

اندازه‌گیری و مدل‌سازی مقاومت دو رقم سیب‌زمینی به عبور جریان هوا

فرزاد گودرزی*

استادیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران
تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۹/۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۵/۲۵

چکیده

میزان افت فشار استاتیک هوای در حال گذر از خلال توده محصولات کشاورزی یکی از داده‌های اساسی برای انتخاب دمنده مورد استفاده در سیستم‌های هوادهی یا خشک کردن آنها است. در این مطالعه با استفاده از یک دستگاه شبیه‌ساز که متشکل از بخش‌های کمپرسور هوا، دبی‌سنج جریان هوا، مخزن استوانه‌ای شکل و یک فشارسنج U شکل بود، میزان افت فشار استاتیک هوا در توده‌هایی از دو رقم سیب‌زمینی آگریا و مارفونا اندازه‌گیری و در قالب مدل ریاضی Shedd، روابط رگرسیونی آنها با سنج‌های عمق توده، ابعاد غده، درصد ناخالصی و درصد رطوبت توده تعریف شد. بر این اساس با افزایش سرعت جریان هوا، میزان افت فشار استاتیک هوا افزایش می‌یابد. با افزایش هر ۲۵ سانتیمتر به عمق توده محصولات سیب‌زمینی آگریا، مارفونا، افت فشار استاتیک به ترتیب ۱/۴۹ و ۱/۵۳ برابر می‌شود. با افزایش هر ۲ درصد خاک و دیگر ناخالصی‌های همراه توده محصول، میزان افت فشار هوا در توده سیب‌زمینی آگریا و مارفونا به ترتیب ۱/۳۶ و ۱/۳۳ برابر می‌شود. در دبی یکسان جریان، توده‌های سیب‌زمینی با محتوای رطوبت بالاتر، افت فشار استاتیک هوای کمتری را نشان می‌دهند. در شرایط یکسان، افت فشار هوا در توده سیب‌زمینی رقم آگریا ۴ تا ۶ درصد بیشتر از مارفونا است.

واژه‌های کلیدی

افت فشار استاتیک، رطوبت، سرعت جریان، سیب‌زمینی، عمق

مقدمه

سیستم‌های هوادهی محصولات کشاورزی که در فرایندهای سردکردن، انبارکردن و خشک کردن مورد استفاده قرار می‌گیرد، تعیین میزان مقاومت توده به عبور جریان هوا و انتخاب دمنده مناسب است (Bala, 2016; Cargill & Price, 1995). دمنده مهمترین بخش یک سیستم خشک‌کن یا هوادهی به حساب می‌آید. وظیفه آن عبور دادن هوا از مجرای موجود در لابلای ذرات متشکله توده

هدف اصلی از اجرای فرایندهای تکنیکی خشک‌کردن و تهویه محصولات کشاورزی بهبود پایداری و افزایش قابلیت ماندگاری آنها در طول مدت انبارداری است. زیرا محصول با رطوبت بالا و بدون تهویه هوای محل نگهداری، نمی‌تواند بدون صدمه و افت کیفیت برای مدت طولانی انبار شود. یکی از اصول اساسی در طراحی خشک‌کن‌ها و

رطوبت اثر معنی‌داری بر مقاومت به عبور جریان هوا داشته، و دانه‌های کوچک‌تر مقاومت بیشتری ایجاد می‌کنند. محققین مختلف به بررسی اثر جهت جریان بر مقاومت به عبور جریان هوا در محصولات مختلف پرداخته و نشان دادند که مقاومت در حالت افقی تا ۵۰٪ بیشتر از هنگامی است که جهت جریان عمودی باشد (Teixeira *et al.*, 2015; ABE Standards, 2007; Bern & Charity, 1998). شهبازی و رجبی‌پور (Shahbazi & Rajabipour, 2007) مقاومت توده سیب زمینی رقم آژاکس را برابر عبور جریان هوا اندازه‌گیری و نشان دادند که غده‌های بزرگ‌تر با وزن بیش از ۱۲۰ گرم نسبت به نمونه‌های با وزن کمتر از ۱۲۰ گرم تا ۴۱ درصد مقاومت کمتری ایجاد می‌کنند. لوپ و همکاران (Lope *et al.*, 2003) با بررسی مقاومت به عبور جریان هوا در چغندر قند دریافتند که مقاومت به عبور جریان هوا در غده‌های کوچک ۱/۹ برابر بیشتر از غده‌های بزرگ است. همچنین با تغییر الگوی جهت وزش جریان از حالت افقی به عمودی، افت فشار استاتیک ۸۳ درصد کمتر می‌شود. آدینات و همکاران (Adinath *et al.*, 2019) نشان دادند با افزایش شدت جریان هوا و عمق توده در حال هوادهی بر میزان افت فشار استاتیک هوا افزوده می‌شود. همچنین همانند سایر محصولات غده‌ای رابطه shedd مناسب‌ترین مدل برای بررسی و تخمین تغییرات افت فشار در توده پیاز است. میزان افت فشار جریان هوا در توده پیازهای درجه بندی شده نسبت به توده‌های درجه بندی نشده برای دو وضعیت افقی و عمودی جریان هوا به ترتیب ۴۳ و ۳۳ درصد بیشتر است.

