تعیین برخی خواص فیزیکی و رئولوژیکی بسته‌های یونجه و کاه در حین فشردگی مضاعف

امین اله معصومی* و علی شهریاری[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۵/۱۱/۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۲/۲۴)

چکیده

به منظور طراحی واحدهای مختلف دستگاه فشرده کن مضاعف بسته‌های علوفه، تعیین برخی خواص فیزیکی و رئولوژیکی محصولات ذکر شده ضروری می‌باشد که در تحقیق حاضر انجام گردید. آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. آزمایش فشردگی به صورت محصور در سه سطح کرنش محوری (۲۵، ۳۵ و ۴۵٪ طول اولیه) برای بسته‌های یونجه وکاه انجام گردید. در این آزمایش تأثیر نوع محصول و سطح فشرده‌سازی بر فشار، مدول الاستیسیته، کاهش تنش و انرژی لازم برای فشرده سازی بررسی شد. نتایج نشان داد که اثر نوع محصول و سطح فشرده‌سازی، بر پارامترهای به دست آمده بسیار معنی‌دار بود (P<۰/۰۱). بیشترین مقدار فشار، مدول الاستیسیته و انرژی، در نمونه‌های کاه با کرنش طولی ۴۵٪ طول اولیه به دست آمد. اثر متقابل محصول و سطح فشردگی بر اولین زمان کاهش تنش بسیار معنی‌دار بود (P<۰/۰۱). در حالی‌که نوع محصول و سطح فشردگی بر دومین و سومین زمان کاهش تنش فاقد اثر معنی‌دار بود (P<۰/۰۵). مدل فابرود (رابطه فشار با چگالی) و هم‌چنین دو مدل سیتکی و اسبف (رابطه مدول الاستیسیته با چگالی) بر مقادیر اندازه‌گیری شده طی آزمایش فشرده سازی برازش شدند و ضرایب ثابت آنها برای بسته‌های یونجه و کاه به دست آمد. ضریب اصطکاک بسته‌های یونجه و کاه روی دو سطح (آهن و گالوانیزه) در سه سطح نیروی عمودی بر بسته‌ها اندازه‌گیری شد. اثر نوع محصول و سطح تماس بر ضریب اصطکاک معنی‌دار نبود (P<۰/۰۵)، ولی اثر وزن عمود بر سطح تماس در مقدار ضریب اصطکاک اندازه‌گیری شده بسیار معنی‌دار بود (P<۰/۰۱). استحکام کششی ریسمان‌های کنفی و نایلونی که در بسته‌بندی متداول، به کار می‌رود اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد مقاومت ریسمان‌های کنفی بیشتر از نایلونی بود و برای مقاومت در پارگی پس از باربرداری ۳ رشته ریسمان کنفی به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: یونجه، کاه، خواص فیزیکی، خواص رئولوژیکی، فشرده‌ساز مضاعف

مقدمه

یکی از عمده‌ترین اقلام خوراک دام مورد مصرف در کشورهای جهان یونجه و کاه گندم است. به منظور کاهش فضای انبارداری و هزینه حمل و نقل، تدابیری از جمله حبه کردن یونجه (Pellet) و یا فشرده‌سازی مضاعف بسته‌های علوفه صورت گرفته است (۴ و۷). فرآیند فشرده‌سازی مضاعف باعث متراکم‌تر شدن بسته‌های علوفه می‌شود که پس از خشک شدن بسته‌ها در مزارع و یا کنار انبارها به صورت ایستگاهی صورت می‌گیرد بنابراین ریزش احتمالی برگ‌ها قابل جمع‌آوری و استفاده است.

در فرآیند فشرده‌سازی علوفه، یکسری پارامترهای وابسته و مستقل مطرح هستند که شناخت روابط بین آنها از ملزومات طراحی قالب فشرده‌سازی و اجزای آن است(۲). پارامترهای مستقل در فشرده‌سازی عبارت‌اند از چگالی، رطوبت محصول،

۱. به ترتیب استادیار و دانشجوی سابق کارشناسی ارشد مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: masoumi@cc.iut.ac.ir

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1388.13.47.25.8]

نرخ فشرده‌سازی و مقدار کرنش. پارامترهای وابسته در فشرده‌سازی عبارت‌اند از زمان کاهش تنش، فشار، مدول الاستیسیته، ضریب اصطکاک و انرژی (۸).

رئولوژی عبارت است از بررسی تغییر شکل‌ها و تنش‌های متغیر بر حسب زمان (۹). از مباحث مهم خواص رئولوژیکی مواد کشاورزی، کاهش تنش(Time of relaxation) محصولات است. اهمیت این ویژگی در آن است که پس از فشرده‌سازی محصولات کشاورزی از جمله علوفه، تنش‌های داخل محصول به طور وابسته به زمان کاهش پیدا می‌کند و از طریق آزمایش‌هایی می‌توان ادامه این کاهش تنش را پیش‌بینی کرده و در طراحی دستگاه‌های فشرده‌ساز مضاعف از آن بهره برد. در این آزمایش‌ها پارامترهای وابسته به زمان همچون مدول الاستیسیته (Modulus of elasticity) (E(t)) و نسبت پواسون (Poisson ratio) (ν(t)) که بر اندازه و نرخ کاهش تنش ماده تأثیر می‌گذارد، تعیین می‌گردد. از آنجا که کاهش تنش محصولات کشاورزی را می‌توان با مدل عمومی ماکسول بررسی کرد و این مدل از چند المان ساده ماکسولی تشکیل شده است، در هر یک از زمان‌های کاهش تنش یکی از المان‌ها به کاهش تنش ۳۷٪ خود می‌رسد. روش باقی‌مانده‌های متوالی (Successive Residual Method) معمول‌ترین روش برای بررسی کاهش تنش بوده است و توسط رابطه زیر تابع تنش محاسبه می‌شود(۸):

