



تعیین خواص مکانیکی توده‌ی دانه‌های گندم در سطوح رطوبتی مختلف با استفاده از مدل‌سازی به روش المان‌های مجزا (DEM) و مقایسه با نتایج تجربی متناظر

حامد جانی سرنوای^۱، اسعد مدرس مطلق^۲، علاءالدین رحمانی دیدار^۳

۱- دانشجوی کارشناس ارشد مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه ارومیه

۲- دانشیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه ارومیه

۳- دانشیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه ارومیه

۱. چکیده

در این مقاله خواص مکانیکی توده‌ی دانه‌های گندم بر اساس طبیعت مجزا و گسسته‌ی آن و در قالب روش المان‌های مجزای (DEM) سه‌بعدی، با فرض مدل تماسی ویسکوالاستیک (خطی و غیرخطی) در تماس بین دانه‌های گندم و با مدل کردن شکل دانه‌ها با روش MSM مدل‌سازی شده است. انتخاب پارامترهای ورودی مدل‌ها تا حد امکان بر اساس ماهیت دانه‌های گندم انجام شده است به طوریکه به واسطه‌ی همین پارامترها، محتوای رطوبتی دانه‌ها نیز به روشی ابتکاری در مدل‌سازی لحاظ شده است. شرایط مرزی و بارگذاری مطابق با شرایط تست‌های برش مستقیم و فشار سه‌محوره انتخاب شده است. چهار خصوصیت جریانی اصلی و مهم مواد دانه‌ای (زاویه‌ی اصطکاک داخلی، چسبندگی، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون) به عنوان شاخص‌ها و معیارهایی برای ارزیابی رفتار مکانیکی توده‌ی گندم در نظر گرفته شده است. نهایتاً تعداد ۱۸۰ تست برش و فشار، با استفاده از نسخه‌ی ۳.۱ برنامه‌ی رایانه‌ی PFC^{3D} شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان داد که با استفاده از رهیافت بکار رفته در شبیه‌سازی محتوای رطوبتی، می‌توان رفتار مکانیکی توده‌ی گندم را در پنج سطح رطوبتی ۱۰، ۱۲/۵، ۱۵، ۱۷/۵ و ۲۰ درصد به درستی پیش‌بینی نمود. همچنین غیرخطی دانستن ماهیت الاستیک موجود در تماس‌های موجود آمده بین دانه‌های گندم، موجب پیش‌بینی بهتر رفتار مکانیکی توده‌ی گندم می‌شود.

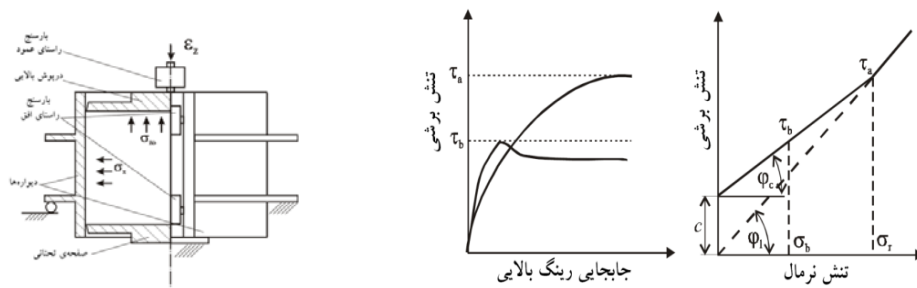
واژه‌های کلیدی: دانه‌های گندم، خواص مکانیکی، مدل تماسی، DEM، MSM

۲- مقدمه

تقریباً تمامی محصولات کشاورزی و مواد موجود در صنایع غذایی به صورت محیط‌های مادی ناپیوسته‌ای

هستند که منشا بیولوژیکی دارند. توده‌ی دانه‌های غلات نمونه‌ی کاملی از انواعی از این محیط‌ها است که در طبقه‌بندی‌ها تحت عنوان مواد دانه‌ای شناخته می‌شوند. به طور کلی و در یک نگاه کلان، اتلافی که در حین جابجایی و انتقال مواد در حالت دانه‌ای حادث می‌شود در حدود ۴۰ درصد از کل ظرفیت تجهیزات انتقال و ماشین‌های حمل و نقل تخمین زده می‌شود (Tijssens et al, 2001). علاوه بر این همواره عدم شناخت دقیق رفتار این مواد منجر به ایجاد مشکلاتی همچون کاهش کیفیت کار دستگاه، انسداد مجاری انتقال، ناپایداری و در نهایت شکست سیلوهای گول‌پیکر و عظیم صنعتی شده است. به همین جهت مطالعه و مدلسازی رفتار مکانیکی و دینامیکی این محیط‌ها، یکی از مراحل اولیه و ضروری در طراحی بهین سیستم‌های نگهداری، انتقال و فرآوری محصولات کشاورزی پس از برداشت آنها را تشکیل می‌دهد (Horabik & Molenda, 2005). تست‌های تجربی همواره مطمئن‌ترین و دقیق‌ترین راه مطالعه‌ی رفتار مواد دانه‌ای هستند. بیشترین تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی مواد دانه‌ای با این روش انجام شده است. هورابیک و مولندا (۲۰۰۵)، در موسسه‌ی آگروفیزیک دانشگاه علوم لهستان، با استفاده از روش‌های تست استاندارد، دو تست معروف برش مستقیم و فشار سه‌محوره را به ترتیب با دستگاه تست برش جنایک^۱ و یک دستگاه ابداعی بر مبنای مدل ساویچکی^۲ روی توده‌ی دانه‌های گندم وارپته بگرا^۳ انجام داده‌اند.

شکل ۱: روش استخراج چهارخصوصیت جریان ν ، $\bar{\sigma}_a$ ، σ_r ، φ_1 در تست‌های تجربی برش و فشار (هورابیک و مولندا، ۲۰۰۵)



تست فشار سه محوره

تست برش مستقیم

$$\nu^* = \frac{\sigma_{rad}}{\sigma_a + \sigma_{rad}}$$

$$E = \frac{\sigma_a}{\varepsilon_a} \left(1 - \frac{2\nu^{*2}}{1 - \nu^*} \right)$$

$$\varphi_1 = \arctan \left(\frac{\tau_a}{\sigma_r} \right)$$

$$c = \tau_a - \sigma_r \tan \varphi_1$$

جدول ۱: شرایط تست‌های تجربی انجام شده توسط هورابیک و مولندا (۲۰۰۵)

تست	ابعاد نمونه (قطر × ارتفاع) (mm×mm)	نرخ بارگذاری (mm/min)	تشن مرجع ($\bar{\sigma}_a$) جهت تحکیم (kPa)	مقدار $\Delta t / D$ در لحظه‌ی ثابت داده‌ها
-----	---------------------------------------	--------------------------	--	--

¹ Jenike Shear Test

² Sawicki

³ Begra

برش مستقیم	۸۰ × ۲۱۰	۱۰/۸	۱۰۰	۰/۰۵
فشار	۳۰۰ × ۱۵۰	۰/۳۵	۱۰۰	۰/۰۶

⊙ مقدار میزانی از جابجایی رینگ برش (یا طول استوانه تست فشار) نسبت به قطر آن است، که در آن لحظه نتایج ثبت می‌شوند.

