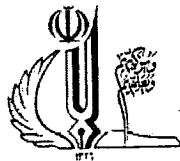


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

١٤٢٠٢١ - ٢٠١٨٨٨٩



دانشگاه پشاور

دانشکده کشاورزی

گروه ماشینهای کشاورزی

رساله برای دریافت درجه دکتری تخصصی مهندسی مکانیزاسیون کشاورزی

عنوان

مدل سازی و شبیه سازی صدمات مکانیکی ناشی از نقل و انتقال مکانیزه برای پیش بینی کوفتگی سیب با استفاده از روش المان گسسته و اعتبار سنجی تجربی مدل

استادان راهنما

دکتر مرتضی صادقی

دکتر حمید رضا قاسم زاده

استادان مشاور

دکتر محمد تقی شروانی تبار

دکتر محمد حسین عباسپور فرد

دکتر ارژنگ جوادی

پژوهشگر

سعید ظریف نشاط

۱۳۸۹ / ۷ / ۳

تیرماه ۱۳۸۹

اطلاعات تکمیلی به
تعمیرات

۱۴۲۰۲۱

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

همسرفداکار و مهربانم

و فرزند دوست داشتنی ام

سپاسگزاری

حال که با عنایت و الطاف خداوند متعال با ارائه تحقیق حاضر دوره تحصیلی ام به پایان رسید، شایسته است که از زحمات و تلاشهای ارزشمند جناب آقای دکتر حمیدرضا قاسم‌زاده استاد فرزانه و دانشمند گروه مهندسی ماشینهای کشاورزی که در مدت ۱۹ سال تلمذ از محضر ایشان، همواره راهگشا و روشنگر اینجانب بوده‌اند و همچنین جناب آقای دکتر مرتضی صادقی دانشیار محترم گروه مهندسی مکانیک بخاطر راهنمایی و مساعدتهای ارزنده‌شان در طول اجرای این تحقیق صمیمانه تشکر و سپاسگزاری نمایم.

از اساتید محترم مشاور پایان‌نامه جناب آقایان دکتر ارزنگ جوادی، دکتر محمدحسین عباسپورفرد و دکتر محمدتقی شروانی‌تبار که با ارائه نظرات و پیشنهادات اندیشمندانه موجب پربارتر شدن این تحقیق گردیدند قدردانی می‌نمایم.

از جناب آقایان دکتر میر محمد اتفاق، دکتر ابراهیم احمدی و مهندس علی توفیقی که در طول اجرای پایان‌نامه مخصوصا در مرحله مدل‌سازی با استفاده از روش المان گسسته با صبر و حوصله فراوان همکاری بسیار صمیمانه‌ای داشتند کمال تشکر را دارم.

از اساتید محترم گروه مهندسی ماشینهای کشاورزی دانشگاه تبریز که اندوخته‌های بسیار از آنان به یادگار دارم تشکر می‌کنم.

از ریاست محترم موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی و همچنین ریاست محترم مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی و ریاست و همکاران عزیز بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی بخاطر همکاری‌های ارزنده‌شان سپاسگزاری می‌نمایم.

از کلیه دوستانی که از ذکر نام یکایک آنان معذورم و صمیمانه و خالصانه مرا میهمان و خوشه چین لطف و معلوماتشان نمودند قدردانی می‌کنم.

در پایان قدردان همسر و فرزند عزیزم که در کلیه مراحل تحصیل و به ویژه اجرای این تحقیق با بردباری همراه بودند می‌باشم.