$$\sigma(t) = \sum_{i=1}^{n} \sigma_i e^{-t/T_i} \qquad [1]$$

که در آن σ_i تنش (Pa) و T_i زمان‌های کاهش تنش (s) در هر المان است. امروزه با توسعه علوم رایانه‌ای می‌توان با استفاده از بسته‌های محاسباتی مانند اکسل(Excel) زمان‌های آسایش تنش را بر اساس اطلاعات حاصل از اندازه‌گیری تنش در زمان‌های پس از متوقف کردن فشرده‌سازی به دست آورد.

مدول الاستیسیته (E) علوفه به دلیل لزج کشسان بودن آن، چه در حین بارگذاری و چه در زمان کاهش تنش تابعی از زمان است (۱۲). پردازش داده‌های تجربی نشان داده است که در حالت $\varepsilon = 0$ (در ابتدای فشرده‌سازی)، $E = E_0$ است(۱۰).

اسبف نشان داد که مدول الاستیسیته گاه با افزایش فشرده‌سازی افزایش می‌یابد و توسط رابطه زیر نشان داد که رابطه بین مدول الاستیسیته و چگالی بسته به صورت نمایی است (۱۰).

$$E = E_0 \exp\left[(\gamma - \gamma_0)/n\right] \qquad [2]$$

که در آن γ و γ_0: به ترتیب چگالی لحظه‌ای و اولیه (kg/m^3) و n: ضریب ثابت است.

سیتکی نیز رابطه بین چگالی و مدول الاستیسیته به صورت زیر بیان کرد (۳):

$$E = E_0 + c\gamma(\gamma - \gamma_0) \qquad [3]$$

که در آن c ضریب ثابت است.

در فرآیند فشرده‌سازی، رابطه زیر بین فشار (P) و کرنش برقرار است (۳):

$$P = c\gamma_0^{\,m}[\varepsilon/(1-\varepsilon)]^m \qquad [4]$$

که در آن c ضریب ثابت، ε کرنش و m ضریب ثابت و برای محدوده فشار موجود در بسته‌بندهای مواد علوفه‌ای تقریباً برابر ۲ گزارش شده است(۳).

آزمایش‌های زیادی توسط محققان جهت بررسی رابطه چگالی و فشار صورت گرفته است که در مجموع دو نوع رابطه نمایی و توانی را بیان می‌کنند از جمله توسط فابرود (Faborode) رابطه نمایی زیر برای کاه گندم ارائه شد (۱۰):

$$P = (a\gamma_0/b)\left[\exp\left(b(r-1)-1\right)\right] \qquad [5]$$

که در آن a و b ضرایب ثابت و r نسبت چگالی لحظه‌ای به چگالی اولیه ($r = \gamma/\gamma_0$) می‌باشند.

تغییر نرخ فشرده‌سازی روی فشار تأثیرگذار است. در این مورد آزمایش‌هایی که روی علوفه سیلویی توسط نگی و همکاران با سرعت‌های مختلف صورت گرفت و نتایج نشان داد که افزایش سرعت باعث افزایش فشار شده و منحنی فشار-جابه‌جایی در سطح بالاتری نسبت به منحنی‌های مشابه در سرعت‌های کمتر قرار می‌گیرد(۹).

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1388.13.47.25.8]

انرژی مخصوص عبارت است از میزان انرژی لازم برای فشرده‌سازی علوفه در واحد جرم علوفه. به این منظور از محاسبه سطح زیر منحنی نیرو- جابه‌جایی، انرژی فشرده‌سازی به دست آمده و با تقسیم آن بر جرم علوفه، انرژی مخصوص محاسبه می‌شود(۳).

در مدت زمان فشرده‌سازی، علوفه تنشی جانبی بر دیواره قالب وارد می‌کند که این تنش موجب ظهور اصطکاک بین بسته و دیواره قالب می‌شود (۱۳). ضریب اصطکاک خارجی محصولات کشاورزی تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار می‌گیرد که مهم‌ترین آنها مقدار رطوبت، فشار سطحی، سرعت لغزش و جنس سطح می‌باشد (۳). ضریب اصطکاک به جنس نمونه بستگی دارد. سطح خارجی بسته‌های علوفه دارای یکسری پرزهای کوچک می‌باشد که در ابتدا باعث بالا بودن اصطکاک می‌شود، ولی پس از طی مسیری این پرزها کنده شده و ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد (۳). روش‌های مختلفی جهت اندازه‌گیری ضریب اصطکاک ابداع شده‌اند. ساده‌ترین وسیله اندازه‌گیری ضریب اصطکاک، از یک سطح شیبدار تشکیل شده است. با قرار دادن نمونه روی این سطح و زاویه دادن به سطح تا لحظه شروع لغزش نمونه به سمت پایین، می‌توان ضریب اصطکاک استاتیکی بین نمونه و سطح شیبدار را به دست آورد(۸):

با توجه به موارد فوق اهداف تحقیق حاضر عبارت‌اند از:

۱- تعیین نیرو و انرژی متراکم‌سازی بسته‌های یونجه و کاه

۲- تعیین زمان کاهش تنش بسته‌های یونجه و کاه که در طراحی طول کانال کاهش تنش دستگاه فشرده‌ساز مضاعف می‌تواند به کار رود. با انتخاب طول محاسبه شده برای کانال کاهش تنش از بازگشت سریع طول بسته‌های فشرده شده جلوگیری و مانع از پارگی ریسمان‌های بسته‌بندی می‌شود.

