



محاسبه افت فشار هوا در عبور از یک بستر انجیر سبز استهبان با بکارگیری مدل اصلاح شده ارگان

یاسمن امانلو، علی زمردیان، کامیار کریمی صحنه سرایی

چکیده:

در این تحقیق افت فشار، زبری سطح، فاکتور شکل، چگالی ظاهری و واقعی و تخلخل در بستر انجیر سبز استهبان در رطوبت‌های مختلف اندازه‌گیری شد. دامنه سرعت هوا و رطوبت محصول در این تحقیق بترتیب در محدوده $0/2 - 1/1$ (m/s) و $5/74 - 34/08$ بر پایه خشک بوده است. برای اندازه‌گیری افت فشار در بستر انجیر یک دستگاه آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد. اثر عمق بستر در هفت سطح (5، 10، 35... cm) بررسی شد. با افزایش عمق بستر افت فشار بصورت خطی افزایش یافت. همچنین افزایش رطوبت و نرخ عبور جریان‌ها موجب افزایش افت فشار و زبری سطح گردید. مدل اصلاح شده ارگان با بیشترین ضریب همبستگی ($R^2 = 0/994$) و کمترین خطا بعنوان بهترین مدل برای پیش‌بینی افت فشار در بستر انجیر شناخته شد.

کلمات کلیدی: مدل‌های ریاضی افت فشار، فاکتور شکل، زبری سطح، دینامیک سیالات

مقدمه

انجیر سبز (*Ficus carica L.*) یکی از پر طرفدارترین میوه‌های خشک شده جهان است. این محصول باغی عمدتاً در کشورهای ایران، ترکیه و افغانستان تولید می‌شود و بعنوان یکی از مهمترین اقلام صادراتی غیر نفتی در طی سه دهه گذشته در ایران شناخته شده است (Doymaz, 2005).

هنگامی که هوا از میان یک توده از مواد متخلخل همانند محصولات کشاورزی عبور می‌کند، فشار آن کاهش می‌یابد. برای فائق آمدن بر این افت فشار ناگزیر از صرف انرژی و استفاده از دمنده‌ها هستیم. در مراحل مختلفی همچون پاک کردن ناخالصی‌ها، خشک کردن، خنک کردن و انبارداری بایستی هوا از بستر محصول مورد نظر عبور داده شود. بطور مثال انرژی لازم برای وارد کردن هوا به درون توده‌ای از یک نوع میوه، به مقدار مقاومت آن میوه خاص در برابر جریان هوا بستگی دارد. بی‌توجهی به میزان مقاومت بستر میوه منجر به طراحی غیر دقیق دمنده‌ها در سیستم‌های خشک‌کن‌ها، انبارداری و غیره می‌شود. این طراحی غیر دقیق به خشک شدن بیش از حد، چروکیدگی، افزایش آفات انباری، مصرف بیش از اندازه انرژی و ... می‌انجامد. بیش از ۷۰ سال است که محققان مختلف در سراسر دنیا اثر متغیرهای مختلف از قبیل رطوبت محصول، ارتفاع بستر، وجود مواد خارجی در توده محصول و ... را در محصولات مختلف کشاورزی را بررسی کرده‌اند. افت فشار در محصولات مختلف از قبیل غلات و حبوبات (Shedd, 1951 & 1953; Hukill & Ives, 1955; Jayas et al., 1987; Sokhansanj et al., 1990; Li and Giner & Denisienia, 1996; Chung et al., 2001)، دانه‌های قهوه (Sokhansanj, 1994; Dairo & Ajibola, 1994)

(Agullo & Marenaya, 2005)، سیب و ریشه کاسنی (Verboven et al., 2004)، کلزا (Patil & Ward, 1988) و پسته (Kashaninejad & Tabil 2009) اندازه گیری شده است.

