بینی افت فشار در بین مدل‌های ریاضی مدل ارگان به عنوان بهترین مدل (با بیشترین R^2 و کمترین RMSE) برای تبیین رابطه سرعت جریان هوا و افت فشار در بستر لیموترش انتخاب شد.

واژه های کلیدی: لیموترش، افت فشار، مدل ریاضی، خواص فیزیکی

مقدمه

لیموترش یا به اختصار لیمو با نام علمی *Citrus Aurantifolia*، میوه درخت لیمو و از مرکبات است. درخت لیمو ترش درختچه‌ای است که ارتفاع آن به ۴ متر می‌رسد و کشت آن فقط در مناطق گرمسیری (آب و هوای مدیترانه‌ای) امکان دارد. بر طبق آمار سال ۲۰۰۷ کشورهای برزیل، چین، آمریکا، مکزیک و هند به ترتیب مقام‌های اول تا پنجم تولید لیموترش جهان را دارا هستند. ایران با تولید سالانه ۶۱۵۰۰۰ تن لیمو ترش در سال مقام نهم تولید جهانی را داراست (FAO, 2007). ابعاد مشخصه، جرم حجمی توده‌ای

(ظاهری)^۳، جرم حجمی واقعی (دانه‌ای)^۴، کرویت^۵، میانگین هندسی قطرها^۶، تخلخل^۷ و افت فشار^۸ از مهمترین خواصی هستند که در طراحی مکانیزم‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. اندازه‌گیری دقیق و سریع خصوصیات هندسی در هنگام فرآوری محصولات کشاورزی، طراحی دستگاه‌های حمل و نقل، فرآیند نگهداری و همچنین دستیابی به محصولی با کیفیت بالا بسیار حائز اهمیت است. Marenya و Agullo در سال ۲۰۰۵ با انجام آزمایشاتی بر روی دانه‌های قهوه و استفاده از مدل‌های شد^۹، هوکیل و ایوز^{۱۰} و یک مدل

3 - Bulk density

4- Particle density

5 - Sphericity

6 - Geometric mean diameter, GMD

7 - Porosity

8 - Pressure drop

9 - Shedd

10 - Hukill & Ives

۱ و ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد و استاد گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

(Email: zomorod@shiraz.ac.ir

*) نویسنده مسئول:

به صورت کلی اهداف این پژوهش عبارت بودند از:

- ۱- اندازه‌گیری ابعاد، کرویت، میانگین هندسی قطرها و جرم حجمی واقعی لیموترش در پنج سطح رطوبتی.
- ۲- اندازه‌گیری جرم حجمی توده‌ای و تخلخل در سه چیدمان مختلف توده لیموترش در پنج سطح رطوبتی.
- ۳- اندازه‌گیری افت فشار در چهار عمق بستر (۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتیمتر) در حالت پر کردن تصادفی، چهار دمای هوای ورودی (۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۰ درجه سانتیگراد) و ۱۱ سرعت عبور جریان هوا (ms^{-1}) (۰/۱ - ۱/۱).
- ۴- اندازه‌گیری افت فشار در حالت لایه نازک در پنج سطح رطوبتی (۱۰، ۱۴، ۱۴، ۴۴، ۶۴، ۸۴ درصد بر پایه تر)، سه چیدمان (شکل ۱) و ۱۱ سرعت جریان هوا (ms^{-1}) (۰/۱ - ۱/۱).
- ۵- انتخاب مدل ریاضی مناسب از بین مدل‌های موجود برای پیش بینی رابطه افت فشار در بستر لیمو، چیدمان و سرعت جریان هوا.

مواد و روش‌ها

لیموترش که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت محصول سال ۱۳۹۰ شهرستان چهارم استان فارس بود. رطوبت اولیه لیموترش به طور متوسط ۸۴ درصد بر پایه تر اندازه‌گیری شد (S353 (ASABE)). به منظور اندازه‌گیری ابعاد، جرم حجمی واقعی و کرویت ۵۰ عدد لیمو تر به طور تصادفی انتخاب گردید. پس از شماره گذاری در هریک از پنج سطح رطوبتی ۸۴، ۶۴، ۴۴، ۲۴ و ۱۰ درصد، سه بعد اصلی، طول (L)، عرض (W) و ارتفاع (H) با کولیسی با دقت ۰/۰۵ میلی‌متر (مدل Mitutoyo ساخت ژاپن) اندازه‌گیری شد. میانگین هندسی قطرها (GMD) و کرویت با استفاده از معادله‌های زیر بدست آمدند (Mohsenin, 1996):

$$GMD = (LWH)^{\frac{1}{3}} \quad (۴)$$

$$\phi = \frac{(LWH)^{\frac{1}{3}}}{L} \times 100 \quad (۵)$$

برای اندازه‌گیری تخلخل، اندازه‌گیری جرم حجمی توده‌ای و جرم حجمی واقعی در هر کدام از سطوح رطوبتی ضروری است. جرم حجمی واقعی عبارتست از جرم در واحد حجم هر لیمو، که به روش جابجایی مایع اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری جرم حجمی واقعی از تولوئن (C_7H_8) به عنوان مایع جابجا شونده استفاده گردید (Mohsenin, 1996). با توجه به اینکه کدام مقطع لیمو روبه روی جریان هوا قرار گیرد، مقاومت متفاوتی در برابر عبور هوا ایجاد می‌شود، سه چیدمان مختلف ایجاد گردید. جرم حجمی توده‌ای برای سه چیدمان مختلف اندازه‌گیری شد (شکل ۱). برای اندازه‌گیری از