محصول است. عبور هوا از این مجاری سبب می‌شود رطوبت، درجه حرارت و اکسیژن موجود در سراسر توده در سطح دلخواه باقی مانده و از بروز آسیب به محصول جلوگیری شود. هنگامی که هوا به درون توده محصول رانده می‌شود، باید از فضاهاى باریک و خلل و فرج بین ذرات عبور کند. در این هنگام، بین هوای در حال عبور و سطح خارجی ذرات اصطکاک پدید می‌آید. این اصطکاک، مقاومتی در برابر عبور هوا پدید می‌آورد. بدین سبب لازم است دمنده دارای چنان قدرتی باشد که بتواند بر مقاومت اصطکاکی موجود در مسیر، غلبه کند. از این نیرو به نام فشار استاتیکی یاد می‌شود (McCabe *et al.*, 2018).

در حقیقت میزان فشار استاتیکی توده محصول یکی از سنجه‌های اساسی در محاسبه قدرت مورد نیاز برای موتور دمنده است. تخمین قدرت دمنده بدون انجام محاسبات علمی، آسیب محصول تحت فرایند و یا مصرف بیش از نیاز انرژی توسط دمنده را در پی خواهد داشت.

سابقه مطالعه و تحقیق پیرامون مقاومت محصولات کشاورزی به عبور جریان هوا به ۷۰ سال قبل برمی‌گردد. یکی از نخستین مطالعات توسط استیرنیمن (Stirniman & Bates, 1931) روی برنج انجام شد. وی دانه‌های کوتاه برنج را مورد مطالعه قرار داد و رابطه افت فشار با سرعت جریان هوا و عمق محصول را برای این محصول به دست آورد. شد (Shedd, 1953) مقاومت به عبور جریان هوا را برای تعدادی از محصولات اندازه‌گیری و مدلی برای تعیین افت فشار هوا در این پروسه ارائه نمود. جکائینفا (Jekayinfa, 2006) اثر درصد رطوبت و اندازه دانه‌های لوبیا را بر مقاومت به عبور جریان هوا مورد مطالعه قرار داده و گزارش کرد که درصد

مواد و روش‌ها

در این مطالعه دو توده سیب‌زمینی رقم آگریا و مارفونا، مرکب از ۲۳ درصد غده‌های ریز (با قطر کمتر از ۵ سانتی‌متر)، ۵۳ درصد متوسط (با قطر ۵ تا ۸/۵ سانتی‌متر) و ۲۴ درصد غده‌های درشت (با قطر بیشتر از ۸/۵ سانتی‌متر) مورد بررسی قرار گرفت. برای اندازه‌گیری خواص بیوفیزیکی مورد نظر، از هر دسته ماده آزمایشی تعداد ۲۰ آزمون به شکل تصادفی انجام و میانگین آنها به عنوان عدد نهایی ویژگی مورد نظر لحاظ شد. سنجش رطوبت نمونه‌ها به روش گرمخانه و در دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس انجام شد (Horwits, 2000). درصد تخلخل توده توسط رابطه زیر محاسبه شد (Dobrzański & Rybczyński, 2014):

$$\%Pr = 100 \times ((\rho_a - \rho_i) / \rho_a) \quad (1)$$

که در آن،

Pr = نشانگر درصد تخلخل توده؛ ρ_a = متوسط جرم حجمی غده‌ها و ρ_i = معرف جرم حجمی توده سیب‌زمینی.

روش اندازه‌گیری افت فشار استاتیک:

برای سنجش افت فشار استاتیک جریان هوا حین عبور از خلال هر توده آزمایشی از دستگاهی که طرح آن در شکل ۱ نمایش داده شده است استفاده شد (Lope *et al.*, 2003; Bala, 2016; Audu *et al.*, 2018). در این دستگاه یک کمپرسور به قدرت ۱۰ اسب بخار هوای فشرده لازم برای آزمایش را تولید می‌کند. با عبور دادن هوا از یک روتامتر (ساخت شرکت آزمون متمم ایران با توانایی اندازه‌گیری دبی ۲۰ تا ۲۰۰۰ لیتر در دقیقه) و توسط

بر اساس نتایج مطالعات پیشین اگر میزان سطح سوراخ موجود در صفحه کف انباره که برای نگهداشتن محصول نصب می‌شود از ۴۰ درصد کل سطح صفحه بیشتر باشد، مقاومت این بخش در برابر عبور جریان تا حد زیادی کاهش و تقریباً قابل صرف نظر خواهد بود (Audu *et al.*, 2018; ABE Standards, 2007).

