یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک
بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران

شبیه‌سازی صدمات ارتعاشی حین حمل‌ونقل در سیب رقم گلدن دلیشز با استفاده از روش المان مجزا

مهدی خدائی[1]، سید صادق سیدلو[2]

[1]دانشجوی دکتری، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز؛Mehdi.khodaei.63@tabrizu.ac.ir
[2]دانشیار، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز؛ Seyyedlu@tabrizu.ac.ir

چکیده

هرساله مقادیر زیادی از محصولات کشاورزی به دلیل صدمات مکانیکی که مهمترین آن کوفتگی می‌باشد، از بین می‌روند. روش المان مجزا به‌عنوان یکی از روش‌های عددی توانسته است که توانایی خود را در شبیه‌سازی رفتار ذرات منفرد ازجمله مواد کشاورزی مانند میوه‌ها به‌خوبی نشان دهد. به همین منظور تحقیق حاضر باهدف شبیه‌سازی صدمات کوفتگی ناشی از ارتعاش در میوه سیب رقم گلدن دلیشز با استفاده از روش المان مجزا انجام گردید و برای اعتبارسنجی آن از داده‌های تجربی به‌دست‌آمده از تست‌های آزمایشگاهی استفاده گردید. اثر پارامترهای دینامیکی از قبیل فرکانس ارتعاش (۱۰/۵، ۵ و ۴ هرتز)، شتاب ارتعاش (۰/۷ و ۰/۳۵ جی) و موقعیت قرارگیری میوه درون جعبه (لایه زیرین، وسط و بالا) بر روی عمق کوفتگی سیب موردبررسی و تحلیل آماری قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که بین نتایج شبیه‌سازی‌های المان مجزا و داده‌های تجربی مطابقت بسیار خوبی (۹۴-۸۲ درصد) وجود دارد و روش المان مجزا توانست صدمات ارتعاشی را در میوه سیب شبیه‌سازی نماید. همچنین نتایج نشان داد هر سه پارامتر موردبررسی فرکانس، شتاب و موقعیت میوه درون جعبه تأثیر معنی‌داری بر روی عمق کوفتگی سیب دارند ($P<0.01$). در هر دو حالت تجربی و شبیه‌سازی شده، فرکانس ۴ هرتز و شتاب ۰/۷ جی بیشترین صدمات را ایجاد کرده بودند و میوه‌هایی که در بالاترین لایه قرار داشتند بیشتر از لایه‌های وسط و زیرین دچار کوفتگی شده بودند.

کلمات کلیدی: صدمات مکانیکی، روش المان مجزا، سیب، کوفتگی، حمل‌ونقل

Simulation of Golden Delicious Apple Vibration Damage during Transportation Using Discrete Element Method

Mehdi Khodaei, Seyed Sadegh Seyyedlou

PhD student, Agricultural Faculty of Tabriz University, Mehdi.khodaei@tabrizu.ac.ir
Associate professor, Agricultural Faculty of Tabriz University, Seyyedlu@tabrizu.ac.ir

ABSTRACT

Large amounts of agricultural crops decayed annually due to mechanical damages, the most important of which is bruising. Discrete element method (DEM) as one of the numerical methods has shown its ability to simulate the behavior of individual particles, including agricultural materials such as fruits. Therefore, this research conducted to simulate bruising damages of Golden Delicious apple cultivar due to vibrations using the discrete element method, and experimental data obtained from laboratory tests used to validate the simulations. The effect of vibration parameters such as frequency (4, 5 and 10.5 Hz), acceleration (0.7 and 0.35 g) and fruit position in the box (bottom, middle and upper layer) on apple bruising depth were evaluated. The results of this study showed that there is a good agreement (82-94%) between the discrete element results and the experimental tests, and discrete element method was able to simulate the vibrational damage in the apple fruit. In addition, the results indicated that all three parameters of frequency, acceleration and position of fruit in the box at significantly affect the depth of apple bruising ($P<0.01$). For both simulated and experimental tests, vibration with a frequency of 4 Hz, and acceleration of 0.70 g caused higher damage levels and fruits located at the top of the bin showed more damage than those in middle and bottom positions.

Keywords: Mechanical Damage, Discrete Element Method (DEM), Apple, Bruising, Transportation

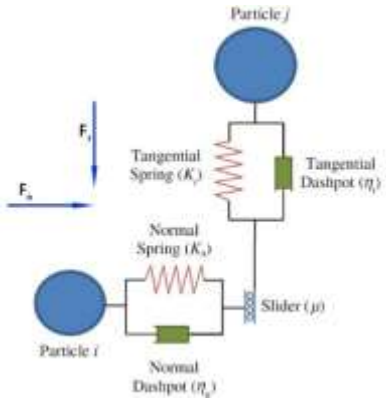
۱- مهدی خدائی، نشانی: آذربایجان شرقی، تبریز- دانشگاه سراسری تبریز- دانشکده کشاورزی- گروه مهندسی بیوسیستم- تلفن: ۰۹۳۵۳۹۱۰۱۷۱

۱- مقدمه

هر ساله مقدار بسیار زیادی از محصولات زراعی و باغی در فرآیندهای پس از برداشت و حمل‌ونقل دچار افت کیفیت می‌گردد، به‌طوری‌که تقریباً ۳۰ الی ۴۰ درصد از محصولات کشاورزی به دلیل صدمات وارده در طول مسیر هرگز به دست مشتری نمی‌رسند (Vigneault et al., 2009). دلیل این امر این است که محصولات زراعی و باغی پس از برداشت، تحت بارگذاری‌های مکانیکی مختلف استاتیکی (فشار) و دینامیکی (ضربه و ارتعاش) ناشی از حمل‌ونقل، درجه‌بندی و فرآوری قرار می‌گیرند که منجر به ایجاد صدمات مکانیکی در محصولات می‌شوند. کوفتگی شایع‌ترین صدمه مکانیکی در افزایش تلفات محصولات باغی است (Opara & Pathare, 2014). به همین دلیل برآورد کمّی از مقدار کوفتگی محصول، هم برای تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان به جهت تشخیص کیفیت میوه و هم برای محققین برای بهبود سیستم‌های حمل‌ونقل میوه اهمیت دارد. برخی تحلیل‌های کمّی از صدمات مکانیکی با استفاده از پارامترهایی نظیر قطر، مساحت و یا حجم منطقه آسیب‌دیده انجام‌شده است (Li & Thomas, 2014)، محققین متعددی نیز از مدل‌های آماری و تحلیلی مختلف برای پیش‌بینی کوفتگی استفاده کرده‌اند (Abedi & Amadi, 2013; Zarifneshat et al., 2010; VanZeebroeck et al., 2007).