تجربی برای بیان رابطه بین سرعت هوا و افت فشار ارائه کردند. آنها خاطر نشان کردند که این رابطه تحت اثر محتوای رطوبتی و چگالی ظاهری بستر است. در پژوهش‌های مشابه بر روی بذر خشک‌شاخ و پسته اوحدی مشخص شد که افزایش رطوبت موجب افزایش قطر میانگین و افت فشار می‌شود (Sacilik, 2001, Kashaninejad & Tabi, 2009).

Amanlou و Zomorodian در سال ۲۰۱۱ با اندازه‌گیری خواص فیزیکی انجیر سبز استهبان مشاهده کردند با افزایش رطوبت ابعاد، کرویت، میانگین هندسی قطرها و جرم حجمی واقعی افزایش پیدا می‌کند. همچنین افزایش رطوبت موجب افزایش افت فشار گردید. مدل‌های بسیاری برای تبیین رابطه سرعت هوا و افت فشار وجود دارد. از این میان قدیمی ترین و مشهورترین مدل مربوط به شد است که به صورت زیر ارائه شده است (Shedd, 1951 & 1953):

$$Q = A_1 (\Delta P)^{B_1} \quad (۱)$$

که در آن Q نمایانگر سرعت عبور جریان هوا ($m^3 s^{-1} m^{-2}$)، ΔP افت فشار $Pa \ m^{-1}$ و A_1 و B_1 ثابت‌های مربوط به نوع محصول می‌باشد. استفاده از مدل شد به دامنه باریکی از نرخ جریان هوا ($m^3 s^{-1} m^{-2}$) (۰/۰۰۵-۰/۳) محدود می‌شود. ضرایب ثابت مدل (A_1 و B_1) در یک بستر مشخص به محتوای رطوبتی و جرم حجمی ظاهری آن بستگی دارد. محققان بسیاری از مدل شد برای پیش بینی افت فشار در بستر محصولاتی همچون پسته، عدس و لوبیا استفاده کردند (Sokhansanj et al., 1990 Jekayinfa, 2006; Kashaninejad & Tabil, 2009).

Ives و Hukill در سال ۱۹۵۵ مدل اصلاح شده شد را به شکل ذیل ارائه کردند (Hukill & Ives, 1955):

$$\Delta P = \frac{A_2 Q^2}{Ln(1 + B_2 Q)} \quad (۲)$$

که در آن A_2 و B_2 ثابت‌های مدل مربوط به نوع محصول می‌باشد. سومین مدل متداول مدل تجربی ارگان^۱ است. ارگان برای مطالعه رابطه افت فشار به سرعت جریان هوا از اصول دینامیک سیالات کمک گرفته است (Ergun, 1952). مدل ارگان به صورت زیر می‌باشد:

$$\Delta P = A_3 Q + B_3 Q^2 \quad (۳)$$

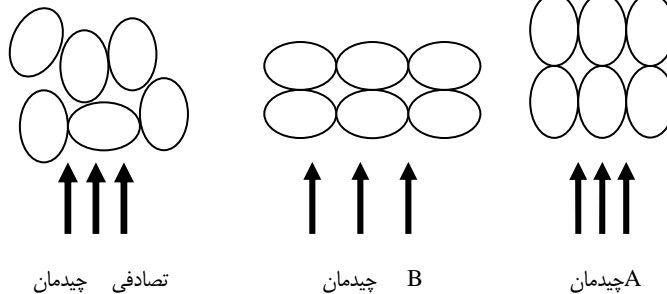
که در آن A_3 و B_3 ثابت‌های مدل وابسته به نوع محصول می‌باشد. گزارش شده است مدل ارگان در مقایسه با مدل هوکیل و ایوز نتایج بهتری را نشان داده است و نتایج هردو این‌ها بهتر از مدل شد بوده است (Pettersen et al., 1971; Madamba et al., 1994; Giner & Denisienia, 1996).