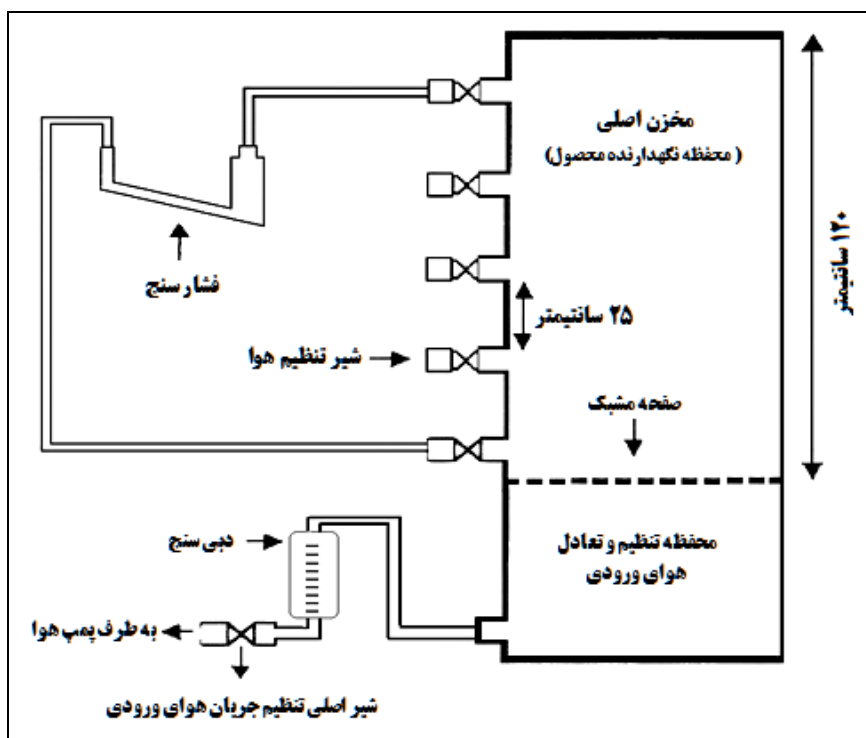
در محصولات کشاورزی فشار استاتیکی تابعی از ویژگی‌های محصول و هوای در حال گذر است. اندازه، درصد رطوبت، شکل ظاهری و خصوصیات سطح خارجی ذرات، درصد ناخالصی و مواد زائد موجود در توده و عمق آن از مهمترین ویژگی‌های محصول است که بر میزان افت فشار استاتیکی هوا مؤثر است. برای مثال وجود ۵ درصد ناخالصی در توده سیب‌زمینی انبار شده در جعبه، افت فشار استاتیک هوا را تقریباً ۲ برابر می‌کند (Olsen & Kleinkopf, 2020). ویژگی‌های اثرگذار هوای در حال گذر بر فشار استاتیکی نیز عبارتند از: سرعت، ویسکوزیته، درصد رطوبت، دانسیته و جهت جریان هوا؛ که در این بین عمق توده محصول، سرعت و جهت جریان هوا از بقیه موثرتر است (McCabe *et al.*, 2018; ABE Standards, 2007; Shmyryova, 2018).

از آنجا که حدود ۶۵ درصد از کل تولید حدود ۵ میلیون تنی سیب‌زمینی کشور در ابتدای فصل پاییز برداشت و راهی انبارهای نگهداری می‌شود (Anon, 2020) آگاهی از ویژگی‌های توده برای انتخاب و مدیریت بهینه سیستم تهویه این انبارها بسیار مهم است. بر این اساس در این مقاله به اندازه‌گیری میزان افت فشار هوا در توده سیب‌زمینی رقم آگریا و مارفونا و رابطه این افت با برخی خصوصیات فیزیکی مهم توده پرداخته شده است.

سنجش اثر درصد مواد خارجی همراه غده بر میزان افت فشار هوا از طریق افزودن مواد خارجی شامل خاک و خاشاک به میزان ۰، ۲، ۴ و ۶ درصد وزن خالص توده آزمایشی، به توده وارده به مخزن دستگاه اندازه گیری شد. اندازه گیری اثر عمق توده های آزمایشی بر مقاومت به عبور جریان هوا، در اعماق ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتی متری توده ها انجام گرفت. دو آزمون فوق برای هر دو نوع رقم سیبزمینی در شرایط یکسان شامل رطوبت نسبی (0.87 ± 0.02) و دمای 9 ± 1 درجه سلسیوس توده های آزمایشی و سرعت جریان هوای 0.08 تا 0.53 (با فواصل 0.09) متر بر ثانیه انجام گرفت. برای مطالعه اثر درصد رطوبت محصولات مورد آزمایش بر میزان افت فشار هوای در حال عبور از توده های مورد مطالعه، آزمایشاتی با سیبزمینی های دارای رطوبت های ۶۴ تا ۸۸ درصد (با فواصل ۴ درصد) در شرایط سرعت جریان 0.08 تا 0.53 متر بر ثانیه، عمق ۱۰۰ cm مخزن و بدون مواد خارجی انجام شد (Jekayinfa, 2006; Park et al., 2013).

برای هر نوبت اندازه گیری، محفظه دستگاه از توده مورد نظر تا ارتفاع معین پر شد. سپس مانومتر به شیر متناظر ارتفاع متصل و جریان هوا برقرار می شد. در این حالت سایر شیرها بسته بود. این عمل برای هر ۴ ارتفاع مورد سنجش انجام می گرفت. کلیه آزمایشات در ۳ تکرار و ۳ برداشت از هر تکرار انجام شد. برای هر تکرار مخزن دستگاه تخلیه و دوباره پر شد. میانگین هر ۳ برداشت به عنوان نتیجه متناظر برای هر تکرار ثبت می شد.

شیر گازی موجود در مسیر حجم هوای عبوری در واحد زمان به مقدار دلخواه تنظیم می شد. هوا با دبی تنظیم شده، برای تثبیت و یکنواخت کردن فشار به انباره ای به ارتفاع ۵۰ سانتی متر واقع در زیر مخزن اصلی دستگاه و هم قطر با آن وارد شد. بین این بخش و مخزن اصلی صفحه مشبکی قرار داده شد تا علاوه بر نگهداری محصول (به عنوان کف مخزن اصلی)، یکنواختی توزیع جریان هوا در سطح مقطع توده را فراهم کند. در کل این صفحه سوراخ هایی به قطر ۴ میلی متر تعبیه شد تا مجموع سطح سوراخ ها، معادل ۵۰ درصد کل سطح صفحه باشد. این مقدار سطح سوراخ شده قابل صرف نظر بودن مقاومت صفحه در برابر عبور جریان هوا را تضمین می کند (ABE Standards, 2007). سرعت جریان هوا از تقسیم دبی بر سطح مقطع آن به دست می آید. مخزن اصلی دستگاه دارای قطر داخلی ۶۵ و ارتفاع ۱۲۰ سانتی متر بود. مطابق شکل ۱ بر روی بدنه مخزن ۵ سوراخ هر یک حاوی یک شیر گازی که فواصل آنها از قاعده مخزن (صفحه مشبک) ۵، ۳۰، ۵۵، ۸۰ و ۱۰۵ سانتی متر بود تعبیه شد. با مبنای قرار دادن سوراخ موجود در ارتفاع ۵ سانتی متری، و بوسیله یک فشار سنج U شکل شیبدار با دقت $2/5$ پاسکال اختلاف فشار جریان هوا هنگام عبور از توده محصول در عمق های ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتی متری محاسبه شد. قبل از آغاز آزمایش ها و برای اطمینان از عدم وجود هرگونه نشتی هوا، دستگاه با فشار هوای ۱۰ کیلو پاسکال تحت آزمون قرار گرفت.