بارگذاری‌های دینامیکی مسبب بیشترین صدمات کوفتگی هستند، زیرا نیروهای دینامیکی مانند ارتعاش در حین حمل‌ونقل، ازنظر اندازه بزرگ‌تر از نیروهای استاتیکی بوده و میزان فراوانی بروز آن‌ها نیز بیشتر از نیروهای استاتیکی هست (VanZeebroeck et al., 2005; Mohsenin, 1986). کارهای تحقیقاتی تجربی متعددی تاکنون درزمینهٔ بررسی صدمات ناشی از ارتعاش در حین و حمل‌ونقل انجام‌گرفته است که هرچند این پژوهش‌های تجربی دید بسیار خوبی را نسبت به عواملی که صدمات ارتعاشی را ایجاد می‌کنند به دست می‌دهد ولی نتایج متناقض زیادی نیز گزارش‌شده است؛ بعلاوه باوجود تحقیقات تجربی گسترده مدل‌های شبیه‌سازی اندکی توسعه داده‌شده‌اند. با گسترش سریع علوم کامپیوتر استفاده از روش‌های عددی در کنار روش‌های تجربی بیشتر موردتوجه قرارگرفته است. یکی از این تکنیک‌های عددی روش المان مجزا است که در آن سیستم تحت مطالعه به صورت مجموعه‌ای از ذرات جدا از هم در نظر گرفته می‌شود (Raji & Favier, 2004). ازنظر فیزیکی ذرات در این روش به‌صورت اجسام صلب و برخورد بین آن‌ها به‌صورت تماس نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شوند و تغییر شکل ذرات به‌صورت همپوشانی مجازی بین دو ذره بیان می‌شود و نیروهای حاصل از برخورد بین دو ذره توسط مدل‌های نیروی برخورد با همپوشانی مجازی متناظر آن‌ها مرتبط هستند (Tijskens et al., 2003). نیروهای عمل‌کننده بین دو ذره بعد از شناسایی برخورد و با توجه به مدل‌های نیروی برخورد نرمال و مماسی که قبلاً برای سیستم تعریف‌شده محاسبه می‌گردد و سپس باهم ترکیب شده و با انتگرال‌گیری از معادلات حرکت نیوتن (برای حرکت خطی) و معادلات اویلر (برای حرکت چرخشی) سرعت و موقعیت ذرات در بازه زمانی بعد محاسبه می‌شود (VanZeebroeck et al., 2006). در روش المان مجزا تعیین میزان همپوشانی مجازی بین دو ذره در حال تماس به‌وسیله مدل‌های نیروی برخورد تعریف شده انجام می‌گیرد، به‌عبارت‌دیگر مدل‌های نیروی برخورد بخش اساسی مدل‌سازی المان مجزا را تشکیل می‌دهند. مدل‌های نیروی برخورد به‌طور اساسی در دو گروه، نیروهای نرمال (F_n) و نیروهای مماسی (F_t) دسته‌بندی می‌شوند (Dintwa et al., 2005). در شبیه‌سازی به روش المان مجزا اکثر مدل‌ها شامل یک بخش سفتی و یک بخش مستهلک کننده می‌باشد که به‌صورت موازی باهم قرار دارند. در مدل نیروی مماسی علاوه بر اجزای مذکور یک جزء اصطکاکی نیز به‌صورت سری با بخش‌های سفتی و مستهلک کننده وجود دارد (شکل ۱). مزیت عمده روش المان مجزا نسبت به روش‌های تجربی این است که این روش بسیار قابل انعطاف است بطوریکه با تغییرات جزئی در پارامترهای مؤثر بر مدل می‌توان نتایج متفاوتی به دست آورد درحالی‌که در مدل‌های آزمایشگاهی اجرای این کار نیازمند صرف وقت و هزینه زیاد خواهد بود. علاوه بر این، در مدل‌های عددی اطلاعات متعدد و زیادی مثل سرعت، شتاب، موقعیت و نیروهای برخوردی در هر المان را می‌توان از داخل سیستم در هر زمان دلخواه استخراج کرد ولی در مدل‌های تجربی این کار اگر ناممکن نباشد بسیار مشکل خواهد بود.

استفاده از تکنیک المان مجزا درزمینه‌ی تحقیقات کشاورزی تاکنون بسیار محدود بوده است و خصوصاً درزمینه‌ی شبیه‌سازی صدمات مکانیکی میوه‌ها تحقیقات انگشت‌شماری وجود دارد و موضوع نسبتاً جدیدی به شمار می‌رود. بیشترین استفاده از روش المان مجزا در تحقیقات کشاورزی مربوط به شبیه‌سازی جریان حرکت مواد گرانوله کشاورزی مانند غلات در سیلوها و مسیرهای انتقال (Holst & Rotter, 1999; Rong et al., 1995) و جدا کردن دانه‌ها به‌وسیله لرزاننده (Sakaguchi et al., 1998) بوده است. باید توجه داشت اکثر مواد بیولوژیک و کشاورزی رفتار ویسکوالاستیک از خود بروز می‌دهند و به همین دلیل مدل‌سازی المان مجزا در آن‌ها نسبت به مواد الاستیک امری پیچیده‌تر می‌باشد. از معدود تحقیقاتی که درزمینهٔ شبیه‌سازی کوفتگی در میوه‌ها (ناشی از ارتعاشات حین حمل‌ونقل) انجام‌گرفته می‌توان به تحقیق رانگ و همکاران (۱۹۹۳) و راجی و فاویر (۲۰۰۲) اشاره کرد. رانگ و همکاران (۱۹۹۳) کوفتگی ناشی از ارتعاشات گذرای (شوک‌ها) به وجود آمده از ناهمواری‌های جاده بر روی میوه سیب را با استفاده از روش المان مجزا شبیه‌سازی کردند. در این شبیه‌سازی که به‌صورت دو بعدی بر روی ۱۲ عدد سیب (سه ردیف چهارتایی) انجام گرفته، اثر شوک‌های ناشی از ناهمواری‌های جاده روی نیروهای اعمالی بین سیب‌ها مورد آزمون قرار گرفت و اثرات سیستم تعلیق، سطح جاده و نوع بسته‌بندی روی نیروی وارده به میوه‌ها بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد روش المان مجزا قادر است نیروی متقابل



شکل ۱-شماتیک کلی مدل‌سازی نیروهای برخورد بین دو ذره در روش المان مجزا، F_n مؤلفه نیروی عمودی، F_t مؤلفه نیروی مماسی، K_n عنصر فنر نیروی برخورد عمودی، η_n عنصر مستهلک کننده نیروی برخورد عمودی، K_t عنصر فنر نیروی برخورد مماسی، η_t عنصر مستهلک کننده نیروی برخورد مماسی، μ عنصر اصطکاک