جزئیات انجام این آزمایش‌ها در مرجع (Horabik&Molenda, 2005) آمده است. شیوه و اسلوب کلی روش اجرای عملی این دو تست توسط هورابیک و مولندا (۲۰۰۵)، ترکیبی از روش‌های پیشنهاد شده توسط استاندارد Eurocode 1 و استاندارد ASTM است.

جدول ۲: خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده برای توده‌ی گندم بگرا در پنج سطح رطوبتی (هورابیک و مولندا، ۲۰۰۵)

رطوبت (%)	زاویه‌ی اصطکاک داخلی (بر حسب 0)	چسبندگی (بر حسب kPa)	مدول الاستیسیته (بر حسب MPa)	نسبت پواسون (بدون بعد)
۱۰	۲۵/۷ ± ۰/۳	۰/۹ ± ۰/۵	۲۲/۴ ± ۴/۶	۰/۲۲ ± ۰/۰۱
۱۲/۵	۲۶/۲ ± ۰/۴	۲/۸ ± ۰/۵	۲۲/۲ ± ۴/۴	۰/۱۸ ± ۰/۰۲
۱۵	۲۷ ± ۰/۵	۲/۱ ± ۰/۷	۱۹/۳ ± ۲/۵	۰/۲ ± ۰/۰۳
۱۷/۵	۳۳ ± ۱	۵/۱ ± ۰/۵	۱۷/۲ ± ۳/۶	۰/۲ ± ۰/۰۱
۲۰	۳۵/۵ ± ۰/۵	۲/۳ ± ۰/۹	۱۱/۱ ± ۱/۱	۰/۱۹ ± ۰/۰۱

جدول ۳: ابعاد میانگین و برخی از خواص فیزیکی دانه‌های گندم بگرا (هورابیک و مولندا، ۲۰۰۵)

رطوبت (%)	طول (mm)	عرض (mm)	ضخامت (mm)	جرم هزاردانه (gr)	وزن مخصوص (kN/m ³)
۱۰	۷/۶	۳/۲	۲/۹	۴۰/۵	۱۳/۸

با وجود مزیت‌های روش‌های تجربی، همواره هزینه و دشواری‌های موجود در آنها محققین را به مدلسازی و استفاده از روش‌های عددی سوق می‌دهد. اخیراً استفاده از تکنیک‌های مدلسازی مبتنی بر روش‌های گسسته مانند روش المان‌های مجزا (DEM) و بکارگیری راه‌کارهای مناسب محاسباتی، در این راستا کارساز شده است. دی‌رنزو و دی‌مایو به مقایسه‌ی سه مدل مکانیکی جهت شبیه‌سازی برخورد‌های الاستیک اصطکاکی در شبیه‌سازی‌های المان مجزایی پرداختند (Di Renzo & Di Maio, 2004). عباسپورفرد پدیده‌هایی همچون اصطکاک، لغزش، چرخش و برخورد دانه‌های محصولات کشاورزی مدل شده به روش MSM^۱ را با مقایسه نتایج روش المان‌های مجزا با نتایج تحلیلی، بررسی نمود (Abbaspur fard, 2004). کارهای انجام شده بر روی محصولات کشاورزی را می‌توان در دو دسته تقسیم بندی نمود، مدلسازی مواد بیولوژیکی نرم و مدلسازی مواد بیولوژیکی سفت. مدلسازی مواد بیولوژیکی نرم مانند کار رانگ^۲ و همکاران (۱۹۹۳) و یا کار ون‌زیبروک (۲۰۰۵) در شبیه‌سازی المان مجزایی آسیب میوه‌ها در حین حمل و نقل. مدلسازی مواد بیولوژیکی سفت مربوط به مدلسازی جریان دانه‌های انواع غلات و مواد به نسبت سفت‌تر می‌شود، که تا حدی مشابه با مواد معدنی و خاک‌ها هستند (VanZeebroeck, 2005). در مدل‌های المان

^۱ Multi Sphere Method

^۲ Rong

مجزایی بررسی شده توسط تریپودی^۱ و همکاران (۱۹۹۲) یک همسانی بین خاک‌ها و محصولات کشاورزی لحاظ شده است، به طوریکه از مدل‌های ساخته شده برای خاک‌ها جهت کمک به مدلسازی رفتار محصولات کشاورزی استفاده شده است. به عنوان مثال ژانگ^۲ و همکاران (۱۹۸۶) و همچنین لی^۳ و همکاران (۱۹۹۰) از مدل‌هایی که برای شن‌ها ساخته شده است برای شبیه‌سازی رفتار توده‌ی گندم استفاده کرده‌اند. نتایج بدست آمده برای دانه‌های گندم و عدس به نحوی بود که با شن و رس هم‌خوانی داشت. همچنین نتایج بدست آمده برای شکر و آرد بیشتر به رس شباهت داشت (Landry, 2005).

با این حال در بیشتر مدلسازی‌های انجام گرفته روی مواد دانه‌ای بیولوژیکی هیچ‌گاه پارامترهای ورودی مدل بر مبنای ماهیت بیولوژیک این مواد انتخاب نشده است. در واقع با بکارگیری مدل‌هایی که برای بررسی رفتار مواد دانه‌ای همچون خرده سنگ‌ها، ماسه‌ها و انواع خاک‌ها، همواره سعی شده است تا رفتار مواد دانه‌ای بیولوژیکی در یک شرایط مرزی خاص مدلسازی شود. هرچند که تحقیقات نشان می‌دهند که این مدل‌ها در پیش‌بینی رفتار مواد دانه‌ای بیولوژیکی موفقیت‌هایی نیز داشته‌اند. هدف عمده در این تحقیق مدلسازی تخصصی رفتار مکانیکی توده‌ی گندم بر اساس طبیعت مجزا و گسسته‌ی آن و در قالب روش المان‌های مجزای سه‌بعدی می‌باشد. در این مدلسازی توجه ویژه‌ای به ماهیت بیولوژیکی دانه‌ها یعنی اثر رطوبت دانه‌ها شده است.