در بسیاری از موارد افت فشار را می توان با مدل های معروفی مانند مدل شد (Shedd) و مدل هوکیل و ایوز پیش بینی کرد. استفاده از این مدل ها راحت و سریع است. با این وجود وربون و همکاران (Verboven et al. 2004) به این نتیجه رسیدند که مدل اصلاح شده ارگان با احتساب اثر تخلخل محصول، قطر موثر، چگالی و ویسکوزیته هوا می تواند دقیق تر از دو مدل تجربی شد و هوکیل ایوز به تخمین افت فشار بپردازد. معادله ارگان بر اساس قواعد دینامیک سیالات پایه گذاری شده است (Kashaninejad & Tabil 2009). در این مدل بیان شده است که انرژی تلف شده در بستر محصول از جمع انرژی جنبشی از دست رفته و ویسکوزیته بدست می آید. برخی از محققان از مدل ساده شده ارگان بصورت معادله ۱ استفاده کرده اند.

$$\Delta P = A u + B u^2 \quad (1)$$

اما تحقیقات وربون و همکاران نشان داد که استفاده از مدل ساده شده دقت پیش بینی را کاهش میدهد. مدل اصلی ارگان در معادله ۲ نشان داده شده است:

$$\nabla P = -\frac{\mu}{K} u - C \rho |u| u \quad (2)$$

که در آن P افت فشار برحسب پاسکال، u بردار سرعت، K ضریب نفوذ پذیری داری و C ضریب هوا بردگی فورچهایم می باشد. جمله اول در سمت راست معادله ۲ نشانگر نیروهای اصطکاکی است و شامل ویسکوزیته μ ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) است. جمله دوم در بردارنده چگالی سیال ρ (kg m^{-3}) و بیان کننده مقاومت به هوا بردگی بستر می باشد. ضرایب K و C به شکل هندسی، صافی سطح (α_r)، تخلخل (ε) و قطر موثر دانه های تشکیل دهنده بستر (d_{pe}) بستگی دارند. این موارد در ضرایب مدل ارگان ساده شده مستتر است اما مدل اصلاح شده ارگان این موارد را بصورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$\frac{1}{K} = \frac{150(1-\varepsilon)^2 \lambda^2}{d_{pe}^2 \varepsilon^3} \quad (3)$$

$$C = \frac{1.75(1-\varepsilon)\lambda}{d_{pe} \varepsilon^3} \quad (4)$$

که در آنها λ نمایانگر فاکتور شکل است. وربون و همکاران در تحقیق خود فاکتور شکل و زبری سطح را بصورت زیر دخیل کردند:

$$\frac{1}{K} = \alpha_r \frac{K_1(1-\varepsilon)^2 \lambda^2}{d_{pe}^2 \varepsilon^3} \quad (5)$$

$$C = \frac{C_1(1-\varepsilon)\lambda}{\alpha_r d_{pe} \varepsilon^3} \quad (6)$$

آنها برای محاسبه α_r و λ از داده های تجربی استفاده کردند. به این صورت که مقادیر K_1 و C_1 را بترتیب برابر با ۱۵۰ و ۱/۷۵ در نظر گرفتند و با استفاده از معادله ۲ و ۵ و ۶ و داده های حاصل از آزمایش مقادیر α_r و λ را بدست آوردند (Verboven et al. 2004).

مواد و روش ها:

انجیر سبز استهبان که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت محصول خرمی سال ۱۳۸۶ بود. رطوبت اولیه انجیر ۵/۷۴ درصد بر پایه خشک بود. رطوبت محصول بر اساس استاندارد S353(ASABE) اندازه گیری شد. مواد خارجی شامل سنگ ریزه، شاخه و برگ و خاک که با محصول مخلوط شده بود قبل از انجام آزمایش بطور کامل زدوده شدند. برای دستیابی به سطوح مختلف رطوبت در انجیرهای مورد آزمایش، مقدار رطوبت مورد نیاز برای رسیدن انجیرها به یک درصد رطوبت خاص محاسبه شد. رطوبت محاسبه شده بصورت آب مقطر با استفاده از یک افشانه بطور یکنواخت به انجیرها اضافه گردید. پس از اضافه کردن رطوبت، انجیرها را درون کیسه های پلی اتیلنی ریخته، درب کیسه ها با دقت بسته شد تا تبادل رطوبت با محیط خارج نداشته باشند. برای اطمینان از جذب کامل رطوبت به درون انجیرها، کیسه ها به مدت ۱۰ روز درون یخچال با دمای ۴+ درجه سلسیوس نگهداری شدند. برای اجرای آزمایش ها ۶ ساعت قبل از شروع آزمایش، کیسه ها از یخچال خارج می شد تا دمای آنها با دمای محیط به تعادل برسد. به منظور اندازه گیری جرم حجمی توده ای^۱، ابعاد و کرویت^۲ ۵۰ عدد دانه انجیر بطور تصادفی انتخاب گردید. پس از شماره گذاری انجیرها در هر یک از سه سطح رطوبت ۵/۷۴، ۲۰/۴۰ و ۳۴/۰۸ درصد؛ سه بعد اصلی، طول (L)، عرض (W) و ارتفاع (H) با کولیسی با دقت $\pm 0/05$ میلی متر اندازه گیری شد. کولیسی مورد استفاده محصول Mitutoyo ژاپن بود. میانگین هندسی اقطار (GMD)^۳ و کرویت (ϕ) از معادله های زیر محاسبه می شوند (Mohsenin, 1996):