Fig. 1. General Schematic of Contact Forces Modeling Between Two Particles in Discrete Element Method, F_n, Normal Force Component, F_t, Tangential Force Component, K_n, Spring Element of Vertical Normal Force, K_t, Spring Element of Tangential Contact Force, η_t, Dashpot Element of Tangential Contact Force, μ, Friction Element

را برای هر نوع بسته‌بندی میوه پیش‌بینی کند، یا به‌عبارت‌دیگر، روش المان مجزا می‌تواند نتایج تحقیقات تجربی را دوباره سازی نماید (شبیه‌سازی کند) و به طراحی سیستم‌های بسته‌بندی میوه بهتر در جهت حمل‌ونقل با ریسک کم کمک کند. از کاستی‌های تحقیق رانگ و همکاران (۱۹۹۳) می‌توان به سادگی بیش از مدل (استفاده از شبیه‌سازی دو بعدی، تعداد میوه‌های بسیار کم و پارامترهای نادقیق) اشاره کرد. وان زیبروک و همکاران (۲۰۰۵) نیز از این روش برای پیش‌بینی صدمات ناشی از ضربه سیب رقم جاناگولد استفاده کردند. برای این منظور برنامه‌ای به نام DEMeter++ با زبان برنامه‌نویسی C++ کد نویسی گردید که در آن مشخصات فیزیکی و مکانیکی میوه سیب و جعبه و همچنین مدل‌های پیش‌بینی کوفتگی و مدل‌های نیروی برخورد بعد از تعیین از طریق روش‌های آزمایشگاهی و مدل‌های تجربی به‌عنوان پارامترهای ورودی برنامه جهت شبیه‌سازی وارد گردید و از عمق کوفتگی سیب (تنها پارامتری که در روش المان مجزا می‌توان به‌عنوان معیار اعتبار سنجی استفاده نمود) به‌عنوان معیاری برای تعیین دقت شبیه‌سازی‌ها استفاده نمودند. درنهایت، اعتبار سنجی مدل نشان داد که روش المان مجزا می‌تواند کوفتگی سیب را در حد قابل قبولی برحسب عمق کوفتگی پیش‌بینی کند. ون زیبروک و همکاران (۲۰۰۶) در تحقیق دیگری نیز تأثیر پارامترهای مکانیکی (فرکانس ارتعاش، مقدار شتاب، اندازه میوه و ارتفاع توده میوه در کانتینر) و خصوصیات میوه (تاریخ برداشت، دما و سفتی آکوستیک) را بر روی صدمات ارتعاشی سیب واریته جوناگولد بررسی کردند. ایشان از جعبه‌ای با ابعاد ۱*۰/۲۰*۰/۲۰ متر و ۱۰۰ عدد ذره (سیب) با شعاع ۰/۰۳۲۵ در درون این جعبه به همراه موج سینوسی عمودی با شتاب ثابت ۱/۴ جی برای شبیه‌سازی استفاده کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند فرکانس‌های پایین‌تر از ۵ هرتز با فاصله زیاد بیشترین تأثیر را ایجاد کوفتگی در سیب ایفا می‌کنند و فرکانس‌های بالاتر از ۵ هرتز منجر به کوفتگی‌های مرئی در سیب نمی‌شود و در این محدوده فرکانسی حتی در شتاب‌های بالاتر از ۱/۴ جی منجر به کوفتگی قابل مشاهده نخواهد شد. استفاده از شتاب‌های بالا که به‌ندرت در حین حمل‌ونقل در شرایط جاده اتفاق می‌افتند و همچنین استفاده از جعبه غیرتجاری در تست‌ها از معایب این تحقیق به شمار می‌رود.

همان‌طور که قبلاً اشاره گردید بیشتر مواد و محصولات کشاورزی رفتار ویسکوالاستیک از خود بروز می‌دهند، به همین دلیل یکی از مناسب‌ترین مدل‌های نیروی برخورد نرمال که برای نشان دادن رفتار میوه‌ها مورداستفاده قرار گرفته است مدل کوبارو- کونو (۱۹۸۷) می‌باشند (VanZeebroeck et al., 2003). مدل کوبارا-کونو به‌صورت معادله (۱) بیان می‌شود:

$$F_n = k\delta^{\frac{3}{2}} + c\delta^{\frac{1}{2}}\dot{\delta} \qquad (۱)$$

که در آن F_n، نیروی برخورد نرمال (N)؛ k، سفتی فنر ($N.m^{-3/2}$)؛ c، مستهلک کننده ($kg.m^{-1/2}.s^{-1}$)؛ δ، تغییر شکل (m) و $\dot{\delta}$، نرخ تغییر شکل (m/s) می‌باشد. برای استفاده از این مدل در روش المان مجزا ابتدا لازم است تا پارامترهای سفتی و مستهلک کننده محاسبه شوند. برای تعیین این پارامترها به‌طور معمول از دستگاه ضربه پاندولی استفاده می‌گردد. نحوه اندازه‌گیری این پارامترها قبلاً توسط محققین پیشین به تفصیل بیان شده است (Zarifneshat et al., 2010; VanZeebroeck et al., 2005). برای مدل‌سازی نیروی برخورد مماسی ذرات با یکدیگر و یا ذرات با مواد دیگر نیز بیشتر محققین برای سادگی کار از مدل اصطکاک خشک کولمبی و تعیین ضریب اصطکاک استاتیکی و دینامیکی در

آزمایشگاه، استفاده می‌کنند (VanZeebroeck et al., 2008; Dintwa et al., 2004).

با توجه به مطالب ذکر شده، در تحقیق حاضر سعی شده است عمق کوفتگی میوه سیب رقم گلدن دلیشز تحت تأثیر فرکانس‌ها و شتاب‌هایی که معمولاً در حین حمل‌ونقل ایجاد می‌شوند و همچنین ارتفاع توده میوه درون جعبه با استفاده از روش المان مجزا انجام موردبررسی قرار گیرد.