نام خانوادگی دانشجو: ظریف نشاط	نام: سعید
عنوان رساله: مدل سازی و شبیه سازی صدمات مکانیکی ناشی از نقل و انتقال مکانیزه برای پیش بینی کوفتگی سیب با استفاده از روش المان گسسته و اعتبار سنجی تجربی مدل	
اساتید راهنما: دکتر حمیدرضا قاسم زاده و دکتر مرتضی صادقی اساتید مشاور: دکتر ارژنگ جوادی، دکتر محمد حسین عباسپور فرد و دکتر محمد تقی شروانی تبار	
مقطع تحصیلی: دکتری رشته: مهندسی ماشین های کشاورزی گرایش: مهندسی مکانیزاسیون دانشگاه: تبریز دانشکده: کشاورزی تاریخ فارغ التحصیلی: تیر ماه ۱۳۸۹ تعداد صفحه: ۱۱۳	
واژه های کلیدی: اعتبار سنجی، کوفتگی، مدل سازی، میوه سیب، نیروی برخورد	
چکیده: صدمه کوفتگی ناشی از ضربه جزو انواع اصلی صدمات مکانیکی پس از برداشت میوه می باشد. از جمله روش های تعیین میزان کوفتگی در میوه ها، استفاده از مدل سازی و شبیه سازی می باشد. روش المان گسسته (Discrete Element Method) یا DEM یک روش عددی است که رفتار دینامیکی ذرات را در برخورد با یکدیگر مورد بررسی قرار می دهد. در توصیف یک برخورد داشتن مدل نیروی برخورد بین ذرات، ضروری است. مدل های نیروی برخورد کلید اصلی شبیه سازی به روش المان گسسته می باشند. در این پژوهش پارامترهای مدل نیروی برخورد نرمال (سفتی و مستهلک کننده) بر پایه مدل برخورد ویسکوالاستیک کوابارا و کونو محاسبه و اعتبار سنجی شد. اثرات عواملی مانند سرعت ضربه، شعاع انحنا و سفتی آکوستیک بر روی متغیرهای ذکر شده ارزیابی گردید. در بحث نیروی مماسی، ضریب اصطکاک استاتیکی برای دو حالت میوه با میوه و میوه با چوب اندازه گیری شد. در مرحله بعد، مدل های پیش بینی کوفتگی تعیین شدند. در این مدل ها، انرژی برخورد یا بیشینه نیروی برخورد به عنوان متغیرهای مستقل و حجم کوفتگی به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد. علاوه بر این، خصوصیات میوه شامل سفتی، دما و شعاع انحناء نیز به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. برای شبیه سازی ارتعاش میوه ها برنامه ای در نرم افزار MATLAB نوشته شد و شرایط اولیه و سایر پارامترهای شبیه سازی در برنامه لحاظ گردید. مرحله بعد، کوفتگی میوه سیب بوسیله لرزاننده و در سطوح شتاب و فرکانسی مختلف اندازه گیری شد. سرانجام اعتبار مدل های کوفتگی از طریق برآورد حجم کوفتگی به وسیله شبیه سازی ارتعاش ناشی از حمل و نقل برای هر ذره، با در نظر گرفتن شرایط یکسان برای ذرات (تعداد ذره، دامنه و فرکانس ارتعاش، شعاع ذرات، ابعاد جعبه، سرعت اولیه ذرات و پارامترهای نیروی برخورد)، و مقایسه آن با کوفتگی واقعی حاصل از لرزاننده که در آزمایشگاه اندازه گیری شد، تعیین گردید. به طور کلی نتیجه گرفته شد که روش شبیه سازی DEM می تواند رفتار میوه را در بررسی صدمات مکانیکی آن مورد مطالعه قرار دهد.	

فهرست مطالب

عنوان

صفحه

فصل اول بررسی منابع

- ۱-۱- مقدمه ۱
- ۲-۱- مکانیک ضربه (برخورد) ۳
- ۳-۱- ضریب برجهندگی ۴
- ۴-۱- مدل‌های نیروی برخورد ۵
- ۱-۴-۱- مدل‌های نیروی برخورد نرمال ۶
- ۱-۱-۴-۱- مدل نیروی برخورد الاستیک ۷
- ۲-۱-۴-۱- مدل نیروی برخورد ویسکوالاستیک $(F_e; F_v)$ ۷
- ۳-۱-۴-۱- مدل نیروی برخورد الاستیک-پلاستیک $(F_e; F_p)$ ۱۱
- ۴-۱-۴-۱- ارتباط بین پارامترهای مدل کوابارا و کونو و خصوصیات ماده ۱۳
- ۱-۴-۱-۴-۱- ارتباط بین پارامتر سفتی و خصوصیات ماده ۱۳
- ۲-۴-۱-۴-۱- ارتباط بین پارامتر مستهلک کننده و خصوصیات ماده ۱۴
- ۵-۱-۴-۱- انتخاب مدل نیروی برخورد نرمال برای مدل سازی مواد ویسکوالاستیک (میوه ها) ۱۵
- ۲-۴-۱- مدل‌های نیروی برخورد مماسی ۱۷
- ۵-۱- اندازه‌گیری تنش های دینامیکی ۲۱
- ۱-۵-۱- کره تجهیز شده (میوه الکترونیکی) ۲۲
- ۲-۵-۱- غشاءهای لمسی ۲۲
- ۶-۱- آنالیز انرژی صدمه ناشی از ضربه ۲۳
- ۱-۶-۱- تحقیقات در مورد اثر ارتفاع سقوط روی صدمه کوفتگی برای واریته‌های مختلف مخصوصا در ارتباط با صفحات سخت: ۲۴
- ۲-۶-۱- تحقیقات روی اثر فاکتورهای پس از برداشت (دمای میوه، رسیدگی، پتانسیل آب، زمان انبار مانی و غیره): ۲۴
- ۳-۶-۱- تحقیقات روی تاثیر مواد بسته‌بندی در کاهش کوفتگی و برخورد سیب به سیب: ۲۵
- ۷-۱- مدل‌های آماری و روش‌های ارزیابی کوفتگی ۲۶
- ۸-۱- اثر ارتعاشات و شوک‌ها روی صدمه کوفتگی سیب ۳۲