شکل ۱- شمای دستگاه بکار رفته برای اندازه‌گیری افت فشار هوا در توده‌های آزمایشی

هدف از این مطالعه به دست آوردن ضرایب B و A به شکلی است که معادله نهایی بالاترین ضریب هبستگی را با نقاط به دست آمده در منحنی (افت فشار - سرعت) داشته باشد. در این معادله میزان افت فشار به ازای واحد عمق بستر $(\Delta P/L)$ به دست می‌آید.

نتایج و بحث

اثر عمق توده بر مقاومت به عبور جریان هوا

نتایج حاصل از بررسی اثر عمق توده دو رقم سیب‌زمینی (آگریا و مارفونا) بر مقاومت در برابر عبور جریان هوا در سرعت‌های مختلف در جداول ۱ و ۲ و شکل‌های ۲ و ۳ آورده شده است. جدول تجزیه واریانس ۱ معنی‌دار بودن اثر تیمارهای سرعت جریان هوا و عمق توده بر میزان افت فشار استاتیک هوا را تأیید می‌کند. بر این اساس با افزایش عمق

رابطه بین افت فشار و هر یک از فاکتورهای مورد اشاره به کمک طرح کاملاً تصادفی و در غالب آزمایش فاکتوریل مطالعه شد. به دلیل دقت و عمومیت بیشتر، برای بیان رابطه افت فشار - سرعت جریان هوا، یا همان مقاومت به عبور جریان هوا از رابطه ریاضی زیر استفاده شد (Shedd, 1953). ضرایب این مدل ریاضی به کمک نرم افزار SPSS ویرایش ۲۰۱۶ تعیین شد:

$$\Delta P/L = A(V)^B \quad (2)$$

که در آن،

B و A = ثابت‌های ویژه محصول است که از آنالیز رگرسیونی به دست می‌آید؛ V = سرعت جریان هوا بر حسب متر بر ثانیه؛ L = عمق توده بر حسب متر؛ و ΔP = افت فشار بر حسب پاسکال.

توده در هر دو رقم سیب زمینی آگریا و مارفونا بر میزان مقاومت آنها به عبور جریان هوا به شکل معنی داری افزوده شد. با این حال این افزایش روندی نزولی داشت. به عبارت دیگر در هر عمق، درصد افزایش افت فشار نسبت به درصد متناظر در عمق ماقبل، کمتر بود. به طور میانگین با افزایش هر ۲۵ سانتی متر به عمق توده آزمایشی، میزان افت فشار هوای در حال گذر برای سیب زمینی رقم آگریا و مارفونا به ترتیب ۱/۴۹ و ۱/۵۳ برابر شد. در عمق ثابت، با افزایش دبی جریان بر میزان مقاومت توده به عبور جریان هوا افزوده شد. این افزایش روندی نزولی داشت و از ۵۱ درصد برای سرعت‌های پایین تا ۲۵ درصد برای دبی‌های بالا متغیر بود. میزان ضرایب رگرسیونی به دست آمده برای مدل منتخب در اعماق مختلف هر دو رقم سیب زمینی در شکل‌های ۲ و ۳ آورده شده است.

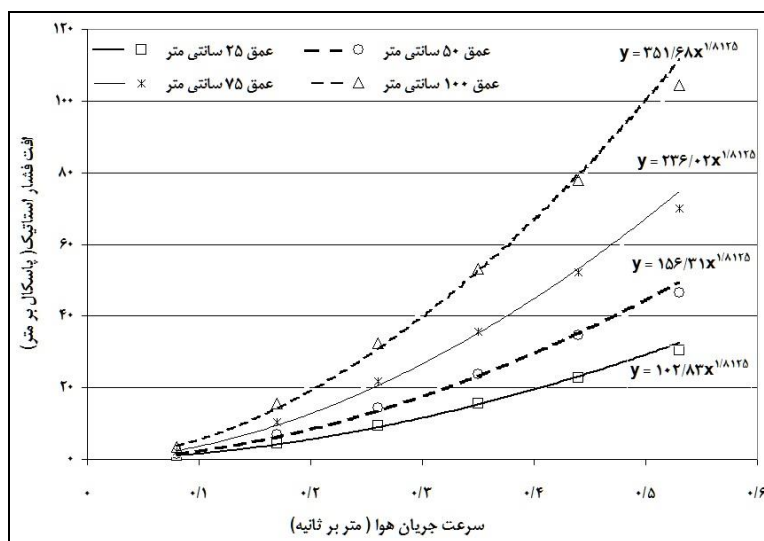
جدول ۱ - جدول تجزیه واریانس اثر سرعت جریان هوا، رقم محصول و عمق توده سیب زمینی بر میزان افت فشار استاتیک جریان هوا