قطر داخلی ۴۰ سانتیمتر بود. به منظور نگهداری لیموها از یک قطعه طوری گالوانیزه استفاده شد که به صورت کشیده در داخل مخزن نصب شده بود. استوانه نگهداری لیمو به فواصل ۲۵ سانتیمتر به منظور اندازه‌گیری افت فشار سوراخ کاری شده بود. جهت اندازه‌گیری افت فشار از یک مانومتر با دقت $1 \text{ mmH}_2\text{O}$ استفاده شد (کارخانه Tecequipment کشور انگلستان). برای اندازه‌گیری سرعت هوا از یک دستگاه سرعت سنج هوا با سیم داغ استفاده شد (ساخت کارخانه Lutron کشور تایوان). این دستگاه قادر است سرعت هوا را در نقطه مورد نظر با دقت 0.1 (m/s) اندازه‌گیری نماید. برای ایجاد سرعت‌های متفاوت هوا در آزمایش‌های افت فشار از یک مبدل ولتاژ استفاده شد.

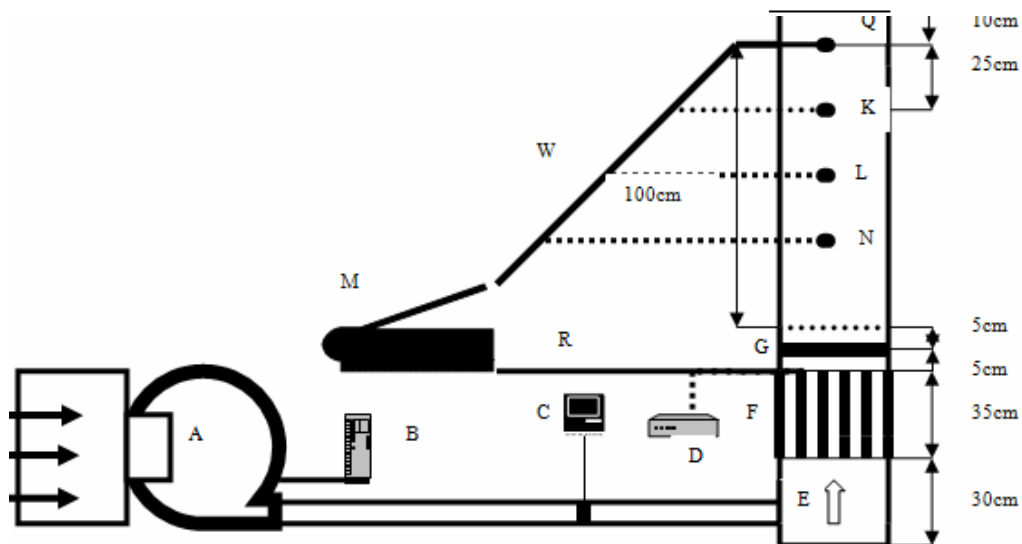
ظرف استوانه‌ای با وزن (۵۰ گرم) و حجم 500 cc استفاده شد. لیموها بدون فشردگی در این ظرف با دو آرایش مختلف و همچنین یک حالت تصادفی ریخته شد و هر آزمایش در سه تکرار انجام شد. از تقسیم جرم لیمو بر حجم مشخص ظرف در هر یک از سه حالت پرشدگی ظرف جرم حجمی مربوط به آن حالت خاص محاسبه شد (Pabis et al., 1998). با محاسبه مقادیر جرم حجمی توده‌ای واقعی، تخلخل با استفاده از فرمول زیر محاسبه گردید (Mohsenin, 1996):

$$\varepsilon = \frac{\rho_t - \rho_b}{\rho_t} \times 100 \quad (6)$$

برای اندازه‌گیری افت فشار دستگاه آزمایشی مطابق شکل ۲ در بخش مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه شیراز طراحی و بهینه سازی شد. مخزن نگهداری لیموترش استوانه‌ای به ارتفاع $1/15$ متر و



شکل ۱- سه طرز قرارگیری لیموترش در اندازه‌گیری افت فشار



شکل ۲- شماتیک دستگاه اندازه‌گیری افت فشار. A فن و کانال ورودی، B مبدل ولتاژ، C سرعت سنج، D ترموستات، E ورودی هوا، F یکنواخت کننده هوا، G توری گالوانیزه، K، L، N و Q محل‌های سوراخ کاری شده، M مانومتر، W و R لوله‌های وصل شده به مانومتر

مدل معروف افت فشار (شد، هوکیل و ایوز و ارگان) به داده‌های حاصل از آزمایش افت فشار با استفاده از رگرسیون غیر خطی (SPSS 2006, 16) برازش شده است.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از اندازه‌گیری سه بعد اصلی، کرویت، میانگین هندسی قطرها و جرم حجمی واقعی در جدول ۱ و جرم حجمی توده‌ای و تخلخل در سه چیدمان مختلف در جدول ۲ آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود با کاهش رطوبت لیمو، ابعاد و میانگین هندسی قطرها کاهش ولی کرویت افزایش یافته است. افزایش کرویت نشان می‌دهد که با کاهش رطوبت شکل لیموترش به دلیل کاهش ابعاد که موجب کاهش میانگین هندسی قطرها نیز شده است، به کره نزدیکتر می‌شود. کاهش رطوبت موجب کاهش جرم حجمی توده‌ای شده است زیرا با کاهش رطوبت، جرم میوه در واحد حجم یافته است. در نتیجه این کاهش، تخلخل افزایش می‌یابد.