۳- تعیین مدول الاستیسیته بسته‌های مورد آزمایش در حین فشرده شدن.

۴- برازش(Fitted) مدل‌های فابرود، اسبف و سیتکی بر مقادیر اندازه‌گیری شده و ارزیابی آنها.

۵- تعیین ضریب اصطکاک بسته‌های علوفه‌های مورد مطالعه روی سطوح فلزی که مورد انتظار است محفظه تراکم و کاهش تنش دستگاه از آن ساخته شود به منظور تعیین نیروی لازم مقابله با آن در فرآیند فشرده‌سازی.

۶- انجام آزمون کشش روی ریسمان‌های بسته‌بندی به منظور تعیین تعداد ردیف‌های ریسمان برای بسته‌های فشرده شده.

مواد و روش‌ها

انتخاب نمونه‌ها

بسته‌های کاه و یونجه به صورت کاملاً تصادفی با ابعاد تقریبی ۳۵×۴۵×۸۵ سانتی‌متر از انبار علوفه مزرعه دانشگاه صنعتی اصفهان تهیه شد. وزن بسته‌های یونجه و کاه به ترتیب ۱۴ کیلوگرم و ۱۲/۵ کیلوگرم (به ترتیب با چگالی ۹۸/۸ و۸۸/۲ کیلوگرم بر متر مکعب) انتخاب شدند. تا حد امکان سعی شد بسته‌هایی انتخاب شود که عاری از علف‌های هرز باشد هم‌چنین بسته‌ها ظاهری کاملاً مکعبی داشته و در مورد بسته‌های یونجه از انتخاب بسته‌ها با رطوبت بالا صرف‌نظر شد.

محتوای رطوبتی نمونه‌های آزمایشی طبق استاندارد ASAE شماره S358.2 DEC93 اندازه‌گیری شد(۵). رطوبت اولیه بسته‌های یونجه و کاه مورد آزمایش به ترتیب ۱۲/۸٪ و ۷/۴٪ (بر مبنای وزن تر) به دست آمد.

آزمون‌ها

فشرده‌سازی تک محوره

برای تعیین رابطه نیرو- جابه‌جایی یا تنش - کرنش در نمونه‌ها از یک دستگاه آزمون جامع کشش- فشار (ساخت شرکت هانسفیلد (Hounsfield) انگلستان) موجود در دانشکده مواد دانشگاه صنعتی اصفهان با ظرفیت ۵ تن نیرو و حداکثر سرعت ۲۰۰ میلی‌متر در دقیقه استفاده شد. جهت شبیه‌سازی محفظه فشرده‌سازی مضاعف، کانالی به ابعاد ۳۵×۴۵×۸۵ سانتی‌متر که در دو انتها باز بود توسط ورق آهن تهیه شد. هم‌چنین دو ورق ضخیم آهنی تهیه شد که یکی از آنها به انتهای کانال جوش داده

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1388.13.47.25.8]

شد و دیگری توسط یک فلانج که روی آن تعبیه شده بود به فک فشار دستگاه آزمون متصل شد. برای این محفظه دریچه‌ای در طول آن در نظر گرفته شد که ورود و خروج بسته‌های علوفه از آن صورت می‌گرفت. هم‌چنین به دلیل عبور بخشی از دستگاه آزمون از میان محفظه، شیاری در دو طرف محفظه ایجاد شد. به دلیل محدودیت سرعت دستگاه آزمون، از حداکثر سرعت دستگاه که برابر ۲۰۰ میلی‌متر در دقیقه بود در این آزمون استفاده شد.

همان‌طور که ذکر شد سرعت فشرده‌سازی یکی از مهم‌ترین فاکتورهای موثر بر نیروهای تولیدی است. به دلیل مشکلات ناشی از محدودیت سرعت دستگاه آزمون کشش- فشار و اختلاف فاحش سرعت‌های مجاز دستگاه آزمون با سرعت‌های معمول در فشرده‌سازی، در محاسبات طراحی لازم است ضریبی به نام ضریب سرعت در نظر گرفته شود. تحقیقات انجام شده توسط نگی و همکاران نشان داد که با افزایش نرخ کرنش به ۱۰ برابر مقدار اولیه آن، نیروهای تولیدی توسط نمونه‌های علوفه به ۱/۵ برابر مقدار اولیه افزایش می‌یابند(۹).

بسته‌های علوفه پس از توزین و اندازه‌گیری ابعاد آنها در داخل محفظه فشار قرار داده شدند و درب محفظه توسط پیچ و مهره کاملاً بسته شد. سپس محفظه فشار به همراه بسته علوفه در داخل دستگاه آزمون قرار داده شد. جهت بررسی تأثیر میزان فشرده‌سازی در سطوح مختلف کرنش، ۳ سطح کرنش طولی ۲۵٪، ۳۵٪ و ۴۵٪ انتخاب شد. با انتخاب حداکثر سرعت دستگاه آزمون (۲۰۰ میلی‌متر در دقیقه) آزمون فشار آغاز شد و بلافاصله پس از رسیدن به کورس مورد نظر دستگاه متوقف گردید و ارقام مربوط به نیرو – جابه‌جایی اندازه‌گیری شده توسط دستگاه آزمون ثبت گردید. در این مرحله آزمایش تنش ایجاد شده در نمونه‌ها، مدول الاستیسیته و انرژی لازم برای فشرده‌سازی در کرنش طولی مشخص محصولات بسته‌بندی شده آزمایشی به دست آمد. به منظور محاسبه مدول الاستیسیته نمونه‌ها، پس از ترسیم منحنی تنش- کرنش، برای هر فاکتور مناسب‌ترین مدل تعیین شد و سپس مدول الاستیسیته که همان مشتق درجه اول مدل برازش شده بود محاسبه گردید. به این منظور لازم گردید چگالی لحظه‌ای بسته‌ها در هر آزمایش با معلوم بودن ابعاد سطح مقطع و وزن بسته‌های مورد آزمایش تعیین گردند. مدل‌های فابرود، اسبف و سیتکی نیز بر مقادیر به دست آمده برازش گردیدند. انرژی مصرفی با انتگرال‌گیری از رابطه نیرو- جابه‌جایی به دست آمده در محدوده مورد نظر به دست آمد(۳).

کاهش تنش و میزان بازگشت طول نمونه‌ها

در ادامه آزمون فشرده‌سازی، با رسیدن پیستون فشرده ساز به سطح کرنش مورد نظر دستگاه آزمون متوقف شد و توسط یک زمان‌سنج(Corn meter) در فواصل مختلف زمانی نیروی حاصله از روی صفحه نمایش دستگاه قرائت و یادداشت گردید. در ابتدای آزمون، کاهش تنش بسیار فاحش بود ولی پس از چند دقیقه تغییرات کاهش یافت. پس از حدود ۲۰ دقیقه به دلیل ثابت ماندن تغییرات، آزمون متوقف شد. اطلاعات به دست آمده در هر سطح فشرده‌سازی در محیط نرم افزار اکسل وارد گردید. با استفاده از گزینه Solver از منوی Tools این نرم افزار پارامترهای مجهول رابطه ۲ که شامل زمان‌های کاهش تنش می‌باشند به دست آمد. در طراحی کانال‌های کاهش تنش به دلیل توجیه اقتصادی طرح از سیکل کاری کوتاه استفاده می‌شود. بنابراین کافی است کوچک‌ترین زمان کاهش تنش مورد توجه قرار گیرد(۸). پس از ثابت ماندن تغییرات بعد از قطع نیروی بارگذاری در هر سطح فشرده‌سازی مقدار بازگشت طول نمونه‌ها توسط خط‌کش اندازه‌گیری شد(۸).

ضریب اصطکاک

به دلیل آن‌که فشرده‌سازی مضاعف در سرعت پایین انجام می‌شود و هم‌چنین کمتر بودن ضریب اصطکاک دینامیکی نسبت به نوع استاتیکی، ترجیحاً ضریب اصطکاک استاتیکی اندازه‌گیری شد. آزمایش روی سطوح تماسی آهن و گالوانیزه به روش سطح شیبدار انجام گردید. جهت بررسی تأثیر بار عمود

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1388.13.47.25.8]

بر سطح تماس، بر ضریب اصطکاک، آزمون در ۲ سطح جنس سطح تماس، ۳ سطح بار عمودی در ۳ تکرار، برای دو نوع بسته‌های یونجه و کاه انجام شد. در سطح وزنی اول، بسته به تنهایی روی سطح شیبدار قرار گرفت. در سطح وزنی دوم وزنه‌ای به وزن ۵۰ کیلوگرم و در سطح وزنی سوم وزنه ۱۰۰ کیلوگرمی روی بسته‌ها که روی سطح شیبدار قرار داشتند قرار گرفت.

کشش ریسمان

بسته‌های علوفه در ایران عموماً توسط ریسمان نایلونی یا کنفی بسته‌بندی می‌شوند. جهت محاسبه تعداد حلقه کافی ریسمان لازم بود که مقاومت کششی ریسمان‌های متداول اندازه‌گیری شود. به همین منظور دو نوع ریسمان گره زنی متداول از جنس نایلون با قطر تقریبی ۴ میلی‌متر (ساخت شرکت پرواز پلاستیک تحت نام نخ عدلبند ماهی نشان) و هم‌چنین از جنس کنف به قطر تقریبی ۵ میلی‌متر (ساخت شرکت sisal binder) انتخاب شده و سعی بر آن شد که از ضخیم‌ترین نوع ریسمان موجود در بازار استفاده گردد. ریسمان‌هایی که انتخاب شدند عاری از خوردگی یا پارگی بودند. آزمایش توسط دستگاه آزمون کشش ریسمان (ساخت شرکت زویبخ (Zwick) آلمان) که دارای فک‌های مخصوص نگه‌داری ریسمان بود، انجام گردید. طبق استاندارد ASTM شماره D2256-80، مقطع نخ‌های مورد آزمایش دایره‌ای فرض شد و طول نمونه‌ها ۲۵ سانتی‌متر انتخاب شدند (۶). علاوه بر طول نمونه فاکتور مهم سرعت کشش نیز در آزمون مطرح است. طبق این استاندارد سرعت آزمون باید به گونه‌ای باشد که در مدت زمان ۳ ± ۲۰ ثانیه ریسمان به تنش نهایی خود برسد. بنابراین قبل از آزمون اصلی، چند نمونه کشش بر ریسمان نایلونی و کنفی به طور جداگانه انجام شد تا سرعت استاندارد به دست آید. سرعت استاندارد کشش ریسمان نایلونی ۲۰۰ میلی‌متر در دقیقه و در مورد ریسمان کنفی ۲۰ میلی‌متر در دقیقه به دست آمد.

با توجه به نیروی بیشینه پسماند اندازه‌گیری شده در بسته‌های محصول مورد نظر پس از گذشت مدت زمانی برابر با زمان به دست آمده از آزمایش کاهش تنش و حداکثر نیروی قابل تحمل نخ کنفی مورد آزمایش تعداد رشته‌های نخ تعیین گردید.

روش آزمون آماری

به منظور بررسی روابط بین پارامترهای مختلف در طرح حاضر و تأثیر عواملی چون نوع گیاه و سطوح مختلف فشرده‌سازی بر این پارامترها، به دلیل حذف تأثیر تفاوت وزن بسته‌ها، آزمون فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام شدند (۱). به منظور تعیین زمان‌های کاهش تنش، انرژی متراکم‌سازی و مدول الاستیسیته نمونه‌ها، از نرم‌افزار اکسل استفاده شد. از رویه NLIN نرم‌افزار SAS گونه ۸ برای تعیین ضرایب مدل‌های رئولوژیکی مورد نظر استفاده گردید (۱۱).

نتایج و بحث

آزمون فشرده‌سازی

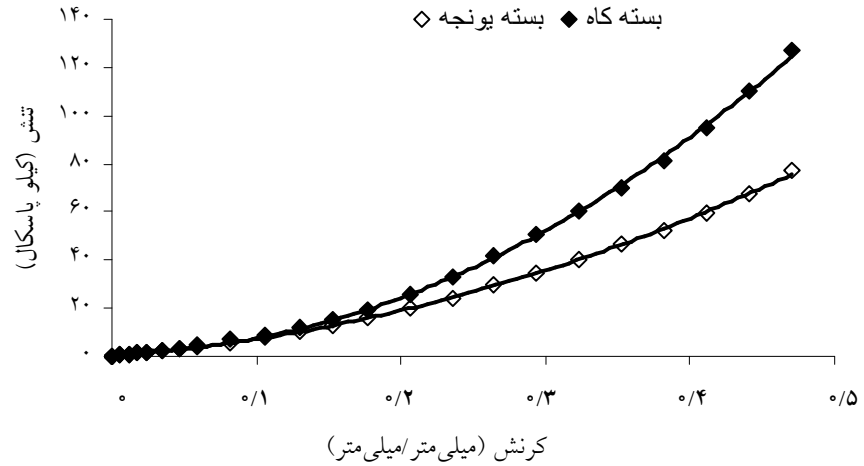
فشار

نتایج حاصل از آزمون فشار نشان داد که با افزایش مقدار فشرده‌سازی (کرنش)، فشار (تنش) به وجود آمده افزایش می‌یابد. در هر یک از سطوح فشرده‌سازی میزان تنش حاصله در کاه بیشتر از یونجه بود که به دلیل بالا بودن خاصیت الاستیک بسته‌های کاه نسبت به بسته‌های یونجه می‌باشد. در شکل ۱ مقادیر متوسط تنش بسته‌های یونجه و کاه تا سطح کرنش طولی ۴۵٪ طول اولیه بسته را نشان می‌دهد. رفتار مشابهی برای هر دو نوع محصول در سایر سطوح کرنش طولی (۲۵٪ و ۳۵٪ طول اولیه بسته) مشاهده شد.

تجزیه واریانس نتایج نشان داد که تأثیر نوع محصول، سطح کرنش و اثرات متقابل آنها در تنش محوری حاصله بسیار معنی‌دار است ($P<0/01$). جدول ۱ مقایسه میانگین مقادیر تنش در بسته‌های یونجه و کاه را نشان می‌دهد. بیشترین تنش در

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1388.13.47.25.8]



شکل ۱. نمودار مقایسه تنش در بسته‌های یونجه و کاه در سطح کرنش طولی ۴۵٪ طول اولیه بسته‌ها

جدول ۱. اثر متقابل نوع محصول و سطح فشرده‌سازی بر تنش حاصله (کیلو پاسکال)

محصول	سطح کرنش طولی		
	٪۲۵	٪۳۵	٪۴۵
یونجه	۳۳/۴ d	۶۱/۵ c	۷۷/۰ b
کاه	۴۱/۱ d	۷۹/۰ b	۱۲۷/۴ a

میانگین‌هایی که دارای حروف مشابه هستند براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ اختلاف معنی‌داری ندارند.

محصول کاه و در سطح کرنش طولی ۴۵٪ طول اولیه بسته حاصل شد (جدول ۱). مقادیر تنش بسته‌های کاه در سطح کرنش ۳۵٪ و ۴۵٪ بیشتر از یونجه بود.

مدول الاستیسیته بیشینه

آزمون تجزیه واریانس آشکار ساخت که نوع محصول و میزان فشرده‌سازی بر مدول الاستیسیته بیشینه اثر بسیار معنی‌داری داشت (P<۰/۰۱). نتایج مقایسه میانگین مقادیرمدول الاستیسیته بیشینه در جدول ۲ نشان داده شده است. مقادیر مدول الاستیسیته بیشینه کاه نسبت به یونجه در هر سطح فشردگی بیشتر بود. در هر محصول با افزایش سطح فشردگی مدول الاستیسیته بیشینه افزایش داشت و اختلاف بین مقادیر میانگین آنها در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار بود. علت این اختلاف علاوه بر تفاوت ساختمان سلولی کاه و یونجه به محتوای رطوبتی بسته‌ها برمی‌گردد.

انرژی مصرفی برای فشرده‌سازی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر نوع محصول و سطح فشرده‌سازی و هم‌چنین اثر متقابل آنها بر انرژی مصرفی بسیار معنی‌دار بود (P<۰/۰۱). در هر محصول افزایش سطح فشرده‌سازی باعث افزایش انرژی مصرفی شد. مقادیر انرژی در سطوح کرنش ۳۵٪ و ۴۵٪، در هر محصول دارای اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ بود. هم‌چنین مصرف انرژی در کاه، در هر سطح فشرده‌سازی بیشتر از یونجه بود که ناشی از ساختمان سلولی و رطوبت نمونه های آزمایشی بود (جدول ۳).

برازش مدل

مدل فابرود

مدل فابرود بر مقادیر اندازه‌گیری شده فشار در مقابل تغییرات چگالی طی آزمون فشار بسته‌های یونجه و کاه در سطوح

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1388.13.47.25.8]

جدول ۲. اثر متقابل نوع محصول و سطح فشرده‌سازی بر مدول الاستیسیته بیشینه (کیلوپاسکال)

محصول	سطح کرنش طولی		
	٪۲۵	٪۳۵	٪۴۵
یونجه	۲۴۹/۵۶ f	۳۳۸/۳۳ e	۳۵۰/۳۵ d
کاه	۳۹۹/۷۷ c	۴۲۸/۶۲ b	۶۸۰/۸۱ a

میانگین‌هایی که دارای حروف مشابه هستند بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ٪۵ اختلاف معنی‌داری ندارند.

جدول ۳ . اثر متقابل نوع محصول و سطح فشرده‌سازی بر انرژی مصرفی (نیوتن- متر)

محصول	سطح کرنش طولی		
	٪۲۵	٪۳۵	٪۴۵
یونجه	۴۰۴ e	۱۰۳۳ d	۱۸۲۰ b
کاه	۴۷۵ e	۱۴۲۵ c	۲۷۰۵ a

میانگین‌هایی که دارای حروف مشابه هستند بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ٪۵ اختلاف معنی‌داری ندارند.

فشرده‌سازی مختلف برازش گردید. به منظور ارزیابی مدل برازش شده مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل (رابطه ۶) در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایش رسم شدند و ضریب تبیین (R^2) و میانگین مربعات خطا (MSE) آنها بررسی و همراه ضرایب به دست آمده برای هر یک از نمونه‌های آزمایشی در جدول ۴ گزارش گردیده است. با توجه به ارقام مربوط به ضریب تبیین به دست آمده در این آزمایش مدل پیش بینی شده در هر یک از حالات مناسب تشخیص داده شد.

به دلیل بیشتر بودن مقدار فشار در بسته‌های کاه، مقدار ضریب a که با فشار نسبت مستقیم دارد، در بسته‌های کاه بیشتر از یونجه بود. هم‌چنین در دو محصول نسبت عکس فشار با ضریب b در نتایج آزمون کاملاً مشهود بود.

مدل‌های اسبف و سیتکی

مدل‌های اسبف و سیتکی بر مقادیر به دست آمده مدول الاستیسیته در مقابل چگالی نمونه‌های آزمایشی در سطوح کرنشی مختلف برازش شدند. از برازش داده‌ها برمدل‌های یاد شده مدول الاستیسیته اولیه (E0) و ضرایب روابط ۳ و ۴ به دست آمدند.

به منظور ارزیابی مدل‌های برازش شده مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها (رابطه‌های ۳ و ۴) در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایش رسم شدند و ضریب تبیین (R^2) و میانگین مربعات خطا (MSE) آنها بررسی شدند که همراه با ضرایب به دست آمده c و n در جدول ۵ ارائه گردیده است.

مدل سیتکی به دلیل بالاتر بودن ضرایب تبیین آن نسبت به مدل اسبف در سطوح مختلف آزمون و پایین‌تر بودن مقادیر MSE به عنوان مدل برتر انتخاب شد. سیتکی نتیجه‌ای مشابه در رطوبت‌های پایین و چگالی اولیه کمتر از ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب به دست آورد (۳). ضریب c در مدل سیتکی با افزایش سطح فشردگی کاهش یافت، در حالی که افزایش سطح فشردگی باعث افزایش ضرایب n در مدل اسبف شد.

کاهش تنش

نتایج تجزیه واریانس نشان داد نوع محصول، اثر معنی‌داری بر اولین زمان کاهش تنش نداشت($P<0/05$). ولی اثر سطح فشردگی بر اولین زمان کاهش تنش در سطح احتمال ٪۵ معنی‌دار بود. جدول ۶ مقایسه میانگین اولین زمان کاهش تنش

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1388.13.47.25.8]

جدول ۴. ضرایب ثابت مدل فابرود و ضریب تبیین (R^2) و مقادیر میانگین مربعات خطا بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط مدل برای بسته‌های یونجه و کاه در سه سطح کرنش

محصول		سطح کرنش طولی(٪)		
		۲۵	۳۵	۴۵
یونجه	a	۶۹۰/۳۴	۶۵۷/۹۹	۶۳۸/۴۲
	b	۶/۱۰	۴/۲۰	۲/۴۲
	R^2	۰/۷۹	۰/۸۶	۰/۸۹
	MSE	۱۴/۵۱	۳۰/۷۶	۴۴/۷۰
کاه	a	۸۴۳/۱۶	۱۰۷۸/۲۶	۹۷۲/۴۵
	b	۶/۶۷	۳/۶۳	۲/۵۹
	R^2	۰/۹۳	۰/۸۰	۰/۹۰
	MSE	۸/۲۰	۶۷/۰۱	۱۱۳/۲۸

جدول ۵. ضرایب ثابت مدل‌های سیتکی (c) و اسبف (n)، ضریب تبیین (R^2) و میانگین مربعات خطا بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط این مدل‌ها برای بسته‌های یونجه وکاه در سه سطح کرنش

محصول	مدل		سطح کرنش طولی(٪)		
			۲۵	۳۵	۴۵
یونجه	اسبف	n	۱۶/۲۸	۲۰/۷۲	۴۵/۵۶
		R^2	۰/۶۸	۰/۶۷	۰/۷۹
		MSE	۴۷/۰۵	۳۰/۳۸	۱۳/۶۶
	سیتکی	c	۳۸/۱۴	۳۷/۳۸	۱۷/۰۲
		R^2	۰/۸۱	۰/۸۹	۰/۸۹
		MSE	۶/۱۰	۱۲/۱۲	۷/۹۷
کاه	اسبف	n	۱۵/۲۱	۲۷/۱۷	۲۴/۷۷
		R^2	۰/۸۵	۰/۷۰	۰/۶۴
		MSE	۹/۸۶	۳۰/۱۵	۹۸/۷۹
	سیتکی	c	۷۱/۶۲	۵۱/۳۱	۳۹/۶۹
		R^2	۰/۹۳	۰/۸۲	۰/۹۰
		MSE	۴/۶۵	۱۹/۹۲	۳۵/۱۴

هر دو محصول را در سطوح کرنشی مختلف نشان می‌دهد. کمترین زمان آسایش تنش مربوط به بسته‌های یونجه ۱۲۰ ثانیه به دست آمد.

خاصیت ارتجاعی مواد پس از فشرده‌سازی

میزان بازگشت طول نمونه‌ها پس از باربرداری اندازه‌گیری شد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد تاثیر نوع محصول، میزان فشردگی و اثر متقابل این دو عامل بر میزان بازگشت طول نمونه‌ها بسیار معنی‌دار بود ($P<0/01$). جدول ۷ مقایسه میانگین میزان بازگشت طول بسته‌های هر دو محصول را در سطوح کرنشی مختلف نشان می‌دهد.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1388.13.47.25.8]

جدول ۶. اثر متقابل نوع محصول و سطح کرنش طولی بر اولین زمان کاهش تنش(ثانیه)

محصول	سطح کرنش طولی		
	٪۲۵	٪۳۵	٪۴۵
یونجه	۱۵۹۷۵ [a]	۱۳۳۳۷ [a]	۸۷۹۳ [b]
کاه	۱۳۶۵۳ [a]	۱۳۳۶۹ [a]	۱۵۳۲۴ [a]

میانگین‌هایی که دارای حروف مشابه هستند بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ٪۵ اختلاف معنی‌داری ندارند.

جدول۷. اثر متقابل نوع محصول و سطح کرنش طولی بر میزان بازگشت طول بسته‌های علوفه پس از آزمون کاهش تنش (سانتی‌متر)

محصول	سطح کرنش طولی		
	٪۲۵	٪۳۵	٪۴۵
یونجه	۹/۷ [d]	۱۵/۳ [c]	۱۱/۷ [d]
کاه	۱۵/۳ [c]	۲۴/۷ [b]	۳۳/۰ [a]

میانگین‌هایی که دارای حروف مشابه هستند بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

جدول ۸. اثر متقابل نوع سطح تماس و وزن عمود بر سطح بر ضریب اصطکاک بسته‌های یونجه وکاه

سطح تماس	وزن عمود بر سطح		
	بسته تنها	بسته+۵۰ کیلوگرم	بسته+۱۰۰ کیلوگرم
آهن	۰/۳۰۵[a]	۰/۲۸۱ [cd]	۰/۲۵۸ [e]
گالوانیزه	۰/۲۹۷[ab]	۰/۲۸۹ [bc]	۰/۲۷۷ [d]

میانگین‌هایی که دارای حروف مشابه هستند بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ٪۵ اختلاف معنی‌داری ندارند.

ضریب اصطکاک

ضریب اصطکاک برای دو فلز آهن و گالوانیزه در سه سطح وزنی اعمال شده عمودی اندازه‌گیری شد. جدول تجزیه واریانس آشکار ساخت نوع محصول و سطح تماس اثر معنی‌داری بر ضریب اصطکاک نداشت (P<۰/۰۵). اثر نیروی عمودی بر سطح تماس بر ضریب اصطکاک معنی‌دار بود (P<۰/۰۵). هر سطح تماس با افزایش وزن عمود بر سطح تماس، ضریب اصطکاک کاهش یافت، زیرا با اعمال بار عمودی بیشتر، سطح تماس بسته‌ها با سطح فلزی صاف‌تر شده و ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. نتایج مشابه توسط سیتکی برای محصولات مختلف گزارش گردیده است (۳). اثر متقابل سطح تماس و وزن عمود بر سطح بر مقادیر ضریب اصطکاک در جدول ۸ آمده است.

کشش ریسمان

آزمون کشش ریسمان نشان داد که ریسمان کنفی با حداکثر نیروی قابل تحمل ۲/۶ کیلو نیوتن مقاوم‌تر از ریسمان نایلونی است. هم‌چنین میزان کرنش ریسمان کنفی تا حد پارگی، کمتر از ریسمان نایلونی است بنابراین این نوع ریسمان کنفی برای استفاده در دستگاه بسته بند مضاعف، مناسب تر از ریسمان نایلونی می‌باشد.

با معلوم بودن ارقام به دست آمده از آزمون کاهش تنش،

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1388.13.47.25.8]

نیروی بیشینه پسماند اندازه‌گیری شده در بسته‌های فشرده شده در کرنش ۴۵ درصد طول اولیه بسته‌های یونجه (۷/۶ کیلو نیوتن) پس از گذشت ۱۲۰ ثانیه (زمان لازم جهت رسیدن به کاهش تنش مناسب) حداقل سه رشته ریسمان بدون پاره شدن نیاز می‌باشد.

نتیجه‌گیری

نتایجی که در طی این تحقیق به دست آمدند عبارت‌اند از:

۱. با افزایش مقدار کرنش، فشار (تنش) بوجود آمده افزایش یافت. در هر یک از سطوح فشرده‌سازی میزان تنش حاصله در کاه بیشتر از یونجه بود.
۲. تأثیر نوع محصول و سطح کرنش بر مدول الاستیسیته بیشینه و مصرف انرژی جهت فشرده‌سازی بسیار معنی‌دار بود. بیشترین این مقادیر در محصول کاه و در سطح کرنش طولی ۴۵ درصد به دست آمد.
۳. در مدل فابرود، مقدار ضریب b با افزایش سطح کرنش، کوچک‌تر شد. سطح فشردگی بر ضریب a در این مدل برای یونجه تأثیر عکس و در کاه تأثیر مستقیم داشت.
۴. مدل سیتکی به دلیل بالاتر بودن ضرایب تبیین آن نسبت به مدل اسبف در سطوح مختلف آزمون، به‌عنوان مدل برتر انتخاب شد.
۵. اثر سطح فشردگی بر اولین زمان آسایش تنش در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود. نوع محصول، اثر معنی‌داری بر اولین زمان آسایش تنش نداشت هم‌چنین نوع محصول و سطح فشردگی بر دومین و سومین زمان آسایش تنش اثر معنی‌داری نداشتند.
۶. تأثیر نوع محصول، سطح فشردگی و اثر متقابل این دو عامل بر میزان بازگشت طول نمونه‌ها در آزمون فشرده‌سازی بسیار معنی‌دار بود.
۷. نوع محصول و سطح تماس اثر معنی‌داری بر ضریب اصطکاک نداشت. اثر وزن عمود بر سطح تماس بر ضریب اصطکاک بسیار معنی‌دار بود. در هر سطح تماس با افزایش وزن عمود بر سطح تماس، ضریب اصطکاک کاهش یافت.
۸. آزمون کشش ریسمان نشان داد که ریسمان کنفی مقاوم‌تر از ریسمان نایلونی است. هم‌چنین میزان کرنش ریسمان کنفی تا حد پارگی، کمتر از ریسمان نایلونی است.

سپاسگزاری

نویسندگان از تمامی عزیزانی که در طول این تحقیق آنها را مشاوره و یاری فرمودند به خصوص استاد ارجمند جناب آقای دکتر همت، مدیریت محترم مزرعه تحقیقاتی دانشکده، جناب آقای دکتر رزمجو و پرسنل محترم سوله ماشین‌های کشاورزی تشکر و قدردانی می‌نمایند. ضمناً از دانشکدهٔ کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان که هزینه‌های این تحقیق را تقبل فرمودند، سپاسگزارند.

منابع مورد استفاده

۱. بصیری، ع. ۱۳۷۰. *طرح‌های آماری در علوم کشاورزی*. انتشارات دانشگاه شیراز.
۲. سریواستاوا، ا.، گ. گورینگ و ر. روربا‌ک. ۱۳۷۹. *اصول طراحی ماشین‌های کشاورزی (ترجمه: منصور بهروزی لار)*. انتشارات علمی دانشگاه آزاد اسلامی.
۳. سیتکی، گ. ۱۳۸۲. *مکانیک محصولات کشاورزی (ترجمه: تیمور توکلی هشجین)*. مرکز خدمات فرهنگی سالکان، ۵۲۸ صفحه.
۴. والتن، پیتردی. ۱۳۶۸. *تولید و مدیریت گیاهان علوفه‌ای (ترجمه: محسن مدیر شانه چی)*. مؤسسه چاپ و انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد.
5. ASAE. ASAE S358.2 DEC93. 1999. Forage moisture content measurement in ASAE Standards, 43rd ed., ASAE, St. Joseph, MI.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1388.13.47.25.8]

6. ASTM. ASTM D2256-80. 2001. String tension method in ASTM Standard for string. American National Standards Institute.
7. Bilanski, W. K., V. A. Graham and J. A. Hanusiak. 1985. Mechanics of bulk forage deformation with application to wafering. ASAE 28:697-702.
8. Mohsenin, N. N. 1970. Physical Properties of Plant and Animal Materials. Gordon and Breach Pub. Co., USA.
9. Negi, S. C., J. R. Ogilvie and J. C. Jofriet. 1987. Some mechanical and rheological properties of silages. Bio-system Eng. 29(1): 59-64.
10. O`Dogherty, M. J. 1989. A review of the mechanical behavior of straw when compressed to high densities. J. Agric. Eng. Res. 44: 241-265.
11. SAS, 2001. SAS User's Guide: Statistics. Version 8.2 Statistical Analysis System Inc., Raleigh, NC.
12. Watts, K. C. and W. K. Bilanski. 1991. Stress relaxation of alfalfa under displacement. ASAE 34: 2491-2498.
13. Wheeler, J. A. and M. J. O`Dogherty. 1984. Compression of straw to high densities in closed cylindrical dies. J. Agric. Eng. Res. 29: 61-72.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1388.13.47.25.8]