۲- مواد و روش‌ها:

برای شبیه‌سازی صدمات ارتعاشی از جعبه پلاستیکی با ابعاد ۳۹cm*۲۷cm*۲۲cm (ارتفاع*عرض*طول) استفاده گردید که این نوع جعبه به‌صورت تجاری در بازار مصرف برای حمل‌ونقل سیب استفاده می‌گردد و گنجایش سه ردیف ۲۰ تایی (درمجموع ۶۰ عدد) از میوه سیب را دارد. برای این تحقیق از میوه سیب رقم گلدن دلیشز که از ارقام پرمصرف و پرطرفدار می‌باشد استفاده گردید. میوه‌های مورد نیاز از بازار محلی تبریز در آبان ماه ۱۳۹۶ تهیه شدند و سپس مورد ارزیابی اولیه قرار گرفتند و میوه‌هایی که دارای کوفتگی اولیه بودند و همچنین میوه‌هایی که خیلی بزرگ و یا خیلی کوچک بودند از روند تست‌ها حذف گردیدند. ابعاد اصلی میوه‌ها توسط کولیس با دقت ۰/۰۰۱ اندازه‌گیری گردید و میانگین قطر هندسی میوه‌ها و ضریب کرویت آن‌ها به ترتیب ۷۵/۲۰ میلی‌متر و ۹۶/۵ درصد به دست آمد. برای بررسی اثرات شتاب و فرکانس ارتعاش بر روی صدمات ارتعاشی ابتدا میوه‌ها به‌صورت منظم در درون جعبه چیده شدند، به‌طوری‌که در هر لایه از جعبه ۲۰ عدد میوه قرار گرفت و سپس جعبه برای شبیه‌سازی ارتعاشات جاده‌ای بر روی میز ارتعاش قرار گرفت. از شتاب ۰/۷ جی (متوسط شتاب در جاده‌های آسفالته) و فرکانس ارتعاش ۵ هرتز به‌صورت موج سینوسی (به دلیل سهولت در اعتبارسنجی مدل بین شبیه‌سازی و تست‌های تجربی) به‌عنوان ورودی میز ارتعاش استفاده شد و مدت زمان ارتعاش ۱۵ دقیقه (معادل مسافت‌های حمل کمتر از ۱۰۰۰ کیلومتر) در نظر گرفته شد. جزییات مربوط به انجام تست‌های ارتعاشی علاوه بر اینکه در کارهای محققین پیشین آمده است در مقاله دیگری توسط نویسندگان نیز ارائه خواهد گردید. بعد از انجام تست‌های ارتعاشی میوه‌ها به مدت ۲۴ الی ۴۸ ساعت در دمای اتاق نگهداری شدند تا آثار کوفتگی در آن‌ها ظاهر گردد. برای اندازه‌گیری عمق کوفتگی در ناحیه آسیب‌دیده، برشی عمود بر بزرگ‌ترین قطر هر ناحیه آسیب‌دیده میوه داده شد و عمق کوفتگی توسط کولیس اندازه‌گیری گردید (محسنین، ۱۹۸۶). پارامترهای مربوط به مدل برخورد نیروی نرمال کوابارا-کونو (سفتی فنر و مستهلک کننده) نیز با استفاده از دستگاه ضربه پاندولی و روش برازش منحنی کمترین مربعات غیرخطی به دست آمد که در آن پارامترهای مذکور از طریق کمینه کردن اختلاف بین داده‌های تجربی و حل عددی معادله کوابارا-کونو تعیین می‌گردد.

برای شبیه‌سازی صدمات ارتعاشی به روش المان مجزا از بسته نرم‌افزاری تجاری EDEM Solutions ورژن ۲/۷ استفاده گردید. این بسته نرم‌افزاری یکی از معتبرترین بسته‌های نرم‌افزاری موجود درزمینهٔ المان مجزا می‌باشد که امکان ایجاد انواع مختلف مدل‌های برخورد بسته به نیاز کاربر را دارا می‌باشد. در تحقیق حاضر ابتدا مدل سه‌بعدی جعبه موردمطالعه با مقیاس یک‌به‌یک در بسته نرم‌افزاری سالیدورکس ورژن ۲۰۱۶ ایجاد گردید و به محیط نرم‌افزار EDEM انتقال داده شد. برای شبیه‌سازی میوه سیب نیز از شکل کره سه‌بعدی استفاده گردید زیرا این میوه از ضریب کرویت بالایی برخورد دار است. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی اعمال شده برای میوه و پلاستیک جعبه در جدول ۱ آورده شده است. بعد از ایجاد هندسه مجموعه جعبه و میوه، برای اعمال مدل کوابارا-کونو، ابتدا مدل مربوطه در محیط برنامه‌نویسی C++ کد نویسی شد و سپس جهت استفاده در طی شبیه‌سازی به نرم‌افزار معرفی گردید. قید حرکت ارتعاشی سینوسی در راستای محور Z (شکل ۲) به جعبه اعمال شد و حرکت جعبه در دیگر جهات مقید گردید. درمجموع ۶۰ عدد کره (سیب) شبیه‌سازی گردید و مدت زمان کل اجرای شبیه‌سازی ۱۰ ثانیه در نظر گرفته شد. درباره مدت زمان اجرای شبیه‌سازی می‌توان گفت که انجام شبیه‌سازی‌های طولانی‌مدت (۱۵ دقیقه) برای مدل‌سازی عمق کوفتگی موردنیاز نیست، زیرا ظاهراً عمق کوفتگی وابسته به زمان نیست و فرقی نمی‌کند که میوه چه مدتی تحت ارتعاش بوده است (VanZeebroeck et al., 2005). درست است که تعداد ضربات وارده به میوه با افزایش مدت زمان ارتعاش افزایش می‌یابد ولی باید گفت افزایش مدت زمان ارتعاش (و متعاقباً تعداد ضربات) لزوماً به معنی افزایش عمق کوفتگی میوه نمی‌باشد. دلیل این امر را می‌توان چنین توضیح داد که یک موج ارتعاش سینوسی دارای بازه تناوبی ثابتی می‌باشد که اندازه شتاب وارده (و متعاقب آن میزان انرژی وارده به میوه) به‌صورت یکنواخت در این بازه تکرار می‌شود و با افزایش و یا کاهش مدت زمان ارتعاش تغییر پیدا نمی‌کند. همچنین تحقیق اوبرین و همکاران (۱۹۶۳) به‌صورت تجربی نشان داد که مجموع مساحت کوفتگی میوه به مدت زمان شتاب ارتعاش وابسته است، اما عمق کوفتگی تنها با اندازه شتاب در ارتباط می‌باشد.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سیب و جعبه مورداستفاده در نرم‌افزار المان مجزا

Table 1. Physical and mechanical properties of apple and plastic box used in DEM software

Material Properties \ Material Type	Apple (Golden Delicious)	Plastic(RPC)
Poisson Ratio	0.35	0.2
Shear Modulus(Mpa)	1.32	3700
Density(kg/m^3)	800	952
Mass(gr)	198.50±7.1	640.30±5.6

