تحقیقات سامانه‌ها و مکانیزاسیون کشاورزی/جلد ۲۵/ شماره ۹۱/پاییز ۱۴۰۳/ص ۵۲-۳۷
سایت مجله: https://www.amsr.areeo.ac.ir

مقاله پژوهشی

ارزیابی عوامل مؤثر بر یکنواختی جیره‌های کاملا مخلوط در ماشین خوراک‌ساز دام

محمدعلی به‌آئین

استادیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۹/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۲

چکیده

افزایش و بهبود ضریب تبدیل در صنعت دام با استفاده از جیره‌های غذایی مخلوط به دست می‌آید. تأمین مواد مغذی کافی و متعادل در جیرهٔ غذایی، برای افزایش تولید، با مخلوط کردن مواد تشکیل‌دهندهٔ خوراک به دست می‌آید. نکتهٔ مهم در تهیهٔ این نوع خوراک دام، یکنواختی مخلوط شدن مواد و توزیع یکسان برای دام‌هاست. ماشین‌های خوراک‌ساز دام از ادوات مناسب برای تهیهٔ جیرهٔ کاملا مخلوط در دامپروری هستند. به منظور بررسی یکنواختی جیرهٔ غذایی مخلوط در ماشین خوراک‌ساز دام، اثر سه سرعت مارپیچ ۵۰ (R_{50})، ۶۰ (R_{60}) و ۷۰ (R_{70}) دور بر دقیقه و زمان مخلوط شدن در سه سطح ۱۵ (T_{15})، ۱۸ (T_{18}) و ۲۱ (T_{21}) دقیقه در یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی با سه تکرار با هم مقایسه شد. از ترکیب کاه، یونجه، سیلوی ذرت، تفالهٔ چغندرقند، کنسانترهٔ دامی و آب برای تهیهٔ جیرهٔ غذایی در ماشین خوراک‌ساز دام استفاده شد. پارامترهای مورد بررسی شامل اندازه‌گیری خردشدن مواد مخلوط، اندازه‌گیری و محاسبهٔ یکنواختی مواد مخلوط-شده و بررسی جریان‌پذیری مواد مخلوط (عدد فرود) است. داده‌های به دست آمده با نرم‌افزار SAS تجزیه و میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن مقایسه گردید. نتایج بررسی‌ها نشان داد که بیشترین مقدار خردشدن مواد (کمترین مقدار در میانگین هندسی قطعات) در سرعت مارپیچ ۷۰ دور بر دقیقه و زمان ۲۱ دقیقه (تیمار $R_{70}T_{21}$) و کمترین مقدار خردشدن مواد علوفه‌ای در سرعت مارپیچ ۵۰ دور بر دقیقه و زمان ۱۵ دقیقه (تیمار $R_{50}T_{15}$) و اختلاف معنی‌دار ($P<0.05$) با یکدیگر به دست آمد. بیشترین یکنواختی نیز در تیمار $R_{70}T_{21}$ حاصل شد. با توجه به کاربرد زیاد ماشین خوراک‌ساز دام در گاوداری‌ها و صرفه‌جویی در زمان تهیهٔ جیره کاملا مخلوط، باید تیماری ارائه شود که سرعت محور مارپیچ آن کم و زمان کاربرد ماشین در تهیهٔ جیره در حد مناسب باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد، تیمار $R_{50}T_{18}$ با انحراف معیار ۱/۳۹ سانتی‌متر طول قطعات (S_{gm}) و یکنواختی مواد مخلوط با ۱/۶۳ گرم (S_d) قابل توصیه است.

واژه‌های کلیدی

الک پنسیلوانیا، جریان‌پذیری، جرم مخصوص ظاهری، خردشدن، عدد فرود

مقدمه

با افزایش تقاضا برای افزودن ریزمغذی‌ها مانند اسیدهای آمینه، ویتأمین‌ها، مواد معدنی و دیگر مکمل‌های خوراک دام، اختلاط مؤثر بسیار ضروری است. مخلوط کردن یکی از مهم‌ترین فرآیندها در تولید خوراک دام است. هدف اصلی در مخلوط کردن خوراک، تولید جیره‌هایی است که در آن مواد مغذی به طور یکنواخت توزیع شده باشد. هزینه‌های

* نویسنده مسئول: Email: ali_behaeen@yahoo.com
http://doi: 10.22092/amsr.2026.371789.1531

