نشریه پژوهش‌های صنایع غذایی/ جلد ۲۳ شماره ۲/ سال ۱۳۹۲

اثر رطوبت بر برخی خواص مکانیکی سه رقم پسته

عبدالله گلمحمدی*[۱]، پوریا صبوری[۲] و ترحم مصری گندشمین[۱]

تاریخ دریافت: ۹۱/۲/۱۱ تاریخ پذیرش: ۹۲/۳/۲۰

[۱] استادیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

[۲] دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

*مسئول مکاتبه: Email: agolmohammadi42@yahoo.com

چکیده

مشخصات مکانیکی محصولات کشاورزی به منظور طراحی بهینه ماشین‌های فرآوری، کاشت و برداشت و همچنین به منظور کاهش تلفات و حفظ کیفیت محصولات طی عملیات برداشت از اهمیت فراوانی برخوردار می‌باشد. در این تحقیق خواص مکانیکی پسته، (شامل: نیروی شکست، تغییر شکل نقطه شکست، انرژی شکست و چغرمگی) مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای خواص مکانیکی با انجام آزمایش بارگذاری شبه استاتیک به وسیله دستگاه آزمون بارگذاری مواد تعیین شد. طی آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی، تأثیر پارامترهای رطوبت (در ۵ سطح: ۳۵، ۳۰، ۲۵، ۲۰ و ۱۵٪ بر پایه‌تر)، سرعت بارگذاری (در ۳ سطح: ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه) و رقم (در ۳ سطح: فندقی، بادامی و اکبری) بر روی خواص مکانیکی پسته مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که هر ۳ فاکتور مورد مطالعه (رقم، رطوبت و سرعت) تأثیر معنی‌داری بر نیروی شکست پسته داشتند، به طوری که با کاهش رطوبت مقدار نیروی شکست افزایش یافت. همچنین با افزایش سرعت بارگذاری از ۱۰ به ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه، نیروی شکست نیز روند صعودی دارد. بررسی اثر رقم، رطوبت و سرعت بارگذاری روی تغییر شکل، انرژی شکست و چغرمگی حاکی از تأثیر معنی‌دار این عوامل بر پارامترهای مذکور می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پسته، خواص مکانیکی، سرعت بارگذاری، محتوای رطوبتی

The effect of moisture content on some mechanical properties of three varieties of pistachio nuts

A Golmohammadi[1*], P Sabouri[2] and T Mesri Gundoshmian[1]

Received: April 30, 2012 Accepted: June 10, 2013
[1]Assistant Professor, Department of Agricultural Machinery, Faculty of Agricultural Technology and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
[2]Former MSc Students,, Department of Agricultural Machinery, Faculty of Agricultural Technology and Natural Resources,, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
[*]Corresponding author: E-mail: agolmohammadi42@yahoo.com

Abstract
Mechanical characteristics of agricultural crops are important to optimum design of milling, planting and harvesting machines and also for reducing losses and to improve quality of crops during harvest stage. In this study, mechanical properties of pistachio nuts (rupture force, deformation, rupture energy and toughness) were investigated. Mechanical properties were determined through quasi-static loading experiment using a material testing machine. A factorial experiment with completely randomized design was utilized to study the effect of moisture content (at 5 levels: 35, 30, 25, 20 and 15% w.b.), loading rate (at 3 levels: 10, 20 and 30 mm min^{-1}) and variety (at 3 levels: Fandoghi, Badami and Akbari) on mechanical properties of pistachio nuts. Results showed that all the three factors (variety, moisture content and loading rate) had significant effects on the rupture force, such that by decreasing moisture content the rupture force increased. Also, the nuts rupture force increased by increasing loading rate from 10 to 30 mm min^{-1}. Investigation of the effects of variety, moisture content and loading rate on deformation, rupture energy and toughness showed that these factors had a significant effect on these parameters.

Key words: Loading rate, Mechanical properties, Moisture content, Pistachio nuts

مقدمه

گیاه پسته اهلی[1] متعلق به خانواده‌ی آناکاردیاسه[2] می‌باشد که بادام هندی، سماق، بلوط سمی و مانگو نیز به این خانواده تعلق دارند. پسته به عنوان یک محصول استراتژیک جایگاه خاصی را در بین تولیدات باغی دارا می‌باشد. این محصول بخش عمده‌ای از صادرات غیر نفتی را تشکیل می‌دهد (ابریشمی ۱۳۷۳). بر اساس آمار منتشر شده از سایت رسمی گمرک جمهوری اسلامی ایران (۱۳۸۹) تولید پسته در طول ۲۰ سال گذشته در کشور افزایش یافته و میزان صادرات پسته کشور در سال ۱۳۸۹ نسبت به مدت مشابه سال قبل حدود ٦٦ درصد رشد داشته است که تا پایان آبان ماه سال ۱۳۸۹ بیش از ۱۰۵ هزار تن انواع پسته به کشورهای مختلف صادر شده است. در شرایط کنونی حدود ۵۵ درصد از تولید و بیش از ٦۰ درصد از صادرات جهانی پسته در اختیار ایران است و درآمد ارزی حاصل از صادرات پسته به بیش از ٤۰۰ میلیون دلار می‌رسد. در حال حاضر سطح زیر کشت پسته در ایران بیش از ۳٦۰،۰۰۰ هکتار می‌باشد که استان کرمان با مجموع بیش از ۲۷۰،۰۰۰ هکتار باغ‌های بارور و غیر بارور، ۷۷ درصد محصول کل کشور را تولید و به عنوان مهم‌ترین منطقه پسته کاری ایران و دنیا محسوب می‌شود.

دانش امروز برتری‌های پسته را از پاره‌ای جهات بر بسیاری از خوراکی‌های مقوی و مغذی از جمله خاویار،

[1] Pistachio Vera. L
[2] Anacardiaceae

میگو، گوشت قرمز و سفید و ... را به اثبات رسانده است، مغز پسته منبع خوبی از چربی (۵۰ تا ۶۰٪) و اسیدهای چرب اشباع نشده است که برای برنامه غذایی انسان بسیار مفید است (ماسکان و کاراتاس ۱۹۹۸).

شناخت خواص فیزیکی و مکانیکی محصولات کشاورزی و مواد غذایی همواره مورد توجه و علاقه متخصصان کشاورزی و صنایع غذایی بوده است. با توجه به کاربردهای مختلف محصولات خشکبار، نظیر پسته در صنایع مختلف، بررسی خواص فیزیکی و رئولوژیکی این محصول حائز اهمیت است. برای این منظور لازم است که روش‌های تشخیص ویژگی‌های تک محصول جایگزین روش‌های بررسی توده محصول گردد (مسی و همکاران ۱۹۹۳).