۳. مواد و روش‌ها

در این تحقیق برای مدلسازی توده‌ی دانه‌های گندم از برنامه‌ی رایانه‌ای PFC^{3D} استفاده شده است. برای ساخت یک مدل از توده‌ی دانه‌های گندم لازم است که ترکیب مناسبی از خصوصیات، ویژگی‌ها و کمیت‌های مربوط به محیط واقعی دانه‌های گندم را فراهم ساخت. به طور کلی روش المان‌های مجزا با دو دسته از کمیت‌های خواص سروکار دارد: میکروخواص (مربوط به اجزای سازنده یا دانه‌ها) و ماکروخواص (مربوط به مجموعه‌ی دانه‌ها). در این مقاله میکروخواص پارامترهای ورودی مدل را تشکیل می‌دهند و در نهایت ماکروخواص‌های بدست آمده در تست‌های تجربی هورابیک و مولندا (۲۰۰۵)، (V, E, C, P)، از مدل استخراج می‌شوند. در این تحقیق سعی شده است که با استفاده از یک رهیافت کاملاً ابتکاری و برای نخستین بار، مهمترین ویژگی مواد دانه‌ای بیولوژیکی یعنی تأثیرپذیری از محتوای رطوبتی آنها، به عنوان یک پارامتر تعیین کننده در مدلسازی گنجانده شود. از طرفی داده‌های مربوط به خواص مکانیکی توده‌ی گندم که از تست‌های تجربی انجام شده توسط هورابیک و مولندا (۲۰۰۵) بدست آمده‌اند، همگی در پنج سطح رطوبتی در محدوده‌ی ۱۰ تا ۲۰ درصدی اندازه‌گیری شده‌اند. بنابراین بایستی به نحوی نقش میزان رطوبت در این محدوده را در مدلسازی مطالعه نمود. در ساخت هر مدل المان مجزایی سه قسمت اصلی

¹ Tripudi

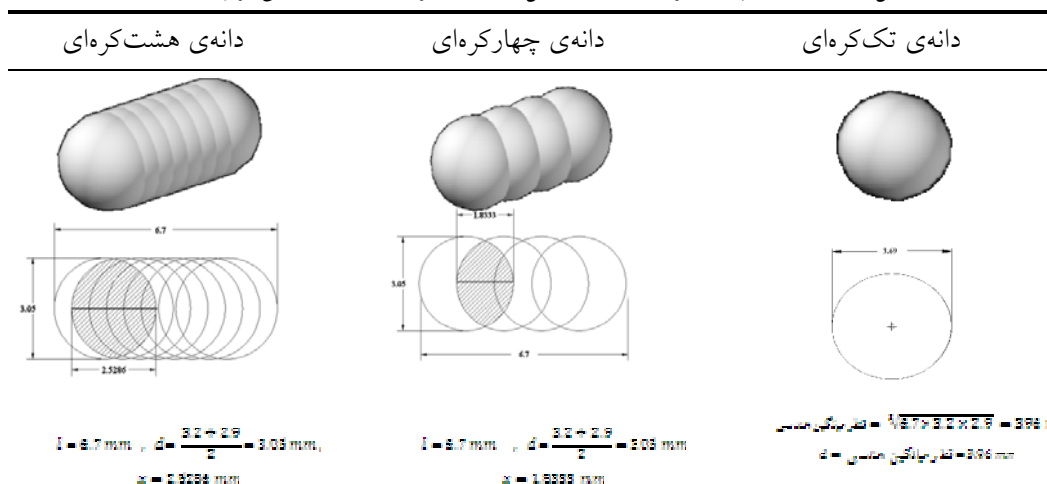
² Zhang

³ Li

وجود دارد که پارامترهای ورودی مدل با توجه به این قسمت‌ها تعیین می‌شوند. این سه عبارتند از: شکل دانه‌ها، مدل تماسی، شرایط مرزی.

مدل نمودن دقیق سطح خارجی یک دانه گندم مستلزم استفاده از هندسه‌ی بسیار پیچیده‌ای خواهد بود که می‌تواند سرعت محاسبات را به نحو چشمگیری کاهش دهد و یا کلاً روند اجرای برنامه را با مشکل مواجه سازد. بنابراین به مانند بسیاری از مدل‌های ساخته شده‌ی قبلی در زمینه‌ی مواد دانه‌ای، از روش MSM که از کره به عنوان ساده‌ترین سطح هندسی برای مدلسازی شکل ظاهری یک دانه گندم بهره می‌برد، استفاده شد. با فرض استوانه‌ای بودن شکل دانه‌های گندم، دانه‌های چندکره‌ای در سه دسته مدلسازی شدند. هر سه شکل دانه‌ها با توپ‌های برنامه‌ی PFC^{3D} و با استفاده از اصول دسته‌سازی توپ‌ها در این برنامه ساخته شدند (Itasca Manual, 2006). در شبیه‌سازی‌های آزمایشی انجام شده روی نمونه‌هایی که دانه‌های آن با بیش از هشت توپ ساخته شده بودند، مدت زمان لازم برای انجام تست‌ها به شدت افزایش می‌یافت و یا حتی گاهی امکان انجام این کار با رایانه‌های موجود مقدور نبود. به همین دلیل برای داشتن دانه‌های واقعی‌تر تنها به هشت توپ بسنده شد. از طرفی برای بررسی اثر تعداد توپ‌های بکار رفته در مدلسازی دانه‌های گندم روی رفتار مکانیکی توده‌ی آنها، دانه‌های چهارکره‌ای نیز برای این مهم انتخاب گردید.

شکل ۲: اشکال انتخاب شده برای شبیه‌سازی شکل دانه‌ها به همراه مشخصات هندسی مربوط به آنها



ماهیت برهم‌کنش مکانیکی بین دانه‌های گندم در برخوردها و تماس‌ها به صورت ویسکوالاستیک در نظر گرفته شده است. برای بررسی این ماهیت از شش مدل ساختاری استفاده شده است که ترکیبی از مدل‌های تماسی است. هریک از مدل‌های تماسی استفاده شده بخشی از ماهیت برهم‌کنش بین دانه‌ها را نشان می‌دهند. جزییات این مدل‌های تماسی را می‌توان در مرجع (Itasca Manual, 2006) یافت.