خوراک دام ۶۵ تا ۷۵ درصد از هزینه‌های تولید را شامل می‌شود که در صورت توزیع نامناسب مواد موجود در جیرهٔ غذایی، انتخاب بعضی از مکمل‌ها در قسمتی از خوراک برای دام، سمیت غذایی را به دنبال دارد (Marczuk *et al.*, 2017). تغذیه و خوراک‌دهی مناسب به دام باعث افزایش تولید، به خصوص در دام‌های بزرگ مانند گاو شیری، می‌شود. از آنجا که افزایش تولید نیاز به مخلوط کردن چند نوع علوفه و مکمل‌های گوناگون دارد، بنابراین ضروری است که مواد مورد نیاز در تهیهٔ مخلوط جیرهٔ غذایی به طور یکنواخت در بین دام‌ها توزیع شود. مخلوط‌نشدن مواد در جیرهٔ کاملا مخلوط[1] کاهش تولید را در دام به دنبال دارد (Dimaiwat *et al.*, 2018). به منظور مخلوط کردن این مواد و تهیهٔ جیره‌ای کاملا مخلوط، از ماشین خوراک‌ساز دام استفاده می‌شود (Adusei-Bonsu *et al.*, 2021). ماشین‌های خوراک‌ساز دام به دو نوع عمودی و افقی تقسیم می‌شوند (شکل ۱). مشخصات ماشین خوراک‌ساز عمودی این است: مارپیچ عمودی، دارای جعبه‌دنده، دارای سامانهٔ توزین مواد جیره، دارای بارکن هیدرولیکی، استهلاک پایین، له نشدن علوفه با توجه عمودی‌بودن مارپیچ، خروجی بهتر علوفه، ظرفیت معمول مخزن ۱/۵ تا ۲۴ مترمکعب، توان مورد نیاز ۱۰ تا ۱۲۰ کیلووات. مشخصات خوراک‌ساز افقی این است: مارپیچ افقی، دارای جعبه‌دنده، دارای سامانهٔ توزیع، دارای بارکن هیدرولیکی، استهلاک بیشتر نسبت به نوع عمودی، باقی‌گذاشتن مقداری پسماند جیره مخلوط در پایان تخلیه در مخزن، ظرفیت معمول مخزن ۶ تا ۲۰ مترمکعب، توان مورد نیاز ۵۵ تا ۷۰ کیلووات. در ماشین‌های خوراک‌ساز عمودی، مدت زمان برای مخلوط کردن مواد در جیره، حداقل ۱۰ تا ۱۵ دقیقه و برای ماشین خوراک‌ساز افقی، ۵ تا ۱۰ دقیقه در نظر گرفته می‌شود.

شکل ۱- ماشین خوراک‌ساز دام با مارپیچ عمودی (سمت راست) و مارپیچ افقی (سمت چپ)

Fig. 1- Feeder mixer machine with vertical auger (right) and horizontal auger (left)

برای تعیین توزیع یکنواختی مواد در جیرهٔ کاملا مخلوط، شاخص ضریب تبدیل کاربرد دارد (Vakili, 2024). عملیاتی که در ماشین‌های مخلوط‌کننده و از جمله ماشین خوراک‌ساز دام روی علوفه و دیگر مواد غذایی مورد نیاز دام اجرا می‌شود تغییر اندازه، شکل و جرم مخصوص ظاهری مواد است. ماشین خوراک‌ساز دام آن‌ها را تغییر می‌دهد و در هنگام عبور از روزنهٔ خروجی ماشین، باعث کاهش

1- Total mixed ration (TMR)

جریان‌پذیری مخلوط یکنواخت مواد غذایی می‌شود (Patricia *et al.*, 2009). مخلوط شدن یکنواخت و جریان‌پذیری مواد غذایی باید در تناسب قابل قبول قرار داشته باشد و تغییر در یکی باعث تغییرات زیاد در دیگری نشود. بنابراین، نیاز است سرعت دورانی محور ماشین و زمان‌های مخلوط شدن آزمایش شود تا تیمار انتخابی هر دو هدف را تأمین می‌کند.

