



تعیین خواص مکانیکی چغندر قند (*Beta vulgaris L.*) در بارگذاری شبه استاتیک

بیژن خورشیدپور^۱، مسعود هنرور^{۲*}، حسین احمدی چنارین^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم کشاورزی و صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲- دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم کشاورزی و صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۳- استادیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، واحد ورامین- پیشوا، دانشگاه آزاد اسلامی، ورامین، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ های مقاله :	<p>تعیین خواص مکانیکی انواع محصولات کشاورزی به منظور تحلیل رفتار آنها به هنگام انتقال، فرآوری و طراحی دقیق ماشین‌ها جهت به حداقل رساندن ضایعات، ضروری است. لذا در این پژوهش تاثیر جرم در سطوح $m > 500$ و $m \leq 500$ گرم همچنین سرعت بارگذاری در سطوح $4/5$، $7/5$ و $10/5$ میلی‌متر بر دقیقه بر بعضی از ویژگی‌های مکانیکی غده‌های چغندر قند نظیر نیروی شکست، تغییر شکل در نقطه شکست و انرژی شکست مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی استفاده شد و مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون چند دامنه‌ای دانکن سطح احتمال یک درصد انجام پذیرفت. طبق نتایج، تاثیر سرعت بارگذاری بر تمام ویژگی‌های مکانیکی معنی‌دار بود اما غیر از نیروی شکست، سطوح مختلف جرم از تاثیری معنی‌دار بر انرژی شکست و تغییر شکل در نقطه شکست برخوردار نبودند. در همین راستا بیشترین مقدار نیروی شکست $(72/3N)$ در نمونه‌های با جرم $m > 500g$ و در سرعت بارگذاری $4/5 mm/min$ اما کمترین مقدار آن $(42/4N)$ در نمونه‌های با جرم $m \leq 500g$ و در سرعت بارگذاری $10/5 mm/min$ اندازه‌گیری شد. در همین راستا بیشترین مقدار تغییر شکل در نقطه شکست $(25/28mm)$ در نمونه‌های با جرم $500g$ و در سرعت بارگذاری $4/5 mm/min$ و کمترین مقدار آن $(16/4mm)$ در نمونه‌های با جرم $m > 500g$ و در سرعت بارگذاری $10/5 mm/min$ به دست آمد. همچنین بیشترین $(82/1mJ)$ و کمترین $(26/48mJ)$ مقدار انرژی شکست در نمونه‌های با جرم $m > 500g$ و به ترتیب در سرعت‌های بارگذاری $4/5$ و $10/5 mm/min$ تعیین گردید.</p>
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۷	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۵	
کلمات کلیدی:	
چغندر قند،	
نیروی شکست،	
انرژی شکست،	
خواص مکانیکی.	
DOI: 10.52547/fsct.18.120.20	
DOR: 20.1001.1.20088787.1400.18.120.29.1	
* مسئول مکاتبات:	
m-honarvar@hotmail.com	

۱- مقدمه

چغندر قند با نام علمی *Beta vulgaris L.* گیاهی دو ساله از تیره اسفناج *Chenopodiaceae* بوده که به صورت گیاهی یکساله زراعت می‌شود. مواد تشکیل دهنده چغندر به دو بخش اصلی شامل آب حدود ۷۵ درصد و مواد جامد حدود ۲۵ درصد تقسیم‌بندی می‌شوند. مواد جامد را می‌توان به دو بخش، ماده قندی (ساکاروز) و غیر قندی تقسیم نمود به طوری که قسمتی از مواد غیرقندی، محلول در آب و بخش دیگر نامحلول در آب است که به آن مارک گفته می‌شود. مارک در واقع مواد غیرقندی نامحلول دیواره سلول را شامل می‌شود و قسمت عمده آن موادی مانند سلولز (۲۴-۲۱ درصد)، همی سلولز (۳۱-۲۲ درصد)، مواد پکتیک (۴۰-۲۰ درصد) و لیگنین (۷-۲ درصد) بوده که به طور متوسط حدود ۴ تا ۵ درصد ترکیبات چغندر را تشکیل می‌دهند. سلولز و همی سلولز باعث استحکام سلول شده در حالی که اجسام پکتیکی به عنوان سیمان، سلول‌ها را به هم متصل می‌کنند. عصاره، از قند ساکارز و مواد محلول غیر ساکارزی تشکیل شده است. مواد محلول غیر ساکارزی در چغندر قند حدود ۵/۲ درصد ترکیبات را تشکیل می‌دهند. مهمترین مواد محلول غیر ساکارزی شامل مواد آلی بدون ازت، مواد آلی ازت‌دار و مواد معدنی هستند. در ایران عملکرد متوسط چغندر حدود ۵۰ تن در هکتار است و از مجموع حدود ۱۲۰ هزار هکتار سطح زیر کشت، بیش از ۶ میلیون تن چغندر برداشت می‌شود که با در نظر گرفتن راندمان متوسط ۱۲ تا ۱۳ درصدی کارخانجات قند چغندری، تقریباً ۷۵۰ تا ۸۰۰ هزار تن شکر از چغندر تولید می‌گردد. استان خراسان، آذربایجان غربی و فارس استان‌هایی هستند که بیشترین تعداد کارخانه فرآوری شکر از چغندر را دارند [۲۱]. آسیب‌های مکانیکی حین مراحل برداشت، بارگیری و حمل و نقل چغندر قند، بخش عمده‌ای از ضایعات کمی و کیفی این محصول را تشکیل می‌دهند. ضرباتی که به طور مستقیم و غیرمستقیم به ریشه چغندر قند وارد می‌شوند، در نهایت باعث می‌گردند که مقدار ساکارز ذخیره شده در ریشه کاهش یافته و مقدار باقیمانده نیز به طور کامل استحصال نشود. در این راستا این گونه به نظر می‌رسد که تلاش برای کاهش ضایعات محصولات کشاورزی از تلاش برای افزایش تولید آنها مهم‌تر و کم‌هزینه‌تر است. نخستین گام برای رویارویی و کنترل ضایعات، شناخت ابعاد مختلف آن بوده که عبارت از عوامل تأثیرگذار بر ضایعات، محل، و نحوه

بروز آن، نوع و طبیعت ضایعات، و میزان آنهاست که در این مورد باید تحقیقات و بررسی‌های تخصصی دنبال و نتایج آن تجزیه و تحلیل علمی شود تا بتوان مشکلات را با بهره‌گیری از اطلاعات صحیح و دقیق، شناخت و برای کنترل آنها برنامه‌ریزی کرد [۳]. همان‌گونه که بیان شد، آسیب‌های مکانیکی وارد شده به محصولات در زمان برداشت و فرآیند انتقال، سبب افزایش ضایعات محصولات کشاورزی شده که یکی از چالش‌های جدی در اکثر کشورها، به ویژه کشورهای در حال توسعه محسوب می‌شود. محصولات کشاورزی اغلب به وسیله نیروهای ساکن یا متحرک خارجی و خیلی کمتر به وسیله نیروهای داخلی آسیب می‌بینند. آسیب‌های مکانیکی که در اثر نیروهای داخلی بوجود می‌آیند بستگی به تغییرات فیزیکی داخلی مانند دما، مقدار رطوبت، تغییرات شیمیایی و بیولوژیکی دارد. نکته قابل توجه این‌که چگونگی ایجاد آسیب‌های مکانیکی در محصولات کشاورزی کاملاً شناخته شده نیست اما گسیختگی و پارگی مجموعه سلول‌ها و بافت محصول طی دوره آسیب دیدگی قطعاً پیچیده است [۴]. آغاز گسیختگی در مجموعه سلول‌های محصولات بیولوژیکی با تعیین نقطه تسلیم بیولوژیکی مشخص می‌شود. بنابراین وقتی بار وارد شده به محصول از حد تسلیم تجاوز کند، آسیب شروع می‌شود. در این راستا برای تعیین بار مجاز، طراحی و ساخت انواع ماشین‌های مورد نیاز به منظور حمل و نقل، بسته بندی، انتقال، فرآوری، جداسازی، ذخیره‌سازی و درجه بندی هر یک از محصولات کشاورزی، شناخت خواص مکانیکی محصولات در تنش‌های ساده (بارهای کششی، فشاری و برشی ساکن یا متحرک) به منظور تحلیل رفتارهای این مواد بیولوژیکی ضروری به نظر می‌رسد. به عبارت دیگر با شناخت خواص مکانیکی نظیر رفتار نیرو-تغییر شکل محصولات کشاورزی که تحت تاثیر بارهای شبه استاتیکی قرار گرفته‌اند همچنین انرژی مورد نیاز برای شکست محصول که معیار مناسبی برای تحلیل مقاومت به شکست می‌باشد، می‌توان حالت‌های بارگذاری پیچیده‌تری را که در عمل اتفاق می‌افتند، ارزیابی کرد و به طور تقریبی وقوع و عدم وقوع آسیب را پیش بینی نمود [۵ و ۶]. به این جهت در مطالعات مختلف، خواص مکانیکی انواع محصولات کشاورزی به صورت تابعی از رطوبت، سرعت بارگذاری، جهت وارد شدن نیرو و رقم (وارپته)، مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان مثال در پژوهشی تاثیر محتوای رطوبت (۷/۴۳، ۹، ۱۰/۵ و ۱۲ بر پایه خشک)،

آزمایش، ۵۰ عدد چغندر سالم (فاقد صدمات مکانیکی و پوسیدگی فیزیولوژیکی) مطابق روش کوکران انتخاب و پس از شستشو داخل کیسه‌های پلی اتیلنی ریخته و تا شروع آزمایش در یخچالی با دمای $1 \pm 4^\circ\text{C}$ و رطوبت نسبی ۸۰٪ نگهداری شدند. قابل توجه این‌که دو ساعت قبل از انجام آزمایش‌ها، نمونه‌ها جهت رسیدن به دمای محیط از یخچال خارج و در محیط آزمایشگاه قرار داده می‌شدند. کلیه آزمون‌های مکانیکی نمونه‌های چغندر در آزمایشگاه خواص فیزیکی مواد غذایی دانشگاه تربیت مدرس و در دمای $25 \pm 1^\circ\text{C}$ و رطوبت نسبی ۵۱٪ انجام پذیرفت.

۲-۲- تعیین رطوبت محصول

برای اندازه‌گیری رطوبت اولیه محصول، نمونه‌ها در آونی با دمای $1 \pm 105^\circ\text{C}$ به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند. وزن نمونه‌ها قبل و بعد از قرار دادن در آن با استفاده از یک ترازوی دیجیتال (Sartorius, model PT210, Germany) و با دقت $0.1 \pm 0.1\text{g}$ اندازه‌گیری شد. در ادامه مقدار رطوبت نمونه‌ها با استفاده از رابطه ۱ و معادل ۷۷/۳۴ درصد (بر پایه خشک) محاسبه گردید [۱۴ و ۱۳].

$$MC = \frac{M_w - M_d}{M_d} \times 100 \quad (1)$$

که در آن: MC - محتوای رطوبت غده‌ها (%، M_w) - جرم اولیه نمونه‌ها (g) و M_d - جرم نمونه‌های خشک شده (g).

۲-۳- اندازه‌گیری خواص مکانیکی

به منظور تعیین خواص مکانیکی نمونه‌های چغندر، از آزمون فشاری و منحنی نیرو - تغییر شکل در دو سطوح جرمی ($m > 500\text{g}$ و $m \leq 500\text{g}$) و در سه سرعت بارگذاری ($10/5$ ، $7/5$ و $4/5$ mm/min) استفاده شد. در این راستا غده‌های سالم (بدون ترک) در وضعیت به پهلو توسط دستگاه آزمون کشش - فشار Hounsfield مدل H50K-S که دارای نیروسنجی به ظرفیت ۵۰۰ نیوتن بود، تحت بارگذاری با صفحه تخت قرار گرفتند (شکل ۱). دستگاه آزمایش به یک رایانه متصل بود و از طریق نرم‌افزار مربوطه تنظیمات آزمایش اعمال می‌گردید. بارگذاری به صورت شبه استاتیک انجام و هم‌زمان و در حین بارگذاری نمودار نیرو - تغییر شکل تا لحظه شکست رسم می‌شد. بارگذاری تا لحظه‌ای صورت می‌گرفت که نمونه‌ها شروع به شکستن می‌کردند که در این لحظه مقدار نیرو در منحنی نیرو - تغییر شکل به شدت کاهش می‌یافت. در تمام آزمون‌های

سرعت بارگذاری (۵، ۳۰، ۵۵ و ۸۰ میلی‌متر بر دقیقه) و اندازه دانه (کوچک، متوسط و بزرگ) بر برخی خواص مکانیکی دانه لویا چشم بلبلی مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج با افزایش رطوبت، انرژی لازم برای گسیختگی، چغرمگی و تغییر شکل در نقطه گسیختگی افزایش در حالیکه نیروی لازم برای گسیختگی کاهش یافت. در همین راستا با افزایش سرعت بارگذاری، تغییر شکل در نقطه گسیختگی، انرژی لازم برای گسیختگی، نیروی لازم برای گسیختگی و چغرمگی کاهش اما با افزایش اندازه دانه تغییر شکل در نقطه گسیختگی، نیروی لازم برای گسیختگی، انرژی لازم برای گسیختگی و چغرمگی افزایش یافت [۷]. در پژوهشی دیگر خصوصیات فیزیکی و رفتار مکانیکی میوه زیتون، تحت بارگذاری فشاری توسط دو صفحه تخت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقدار تغییر شکل، نیرو و انرژی گسیختگی با افزایش اندازه، به‌طور معنی‌دار افزایش می‌یابند و نیز بیشترین مقادیر آن بجز در مورد تغییر شکل میوه زیتون، در راستای بعد طولی رخ می‌دهند [۸]. همچنین در پژوهشی دیگر، خواص مکانیکی سه رقم دانه سویا در محتوای رطوبت (۱۱-۱۳)، (۱۶-۱۷) و (۱۹-۱۷) درصد بر پایه تر و در سه جهت بارگذاری مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج بیشترین مقدار نیرو و انرژی شکست در محدوده رطوبت (۱۶-۱۷) درصد و در جهت بارگذاری طولی به‌دست آمد [۹]. در ادامه علاوه بر پژوهش‌هایی که به آن‌ها اشاره گردید، تحقیقات مشابه دیگری توسط سایر محققین انجام شده است [۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴]. کیفیت تکنولوژیک چغندر، ترکیبی از کلیه جنبه‌های شیمیایی و فیزیکی است که بر فرآیند تولید و در نهایت میزان استحصال شکر تاثیرگذار است. ارزش تکنولوژیک چغندر، به فاکتورهای ژنتیکی، زراعی و اقلیمی در قبل و بعد از برداشت و همچنین به شرایط نگهداری محصول برداشت شده وابسته است. طی بررسی‌های به‌عمل آمده پژوهشی در زمینه تعیین ویژگی‌های مکانیکی چغندر، انجام نشده و به نظر می‌رسد شناخت این ویژگی‌ها گامی موثر در حفظ ویژگی‌های کیفی و تکنولوژیکی چغندر قند باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها

چغندرهای مورد استفاده در تحقیق، مهر ماه ۱۳۹۹ از مزارع کارخانه قند شهرستان قزوین تهیه شدند. برای انجام

ثبت گردید.

بارگذاری، نخستین نقطه شکست به عنوان نیروی شکست



Fig 1 Pressure test of sugar beet samples

می‌آید [۱۶].

۲-۴- تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی و در سه تکرار استفاده گردید و مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون چند دامنه‌ای دانکن و با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۴ در سطح احتمال $\alpha=1\%$ انجام شد.

۳- نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده‌های حاصل از تاثیر جرم، سرعت بارگذاری و اثر متقابل آن‌ها بر برخی ویژگی‌های مکانیکی غده چغندر قند نظیر نیروی شکست، تغییر شکل در نقطه شکست و انرژی شکست در جدول ۱ نشان داده شده است.

۲-۳-۱- نیروی شکست

نیروی شکست، نقطه‌ای روی منحنی نیرو - تغییر شکل است که با افزایش ناچیز تغییر شکل، کاهش بسیار زیادی در مقدار نیرو حاصل می‌شود [۱۵].

۲-۳-۲- تغییر شکل در نقطه شکست

نقطه‌ای متناظر نیروی شکست در نمودار نیرو - تغییر شکل و بر روی محور تغییر شکل می‌باشد و از رابطه ۲ قابل محاسبه است [۱۵].

$$E_a = \frac{F_r \times D_r}{2} \quad (2)$$

که در آن: E_a - انرژی شکست (J)، F_r - نیروی شکست (N) و D_r - تغییر شکل در نقطه شکست (m).

۲-۳-۳- انرژی شکست

انرژی شکست با محاسبه سطح زیر منحنی نیرو - تغییر شکل، از نقطه شروع بارگذاری تا نقطه شکست به دست

Table 1 Variance analysis (ANOVA) of mechanical properties of *Beta vulgaris* at two mass levels and different loading speed

S.O.V	df	Mean square		
		Rupture force (N)	Deformation at rupture point (mm)	Rupture energy (mJ)
Mass (A)	1	766.40**	323.44 ^{ns}	259.08 ^{ns}
Loading speed (B)	2	601.71**	230.36**	161.77**
A×B	2	393.08**	120.22**	129.89**
Error	12	6.12	5.20	6.44**

**Significant difference at $\alpha = 1\%$ probability level; ^{ns}No significant

با افزایش سرعت بارگذاری، مقدار نیروی شکست به طور معنی‌داری کاهش یافت. مطابق جدول ۴، در نمونه‌های با جرم بیشتر از ۵۰۰ گرم، با افزایش سرعت بارگذاری از ۴/۵ به ۷/۵ و از ۷/۵ به ۱۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه، میزان نیروی شکست به ترتیب ۱۳/۹۶ و ۳۰/۷۰ درصد کاهش اما در نمونه‌های با جرم کمتر از ۵۰۰ گرم و در شرایط مشابه، میزان نیروی شکست به ترتیب ۵/۱۳ درصد افزایش و سپس ۲۶

۳-۱- نیروی شکست

با توجه به جدول ۱، تاثیر جرم، سرعت بارگذاری و اثر متقابل آن‌ها بر مقدار نیروی شکست معنی‌دار است ($P \leq 0.01$). طبق نتایج مقایسه میانگین داده‌های حاصل از تاثیر جرم، سرعت بارگذاری و اثر متقابل آن‌ها بر نیروی شکست که در جدول‌های ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است،

مقدار آن در نمونه‌های با جرم کمتر از ۵۰۰ گرم و در سرعت بارگذاری ۱۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه اندازه‌گیری شده‌است. قابل توجه این‌که در سطوح جرمی مختلف و در هر یک از سرعت‌های بارگذاری ۴/۵ و ۱۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه، اختلاف معنی‌دار بین مقادیر نیروی شکست نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود. قابل توجه این‌که در شکل ۲، منحنی‌های نیرو - تغییر شکل برای جرم‌های مختلف و در سطوح مختلف بارگذاری نشان داده شده است.

درصد کاهش نشان دادند. علت این رفتار را می‌توان به کم بودن زمان واکنش نمونه‌ها به ضربه‌های وارد شده در سرعت‌های بارگذاری بالا نسبت داد [۸ و ۱۷]. از سوی دیگر نمونه‌های با جرم کمتر از ۵۰۰ گرم از مقدار نیروی شکست کمتری در مقایسه با نمونه‌های با جرم بیشتر از ۵۰۰ گرم برخوردارند. در همین راستا بیشترین مقدار نیروی شکست در نمونه‌های با جرم بیشتر از ۵۰۰ گرم و در سرعت بارگذاری ۴/۵ میلی‌متر بر دقیقه اما کمترین (۴۲/۴N)

Table 2 Mean comparison of loading speed effects on rupture force of *Beta vulgaris*

Loading speed (mm/min)	4.5	7.5	10.5
Rupture force (N)	62.5±0.78 ^a	61.7±0.41 ^a	42.3±0.63 ^b

Values are means of three replicates ± SD; Means with same letter are not significant different ($P>0.05$).

Table 3 Mean comparison of mass effects on rupture force of *Beta vulgaris*

Mass (g)	$m \leq 500$ (g)	$m > 500$ (g)
Rupture force (N)	51.3±2 ^b	59.64±2 ^a

Values are means of three replicates ± SD; Means with same letter are not significant different ($P>0.05$).

Table 4 Mean comparison of interaction between (mass × loading speed) on rupture force of *Beta vulgaris*

Mass (g)	Loading speed (mm/min)		
	4.5	7.5	10.5
$m \leq 500$ (g)	54.5±2 ^c	57.3±3 ^b	42.4±2 ^d
$m > 500$ (g)	72.3±2 ^a	62.2±3 ^b	43.1±2 ^d

Values are means of three replicates ± SD; Means with same letter are not significant different ($P>0.05$).

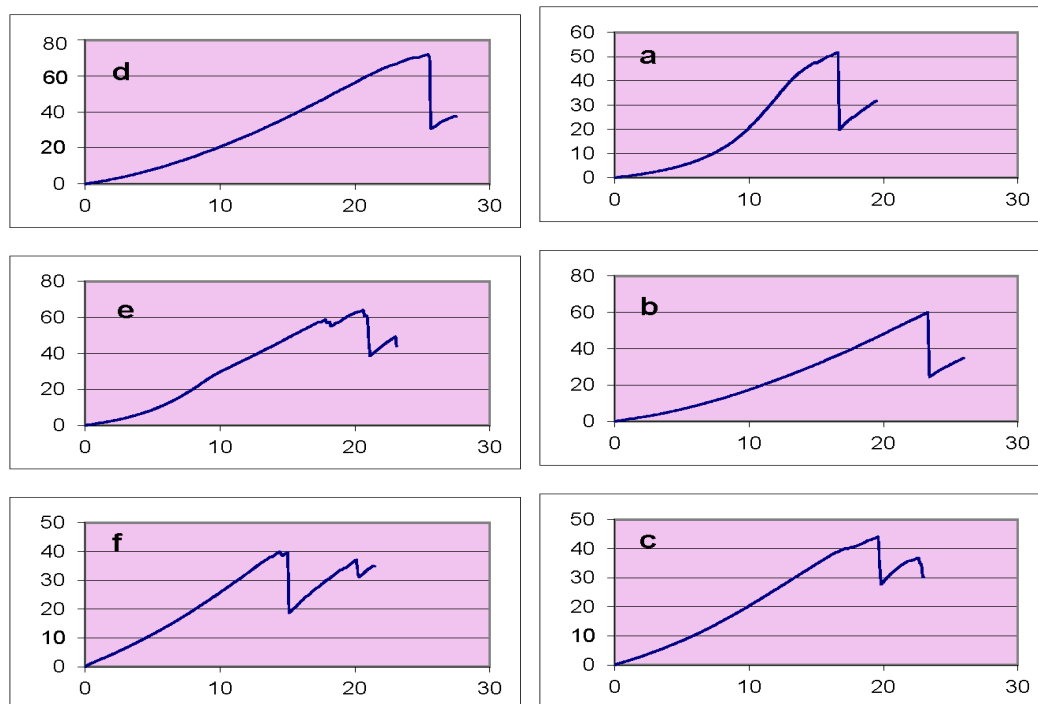


Fig 2 Experimental curves of force-displacement (X-axis: displacement (mm) and Y-axis: force (N)); a, b and c for the samples with $m \leq 500$ g and loading speed at three levels, 4.5, 7.5 and 10.5 mm/min, respectively) and d, e and f for the samples with $m > 500$ g and loading speed at the same levels, respectively)

اثر متقابل آن‌ها بر مقدار تغییر شکل در نقطه شکست که در جدول‌های ۵، ۶ و ۷ نشان داده شده است، با افزایش سرعت بارگذاری، مقدار تغییر شکل در نقطه شکست به طور معنی‌داری کاهش یافت. مطابق جدول ۷، در نمونه‌هایی که جرم آن‌ها از ۵۰۰ گرم کمتر بود، با افزایش سرعت بارگذاری از ۴/۵ به ۷/۵ همچنین از ۷/۵ به ۱۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه، میزان تغییر شکل در نقطه شکست به ترتیب ۹/۲۷ و ۶/۸۲ درصد اما در نمونه‌های با جرم بیشتر از ۵۰۰ گرم و در شرایط مشابه، میزان تغییر شکل در نقطه شکست به ترتیب ۲۳/۶۵ و ۱۳/۹۸ درصد کاهش نشان دادند. علت نتیجه حاصل آن است که در سرعت‌های بارگذاری بالا، ضربه و مقدار اندازه حرکت اعمال شده به غده‌ها به دلیل حرکت سریع فک متحرک دستگاه افزایش یافته لذا تغییر شکل در نقطه شکست کاهش می‌یابد [۱۷ و ۲۱]. از سوی دیگر نمونه‌های با وزن بیشتر از ۵۰۰ گرم از مقدار تغییر شکل در نقطه شکست بیشتری در مقایسه با نمونه‌های با وزن کمتر از ۵۰۰ گرم برخوردار بودند که البته اختلاف بین این دو تیمار معنی‌دار نیست. در همین راستا بیشترین (۲۵/۲۸mm) مقدار تغییر شکل در نقطه شکست در نمونه‌های با جرم بیشتر از ۵۰۰ گرم و در سرعت بارگذاری ۴/۵ میلی‌متر بر دقیقه و کمترین (۱۶/۴mm) مقدار آن در نمونه‌های با جرم کمتر از ۵۰۰ گرم و در سرعت بارگذاری ۱۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه اندازه‌گیری شد.

همچنین روابط ۳ و ۴، معادلات رگرسیونی مربوط به نیروی شکست را برحسب سرعت بارگذاری نشان می‌دهند. این روابط نتایج نشان می‌دهند که یک رابطه چند جمله‌ای (polynomial relationship) بین نیروی شکست و سرعت بارگذاری نمونه‌های چغندر قند وجود دارد.

(۳)

$$F_r = -0.5v^2 + 2.633v + 70.575, R^2 = 0.97$$

$$m > 500$$

(۴)

$$F_r = -0.983v^2 + 12.73v + 17.11, R^2 = 0.98$$

$$m \leq 500$$

خزایی و همکاران (۲۰۰۳) تأثیر اندازه بادام، سرعت و جهت بارگذاری را بر نیرو، انرژی و توان مورد نیاز برای شکستن پوست چوبی بادام درختی رقم تکراس، مورد مطالعه قرار داده و نشان دادند که سرعت بارگذاری از تأثیری معنی‌دار بر نیرو و توان مورد نیاز برای شکست دانه بادام برخوردار است [۱۸]. در این زمینه علاوه بر پژوهشی که به آن اشاره گردید، تحقیقات مشابه دیگری توسط سایر محققین انجام شده است [۱۳، ۱۵، ۱۹ و ۲۰].

۲-۳- تغییر شکل در نقطه شکست

با توجه به جدول ۱، تأثیر سرعت بارگذاری و اثر متقابل جرم و سرعت بارگذاری بر مقدار تغییر شکل در نقطه شکست معنی‌دار است ($P \leq 0.01$). مطابق نتایج مقایسه میانگین داده‌های حاصل از تأثیر جرم، سرعت بارگذاری و

Table 5 Mean comparison of loading speed effects on deformation at rupture point of *Beta vulgaris*

Loading speed (mm/min)	4.5	7.5	10.5
Deformation at rupture point (mm)	22.34±2 ^a	18.15±2 ^b	16.5±2 ^b

Values are means of three replicates ± SD; Means with same letter are not significant different ($P > 0.05$).

Table 6 Mean comparison of mass effects on deformation at rupture point of *Beta vulgaris*

Mass (g)	m>500(g)	m ≤500 (g)
Deformation at rupture point (mm)	20.13±2 ^a	19.72±3 ^a

Values are means of three replicates ± SD; Means with same letter are not significant different ($P > 0.05$).

Table 7 Mean comparison of interaction between (mass × loading speed) on deformation at rupture point of *Beta vulgaris*

Mass (g)	Loading speed (mm/min)		
	4.5	7.5	10.5
m≤500(g)	19.4±1 ^b	17.6±1 ^{bc}	16.4±1 ^c
m >500 (g)	25.28±2 ^a	19.3±1 ^b	16.6±1 ^c

Values are means of three replicates ± SD; Means with same letter are not significant different ($P > 0.05$).

مقایسه میانگین داده‌های حاصل از تاثیر جرم، سرعت بارگذاری و اثر متقابل آن‌ها بر مقدار انرژی شکست نشان داده شده است. طبق نتایج، با افزایش سرعت بارگذاری، مقدار انرژی شکست به طور معنی‌داری کاهش یافت. همان‌گونه که قبلاً بیان شد، انرژی لازم برای شکست معادل سطح زیر منحنی نیرو - تغییر شکل تا نقطه گسیختگی است لذا تغییرات آن به نوعی تابعی از نیروی شکست و جابجایی در نقطه شکست خواهد بود [۸ و ۲۰]. مطابق جدول ۱۰، در نمونه‌هایی که جرم آن‌ها از ۵۰۰ گرم کمتر بود، با افزایش سرعت بارگذاری از ۴/۵ به ۷/۵ همچنین از ۷/۵ به ۱۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه، میزان کاهش انرژی شکست به ترتیب ۸/۵۷ و ۲۸/۰۸ درصد اما در نمونه‌های با جرم بیشتر از ۵۰۰ گرم و در شرایط مشابه، میزان انرژی شکست به ترتیب ۲۳/۹۹ و ۵۷/۵۶ درصد کاهش نشان دادند. از سوی دیگر نمونه‌های با جرم کمتر از ۵۰۰ گرم از مقدار انرژی شکست کمتری در مقایسه با نمونه‌های با جرم بیشتر از ۵۰۰ گرم برخوردارند. زیرا غده‌های بزرگتر از بافتی محکم‌تر برخوردارند که عاملی جهت افزایش میزان انرژی شکست است [۲۱]. در همین راستا بیشترین (۸۲/۱mJ) و کمترین (۲۶/۴۸mJ) مقدار انرژی شکست در نمونه‌های با وزن بیشتر از ۵۰۰ گرم و به ترتیب در سرعت‌های بارگذاری ۴/۵ و ۱۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه اندازه‌گیری شد.

در همین راستا روابط رگرسیونی بین مقدار تغییر شکل در نقطه شکست و سرعت بارگذاری در معادلات ۵ و ۶ نشان داده شده است. این روابط نتایج نشان می‌دهند که یک رابطه چند جمله‌ای بین تغییر شکل و سرعت بارگذاری نمونه‌های چغندرقد وجود دارد.

(۵)

$$D_r = 0.182v^2 - 4.18v + 40.40, R^2 = 0.96$$

$$m > 500,$$

(۶)

$$D_r = 0.033v^2 - v + 23.25, R^2 = 0.98,$$

$$m \leq 500$$

در پژوهشی تاثیر رطوبت، جهت و سرعت بارگذاری بر برخی خواص مکانیکی لوبیا چیتی رقم محلی مشکین شهر مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج، نیرو و انرژی لازم برای گسیختگی و تغییر شکل در نقطه گسیختگی با افزایش رطوبت، افزایش اما با افزایش سرعت بارگذاری کاهش یافتند. همچنین مقادیر این صفات در بارگذاری در جهت عرضی بیشتر از بارگذاری در جهت طولی دانه بود [۲۲]. بسیاری از محققین در تحقیقات خود به نتایج مشابه تحقیق حاضر دست یافته‌اند [۱۷، ۲۱ و ۲۳].

۳-۳- انرژی شکست

با توجه به جدول ۱، تاثیر سرعت بارگذاری و اثر متقابل جرم و سرعت بارگذاری بر مقدار انرژی شکست معنی‌دار است ($P \leq 0.01$). همچنین در جدول‌های ۸، ۹ و ۱۰، نتایج

Table 8 Mean comparison of loading speed effects on rupture energy of *Beta vulgaris*

Loading speed (mm/min)	4.5	7.5	10.5
Rupture energy (mJ)	72.33±3 ^a	59.8±3 ^b	33.81±4 ^c

Values are means of three replicates ± SD; Means with same letter are not significant different ($P > 0.05$).

Table 9 Mean comparison of mass effects on rupture energy of *Beta vulgaris*

Mass (g)	m > 500 (g)	m ≤ 500 (g)
Rupture energy (mJ)	56.99±2 ^a	53.63±2 ^a

Values are means of three replicates ± SD; Means with same letter are not significant different ($P > 0.05$).

Table 10 Mean comparison of interaction between (mass × loading speed) on rupture energy of *Beta vulgaris*

Mass (g)	Loading speed (mm/min)		
	4.5	7.5	10.5
m ≤ 500 (g)	62.56±3 ^b	57.2±3 ^b	41.14±2 ^c
m > 500 (g)	82.1±2 ^a	62.4±3 ^b	26.48±2 ^d

Values are means of three replicates ± SD; Means with same letter are not significant different ($P > 0.05$).

روابط نتایج نشان می‌دهند که یک رابطه چند جمله‌ای بین

همچنین روابط ۷ و ۸ معادلات رگرسیونی مربوط به انرژی شکست را برحسب سرعت بارگذاری نشان می‌دهند. این

- [2] Pan, L., Lu, R., Zhu, Q., Tu, K., and Cen, H. 2016. Predict compositions and mechanical properties of sugar beet using hyperspectral scattering. *Food Bioprocess Technology*. 9: 1177-1186.
- [3] Khazaei, J., and Daneshmandi, S. 2007. Modeling of thin-layer drying kinetics of sesame seeds: mathematical and neural networks modeling. *International Agrophysics*. 21: 335-348.
- [4] Khorshidpour, B., Honarvar, M., and Ahmadi Chenarbon, H. 2020. Assessment of several hydrodynamic properties of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Journal of Food Science and Nutrition*. 8(10): 5641-5649.
- [5] Rozbahani, A., Movahhed, S., and Ahmadi Chenarbon, H. 2019. Mathematical modeling of hydrodynamic properties of lime (Mexican lime). *Journal of Food Process Engineering*. 42(4): e13054.
- [6] Jahanbakhshi, A., Abbaspour-Gilandeh, Y., Ghamari, B., and Heidarbeigi, K. 2019. Assessment of physical, mechanical, and hydrodynamic properties in reducing postharvest losses of cantaloupe (*Cucumis melo* var. *Cantaloupensis*). *Journal of Food Process Engineering*. 42 (5): e13091.
- [7] Rasekh, M. 2014. Some of mechanical properties of black-eyed pea (*Vigna sinensis* L.). *Journal of Food Science and Technology*. 44(11): 35-46.
- [8] Kilickan, A., and Guner, M. 2008. Physical properties and mechanical behavior of olive fruits (*Olea europaea* L.) under compression loading. *Journal of Food Engineering*. 7(3): 222-228.
- [9] Ahmadi Chenarbon, H., and Hasheminia, S. M. 2005. The study of mechanical properties of soybean kernel under compressive loading. 9th International Conference on Agrophysics, Lublin, Poland.
- [10] Altuntaş, E. 2015. The post-harvest engineering properties of Japan flowering crabapple (*Malus floribunda*) fruits. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 17(1): 264-272.
- [11] Akbarnejad, A., Azadbakht, M., & Asghari, A. 2017. Studies of the selected mechanical properties of Banana (Cavendish var.). *International Journal of Fruit Science*. 17: 93-101.
- [12] Reddy, B. S., and Srinivas, P. 2017. Effect of fruit size and maturity on selected mechanical properties of tomato. *International Journal of Pure and Applied Bioscience*. 5(4): 1730-1737.
- [13] Jahanbakhshi, A., Abbaspour-Gilandeh, Y., and Gundoshmian, T. M. 2018.

انرژی شکست و سرعت بارگذاری نمونه‌های چغندرقلند وجود دارد.

(V)

$$E_a = -0.90v^2 + 4.24v + 81.23, R^2 = 0.97$$

$$m > 500$$

(A)

$$E_a = -0.594v^2 + 5.34v + 50.54, R^2 = 0.98$$

$$m \leq 500$$

در پژوهشی اثر محتوای رطوبت و سرعت بارگذاری بر خواص مکانیکی باقلا مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج، با افزایش سرعت بارگذاری، مقدار نیرو و انرژی گسیختگی و همچنین تغییر شکل در نقطه گسیختگی کاهش یافتند [۲۱]. در تحقیقات محققین دیگر نیز نتایج مشابهی گزارش شده است [۲۰ و ۲۳].

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیر جرم، سرعت بارگذاری و اثر متقابل آن‌ها بر برخی ویژگی‌های مکانیکی چغندرقلند مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج، تاثیر جرم بر نیروی شکست معنی‌دار اما تاثیر آن بر تغییر شکل در نقطه شکست و انرژی شکست معنی‌دار نبود. در همین راستا سرعت بارگذاری و اثر متقابل (جرم × سرعت بارگذاری) از تاثیر معنی‌دار بر تمام ویژگی‌های مکانیکی بررسی شده در این تحقیق برخوردار بودند. قابل توجه این‌که با افزایش جرم و سرعت بارگذاری، تمام ویژگی‌های مکانیکی شامل نیروی شکست، تغییر شکل در نقطه شکست و انرژی شکست به ترتیب افزایش و کاهش یافتند. حال با توجه به این‌که افزایش سرعت بارگذاری باعث کاهش نیروی و انرژی لازم برای شکست غده‌ها می‌شود، لذا بهتر است عملیات برداشت، انتقال، حمل و نقل و فراوری در سرعت‌های بارگذاری کمتر انجام شود. قابل توجه این‌که از نتایج به دست آمده در این پژوهش می‌توان در طراحی ادوات مربوط به برداشت، حمل و نقل، ذخیره سازی و انتقال استفاده نمود.

۵- منابع

- [1] Trebbi, D. 2005. Genetic analysis of sucrose accumulation in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). Unpublished Ph.D. Dissertation. Michigan State University, East Lansing, MI, USA.

- kernel. *Journal of Agricultural Science*. 9(3): 11-34 [in Persian].
- [19] Aydin, C., and Ozcan, M. M. 2002. Some physico-mechanic properties of terebinth fruits. *Journal of Food Engineering*. 53: 97-104.
- [20] Kubilay, V., and Faruk, O. 2004. Some physical, mechanical and aerodynamic properties of pine (*Pinus pinea*) nuts. *Journal of Food Engineering*. 68(2): 191-196.
- [21] Altuntas, E., and Yildiz, M. 2007. Effect of moisture content on some physical and mechanical properties of Faba bean grains. *Journal of Food Engineering*. 78 (1): 174-183.
- [22] Gahhari Kermani, F. 2011. Determination of some physical and mechanical properties of a common Iranian variety of kidney bean Grains. M. Sc. thesis, Faculty of Agriculture. University of Mohaghegh Ardabili. Ardabil, Iran [in Persian].
- [23] Zaki dizaji, H., and Minaei, S. 2007. Determination of some of physical and mechanical properties of Chickpea Kernel. *Iranian Journal of Food Science and Technology*. 4(2): 57-66 [in Persian].
- Determination of physical and mechanical properties of carrot in order to reduce waste during harvesting and post-harvesting. *Food Science and Nutrition*. 6: 1898-1903.
- [14] Mirzaei, M., Movahhed, S., Asadollahzadeh, M. J., and Ahmadi Chenarbon, H. 2020. Effect of carboxy methyl cellulose and locust bean gums on some of physicochemical, mechanical and textural properties of extruded rice. *Journal of Texture Studies*. 52(4): 91-100.
- [15] Aydin, C. 2002. Physical properties of hazel nuts. *Journal of Biological Engineering*. 82: 297-303.
- [16] Koyuncu, M. A., Ekin, K., and Savran, E. 2004. Cracking characteristics of walnut. *Journal of Biological Engineering*. 87: 305-311.
- [17] Tekin, Y., Isik, E., Unal, H., and Okorsoy, R. 2006. Physical and Mechanical properties of Turkish Goynuk Bombay Beans (*Phaseolus Vulgaris* L.). *Pakistan Journal of Biological Sciences*. 9(12): 2229-2235.
- [18] Khazaei, J., Borghei, A. M., and Rasekh, M. 2003. Determining the physical and mechanical properties of almond and it's



Determination of mechanical properties of sugar beet under quasi-static loading

Khorshidpour, B. ¹, Honarvar, M. ^{2*}, Ahmadi Chenarbon, H. ³

1. Ph.D student, Department of Food Science and Technology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2. Associated Professor, Department of Food Science and Technology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
3. Assistant Professor, Department of Agronomy, College of Agriculture, Varamin - Pishva Branch, Islamic Azad University, Varamin, Iran.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received 2021/ 08/ 18
Accepted 2021/ 10/ 17

Keywords:

Sugar beet,
Rupture force,
Rupture energy,
Mechanical properties.

DOI: 10.52547/fsct.18.120.20

DOR: 20.1001.1.20088787.1400.18.120.29.1

*Corresponding Author E-Mail:
m.honarvar@srbiau.ac.ir

Determining the mechanical properties of various agricultural products is necessary to analyze their behavior during transport, processing and precision design of machines to minimize waste. Therefore, in this study, the effect of mass at the levels of $m > 500$ and $m \leq 500$ g as well as the loading speed at the levels of 4.5, 7.5 and 10.5 mm/min on some mechanical properties of sugar beet such as rupture force, deformation at rupture point and rupture energy were examined. Then, for data analysis, factorial experiment based on a completely randomized design was used and the comparison of means was performed by Duncan's multiple range test at $\alpha=1\%$. According to the results, the effect of loading speed on all mechanical properties was significant, but except for the rupture force, different mass levels did not have a significant effect on the deformation at rupture point and rupture energy. In this regard, the highest rupture force (72.3 N) in samples with mass of $m > 500$ g and in the loading speed of 4.5 mm/min, but the lowest amount (42.4 N) in samples with mass of $m \leq 500$ g and in the loading speed of 10.5 mm/min was measured. In this regard, the highest deformation at the rupture point (25.28 mm) in samples with mass of $m > 500$ g and in loading speed 4.5 mm/min and the lowest amount (16.4 mm) in samples with mass $m \leq 500$ g and in speed Load 10.5 mm/min was obtained. Also, the highest (82.1 mJ) and lowest (26.48 mJ) values of rupture energy were determined in samples with mass of $m > 500$ g and loading speeds of 4.5 and 10.5 mm/min, respectively.