$$GMD = (LWH)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

$$\phi = \frac{(LWH)^{\frac{1}{3}}}{L} \times 100 \quad (8)$$

تخلخل مواد دانه ای اثر محسوسی بر روی مقاومت محصول به عبور هوا دارد. برای اندازه گیری تخلخل اندازه گیری جرم حجمی توده ای (ρ_b) و جرم حجمی دانه ای^۴ (ρ_t) در هر کدام از سطوح رطوبتی ضروری می نماید. جرم حجمی دانه ای عبارت است از جرم در واحد حجم تک دانه انجیر که با روش جایجایی مایع انجام شد. در این تحقیق بجای آب از تلوئن (C_7H_8) استفاده شد زیرا کشش سطحی این مایع کمتر از آب است و به راحتی

¹ - Bulk density

² - Sphericity

³ - Geometric mean diameter

⁴ - Particle density

تمام پستی و بلندی های سطح را در بر می گیرد همچنین حلالیت آن بسیار کم و قابل صرف نظر کردن است (Mohsenin, 1996).

جرم حجمی توده ای برای سه سطح رطوبت مختلف بستر انجیر اندازه گیری شد. برای اندازه گیری از ظرفی با وزن و حجم مشخص استفاده شد. از تقسیم جرم انجیر بر حجم مشخص ظرف در هر یک از چهار حالت های پر شدگی ظرف جرم حجمی مربوط به آن حالت خاص محاسبه شد. با داشتن مقادیر جرم حجمی توده ای و دانه ای، تخلخل از فرمول زیر بدست می آید (زمردیان، ۱۳۸۷):

$$\varepsilon = \frac{\rho_t - \rho_b}{\rho_t} \times 100 \quad (3-3)$$

برای اندازه گیری افت فشار دستگاه آزمایشگاهی بصورت شکل ۱ در بخش مکانیک ماشین های کشاورزی دانشگاه شیراز طراحی و ساخته شد. مخزن نگهداری انجیر دارای مقطع دایره ای به قطر ۴۰ (cm) بود. به منظور نگهداری انجیرها از یک قطعه توری گالوانیزه استفاده شد که بصورت کشیده در داخل مخزن نصب شده بود. در هنگام آزمایش، مخزن تا ارتفاع ۴۰ (cm) پر می گردید. جهت اندازه گیری افت فشار ناشی از لایه های انجیر از یک مانومتر با دقت 1mmH2O استفاده شد. مانومتر ساخت کارخانه Tecequipment از کشور انگلستان بود.

همچنین برای بررسی اثر افزایش ارتفاع توده انجیر بر روی افت فشار هفت ارتفاع (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵cm) و چهار نرخ جریان هوا (۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱) در دمای ثابت اندازه گیری شد.

برای برازش مدل ارگان اصلاح شده از رگرسیون غیر خطی (ماکروسافت، اکسل ۲۰۰۳، solver) استفاده شد.



شکل 1 دستگاه آزمایشگاهی ساخته شده در بخش مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه جهت اندازه‌گیری افت فشار

نتیجه و بحث:

(۱) خواص فیزیکی انجیر سبز استهبان

نتایج حاصل از ابعاد اصلی، میانگین هندسی اقطار (GMD)، چگالی واقعی، کرویت و تخلخل در سه سطح رطوبت در جدول ۱ آمده است.