میانگین مربعات افت فشار استاتیک		درجه آزادی	منابع تغییرات
رقم مارفونا	رقم آگریا		
۱۰۱۳۱/۳*	۱۰۱۷۹/۶*	۵	سرعت جریان هوا (A)
۳۷۱۵/۸*	۳۷۲۳/۵*	۳	درصد ناخالصی (B)
۱۲۱۱۳/۲*	۱۱۹۰۰/۹*	۳	عمق توده (C)
۴۸/۱	۵۵/۶	۱۵	A×B
۸۰/۵*	۷۵/۴*	۱۵	A×C
۳/۶	۲/۴	۹	B×C
۲/۹	۳/۲	۴۵	A×B×C
۲۴/۳۵	۲۲/۷۱	۱۳۴	اشتباه

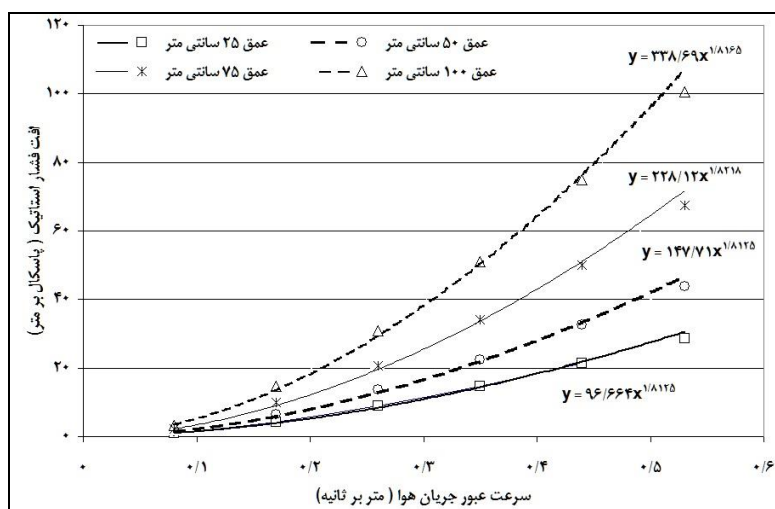
*: بین میانگین‌ها در سطح ۵٪ اختلاف معنی دار مشاهده شده است.

جدول ۲ - مقایسه میانگین میزان افت فشار استاتیک هوا در سطوح مختلف عمق توده و سرعت جریان هوا در دو رقم سیب زمینی آگریا و مارفونا

سرعت جریان هوا (متر بر ثانیه)	رقم آگریا				رقم مارفونا			
	۲۵	۵۰	۷۵	۱۰۰	۲۵	۵۰	۷۵	۱۰۰
۰/۰۸	۰/۹۸	۱/۵۰	۲/۲۵	۳/۴۰	۰/۹۲	۱/۴۰	۲/۱۵	۳/۲۳
۰/۱۷	۴/۵۳	۶/۹۰	۱۰/۴۷	۱۵/۶۵	۴/۲۵	۶/۵۳	۹/۸۲	۱۴/۷۹
۰/۲۶	۹/۴۵	۱۴/۳۶	۲۱/۶۹	۳۲/۳۵	۸/۸۸	۱۳/۵۷	۲۰/۶۲	۳۰/۸۸
۰/۳۵	۱۵/۵۵	۲۳/۶۳	۳۵/۶۹	۵۳/۲۰	۱۴/۶۱	۲۲/۳۳	۳۴/۱۷	۵۱/۹۴
۰/۴۴	۲۲/۷۹	۳۴/۶۴	۵۲/۳۱	۷۷/۸۳	۲۱/۵۰	۳۲/۷۳	۵۰/۹۳	۷۴/۶۱
۰/۵۳	۳۰/۵۳	۴۶/۴۱	۷۰/۱۰	۱۰۴/۳۱	۲۸/۷۱	۴۴/۶۹	۶۸/۴۴	۱۰۰/۵۷
	LSD=۱/۶۶۳				LSD=۱/۵۲۸			



شکل ۲- روابط رگرسیونی اثر سرعت هوای در حال گذر از اعماق مختلف توده سیب‌زمینی رقم آگریا بر میزان افت فشار استاتیک



شکل ۳- روابط رگرسیونی اثر سرعت هوای در حال گذر از اعماق مختلف توده سیب‌زمینی رقم مارفونا بر میزان افت فشار استاتیک

بر وابستگی ضریب B به شکل کلی و هندسی میوه و سبزیجات غده‌ای مطابقت دارد. اثر درصد مواد خارجی موجود در توده، بر مقاومت به عبور جریان هوا: نتایج حاصل از سنجش افت فشار هوا در توده‌های آزمایشی دارای ۰، ۲، ۴ و ۶ درصد

این داده‌ها نشان می‌دهد که با افزایش عمق توده، ضریب A در معادله افزایش یافته اما ضریب B تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. این نتایج با مقادیر به دست آمده از مطالعات آبرام و فیش (Abram & Fish, 1982)، رامسی (Rumsey, 1989) و شهبازی و رجبی پور (Shahbazi & Rajabipour, 2007) مبنی

سیبزمینی، میزان خاک بیشتری سطح به غده‌ها چسبیده و ناهمواری کلی سطح توده بیشتر می‌شود. همچنین خاک و گل چسبیده به غده پس جدا شدن از آن، سبب مسدود شدن مجاری لابه لای غده‌ها شده، بر میزان افت فشار هوا می‌فزایند. در مقادیر ثابت میزان ناخالصی، با افزایش سرعت جریان هوا، بر میزان افت فشار استاتیک افزوده می‌شود. جداول تجزیه واریانس ۱ نیز معنی‌دار بودن اثر تیمارهای سرعت جریان هوا و درصد مواد خارجی را بر میزان افت فشار هوا نشان می‌دهد. میزان ضرایب رگرسیونی به دست آمده برای مدل مورد استفاده برای برازش داده‌ها در هر دو رقم سیبزمینی تحت آزمایش در جدول ۳ آورده شده است. این داده‌ها نشان داد که با افزایش ناخالصی، بر میزان ضریب A افزوده و از مقدار ضریب B در هر دو رقم سیبزمینی کاسته شد. این نتایج با گزارش‌های ارائه شده توسط اولسن و کلنیکوف (Olsen & Kleinkopf, 2020) و لوپ و همکاران (Lope *et al.*, 2003) و میسنر (Misener, 1986) مطابقت دارد.

وزنی- وزنی خاک و سایر مواد ناخالصی که می‌تواند از سطح مزرعه همراه محصول برداشت و به انبار منتقل شود در جدول ۳ ارائه شده است. مطابق نتایج با افزایش میزان خاک و مواد خارجی موجود در توده سیبزمینی بر میزان افت فشار استاتیک هوای در حال گذر افزوده می‌شود. تقریباً با افزایش هر ۲ درصد ناخالصی، میزان افت فشار در توده محصولات سیبزمینی آگریا و مارفونا به ترتیب ۱/۳۶ و ۱/۳۳ برابر شد. این افزایش از آنجا ناشی می‌شود که ناخالصی‌ها بخشی از فضای لابه‌لای غده‌ها را اشغال و عملاً مجاری عبور هوا محدودتر شده و در نهایت اسباب افت بیشتر فشار هوا فراهم می‌شود. در غده‌های آگریا میزان افت فشار به وجود آمده در مقادیر مساوی ناخالصی، به طور متوسط ۸ درصد بیشتر از غده‌های مارفونا بود. این وضعیت علاوه بر اختلاف شکل ظاهری، ناشی از ناهمواری‌های بیشتر سطح غده‌های رقم آگریا و نیز تعداد و عمق بیشتر چشم‌ها در این رقم نسبت به سیبزمینی رقم مارفونا است. به این ترتیب که با افزایش ناهمواری سطح، تعدد و عمق چشم‌های

جدول ۳- اثر درصد مواد خارجی موجود در توده‌های آزمایشی بر تغییرات ضرایب معادله سنجش مقاومت توده به عبور جریان هوا با سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه در واحد عمق (متر)

رقم	دانسیتته فله‌ای کیلوگرم بر مترمکعب	% تخلخل	ضرایب برازش شده معادله			$\Delta P / L$ پاسکال بر متر	
			% ناخالصی	$\Delta P / L = A(V)^B$			
				A	B		R ²
آگریا	۶۲۰	۴۲/۷۹	۰	۳۵۱/۶۸	۱/۸۱۲	۰/۹۹۶	۱۰۴/۳۱
	۶۳۲	۴۱/۶۷	۲	۴۹۷/۳۱	۱/۸۴۲	۰/۹۹۴	۱۳۸/۷۵
	۶۴۵	۴۰/۵۰	۴	۶۴۹/۵۴	۱/۷۴۶	۰/۹۹۸	۱۸۴/۷۷
	۶۵۷	۳۹/۳۸	۶	۸۴۲/۷۲	۱/۷۳۱	۰/۹۹۵	۲۵۳/۸۷
مارفونا	۵۹۹	۴۳/۲۲	۰	۳۳۸/۶۹	۱/۸۱۶	۰/۹۹۷	۱۰۰/۵۷
	۶۱۱	۴۲/۱۹	۲	۴۶۴/۵۳	۱/۸۶۳	۰/۹۹۵	۱۲۷/۶۷
	۶۲۳	۴۰/۹۸	۴	۵۶۸/۳۵	۱/۷۸۰	۰/۹۹۷	۱۶۵/۶۱
	۶۳۴	۳۹/۸۶	۶	۸۲۱/۳۷	۱/۷۶۹	۰/۹۹۶	۲۴۰/۹۹

نگهدارنده قدری فشرده شده و متراکم می‌شوند. در این حالت قطر مجاری موجود در لابلای غدد درون مخزن در بخش‌های پایینی کاهش یافته، هوا برای عبور از این مجاری با مقاومت بیشتری رو به رو می‌شود. نکته دارای اهمیت آنکه غده‌های رقم مارفونا به دلیل پوست نازکتر و ماده خشک کمتر نسبت به ارقام آگریا دچار پلاسیدگی و تغییر فرم بیشتری می‌شوند. همین عامل افت بیشتر فشار استاتیک در توده سیب‌زمینی رقم مارفونا را هنگام از دست دادن رطوبت به خوبی توجیه و توجه کافی به حفظ رطوبت غده‌ها طی دوره نگهداری برای تهویه مناسب‌تر توده انبارشده را یادآوری می‌کند. مقدار ضرایب رگرسیونی به دست آمده برای تابع درجه ۳ تعریف شده برای بیان رابطه درصد رطوبت محصولات تحت آزمایش با میزان افت فشار هوا در جدول ۴ آورده شده است. این نتایج با مقادیر گزارش شده توسط پارک و همکاران (Park et al., 2013) و کارژیل و پرایس (Cargill & Price, 1995) برای محصولات غده‌ای سازگاری دارد.