خواص مکانیکی مواد می‌تواند درک جامع و روشن‌تری از خواص فیزیکی و در نتیجه خصوصیات بافت آن ماده بدست دهد لذا این مفهوم، پایه و اساس بسیاری از روش‌های ابزاری در شناسایی خصوصیات بافت مواد بیولوژیک می‌باشد (لویس ۱۹۸۹).

تحقیقات زیادی در زمینه تعیین خواص مکانیکی محصولات کشاورزی، تحت اثر نیروهای استاتیک و شبه استاتیک انجام شده است. از جمله پژوهش‌های انجام شده در این زمینه می‌توان به تحقیق آیدین (۲۰۰۲) بر روی دانه فندق، آیدین و ازکن (۲۰۰۲) بر روی بنه (پسته کوهی)، آیدین (۲۰۰۳) بر روی بادام، کوبلای و فاروک (۲۰۰٤) بر روی هسته زردآلو، کیلیکان و گونر (۲۰۰۸) بر روی زیتون، عالمی و همکاران (۱۳۸۸) بر روی دانه سویا و حیدر بیگی و همکاران (۲۰۰۸) بر روی پسته جنگلی اشاره کرد. بررسی‌های اولیه نشان می‌دهد که روی خواص مکانیکی پسته‌های اکبری، بادامی و فندقی منطقه رفسنجان تحقیقی صورت نگرفته است. هدف از این پژوهش بررسی برخی خواص مکانیکی پسته نظیر، نیروی شکست، تغییر شکل نقطه شکست، انرژی شکست و چغرمگی تحت بارگذاری شبه استاتیک است.

علاوه بر این نحوه تأثیر رطوبت و سرعت بارگذاری شبه استاتیک بر خواص مکانیکی سه رقم پسته تجاری منطقه رفسنجان (فندقی، بادامی و اکبری) نیز بررسی خواهد شد.

مواد و روش‌ها

تهیه، نگهداری و آماده سازی نمونه‌ها

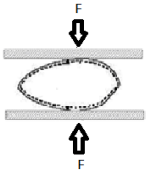
سه رقم از ارقام متداول پسته شامل: فندقی، بادامی و اکبری هر کدام به مقدار ۱۰ کیلوگرم در شهریور ماه سال ۱۳۹۰ از باغ‌های منطقه رفسنجان تهیه شد. پسته‌ها به صورت دستی پوست گیری شد و دانه‌های نارس، شکسته و مواد زائد از آن جدا گردید. رطوبت اولیه پسته‌ها با استفاده از روش استاندارد وزنی بر پایه تر تعیین شد (ASAE, ۲۰۰۱). به دلیل این که عملیات‌های مختلف فراوری بر روی پسته معمولاً در محدوده رطوبتی ۱۵ تا ۳۵ درصد بر پایه‌تر انجام می‌شود، برای بررسی اثر رطوبت بر خواص مکانیکی پسته، پنج سطح رطوبتی ۳۵، ۳۰، ۲۵، ۲۰ و ۱۵ درصد (بر پایه‌تر) در نظر گرفته شد. سطوح مختلف رطوبتی پسته‌ها از طریق خشک کردن در آون و توزین‌های متوالی و محاسبه‌ی کاهش وزن تا رسیدن به سطح رطوبت مطلوب بدست آمد. بعد از این که پسته‌ها به سطح رطوبتی مطلوب رسیدند، نمونه‌ها به مدت ۲٤ ساعت در داخل ظروف پلاستیکی مسدود و در دمای ۵ درجه سلسیوس در یخچال نگهداری شدند تا رطوبت به طور یکسان توزیع گردد. قبل از انجام آزمایش‌ها به مدت ۲ ساعت نمونه‌ها در دمای محیط آزمایشگاه قرار گرفت و سپس آزمایش‌ها بر روی آن‌ها انجام شد (آیدین و ازکن ۲۰۰۲).

بارگذاری شبه استاتیک:

از آنجا که آزمایش بارگذاری شبه استاتیک معمولاً بیانگر ویژگی‌های مقاومتی و خواص مکانیکی نمونه مورد آزمایش است، لذا اطلاعاتی که از منحنی نیرو- تغییر شکل استخراج می‌گردد، نه تنها برای بررسی اثر

رطوبت و ارقام مختلف بر روی خواص مکانیکی مفید است، بلکه می‌تواند در طراحی و بهینه‌سازی ماشین‌های فراوری از قبیل ماشین‌های که در فرآیند خندان کردن پسته‌های دهان بسته و پسته مغز کن‌ها استفاده می‌شوند، مورد بهره‌برداری قرار گیرد. بر این اساس هدف از این آزمایش استخراج منحنی نیرو-تغییر شکل پسته می‌باشد تا به کمک آن بتوان به بررسی ویژگی‌های استحکام فشاری پسته پرداخت.

برای انجام آزمون مکانیکی پسته از دستگاه آزمون کشش و فشار سنتام مدل STM-20 با لودسل ۱۰۰ نیوتنی استفاده گردید. با توجه به اثر سرعت بارگذاری بر بازده و کارایی مطلوب دستگاه‌های فراوری، ۳ سرعت بارگذاری متفاوت و با فاصله یکنواخت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. جهت بارگذاری مطابق شکل ۱ از پهلو و روی شیار پسته‌ها در نظر گرفته شد.



شکل ۱- نحوه اعمال نیرو به پسته

در هر آزمایش پسته بین فک‌های ثابت و متحرک دستگاه کشش و فشار قرار می‌گرفت و نمودار نیرو-تغییر شکل آن به طور پیوسته توسط نرم‌افزار STM-Controller ترسیم می‌شد و بارگذاری تا رسیدن نیرو به بیش‌ترین مقدار خود و شکسته شدن پسته، ادامه می‌یافت.

نیروی شکست:

نیروی شکست، نقطه‌ای روی منحنی نیرو-تغییر شکل است که در آن با افزایش ناچیز تغییر شکل، کاهش بسیار زیاد در مقدار نیرو حاصل می‌شود (آیدین ۲۰۰۲).

تغییر شکل در نقطه شکست:

نقطه‌ی متناظر نیروی شکست در نمودار نیرو-تغییر شکل بر روی محور تغییر شکل می‌باشد (حیدربیگی و همکاران، ۲۰۰۹).