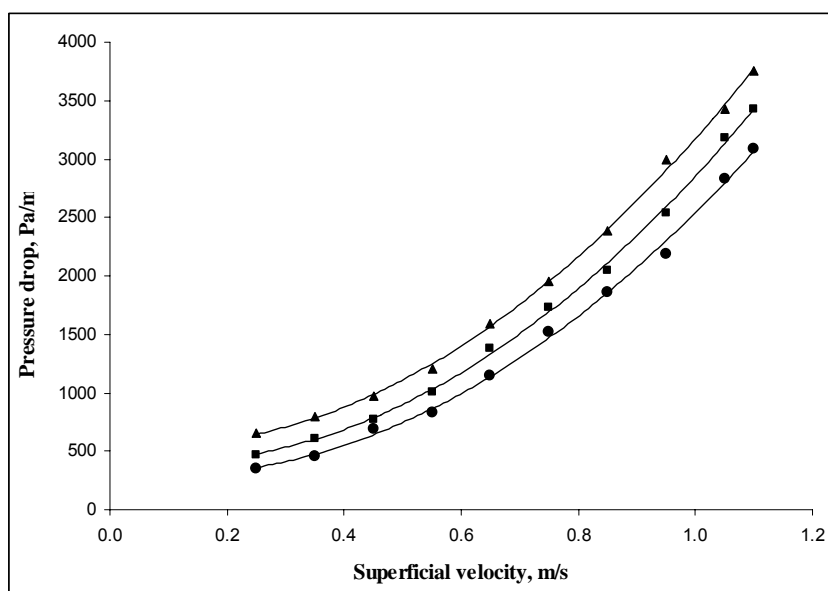
جدول 1 - میانگین هندسی اقطار (GMD)، چگالی واقعی، کرویت و تخلخل انجیر در سه سطح رطوبت

تخلخل	جرم حجمی دانه‌ای، ρ_i (kg/m ³)	میانگین هندسی اقطار، mm	کرویت، ϕ %	رطوبت، %
۵۰/۶	۱۰۶۸	۲۰/۱۴	۹۱/۸۷	۵/۷۴
۴۳/۶	۹۶۰	۲۰/۷۴	۹۲/۲۰	۲۰/۴۰
۳۶/۵	۸۸۸	۲۱/۲۰	۹۲/۲۸	۳۴/۰۸

همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش رطوبت میانگین هندسی اقطار و کرویت افزایش یافته است. دانه‌های انجیر متورم می‌شوند و سه بعد اصلی آنها افزایش می‌یابد که فراخور آن میانگین هندسی اقطار نیز افزایش می‌آید. افزایش کرویت نشان می‌دهد که افزایش رطوبت شکل انجیر به کره نزدیک‌تر می‌شود. افزایش رطوبت موجب افزایش جرم حجمی توده‌ای شده است زیرا با جذب رطوبت، جرم میوه در واحد حجم افزایش می‌یابد.

(۲) نتایج مربوط به اندازه‌گیری افت فشار

نتایج نشان دادند که با افزایش رطوبت، افت فشار در توده انجیر افزایش می‌یابد. افزایش رطوبت باعث افزایش جرم حجمی توده‌ای شده و همچنین تخلخل کاهش می‌یابد بنابراین با افزایش رطوبت عبور هوا از میان توده انجیر مشکل‌تر صورت می‌گیرد (شکل ۲). همچنین نتایج نشان داد که به ازای هر ۱٪ افزایش محتوای رطوبتی بطور متوسط افت فشار ۷/۲٪ افزایش می‌یابد. نتایج مشابه توسط محققان دیگر برای محصولات مختلف کشاورزی بدست آمده است (Kashaninejad & Tabil 2009; Sokhansanj et al., 1990; Al-yahya & Moghazi, 1998).



شکل ۲ اثر رطوبت بر روی افت فشار لایه ضخیم انجیر (●: رطوبت ۵/۷٪، ■: ۲۰/۴۰٪، ▲: ۳۴/۰۸٪)

فاکتور شکل و زبری سطح از داده‌های آزمایشگاهی برای انجیر سبز استهبان در سه سطح رطوبت استخراج شد (جدول ۲).