بهترین مکان برای قرائت سرعت هوا حد میانه لوله ورودی هوا از فن به مخزن می‌باشد زیرا این مکان ۸ برابر قطر داخلی لوله از محل اتصالات هد است بنابراین طبق استاندارد ISO 5167-1980E در میانه لوله دستگاه اندازه‌گیری سرعت هوا با اغتشاش ناشی از فن و محل اتصالات لوله ورود هوا به مخزن به اندازه کافی فاصله دارد. برای قرائت افت فشار در هر سرعت عبور هوای مشخص، ابتدا به کمک میدل^۱ ولتاژ و دستگاه سرعت سنخ هوا، سرعت جریان هوا تنظیم می‌شود و سپس افت فشار متناظر با سرعت جریان هوای تنظیم شده قرائت گردید. در آزمایش اول که مربوط به توده لیمو بود، مخزن به چهار قسمت تقسیم شده و پس از اتمام اندازه‌گیری افت فشار، در عمق‌های بعدی مخزن بعدی اضافه می‌شد. با توجه به اینکه نسبت قطر متوسط دانه لیمو و قطر مخزن بیشتر از ۱۰ بود، بنابراین اثر دیواره‌ای قابل اغماض بوده است (Amanlou and Zomorodian, 2011). در آزمایش دوم که در حالت لایه نازک صورت گرفت دو سوراخ در فاصله های ۳ و ۶ سانتیمتری از توری گالوانیزه برای اندازه‌گیری افت فشار ایجاد شد. در مطالعه حاضر سه

جدول ۱- خواص فیزیکی لیمو ترش

رطوبت (%)	طول (mm)	عرض (W)	ارتفاع (H)	کرویت (%)	میانگین هندسی قطرها (mm)	جرم حجمی واقعی (g.cm ⁻³)
۸۴	۴۰/۲۸	۳۳/۶۲	۵۲/۳۳	۸۸۶/۰	۶۷/۳۵	۰/۳۸
۶۴	۳۶/۴۲	۳۱/۷۲	۸۵/۳۱	۹۱۳/۰	۲۶/۳۳	۰/۶۹
۴۴	۳۱/۸۱	۳۰/۲۱	۲۹/۲۹	۹۱۸/۰	۰۴/۳۱	۰/۴۸۶
۲۴	۳۱/۱۰	۲۹/۴۲	۶۱/۲۷	۹۴/۰	۳۴/۲۹	۰/۲۴۹
۱۰	۳۰/۲۶	۲۸/۵۶	۲۰/۲۶	۹۳۴/۰	۲۹/۲۸	۰/۲۳۸

جدول ۲- خواص فیزیکی لیموترش (توده‌ای)

رطوبت (%)	چیدمان	جرم حجمی توده‌ای (g.cm ⁻³)	تخلخل، %
	A	۰/۵۴۰	۰/۴۷۰
۸۴	B	۰/۵۷۰	۰/۴۵۰
	تصادفی	۰/۵۴۰	۰/۴۷۰
	A	۰/۳۵۰	۰/۴۹۸
۶۴	B	۰/۳۷۰	۰/۴۹۸
	تصادفی	۰/۳۴۰	۰/۵۱۲
	A	۰/۲۴۰	۰/۵۰۶
۴۴	B	۰/۲۵۰	۰/۴۸۵
	تصادفی	۰/۲۳۰	۰/۵۲۶
	A	۰/۱۱۸	۰/۵۲۶
۲۴	B	۰/۱۲۶	۰/۴۹۴
	تصادفی	۰/۱۱۵	۰/۵۳۸
	A	۰/۱۱۳	۰/۵۲۴
۱۰	B	۰/۱۲۴	۰/۴۷۹
	تصادفی	۰/۱۰۹	۰/۵۴۲