اثر درصد رطوبت توده محصولات بر میزان مقاومت به عبور جریان هوا:

نتایج حاصل از سنجش میزان افت فشار هوای در حال عبور از خلال توده‌های تحت آزمایش در جدول ۴ نشان داده شده است. جدول تجزیه واریانس ۱ نیز معنی‌دار بودن اثر تیمار درصد رطوبت محصول بر میزان افت فشار هوا را تأیید می‌کند. بر این اساس با کاهش درصد رطوبت غده‌های سیب‌زمینی بر میزان افت فشار هوای در حال عبور افزوده شد. در محدوده رطوبتی مورد آزمایش، به طور متوسط با کاهش هر ۴ درصد رطوبت در غده‌های سیب‌زمینی آگریا و مارفونا میزان افت فشار استاتیک هوای در حال گذر به ترتیب تا ۱/۱۸ و ۱/۲ برابر افزایش یافت (جدول ۴). این تغییرات به افزایش میزان چروکیدگی و افزایش ناهموازی سطح غده‌ها با کاهش درصد رطوبت مربوط است. ضمن آنکه با کاهش درصد رطوبت غده‌ها، از میزان استقامت غده‌ها در برابر فشار وزن توده فوقانی کاسته و غده‌های مستقر در بخش‌های زیرین مخزن

جدول ۴- اثر درصد رطوبت توده‌های سیب‌زمینی آزمایشی بر تغییرات ضرایب معادله سنجش مقاومت توده به عبور جریان هوا در واحد عمق (متر)

محدوده معتبر درصد رطوبت (X)	مدل برازش:					سرعت جریان هوا (متر بر ثانیه)	رقم سیب‌زمینی
	R ²	D	C	B	A		
۶۵ > X > ۸۵	۰/۹۹۵	۱/۰۴۸	۴/۲۸۵	- ۰/۰۹۹۱	۰/۰۰۰۶	۰/۱۲	آگریا
	۰/۹۹۶	۱/۷۵۹	۱۰/۶۶۲	- ۰/۲۴۳۸	۰/۰۰۱۴	۰/۲۵	
	۰/۹۹۷	۴/۵۰۸	۱۹/۷۳۸	- ۰/۴۳۳۲	۰/۰۰۲۶	۰/۰/۳۸	
	۰/۹۹۳	۶/۷۶۱	۳۲/۷۲۴	- ۰/۸۵۶۴	۰/۰۰۰۵	۰/۵۰	
۶۵ > X > ۸۸	۰/۹۹۴	۱/۲۱۰	۶/۲۷۴	- ۰/۱۴۶۹	۰/۰۰۰۹	۰/۱۲	مارفونا
	۰/۹۹۸	۲/۶۲۶	۱۰/۵۳۳	- ۰/۲۳۱۳	۰/۰۰۱۳	۰/۲۵	
	۰/۹۹۳	۵/۰۱۸	۲۳/۸۶۴	- ۰/۵۳۴۹	۰/۰۰۳۱	۰/۰/۳۸	
	۰/۹۹۷	۸/۴۲۴	۴۵/۰۵۵	- ۰/۰۱۵۱	۰/۰۰۵۳	۰/۵۰	

نتیجه‌گیری

- با کاهش هر ۴ درصد رطوبت برای سیب‌زمینی آگریا و مارفونا میزان افت فشار استاتیک هوای در حال گذر از خلال توده، به ترتیب ۱/۱۸، ۱/۲۰ برابری می‌شود.
- آگاهی از میزان افت فشار استاتیک در توده‌های سیب‌زمینی نگهداری شده در انبار علاوه بر افزایش اطمینان از تهویه کامل توده انبار شده، مانع از به کارگیری دمنده‌های بادبی بالاتر از میزان نیاز و یا فعال نگه داشتن غیرضروری این ادوات برای زمان‌های طولانی‌تر خواهد شد؛ که در هر حال علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف انرژی و استهلاک کمتر سیستم تهویه، افت رطوبتی کمتر و ماندگاری طولانی‌تر توده ذخیره شده را نیز در پی خواهد داشت (Dobrzański & Rybczyński, 2014; McCabe *et al.*, 2018).
- بر اساس نتایج حاصل از اندازه‌گیری میزان افت فشار هوا در توده‌های سیب‌زمینی رقم آگریا و مارفونا در سرعت‌های ۰/۰۸ تا ۰/۵۳ متر بر ثانیه جریان هوا، درصد مواد ناخالصی صفر تا ۶ درصد و درصد رطوبت نسبی ۸۸ تا ۶۵ درصد نکات زیر قابل ارائه می‌باشد:
- میزان افت فشار در سیب زمینی رقم آگریا ۴ الی ۶ درصد بیشتر از مارفونا است.
- با افزایش سرعت جریان هوا، میزان افت فشار استاتیک هوا با شیب نزولی، افزایش می‌یابد.
- با افزایش هر ۲۵ cm، به عمق توده سیب زمینی آگریا و مارفونا، افت فشار هوا به ترتیب ۱/۴۹ و ۱/۵۳ برابر می‌شود.
- با افزایش هر ۲٪ ناخالصی، میزان افت فشار در توده سیب زمینی آگریا و مارفونا به ترتیب ۱/۳۶ و ۱/۳۳ برابر می‌شود.

تعارض منافع

نویسنده در انتشار این مقاله از اخلاق نشر تبعیت کرده و از موارد سوء اخلاق از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پرهیز نموده و منافع تجاری در این راستا وجود ندارد.