انرژی شکست:

انرژی شکست، با محاسبه سطح زیر منحنی نیرو-تغییر شکل از نقطه شروع بارگذاری تا نقطه شکست به دست می‌آید (کویونکو و همکاران ۲۰۰٤).

چغرمگی[3]:

چغرمگی عبارت است از مقدار کار انجام شده بر واحد حجم جسم تا اینکه شکست حاصل شود (کوبلای و فاروک ۲۰۰٤). با توجه به اینکه سطح زیر منحنی نیرو-تغییر شکل معرف کار انجام شده برای شکست پسته می‌باشد، لذا با تقسیم آن بر حجم پسته مقدار چغرمگی پسته محاسبه شد.

تحلیل داده‌ها:

برای هر تیمار، اندازه گیری‌های مربوط به خواص مکانیکی در ٥ تکرار انجام شد. از آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی به منظور بررسی اثرات اصلی و متقابل رقم (در ۳ سطح)، محتوای رطوبتی (در ٥ سطح) و سرعت بارگذاری (در ۳ سطح) بر خواص مکانیکی استفاده گردید. برای مقایسه‌ی میانگین‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن استفاده شد و نرم افزارهای آماری SPSS-19 و MSTAT-C برای تجزیه‌ی و تحلیل داده‌ها مورد استفاده قرار گرفتند.

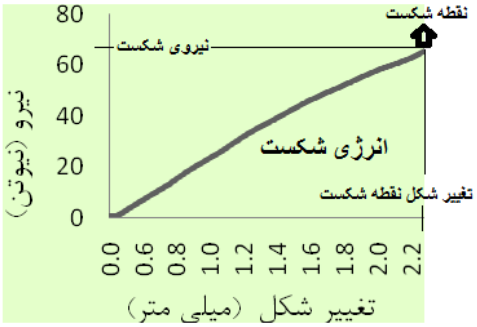
نتایج و بحث

رفتار دانه پسته تحت بارگذاری شبه استاتیک:

نتایج اولیه این آزمایش نشان داد که بخش اولیه منحنی نیرو-تغییر شکل پسته همانند دیگر مواد بیولوژیک بوده و در اغلب موارد می‌توان در بخش اولیه محدوده‌ای را به صورت خطی در نظر گرفت. نمونه‌ای از منحنی نیرو- تغییر شکل برای رقم فندقی در شکل ۲ ارائه شده

[3]- Toughness

است. با توجه به منحنی‌های نیرو- تغییر شکل به دست آمده، سیر صعودی منحنی بعد از نقطه شکست ادامه نمی‌یابد، که احتمالاً به دلیل ترک ناگهانی و عمیق در پسته می‌باشد؛ لذا در این محصول نقطه حد تسلیم کاملاً واضح و مشخص است.



شکل ۲- نمودار نیرو- تغییر شکل (پسته فندقی در رطوبت ۲۰٪ و سرعت بارگذاری ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه)

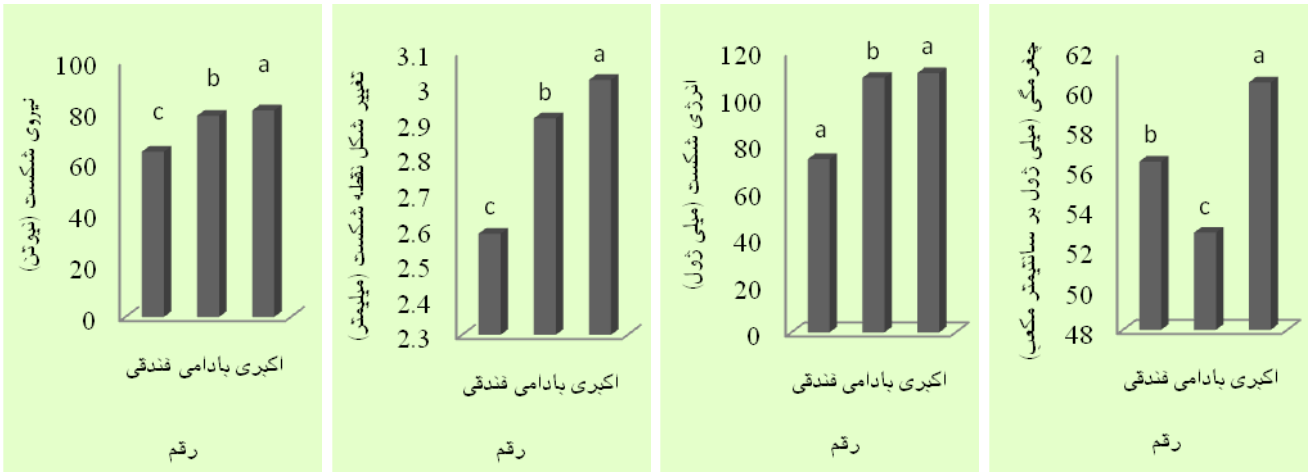
تجزیه واریانس خواص مکانیکی پسته:

نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) مربوط به اثرات رقم، رطوبت و سرعت بارگذاری بر خواص مکانیکی مورد بحث در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بین ارقام، رطوبت و سرعت‌های مختلف بر خواص مکانیکی مورد بررسی اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪ وجود دارد (جدول ۱). در شکل‌های ۳ تا ۵، اثر رقم، رطوبت و سرعت بارگذاری، روی نیروی شکست، تغییر شکل در نقطه شکست، انرژی شکست و چغرمگی سه رقم پسته فندقی، بادامی و اکبری رسم شده است. جداول ۲ تا ۵ نیز به ترتیب میانگین و انحراف معیار نیروی شکست، تغییر شکل نقطه شکست، انرژی شکست و چغرمگی را برای سه رقم پسته فندقی، بادامی و اکبری در رطوبت و سرعت‌های متفاوت بیان می‌کند.

