



بررسی رفتار تراکمی ذرات یونجه

افسانه کرمی^۱ داود قنبریان^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه شهرکرد

۲- استادیار مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه شهرکرد

af.karami64@gmail.com

چکیده

حمل و نقل و انبارداری علوفه برداشت شده در مزارع به دلیل حجم زیاد این محصولات مستلزم صرف هزینه‌های زیادی است. یکی از روش‌های مناسب برای کاهش این مشکل، تولید قرص‌های فشرده علوفه است. مطالعه رفتار تراکمی علوفه یکی از مراحل ضروری برای طراحی و ساخت دستگاه‌های قرص‌ساز محسوب می‌شود. برای تعیین بهترین مدل پیش‌بینی کننده رفتار تراکمی یونجه، آزمایشات بر روی یونجه خرد شده رقم هراتی با سه سطح رطوبتی ۱۰، ۱۵ و ۲۰٪ وزن تر و متوسط اندازه ذرات ۳/۲۶ و ۴/۷۵ میلی‌متر انجام شد. به منظور شبیه‌سازی فرآیند تولید قرص، یونجه‌های خرد شده در داخل یک واحد آزمایشگاهی سیلندر و پیستون تحت فشار قرار گرفته و تغییرات چگالی و حجم نسبت به فشار وارده ثبت شد. سپس به منظور بررسی رفتار تراکمی ذرات یونجه، هفت مدل تراکمی جونز، کوکیتا، گاریاچکین، میوس، باتلر-مک‌کولی، پریژاگین و پانلی-فلهو بر داده‌های حاصل از آزمایشات برازش شدند. نتایج آزمایش نشان داد که بیشترین چگالی در یک رنج نیرویی ثابت در رطوبت ۱۰٪ و اندازه ذرات ۳/۲۶ میلی‌متر حاصل شد. همچنین قابلیت تراکم‌پذیری در حین مراحل فشرده‌سازی متغیر بود. در ابتدای فرآیند که فشار پایین است، چگالی با سرعت بالایی نسبت به فشار افزایش یافت در حالیکه در فشارهای بالاتر این سرعت کاهش یافت. برازش هفت مدل تراکمی، با توجه به مقایسه مقادیر ضریب تبیین R^2 و خطای استاندارد رگرسیون RSE نشان داد که مدل جونز بهترین همخوانی را با داده‌های آزمایشی دارد.

واژه‌های کلیدی: رفتار تراکمی ذرات، قرص‌سازی، قرص یونجه، متراکم‌سازی، مدل‌های تراکمی.

مقدمه

یونجه به دلیل ارزش غذایی فراوان، از مواد پرمصرف در تغذیه نشخوارکنندگان محسوب می‌شود (هاشمی، ۱۳۷۵). معمولاً برای تسهیل در حمل و نقل و جابجائی این محصول، از ماشین‌های مخصوص بسته‌بندی که یونجه را به بسته‌های مکعبی یا استوانه‌ای تبدیل می‌کنند، استفاده می‌شود. حجم زیاد این بسته‌ها و نیاز به نیروی کارگری از جمله معایب دستگاه‌های بسته‌بندی است (منصوری‌راد، ۱۳۸۲). به همین دلیل امروزه طراحی و ساخت دستگاه‌های قرص‌ساز علوفه مورد توجه محققین بخش کشاورزی قرار گرفته است. بدیهی است بررسی رفتار تراکمی محصولات کشاورزی شرط اولیه برای تحقیق در زمینه طراحی و ساخت دستگاه‌های قرص‌ساز می‌باشد. در فرآیند متراکم‌سازی ذرات، میزان تغییرات چگالی در مقابل تغییرات فشار بیان کننده قابلیت تراکم‌پذیری ذرات می‌باشد که

مقدار آن در حین مراحل فشرده‌سازی متغیر است. در طی این فرایند، ذرات تشکیل دهنده یک ماده گسسته با اعمال نیرو به یکدیگر نزدیک‌تر شده، حجم فضای بین آنها کاهش یافته و ماده مورد نظر به فرم قالبی که در آن فشرده می‌شود درمی‌آید. نیروهای موثر در شکل‌گیری قرص را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: ۱- نیروهای درونی و ۲- نیروهای بیرونی. نیروی درونی موجود بین ذرات، شامل تمام مکانیزم‌های اتصال‌دهنده‌ای است که در متمرکز کردن ذرات برای تجمع آنها کنار یکدیگر نقش دارد. نیروی بیرونی همان نیروی مکانیکی اعمال شده از طرف دستگاه قرص‌ساز است که با فشار وارده باعث اتصال بهتر ذرات می‌شود (تیبیل، ۱۹۹۶). مراحل تراکم ذرات متناسب با مقدار نیروی مکانیکی اعمال شده را می‌توان به ترتیب زیر بیان نمود:

الف) مرحله تراکم اولیه: در این مرحله فشار اعمال شده برای متراکم‌سازی پایین است و فقط چیدمان و ترتیب ذرات را تغییر می‌دهد که شامل تبدیل بسته‌های ناپایدار (تجمع ذرات به صورت پل و کمان) به توده‌های متمرکز می‌شود. در این مرحله بخشی از انرژی صرف غلبه بر اصطکاک درونی ذرات شده و خصوصیات فیزیکی ذرات اولیه حفظ می‌شود.