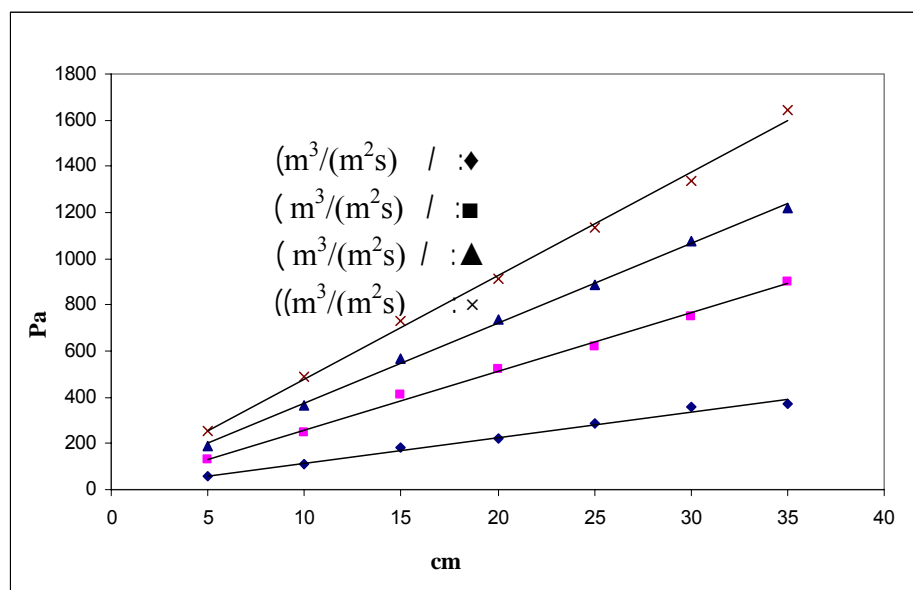
جدول ۲ فاکتور شکل و زبری سطح از داده‌های آزمایشگاهی برای انجیر سبز استهبان در سه سطح رطوبت

انحراف معیار		فاکتورها		رطوبت، %
α_r	λ	α_r	λ	
۰/۰۰۷	۰/۰۱۳	۱/۱۲۱	۱/۰۱۷	۵/۷۴

۰/۰۱۲	۰/۰۱۰	۱/۴۳۲	۱/۰۳۶	۲۰/۴۳
۰/۰۱۱	۰/۰۰۵	۲/۱۱۱	۱/۰۳۹	۳۴/۰۸

می توان نتیجه گیری کرد که با افزایش رطوبت انجیر، تورم دانه های آن نیز افزایش یافته است بنابراین با افزایش رطوبت به مقدار فاکتور شکل هم افزوده شده است. همچنین با افزایش رطوبت زبری سطح افزایش یافته است. می توان گفت که افزایش رطوبت چسبندگی سطح انجیر را افزایش داده است که این مورد خود را بصورت افزایش زبری سطح نشان داده است.

نتایج مشخص کرد که رابطه خطی بین افزایش ارتفاع بستر انجیر و افزایش افت فشار انجیر وجود دارد (شکل ۳-۴). نتایج مشابه توسط معصومی و تبیل (۲۰۰۳) برای نخود، ساسیلیک (۲۰۰۴) برای بذر خشخاش، آگولو و مارینا (۲۰۰۵) برای دانه های قهوه، تبک و همکاران (۲۰۰۴) برای دانه های پنبه و کاشانی نژاد و تبیل (۲۰۰۹) برای پسته گزارش شده است.



شکل 3 اثر ارتفاع بستر انجیر بر روی افت فشار در چهار نرخ عبور جریان هوا

نتایج مربوط به برازش معادله ارگان تصحیح شد و ارگان ساده شده نشان داد که مدل ارگان اصلاح شده توانایی بیشتری در توجه پدیده افت فشار در بستر انجیر سبز استهبان داشته است (جدول ۳).

جدول ۳ مقایسه معادله ارگان تصحیح شده و معادله ارگان ساده شده

مدل	رطوبت	R^2	RMSE	P(%)
ارگان اصلاح شده	۲۰/۴۳	۰/۹۹۶	۲۷/۰۷	۰/۵۰۴
	۵/۷۴	۰/۹۹۵	۲۴/۹۴	۰/۸۲۱

۰/۵۱۶	۳۵/۴۹	۰/۹۹۲	۳۴/۰۸	
۹/۱۸	۴۳/۳۹	۰/۹۸۹	۵/۷۴	
۵/۳۰	۲۴/۸۱	۰/۹۶۹	۲۰/۴۳	ارگان ساده شده
۷/۰۳	۴۰/۴۳	۰/۹۸۹	۳۴/۰۸	

نتیجه گیری کلی:

ابعاد اصلی، کرویت، جرم حجمی توده ای، فاکتور شکل و زبری سطح با افزایش رطوبت در انجیر سبز افزایش یافته است.