شکل ۲- مدل سه‌بعدی جعبه و ذرات (سیب) ایجاد شده در نرم‌افزار المان مجزا

Fig. 2. 3D Model of box and particles(apples) created in DEM software

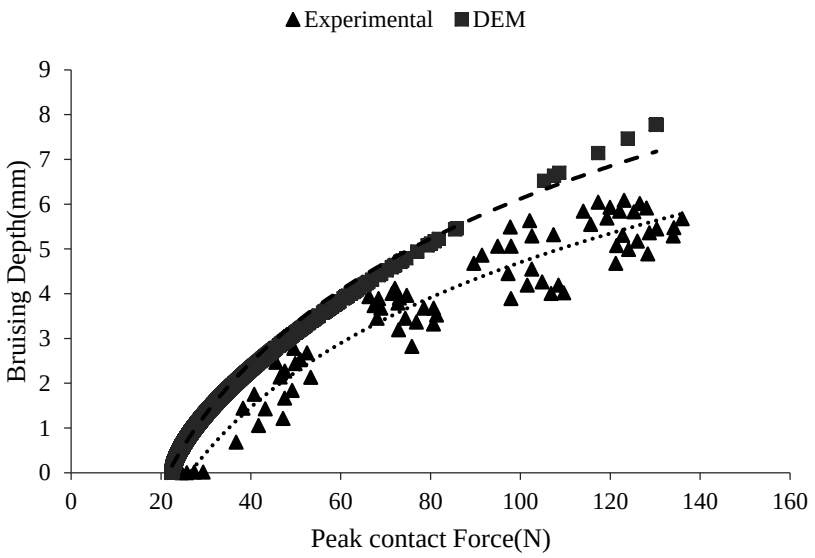
برای اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار، علاوه بر داده‌های تجربی به‌دست‌آمده از تست‌های ارتعاشی انجام یافته در این تحقیق، از داده‌های تجربی به‌دست‌آمده توسط ظریف نشاط و همکاران (۲۰۱۰) که بر روی رقم گلدن دلیشز انجام یافته است نیز استفاده گردید. ایشان از دو فرکانس ۳/۵ و ۱۰/۵ هرتز و دو شتاب ارتعاش ۰/۳۵ و ۰/۷ جی و مدت زمان ثابت ۱۰ دقیقه برای انجام تست‌های ارتعاشی در یک جعبه استفاده کردند؛ بنابراین در شبیه‌سازی کامپیوتری اثرات سه پارامتر شتاب ارتعاش (۲ سطح)، فرکانس ارتعاش (۳ سطح) و ارتفاع توده میوه درون جعبه (۳ سطح) موردبررسی قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث:

به‌منظور مقایسه بین نتایج حاصل از داده‌های تجربی و داده‌های به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی المان مجزا، مدل‌های آماری رگرسیونی کوفتگی بر اساس عمق کوفتگی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به‌دست‌آمده از دستگاه ضربه پاندولی ایجاد گردید. نتایج نشان داد که بین عمق کوفتگی و حداکثر نیروی برخورد حین ضربه رابطه لگاریتمی خوبی (R^2=0.91) به‌صورت معادله ۲ وجود دارد. ون زیبروک (۲۰۰۵) نیز چنین نتیجه‌ای را در مورد سیب رقم جاناگولد گزارش کرده است. همچنین نمودار تغییرات عمق کوفتگی نسبت به تغییر نیروی برخورد حداکثر برای هر دو حالت داده‌های تجربی و داده‌های حاصل از شبیه‌سازی المان مجزا به‌صورت شکل ۳ ایجاد گردید. با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌گردد که روش المان مجزا توانسته است به‌خوبی (R^2=0.94) رفتار میوه سیب را در برابر تغییرات نیروی برخورد پیش‌بینی نماید و نزدیکی خوبی بین داده‌های به‌دست‌آمده از روش المان مجزا و داده‌های تجربی وجود دارد.

$$BD = 3.5352 \ln(PF) - 11.579 \quad (۲)$$

که در آن BD، عمق کوفتگی و PF، نیروی برخورد حداکثر حین ضربه می‌باشد.



شکل ۳- ارتباط بین نیروی برخورد حداکثر و عمق کوفتگی برای سیب رقم گلدن دلیشز

Fig. 3. Relation between Peak Contact Force and Bruise Depth for "Golden Delicius" Apple

جدول ۲- مقادیر متوسط به‌دست‌آمده برای پارامترهای مدل نیروی برخورد نرمال کوابارا-کونو در میوه سیب رقم گلدن دلیشز

Table 2. Calculated Mean Values for the Kuawabara - Kono Normal Contact Force Model Parameters of the Golden Delicious Apple Cultivar

Parameter	Average value	Standard deviation (%)
Spring Stiffness coefficient(k) $(Nm^{-3/2})$	653215	19
Dashpot coefficient (c) $(kgm^{-1/2}s^{-1})$	876	15

در جدول ۲ مقادیر متوسط به‌دست‌آمده برای پارامترهای سفتی فنر و مستهلک کننده مدل نیروی برخورد کوابارا- کونو نشان داده شده است. همان‌طور که قبلاً نیز ذکر گردید این مقادیر به‌دست‌آمده در مدل کوابارا-کونو جایگزین شده و به‌عنوان ورودی نرم‌افزار المان مجزا جهت شبیه‌سازی کامپیوتری استفاده شد.

۳-۱- تأثیر پارامترهای ارتعاشی بر روی کوفتگی سیب:

بررسی نتایج حاصل از آنالیز واریانس (جدول ۳) بر روی‌داده‌های به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی به روش المان مجزا برای پارامتر عمق کوفتگی نشان داد که اثرات فاکتورهای اصلی فرکانس، شتاب و ارتفاع توده میوه درون جعبه در سطح احتمال ۱ درصد و همچنین اثرات متقابل فاکتور فرکانس در لایه میوه در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار است ولی اثرات متقابل دوگانه فاکتورهای فرکانس در شتاب و اثرات متقابل شتاب در لایه میوه و اثر متقابل سه‌گانه فرکانس در شتاب در لایه میوه در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار نشد. این نتیجه با نتایج به‌دست‌آمده از نتایج تجربی توسط ظریف نشاط و همکاران (۲۰۱۰) مطابقت بسیار خوبی دارد. شهبازی و همکاران (۲۰۱۰) نیز در تحقیقی تجربی که بر روی هندوانه رقم کریمسون سوئیت انجام دادند نتایج مشابهی را در مورد تأثیر فاکتورهای فرکانس، شتاب و مدت زمان ارتعاش بر روی پوست هندوانه گزارش کردند.

۳-۲- اثر فرکانس و شتاب ارتعاش بر روی عمق کوفتگی:

شکل ۴ مقایسه‌ای را بین نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی المان مجزا و داده‌های تجربی برای تغییرات عمق کوفتگی نسبت به تغییر فرکانس نشان می‌دهد. برای بررسی تغییرات بین فرکانس‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن استفاده گردید. با توجه به شکل ۴ مطابقت خوبی (۹۴-۸۲ درصد) بین داده‌های تجربی و داده‌های به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها مشاهده می‌شود. با افزایش فرکانس ارتعاش از ۴ هرتز به ۱۰/۵ هرتز نزدیکی بین داده‌های تجربی و شبیه‌سازی شده از ۹۴ درصد به ۸۲ درصد کاهش می‌دهد. به نظر می‌رسد با افزایش فرکانس ارتعاش و کاهش معنی‌دار عمق کوفتگی و سخت‌تر شدن اندازه‌گیری عمق کوفتگی در آزمایشگاه موجب افزایش فاصله بین داده‌های تجربی و شبیه‌سازی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد با افزایش فرکانس ارتعاش از ۴ هرتز به ۱۰/۵ هرتز، عمق کوفتگی به‌طور معنی‌داری در هر دو حالت کاهش می‌یابد به‌طوری‌که افزایش فرکانس از ۴ به ۱۰/۵ هرتز میانگین عمق کوفتگی را درداده های به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی و تجربی به ترتیب ۵۰ و ۵۸ درصد کاهش می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود بین دو فرکانس ۴ و ۵ هرتز تفاوت معنی‌داری وجود ندارد.