ب) مرحله تغییر شکل: در فشار بالاتر توده مواد تغییر شکل الاستیک-پلاستیک می‌دهند و حرکت ذرات به سمت فضاهای خالی بیشتر شده، در نتیجه سطح تماس بین آنها افزایش می‌یابد. با کاهش فاصله ذرات، نیروهای واندروالس (Van der Waal's) و الکترواستاتیکی (Electrostatic) فعال می‌شوند که این موضوع در پیوستگی ذرات موثر است. در این مرحله، فشار اعمالی، توانایی شکستن ذرات ترد را دارد.

پ) مرحله تراکم نهایی: مانند مرحله قبل با افزایش نیرو، فشرده‌سازی مواد ادامه می‌یابد و با کاهش خلل و فرج بین ذرات، چگالی افزایش می‌یابد. در طی مراحل سه گانه فرآیند تراکم، اصطکاک موجود بین ذرات ماده و سطح محفظه فشرده‌سازی باعث هدر رفت انرژی به صورت گرما می‌شود و دما مرتباً افزایش می‌یابد. اگر دما به نقطه ذوب بخشی از مواد تشکیل دهنده قرص برسد ذوب مقطعی رخ می‌دهد و اتصال بهتر ذرات امکان‌پذیر می‌شود (آداپ و همکاران، ۲۰۰۹). با توجه به موارد ذکر شده می‌توان گفت که در فرآیند متراکم‌سازی، کاهش حجم مواد در دو مرحله صورت می‌گیرد که عبارتند از:

۱- کاهش حجم اولیه که در اثر تغییر چیدمان ذرات رخ می‌دهد.

۲- کاهش حجم ثانویه که در اثر تغییر شکل الاستیک-پلاستیک ذرات ایجاد می‌گردد (مانی و همکاران، ۲۰۰۴).

محققان زیادی در زمینه نحوه اتصال ذرات به یکدیگر در توده تراکمی فعالیت کرده‌اند، تیبیل (۱۹۹۶) در زمینه فشرده‌سازی ذرات یونجه برای تولید قرص تحقیق کرد. مانی و همکاران (۲۰۰۴) رفتار تراکمی ساقه گندم، ذرت و جو را مورد بررسی قرار دادند. آداپ و همکاران (۲۰۰۲) روی فشرده‌سازی ذرات یونجه تحقیق کردند. مرور تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که در فرآیند فشرده‌سازی، عوامل مختلفی در اتصال ذرات به یکدیگر نقش دارند. این عوامل عبارتند از: اتصال‌دهنده‌های طبیعی، اتصال‌دهنده‌های مصنوعی، نیروهای بین مولکولی و نیز تشکیل پل جامد بین ذرات ماده. در بین عوامل ذکر شده، اتصال‌دهنده‌های طبیعی درون ماده موثرترین نقش را بر عهده دارند (تیبیل و سخن‌سنج، ۱۹۹۶). ترکیبات شیمیایی علوفه عبارتند از: سلولز، همی سلولز، پروتئین، نشاسته، لیگنین، فیبر و چربی که برخی از این مواد در اثر دما و فشار موجود در کاندیشنر مانند چسب عمل می‌کنند و باعث افزایش نیروی چسبندگی ذرات به یکدیگر می‌شوند که به آن‌ها اتصال‌دهنده‌های طبیعی گویند (آداپ و همکاران، ۲۰۰۷). به طور

مثال پروتئین موجود در یونجه تحت حرارت تولید شده در کاندیشنر نرم می‌شود و در اتصال بهتر ذرات به یکدیگر نقش دارد، بنابراین باعث افزایش استحکام قرص می‌شود (وینوسک، ۱۹۹۸ و بریگ و همکاران، ۱۹۹۹). نشاسته نیز در اثر حرارت و رطوبت، حالت ژلاتینی پیدا کرده و به صورت چسب عمل می‌کند (توماس و همکاران، ۱۹۹۸). لیگنین در دما و فشار بالا نرم می‌شود و باعث بهبود خاصیت چسبندگی ذرات می‌گردد، این ماده دمای ذوب پایینی (۱۴۰ درجه سانتیگراد) دارد و در صورتی که گرمای کافی دریافت کند ذوب شده، در فضای بین ذرات نفوذ می‌کند و بعد از انجماد پل جامد تشکیل می‌دهد (وان دام و همکاران، ۲۰۰۴). فیبر موجود در علوفه نیز، درون قرص مانند قفل‌کننده ذرات بهم عمل می‌کنند و مثل تار و پود باعث شکل‌گیری اسکلت قرص می‌شود (تیل و سخن‌سنج، ۱۹۹۶).

رفتار تراکمی مواد ذره‌ای

در فشرده‌سازی مواد، با افزایش نیرو در واحد سطح (فشار) حجم مواد کاهش یافته و در نتیجه جرم حجمی افزایش می‌یابد. در این تحقیق برای بررسی رابطه جرم حجمی و فشار، یا حجم و فشار هفت مدل بررسی شد که در زیر معرفی می‌شوند:

الف) مدل جونز: این مدل برای توصیف رفتار تراکمی ذرات فلزی معرفی شده است و ارتباط چگالی و فشار را بیان می‌کند (جونز، ۱۹۶۰):

$$\ln \rho = m \ln P + b \quad (1)$$

که در آن P فشار، ρ چگالی مواد فشرده شده، m قابلیت تراکم‌پذیری و b ثابت معادله است.