جرم حجمی دانه ای و تخلخل با افزایش رطوبت کاهش یافته است. افت فشار بصورت خطی با افزایش عمق بستر افزایش یافته است. مدل ارگان تصحیح شده با دقت بسیار خوب قادر به تخمین افت فشار در بستر انجیر می باشد.

منابع مورد استفاده:

1. Agullo, J.O. and Marenya, M.O., 2005, Air flow resistance of parchment Arabica coffee. *Biosystems Engineering* 91(2), 149-156.
2. Al-yahya, S.A., Moghazi, H.M., 1998, Static pressure drop through barley grain. *Canadian Agricultural Engineering* 40 (2), 213-217.
3. ASABE Standards, 2007, ASAE D272.3 MAR1996 (R2007) – Resistance to Air flow of Grains, Seeds, Other Agricultural Products, and Perforated Metal Sheets. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers, vol. 54, pp. 627-633.
4. Chung, D.S., Maghirang, R.G., Kim, Y.S. and Kim, M.S., 2001, Effects of moisture and fine material on static pressure drops in a bed of grain sorghum and rough rice. *Transactions of the ASAE* 42 (2), 331-336.
5. Dairo, O.U. and Agibola, O.O., 1994, Resistance to air flow of bulk Sesame seed. *Agriculture engineering* (58), 99-105.
6. Doymaz, I., 2005, Sun drying of figs: an experimental study. *Journal of Food Engineering* 71, 403-407.
7. Ergun, S., 1952, Fluid flow through packed columns. *Chemical Engineering progress* 48, 89-94.
8. Giner, S.A. and Denisenia, E., 1996, Pressure drop through wheat as affected by air velocity, moisture content and fines. *Journal of Agricultural Engineering Research* 63, 73-86.
9. Hukill, W.V. and Ives, N.C., 1955, Radial air flow resistance of grains. *Agricultural Engineering* 35 (5), 332-335.
10. Jayas, D.S., Sokhasanj, S., Moysey, E.B. and Barber, E.M., 1987, Air flow resistance of canola (rapeseed). *Transactions of the ASAE* 30 (5), 1484-1488.
11. Kashaninejad, M. and Tabil, L.G., 2009, Resistance of bulk pistachio nuts (Ohadi variety) to air flow. *Journal of Food Engineering* 90, 104-109.
12. Li, W., Sokhasanj, S., 1994, Resistance of bulk alfalfa seed to air flow. *Canadian Agricultural Engineering* 36 (1), 25-28.

13. Mohsenin, N.N., 1996, Physical characteristics, In *Physical properties of plants and animal materials*, (Gordon and Breach Science Publishers, Canada), pp. 79-127.
14. Patil, B.G. and Ward, G.T., 1988, Resistance to air flow of oilseed Rape. *Agriculture Engineering* (41), 25-31.
15. Sacilik, K., 2004, Resistance of bulk poppy seeds to air flow. *Biosystems Engineering* 89 (4), 435–443.
16. Shedd C. K., 1951, Some new data on resistance of grins to air flow. *Agricultural Engineering* 32:493-495
17. Shedd C. K., 1953, Resistance of grains and seeds to air flow. *Agricultural Engineering* 34 (9), 616–619.
18. Sokhansanj, S.A., Falacinski, A.A., Sosulski, F.W., Jayas, D.S. and Tang, J., 1990, Resistance of bulk lentils to air flow. *Transactions of the ASAE* 33 (4), 1281–1285.
19. Tabak, S., Askarov, B., Rashindov, U., Tabak, I., Manor, G. and Shmulevich, I., 2004, Air flow through granular beds packed with Cottonseeds. *Biosystems Engineering* 88 (2), 163-173.
20. Verboven, P., Hoang, M.L., Baelmans, M. and Nicolai, B.M., 2004, Air flow through bed of apples and chicory roots. *Biosystems Engineering* 88 (1), 117-125.