شکل ۵ اثرات متقابل فرکانس و شتاب ارتعاش را بر روی عمق کوفتگی در آزمون چند دامنه‌ای دانکن در هر دو حالت شبیه‌سازی المان مجزا و داده‌های تجربی نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌گردد که هر دو حالت تجربی و شبیه‌سازی شده، در یک فرکانس ارتعاشی ثابت با افزایش شتاب ارتعاش، عمق کوفتگی به‌صورت معنی‌داری افزایش می‌یابد. با توجه به داده‌های شبیه‌سازی شده، با تغییر اندازه شتاب ارتعاش بیشترین

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس داده‌های به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی المان مجزا مربوط به اثر پارامترهای مختلف بر عمق کوفتگی میوه سیب (میانگین مربعات)

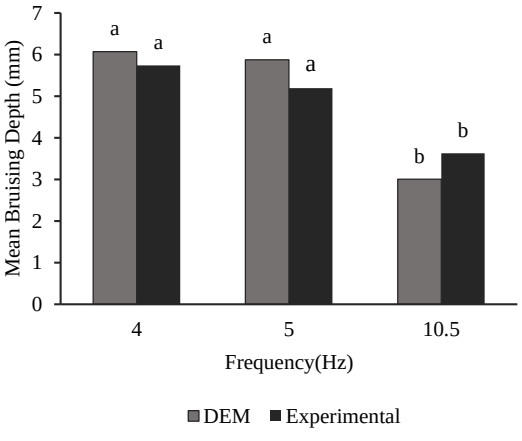
Table 3. The Results of Variance Analysis for Data Obtained from DEM Simulations of the Effect of Different Parameters on the Bruising Depth of Apple (Mean Squares)

Source	Sum of Squares	Degrees of freedom	Mean Square	F value
Vibration Frequency (F)	70.677	2	35.338	367.152**
Vibration Acceleration (A)	42.752	1	42.752	444.175**
F×A	.205	2	.102	1.064ns
Fruit position(H)	17.703	2	17.703	183.927**
F×H	.387	2	.194	92.012**
A×H	.605	2	.605	6.286ns
F×A×H	.602	3	.301	3.126ns
Error	2.310	28	.096	

نرخ افزایش در عمق کوفتگی در فرکانس ۱۰/۵ هرتز و برابر با ۴۶ درصد و کمترین نرخ افزایش در فرکانس ۴ هرتز برابر با ۳۱ درصد می‌باشد درحالی‌که این نرخ افزایش درداده های تجربی به ترتیب ۳۹ و ۲۸ درصد می‌باشد. ورساوس و ازگون (۲۰۰۴) نیز نتیجه مشابهی را برای سیب رقم گلدن دلشیز گزارش کردند. ایشان صدمات ارتعاشی میوه سیب را در دو فرکانس ارتعاشی مختلف ۸/۲ و ۱۲/۶ هرتز و دو شتاب مختلف ۰/۳۳ و ۰/۶۳ جی به‌صورت تجربی موردبررسی قرار دادند و عنوان کردند افزایش شتاب ارتعاش از ۰/۳۳ جی به ۰/۶۳ جی در دو فرکانس ۸/۲ و ۱۲/۶ هرتز به ترتیب موجب افزایش ۷۱ و ۲۷ درصدی شاخص کوفتگی سیب می‌شود. ظریف نشاط و همکاران (۲۰۱۰) نیز گزارش کردند افزایش شتاب ارتعاش از ۰/۳۵ جی به ۰/۷ جی در میوه سیب موجب افزایش ۴۵ درصدی کوفتگی آن می‌گردد. در تحقیق ون زیبروک و همکاران (۲۰۰۶) نیز که در آن صدمات ارتعاشی میوه سیب با روش المان مجزا شبیه‌سازی گردید نتیجه مشابهی به‌دست‌آمده است به‌طوری‌که ایشان گزارش کردند بین فرکانس‌های ارتعاشی بیشتر از ۵ هرتز و کمتر از آن در ایجاد عمق کوفتگی تفاوت معنی‌داری وجود دارد. از طرف دیگر با توجه به شکل ۵ می‌توان مشاهده کرد که در یک شتاب ارتعاشی ثابت، افزایش فرکانس ارتعاش از ۴ به ۱۰/۵ هرتز، عمق کوفتگی را به‌طور معنی‌داری کاهش می‌دهد. بیشترین و کمترین مقدار کاهش در عمق کوفتگی برابر ۵۹ و ۴۴ درصد به ترتیب در شتاب ارتعاشی ۰/۳۵ و ۰/۷ جی مشاهده گردید. این نتیجه نیز با نتایج ورساوس و ازگون (۲۰۰۴)، ظریف نشاط و همکاران (۲۰۱۰) و ون زیبرک و همکاران (۲۰۰۶) مطابقت دارد. برای توجیه نتایج فوق می‌توان چنین گفت که در یک شتاب ارتعاشی ثابت، افزایش فرکانس ارتعاش اگر در محدود فرکانس تشدید میوه‌ها انجام نگیرد، موجب کاهش دامنه حرکت میوه‌ها شده و از تعداد ضربات بین میوه‌ها می‌کاهد و درنتیجه صدمات کمتری ایجاد می‌گردد. همچنین در یک فرکانس ارتعاشی ثابت افزایش شتاب ارتعاشی بر روی میزان نیرو و قدرت ارتعاش اثر گذاشته و افزایش شتاب قدرت و شدت نیروهای وارده به میوه را افزایش می‌دهد. به همین خاطر اگر در هنگام حمل‌ونقل میوه شتاب ارتعاش زیاد باشد وارد شدن نیروهای بزرگ‌تر به میوه به‌صورت بارگذاری‌های تکراری موجب تخریب بافت میوه شده و صدمات را افزایش می‌دهد.

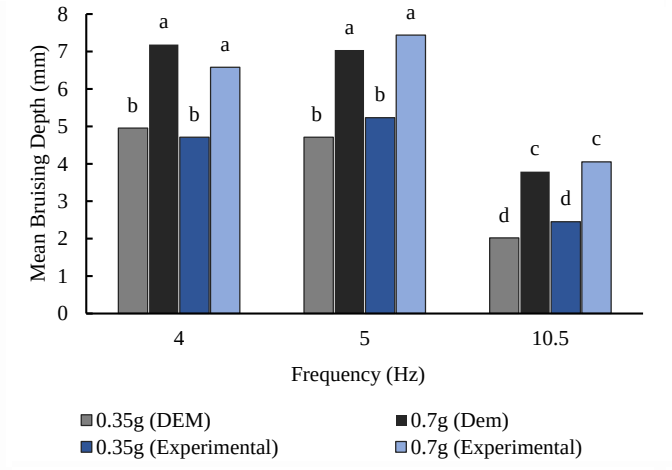
۳-۳- اثر لایه میوه بر روی عمق کوفتگی:

شکل ۶ نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی المان مجزا برای اثرات دوگانه فرکانس و لایه میوه بر روی عمق کوفتگی میوه سیب را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با ثابت بودن فرکانس ارتعاش، عمق کوفتگی در لایه بالایی به‌طور معنی‌داری بیشتر از پایین‌ترین لایه داخل جعبه می‌باشد و به‌عبارت‌دیگر عمق کوفتگی از پایین به بالا افزایش می‌یابد. این نتیجه با نتایج تجربی به‌دست‌آمده توسط ظریف نشاط و همکاران (۲۰۱۰) متناقض است ولی با نتایج به‌دست‌آمده توسط شهبازی و همکاران (۲۰۱۰) و همچنین اوبرین و همکاران (۱۹۶۵) مطابقت دارد. ظریف نشاط و همکاران(۲۰۱۰) اذعان داشتند با افزایش وزن لایه‌های بالایی بر روی لایه‌های زیرین عمق کوفتگی به‌تدریج از بالا به پایین افزایش می‌یابد. هرچند



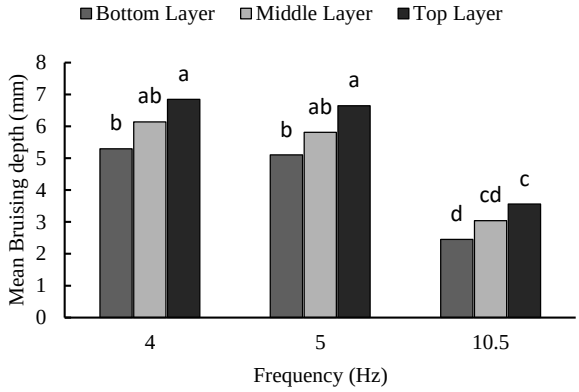
شکل ۴- مقایسه اثر فرکانس بر روی عمق کوفتگی (نتایج تجربی و نتایج روش المان مجزا)

Fig 4. Comparison of Frequency Effect on the Bruising Depth (Experimental and DEM results)



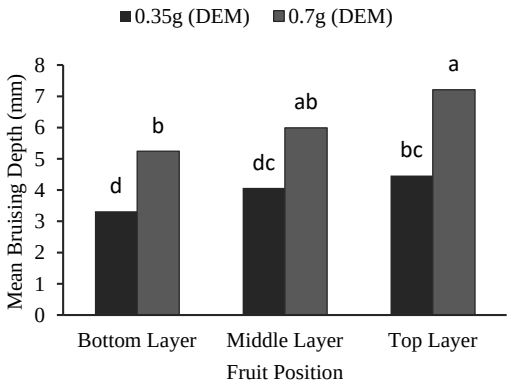
شکل ۵- مقایسه اثر متقابل فرکانس و شتاب ارتعاش بر روی عمق کوفتگی (نتایج تجربی و نتایج روش المان مجزا)

Fig 5. Comparison of Frequency by Acceleration Interaction effect on the Bruising Depth (Experimental and DEM results)



شکل ۶- اثر متقابل فرکانس و موقعیت قرارگیری میوه درون جعبه بر روی عمق کوفتگی (روش المان مجزا)

Fig. 6. Effect of Frequency by Fruit position in the box Interaction on the Bruising Depth (DEM)



شکل ۷- اثر متقابل موقعیت قرارگیری میوه درون جعبه و شتاب ارتعاش بر روی عمق کوفتگی (روش المان مجزا)

Fig. 7. Effect of Fruit position in the box by Acceleration Interaction on the Bruising Depth (DEM)

این نظر درست به نظر می‌رسد ولی باید به این نکته نیز توجه داشت که شتاب ارتعاش میوه‌های درون جعبه در حین حمل‌ونقل به‌تدریج از پایین به بالا افزایش می‌یابد که منجر به افزایش حرکت میوه‌ها در لایه‌های بالایی شده و با افزایش تعداد تماس بین میوه‌ها درنهایت منجر به افزایش عمق کوفتگی می‌گردد به‌خصوص اگر در بسته‌بندی میوه‌ها از درب محافظ استفاده نشده باشد. با توجه به شکل ۶ کمترین و بیشترین مقدار مربوط به میانگین عمق کوفتگی برابر ۲/۴۵ و ۶/۸۵ میلی‌متر است که به ترتیب در لایه زیرین- فرکانس ۱۰/۵ هرتز و لایه بالایی- فرکانس ۴ هرتز ایجاد شده است. همچنین با توجه به شکل ۶ می‌توان مشاهده نمود که با افزایش فرکانس ارتعاش از ۴ به ۱۰/۵ هرتز، عمق کوفتگی برای هر سه لایه میوه به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد. شکل ۷ نیز نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی المان مجزا برای اثرات دوگانه شتاب و لایه میوه بر روی عمق کوفتگی میوه سیب را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، با ثابت بودن شتاب ارتعاش، عمق کوفتگی در لایه بالایی به‌طور معنی‌داری بیشتر از پایین‌ترین لایه داخل جعبه می‌باشد. کمترین و بیشترین عمق کوفتگی به ترتیب مربوط به برهمکنش شتاب ۰/۳۵ جی در پایین‌ترین لایه و شتاب ۰/۷ جی در بالاترین لایه جعبه و برابر ۳/۲۲ و ۷/۲۱ میلی‌متر می‌باشد. این نتیجه نیز با یافته‌های محققینی مانند شهبازی و همکاران (۲۰۱۰) مطابقت دارد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق صدمات ارتعاشی میوه سیب رقم گلدن دلیشز هم در شرایط آزمایشگاهی و هم با استفاده از روش عددی المان مجزا موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مطابقت بسیار خوبی بین داده‌های تجربی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی به روش المان مجزا وجود دارد و روش المان مجزا می‌تواند رفتار سیستم‌های منفرد مانند میوه‌ها را به‌خوبی شبیه‌سازی نماید به دست البته با این شرط که مدل‌های تماسی مناسبی برای شبیه‌سازی رفتار میوه‌ها تعریف‌شده باشد. همچنین با توجه به نتایج این تحقیق مشخص گردید که پارامترهای دینامیکی از قبیل فرکانس و شتاب ارتعاش و موقعیت قرارگیری میوه درون جعبه بر روی میزان صدمات مکانیکی حین حمل‌ونقل آن تأثیر معنی‌داری دارند.

۵- تقدیر و تشکر

از گروه مکانیک دانشگاه تبریز به جهت فراهم نمودن امکانات انجام این تحقیق تقدیر و تشکر می‌گردد.

۷- مراجع

Abedi, G., & Ahmadi, E. (2013). Design and evaluation a pendulum device to study postharvest mechanical damage in fruits: bruise modeling of red delicious apple. Australian Journal of Crop Science, 7, 962-968.

Dintwa, E., Van Zeebroeck, M., Tijskens, E., & Ramon, H. (2004). Torsional stiffness of viscoelastic spheres in contact. The European Physical Journal, 39, 77-85. doi:10.1140/epjb/e2004-00173-2.

Dintwa, E., Van Zeebroeck, M., Tijskens, E., & Ramon, H. (2005). Determination of Parameters of a Tangential Contact Force Model for Viscoelastic Spheroids (fruits) using a Rheometer Device. Biosystems Engineering, 91, 321-327. doi:10.1016/j.biosystemseng.2005.04.005.

Holst J. M. F. G; Rotter, J. M., Ooi, J. Y. and G. H. Rong. 1999. Numerical modelling of silo filling II: Discrete element analysis. Journal of Engineering Mechanics. 125(1):104-110.

Kafashan, J., Van Zeebroeck, M., Sadrnia, H., Moshou, D., De Baerdemaeker, J., Nicolai, B., Tijskens, B. (2007). Effects of Impact Locations on Mechanical and Dynamical Properties of Fruits.

Kuwabara, G., Kono, K. (1987). Restitution coefficient in a collision between two spheres. Japanese journal of applied physics, 26(8), 1230-1233.

Li, Z., & Thomas, C. (2014). Quantitative evaluation of mechanical damage to fresh fruits. Trends in Food Science & Technology, 35, 138-150. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2013.12.001.

Mohsenin, N. N. (1986). Physical properties of plant and animal materials.

O'Brien, M., Claypool, L. L., Leonard, S. J., York, G. K., & MacGillivray, J. H. (1963). Causes of Fruit Bruising on Transport Trucks. Hilgardia, 35(6), 113-124.

O'Brien, M., Gentry, J. P., & Gibson, R. C. (1965). Vibrating characteristics of fruits as related to in-transit injury. Transactions of the ASAE, 8, 241-243.

Opara, U. L., & Pathare, P. B. (2014). Bruise damage measurement and analysis of fresh horticultural produce—a review. Postharvest Biology and Technology, 91, 9-24. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.12.009.

Raji, A. O., & Favier, J. F. (2004). Model for the deformation in agricultural and food particulate materials under bulk compressive loading using discrete element method. I: Theory, model development and validation. Journal of Food Engineering, 64, 359-371. doi:10.1016/j.jfoodeng.2003.11.004

Raji, A.O. and Favier, J.F., 2002. Discrete element modelling of the impact parameters of a selected fruit: application. Journal of Applied Science, Engineering and Technology, 2(1), pp.7-12.

Rong, G. H. Negi, S. C. Jofriet, J. C., 1995. Simulation of flow behavior in bulk solids in bins. Part 2: shear bands, flow corrective inserts and velocity profiles. Journal of Agricultural Engineering Research 62. 257-269.

Rong, G.H., Negi, S.C., Jofriet, J.C. 1993. DEM simulation of in-transit fruit damage. ASAE paper no 93-6503.

Sakaguchi, E. Kawakami, S. Suzuki, M. Urukawa, T. and J. F. Favier. 1998. Effective use of DEM simulation for development of grain processing technology: Application to shaking separation phenomenon of paddy and brown rice. Paper No. 98-F-021. International Conference on Agricultural Engineering, Oslo.

Shahbazi, F., Rajabipour, A., Mohtasebi, S., & Rafiee, S. (2010). Simulated In-transit Vibration Damage to Watermelons. j. Agr. Sci. Tech., 12, 23-34.

Tijskens, E., Ramon, H., & De Baerdemaeker, J. (2003). Discrete element modelling for process simulation in agriculture. Journal of Sound and Vibration, 266, 493-514. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0022-460X **(**03)00581-9.

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

Van Zeebroeck, M., Lombaert, G., Dintwa, E., Ramon, H., Degrande, G., & Tijskens, E. (2008). The simulation of the impact damage to fruit during the passage of a truck over a speed bump by means of the discrete element method. Biosystems Engineering, 101, 58-68. doi:10.1016/j.biosystemseng.2008.06.003.

Van Zeebroeck, M., Tijskens, E., Dintwa, E., Kafashan, J., Loodts, J., De Baerdemaeker, J., & Ramon, H. (2006). The discrete element method (DEM) to simulate fruit impact damage during transport and handling**:** Model building and validation of DEM to predict bruise damage of apples. Postharvest Biology and Technology, 41, 85-91. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.02.007.

Van Zeebroeck, M., Tijskens, E., Van Liedekerke, P., Deli, V., De Baerdemaeker, J., Ramon, H., & Van Liedekerke, P. (2003). Determination of the dynamical behavior of biological materials during impact using a pendulum device. Journal of Sound and Vibration, 266, 465-480. Doi: 10.1016/S0022-460X (03)00579-0.

Van Zeebroeck, M., Van linden, V., Ramon, H., De Baerdemaeker, J., Nicolai, B. M., & Tijskens, E. (2007). Impact damage of apples during transport and handling. Postharvest Biology and Technology, 45(2), 157-167. doi:10.1016/j.postharvbio.2007.01.015

Vigneault, C., Thompson, J., Wu, S., Hui, K. P. C., & Leblanc, D. I. (2009). Transportation of fresh horticultural produce. Postharvest Technologies for Horticultural Crops, 2, 1-24.

Vursavuş, K.K. and Özgüven, F., 2004. Determining the effects of vibration parameters and packaging method on mechanical damage in golden delicious apples. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 28(5), pp.311-320**.**

Zarifneshat, S., Ghassemzadeh, H. R., Sadeghi, M., Abbaspour Fard, M. H., Javadi, A., Shervani Tabar, M. T. (2010). Modeling and Simulation of Mechanical Damages for Prediction of Apple Bruising During Mechanized Transport and Handling Using Discrete Element Method and Experimental Validation of the Model, Ph.D. thesis, Tabriz University of Iran (Persian).