جدول ۴: مدل‌های ساختاری شش‌گانه

مدل‌های پیشنهادی	مدل‌های	مدل‌های تماسی			
		اتصال		الاستیک	
		تماسی	موازی	غیرخطی	خطی
اول	✓	✓	✓	-	✓
دوم	✓	-	✓	-	✓
سوم	-	-	✓	✓	✓
چهارم	-	✓	✓	✓	-
پنجم	✓	-	✓	-	✓
ششم	-	-	✓	✓	✓

انواع مدل‌های تماسی بکار رفته در این مدلسازی به همراه پارامترهای ورودی موردنیاز و نقش آنها در جدول ۵ به صورت خلاصه نشان داده شده است. مهمترین بخش در تعریف مدل تماسی، نحوه‌ی تخصیص مقدار به پارامترهای ورودی مدل‌های تماسی بر اساس میکروخواص‌ها است. از آنجا که توده‌ی مواد دانه‌ای بیولوژیکی به تأثیرات مستقیم میزان رطوبت در خواص دانه‌های آن برمی‌گردد، انتخاب میکروپارامترهای مدل (ردیف آخر جدول ۵) با توجه به رابطه‌ی آنها با میزان رطوبت دانه‌ها انجام گرفته است. این موضوع اساس و منطق رهیافت ابتکاری بکار گرفته شده در شبیه‌سازی سطوح رطوبتی می‌باشد. با توجه به اینکه خواص فیزیکی و مکانیکی اندوسپرم دانه‌های گندم به شدت به محتوای رطوبتی آنها بستگی دارد، با یافتن رابطه‌ی بین هر یک از این خواص با محتوای رطوبتی دانه‌های گندم و تخصیص میکروپارامترهای ورودی مدل بر این اساس، سطوح رطوبتی دانه‌های گندم نیز شبیه‌سازی شده است. بدین ترتیب برای نخستین بار یک مدل عددی قادر خواهد بود با ورودی‌های یکسان برای دانه‌های گندم، رفتار مکانیکی توده‌ی بیولوژیکی دانه‌های گندم را در سطوح رطوبتی مختلف دانه‌ها پیش‌بینی نماید.

جدول ۵: مدل‌های تماسی بکار رفته در شبیه‌سازی

مدل تماسی	الاستیک خطی	الاستیک غیرخطی	لغزشی	میرایی	اتصال موازی	اتصال تماسی
شمتیک مدل						

$\vec{F}_1 = \vec{F}_2 + \vec{F}_3$ $\vec{F}_1 = \vec{F}_2 + \vec{F}_3$	$\vec{F}_1 = \vec{F}_2 + \vec{F}_3$ $\vec{F}_1 = \vec{F}_2 + \vec{F}_3$	$\vec{F}_1 = \vec{F}_2 + \vec{F}_3$ $\vec{F}_1 = \vec{F}_2 + \vec{F}_3$	$\vec{F}_1 = \vec{F}_2 + \vec{F}_3$ $\vec{F}_1 = \vec{F}_2 + \vec{F}_3$	$\vec{F}_1 = \vec{F}_2 + \vec{F}_3$ $\vec{F}_1 = \vec{F}_2 + \vec{F}_3$	<p>روابط</p>
<p>این مدل‌ها بیشتر جنبه‌ی فرعی داشته و نقش عوامل لحاظ نشده و ناشناخته‌ی موجود در برهم‌کنش بین دانه‌های گندم را ایفا نمی‌کنند. بنابراین پارامترهای ورودی این مدل‌ها به نحوی تعریف شده‌اند که تنها در کنار اجرای اصلی مدل نهایی معنی‌دار باشند و به تنهایی قادر به تغییر رفتار توده‌ی مدل شده نباشند. عواملی که در برهم‌کنش بین دانه‌های گندم موجود بوده ولی در این مدل‌سازی لحاظ نشده‌اند، عواملی هستند که شاید مهمترین آنها ناشی از نیروهای چسبندگی باشد</p>	<p>برای رسیدن به یک حل حالت پایا در تعداد معقولی از گام‌های زمانی، این نوع میرایی به نحوی عمل می‌کند که تنها حرکت‌های شتاب‌دار را میرا نموده و نیروی میرا کننده را در خلاف جهت حرکتی دانه به آن وارد می‌نماید.</p>	<p>نشان دادن اثر اصطکاک بین سطوح دانه‌ها در حین برخورد و لغزش روی یکدیگر</p>	<p>نشان دادن ماهیت الاستیک غیرخطی در اتلاف انرژی بوجود آمده در برهم‌کنش بین دانه‌ها</p>	<p>نشان دادن ماهیت الاستیک خطی در اتلاف انرژی بوجود آمده در برهم‌کنش بین دانه‌ها</p>	<p>نقش مدل</p>
$\vec{F}_1 = \vec{F}_2 + \vec{F}_3$	$\vec{F}_1 = \vec{F}_2 + \vec{F}_3$	$\vec{F}_1 = \vec{F}_2 + \vec{F}_3$	$\vec{F}_1 = \vec{F}_2 + \vec{F}_3$	$\vec{F}_1 = \vec{F}_2 + \vec{F}_3$	<p>پارامترهای ورودی</p>

پارامترهای ورودی مورد نیاز که در سطر آخر جدول ۵ آمده‌اند را می‌توان از خواص فیزیکی و مکانیکی اندازه‌گیری شده برای دانه‌های گندم (یا به استناد تریپودی خواص مربوط به محصولات مشابه و یا حتی خواص مربوط به خاک) استخراج نمود. پارامترهای ورودی مذکور یا به صورت مستقیم از اندازه‌گیری‌ها بدست می‌آیند و یا از طریق روابطی که در مرجع (Landry,2005) به تفصیل به آن پرداخته شده است، بر مبنای یک سری خواص اندازه‌گیری شده محاسبه می‌شوند.