- ۹-۱- شیبه سازی ذرات با استفاده از روش المان گسسته (DEM) ۳۴
- ۱۰-۱- جمع بندی ۴۶

فصل دوم مواد و روشها

- ۱-۲- تعیین خصوصیات میوه ۴۷
- ۲-۱-۲- اندازه گیری شعاع انحناء میوه ۴۷
- ۳-۱-۲- اندازه گیری سفتی آکوستیک ۴۸
- ۲-۲- مدل سازی نیروی برخورد نرمال ۵۰
- ۱-۲-۲- انتخاب مدل نیروی برخورد نرمال ۵۰
- ۲-۲-۲- ساخت پاندول و چگونگی انجام آزمایش ۵۰
- ۳-۲-۲- تخمین پارامترهای مدل نیروی برخورد ۵۳
- ۴-۲-۲- روش آزمایش ۵۵
- ۵-۲-۲- آنالیز آماری ۵۶
- ۳-۲- مدل سازی نیروی برخورد مماسی ۵۷
- ۱-۳-۲- تعیین ضریب اصطکاک استاتیکی میوه ۵۷
- ۴-۲- تعیین مدل های آماری پیش بینی کوفتگی ۵۷
- ۱-۴-۲- روش اجرای آزمایش ۵۸
- ۵-۲- شیبه سازی کامپیوتری فرآیند انتقال میوه با استفاده از روش المان گسسته ۶۰
- ۶-۲- تعیین صدمه کوفتگی واقعی در آزمایشگاه بوسیله لرزاننده ۶۴
- ۷-۲- اعتبار سنجی مدل ۶۵

فصل سوم نتایج و بحث

- ۱-۳- نتایج مربوط به محاسبه پارامترهای سفتی و مستهلک کننده مدل نیروی برخورد نرمال ۶۷
- ۱-۱-۳- اثر سرعت ضربه بر پارامترهای مدل نیروی برخورد ۷۲
- ۲-۱-۳- اثر شعاع انحناء موثر بر پارامترهای مدل نیروی برخورد ۷۳
- ۳-۱-۳- اثر سفتی آکوستیک بر محاسبه پارامترهای مدل نیروی برخورد ۷۴
- ۴-۱-۳- نتیجه گیری نهایی ۷۵

- ۷۵-۲-۳ نتایج مربوط به محاسبه ضریب اصطکاک استاتیکی مدل نیروی برخورد مماسی.....
- ۷۶-۳-۳ نتایج مربوط به محاسبه مدل‌های پیش‌بینی کوفتگی.....
- ۷۶-۱-۳-۳ مدل پیش‌بینی کوفتگی با بیشینه نیروی برخورد به عنوان متغیر مستقل.....
- ۷۷-۱-۱-۳-۳ اثر شعاع انحناء بر حجم کوفتگی.....
- ۷۷-۲-۱-۳-۳ اثر سفتی آکوستیک بر روی حجم کوفتگی.....
- ۷۸-۳-۱-۳-۳ اثر دما بر حجم کوفتگی.....
- ۷۹-۲-۳-۳ مدل‌های پیش‌بینی کوفتگی با انرژی ضربه به عنوان متغیر مستقل.....
- ۸۰-۱-۲-۳-۳ اثر شعاع انحناء بر حجم کوفتگی.....
- ۸۱-۲-۲-۳-۳ اثر سفتی آکوستیک بر حجم کوفتگی.....
- ۸۱-۳-۲-۳-۳ اثر دمای سیب بر حجم کوفتگی.....
- ۸۱-۳-۳-۳ بحث در مورد مدل‌های آماری پیش‌بینی کوفتگی.....
- ۸۲-۱-۳-۳-۳ اثر شعاع انحناء بر حجم کوفتگی.....
- ۸۳-۲-۳-۳-۳ اثرات سفتی آکوستیک بر حجم کوفتگی.....
- ۸۴-۳-۳-۳-۳ اثر دمای میوه بر حجم کوفتگی.....
- ۸۵-۴-۳-۳ نتیجه‌گیری نهایی.....
- ۸۶-۴-۳ نتایج مربوط به اعتبار سنجی مدل *DEM*.....
- ۹۴-۵-۳ جمع بندی نهایی.....
- ۹۶..... توصیه و پیشنهادات.....
- ۹۹..... فهرست منابع.....

۱-۱- مقدمه

تقاضا برای محصولات با کیفیت بالا از دهه گذشته در حال افزایش بوده و هم اکنون نیز روند افزایشی دارد. یکی از جنبه‌های کیفی میوه، اثر زیان آور صدمه ناشی از ضربه می‌باشد. این جنبه تنها مربوط به ظاهر میوه نمی‌گردد بلکه ریسک آلودگی باکتریایی و قارچی محصول را بالا برده منجر به کاهش عمر قفسه‌ای می‌گردد. سایر اثرات جانبی شامل افت آب و رطوبت میوه صدمه دیده می‌باشد که این امر می‌تواند تا ۴۰٪ بیشتر از سیب سالم باشد. در بیشتر میوه‌ها از جمله سیب کوفتگی از مهمترین و مرسوم ترین نوع صدمات مکانیکی پس از برداشت می‌باشد. معمولاً بیماریهای قارچی در صورت ایجاد صدمات مکانیکی ایجاد می‌گردد که از این میان می‌توان به کپک خاکستری^۱ و کپک آبی^۲ اشاره کرد. این اورگانیسیم‌ها مانند بیشتر پاتوژنهای پس از برداشت نمی‌توانند بافت سالم را مبتلا کنند و معمولاً وارد بافت مرده و یا صدمه دیده می‌شوند. لذا صدمات مکانیکی می‌تواند عامل اصلی آلودگی و بیماری شود. در صورت جلوگیری از ایجاد صدمه در محصولات، برای جلوگیری از بیماری کمتر به قارچ‌کشها نیاز خواهد بود (وان زیبروک و همکاران، ۲۰۰۷a).