ب) مدل باتلر-مک‌کولی: این مدل برای توصیف رفتار تراکمی یونجه با رطوبت ۱۲٪ معرفی شده است و ارتباط فشار و چگالی را بیان می‌کند (باتلر و مک‌کولی، ۱۹۶۲).

$$P = Ae^{n\gamma} \quad (2)$$

در رابطه بالا γ چگالی در فشار P و A و n ثابت‌های معادله هستند.

پ) مدل پریژاگین: این مدل برای توصیف رفتار تراکمی علوفه غلات معرفی شده است و ارتباط چگالی و فشار را بیان می‌کند (پریژاگین، ۱۹۶۳):

$$\gamma = (\gamma_0 + AP^n) \times [1 + 0.03(w - 12)] \quad (3)$$

که در آن، P فشار، γ چگالی در فشار P، γ_0 چگالی اولیه ماده، w رطوبت نسبی ماده (وزن تر)، A و n ثابت‌های معادله می‌باشند.

ج) مدل گاریاچکین: این مدل رابطه بین فشار و جابه‌جایی پیستون را به شکل زیر بیان می‌کند (گاریاچکین، ۱۹۶۵):

$$P = aP_{\max} \left(1 - \frac{S^2}{L^2}\right) + b \quad (4)$$

در رابطه فوق، P فشار، S جابه‌جایی پیستون، L طول محفظه فشار، P_{\max} فشار نهایی و a و b ثابت‌های معادله می‌باشند.

چ) مدل کوکیتا: این مدل برای توصیف رفتار تراکمی مواد پودری بسیار نرم و پرز مانند معرفی شده است و بیان‌کننده رابطه فشار و حجم است (کوکیتا، ۱۹۷۱):

$$\frac{P}{C} = \frac{1}{ab} + \frac{p}{a} \quad (5)$$

در رابطه فوق، P فشار، C درجه کاهش حجم (کرنش مهندسی) و a و b ثابت‌های معادله هستند. مقادیر ثابت‌های a و b به نوع ماده بستگی دارند. برای محاسبه میزان کرنش مهندسی (C) از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$C = \frac{V_0 - V}{V_0} \quad (6)$$

که در آن پارامتر V_0 حجم اولیه و V حجم در فشار p می‌باشد. مقدار ثابت a با مقدار C وقتی به سمت C_∞ می‌رود برابر است و از رابطه زیر قابل محاسبه است که در آن V_∞ حجم خالص پودر (Net Volume) است.

$$a = C_\infty = \frac{V_0 - V_\infty}{V_0} \quad (7)$$

ح) مدل میوس: این مدل برای توصیف رفتار تراکمی مواد علوفه‌ای و کاه معرفی شده است و ارتباط فشار و چگالی را بیان می‌کند (اسبوف، ۱۹۷۴):

$$P = A(\gamma^n - \gamma_0^n) \quad (8)$$

در رابطه بالا، γ چگالی در فشار P، γ_0 چگالی اولیه ماده و n ثابت معادله است.

خ) مدل پانلی-فلهو: این مدل رابطه بین فشار و چگالی را به شکل زیر بیان می‌کند (پانلی-فلهو، ۲۰۰۱):

$$\ln\left(\frac{1}{1 - \rho_r}\right) = A\sqrt{P} + B \quad (9)$$

که در آن P فشار، ρ_r چگالی نسبی ماده فشرده شده و A و B ثابت‌های معادله هستند.

هدف از این تحقیق عبارت است از بررسی رفتار تراکمی یونجه در سطوح مختلف رطوبت و ریزی و سپس بررسی و انتخاب بهترین مدل برای پیش‌بینی روابط بین فشار، حجم و چگالی.

مواد و روش‌ها

نمونه یونجه از منطقه کرکوند در استان اصفهان تهیه و جهت انجام آزمایشات به دانشگاه صنعتی اصفهان منتقل گردید. نمونه از چین پنجم رقم هراتی در زمانی که ۱۰٪ مزرعه به گل نشسته بود تهیه شد. برای بررسی رفتار تراکمی یونجه در فرآیند قرص‌سازی، باید مراحل خرد شدن، خشک شدن، کاندیشنر و در نهایت فشرده‌سازی انجام پذیرد.

برای خرد کردن یونجه از آسیاب چکشی (مدل CH) با توان ۱/۵ کیلووات و سرعت دورانی ۳۴۵۰ دور بر دقیقه استفاده شد. علوفه برداشت شده از مزرعه ابتدا به رطوبت ۳۰٪ (وزن تر) رسید و سپس آسیاب شد، زیرا رطوبت بالای علوفه (رطوبت اولیه بعد از برداشت) باعث پیچیدن ساقه‌ها به دور محور دوار آسیاب می‌شد.