جدول ۶: میکروخواص مورد نیاز برای میکروپارامترهای ورودی مدل‌ها

خواص	رابطه با رطوبت	مرجع	سایر میکروپارامترهای حاصله
چگالی	$\rho_{d,moist}(\rho^*) = 0.8820M_1 + 0.884$ $V(\rho_{d,moist}^2) = 0.0033(M_1)^2 - 0.2420M_1 + 30.76$ $\rho_{d,moist}^2(\rho^*) = \frac{\rho_{d,moist}(\rho^*)^2}{V(\rho_{d,moist}^2)} \times 10^3$	المحاسنه و ربابه (۲۰۰۷)	
مدول الاستیسیته	$E_{d,moist}(E^*) = -0.1783M_1 + 4.403$	گلن (۱۹۹۱)	$\vec{K}_d = 4E_d \vec{R}_d, \vec{K}_{11} = \frac{1-\nu}{1-0.5\nu}$
نسبت پواسون	$\nu_{d,moist} = 1.8820M_1^{-0.111}$	بورویای (۲۰۰۸)	$\nu, \mu = \frac{\nu}{1-\nu}$
ضریب اصطکاک	$\mu_{d,moist} = 0.001 M_1^2 - 0.0183M_1 + 0.991$	اسنایدر و همکاران (۱۹۶۷)	
استحکام نرمال	$\sigma^*(M^*) = -3.88 M_1 + 107$	توکلی (۱۳۸۲)	$\vec{\sigma}_z = \frac{1}{1000} \sigma^*$
استحکام برشی	$\tau^*(M^*) = -0.252 M_1 + 97.4$	توکلی (۱۳۸۲)	$\vec{\tau}_z = \frac{1}{1000} \tau^*$
ثابت میرایی	ثابت (از روی مقدار بکار رفته در شبیه‌سازی خاک)	وندربلیند (۲۰۰۵)	
به صورت ضربی از شعاع توپ‌ها	به صورت ضریب از نیروهای نرمال و برشی بین توپ‌ها		به صورت ضریب از سختی مدل الاستیک

به هر حال در فرآیند مدل‌سازی، یک معیار کلی برای قابل قبول بودن مدل و شمول جزئیات در آن وجود ندارد و تنها می‌توان از راه تطبیق نتایج بدست آمده از مدل‌سازی با خصوصیات سیستم واقعی به این مهم دست یافت. بنابراین جهت تایید و ارزیابی مدل‌سازی صورت گرفته، از شرایط مرزی و روش‌های بارگذاری تعریف شده در تست‌های استاندارد انجام شده توسط هورابیک و مولندا (۲۰۰۵) برای تعیین شرایط بارگذاری و نوع تغییر شکل آنها استفاده گردید. برای نشان دادن برهم‌کنش بین دیواره‌ها با توپ‌های مجاور آنها، لازم است که خواص مکانیکی دیواره‌ها تعیین گردد. از طرفی در برنامه‌ی PFC^{3D}، در مدل‌های ساختاری الاستیک غیرخطی عیناً از خواص توپ‌ها برای دیواره‌ها استفاده می‌شود، در حالی که در مدل‌های الاستیک خطی یک دیواره نیز دقیقاً مانند یک توپ در تماس با توپ‌ها عمل می‌کند. بنابراین در مدل‌های الاستیک خطی سه کمیت سختی نرمال برابر با 2.0×10^6 ، سختی برشی برابر با 1.0×10^6 و ضریب اصطکاک برابر با ۰/۱ برای دیواره‌ها لحاظ شده است.

۴. نتایج و بحث

از شبیه‌سازی تعداد ۱۸۰ تست برش و فشار، برای چهار خصوصیت جریانی Φ ، E ، ϵ ، ν در حالت‌های ترکیبی از شکل-مدل ساختاری و سطوح رطوبتی پنج‌گانه، ۳۶۰ عدد بدست آمد. در جدول ۷ تنها داده‌های مربوط به Φ نشان داده شده است. برای انجام مقایسه با نتایج تجربی ارائه شده در جدول ۲ و جهت نتیجه‌گیری از داده‌های بدست آمده، از روش‌های آماری و چند نوع بررسی اولیه به صورت چهار گزینه‌ی ممیزی استفاده گردید. در نتایج تجربی نشان داده شده در جدول ۲ هر یک از مقادیر ν ، E ، ϵ ، Φ در هر سطح رطوبتی دارای یک مقدار میانگین و یک مقدار انحراف هستند، با کم و اضافه کردن مقدار انحراف از مقدار میانگین می‌توان یک محدوده‌ی قابل قبول برای آنها بدست آورد. بنابراین در هر بررسی می‌توان قرار داشتن داده‌های حاصل از شبیه‌سازی در محدوده‌ی قابل قبول متناظر را به عنوان یک گزینه ممیزی در نظر گرفت.

جدول ۷: مقادیر زاویه‌ی اصطکاک داخلی بدست آمده از شبیه‌سازی تست برش مستقیم بر حسب درجه

مدل ساختاری							شکل دانه‌ها	درصد	درجه
ششم	پنجم	چهارم	سوم	دوم	اول	ششم			
۲۸/۳۳۵	۲۵/۴۱۲	۳۶/۴۱۲	۲۸/۰۱۲	۳۶/۰۵۵	۲۷/۴۱۲	تک‌کره‌ای	۱۰ درصد	۳۰	
۳۰/۲۳۵	۳۳/۳۰۵	۳۰/۳۰۵	۳۰/۰۲۵	۳۲/۰۵۶	۳۱/۳۰۵	چهارکره‌ای			
۳۹۹۲۸	۲۴/۳۳۴	۲۵/۲۲	۲۵/۸۵۵	۲۹/۶۲۴	۲۵/۱۲۴	هشت‌کره‌ای			
۲۸/۶۸۸	۲۵/۹۲۳	۲۶/۶۲۳	۳۹۹۰۰	۲۶/۶۲۳	۲۷/۶۲۳	تک‌کره‌ای	۱۲/۵ درصد	۳۰	
۳۰/۳۶۱	۳۳/۸۷۲	۳۱/۲۰۲	۳۰/۳۶۸	۳۳/۱۶	۳۱/۲۰۲	چهارکره‌ای			
۲۵/۱۶۶	۲۵/۳۱۶	۲۵/۹۳۲	۲۶/۵۰۳	۳۰/۰۱۶	۲۵/۸۱۶	هشت‌کره‌ای			
۳۹۹۰۱	۲۷/۶۳۸	۲۸/۶۳۸	۲۸/۷۸۸	۲۸/۷۸	۲۸/۶۳۸	تک‌کره‌ای	۱۵ درصد	۳۰	
۳۱/۱۱۹	۳۴/۱۱۷	۳۳/۱۱۷	۳۰/۶۹۹	۳۳/۴۴۷	۳۳/۱۱۷	چهارکره‌ای			
۳۶/۱۱۲	۳۷/۱۷۷	۳۷/۲۳۵	۳۷/۹۹۹	۳۱/۱۳۵	۳۷/۰۳۵	هشت‌کره‌ای			
۳۲/۸۱۴	۳۰/۸۱۴	۳۲/۸۱۴	۳۲/۶۳۷	۳۱/۰۰۹	۳۱/۸۱۴	تک‌کره‌ای	۱۷/۵ درصد	۳۰	
۳۱/۹۸۸	۳۴/۷۵۱	۳۳/۰۵۱	۳۰/۹۸۸	۳۴/۳۲۱	۳۳/۷۵۱	چهارکره‌ای			
۳۳/۱۴۳	۳۲/۱۴۳	۳۳/۱۰۳	۳۱/۶۶۴	۳۳/۱۴۳	۳۱/۱۴۳	هشت‌کره‌ای			
۳۴/۴۰۹	۳۲/۲۰۹	۳۳/۲۰۹	۳۵/۶۱۱	۳۲/۰۱۱	۳۴/۲۰۹	تک‌کره‌ای	۲۰ درصد	۳۰	
۳۲/۱۹۹	۳۵/۴۰۷	۳۳/۴۰۷	۳۱/۱۹۹	۳۵/۱۵۵	۳۴/۴۰۷	چهارکره‌ای			
۳۵/۳۲۱	۳۵/۵۹۱	۳۴/۵۹۱	۳۴/۷۹۱	۳۶/۸۱۱	۳۶/۵۹۱	هشت‌کره‌ای			