مراجع

- ABE Standards. 2007. Resistance to airflow of grains, seeds, other agricultural products, and perforated metal sheets. ASAE, St. Joseph, MI. D272.3.
- Abram S, C.F. and Fish, Jr. 1982. Airflow resistance characteristics of bulk piled sweet potatoes. Transactions Of The ASAE. 25 (4): 1103-1106.
- Adinath, E. K., Subir, K. C., Dilip, A. P., and Kalyani, G. 2019. Airflow resistance and pressure drop behavior in different conditions of bulk-stored onion and its dynamic modeling. Journal of Food Process Engineering. 42(5): 130-141.
- Anon. 2018. Agricultural statistics of Hamadan province, Hamadan Agricultural Organization Publications. Hamedan, Iran (In Farsi).
- A.S.A.E Standard. 1998. Resistance to airflow Through The grains, seeds, tubers and perfected metal sheets. D272.3. S.t.Joseph. MI: 49058 :371-375.
- Audu, J., Awulu1, O., and Anyebe, S.P. 2018. Modeling and optimization of airflow resistance through a dry bed of Bambara nuts. Agricultural Engineering International. 20(4):169-177.

- Bala, B. K. 2016. Airflow resistance and fans. In *Drying and Storage of Cereal Grains*, eds. B. K. Bala, ch: 5, 81–106. Science Publishers Inc., Enfield, New Hampshire 03748, USA.
- Bern, C.J., and Charity, L.F. 1998. Air flow resistance characteristics of corn as influenced by bulk density. ASAE: paper No: 75-3510.
- Cargill, B.F., and Price, K.C. 1995. Ventilation system performance in michigan bulk potato storages. ASAE paper No: 85-4037. St. Joseph, MI:ASAE.
- Dobrzański, B and Ryczyński, R. 2014. *Physical Properties of Raw Materials and Agricultural Products*. Springer, Dordrecht Publication. Online ISBN: 978-90-481-3585-1.
- Horwits, W. 2000. Association of Official Analytical Chemists International (AOAC). Gaithersburg, Maryland, U.S.A.
- Jekayinfa, S. 2006. Effect of Airflow Rate, Moisture Content and Pressure Drop on the Airflow Resistance of Locust Bean Seed. *Agricultural Engineering International*. 12(1):1-9.
- Lope, T., Kienholz, J., Marshall, E., and Hong, Q. 2003. Airflow Resistance of Sugarbeet. *Journal of Sugar Beet Research*. 40(3): 67-86.
- McCabe, W.L., Julian, S., and Harriot, P. 2018. *Unit operation of chemical Engineering*. 7th Edition, MC Graw – Hill publisher. New York, USA.
- Misener, G.C. 1986. Airflow resistance due to soil on bulk potatoes. *Canadian Agricultural Engineering*. 28(1):43-44.
- Olsen, N. and Kleinkopf, G. 2020. Storage management. In: Stark, J. C., Thornton, M., and Nolte, P. (Ed) *Potato Production Systems*. Springer International Publishing. Gewerbestr 11, 6330 Cham Switzerland.
- Park, J. M., Kim, G.s., Kwon, S.H., and Chung, S.W. 2013. Development of Post-harvest bulk handling system of onions (I) - Characteristics of friction and airflow resistance. *Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University*. 58(1): 87-92.
- Rumsey, T. 1989. Moisture change in bulk walnut storage. A.S.A.E Paper No: 891-6581.
- Shahbazi, F., and Rajabipour, A. 2007. Resistance of Potatoes to Airflow. *Journal of Agriculture Science and Technology*. 10(1):1-9.
- Shedd, C.K. 1953. Resistance of grains and seeds to airflow. *Agricultural Engineering*. 34 (9):616-619.
- Shmyryova, E. 2018. Airflow resistance of sugar beets. ASAE. Paper No: 996059.
- Stirniman, E.J., and Bates, E.N. 1931. Tests on resistance to passage of air Through rough rice in a deep bin. *Agricultural Engineering*. 125(5):145-148.
- Teixeira, D. L., De Matos, E., and De Castro, M. 2015. Resistance to forced airflow through layers of composting organic material. *Waste Management*, 36(1): 57–62.

Measurement and Modeling of Airflow Resistance in Two Potato Varieties Pile

F. Goodarzi*

* Corresponding Author: Assistant professor, Department of AERI, Research and education Center of Agriculture and Natural Resources of Hamedan. Agricultural Research, Education and Extension Organisation (AREEO). Hamedan, Iran. Email: goodarzifarzad@gmail.com

Received: 30 November 2019, Accepted: 27 July 2021

[http://doi: 10.22092/fooder.2021.128571.1248](http://doi:10.22092/fooder.2021.128571.1248)

Abstract

The rate of static pressure drop of air passing through the mass of agricultural products is one of the basic data for selecting the fan used in aeration or dryer systems. In this study, the amount of static air pressure drop through the masses of Agria and Marfona cultivars was measured using a simulator device consisting of an air compressor, a rotameter, a cylindrical bin, and a U-shaped barometer and their regression relationship with some parameters such as depth of mass, moisture content and percentage of unwanted materials (soil &, etc.) were defined by using of Shedd's model. According to these tests: As the air velocity increases from 0.085 to 0.53 (m/s), the static air pressure drop increases too. By each 25 cm increase in the depth of Agria and Morfona potatoe piles, the static pressure will be dropped by 1.49 and 1.53 times respectively. With each 2% increase of soil and other impurities in the potato pile, the rate of air pressure drop in the potato mass of Agria and Marfona increases 1.36 and 1.33, respectively. At similar airflow rates, potatoes with higher moisture content showed fewer static pressure drops. The airflow resistance of the Agria potato piles measured 4 to 6% more than the Marfona cultivar, at the same condition.

Keywords: Airflow, Static pressure drop, Potato, Depth, Moisture.