سپس یونجه خرد شده به طور طبیعی در آفتاب خشک شد. به علت متفاوت بودن سرعت خشک شدن برگ و ساقه، هر کدام به صورت جداگانه خشک و سپس با همان نسبت طبیعی مخلوط شدند. خشک کردن نمونه‌ها بدون جداسازی ساقه و برگ منجر به بیش خشکی برگ و کم خشکی ساقه می‌شود. برای اندازه‌گیری محتوای رطوبت یونجه، سه نمونه ۱۰ گرمی طبق استاندارد ASAE S358.2 در داخل آون (مدل Qallenkamp ساخت انگلستان) با دمای 103 ± 3 درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد تا رطوبت اولیه آن به دست آید. میزان رطوبت بر اساس وزن تر مطابق رابطه زیر به دست آمد.

$$U = \frac{G_w}{G_w + G_{dm}} \quad (10)$$

در رابطه فوق G_w وزن آب موجود در محصول و G_{dm} وزن خشک مواد می‌باشد. برای دستیابی به بهترین کیفیت قرص (کمترین میزان مصرف انرژی و بالاترین استحکام) آزمایشات در سه سطح رطوبتی ۱۰، ۱۵ و ۲۰٪ صورت گرفت. میزان آب مورد نیاز برای افزایش رطوبت یونجه خشک شده به سه سطح مطلوب از فرمول زیر محاسبه شد.

$$m_w = \frac{m_i (M_{wf} - M_{wi})}{1 - M_{wf}} \quad (11)$$

که در آن M_{wi} رطوبت اولیه علوفه بر مبنای تر، M_{wf} رطوبت نهایی بر مبنای تر، m_i وزن اولیه علوفه بر مبنای تر و m_w وزن آب اضافه شده می‌باشد.

در اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها از ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم و حداکثر ظرفیت ۶۰۰ گرم استفاده شد. پس از اضافه نمودن آب مقطر، نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۴ درجه سلسیوس در کیسه‌های پلاستیکی در بسته درون یخچال نگهداری شدند تا رطوبت افزوده شده به نمونه‌ها به طور یکنواخت توزیع گردد. برای تعیین مقدار واقعی رطوبت نمونه‌ها، سه نمونه ۱۰ گرمی از هر سطح رطوبتی در آون قرار داده شد.

پس از رطوبت‌دهی مواد، برای شبیه‌سازی کاندیشنر، نمونه‌ها به مدت ۱۵ ثانیه درون تونل بخاری با دمای حدود ۹۵ درجه سانتیگراد قرار داده شدند. بخار آب تزریق شده روی مواد باعث نرم شدن خوراک، بهبود خاصیت تراکم‌پذیری، افزایش خاصیت چسبندگی ذرات می‌شود. مقادیر مناسب افزایش دما و رطوبت در کاندیشنر به ترتیب ۳-۲٪ و ۸۰-۷۰ درجه سانتیگراد می‌باشد (تیل، ۱۹۹۶)، بنابراین زمان لازم برای دستیابی به این مقادیر در تونل بخار با روش سعی و خطا تعیین شد.

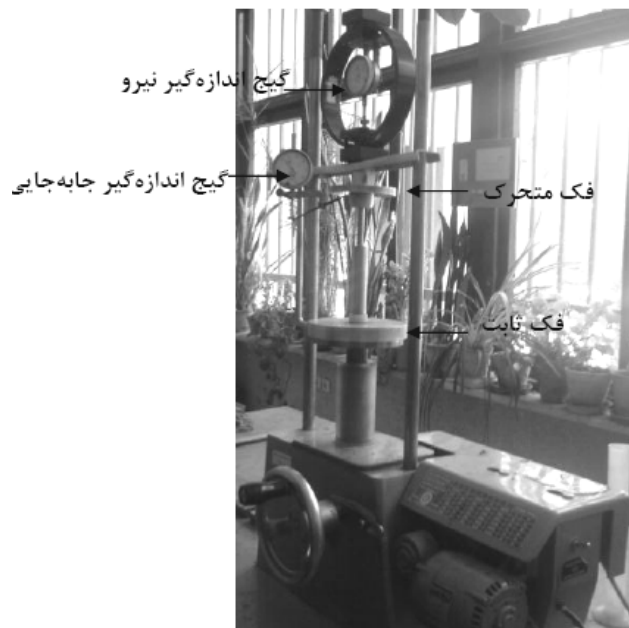
به منظور شبیه‌سازی منافذ دای، سیلندر و پیستونی با قطر داخلی ۹ و طول ۱۲۵ میلی‌متر از جنس فولاد Ck 45 با شماره استاندارد ۱/۱۱۹۱ تهیه شد. به منظور بررسی رفتار یونجه در فرآیند فشرده‌سازی، یونجه خرد شده درون سیلندر ریخته شده و با حرکت پیستون به طرف پایین، مواد فشرده شده تا به چگالی نهایی برسد.

برای تامین نیروی لازم برای فشرده‌سازی مواد درون سیلندر از دستگاه فشار تک محوره (CBR) مدل Instron 1140 ساخت انگلستان استفاده شد. این دستگاه شامل دو فک ثابت و متحرک است که سیلندر و پیستون بین آنها قرار گرفت و سرعت حرکت فک متحرک ۲/۵ میلی‌متر بر ثانیه (سرعت مناسب برای فشرده‌سازی) تنظیم شد (۱۵). در حین فرآیند تراکم‌سازی مواد، مقدار نیرو بر حسب میزان جابه‌جایی توسط دو گیج اندازه‌گیری شد (شکل شماره ۱).

سپس به منظور بررسی رفتار تراکمی ذرات یونجه، هفت مدل تراکمی جونز، کوکیتا، گاریاچکین، میوس، باتلر-مک‌کولی، پریژاگین و پانلی-فلهو با استفاده از نرم‌افزارهای EXCEL و Sigmaplot بر داده‌های حاصل از آزمایشات برازش شدند و بهترین مدل با توجه به مقایسه مقادیر ضریب تبیین R^2 و خطای استاندارد رگرسیون RSE انتخاب شد.