جدول ۸: تعداد پیش‌بینی‌های قابل قبول انجام شده در هر سطح رطوبتی
 جدول ۹: تعداد پیش‌بینی‌های قابل قبول انجام شده در هر یک از اشکال انتخاب شده

شماره	چهارگرای	تک‌گرای	تعداد پیش‌بینی‌های قابل قبول انجام شده در هر سطح رطوبتی			طوبتی مکانیکی
			۱۰٪	۱۲/۵٪	۱۵٪	
۱	۳	۵	۴	۳	۶	۲
۲	۴	۹	۵	۱	۱۰	۶
۳	۱۹	۲۰	۱۴	۹	۱۸	۱۸
۴	۱۴	۶۱	۶	۱۸	۱۲	۳
۵	۴۰	۵۰	۲۹	۳۱	۴۶	۲۹

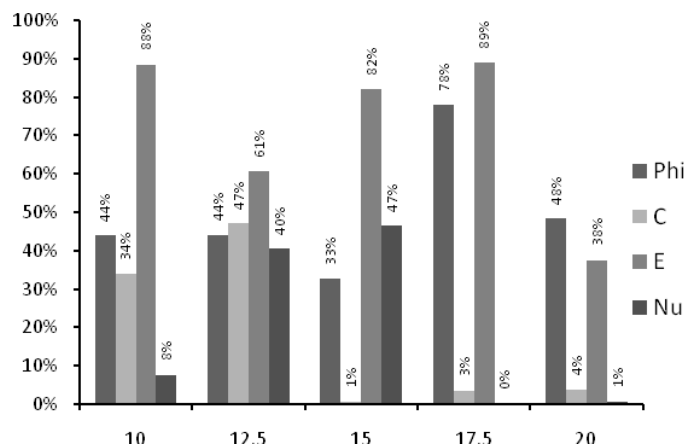
جدول ۱۰: تعداد پیش‌بینی‌های درست انجام شده توسط هر یک از مدل‌های ساختاری

شماره	مدل ساختاری					خواص مکانیکی
	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	
۱	۲	۳	۳	۵	۵	ویه‌ی اصطکاک داخلی
۲	۶	۲	۴	۶	۱	چسبندگی
۳	۱۱	۸	۱۲	۱۲	۹	مدول الاستیسیته
۴	۸	۶	۴	۹	۹	نسبت پواسون
۵	۲۷	۱۹	۳۲	۳۲	۲۴	مجموع

همچنین از سطح احتمال بدست آمده از آزمون تی-استودنت^۱ نیز در این بررسی‌ها استفاده شده است. به عنوان مثال برای بررسی میزان توفیق مدل‌های ساخته شده با دانه‌های هشت‌گرای در پیش‌بینی σ_c در سومین سطح رطوبتی، لازم است که یک مجموعه از داده‌ها (نهمین ردیف جدول ۷) با عدد میانگین μ مربوط به سومین سطح رطوبتی در جدول ۲ مقایسه شود. با محاسبه آماره‌ی t این احتمال بدست می‌آید. در شکل ۳ نمودار مقادیر میانگین این احتمالات برای هر یک از چهار خصوصیت در پنج سطح رطوبتی مورد بحث نشان داده شده است. قابل ذکر است که هر یک از ستون‌های نمودار شکل ۳ معرف میانگین سطح احتمال سه حالت مختلف بوده و به همین جهت مقادیر بسیار پایینی نیز در آنها به چشم می‌خورد.

شکل ۳: نمودار مقادیر میانگین‌گیری شده‌ی احتمالات پیش‌بینی درست در هر سطح رطوبتی

^۱ t-student



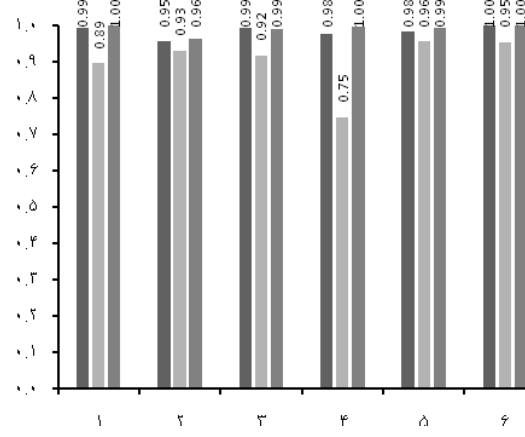
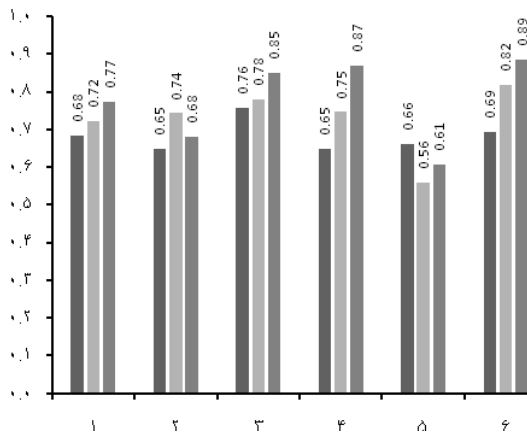
همبستگی پیرسون^۱ روش آماری دیگری است که در این مقایسه‌ها به عنوان یک گزینه ممیزی بکارگرفته شد. به عنوان مثال برای مقایسه روند تغییرات داده‌های Φ بدست آمده از شبیه‌سازی با چهارمین مدل ساختاری (در هر سه شکل دانه‌ها) نسبت به سطوح رطوبتی، با روند تغییرات نتایج متناظر تجربی. این ضرایب در شکل ۴ به صورت نمودارهای ستونی نشان داده شده است.