در یک پژوهش به منظور اختلاط ذرت دانه‌ای با رطوبت ۱۵/۳۵ درصد و کاغذهای رنگی به مساحت ۲۵ میلی‌متر مربع به عنوان ردیاب، آزمایشی به اجرا در آمد که در آن برای راه‌اندازی ماشین خوراک‌ساز دام با محور افقی، از یک موتور الکتریکی با سرعت ۱۴۴۰ دور بر دقیقه و توان ۵ اسب‌بخار استفاده گردید. زمان مخلوط شدن مواد نیز ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ دقیقه در نظر گرفته شد. نتایج تحقیق نشان داد که حداکثر اختلاط برای کاغذهای رنگی، ۶ دقیقه و برای ذرت دانه‌ای، ۸ دقیقه است. نتایج تحقیق همچنین نشان داد که هر چه ابعاد ردیاب بیشتر باشد، راندمان اختلاط کمتر است. فاصلهٔ گام مته از ۹۰ به ۸۵ میلی‌متر کاهش داده شد. با این تغییر، تعداد گام‌ها از ۱۰ به ۱۲ افزایش یافت. این تغییر در مته، ظرفیت خروجی ماشین خوراک‌ساز را از ۵۰ به ۷۰ کیلوگرم افزایش داد (Adedeji *et al.*, 2021).

نتایج حاصل از بررسی‌ها روی اندازه سه نوع ذره در خردشدن برگ‌های نیشکر نشان داد که با افزایش اندازهٔ ذرات، سرعت و زمان اختلاط نیز باید افزایش یابد به طوری‌که ذرات با طول ۳، ۴ و ۵ میلی‌متر، به ترتیب در سرعت‌های ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ دور بر دقیقه و زمان‌های ۴، ۶ و ۸ دقیقه، کاملا مخلوط شدند و بالاترین یکنواختی را داشتند (Ansuree *et al.*, 2021).

نتایج تحقیقی دیگر نشان داد که کار با ماشین خوراک‌ساز دام در زمان‌های ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ دقیقه، دو زمان ۶ و ۸ دقیقه، بالاترین مقدار یکنواختی را در جیرهٔ کاملا مخلوط به همراه دارد (Adedeji *et al.*, 2021). داده‌های به دست آمده از نتایج یک تحقیق در تهیهٔ جیرهٔ کاملا مخلوط گاو شیری نشان داد که زمان اختلاط مواد موجود در جیره و نوع ماشین خوراک‌ساز دام (افقی و عمودی)، از عواملی هستند که بر یکنواختی مخلوط شدن در جیره تأثیر دارند. در جیره‌های با وزن ۵۰۰ کیلوگرم که از یک ماشین خوراک‌ساز افقی تهیه شده بود، تعداد ۹۵۸ نمونه‌گیری به عمل آمد که فقط ۲۴ درصد نمونه‌ها، راندمان اختلاط مطلوب داشتند. همچنین در یک ماشین خوراک‌ساز عمودی، از ۸۵ نمونه فقط برای ۱۴ درصد از نمونه‌ها راندمان اختلاط مطلوب ثبت شد. در جیرهٔ غذایی ۵۰۰ کیلوگرمی، برای زمان مخلوط شدن ۴ و ۱۵ دقیقه به ترتیب شاخص یکنواختی ۳۰/۵۸ و ۲۶/۰۹ درصد به دست آمد (Marczuk *et al.*, 2017).

در آزمایشی نشان داده شد که در یک مخلوط‌کن حاوی گندم، ذرت، سورگوم و آفتابگردان، با افزایش زمان از ۲۰ به ۳۰ دقیقه، درجه مخلوط شدن گندم از ۹۰ به ۹۱/۵ درصد افزایش یافت. افزایش زمان به ۴۰ دقیقه، کاهش درجه مخلوط شدن به ۸۹ درصد را نشان داد (Krolczyk, 2016).

در آزمایش شبیه‌سازی، با مخلوط کردن ذرات کروی شکل آلومینیم و فولاد، به ترتیب با جرم مخصوص ظاهری ۳۶۰۰ و ۷۹۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب، نشان داده شد که با افزایش زمان تا هشت ثانیه درجهٔ مخلوط شدن افزایش و پس از آن درجه مخلوط شدن تا ثانیهٔ سیزدهم کاهش و از

ثانیهٔ سیزدهم به بعد دوباره افزایش می‌یابد (Yamamoto *et al*., 2016).