بین صدمات مکانیکی پیش و پس از برداشت تمایز وجود دارد. میوه‌ها هنگامیکه روی درخت هستند می‌توانند از چندین طریق صدمه ببینند. در طی مرحله رشد میوه‌ها ممکن است با سایر میوه‌ها تماس داشته باشند و یا با سایر قسمت‌های درخت نظیر شاخه‌ها برخورد کنند که منجر به سائیدگی، ایجاد سوراخ و یا کوفتگی گردد. دام‌ها، حشرات، پرندگان می‌توانند پوست میوه را سوراخ کرده و قسمتی از بافت را مورد استفاده قرار دهند. آب و هوا نیز یکی از عوامل مهم ایجاد صدمه در میوه می‌باشد. باد می‌تواند باعث برخورد میوه‌ها به سایر قسمت‌ها گردد. صدمات مکانیکی پیش از برداشت بصورت انفرادی ایجاد شده و بندرت پیش می‌آید، لذا قابل کنترل نمی‌باشند. عامل اصلی صدمات میوه‌ها حمل و نقل توسط انسان می‌باشد که این در برداشت با دست بیشترین حد است. هنگامی که میوه به آسانی از درخت جدا نشود بیشتر در معرض صدمه ناشی از نیروی دست قرار می‌گیرد. این حالت هنگامی رخ می‌دهد که دو یا سه انگشت برای

¹ -Bortrytis

² -Pencilium

کشیدن استفاده می‌شود لذا تولید کنندگان پیشنهاد می‌کنند که از تمام دست برای گرفتن و پیچاندن میوه استفاده گردد تا حرکات و نیروها به ساقه اصلی منتقل شود.

میوه پس از برداشت در جاده‌های پر از دست انداز مزرعه‌ای حمل شده تا بدست مصرف کننده برسد. در هنگام تخلیه خطر برخورد میوه به میوه و همچنین میوه با کانتینر و سایر تجهیزات دسته بندی و بسته بندی وجود دارد. فرآیند حمل و نقل سیب از مراحل زیر تشکیل شده است:

- ۱) انتقال سیب از سطل برداشت به جعبه‌های چوبی
- ۲) انتقال بوسیله تراکتور در باغ بصورت فله ای جهت انبار کردن
- ۳) انتقال به محل مزایده
- ۴) تخلیه جعبه
- ۵) درجه بندی و دسته بندی
- ۶) انتقال جهت سایر انواع بسته بندی (جعبه‌های کارتنی، چوب و پلاستیک)
- ۷) انتقال بوسیله خریدار به مغازه
- ۸) حمل و نقل توسط مصرف کننده

در طی این مراحل با توجه به چگونگی برخورد و نوع سطح برخورد می‌تواند سوراخ شدگی، بریدگی، کوفتگی و خراشیدگی در میوه اتفاق بیفتد. کوفتگی اصلی‌ترین نوع صدمه پس از برداشت می‌باشد. در طی انتقال میوه‌ها علت بیشتر صدمات کوفتگی نیروهای دینامیکی هستند. زیرا این نیروها از نظر اندازه، شیوع و وقوع بیشتر از نیروهای استاتیکی هستند.

کوفتگی سیب می‌تواند منجر به افت بیشتر از ۵۰٪ گردد. گرچه این افت بسته به آگاهی مصرف کنندگان می‌تواند به ۱۰ تا ۲۵ درصد تقلیل یابد (وان زیروک و همکاران، ۲۰۰۷a). علاوه بر این بعضی صدمات کوفتگی کوچک که در طی فرآیند درجه‌بندی قابل مشاهده نیستند بعدا قابل رویت شده و به افت بیشتر در مغازه‌های میوه فروشی منجر می‌گردند. مجموعه علل فوق الذکر باعث کاهش ماندگاری میوه‌ها می‌گردند.

صدمه کوفتگی یک صدمه داخلی بوده و تشخیص آن به مراتب مشکلتر از سایر انواع صدمات می باشد. همچنین عوامل ایجاد کوفتگی نیز زیاد بوده و حذف کامل آنها مشکل است. هدف از انجام این تحقیق را می توان بصورت زیر دسته بندی نمود:

- ۱) تخمین پارامترهای مدل نیروی برخورد سیب رقم گلدن دلشز^۱
- ۲) تعیین مدل های آماری پیش بینی کوفتگی سیب با در نظر گرفتن خصوصیات فیزیکی و مکانیکی میوه
- ۳) مدل سازی کامپیوتری کوفتگی سیب گلدن دلشز با استفاده از روش المان گسسته
- ۴) تعیین میزان کوفتگی واقعی سیب در آزمایشگاه با استفاده از دستگاه لرزاننده و
- ۵) اعتبار سنجی مدل کامپیوتری از طریق مقایسه حجم کوفتگی سیب بین حالت واقعی و مدل سازی شده.

۱-۲- مکانیک ضربه (برخورد)

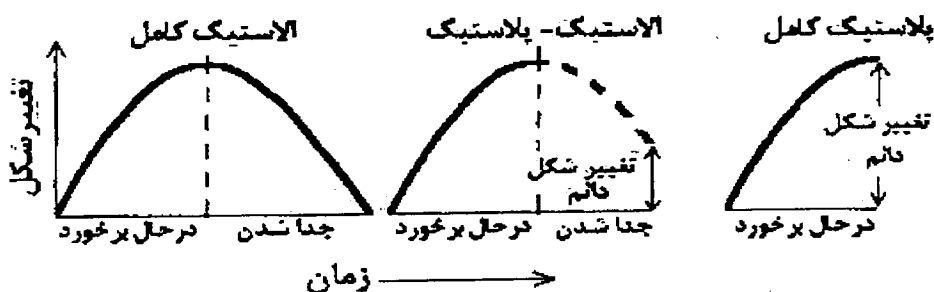
بین ضربه و بار گذاری سریع تفاوت وجود دارد. در واقع در هنگام ضربه دو جسم در مدت زمان بسیار کوتاه به یکدیگر برخورد کرده و از هم دور می شوند. بواسطه این پدیده امواج تنش در جسم ایجاد شده و از منطقه برخورد در جسم شروع به حرکت می کند. باید اشاره نمود که تا کنون هیچ نظریه عمومی در مورد ضربه ارائه نشده و مبنای مطالعات فعلی بر تئوری سنت و نانت^۲ در مورد انتشار موج و تئوری هرتز در مورد پدیده برخورد در اجسام الاستیک استوار است. نتایج آزمایشات مختلف نشان داده است که در برخورد دو جسم کرومی الاستیک و سخت با سرعت اولیه کم تئوری هرتز صادق است. برای تحلیل تغییر شکل پلاستیک مواد نرم در سرعت برخورد زیاد لازم است تئوری های مناسب دیگری جایگزین گردد. با این وجود استفاده از تئوری هرتز در کنار سادگی نسبی آن در حل مسائل الاستیک، به دلیل تطابق خوب آن با نتایج حاصل از آزمایشات عملی عمومیت دارد.

پدیده ضربه در چهار فاز بصورت زیر اتفاق می افتد:

¹ - Golden Delicious

² - St. Venant

- ۱- تغییر شکل اولیه الاستیک که در آن منطقه تحت برخورد بصورت الاستیک تغییر شکل یافته و بدون هیچ نوع تغییر شکل دائم به حالت اولیه خود باز می‌گردد.
- ۲- آغاز تغییر شکل پلاستیک که در آن فشار متوسط از فشار تسلیم دینامیک بیشتر شده و نتیجه آن تغییر شکل الاستیک-پلاستیک است که بطور کامل قابل بازگشت نخواهد بود.
- ۳- تغییر شکل پلاستیک کامل که در آن تغییر شکل از حالت الاستیک-پلاستیک تا پلاستیک کامل یعنی تا زمانی که فشار اعمالی به زیر فشار تسلیم دینامیک کاهش یابد ادامه پیدا می‌کند.
- ۴- جهش الاستیک که در آن تنش‌های الاستیک ذخیره شده در هر دو جسم آزاد می‌گردد.
- شکل ۱-۱ منحنی‌های تغییر شکل-زمان حاصل از تحلیل تقریبی چهار فاز برخورد را نشان می‌دهد که در آن بر زمان برخورد تاکید شده است. (محسنین ۱۹۷۸).



شکل ۱-۱- چهار مرحله برخورد بر اساس منحنی تغییر شکل-زمان

۳-۱- ضریب برجهنگی^۱

اگر دو جسم پس از برخورد روی یک امتداد حرکت کنند ضریب برجهنگی e را میتوان از رابطه ۱-۱ محاسبه نمود:

$$e = \frac{V_2 - V_1}{U_2 - U_1} \quad (1-1)$$

که در آن اندیس‌های ۱ و ۲ دلالت بر دو جسم برخورد کننده دارد و U و V به ترتیب معرف سرعت دو جسم بلافاصله قبل و بعد از برخورد است. بر این اساس در یک برخورد کاملاً الاستیک $e = 1$ و در یک

^۱ - Coefficient of restitution

برخورد کاملاً پلاستیک $e=0$ و نهایتاً برای یک برخورد غیر الاستیک $0 < e < 1$ می‌باشد. این ضریب را در یک آزمون سقوط آزاد می‌توان از رابطه ۱-۲ محاسبه نمود:

$$e = \left(\frac{h_r}{h_d} \right)^{1/2} \quad (2-1)$$

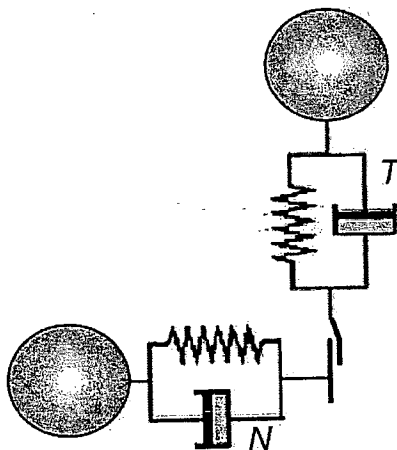
که در آن h_r و h_d به ترتیب عبارتند از ارتفاع جهش و ارتفاع سقوط جسم می‌باشد. در عین حال باید ذکر نمود که بر اساس آزمایشات انجام شده ضریب برجهندگی مقداری ثابت نبوده و متناسب با سرعت برخورد می‌باشد. بنابراین اندازه‌گیری مستقیم ضریب برجهندگی که در عمل با مشکلاتی بویژه از لحاظ سخت افزاری در اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای برخورد همراه است، می‌توان این ضریب را با کمک معادله ۱-۲ و با اندازه‌گیری ارتفاع سقوط و بازگشت تعیین نمود. روش سقوط آزاد را می‌توان در مورد بعضی از میوه‌ها عملاً اجرا نمود. اما در مورد محصولات دانه‌ای بهترین روش استفاده از یک سامانه پاندول می‌باشد (باجما و هاید ۱۹۹۸).

۴-۱- مدل‌های نیروی برخورد

مدل‌سازی فیزیکی ضربه هم بر اساس تئوری الاستیک-پلاستیک و هم بر اساس تئوری ویسکوالاستیک می‌باشد. روش‌های تجزیه تنش در مواد مهندسی که تحت بارهای مرکب قرار دارند بخوبی توسعه یافته‌اند و مهندسان و دانشمندان علم مواد کوشیده‌اند تا با فرض ویسکوالاستیک یا الاستیک-پلاستیک بودن بافت میوه‌ها معادلات مختلف رئولوژیکی مواد را در مورد آنها بکار برند. برای توصیف یک برخورد داشتن مدل نیروی برخورد بین ذرات، ضروری است. مدل‌های نیروی برخورد کلید اصلی شبیه‌سازی به روش المان گسسته می‌باشند.

برای ترکیب ضریب فنر در مدل‌سازی عددی، مدل‌های مختلفی بر اساس نظریه مدل هوک که برای فنر خطی ساده کاربرد دارد و سایر مدل‌ها نظیر مدل تسوجی، تورنتن، کوابارو و کونو که تئوری نیروی غیر خطی را برای بدست آوردن مدل نیروی برخورد بکار برده‌اند، وجود دارد (تاناکا و همکاران، ۲۰۰۲ و راجی و فاویر، ۲۰۰۴a).

نیروهای برخورد، نیروهای نرمال (عمود بر سطح) و نیروهای مماسی (موازی با سطح) را شامل می شوند. برای شبیه سازی از مدلی استفاده می شود که در آن دو جزء فنر (نماد سفتی^۱) و داش پات (نماد مستهلک کننده^۲) در ترکیب موازی قرار دارند (شکل ۲-۱).



شکل ۲-۱- مدل سازی نیروهای نرمال (F_n) و مماسی (F_t) فنر و مستهلک کننده در ترکیب موازی با هم برای نیروهای نرمال و مماسی قرار گرفته اند. در نیروی مماسی، فنر و مستهلک کننده با جزء اصطکاکی به صورت سری مدل شده است.

۱-۴-۱- مدل های نیروی برخورد نرمال

اساساً در مکانیک ضربه نیروهای ایجاد شده در اثر برخورد دو جسم به یکدیگر با توجه به ساختار ماده، به سه دسته نیروی الاستیک، نیروی ویسکوز و نیروی پلاستیک تقسیم می شوند. معادله عمومی نیرو به صورت زیر می باشد:

$$F_n = F_e + F_v + F_p \quad (۳-۱)$$

F_n : نیروی برخورد نرمال (N)

$F_e = f(\delta)$: نیروی عامل تغییر شکل الاستیک

$F_v = f(\delta, \dot{\delta})$: نیروی عامل تغییر شکل ویسکوز

^۱ - Stiffness
^۲ - Damping

$F_p = f(\delta, \dot{\delta})$: نیروی عامل تغییر شکل پلاستیک

δ : میزان نزدیک شدن مراکز دو جسم (کروی) به هم - تغییر شکل مرکب (m)

$\dot{\delta}$: آهنگ تغییر شکل (آهنگ جابجایی) (m/s)

ذیلا انواع مختلف مدل های نیروی برخورد نرمال مورد بحث قرار می گیرند:

۱-۴-۱-۱ مدل نیروی برخورد الاستیک

مدل الاستیک، ساده ترین مدل بوده و از قانون هوک تبعیت می کند.

$$F_e = k\delta \quad (۴-۱)$$

k : پارامتر سفتی - بستگی به خواص فیزیکی مدل دارد (N/m)

این مدل، رابطه خطی بین نیرو و تغییر شکل را نشان می دهد. اما هرترز (به نقل از شافر و همکاران،

۱۹۹۶)، مدلی را ارائه داد که در آن رابطه غیر خطی بین نیرو و تغییر شکل حاکم است. نتایج نشان داد که

این مدل، نیروی برخورد بین دو جسم کروی الاستیک را مطلوب تر مدل می کند.

$$F_e = k\delta^{\frac{3}{2}} \quad (۵-۱)$$

۱-۴-۱-۲ مدل نیروی برخورد ویسکوالاستیک (F_e, F_v)

ساده ترین مدل، برای بیان رفتار ویسکوز، قانون ویسکوز است که برای مایعات نیوتنی بکار میرود:

$$F_v = c\dot{\delta} \quad (۶-۱)$$

c : پارامتر مستهلک کننده (kg/s)

با ترکیب کردن این مدل با مدل نیروی الاستیک خطی، مدل کلومین یا همان ترکیب موازی فنر-دشپات

ایجاد می شود.

$$F = k\delta + c\dot{\delta} \quad (۷-۱)$$

مدل کلومین اغلب برای مدل سازی حرکت ذرات استفاده می شود. ولی این مدل به دو دلیل، به خوبی

نمی تواند رفتار واقعی ماده ویسکوالاستیک را تشریح کند. دلیل اول، مرتبط با ضریب برجهندگی است. با

استفاده از این مدل، ضریب برجهندگی از رابطه زیر بدست می آید (پوشل و همکاران، ۲۰۰۳):

$$e = \exp \left[\frac{-\pi c}{2m_{eff}} / \sqrt{\frac{k}{m_{eff}} - \left[\frac{c}{2m_{eff}} \right]^2} \right] \quad (۸-۱)$$

که در آن:

$$m_{eff} = \frac{m_i m_j}{m_i + m_j}$$

m_{eff} : جرم موثر (kg)

$m_{i/j}$: جرم ذرات i/j

همانطور که در معادله دیده می‌شود، مدل خطی منجر به حالتی می‌شود که ضریب برجهندگی مستقل از سرعت ضربه می‌باشد. آزمایشات فراوانی خلاف این حالت را اثبات نموده است (رامیرز و همکاران، ۱۹۹۹). کوابارا و کونو به نقل از وان زیبروک (۲۰۰۳)، ضریب برجهندگی را مطابق معادله زیر در نظر گرفتند:

$$e = 1 - f(v_i^{1/5}) \quad (۹-۱)$$

v_i : سرعت ضربه

پوشل و همکاران (۲۰۰۳)، ادعا کردند که مدل کلوین، تئوری مواد ویسکوز را نقض می‌کند. دلیل دوم را می‌توان چنین بیان کرد که نیروی برخورد در آغاز ضربه صفر نیست (نیروی ویسکوز به واسطه بیشینه سرعت، از بیشترین مقدار خود برخوردار است) که این حالت با واقعیت مطابقت ندارد (تسوجی و همکاران، ۱۹۹۳ و ژانگ و همکاران، ۱۹۹۸). بنابراین مدل‌های غیر خطی، توسط برخی از محققین پیشنهاد شده است. اولین مدل، مدل هانت و کراسلی (به نقل از شافر و همکاران ۱۹۹۶) می‌باشد.

$$F = k\delta^2 + c\delta^{3/2} \quad (۱۰-۱)$$

رابطه نیروهای عامل الاستیک و ویسکوز هر دو با تغییر شکل غیر خطی است. در رابطه ۱-۱۰ با وارد کردن $\delta^{3/2}$ در جمله مربوط به نیروی عامل تغییر شکل ویسکوز نیروی برخورد در آغاز ضربه صفر خواهد شد. اتلاف انرژی در این مدل در مقایسه با انرژی الاستیک بسیار کم است (ضریب برجهندگی نزدیک به یک

است). این مدل بعداً توسط لنکرانی و نیک روش (۱۹۹۴)، اصلاح شد. آنها پارامتر مستهلک کننده (c) و ضریب برجهندگی را چنین محاسبه کردند:

$$c = \frac{3k(1-e^2)}{4v_i} \Rightarrow e = \sqrt{1 - \frac{4cv_i}{3k}} \quad (11-1)$$

همان طور که دیده می‌شود با افزایش سرعت ضربه، ضریب برجهندگی کاهش می‌یابد، که در عمل هم چنین است.

مدل های نیروی برخورد ویسکوالاستیک، بعداً توسط کوابارا و کونو (شافر و همکاران، ۱۹۹۶)، و همچنین بریلیاتوف و همکاران (۱۹۹۶a,b)، وارد مرحله جدیدتری شد. مدل‌های مزبور چنین تعریف می‌شوند:

$$F = k\delta^{\frac{3}{2}} + c\delta^{\frac{1}{2}} \dot{\delta} \quad (12-1)$$

پارامتر مستهلک کننده، برای دو جسم کروی با جنس یکسان با توجه به این مدل، به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$c = Ak$$

$$A = \frac{1}{3} \frac{(3\eta_2 - \eta_1)^2 (1-\nu)(1-2\nu)}{3\eta_2 + 2\eta_1} \frac{1}{Ev^2} \quad (13-1)$$

A: پارامتر افت ماده (s)

E: مدول الاستیسیته (Pa)

v: نسبت پویسن (بی بعد)

η_1, η_2 : ویسکوزیته (Pa.s)

آنها ضریب برجهندگی را در این مدل چنین محاسبه کردند:

$$e = 1 - C_1 A k^{2/5} v_i^{1/5} + C_2 A^2 k^{4/5} v_i^{2/5} \quad (14-1)$$

$$k = (3/2)^{3/2} \frac{E\sqrt{R^*}}{m_{eff}(1-\nu^2)}$$

v_i : سرعت ضربه (m/s)

C_1, C_2 : ثابت‌های تجربی

v : ضریب پویسن

m_{eff} : جرم موثر (kg)

R^* : شعاع موثر خمیدگی، که چنین تعریف می‌شود: $\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$

$R_{1/2}$: شعاع کره‌ها (m)

تسوجی و همکاران (۱۹۹۳) مدل برخورد ویسکوالاستیک غیرخطی دیگری را بصورت زیر ارائه کردند:

$$F = k\delta^{\frac{3}{2}} + c\delta^{\frac{1}{4}}\dot{\delta} \quad (15-1)$$

که در آن:

F : نیروی برخورد نرمال (N)

k : پارامتر سفتی ($N/m^{3/2}$)

c : پارامتر مستهلک کننده ($kg \cdot m^{-1/4} \cdot s^{-1}$)

δ : میزان تغییر شکل (m)

$\dot{\delta}$: آهنگ تغییر شکل (m/s)

پارامتر مستهلک کننده بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$c = \alpha m^{\frac{1}{2}} k^{\frac{1}{2}} \quad (16-1)$$

که در آن: α ثابت تجربی

m : جرم موثر (kg)

k : پارامتر سفتی ($N/m^{3/2}$)

از مغایب این مدل آن است که پارامتر α بایستی بصورت تجربی تعیین شود. در این مدل فرض بر

اینست که ضریب برجهندگی مستقل از سرعت برخورد بوده که این امر نیز چندان واقع بینانه بنظر نمی‌رسد.

۳-۱-۴-۱- مدل نیروی برخورد الاستیک-پلاستیک ($F_e; F_p$)

والتون و براون (به نقل از شافر و همکاران، ۱۹۹۶)، مدل برخورد الاستیک-پلاستیک خطی را ارائه دادند. آنها دو پارامتر سفتی (ثابت فنر)، k_1 و k_2 را برای بارگذاری و بار برداری در نظر گرفتند.

$$F = \begin{cases} k_1 \delta \rightarrow \text{loading} \\ k_2 (\delta - \delta_0) \rightarrow \text{unloading} \end{cases} \quad (17-1)$$

δ_0 : تغییر شکل دائم ایجاد شده در ماده

ضریب برجهندگی در این مدل از رابطه $e = \sqrt{k_1/k_2}$ محاسبه می‌شود که مستقل از سرعت ضربه است. ولی این مدل در مورد مواد ویسکوالاستیک صادق نیست. شافر و همکاران (۱۹۹۶) پیشنهاد کردند که k_2 تابعی از بیشینه نیروی ایجاد شده در مرحله بارگذاری باشد ($k_2 = k_1 + sF_{\max}$) و ضریب برجهندگی را چنین محاسبه کردند:

$$e = \frac{1}{\sqrt{sv_i \left(\frac{m_{\text{eff}}}{k_1}\right)^{\frac{1}{2}} + 1}} \quad (18-1)$$

s : ثابت تجربی

همانطور که دیده می‌شود ضریب برجهندگی با افزایش سرعت ضربه کاهش می‌یابد. مدل نیروی برخورد الاستیک-پلاستیک غیر خطی، توسط محققین مختلفی ارائه شده است (تورنتن و نینگ، ۱۹۹۸ و میشرا، a,b, ۲۰۰۳). این مدل در سه فاز مورد بررسی قرار گرفته است: فاز اول بارگذاری - این فاز معروف به الاستیک کامل است، که از قانون هرتز تبعیت می‌کند و در آن هیچ نوع تغییر شکل پلاستیک رخ نمی‌دهد:

$$F = \frac{4}{3} E^* (R^*)^{\frac{1}{2}} \delta^{\frac{3}{2}} \quad (19-1)$$

E^* : مدول الاستیسیته معادل، که چنین تعریف می‌شود:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}$$

$E_{1/2}$: مدول الاستیسیته دو جسم (Pa)

فاز دوم بارگذاری - نیرو فراتر از تنش تسلیم ماده بوده و تغییر شکل پلاستیک اتفاق می افتد:

$$F = F_y + \pi P_y R^* (\delta - \delta_y) \quad (20-1)$$

F_y : نیروی بحرانی (نیروی که منجر به آغاز تغییر شکل دائم می گردد)

P_y : فشار بحرانی (سطح تماس نیروی بحرانی)

δ_y : تغییر شکل دائم (میزان تغییر شکل در F_y)

فاز بار برداری - اگر تغییر شکل دائم اتفاق بیفتد، شعاع انحنای سطح بزرگتر از شعاع انحنای اولیه (شعاع

خمیدگی) می گردد (R_p^*):

$$F = \frac{4}{3} E^* (R_p^*)^2 (\delta - \delta_p)^2$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \quad (21-1)$$

$$R_p^* = \frac{4E^*}{3F^*} \left(\frac{2F^* + F_y}{2\pi P_y} \right)^2$$

F^* : بیشینه نیرو در طول فاز بارگذاری (N)

δ_p : تغییر شکل پایدار

R_p^* : شعاع موثر خمیدگی در اجسام کروی تغییر شکل داده شده

تورنتن و نینگ (۱۹۹۸) همچنین سرعت ضربه بحرانی (سرعتی که در آن تغییر شکل پلاستیک آغاز

می شود) را به شرح زیر برای مواد تعریف کردند:

$$v_y = \left(\frac{\pi}{2E^*} \right)^2 \left(\frac{8\pi R^{*3}}{15 m_{eff}} \right)^{\frac{1}{2}} P_y^{5/2} \quad (22-1)$$

v_y : سرعت ضربه بحرانی (m/s)

زانگ و وو- کوک (۲۰۰۰) از مدل تورنتن برای مدل سازی نیروی برخورد نرمال استفاده کردند.