با بررسی همزمان این نتایج می‌توان میزان توفیق این مدل‌سازی را در شبیه‌سازی رفتار مکانیکی توده‌ی دانه‌های گندم به واسطه تعیین خواص مکانیکی آن بررسی نمود. با توجه به جدول ۸ می‌توان امیدوار بود که با استفاده از رهیافت بکار رفته در شبیه‌سازی سطوح رطوبتی، می‌توان هر یک از چهار خصوصیت جریانی توده‌ی گندم را در پنج سطح رطوبتی ۱۰، ۱۲/۵، ۱۵، ۱۷/۵ و ۲۰ درصد به درستی پیش‌بینی نمود. البته برای دستیابی به این مهم لزوماً از حالت ترکیبی شکل‌دانه-مدل‌ساختاری یکسانی استفاده نخواهد شد و برای پیش‌بینی درست رفتار جریانی توده‌ی گندم در این سطوح رطوبتی لازم است که در انتخاب شکل و مدل ساختاری دانه‌ها دقت نمود.

در مورد شبیه‌سازی سطوح رطوبتی و صرف‌نظر از شکل و مدل ساختاری انتخاب شده برای دانه‌ها چندین نکته قابل استنتاج است. در مدل‌سازی توده‌ی گندم در پنج سطح رطوبتی، خصوصیات جریانی حاصل از تست فشار بهتر از خصوصیات حاصل از تست برش پیش‌بینی می‌شوند. در بین سطوح رطوبتی شبیه‌سازی شده، امکان پیش‌بینی درست و هم‌زمان چهار خصوصیت جریانی توده‌ی گندم در سطح رطوبتی ۱۲/۵ درصد به نسبت سایر سطوح رطوبتی بیشتر است.

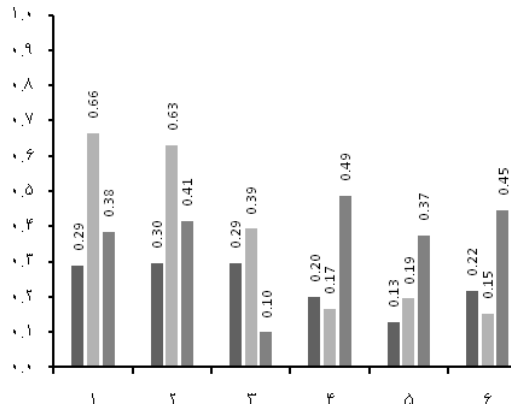
شکل ۴: ضرایب همبستگی بین مقادیر خواص تجربی و داده‌های متناظر حاصل از شبیه‌سازی در حالت‌های ترکیبی شکل-مدل ساختاری (■ چهارکره‌ای، ■ هشت‌کره‌ای، ■ تک‌کره‌ای - محور عمودی: ضریب همبستگی، محور افقی: مدل‌های ساختاری)

^۱ Pearson Correlation

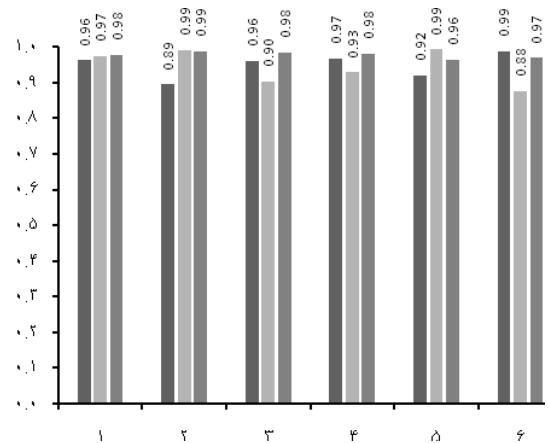


ب - چسبندگی

الف - زاویه اصطکاک داخلی



د - نسبت پواسون



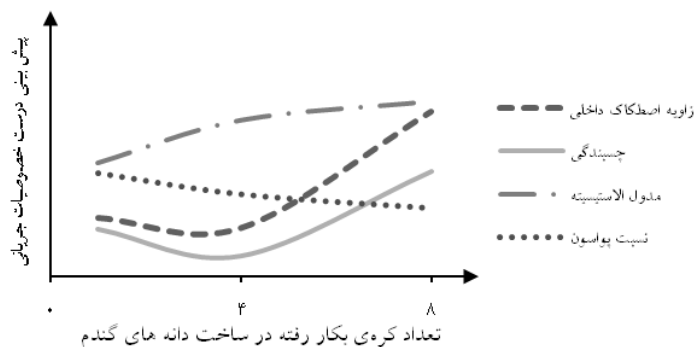
ج - مدول الاستیسیته

کمترین امکان مذکور مربوط به سطح رطوبتی ۲۰ درصد می‌باشد. پیش‌بینی چسبندگی توده‌ی گندم در سطوح رطوبتی پایین‌تر (۱۰ و ۱۲/۵ درصد) بهتر انجام می‌گیرد، در حالیکه نسبت پواسون در سطوح رطوبتی میانی (۱۲/۵ و ۱۵ درصد) بهتر بدست می‌آید. پیش‌بینی مدول الاستیسیته و زاویه‌ی اصطکاک داخلی توده‌ی گندم در تمام سطوح رطوبتی تقریباً یکسان انجام می‌شود. در مجموع نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی پنج سطح رطوبتی، مدول الاستیسیته‌ی توده‌ی گندم بسیار بهتر از سایر خصوصیات پیش‌بینی می‌شود. همچنین بدترین نتایج بدست آمده مربوط به چسبندگی توده‌ی گندم می‌باشد.