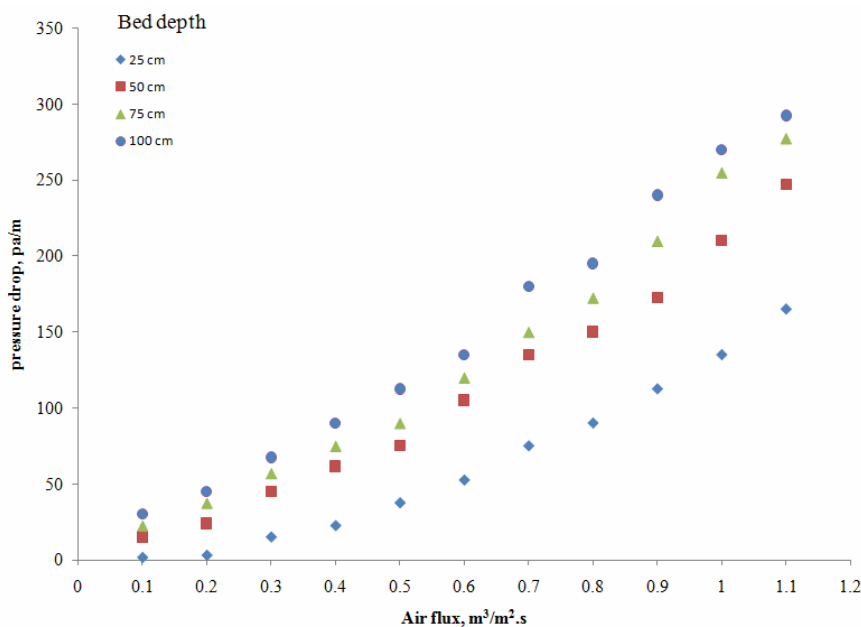
نتایج آنالیز آماری در جدول ۳ نشان می‌دهند که تیمارهای سرعت عبور جریان هوا و عمق بستر لیموها اثر معنی داری بر روی افت فشار دارد اما تغییرات دمای هوای ورودی بر روی افت فشار در بستر لیمو معنی دار نبوده است به همین دلیل در آزمایش بعدی مورد بررسی قرار نگرفت. با افزایش عمق بستر به دلیل افزایش دانسیته توده و کاهش تخلخل، افت فشار افزایش پیدا کرد. در آزمایش دوم اثر ۵ سطح رطوبتی (۱۰، ۲۴، ۴۴، ۶۴ و ۸۴) درصد بر پایه تر، سه طرز قرارگیری و ۱۱ سرعت عبور جریان هوا (۰/۱-۱/۱) مورد تحقیق قرار گرفت. جدول ۴ نشانگر نتایج آماری بدست آمده است.

نتایج مربوط به اثر چیدمان در جدول ۲ نشان می‌دهد که در یک رطوبت ثابت بیشترین جرم حجمی توده‌های و کمترین تخلخل مربوط به چیدمان B است، زیرا در این چیدمان لیموها بسیار نزدیک به هم قرار گرفته اند که این امر باعث کاهش کانال‌های هوا در داخل توده لیمو شده است. در آزمایش‌های مربوط به افت فشار در بستر لیمو (چیدمان تصادفی) اثر ۴ عمق بستر (۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰) سانتیمتر، ۴ دمای هوا (۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۰) درجه سلیسیوس و ۱۱ سرعت عبور جریان هوا (۰/۱-۱/۱) اندازه‌گیری شد (شکل ۳). جدول ۳ نتایج آنالیز آماری این تیمارها آورده شده است.

جدول ۳- جدول تجزیه واریانس تیمارهای سرعت جریان هوا، عمق بستر و دما و اثر متقابل آن‌ها بر افت فشار

متغیرها	درجه آزادی	RMSE	مقدار F
نرخ جریان هوا (A)	۱۰	۱۳۸۵۸۹۶/۳۵۹	**۳۳۸۵
عمق بستر (B)	۳	۱۸۰۶۸۲/۲۱۰	**۱۴۷۱
دما (C)	۳	۴۳۰/۵۶۲	ns ^۳ /۵۰۰
A*B	۳۰	۴۲۴۲۶/۶۱۸	ns ^{۳۴} /۵۴۳
A*C	۳۰	۲۱۳/۵۵۸	ns ^۰ /۱۱۷۴
A*B*C	۹۰	۶۱۹/۲۵۳	ns ^۰ /۱۶۸
B*C	۹	۳۱۰/۰۶۵	ns ^۰ /۸۴۱
خطا	۳۵۲	۱۴۴۱۱/۱۶۷	

** - معنی دار در سطح ۱٪ - ns - غیر معنی دار



شکل ۳- اثر تغییرات عمق بستر (۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰) سانتیمتر و سرعت عبور جریان هوا بر روی افت فشار

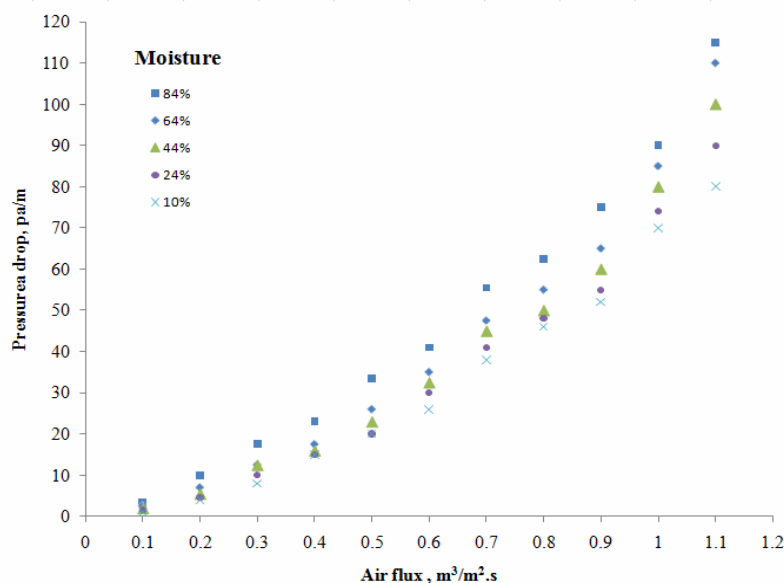
جدول ۴- جدول تجزیه واریانس تیمارهای سرعت جریان هوا، رطوبت، چیدمان و عمق بستر و اثر متقابل آن‌ها بر افت فشار

متغیر	درجه آزادی	RMSE	مقدار F
سرعت جریان هوا (A)	۱۰	۶۵۲۹۱۸/۴۳۲	** ۸۲۹/۰۱۳
رطوبت (B)	۴	۱۰۰۹۸/۴۷۱	** ۳۲/۰۵۵
چیدمان (C)	۲	۱۶۵۸۳/۲۴۹	** ۱۰۵/۲۷۹
عمق بستر (D)	۱	۲۰۱۷۸۷/۸۳۴	** ۲۵۶۲
A*B	۴۰	۶۸۸۹/۴۲۴	ns ۲/۱۷۸
A*C	۲۰	۳۶۳۱/۴۵۱	ns ۲/۳۰۵
A*D	۱۰	۶۱۷۳۲/۵۹۹	ns ۷۸/۳۰۲
خطا	۳۳۰	۷۱۰۴۰/۱۷۲	

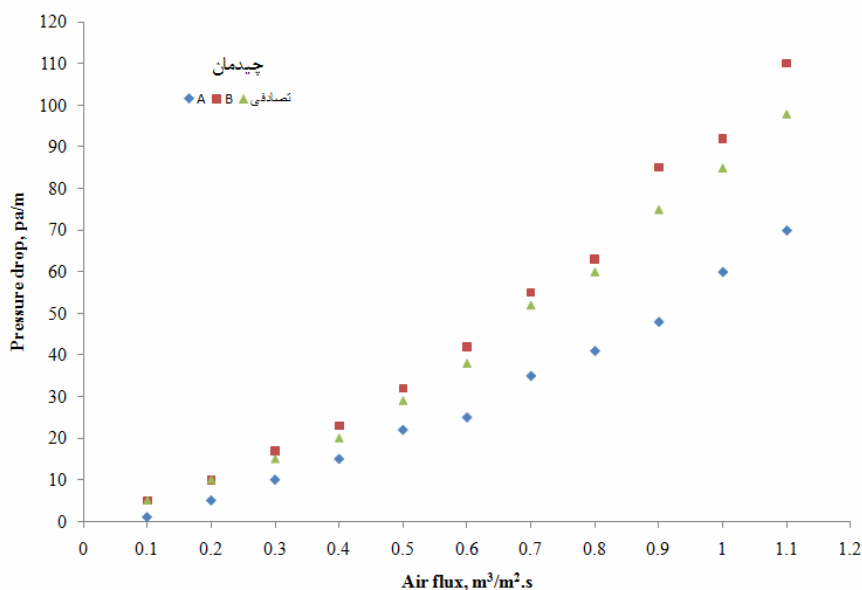
** - معنی دار در سطح ۱٪ - ns - غیر معنی دار

برای انتخاب بهترین مدل ریاضی برای تخمین افت فشار در بستر لیموترش سه مدل معروف شد، هوکیل-ایوز و ارگان استفاده شدند. ضرایب بدست آمده از هریک از مدل‌ها برای آزمایش اول در عمق بستر و آزمایش دوم در سطوح رطوبتی مختلف در جدول‌های ۵ تا ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود برای هر سه سطح رطوبت بهترین مدل که دارای بیشترین مقدار R^2 بوده مدل ارگان می‌باشد.

نتایج نشان می‌دهند که همه تیمارهای ذکر شده اثر معنی داری بر روی افت فشار داشته است. در این آزمایش مشاهده شد با کاهش رطوبت نمونه‌ها افت فشار بدلیل کاهش دانسیته توده و افزایش تخلخل کاهش پیدا کرده است (شکل ۵). نتایج مشابه توسط محققان دیگر برای محصولات مختلف کشاورزی بدست آمده است (Sokhansanj و همکاران در سال ۱۹۹۰ بر روی عدس، Kashaninejad و Tabil در سال ۲۰۰۹ بر روی پسته، Amanlou و Zomorodian در سال ۲۰۱۱ بر روی انجیر).



شکل ۵- اثر رطوبت (۱۰، ۲۴، ۴۴، ۶۴ و ۸۴) درصد و سرعت عبور جریان هوا بر روی افت فشار



شکل ۶- اثر سه چیدمان بر روی افت فشار

جدول ۵- ضرایب بدست آمده برای مدل شد

عمق بستر	A ₁	B ₁	F	R ²	RMSE
۲۵	۰/۰۸۰	۰/۵۵۹	۳۵۵۷/۱۵	۰/۹۹۷	۴۳/۷۹۰
۵۰	۰/۰۲۶	۰/۷۲۱	۱۵۹۹/۶۰	۰/۹۹۰	۳۱۴/۲۹۱
۷۵	۰/۰۲۹	۰/۷۱۶	۱۵۵۹/۲۷	۰/۹۹۰	۲۴۶/۷۰۷
۱۰۰	۰/۰۱۳	۰/۸۴۱	۳۱۳۹/۷۸	۰/۹۹۴	۲۱۲/۱۳۹

جدول ۶- ضرایب بدست آمده برای مدل هوکیل و ایوز

عمق بستر	A ₂	B ₂	F	R ²	RMSE
۲۵	۴۷۱/۹۶۵	۱۷۰/۹۵۴	۳۴۲۶/۰۲۲	۰/۹۹۷	۴۵/۴۶۴
۵۰	۲۱۰/۵۸۲	۲/۷۸۷	۲۲۵۹/۶۳	۰/۹۹۳	۲۲۲/۶۶۹
۷۵	۱۶۱/۰۵۱	۲/۹۷۲	۲۰۴۷/۱۶	۰/۹۹۳	۱۸۵/۶۰۱
۱۰۰	۱۱۰/۳۷۵	۰/۸۶۴	۴۵۶۸/۱۸	۰/۹۹۶	۱۴۵/۸۷۰

جدول ۷- ضرایب بدست آمده برای مدل ارگان

عمق بستر	A ₃	B ₃	F	R ²	RMSE
۲۵	۱۳/۶۵۲	۷۸/۰۹۲	۲۹۳۷/۴۴	۰/۹۹۶	۵۳/۰۱۹
۵۰	۸۲/۱۴۳	۷۶/۱۶۱	۲۴۹۰/۳۵	۰/۹۹۴	۲۰۲/۰۷۹
۷۵	۷۰/۳۸۸	۶۸/۲۷۱	۲۳۱۱/۳۴	۰/۹۹۳	۱۶۶/۵۸۸
۱۰۰	۱۲۹/۸۷۸	۴۷۹/۰۴۷	۴۷۱۴/۹۰	۰/۹۹۶	۱۴۱/۳۳۴

جدول ۸- ضرایب مدل شد

محتوای رطوبتی	A ₁	B ₁	F	R ²	RMSE
۸۴	۰/۰۷۲	۰/۵۹۶	۶۰۴۴/۳۳	۰/۹۹۸	۲۱/۴۹۲
۶۴	۰/۰۳۰	۰/۷۳۷	۱۸۱۲/۶۴	۰/۹۹۱	۱۵۲/۲۹۲
۴۴	۰/۰۳۳	۰/۷۱۳	۱۳۷۸/۲۲	۰/۹۸۹	۲۱۴/۹۸۸
۲۴	۰/۰۲۶	۰/۷۶۲	۱۷۸۸/۰۳	۰/۹۹۱	۱۶۱/۸۵۳
۱۰	۰/۰۶۰	۰/۶۳۶	۲۱۲۸/۰۳	۰/۹۹۴	۵۹/۹۸۷

جدول ۹- ضرایب مدل هوکیل و ایوز

محتوای رطوبتی	A ₂	B ₂	F	R ²	RMSE
۸۴	۲۷۴/۱۶۸	۲۶/۲۸۱	۵۷۶۱/۸۱	-/۹۹۸	۲۲/۵۴۸
۶۴	۱۴۱/۹۰۶	۲/۳۷۰	۲۸۷۰/۳۸	-/۹۹۴	۹۶/۲۶۰
۴۴	۱۷۰/۳۳۳	۳/۰۵۶	۱۹۳۳/۱۱	-/۹۹۲	۱۵۳/۴۲۵
۲۴	۱۲۴/۹۶۵	۱/۸۶۰	۲۷۴۲/۱۰	-/۹۹۴	۱۰۵/۶۳۷
۱۰	۱۹۶/۳۶۸	۹/۸۳۴	۲۱۶۴/۷۸	-/۹۹۴	۶۰/۴۶۱

جدول ۱۰- ضرایب مدل ارگان

محتوای رطوبتی	A ₃	B ₃	F	R ²	RMSE
۸۴	۲۰/۵۲۴	۶۲/۵۲۲	۴۸۸۳/۶۹	-/۹۹۷	۲۶/۵۹۳
۶۴	۶۳/۹۳۷	۵۲/۹۸۰	۳۲۹۴/۴۷	-/۹۹۵	۸۳/۸۸۸
۴۴	۶۱/۰۱۵	۶۰/۷۹۳	۲۲۰۲/۳۸	-/۹۹۳	۱۳۴/۷۰۲
۲۴	۷۰/۴۲۴	۴۸/۶۲۳	۳۰۳۸/۱۴	-/۹۹۵	۹۵/۳۵۲
۱۰	۲۷/۹۸۸	۵۴/۴۳۷	۲۰۷۴/۷۱	-/۹۹۴	۶۳/۰۸۲

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش در ذیل آمده است:

ابعاد، میانگین هندسی قطرها، جرم حجمی واقعی، جرم حجمی توده‌ای با کاهش رطوبت کاهش می‌یابد. ولی تخلخل با کاهش رطوبت افزایش می‌یابد.

- افت فشار با افزایش عمق بستر لیمو و سرعت جریان هوای ورودی افزایش یافته است.

- سرعت عبور جریان هوا، محتوای رطوبتی، عمق بستر، طرز قرارگیری اثر معنی داری بر روی افت فشار داشته اند، اما تاثیر افزایش

سرعت ورودی بر روی افت فشار بیشتر است.

- با کاهش رطوبت از ۸۴ درصد بر پایه تر به ۱۰ درصد افت فشار کاهش پیدا کرد.

- طرز قرار گیری لیموها اثر معنی داری بر روی افت فشار دارد.

- هر سه مدل ذکر شده، شد، هوکیل و ایوز و ارگان به طور قابل قبولی برای پیش بینی مدل ریاضی افت فشار قابل کاربرد می‌باشند ولی مدل ارگان به عنوان بهترین مدل برای پیش بینی افت فشار انتخاب گردید.

منابع

- Amanlou, Y., Zomorodian, A., 2011, Evaluating Resistance to Air flow across a Green Fig Bed for Selecting an Appropriate Pressure Drop Prediction Equation. Food and bio products processing. 89, 157-162.
- Agullo, J. O., and Marenya M. O., 2005, 2. Airflow resistance of parchment Arabica coffee. Bio systems Engineering, 91 (2) , 149-156
- Al- yahya, S. A. & Moghazi, H. M., 1998, Static pressure drop through barley grain. CANADIAN Agricultural Engineering, 40 (2) , 213-217.
- Bern, C. J. & Charitym, L. F., 1975, Airflow resistance Characteristics of Corn as Influenced by Bulk Density. ASAE Paper No. 75-3510, ASAE: St- Joseph. MI.
- Ergun, S., 1952, Fluid flow through packed columns. Chemical Engineering Progress, 48, 89-94.
- Faghihi, H. & Sabet-sarvestani, J., 2002, Fig, planting, cultivating and harvesting. Rahgosha. (In Farsi). Food and Agriculture Organization., 2006, Biodiversity: Agricultural biodiversity in FAO. From <http://www.FAO.Org/statistics.Htm>.
- Giner, S. A. & Denisienia, E., 1996, Presure drop through wheat as affected by air velocity, moisture content and fines. Journal of Agricultural Engineering Research, 63, 73-86.
- Hukill, W. V. & Ives, N. C., 1955, Redial airflow resistance of grains. Agricultural Engineering, 35 (5) , 332-335.
- Jakayinfa, S. O., 2006, Effect of Airflow Rate, Moisture Content and Pressure Drop on the Airflow Resistance of Locust Bean Seed. Agriculture Engineering International. CIGR Ejournal. Vol. VIII. MAY. Joseph MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers, vol. 54.
- Kashaninejad, M., & Tabil, L. G., 2009, Resistance of bulk pistachio nuts (Ohadi variety) to airflow. Journal of Food Engineering, 90, 104-109.

Madamba, P. S., Driscoll, R. H., & Buckle, K. A., 1994, Bulk density, porosity and resistance to airflow of garlic slices. *Drying Technology*, 12 (4) , 937-954.

Mohsenin, N. N., 1996, *Physical Properties of Plant and Animal Materials*. Gordon and Breach Science Publishers, N. W, New York.

Pabis, S., Jayas, D. S. & Cenkowski S., 1998, *Grain drying: Theory and practice*. John Wiley & Sons.

Patterson, R. J., Bakker-Arkema, F. W. & Bickert, W. G., 1971, Static pressure-airflow relationships in packed beds of granular materials such as grain II. *Transactions of the ASAE* 14, 172-174. 178, 627-633.

Razavi, S. M. A., Pour-reza, A., Razavizadegan, S. H. & Hematian, A., 2008, Some physical properties, friction and aerodynamic for dry fig. 5 national Conference on Agricultural Machinery Engineering and Mechanization, Ferdowsi University (Mashhad). (In Farsi).

Sacilik, K., 2004, Resistance of bulk poppy seeds to airflow. *Biosystems Engineering*, 89 (4) , 435-443.

Shedd, C. K., 1951, Some new data on resistance of grains to airflow. *Agricultural Engineering*, 32, 493-495.

Shedd, C. K., 1953, Resistance of grain and seeds to airflow. *Agricultural Engineering*, 34 (9) , 616-619.

Sokhansanj, S. A., Falacinski, A. A., Sosulski, F. W., 1990, Lentils to airflow. *Transactions of the ASAE* 33 (4) , 1281-1285.