در پژوهشی، با اجرای آزمایش روی مواد جامد کروی گزارش شد که زمان مخلوط شدن مواد سرعت و زاویهٔ تیغه‌های مخلوط‌کننده روی پراکنندگی مواد در مخلوط اثر دارد به طوری‌که با افزایش زمان مخلوط شدن، ضریب تغییرات یکنواختی کاهش پیدا می‌کند. با افزایش سرعت تیغه‌ها، زاویهٔ تیغه ۹۰ درجه بیشترین ضریب پخش و یکنواختی مواد را ایجاد می‌کند (Schmelzle *et al*., 2015).

در تحقیقی برای دستیابی به مناسب‌ترین یکنواختی در مواد گرانولی، اثر عواملی مانند جرم مخصوص ظاهری، ضریب اصطکاک، کیفیت سطح و اندازهٔ ذرات روی یکنواخت مخلوط شدن این مواد بررسی و نشان داده شد که با افزایش زمان مخلوط شدن تا ۳۰۰ ثانیه، درجهٔ یکنواختی افزایش و پس از آن یکنواختی در حد ثابت باقی می‌ماند (Aissa *et al*., 2011). بررسی‌های محققان نشان می‌دهد سرعت گردش مارپیچ یا تیغهٔ مخلوط‌کننده، زاویهٔ مخلوط کردن و چسبندگی مواد می‌تواند روی یکنواختی مخلوط تأثیر داشته باشد (Patricia *et al*., 2009; Keller, 2012).

نتایج یک آزمایش در بررسی جریان‌پذیری[1] و ارتفاع مواد مخلوط شدنی در مخزن یک ماشین مخلوط‌کن آزمایشی نشان داد که با افزایش ارتفاع مواد در مخزن از ۵ به ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر، میزان جریان‌پذیری مواد به ترتیب از ۱۳۵/۱ به ۱۶۴/۶ و ۱۷۹/۵ سانتی‌متر مکعب در ثانیه افزایش می‌یابد (Seilamovicz *et al*., 2011).

به منظور جریان‌پذیری موادی که با هم مخلوط می‌شوند، عددی به نام عدد فرود[2] تعریف می‌شود. عدد فرود، کمیتی بدون بعد است و به عنوان شاخص نشان‌دهنده نوع جریان در هر ساختار هیدرولیکی است که تنها نیروی محرک آن یعنی نیروی جاذبه، در تعامل با نیروی مقاوم اینرسی یا سکون است. این عدد در رژیم‌های مختلف جریان در بسترهای دایره-ای بر اساس نوع موادی که با هم مخلوط می‌شوند متفاوت است (Mellmann, 2001).

با توجه به اینکه موادی که در تهیه غذای دام استفاده می‌شوند از نظر خواص فیزیکی با یکدیگر تفاوت دارند، لازم است که پارامترهای عملکردی ماشین خوراک‌ساز دام برای تهیهٔ جیره‌ای مناسب و یکنواخت بررسی شود. هدف از اجرای این پروژه دستیابی به یک مخلوط جیره غذایی یکنواخت در گاو شیری با تغییر سرعت مارپیچ و زمان تهیهٔ مخلوط در ماشین خوراک‌ساز عمودی است.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق به منظور بررسی متغیرهای تأثیرگذار روی یکنواختی مخلوط جیرهٔ غذایی، از یک ماشین خوراک‌ساز عمودی مدل DM5 ساخت شرکت دام ماشین کاوه (شیراز، ایران) با ظرفیت مخزن ۴ مترمکعب استفاده شد. مشخصات ماشین خوراک‌ساز عمودی در جدول ۱ نشان داده شده است.

1- Flowability
2- Froude number

جدول ۱- مشخصات فنی ماشین خوراک‌ساز عمودی

Table 1- Technical specifications of the feeder mixer machine with vertical auger

مدل (Model)	حجم مخزن (مترمکعب) Hopper volume (m^3)	گنجایش وزنی (کیلوگرم) Weight capacity (kg)	وزن ماشین (کیلوگرم) Machine weight (kg)	تعداد لودسل‌ها Number of load cells	حداقل توان لازم (اسب بخار) Minimum power required (hp)	نوع مارپیچ (Spiral type)
DM5	4	1900	1600	4	40	عمودی (Vertical)

ترکیب جیره کاملا مخلوط

به منظور اجرای آزمایش‌های ماشین خوراک‌ساز دام، ترکیبی از مواد که جیرهٔ کاملا مخلوط تشکیل می‌دهند به ترتیب جدول ۲ (کاه، یونجه، ذرت سیلویی، تفاله چغندرقند، کنسانتره دامی، آب)، برای تولید ۳۵ کیلوگرم شیر در یک گاو در ماشین ریخته شد و سپس آزمایش‌ها با تیمارهای سرعت مارپیچ و زمان مخلوط شدن جیره آغاز گردید.

جدول ۲- ترکیب جیرهٔ کاملا مخلوط

Table 2 - Composition of total mixed ration

جیره کاملا مخلوط (کیلوگرم) (kg) Total mixed ration	کاه (کیلوگرم) Straw (kg)	یونجه (کیلوگرم) Alfalfa (kg)	ذرت سیلویی (کیلوگرم) Corn silage (kg)	تفاله چغندرقند (کیلوگرم) Sugar beet pulp pellets (kg)	کنسانتره دامی (کیلوگرم) Livestock concentrate (kg)	آب (لیتر) Water (L)
مقدار برای یک گاو Amount for one cow	1.25	1	22	2	15	2

به منظور بررسی یکنواختی مخلوط جیرهٔ غذایی در ماشین خوراک‌ساز دام، اثر سه سرعت مارپیچ ۵۰ (R_{50})، ۶۰ (R_{60}) و ۷۰ (R_{70}) دور بر دقیقه، زمان مخلوط شدن خوراک دام در سه سطح ۱۵(T_{15})، ۱۸ (T_{18}) و ۲۱ (T_{21}) دقیقه در یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی با سه تکرار با هم مقایسه شد. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS[1]، تجزیه واریانس شد و میانگین‌ها با آزمون چنددامنه‌ای دانکن مقایسه گردید. عملکرد ماشین نیز با استفاده از پارامترهای زیر بررسی شد:

اندازه‌گیری و محاسبهٔ یکنواختی مواد مخلوط

یکنواختی مواد مخلوط از مهم‌ترین پارامترها در اندازه‌گیری عملکرد هر ماشین مخلوط‌کننده است. برای این منظور، پس از جمع‌آوری مواد از خروجی ماشین خوراک‌ساز در ۵ نمونه به وزن ۲ کیلوگرم، مجددا ۵۰۰ گرم از هر نمونه روی الک‌های پنسیلوانیا ریخته شد و پس از جمع‌آوری مواد از روی هر الک، جداسازی بر حسب نوع ماده و توزین با ترازوی دیجیتالی صورت گرفت. در مرحلهٔ بعد، با استفاده از شاخص ضریب تغییرات، مقدار یکنواختی محاسبه شد. نمونه‌برداری تا زمان خروج تمام مواد از ماشین ادامه داشت و آخرین نمونه از ماشین زمانی برداشته شد که خوراک مخلوط در ماشین خوراک‌ساز دام وجود نداشت. هرچه ضریب تغییرات در تیمارهای مختلف کمتر باشد، یکنواختی بیشتر است (Patricia *et al.*, 2009). ضریب تغییرات از رابطه‌های ۱ و ۲ به دست آمد:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2}{n-1}} \qquad (۱)$$

1- Statistical Analysis System

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \times 100 \qquad (۲)$$

که در آن‌ها:

s = انحراف معیار (گرم)؛ x_i= وزن مواد جمع‌آوری شده روی هر الک (گرم) ؛ $\bar{x}$= متوسط وزن مواد جمع‌آوری شده روی هر الک (گرم)؛ و CV= ضریب تغییرات (درصد).

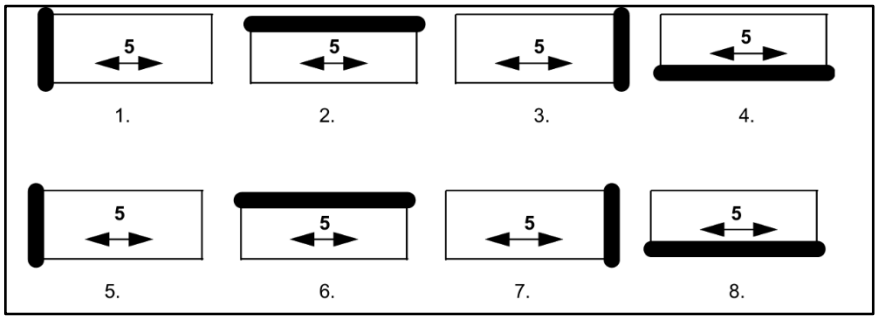
الک‌های پنسیلوانیا[1] از سه الک و یک سینی تشکیل شده است که روی هم قرار می‌گیرند. اندازهٔ روزنه‌های الک از بالا به پایین ۱۹، ۸ و ۱/۱۸ میلی-متر است (شکل ۲). برای کار با الک پنسیلوانیا، ابتدا جیرهٔ کاملا مخلوط را که از ماشین خوراک‌ساز دام خارج شده بدون به هم خوردن در یک ظرف به حجم ۲ لیتر می‌ریزند و محتویات این ظرف در وسط الک بالایی (۱۹ میلی‌متر) ریخته می‌شود.

شکل ۲- الک‌های پنسیلوانیا و جیره کاملا مخلوط روی الک

Fig. 2– Penn State Particle Separator and total mixed ration on the sieve

برای کار با الک‌ها هیچ‌گونه حرکت عمودی وجود ندارد و حرکت‌ها فقط در جهت افقی است. در یک فاصله علامت‌گذاری شده ۲۰-۱۷ سانتی‌متر در هر وجه الک حرکت رفت و برگشتی ۵ بار تکرار می‌شود که برای چهار وجه الک‌های روی هم قرار گرفته، ۲۰ حرکت افقی شامل خواهد شد. این عمل یک بار دیگر نیز تکرار می‌گردد که در مجموع ۴۰ حرکت برای مجموعهٔ الک‌ها تحقق می‌یابد. پس از آن، مواد قرار گرفته روی الک‌ها به صورت مجزا با ترازوی دیجیتالی وزن و اعداد ثبت می‌شود. نکتهٔ مشترک تمام توصیه‌ها این است که در هنگام کار با الک‌های پنسیلوانیا و توزیع مواد روی آن‌ها، بیشترین مقدار مواد جیره روی الک دوم و کمترین مقدار مواد روی الک اول و الک سوم و درصدی بین الک اول و دوم است. در این صورت مخلوط شدن جیره غذایی مناسب است. نکته‌ای که باید به آن توجه کرد این است که در مورد الک ۱/۱۸ میلی‌متری، در هنگام وزن کردن باید چند ضربه به الک وارد و پس از آن الک را با برس به طور کامل پاک کرد (شکل ۳).

1- Penn State Particle Separator (PSPS)



شکل ۳- الگوی تکان‌دادن الک‌های پنسیلوانیا برای جداسازی اندازه ذرات

Fig. 3– Pennsylvania sieve shaking pattern for particle size separation

اندازه‌گیری خردشدن مواد مخلوط

عملکرد اصلی ماشین خوراک‌ساز دام مخلوط کردن یکنواخت علوفه و مواد مکمل است. با توجه به اینکه در ماشین خوراک‌ساز دام از مارپیچ و تیغه‌هایی استفاده می‌شود که روی خرد شدن مواد اثر دارند و نیز اندازهٔ مواد مخلوط شدنی روی یکنواختی مخلوط تهیه شده مؤثر است، این پارامتر با ریختن نمونه‌های جمع‌آوری شده روی الک‌های پنسیلوانیا تعیین می‌شود. برای این منظور ۵۰۰ گرم از جیرهٔ کاملا مخلوط روی الک اول ریخته شد و با عقب و جلو بردن الک به مسافت ۲۰ سانتی‌متر و چرخاندن الک، نمونه غربال گردید. سپس با استفاده از رابطه‌های ۳ و ۴ مقدار خرد شدن مواد مخلوط محاسبه شد (Nikkhah *et al*., 2005).

$$X_{gm} = Log^{-1}\frac{\sum\left(M_i \, Log\,\bar{x}_i\right)}{\sum M_i} \qquad (۳)$$

$$S_{gm} = Log^{-1}\left[\frac{\sum M_i\left(Log\,\bar{x}_i - Log\,x_{gm}\right)^2}{\sum M_i}\right]^{1/2} \qquad (۴)$$

که در آن‌ها،

x_i= قطر منافذ الک iام؛ x_{gm}= میانگین هندسی اندازهٔ قطعات (سانتی‌متر)؛ $\bar{x}$= میانگین هندسی طول قطعات روی i امین الک (سانتی‌متر)؛ M_i = توده روی iامین الک (مقدار واقعی بعد از الک‌کردن)؛ و S_{gm} = انحراف معیار.