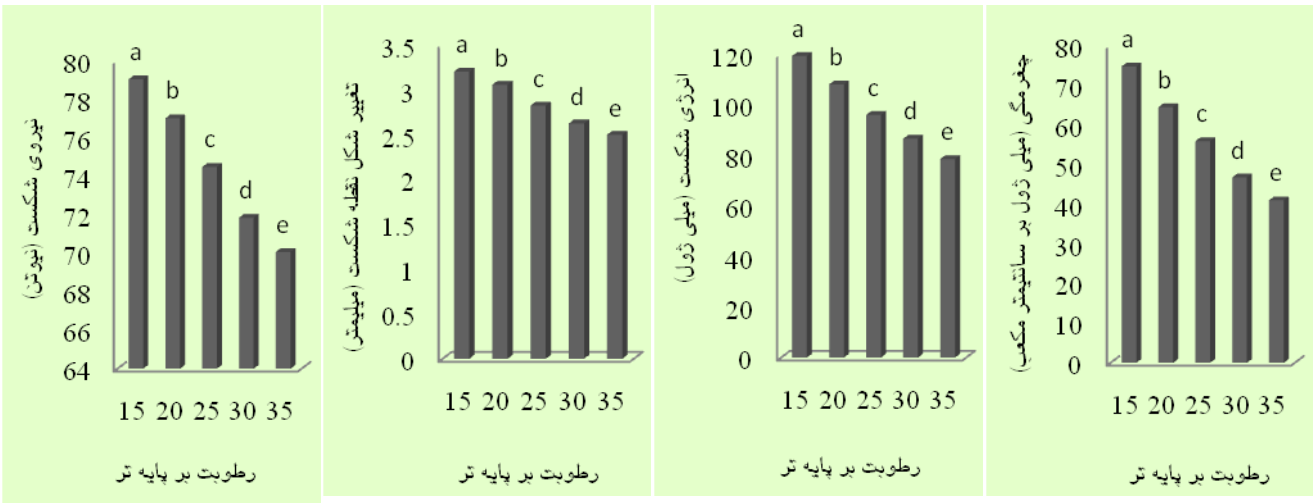
جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) خواص مکانیکی پسته

متغیر	درجه آزادی	نیروی شکست (نیوتن)	تغییر شکل (میلی متر)	انرژی شکست (میلی ژول)	چغرمگی (میلی ژول بر سانتیمتر مکعب)
رقم	۲	۵۷۴۴/۷۴۰**	۳/۸۳۰**	۳۲۰۰۴/۲۸۱**	۱۰۷۱/۴۱۷**
سرعت بارگذاری	۲	۵۴۱۵/۷۳۱**	۶/۲۴۶**	۱۲۰۴۴/۴۰۷**	۷۲۶/۵۹۴**
رطوبت	۴	۶۰۳/۹۸۹**	۳/۸۳۸**	۲۶۷۲/۰۷۱**	۸۲۵۹/۳۷۰**
رقم × سرعت	۴	۵۱۱/۹۴۵**	۰/۲۸۷**	۱۵۹/۳۷۴**	۷۴/۹۹۲**
رقم × رطوبت	۸	۱۰/۴۷۵ n.s	۰/۰۶۹**	۴۲۲/۶۴۰**	۵۶/۸۲۸**
سرعت × رطوبت	۸	۱۰/۰۴۳ n.s	۰/۰۲۷ n.s	۱۱۱/۶۹۲**	۳۱/۵۲۸**
رقم × سرعت × رطوبت	۱۶	۴/۶۰۵ n.s	۰/۰۵۵**	۵۱/۰۸۶ n.s	۲۰/۸۷۴**
خطا	۱۸۰	۱۰/۰۲۹	۰/۰۱۶	۳۲/۲۱۲	۶/۹۴۷

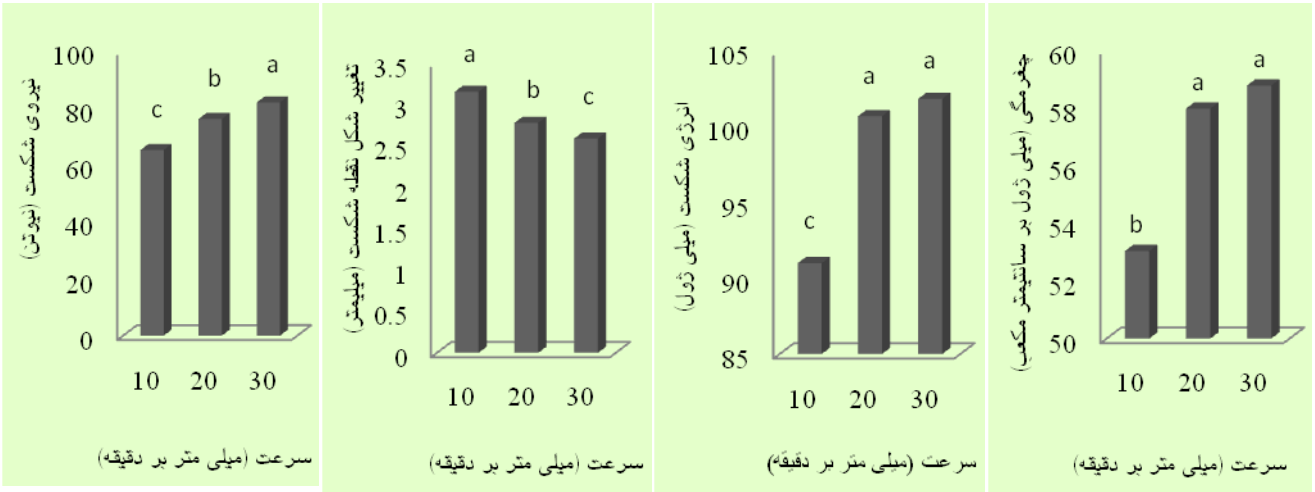
** معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪، * معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و n.s عدم معنی‌داری.



شکل ۳- تأثیر رقم بر خواص مکانیکی سه رقم پسته



شکل ۴- تأثیر رطوبت بر خواص مکانیکی سه رقم پسته



شکل ۵- تأثیر سرعت بارگذاری بر خواص مکانیکی سه رقم پسته

جدول ۲- میانگین و انحراف معیار نیروی شکست پسته (نیوتن) در رطوبت و سرعت‌های مختلف

رطوبت (بر پایه‌تر)	سرعت (میلی متر بر دقیقه)	فندقی	بادامی	اکبری
۳۵	۱۰	۴۳/۷۱۸۷±۲/۳۶۰۹^{i}	۶۹/۳۱۹۱±۲/۶۹۵۸^{i}	۷۱/۷۹۳۷±۲/۷۱۶۷^{f}
۳۰	۱۰	۴۶/۴۸۷۱±۲/۶۵۷۶^{hi}	۷۰/۳۴۳۶±۲/۷۳۵۷^{hi}	۷۳/۰۰۵۳±۲/۷۶۲۵^{f}
۲۵	۱۰	۵۰/۰۵۲۰±۳/۷۷۳۳^{gh}	۷۲/۳۲۳۶±۲/۸۱۲۷^{ghi}	۷۳/۴۴۰۳±۲/۷۷۹۰^{ef}
۲۰	۱۰	۵۳/۰۵۲۴±۴/۳۴۶۹^{fg}	۷۳/۶۲۶۲±۲/۸۶۳۳^{fgh}	۷۵/۲۷۲۸±۲/۸۴۸۳^{ef}
۱۵	۱۰	۵۵/۷۷۵۷±۵/۳۱۵۱^{f}	۷۴/۶۹۴۴±۲/۹۰۴۹^{efg}	۷۶/۲۴۳۶±۲/۸۸۵۱^{ef}
۳۵	۲۰	۶۱/۸۷۱۲±۲/۴۱۱۳^{e}	۷۶/۴۵۳۹±۲/۹۷۳۳^{efg}	۷۵/۲۶۸۲±۲/۸۴۸۲^{ef}
۳۰	۲۰	۶۲/۸۱۶۳±۲/۶۳۴۴^{e}	۷۸/۳۱۵۴±۳/۰۴۵۷^{cde}	۷۷/۵۰۸۹±۲/۹۳۳۰^{e}
۲۵	۲۰	۶۷/۸۳۵۱±۲/۶۵۶۴^{d}	۸۱/۷۱۷۲±۳/۱۷۸۰^{bcd}	۸۱/۸۳۹۵±۳/۰۹۶۸^{d}
۲۰	۲۰	۷۰/۲۸۴۰±۲/۹۴۵۲^{cd}	۸۲/۵۰۹۸±۳/۲۰۸۸^{bc}	۸۳/۶۴۸۳±۳/۱۶۵۳^{cd}
۱۵	۲۰	۷۱/۷۳۳۲±۳/۶۹۵۷^{bcd}	۸۴/۸۷۹۹±۳/۳۰۱۰^{ab}	۸۶/۴۳۴۶±۳/۲۷۰۷^{bc}
۳۵	۳۰	۷۱/۸۶۴۸±۲/۳۴۶۴^{bcd}	۷۷/۵۸۳۰±۳/۰۱۷۲^{def}	۸۲/۷۷۶۹±۳/۱۳۲۴^{cd}
۳۰	۳۰	۷۳/۳۳۶۱±۲/۵۰۹۶^{bc}	۸۰/۸۵۹۸±۳/۱۹۴۱^{bcd}	۸۴/۰۲۱۲±۳/۱۷۹۴^{cd}
۲۵	۳۰	۷۵/۲۲۱۷±۳/۰۰۲۳^{b}	۸۲/۱۳۱۱±۳/۱۹۴۱^{bc}	۸۵/۸۴۵۳±۳/۲۴۸۴^{bcd}
۲۰	۳۰	۸۰/۲۱۲۶±۳/۷۰۲۵^{a}	۸۴/۹۲۰۳±۳/۳۰۲۶^{ab}	۸۹/۷۱۷۹±۳/۳۹۵۰^{ab}
۱۵	۳۰	۸۲/۶۹۳۶±۴/۴۷۵۸^{a}	۸۷/۵۶۳۶±۳/۴۰۵۴^{a}	۹۱/۴۳۰۵±۳/۴۵۹۸^{a}

میانگین‌های با حروف یکسان در هر ستون در سطح احتمال P < ۰/۰۵ تفاوت معنی داری ندارند (آزمون چند دامنه‌ای دانکن).

جدول ۳- میانگین و انحراف معیار تغییر شکل نقطه شکست پسته (میلی متر) در رطوبت و سرعت‌های مختلف

رطوبت (بر پایه‌تر)	سرعت (میلی متر بر دقیقه)	فندقی	بادامی	اکبری
۳۵	۱۰	۲/۷۵۶۴±۰/۰۶۶۵^{cd}	۲/۷۷۶۳±۰/۱۱۴۲^{ef}	۲/۹۵۶۶±۰/۱۴۳۹^{fg}
۳۰	۱۰	۲/۸۶۴۵±۰/۰۸۵۹^{c}	۲/۸۰۷۲±۰/۱۱۵۵^{ef}	۳/۰۷۳۶±۰/۱۴۹۶^{ef}
۲۵	۱۰	۳/۰۶۲۳±۰/۰۹۴۴^{b}	۳/۳۰۴۶±۰/۱۳۵۹^{bc}	۳/۱۸۹۹±۰/۱۵۵۲^{cde}
۲۰	۱۰	۳/۱۷۳۰±۰/۱۰۶۲^{ab}	۳/۴۴۰۵±۰/۱۴۱۵^{ab}	۳/۴۵۷۵±۰/۱۶۸۳^{b}
۱۵	۱۰	۳/۳۰۸۹±۰/۱۳۲۱^{a}	۳/۵۰۵۴±۰/۱۴۴۲^{a}	۳/۶۲۸۴±۰/۱۷۶۶^{a}
۳۵	۲۰	۲/۱۷۰۵±۰/۰۶۲۲^{g}	۲/۵۱۱۰±۰/۱۰۳۳^{gh}	۲/۷۳۵۴±۰/۱۳۳۱^{i}
۳۰	۲۰	۲/۲۵۱۷±۰/۰۶۷۴^{g}	۲/۵۶۸۲±۰/۱۰۵۶^{gh}	۲/۸۱۲۰±۰/۱۳۶۸^{ghi}
۲۵	۲۰	۲/۴۴۲۱±۰/۰۶۴۶^{ef}	۲/۷۵۱۳±۰/۱۱۳۲^{ef}	۲/۹۳۹۱±۰/۱۴۳۰^{fgh}
۲۰	۲۰	۲/۵۶۷۷±۰/۱۷۱۹^{ef}	۳/۲۰۸۸±۰/۱۳۲۰^{c}	۳/۲۶۱۰±۰/۱۵۸۷^{cd}
۱۵	۲۰	۲/۷۵۸۴±۰/۱۸۶۵^{cd}	۳/۲۳۰۸±۰/۱۳۲۹^{c}	۳/۴۵۶۴±۰/۱۶۸۲^{b}
۳۵	۳۰	۱/۹۸۳۶±۰/۰۶۰۸^{h}	۲/۴۸۳۵±۰/۱۰۲۲^{h}	۲/۱۰۰۴±۰/۱۰۲۲^{k}
۳۰	۳۰	۲/۱۵۸۲±۰/۰۶۶۴^{g}	۲/۵۵۵۷±۰/۱۰۵۱^{gh}	۲/۵۱۵۸±۰/۱۲۲۴^{j}
۲۵	۳۰	۲/۲۵۷۸±۰/۰۶۵۹^{g}	۲/۶۶۴۴±۰/۱۰۹۶^{fg}	۲/۷۷۷۶±۰/۱۳۵۲^{hi}
۲۰	۳۰	۲/۴۲۹۲±۰/۰۶۵۳^{f}	۲/۸۵۱۴±۰/۱۱۷۳^{e}	۳/۱۰۲۲±۰/۱۵۱۰^{def}
۱۵	۳۰	۲/۶۰۵۳±۰/۱۵۶۵^{de}	۳/۰۱۴۳±۰/۱۲۴۰^{d}	۳/۲۹۷۳±۰/۱۶۰۵^{bc}

میانگین‌های با حروف یکسان در هر ستون در سطح P < ۰/۰۵ تفاوت معنی داری ندارند (آزمون چند دامنه‌ای دانکن).

جدول ۴- میانگین و انحراف معیار انرژی شکست پسته (میلی ژول) در رطوبت و سرعت‌های مختلف

رطوبت (بر پایه‌تر)	سرعت (میلی متر بر دقیقه)	فندقی	بادامی	اکبری
۳۵	۱۰	۵۶/۱۴۰۵±۲/۷۷۸۳^{h}	۷۲/۰۶۶۱±۲/۹۳۰۱^{i}	۷۶/۳۵۶۸±۳/۸۶۳۷^{h}
۳۰	۱۰	۶۱/۴۱۹۳±۳/۰۴۸۸^{gh}	۸۳/۴۴۵۶±۳/۳۹۲۸^{h}	۹۱/۱۹۰۷±۴/۶۱۴۳^{g}
۲۵	۱۰	۶۷/۱۶۰۱±۳/۴۵۹۸^{fg}	۱۰۵/۱۰۰۸±۱۰/۴۸۰۴^{def}	۱۰۶/۵۷۶۳±۵/۳۹۲۸^{de}
۲۰	۱۰	۷۳/۱۷۴۷±۳/۱۸۶۳^{ef}	۱۱۶/۱۴۹۰±۶/۱۰۲۱^{c}	۱۱۸/۶۵۰۱±۶/۰۰۳۸^{c}
۱۵	۱۰	۸۲/۳۱۸۶±۳/۴۰۴۲^{bcd}	۱۲۴/۶۳۷۹±۶/۲۸۹۰^{b}	۱۳۰/۷۰۳۰±۶/۶۱۳۶^{b}
۳۵	۲۰	۶۳/۳۷۳۷±۳/۰۳۹۱^{gh}	۹۵/۴۹۲۵±۳/۸۸۲۶^{g}	۹۸/۴۶۶۳±۴/۹۸۲۴^{f}
۳۰	۲۰	۶۵/۷۹۸۳±۳/۳۸۷۲^{fg}	۹۹/۳۶۲۷±۴/۰۳۹۹^{fg}	۱۰۳/۴۹۳۸±۵/۲۳۶۸^{def}
۲۵	۲۰	۷۳/۷۹۷۸±۳/۱۶۰۰^{ef}	۱۰۷/۷۸۶۲±۴/۳۸۲۴^{de}	۱۰۹/۴۴۱۶±۵/۵۳۷۸^{d}
۲۰	۲۰	۷۹/۱۷۷۸±۴/۳۴۸۴^{cde}	۱۲۵/۵۲۰۵±۵/۱۰۳۵^{b}	۱۲۴/۳۵۳۶±۶/۲۹۲۳^{bc}
۱۵	۲۰	۸۸/۸۷۶۳±۳/۶۷۳۳^{b}	۱۳۴/۷۵۰۵±۵/۴۷۸۷^{a}	۱۴۱/۱۵۱۹±۷/۱۴۲۳^{a}
۳۵	۳۰	۶۷/۲۵۴۶±۳/۰۹۵۰^{fg}	۹۵/۸۴۸۷±۳/۸۹۷۱^{g}	۸۳/۱۲۰۷±۴/۲۰۵۹^{h}
۳۰	۳۰	۷۳/۵۵۳۸±۳/۱۷۳۲^{ef}	۱۰۲/۰۶۶۲±۴/۱۴۹۸^{efg}	۱۰۰/۳۸۵۵±۵/۰۷۹۶^{ef}
۲۵	۳۰	۷۵/۵۲۹۹±۳/۳۷۷۰^{de}	۱۱۱/۵۶۱۸±۱۲/۸۹۹۴^{cd}	۱۰۸/۴۸۵۲±۵/۴۸۹۴^{d}
۲۰	۳۰	۸۶/۴۷۰۸±۳/۴۳۱۸^{bc}	۱۲۳/۸۳۴۳±۱۴/۲۶۳۸^{b}	۱۲۶/۸۰۴۰±۶/۴۱۶۳^{b}
۱۵	۳۰	۹۶/۵۷۰۲±۳/۳۷۷۰^{a}	۱۳۴/۱۲۱۱±۸/۹۶۹۹^{a}	۱۴۲/۴۴۵۴±۷/۲۰۷۸^{a}

میانگین‌های با حروف یکسان در هر ستون در سطح $P < ۰/۰۵$ تفاوت معنی داری ندارند (آزمون چند دامنه‌ای دانکن).

جدول ۵- میانگین و انحراف معیار چغرمگی در نقطه شکست پسته (میلی ژول بر سانتی مترمکعب) در رطوبت و سرعت‌های مختلف

رطوبت (بر پایه‌تر)	سرعت (میلی متر بر دقیقه)	فندقی	بادامی	اکبری
۳۵	۱۰	۳۸/۱۹۵۹±۱/۸۶۸۵^{i}	۳۰/۸۵۶۰±۱/۴۴۹۶^{g}	۳۸/۰۳۴۶±۱/۳۹۶۴^{i}
۳۰	۱۰	۴۴/۰۹۵۲±۳/۰۵۵۹^{h}	۳۷/۷۴۹۰±۱/۷۷۳۵^{f}	۴۶/۱۰۱۸±۱/۶۹۲۵^{g}
۲۵	۱۰	۵۰/۷۳۴۵±۲/۴۵۲۶^{g}	۵۴/۶۰۹۷±۱/۴۶۳۶^{c}	۵۸/۱۸۴۶±۲/۱۳۶۱^{e}
۲۰	۱۰	۵۹/۳۴۶۸±۲/۱۴۰۷^{e}	۵۸/۸۳۹۸±۲/۷۶۴۳^{b}	۶۶/۳۳۸۵±۲/۴۳۵۵^{d}
۱۵	۱۰	۶۷/۶۶۰۰±۱/۷۴۵۳^{c}	۶۷/۴۶۵۷±۳/۱۶۹۶^{a}	۷۷/۳۲۳۸±۲/۸۳۸۸^{b}
۳۵	۲۰	۴۳/۰۴۵۴±۲/۰۳۱۳^{h}	۴۰/۸۸۶۳±۱/۹۲۰۹^{ef}	۴۹/۰۴۷۷±۱/۸۰۰۷^{fg}
۳۰	۲۰	۴۶/۴۹۵۹±۲/۲۲۲۱^{h}	۴۴/۹۴۹۶±۲/۱۱۱۸^{d}	۵۲/۳۲۱۷±۱/۹۲۰۹^{f}
۲۵	۲۰	۵۵/۶۸۵۴±۲/۱۰۴۶^{f}	۵۴/۶۱۵۵±۴/۱۰۱۶^{c}	۵۹/۷۴۸۹±۲/۱۹۳۵^{e}
۲۰	۲۰	۶۳/۹۶۶۶±۲/۶۹۸۱^{d}	۶۲/۰۷۰۴±۲/۷۷۵۰^{b}	۶۹/۵۲۷۴±۲/۵۵۲۵^{cd}
۱۵	۲۰	۷۳/۱۹۲۵±۱/۹۰۶۱^{b}	۷۰/۶۷۱۵±۳/۳۲۰۲^{a}	۸۳/۵۰۵۳±۳/۰۶۵۷^{a}
۳۵	۳۰	۴۵/۸۹۴۲±۲/۳۷۵۸^{h}	۴۱/۶۳۸۸±۱/۹۷۱۹^{e}	۴۱/۴۰۳۸±۱/۵۲۰۰۰^{h}
۳۰	۳۰	۵۱/۹۷۸۶±۲/۰۵۸۸^{g}	۴۶/۳۷۲۶±۲/۰۷۲۴^{d}	۵۰/۷۵۰۳±۱/۸۶۳۲^{f}
۲۵	۳۰	۵۶/۸۱۲۵±۲/۰۳۹۴^{ef}	۵۳/۷۵۳۴±۵/۶۴۳۳^{c}	۵۹/۲۲۶۸±۲/۱۷۴۴^{e}
۲۰	۳۰	۶۹/۹۴۲۹±۲/۰۶۳۸^{bc}	۵۹/۸۳۷۱±۶/۴۵۶۴^{b}	۷۰/۸۹۷۴±۲/۶۰۲۸^{c}
۱۵	۳۰	۷۹/۹۲۰۱±۲/۰۸۸۸^{a}	۶۹/۰۳۳۸±۳/۲۷۳۵^{a}	۸۴/۲۷۰۶±۳/۰۹۳۸^{a}

میانگین‌های با حروف یکسان در هر ستون در سطح $P < ۰/۰۵$ تفاوت معنی داری ندارند (آزمون چند دامنه‌ای دانکن)

نیروی لازم برای شکست پسته:

نتایج نشان می‌دهد که با کاهش رطوبت مقدار نیروی شکست به طور معنی‌داری افزایش می‌یابد که می‌توان دلیل آن را این گونه بیان نمود که با کاهش رطوبت به دلیل سخت و خشبی شدن پوست پسته، نیروی لازم برای شکست آن افزایش می‌یابد و با افزایش رطوبت با

توجه به نرم شدن پوست به دلیل جذب آب در رطوبت‌های بالا توسط پوست و در نتیجه کاهش مقاومت آن مقدار نیروی شکست کاهش می‌یابد (شکل ٤)؛ لذا با افزایش میزان رطوبت محصول در دستگاه‌های فراوری از جمله پسته خندان کن‌ها و پسته مغز کن‌ها می‌توان نیروی مورد نیاز را به مقدار نسبتاً زیادی کاهش داد. آیدین (۲۰۰۲) و (۲۰۰۳) به ترتیب در تحقیقاتی مشابه بر روی دانه فندق و بادام نشان داد که با کاهش رطوبت، مقدار نیروی لازم برای شکست پوست این محصولات افزایش پیدا می‌کند.

نتایج آزمون چند دامنه‌ای دانکن نشان داد که با افزایش سرعت بارگذاری، نیروی مورد نیاز به منظور شکستن پسته افزایش می‌یابد (شکل ٥). این رفتار به دلیل کمتر بودن زمان واکنش در سرعت‌های بارگذاری بالا و در نتیجه بیشتر شدن مقاومت پوست قابل توجیه است. در تحقیق کیلیکان و گونر (۲۰۰۸) که بر روی دانه زیتون انجام شده است، نتایج نشان داد که با افزایش سرعت بارگذاری، مقدار نیروی شکست افزایش می‌یابد. بنابراین با توجه به نتایج فوق، بیش‌ترین نیروی شکست (۹۱/٤۳۰٥ نیوتن) مربوط به رقم اکبری در رطوبت ۱٥٪ بر پایه‌تر، در سرعت بارگذاری ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه و کم‌ترین (٤۳/۷۱۸۷ نیوتن) مربوط به رقم فندقی در رطوبت ۳٥٪ بر پایه‌تر، در سرعت بارگذاری ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه بدست آمد.

تغییر شکل در نقطه شکست پسته:

نتایج آزمون چند دامنه‌ای دانکن نشان داد که در بین سه رقم پسته، تغییر شکل نقطه شکست در رقم فندقی کم‌ترین مقدار و در رقم اکبری بیش‌ترین مقدار بوده است (شکل ۳). همچنین نتایج نشان داد که با کاهش رطوبت مقدار تغییر شکل نقطه شکست پسته به طور معنی‌داری افزایش می‌یابد که می‌توان دلیل این امر را این‌گونه بیان نمود که با کاهش رطوبت به دلیل کوچک‌تر شدن مغز پسته، امکان جابجایی بیشتری به پوسته داده می‌شود بنابراین میزان تغییر شکل افزایش می‌یابد (شکل ٤). همچنین نتایج آزمون چند دامنه‌ای دانکن نشان داد که با افزایش سرعت بارگذاری، تغییر شکل نقطه شکست پسته کاهش می‌یابد، دلیل این امر را می‌توان کاهش فرصت لازم برای تنش آسایی بیان نمود (شکل ٥). بیش‌ترین تغییر شکل نقطه شکست پسته (۳/٦۲۸٤ میلی‌متر) مربوط به رقم اکبری در رطوبت ۱٥٪ بر پایه‌تر، در سرعت بارگذاری ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و کم‌ترین (۱/۹۸۳٦ میلی‌متر) مربوط به رقم فندقی در رطوبت ۳٥٪ بر پایه‌تر، در سرعت بارگذاری ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه بدست آمد.

انرژی لازم برای شکست پسته:

نتایج حاصل نشان داد که با کاهش رطوبت، انرژی شکست پسته افزایش یافته است (شکل ٤). با کاهش رطوبت نیروی شکست و تغییر شکل نقطه شکست افزایش می‌یابد و انرژی شکست رابطه مستقیم با این دو پارامتر دارد بنابراین افزایش آن قابل توجیه می‌باشد. در تحقیق کوینکو و همکاران (۲۰۰٤) که بر روی ویژگی‌های شکست دانه گردو انجام شده نیز با کاهش رطوبت، انرژی شکست افزایش پیدا کرده است. به طور کلی با افزایش سرعت بارگذاری، انرژی شکست پسته افزایش یافته است اما نتایج آزمون چند دامنه‌ای دانکن نشان داد که بین سرعت‌های ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه تفاوت معنی داری از لحاظ انرژی شکست پسته وجود نداشته است (شکل ٥). در تحقیق کیلیکان و گونر (۲۰۰۸) که بر روی دانه زیتون انجام شده است، نتایج نشان داد که با افزایش سرعت بارگذاری، مقدار نیروی شکست افزایش می‌یابد. بیش‌ترین انرژی شکست پسته (۱٤۲/٤٤٥٤ میلی ژول) مربوط به رقم اکبری در رطوبت ۱٥٪ بر پایه‌تر، در سرعت بارگذاری ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه و کم‌ترین (٥٦/۱٤۰٥ میلی ژول) مربوط به رقم فندقی در رطوبت ۳٥٪ بر پایه‌تر، در سرعت بارگذاری ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه بدست آمد.

مقدار چغرمگی در نقطه شکست پسته:

نتایج نشـان داد در نقطـه شکسـت، مقـدار چغرمگـی بـا کاهش رطوبت، افزایش یافته اسـت، مـی‌تـوان دلیـل ایـن رفتار را افزایش نیروی شکست و کاهش حجم پسـته در رطوبت‌هـای پـایین‌تر بیـان کـرد (شـکل ٤). در تحقیقـی مشـابه روی هسـته زردآلـو مشـاهده شـده اسـت کـه چغرمگـی هسـته بـا کـاهش رطوبـت، افـزایش می‌یابـد (کوبلای و فاروک ۲۰۰٤).

به طور کلی با افزایش سرعت بارگذاری، مقدار چغرمگی افزایش یافته است اما نتایج آزمون چند دامنـه‌ای دانکـن نشان داد که بین سرعت‌های ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر بر دقیقه تفـاوت معنـی داری از لحـاظ مقـدار چغرمگـی وجـود نداشته اسـت (شـکل ٥). بیش‌تـرین مقـدار چغرمگـی در نقطه شکست پسته (٨٤/٢٧٠٦ میلی ژول بر سـانتی متـر مکعب) مربوط به رقم اکبری در رطوبت ۱۵٪ بر پایـه‌تر، در سرعت بارگذاری ۳۰ میلی‌متـر بـر دقیقـه و کم‌تـرین مقدار (۳۰/۸٥٦۰ میلی ژول بر سانتی متر مکعب) مربوط به رقم بـادامی در رطوبـت ۳۵٪ بـر پایـه‌تر، در سـرعت بارگذاری ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه بدست آمد.

نتیجه گیری

- خواص مکانیکی پسـته بـه رقـم، محتـوای رطـوبتی و سرعت بارگذاری وابسته است.
- خـواص مکـانیکی پسـته بـا کـاهش رطوبـت، افـزایش می‌یابد.
- خواص مکانیکی پسته بجز تغییر شکل نقطه شکست با افزایش سرعت بارگذاری، افزایش می‌یابد.

منابع مورد استفاده

ابریشمی م، ۱۳۷۳. پسته ایران. مرکز نشر دانشگاهی تهران.

بی نام، ۱۳۸۹. آمار گمرک جمهوری اسلامی ایران (IRICA). قابل دسترس در وب سایت http://www.irica.gov.ir

عالمی ه، خوش تقاضا م ه و مینایی س، ۱۳۸۸. تعیین خواص مکانیکی دانه سویا در بارگذاری شبه اسـتاتیک. مجلـه علـوم و صـنایع غذایی، شماره ۲. صفحه‌های ۱۱۳ تا ۱۲٤.

Anonymous, 2001. Moisture measurement-unground grain and seeds. American Society of Agricultural Engineering. ASAE Standard S352.2.

Aydin C, 2002. Physical properties of hazel nuts. Journal of Biological Engineering. 82: 297-303, 2002.

Aydin C, 2003. Physical properties of almond nut and kernel. Journal of Food Engineering. 60: 315-320, 2003.

Aydin C and Ozcan MM, 2002. Some phisico-mechanic properties of terebinth fruits. Journal of Food Engineering. 53: 97-104, 2002.

Heidarbeigi K, Ahmadi H, Kheiralipour K and Tabatabaeefar A, 2008. Some physical and mechanical properties of Iranian wild Pistachio (Pistachio mutica. L.). American-Eurasian Journal of Agricultural and Environment Science, 3: 521-525.

Kilickan A and Guner M, 2008. Physical properties and mechanical behavior of olive fruits (Olea europaea L.) under compression loading. Journal of Food Engineering. 87: 222-228, 2008.

Koyuncu M A, Ekinci K and Savran E, 2004. Cracking characteristics of walnut. Journal of Biological Engineering. 87: 305-311, 2004.

Kubilay V and Faruk O, 2004. Mechanical behavior of apricot pit under compression loading. Journal of Food Engineering. 65: 255-261, 2004.

Lewis R S, 1989. Physical Properties of Food and Food Processing Systems. 1stedn. Chichester. Ellis Horwood, UK.

Maskan M and Karatas S, 1998. Fatty acid oxidation of pistachio nuts stored under various atmospheric conditions and different temperatures. Journal of Food and Agricultural Science. 77: 334-340, 1998.

Massie D D., Slaughter J and Haruschka W, 1993. Acoustic single-kernel wheat hardness. Transactions of the ASAE. 36: 1393-1398.