شکل ۱-دستگاه CBR در حال متراکم‌سازی یونجه درون واحد فشرده‌ساز

نتایج و بحث



جداول شماره ۱ و ۲ به ترتیب تغییرات چگالی در مراحل مختلف متراکم‌سازی ذرات یونجه در دو سایز ۳/۲۶ و ۴/۷۵ میلی‌متر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر دو سایز ذرات، در یک رنج نیرویی ثابت، ذرات با رطوبت بالاتر، چگالی کمتری دارند. بنابراین نمونه‌ها با رطوبت بالاتر، نیروی فشرده‌سازی بیشتری برای رسیدن به چگالی مشخص احتیاج دارند. همچنین با مقایسه جدول ۷ و ۸ مشاهده می‌شود که در یک رنج نیرویی ثابت توده ذرات با سایز کوچک‌تر (اندازه ذرات ۳/۲۶ میلی‌متر) چگالی بیشتری نسبت به سایز بزرگ‌تر (اندازه ذرات ۴/۷۵ میلی‌متر) دارند. بنابراین بیشترین چگالی در رطوبت ۱۰٪ و اندازه ذرات ۳/۲۶ میلی‌متر حاصل شده است.

جدول ۱- تغییرات چگالی در فرآیند متراکم‌سازی ذرات یونجه با سایز ۳/۲۶ میلی‌متر در سطوح رطوبتی مختلف

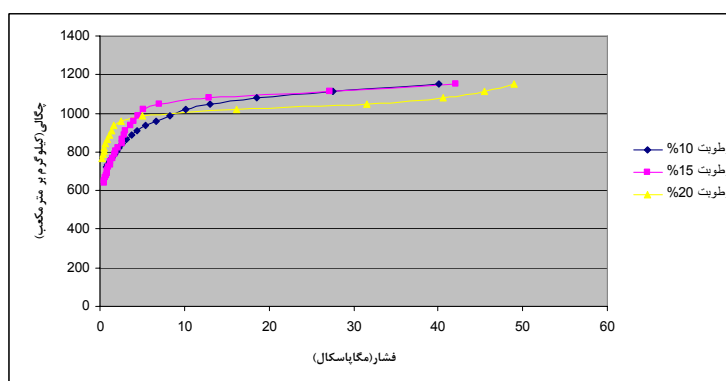
نیرو	فشار (مگاپاسکال)	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)		
		رطوبت ۱۰٪	رطوبت ۱۵٪	رطوبت ۲۰٪
۵۰۰	۷/۸۶	۱۳/۷±۱۰۰۰/۲۷	۳۰/۲±۹۷۴/۳۷	۶/۰۱±۹۷۰/۴۷
۱۰۰۰	۱۵/۷۲	۱/۹±۱۰۶۸/۱۵	۳۲/۸۴±۱۰۶۶	۱۲/۷۴±۱۰۳۱/۳۸
۱۵۰۰	۲۳/۵۸	۱۰/۲۲±۱۱۱۳/۷۴	۳۰/۶۸±۱۱۱۰/۱	۱/۷۸±۱۰۳۳/۳۳
۲۰۰۰	۳۱/۴۴	۱۲/۷۶±۱۱۳۱/۶۷	۲۱/۵±۱۱۳۰/۳۴	۸/۵۲±۱۰۵۷/۶
۲۵۰۰	۳۹/۳۰	۸/۷۶±۱۱۴۴/۶۲	۰±۱۱۴۲/۷۳	۱۸/۴۱±۱۱۰۱/۵۴

جدول ۲- تغییرات چگالی در فرآیند متراکم‌سازی ذرات یونجه با سایز ۴/۷۵ میلی‌متر در سطوح رطوبتی مختلف

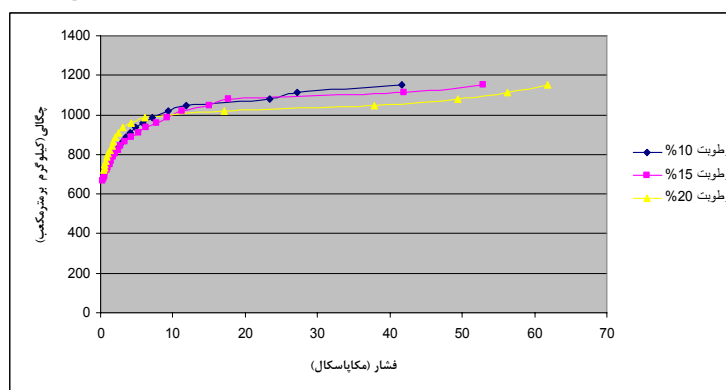
نیرو	فشار (مگاپاسکال)	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)		
		رطوبت ۱۰٪	رطوبت ۱۵٪	رطوبت ۲۰٪

۵۰۰	۷/۸۶	۸/۲۷±۹۷۵/۶	۰±۹۶۰/۶۱	۶/۵۹±۹۵۱/۸۶
۱۰۰۰	۱۵/۷۲	۵/۶۲±۱۰۶۰/۸۲	۱۸/۹±۱۰۵۸/۸۵	۳/۴۳±۱۰۱۵/۱۳
۱۵۰۰	۲۳/۵۸	۲۶/۲۷±۱۰۸۶/۷۶	۹/۰۷±۱۰۷۰/۹۶	۱/۷۷±۱۰۳۱/۲۷
۲۰۰۰	۳۱/۴۴	۲۵/۴±۱۱۰۸/۷۹	۱۰/۲۲±۱۱۰۳/۷۴	۳/۶۴±۱۰۴۵/۸۳
۲۵۰۰	۳۹/۳۰	۰±۱۱۳۲/۷۳	۲۱/۴۷±۱۱۲۷/۹۴	۸/۱۲±۱۰۵۵/۴۴

شکل های ۲ و ۳ به ترتیب نمودار فشار-چگالی ذرات یونجه را در دو سایز ۳/۲۶ و ۴/۷۵ میلی متر نشان می دهد. همان طور که در نمودارها مشاهده می شود در فشارهای پایین، چگالی با سرعت زیادی (نسبت به فشار) افزایش می یابد در حالیکه در فشارهای بالا این سرعت کاهش می یابد. علت این موضوع به نحوه کاهش حجم ماده در مراحل مختلف فشرده سازی مربوط است. در فشارهای پایین متراکم سازی ذرات از طریق تغییر چیدمان آنها است و با افزایش ناچیز فشار، کاهش حجم بزرگی رخ می دهد. ولی در فشارهای بالاتر متراکم سازی از طریق تغییر شکل (الاستیک-پلاستیک) ذرات صورت می گیرد که انرژی و نیروی بیشتری نسبت به مرحله قبل نیاز دارد و نرخ تغییر چگالی در برابر فشار کاهش می یابد.



شکل ۲- نمودار فشار-چگالی ذرات یونجه با سایز ۳/۲۶ میلی متر در سه سطح رطوبتی



شکل ۳- نمودار فشار-چگالی ذرات یونجه با سایز ۴/۷۵ میلی متر در سه سطح رطوبتی

به منظور بررسی رفتار تراکمی ذرات یونجه، هفت مدل تراکمی جونز، کوکیتا، گاریاچکین، میوس، باتلر-مک کولی، پریزاگین و پانلی-فلهو بر داده های حاصل از آزمایشات برازش شدند. مقادیر ضریب تبیین، خطای استاندارد و ضرایب هفت مدل تراکمی تعیین شدند که نتایج آن در جدول شماره ۳ ارائه شده است. متغیرهای مورد

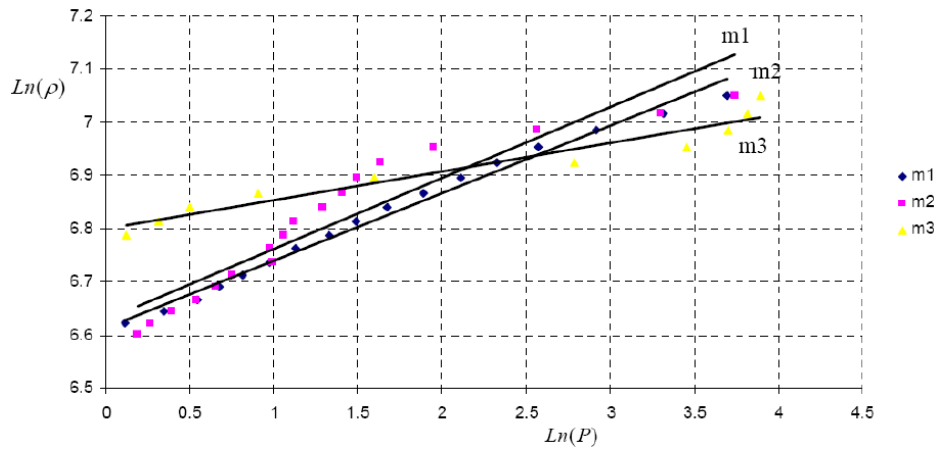
بررسی در رفتار تراکمی ذرات شامل سه حد رطوبتی ۱۰، ۱۵ و ۲۰٪ و دو سطح اندازه ذرات ۳/۲۶ و ۴/۷۵ میلی‌متر می‌باشند که در جدول زیر سایز ذرات به ترتیب با پارامتر a و b بیان شده است.

جدول ۳- نتایج حاصل از برازش مدل‌های تراکمی بر داده‌های حاصل از آزمایش

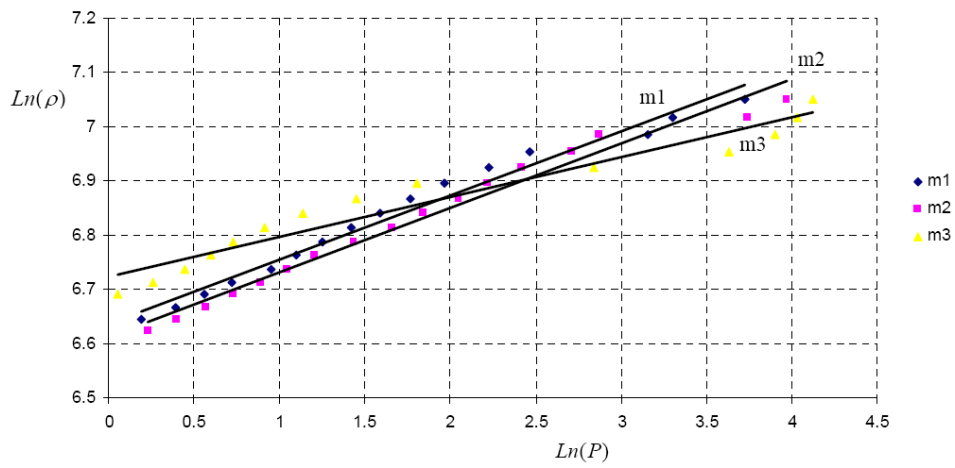
$Ln\rho = mLnP + b$					
مدل جونز					
ضرایب مدل	خطای استاندارد	مقدار R^2	سایز (میلی‌متر)	رطوبت (وزن‌تر)	
$m=0/127$ $b=6/61$	0/01	0/99	a	10	
$m=0/116$ $b=6/64$	0/02	0/98	b		
$m=0/15$ $b=6/6$	0/05	0/94	a	15	
$m=0/118$ $b=6/61$	0/02	0/99	b		
$m=0/067$ $b=6/67$	0/03	0/95	a	20	
$m=0/084$ $b=6/63$	0/03	0/95	b		
$\frac{P}{C} = \frac{1}{ab} + \frac{p}{a}$					
مدل کوکیتا					
$a=0/45$ $b=0/57$	2/21	0/99	a	10	
$a=0/45$ $b=0/62$	1/87	0/99	b		
$a=0/53$ $b=1/76$	4/93	0/94	a	15	
$a=0/46$ $b=0/38$	1/43	0/99	b		
$a=0/42$ $b=1/27$	2/65	0/99	a	20	
$a=0/43$ $b=1$	2/7	0/99	b		
$P = aP_{max} (1 - \frac{S^2}{L^2}) + b$					
مدل گاریاچکین					
$a=-0/63$ $b=23/32$	4/9	0/86	a	10	
$a=-0/74$ $b=25/21$	5/77	0/73	b		
$a=-0/53$ $b=19/9$	6/3	0/56	a	15	
$a=-0/8$ $b=29/5$	7/54	0/68	b		
$a=-1/43$ $b=40/96$	8/6	0/79	a	20	
$a=-1/47$ $b=46/7$	11/03	0/74	b		
$P = Ae^{ny}$					
مدل باتلر-مک‌کولی					
$A=0/002$ $n=0/009$	0/08	0/99	a	10	
$A=0/001$ $n=0/009$	0/17	0/98	b		
$A=0/005$ $n=0/007$	0/26	0/95	a	15	
$A=0/001$ $n=0/01$	0/17	0/99	b		
$A=1/87E-006$ $n=0/01$	0/38	0/96	a	20	
$A=4/48E-005$ $n=0/01$	0/32	0/97	b		
$\gamma = (\gamma_0 + AP^n) \times [1 + 0.03(w - 12)]$					
مدل پریزاگین					
$A=163/1$ $n=0/04$	0/097	0/96	a	10	
$A=172/5$ $n=0/38$	0/098	0/96	b		

$A=123/2$	$n=0/6$	0/3	0/84	a	15
$A=142/2$	$n=0/44$	0/143	0/95	b	
$A=272/6$	$n=0/19$	0/11	0/92	a	20
$A=211$	$n=0/26$	0/16	0/89	b	
$Ln\left(\frac{1}{1-\rho_r}\right) = A\sqrt{P} + B$ مدل پانلی-فلهو					
$A=0/42$	$B=0/54$	0/02	0/99	a	10
$A=0/39$	$B=0/61$	0/07	0/99	b	
$A=0/44$	$B=0/55$	0/15	0/95	a	15
$A=0/35$	$B=0/62$	0/08	0/99	b	
$A=0/24$	$B=1/03$	0/21	0/92	a	20
$A=0/24$	$B=0/91$	0/19	0/96	b	
$P = A(\gamma^n - \gamma_0^n)$ مدل میوس					
$A=6/98E-27$	$n=9/05$	1/25	0/99	a	10
$A=5/57E-30$	$n=10/08$	1/39	0/98	b	
$A=6/12E-30$	$n=10/04$	2/7	0/92	a	15
$A=1/84E-28$	$n=9/61$	2/8	0/97	b	
$A=2/42E-24$	$n=8/29$	7/48	0/9	a	20
$A=1/37E-27$	$n=9/37$	5/87	0/93	b	

با توجه به ضریب تبیین و خطای استاندارد رگرسیون مدل‌های بالا، بهترین مدل‌ها در هر سطح رطوبتی و سایز ذرات انتخاب شد. بنابراین بهترین مدل‌ها در رطوبت‌های 10 و 15٪ و اندازه ذرات 3/26 و 4/75 میلی‌متر جونز و پانلی‌فلهو، در رطوبت 20٪ و اندازه ذرات 3/26 جونز و باتلر-مک‌کولی و در همین حد رطوبتی و سایز ذرات 4/75 میلی‌متر جونز و پانلی می‌باشد. با در نظر گرفتن تمام سطوح رطوبتی و اندازه ذرات می‌توان نتیجه گرفت که مدل جونز بیشترین همخوانی را با داده‌های آزمایشی داشت. برازش مدل جونز بر داده‌های آزمایشی در دو سطح ریزی 3/26 و 4/75 میلی‌متر به ترتیب در شکل‌های 4 و 5 مشاهده می‌شود و در نمودارها سه سطح رطوبتی 10، 15 و 20٪ به ترتیب با m_1 ، m_2 و m_3 نشان داده شده‌اند.



شکل ۴- برازش مدل جونز با داده‌های حاصل از آزمایش با اندازه ذرات ۳/۲۶ میلی‌متر و سطوح رطوبتی مختلف



شکل ۵- برازش مدل جونز با داده‌های حاصل از آزمایش با اندازه ذرات ۴/۷۵ میلی‌متر و سطوح رطوبتی مختلف

۱. توکلی هاشجین، ت. ۱۳۸۲. مکانیک محصولات کشاورزی. انتشارات سالکان، تبریز، صص ۱-۵۲۰.
۲. منصورى راد، د. ۱۳۸۲. تراکتورها و ماشین های کشاورزی. جلد دوم، انتشارات دانشگاه بو علی سینا.
۳. هاشمی، م. ۱۳۷۵. خوراکیها و خوراک دادن و جیره نویسی، جلد اول، انتشارات فرهنگ جامع.
4. Adapa, P.K, Tabil, L.G, Schoenau, G.J, Crerar, B and Sokhansanj, S. 2002. Compression Characteristics of Fractionated Alfalfa Grinds. *Powder Handling and Processing*, 14(4), 25-52.
5. Adapa, P.K, Schoenau, G.J, Tabil, L.G, Arinze, E.A, Singh, A and Dalai, A.K. 2007. Customized and Value-added High Quality Alfalfa Products - A New Concept. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript FP 07 003. Vol. IX, 1-28
6. Adapa, P, Tabil, L, Schoenau G. 2009. Compression Characteristics of Selected Ground Agricultural Biomass. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript 1347. Vol. XI.
7. ASABE. 2006. ASAE S358.2 – Moisture measurement – forages. In ASABE Standards, 608. St. Joseph, MI.: American Society of Agricultural and Biological Engineers.
8. Asoboff, V.I, Vasilief, G.K and Galianovski, A.V. 1974. Mashines troienie. Moscow. (In Russian)
9. Briggs, J.L, Maier, D.E, Watkins, B.A and Behnke, K.C. 1999. Effects of Ingredients and Processing Parameters on Pellet Quality. *Poultry Science*. 78, 1464-1471
10. Butler, I.L and Mc Colly, H.F. 1962. Factors affecting the pelleting of hay. *Agricultural Engineering*. 40,442-446.
11. Gariachkin, V.P. 1965. Sobranie Sochinenie. TOM3 Kolos. (In Russian)
12. Jones, W.D. 1960. Fundamental Principles of Powder Metallurgy. Edward Arnold Publishers Ltd. London. 242-370.
13. Kawakita, K and Ludde, K.H. 1971. Some Considerations on Powder Compression Equations. *Powder Technology*. 4, 61-68.
14. Mani, S, Tabil, L.G and Sokhansanj, S. 2004. Evaluation of Compaction Equations Applied to Four Biomass Species. *Canadian Biosystems Engineering*. 46, 355-361
15. Manufacturing of Compound Feed. 2001. Kahl Pelleting Presses.
16. Panelli, R and Filho, F.A. 2001. A Study of a New Phenomenological Compacting Equation, *Powder Technology*. 114, 255-261.
17. Perezhagin, M.A and Sergeief, M.P. 1963. Davlenie V Kamere Pressa I energoiekoomb briketorivania groubikh karmof. *Masgiz*. 157-162. (In Russian)
18. Tabil, L.G. 1996. Binding and Pelleting Characteristics of Alfalfa. Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy. Department of Agricultural and Bioresource Engineering University of Saskatchewan.
19. Tabil, L.G and Sokhansanj, S. 1996. Compression and Compaction Behavior of Alfalfa Grinds Part 1 – Compression Behaviour. *Journal of Powder Handling and Processing*. 8(1), 17-23.
20. Thomas, M, van Vliet, T and van der Poel, A.F.B. 1998. Physical Quality of Pelleted Animal Feed: Contribution of Feedstuff Components. *Animal Feed Science Technology*. 76, 59-78
21. van Dam, J.E.G, van den Oever, M.J.A, Teunissen, W, Keijsers, E.R.P and Peralta, A.G. 2004. Process for Production of High Density/High Performance Binderless Boards from Whole Coconut Husk Part 1: Lignin as Intrinsic Thermosetting Binder Resin. *Industrial Crops and Products*. 19, 207-16.
22. Winiowiski, T.S. 1988. Wheat and Pellet Quality. *Feed Management*. 39(9), 58-64.

Compaction Behavior of alfalfa Grinds

Densification of biomass is one of the important processes for effective handling and storage of bulky hay materials. It is important to understand the fundamental mechanism of the hay compression process, which is required in the design of pellet mill. For choosing the best compression models to foresee alfalfa compaction behavior, experiments were done on alfalfa grinds at 10, 15 and 20 % moisture content (w.b.) and 3.26 and 4.75 mm grind size. To simulate the pelleting process, alfalfa grind compressed in a plunger and die assembly and the change in compact density and volume under different pressures were measured. Seven compression models were fitted to the test results to analyze the compaction behavior of alfalfa grinds, namely: Jones (1960), Butler-Mc Colly (1962), Perezhagin (1963), Gariachkin (1965), Kawakita (1971), Mewes (1974) and Panelli-Filho (2001) models. The experiment results showed that, at any particular pressure, the density of pellets was highest for 10% moisture content and 3.26 mm grind size. The results of experiment showed that compressibility of alfalfa grind changes during compaction test. There was a rapid increase in density of pellets at lower compression pressures, but at higher compaction pressures density values continued to increase at a lower rate. Among the seven studied models, Jones's model had higher coefficient of determination (R^2) and lower standard error of regression (RSE) provided an excellent fit to pressure-density data.

Keywords: Alfalfa Pellet, compaction, compaction behavior of grind, compression models, Pelleting.