به طور کلی مدل کردن شکل دانه‌های گندم به روش چندکره‌ای و با فرض استوانه‌ای بودن دانه‌های گندم به پیش‌بینی درست رفتار مکانیکی توده‌ی دانه‌های گندم کمک می‌کند، مشروط بر اینکه نسبت هم‌پوشانی کره‌های سازنده‌ی دانه‌های گندم در حدی نباشد که تاثیرات منفی اصطکاک کاذب بوجود آمده در اثر ناهم‌واری‌های سطوح

خارجی دانه‌ها، غالب شود. به طوریکه دانه‌های هشت‌کره‌ای نتایج به مراتب بهتری را در پیش‌بینی رفتار مکانیکی واقعی توده‌ی گندم نشان داده‌اند. این مطلب نتایج حاصل از تحقیقات عباسپورفرد (۲۰۰۷) را تایید می‌کند. تقریباً می‌توان گفت که دانه‌های تک‌کره‌ای در پیش‌بینی رفتار مکانیکی توده‌ی گندم بهتر از دانه‌های چهارکره‌ای عمل می‌کنند. به طوریکه دانه‌های تک‌کره‌ای و دانه‌های چهارکره‌ای تنها در پیش‌بینی مدول الاستیسته‌ی توده‌ی گندم با هم برابری می‌کنند. با افزایش تعداد کره‌های بکار رفته در ساخت دانه‌های گندم، روند بهتر شدن یا بدتر شدن پیش‌بینی هر یک از چهار خصوصیت جریان‌ی با هم متفاوت می‌باشد. به طوریکه پیش‌بینی خصوصیات جریان‌ی بدست آمده از شبیه‌سازی تست برش (زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی) در دانه‌های تک‌کره‌ای نسبت به دانه‌های چهارکره‌ای بهتر انجام شده و دانه‌های هشت‌کره‌ای نسبت به دانه‌های تک‌کره‌ای پیش‌بینی‌های بهتری را بدست می‌دهند. در حالیکه پیش‌بینی‌های انجام شده برای خصوصیات بدست آمده از تست‌های فشار رابطه‌ی مستقیم و یا عکس با تعداد کره‌های بکار رفته در ساخت دانه‌های گندم را نشان می‌دهند. به طوریکه با زیاد شدن تعداد کره‌های بکار رفته در ساخت دانه‌های گندم، پیش‌بینی مدول الاستیسته و نسبت پواسون به ترتیب بهتر و بدتر می‌شود (شکل ۶-۱).

شکل ۵: تاثیر تعداد کره‌های بکار رفته در ساخت دانه‌های گندم روی پیش‌بینی رفتار توده‌ی آنها



غیرخطی دانستن ماهیت الاستیک موجود در تماس‌های موجود بین دانه‌های گندم، موجب پیش‌بینی بهتر رفتار مکانیکی توده‌ی گندم می‌شود. هرچند که برخی از نتایج بدست آمده حاکی از این است که مدل‌های ساختاری الاستیک خطی در پیش‌بینی مدول الاستیسته‌ی توده‌ی گندم موفق‌تر عمل می‌کنند. بدون شک استفاده از مدل‌های اتصالی، کمک شایانی به بهبود پیش‌بینی خواص مکانیکی حاصل از تست فشار توده‌ی گندم، می‌کند. بیشترین تاثیر نامطلوب استفاده از مدل اتصال تماسی به جای مدل لغزشی در پیش‌بینی چسبندگی توده‌ی گندم مشاهده شده است. همچنین استفاده از همزمان مدل لغزشی و مدل اتصال موازی، موجب پیش‌بینی بهتر خواص مکانیکی حاصل از تست فشار (مدول الاستیسته و نسبت پواسون) می‌شود. نهایتاً استفاده از مدل‌های اتصالی به خصوص اتصالات موازی سبب بهبود نتایج شبیه‌سازی‌ها خواهد شد.

۵. نتیجه‌گیری کلی

بهترین حالت‌های ترکیبی (مدل ساختاری-شکل دانه) برای پیش‌بینی هر یک از چهار خصوصیت جریانی توده‌ی گندم به این ترتیب می‌باشد:

۱. دانه‌های هشت‌گه‌ای در قالب چهارمین مدل ساختاری برای پیش‌بینی زاویه‌ی اصطکاک داخلی توده‌ی گندم
۲. دانه‌های هشت‌گه‌ای در قالب ششمین مدل ساختاری برای پیش‌بینی چسبندگی توده‌ی گندم
۳. دانه‌های هشت‌گه‌ای در قالب مدل سومین ساختاری برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته‌ی توده‌ی گندم
۴. دانه‌های چهارگه‌ای در قالب اولین مدل ساختاری برای پیش‌بینی نسبت پواسون توده‌ی گندم

در مجموع بررسی‌های انجام شده، حالت ترکیبی دانه‌های هشت‌گه‌ای در قالب چهارمین مدل ساختاری به عنوان بهترین حالت ترکیبی (مدل ساختاری-شکل دانه) برای پیش‌بینی خواص مکانیکی توده‌ی گندم شناخته شد. همچنین بکارگیری دانه‌های چهارگه‌ای با پنجمین مدل ساختاری، ضعیف‌ترین حالت ترکیبی (مدل ساختاری-شکل دانه) را بوجود می‌آورد.

۶. منابع

توکلی هشجین، تیمور. ۱۳۸۲. مکانیک محصولات کشاورزی. (ترجمه). انتشارات سالکان.

Abbaspour-Fard, M.H. 2004. Theoretical Validation of a Multi-sphere, Discrete Element Model Suitable for Biomaterials Handling Simulation. *Biosystems Engineering*, 88(2): 153-161

Al Mahasneh, M.A. and Rababah, T.M. 2007. Effect of moisture content on some physical properties of green wheat. *Journal of Food Engineering* 79 : 1467-1473.

ASTM-D6128. 2000. Standard Test Method for Shear Testing of Bulk Solids Using the Jenike Shear Cell. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

Burubai, W., Amula, E., Davies, R.M., Etekpe, G.W.W. and Daworiye, S.P. 2008. Determination of Poisson's ratio and elastic modulus of African nutmeg. *Int. Agrophysics*, 22: 99-102.

Di Renzo, A. and Di Maio, F.P. 2004. Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes. *Chemical Engineering Science*, 59: 525-541.

Glenn, G.M., Younce, F.L. and Pitts, M.J. 1991. Fundamental physical properties characterizing the hardness of wheat endosperm. *Journal of Cereal Science*, 13: 179-194.

Itasca manual, 2006. PFC^{3D} User's Manual, Version 3.1., Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, US

Landry, H. 2005. Numerical modelling of machine-product interactions in solid and semi solid manure handling and land application. University of Saskatchewan, Saskatoon.

Horabik, J and Molenda, M. 2005. Mechanical properties of granular agromaterials and food powders for industrial practice Part1: Characterization of mechanical properties of particulate solids for storage and handling. Lublin.

Tijksens, E., Ramon, H. and DeBaerdemaeker, J. 2001. Development of an object oriented extensible toolkit for efficient DEM simulation (DEMeter++), Proceedings of the Fourth International Conference on Mathematical Modelling and Simulation in Agro and Bio Industries, Haifa, Israel, : 12-14.

Van Zeebroeck, M. 2005. The Discrete Element Method (DEM) to Simulate Fruit Impact Damage during Transport and Handling. Phd dissertation. Katholieke Universiteit Leuven Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen.