بررسی رفتار ویسکوالاستیک دانه پسته دهان بسته تحت بارگذاری شبه استاتیکی (۶۳۵)

حسین مقصودی[۱] ، محمدهادی خوش‌تقاضا[۲] ، سعید مینایی[۳]

چکیده

بررسی رفتار ویسکوالاستیک پسته های دهان بسته در راستای طراحی تجهیزات فرآوری از جمله دستگاههای پسته خندان‌کن مورد نیاز می باشد. آزمایش استراحت تنش برای دو رقم اوحدی و بادامی در ۴ سطح رطوبتی (۵ تا ۲۰٪ بر پایه تر) و ۲ سرعت بارگذاری (۱۰ mm/min و ۴۰) انجام شد. در این آزمایش نمودار لگاریتمی نیرو نسبت به زمان ترسیم گشت و مقادیر ضرایب مدل سه جزئی ماکسول، در ۴ سطح رطوبتی به دست آمد. نتایج به دست آ ده اثر معنی‌دار رطوبت بر ضرایب مدل را نشان داد، که بر اساس این نتایج با افزایش رطوبت، ضرایب مربوط به فنرهای مدل ماکسول عمومی کاهش یافت. همچنین مشخص گردید که با افزایش سرعت بارگذاری، عامل نیرو افزایش و نسبت کاهش نیرو، با کاهش همراه شده است.

کلیدواژه: پسته دهان بسته، خواص ویسکوالاستیک، آزمایش استراحت تنش، میزان رطوبت

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس
۲- دانشیار گروه مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس
۳- دانشیار گروه مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه

در مسیر فرایند فرآوری پسته با پسته‌های پوست کنده‌ای مواجه هستیم که دهان بسته بوده که مانع سهولت مصرف آن می‌گردند. در بعضی سالها درصد ناخندانی ممکن است تا ۴۱ درصد نیز برسد [۳]. خندان بودن فاکتوری مهم در مشتری پسندی این محصول و حفظ موقعیت جهانی آن در عرصه صادرات می‌باشد. ارائه روشهای پیشرفته برای خندان نمودن پسته‌های دهان بسته از مسائلی است که پرداختن به آن ضمن کمک به صادرات مرغوب و با کیفیت پسته، افزایش کمی صادرات را نیز در پی خواهد داشت.

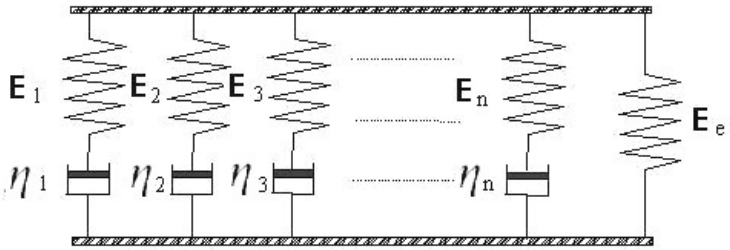
اغلب محصولات کشاورزی ویسکوالاستیک هستند و از نظر مقاومت به کشش استاتیکی و نیروهای فشاری، دینامیکی و لرزشی رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند. در این محصولات تغییر شکل فقط تابعی از تنش وارده نمی‌باشد، بلکه به زمان هم بستگی دارد [۲]. موادی که تغییر شکل آنها بستگی به زمان دارد، به عنوان مواد ویسکوالاستیک دارای بخشی از خواص جامدات و بخشی از خواص مایعات می‌باشند. تدوین مدل ویسکوالاستیک پسته‌های دهان‌بسته بر اساس منحنی استراحت تنش، به منظور بررسی بافت پسته‌های دهان بسته و رفتار آنها تحت بار، در راستای طراحی تجهیزات فرآوری از جمله دستگاههای پسته خندان‌کن مورد نیاز می‌باشند.

یکی از مهمترین مشخصه‌های مواد ویسکوالاستیک استراحت تنش[1] می‌باشد، که در یک تغییر شکل اولیه ثابت، تنش بر حسب زمان به طور پیوسته کاهش می‌یابد که آن را استراحت تنش یا کاهش تنش نامند. اندازه و سرعت کاهش تنش به ساختمان و اندازه تغییرشکل بستگی دارد. معمولاً کاهش تنش بطور مجانب به یک مقدار حدی میل می‌کند. سرعت کاهش تنش با زمان استراحت، یعنی دوره زمانی که طول می‌کشد که تنش کاهش یابد مشخص می‌شود [۲].

رفتار یک ماده الاستیک مانند رفتار یک فنر[2] است، در حالیکه رفتار یک مایع را با کمک‌فنر[3] می‌سنجند. بدین ترتیب می‌توان دستگاهی را برای بررسی رفتار یک ماده ویسکوالاستیک با ترکیبی از فنر و کمک‌فنر درست کرد و دستگاه مکانیکی حاصل را مدل رئولوژیکی نامید. این مدل برای نشان دادن پاسخ مواد تحت موقعیت استراحت تنش مفید می‌باشد، بعلاوه می‌تواند اطلاعات واضح‌تری در مورد طبیعت عمومی پاسخ ویسکوالاستیک مواد بدهد [۴].

مدل ماکسول از ترکیب سری فنر و کمک‌فنر تشکیل شده است و مدل ماکسول عمومی[4] یکی از مهمترین مدلهای رئولوژیکی برای توصیف رفتار مواد بیولوژیک می‌باشد. این مدل شامل تعدادی مدل ماکسول و یک فنر است که به صورت موازی به هم متصل شده‌اند [۲] (شکل ۱). از این مدل برای نشان دادن استراحت تنش در محصولات کشاورزی استفاده می‌شود. برای موادی که رفتار درستی از خود نشان نمی‌دهند، این مدل توصیف مناسبتر و بهتری نسبت به مدل ماکسول نشان می‌دهد. معمولاً مدل سه جزئی ($n=3$) به طور مناسبی می‌تواند رفتار واقعی مواد کشاورزی را بیان نماید [۱۱]. تجربه نشان می‌دهد که مقداری از تنش ایجاد شده در محصولات کشاورزی حتی بعد از گذشت زمان طولانی باقی می‌ماند و به طور دقیق از مدل ماکسول پیروی نمی‌کند، برای رفع این عیب فنری با ضریب E_e به دستگاه ماکسول اضافه می‌کنند. رابطه (۱)، معادله رئولوژیکی مربوط به آن برای سه جزء ماکسول و یک جزء فنر را نشان می‌دهد [۱].

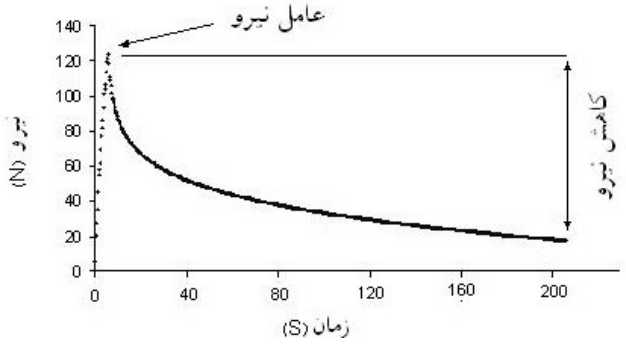
[1] Stress relaxation
[2] Spring
[3] Dashpot
[4] Generalizied Maxwell model



شکل ۱: مدل ماکسول عمومی شامل n جزء ماکسول و یک جزء فنر

$$F(t) = E_1 e^{\frac{-t}{\tau_1}} + E_2 e^{\frac{-t}{\tau_2}} + E_3 e^{\frac{-t}{\tau_3}} + E_e \qquad (۱)$$

که در این رابطه، $F(t)$ تابع کاهش نیرو در طی زمان ، E_n و τ_n ضرایب مدل می‌باشند که $\tau_n = \eta_n / E_n$ زمان استراحت می‌باشد. منحنی استراحت تنش، به عنوان تابعی از ویژگیهای ویسکوالاستیک محصول می‌باشد، که این ویژگیها با کمک پارامترهای نسبت کاهش نیرو [۱] (معادل درصد کاهش نیرو نسبت به نیروی اولیه پس از طی زمان آ ایش) و عامل نیرو [۲] (بیشینه نیرویی که سبب ایجاد کرنش ٪۱۰ در جسم گردد)، قابل بررسی و مقایسه می‌باشند. دو پارامتر مکانیکی عامل نیرو و نسبت کاهش نیرو در شکل (۲) نشان داده شده است [۸]. یکی از مزیتهای مدل ماکسول در این تحقیق که اصولاً به منظور مقایسه ارقام و تأثیر رطوبت می‌باشد، امکان تفکیک مؤلفه‌های الاستیک و ویسکوز مدل از یکدیگر می باشد.



شکل ۲: منحنی استراحت تنش و تعریف دو پارامتر عامل نیرو و نسبت کاهش نیرو

در طی تحقیقی، با استفاده از مدل ماکسول عمومی رفتار استراحت تنش در مورد دانه سویا، مورد بررسی قرار گرفت و در این آزمایش عوامل دما و رطوبت به عنوان پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار مکانیکی دانه شناخته شد [۷]. در آزمایش دیگری بر روی رفتار رئولوژیکی دانه کلزا و گندم، اثر سطوح مختلف رطوبت بر روی منحنی استراحت تنش در سطح کرنش ٪۲۰ و سرعت تغییرشکل ۱/۵ mm/min مورد بررسی قرار گرفت [۶].

در همین راستا افکاری سیاح [۱]، آزمایش استراحت تنش را بر روی پنج رقم مختلف گندم، در دو سطح کرنش ٪۱۰ و ٪۲۰ و سطوح رطوبتی ٪۹، ٪۱۳ و ٪ ۱۵ مورد بررسی قرار داد. در نتیجه بر اساس آنالیز واریانس داده‌ها مشخص گردید که فاکتور رطوبت تأثیر معنی‌داری بر روی خواص ویسکوالاستیک دانه گندم دارد، به طوریکه با افزایش رطوبت فاکتور عامل نیرو کاهش و نسبت کاهش نیرو به طور خطی افزایش می ابد.

[1] Force decay ratio
[2] Force factor

مواد و روشها

در این آزمایش تأثیر رقم، رطوبت و سرعت بارگذاری بر ویژگی‌های منحنی استراحت تنش، به عنوان مشخصه‌ای از ویژگیهای ویسکوالاستیک دانه پسته بررسی و ضرایب مدل از منحنی مذکور استخراج شد و سپس مورد مطالعه قرار گرفت. دو رقم بادامی و اوحدی که به طور گسترده‌ای در ایران کشت می‌شوند، به مقدار ۱۰ کیلوگرم برای هر رقم، به صورت تصادفی از میان توده پسته تهیه شدند. سپس دانه‌ها به صورت دستی پوست‌گیری و دانه‌های دهان بسته جدا شدند تا از اعمال فشارهای مکانیکی توسط ماشین‌های فرآوری بر نمونه‌ها جلوگیری شود. رطوبت پسته‌های دهان بسته به روش وزنی اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها به وسیله آب مقطر به رطوبت‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰٪ بر پایه تر رسیدند.

رطوبت اولیه پسته‌های دهان بسته به روش وزنی اندازه‌گ ی شد. بر این اساس قبل از انجام آزمایشات، مقدار معینی از نمونه‌ها (۳ تا ۵ گرم) در دمای ۲±۱۰۳ سانتیگراد، حدود ۳ ساعت (تا زمانیکه تغییرات ین ۲ مرحله متوالی توزین نمونه‌ها بسیار کم و ناچیز شود) درون آون قرار گرفته و بر اساس روش استاندارد وزنی مقادیر رطوبت اولیه هر یک از ارقام اندازه‌گیری شد [۱۰]، در نتیجه رطوبت اولیه ارقام اوحدی و بادامی به ترتیب ٪۴/۸۷ و ٪۴/۶۳ بر پایه تر به دست آمد. سپس نمونه‌ها به وسیله آب مقطر به رطوبت‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰٪ بر پایه تر رسیدند. مقدار آب مقطر مورد نیاز از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$W_2 = W_1 \cdot \left[\frac{M_1 - M_2}{100 - M_1}\right] \quad (۲)$$

که در این رابطه W_1 و W_2 به ترتیب وزن نمونه و وزن آب مقطر بر حسب گرم و M_1 و M_2 به ترتیب میزان رطوبت نهایی و ابتدایی بر پایه تر می‌باشند.

با توجه به یک سری آزمایشات مقدماتی و همچنین بررسی تحقیقات مشابه سطح کرنش اولیه (تغییرشکل دانه در راستای بارگذاری نسبت به اندازه اولیه) معادل ۱۰٪ در نظر گرفته شد. در این تحقیق به منظور آشکار شدن تفاوت بین سرعتهای مختلف بارگذاری، از دو سرعت بارگذاری ۱۰ و ۴۰ میلیمتر بر دقیقه استفاده شد. ضمناً تعداد تکرار در هر آزمایش ۱۰ بار در نظر گرفته شد. هر چند این پدیده پیش از این بوسیله محققین مختلف بیان شده است [۵ و ۹]، اما آنچه در این مرحله اهمیت دارد نحوه تأثیر رطوبت و سرعت بارگذاری بر آن دسته از خصوصیات مکانیکی پسته است که می‌توانند معیاری از کیفیت بافت دانه باشند.

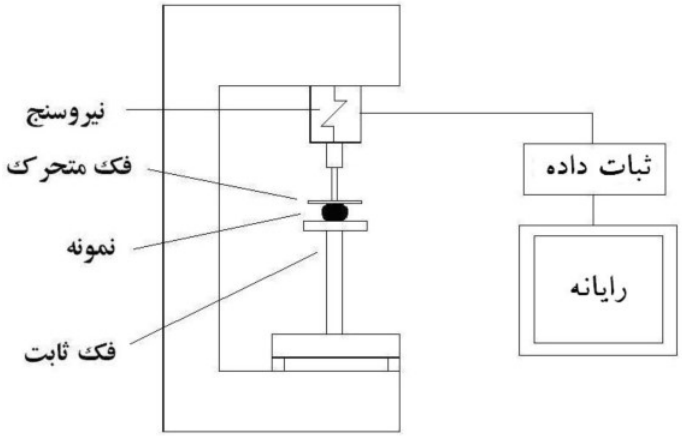
دستگاه مربوط به استراحت تنش

در این تحقیق به منظور اندازه‌گیری و بررسی خواص ویسکوالاستیک دانه‌های پسته و مشخصه‌های وابسته به زمان، تغییراتی در دستگاه آزمون مواد هانسفیلد صورت گرفت. دلیل این تغییرات عدم اندازه‌گیری و ثبت اعداد مربوط به نیرو نسبت به پارامتر زمان توسط دستگاه می‌باشد. لذا از ثبات داده‌های قابل حمل و یک بارسنج برای مشاهده و ثبت تغییرات نیرو نسبت به زمان استفاده شد (شکل ۳).

شکل ۳: دستگاه تهیه شده به منظور اندازه‌گیری مشخصه‌های مربوط به آزمایش استراحت تنش

بدین ترتیب که بارسنج مربوطه جایگزین بارسنج دستگاه آزمون مواد شده و توسط کابل رابط نیروی فشاری به ثبات داده‌ها فرستاده شد. اطلاعات وارده در صفحه ثبات داده‌ها مشاهده و نسبت به گذشت زمان در دستگاه ثبت می‌شوند و سپس با انتقال اطلاعات به نرم افزار Excel نمودار استراحت تنش (نیرو–زمان) برای دانه‌های دهان بسته پسته ترسیم شد.

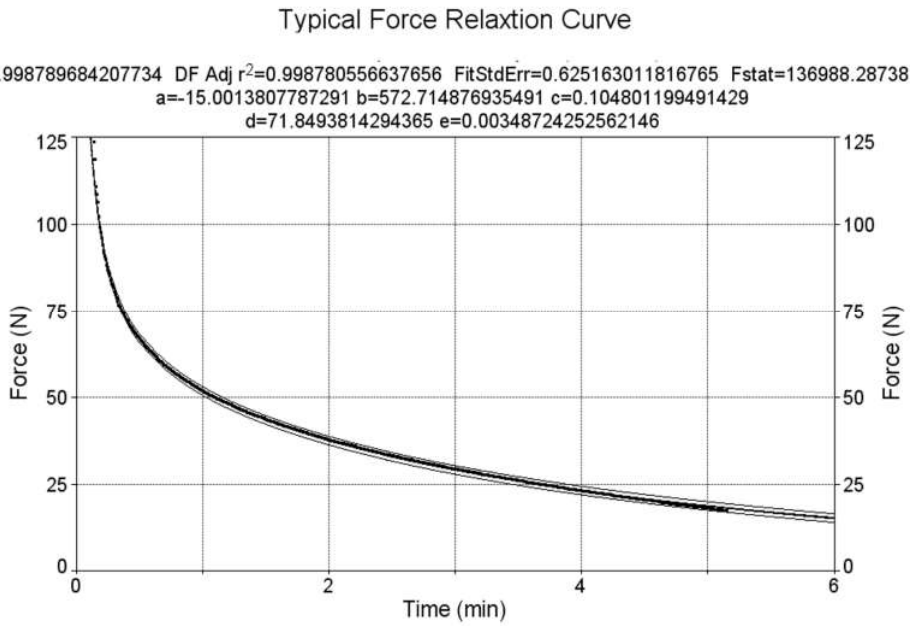
برای اجرای آزمون استراحت تنش، نمونه روی صفحه فولادی قرار گرفت (شکل ۴) و صفحه فشار دهنده کاملاً بر سطح نمونه مماس گردید. برای جلوگیری از حرکت جانبی دانه از صفحه شیارداری در زیر نمونه استفاده شد. پس از شروع بارگذاری با سرعت مناسب، زمانی که کرنش مورد نظر (۱۰ درصد) در نمونه ایجاد شد، با متوقف کردن بارگذاری، دستور ثبت اطلاعات به ثبات داده‌ها داده می‌شود و تغییرات نیرو نسبت به گذشت زمان در حافظه داخلی ثبات داده‌ها ذخ ه می‌گردند که پس از اتمام آزمایش این اعداد به راحتی قابل خواندن می‌باشند. با توجه به ماهیت آزمایش و ثبت تغییرات مکانیکی بافت توسط بارسنج، توصیه می‌شود که در طول مدت آزمایش از تکان دادن و ضربه زدن به دستگاه (خصوصاً بارسنج) خودداری شود.



شکل ٤: طرحواره سامانه مورد استفاده برای بررسی استراحت تنش

نتیجه‌گیری و بحث

با انجام آزمایش‌های استراحت تنش مشخص شد که برای استخراج مدل ویسکوالاستیک دانه پسته دهان بسته بر اساس منحنی استراحت تنش، به حداقل ۲۰۰ ثانیه زمان استراحت نیاز می‌باشد، تا مدل نمایی[1] مربوطه فراهم گردد، زیرا به نظر می‌رسد که در مدت زمان کمتر از این مقدار بخش انتهایی منحنی هنوز به ثبات لازم نرسیده است و لذا استخراج جزء سوم مدل در بسیاری از موارد امکان‌پذیر نمی‌گردد. برای انجام این آزمایش از روش Sucessive Residual معرفی شده توسط محسنین (۱۹۷۰) استفاده شد، که در این روش نمودار لگاریتمی نیرو نسبت به زمان ترسیم گشت و با استفاده از نرم افزار TableCurve 2D مقادیر ضرایب مدل سه جزئی ماکسول، در ۴ سطح رطوبتی به دست آمد. جدول ۱ مقادیر میانگین ضرایب مدل سه جزئی ماکسول، با یک جزء اضافی فنر را در ۴ سطح رطوبتی و در کرنش اولیه ۱۰٪ نشان می‌دهد. بر همین اساس، شکل ۵ نیز نمونه‌ای از منحنی مدل (رسم شده بر اساس ضرایب مدل ماکسول) و منحنی حاصل از داده‌های اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.



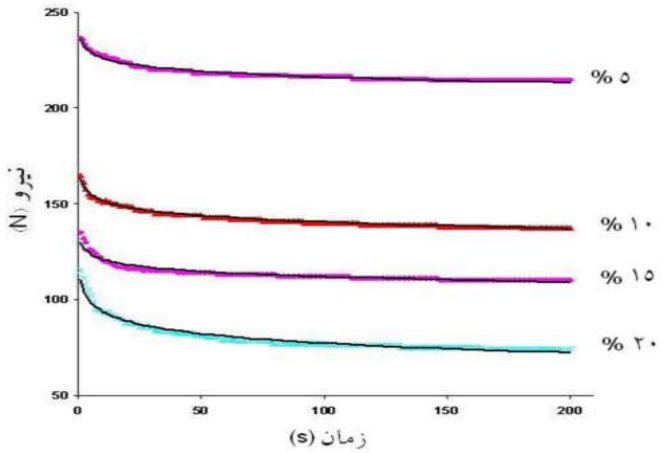
شکل ۵: نمونه‌ای از نحوه برازش منحنی استراحت تنش توسط مدل نمایی دو جزئی با جزء اضافی فنر

[1] - Exponential model

جدول ۱: مقادیر میانگین ضرایب مدل ویسکوالاستیک دانه پسته در ٤ سطح رطوبتی

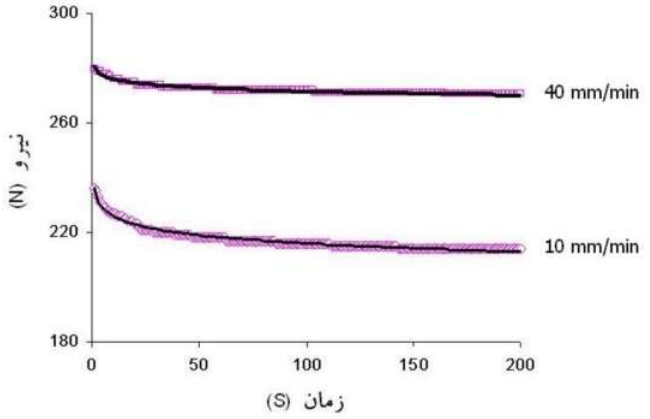
ضرایب	نمونه خشک ۵٪		۱۰٪		۱۵٪		نمونه مرطوب ۲۰٪	
	اوحدی	بادامی	اوحدی	بادامی	اوحدی	بادامی	اوحدی	بادامی
f_1	۷۲/۳۶	۱۱۵/۲۰	۶۱/۶۷	۹۶/۴	۵۳/۶۵	۹۳/۶۶	۴۶/۱۴	۵۹/۷
T_{rel1}	۲۶۰/۲۵	۳۱۱/۲۸	۲۵۹/۱۵	۳۸۴/۱۹	۲۶۱/۰۲	۳۹۶/۵۸	۲۶۱/۷۴	۴۱۸/۲۹
f_2	۳۱/۲۶	۵۴/۵۳	۲۴/۸۳	۵۳/۴۶	۲۲/۰۸	۴۳/۱۸	۳۰/۰۱	۳۶/۱۳
T_{rel2}	۲۶/۸۵	۶۹/۳۷	۲۸/۷۷	۷۶/۳۰	۲۵/۵۲	۷۴/۳۸	۲۷/۴۴	۷۱/۶۳
f_3	۹/۱۶	۲۸/۳۲	۱۰/۶۸	۲۷/۴۲	۸/۷۳	۱۷/۰۲	۱۱/۲۲	۱۶/۸۲
T_{rel3}	۴/۹۵	۱۵/۴۶	۵/۴۶	۱۶/۰۲	۵/۸۲	۱۳/۸۹	۶/۰۳	۱۲/۸۵
f_e	۹۴/۷۶	۱۷۳/۲۴	۸۱/۳۸	۱۴۳/۶	۷۴/۱۲	۱۱۸/۴۶	۶۸/۸۳	۸۶/۷۱

نتیجه‌ای که از مقایسه میانگین ضرایب در سطوح رطوبتی مشاهده گردید، این است که با افزایش رطوبت، ضرایب f_1، f_2، f_3 و f_e کاهش یافتند و در بقیه ضرایب اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. حال با توجه به اینکه ضرایب مذکور در مدل ماکسول عمومی بیان کننده خصوصیات الاستیک فنر می‌باشند، لذا با افزایش رطوبت، ضریب کشسانی دانه پسته دهان بسته (ماده ویسکو الاستیک)، نیز کاهش می‌یابد.



شکل٦: منحنی‌های تنش آسایی دانه پسته دهان بسته در رطوبت‌های متفاوت (کرنش اولیه ۱۰٪)

با توجه به منحنی‌های به دست آمده در رطوبت‌های مختلف مشخص شد که با افزایش رطوبت، عامل نیرو (نیروی لازم برای ایجاد کرنش اولیه ۱۰٪) کاهش می‌یابد (شکل ۶) که انحنای کم ابتدای منحنی در نمونه‌های خشک‌تر دلالت بر کاهش تأثیر المان سوم در مدل ماکسول دارد.



شکل ۷: منحنی‌های تنش آسایی دانه پسته دهان بسته در سرعت mm/min ۱۰ و ۴۰

همچنین با توجه به شکل ۷ نیز مشخص می‌گردد که با افزایش سرعت بارگذاری، عامل نیرو افزایش پیدا کرده و نسبت کاهش نیرو نیز با افزایش سرعت بارگذاری کاهش نشان می‌دهد که دلیل این امر داشتن زمان کمتر برای نشان دادن خواص ویسکوز نمونه‌ها در سرعت‌های بالاتر می‌باشد. لذا با افزایش سرعت بارگذاری رفتار الاستیک دانه‌های پسته دهان بسته افزایش می‌یابد.

نتایج

– بر اساس نتایج تجزیه واریانس مربوط به اثر رطوبت بر ضرایب مدل الاستیک، مشخص شد که رطوبت تأثیر معنی-داری بر ضرایب مذکور دارد.

– بر اساس نتایج ضرایب منحنی استراحت تنش با افزایش رطوبت، ضرایب مربوط به فنرهای مدل ماکسول عمومی کاهش یافت.

– افزایش میزان رطوبت باعث کاهش عامل نیرو گردید و همچنین با افزایش سرعت بارگذاری، عامل نیرو افزایش پیدا کرده و نسبت کاهش نیرو با کاهش همراه شد.

منابع

۱. **افکاری سیاح، الف.** (۱۳۸۲). اندازه‌گیری سختی دانه گندم و ارتباط آن با کیفیت آرد تولیدی، رساله دکتری مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۵۱ ص.

۲. **توکلی هشجین، ت** (۱۳۸۲). مکانیک محصولات کشاورزی، (تألیف سیتگی، گ). چاپ اول، انتشارات دانشگاه زنجان. ۵۲۰ ص.

۳. **درویشیان، م** (۱۳۸۱). کشت و تولید پسته (تالیف فرگوسن). چاپ سوم. ناشر آیندگان. ۲۳۶ ص.

4. **Anonymous,** (2003)**.** Viscoelasticity. University of Nottingham, School of Polymer Engineering., p: 1-25.
5. **Bargale, P. C., Irudayaraj, J. and Marquuist, B.** (1994). Some mechanical properties and stress relaxation characteristics of lentils. Canadian Agricultural Engineering. **36**(4), 247-254.
6. **Bargale, P. C., Irudayaraj, J. and Marquist, B.** (1995). Studies on rheological behavior of conola and wheat. Journal of Agricultural Engineering Research., **61**, 267-274.
7. **Herum, F. L., Mansah, J. K., Barre, J. H. and Majidzadeh, K.** (1979). Viscoelastic behavior of soybeans due to temperature and moisture content. Transactions of the ASAE., 1219-1224.
8. **Lakes, R. S. (1999).** Viscoelastic Solids. 1st edn., Bocaraton, Florida. CRC Press, 476 p.

9. **Mohsenin, N. N. (1970).** Physical Properties of Plant and Animal Materials. New Yourk: Gordon and Breach Science Publishers.
10. **Razavi, S. M. A. and Taghizadeh, M.,** (2007). The specific heat of pistachio nuts as affected by moisture content, temperature, and variety. Journal of Food Engineering, **79**, 158–167.
11. **Stroshine, R. and Hamann, D.** (1994). Physical Properties of Agricultural Materials and Food Products. 1st edn. West Lafayette, IN.