بررسی جریان‌پذیری مواد مخلوط

عدد فرود به طور معمول برای تعیین رژیم جریان از یک خروجی تعریف می‌شود (Mellmann, 2001). با توجه به مواد مختلف موجود در جیره و وجود تیمارهای مختلف، این عدد به منظور عملکرد مناسب ماشین خوراک‌ساز دام در جریان‌پذیری جیره کاملا مخلوط بررسی شد. هرچه این عدد بزرگ‌تر باشد، مواد سریع‌تر از دهانهٔ خروج خارج می‌شوند و به سخنی دیگر هرچه عدد فرود کوچک‌تر باشد، نیروی گرانشی غالب‌تر است.

$$Fr = \frac{\omega^2 R}{g} \qquad (۵)$$

که در آن،

Fr= عدد فرود (بی‌بعد)؛ ω= سرعت دورانی (رادیان بر ثانیه)؛ R= شعاع مارپیچ (متر)؛ و g= شتاب جاذبه (متر بر مجذور ثانیه).

تعیین جرم مخصوص ظاهری جیرهٔ کاملا مخلوط

جرم مخصوص ظاهری جیره کاملا مخلوط در زمان‌ها و سرعت‌های مختلف مارپیچ ماشین خوراک‌ساز دام تغییر می‌یابد. بنابراین، جرم مخصوص ظاهری در سه تکرار برای هر تیمار از رابطهٔ ۶ محاسبه شد (Razavi & Akbari, 2023).

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (۶)$$

که در آن:

ρ= جرم مخصوص ظاهری (کیلوگرم بر مترمکعب)؛ m= جرم نمونه (کیلوگرم)؛ و v= حجم نمونه (مترمکعب).

نتایج و بحث

نتایج تجزیهٔ واریانس نشان داد که اثر سرعت مارپیچ فقط در میانگین وزن مواد در سطح پنج درصد معنی‌دار است و در سایر متغیرهای اندازه‌گیری شده معنی‌دار نیست (جدول ۳). زمان مخلوط شدن جیرهٔ کاملا مخلوط در ماشین خوراک‌ساز دام بر میانگین هندسی اندازهٔ قطعات، انحراف معیار اندازهٔ قطعات، انحراف معیار وزن مواد و میانگین وزن مواد در سطح پنج درصد معنی‌دار است، ولی در متغیر ضریب تغییرات معنی‌دار نیست. اثر متقابل سرعت مارپیچ و زمان مخلوط شدن در انحراف معیار اندازه قطعات، انحراف معیار وزن مواد و میانگین وزن مواد در سطح پنج درصد معنی‌دار است و در میانگین هندسی اندازه قطعات و ضریب تغییرات، اثر معنی‌داری در سطح پنج درصد نشان داده نشده است (جدول ۳).

جدول ۳- تجزیهٔ واریانس اثر سرعت مارپیچ و زمان مخلوط شدن جیرهٔ کاملا مخلوط بر متغیرهای اندازه‌گیری شده

Table 3- Analysis of variance of the effect of spiral rotation and mixing time of total mixed ration on measured variables

منابع تغییر Sources of variance	درجات آزادی Degrees of freedom	میانگین هندسی اندازه قطعات (سانتی‌متر) X_{gm} (g)	انحراف معیار اندازه قطعات (سانتی‌متر) S_{gm} (g)	انحراف معیار وزن مواد (گرم) S_d (g)	میانگین وزن مواد (گرم) Mean (g)	ضریب تغییرات (درصد) CV (%)
تیمار (Treatment)	8	0.085*	0.047*	0.101*	2.035*	211.892ns
دور مارپیچ (Spiral rotation, R)	2	0.081ns	0.042ns	0.305ns	1.904*	38.193ns
زمان مخلوط شدن (Mixing time, T)	2	0.104*	0.065*	1.371*	2.202*	447.935ns
اثر متقابل (R×T)	4	0.077ns	0.041*	1.710*	2.018*	180.720ns
خطا (Error)	18	0.031	0.014	0.356	0.546	145.518

*: اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، ns: نبود اختلاف معنی‌دار.

*: significant difference at $\alpha<0.05$; ns: no significant difference

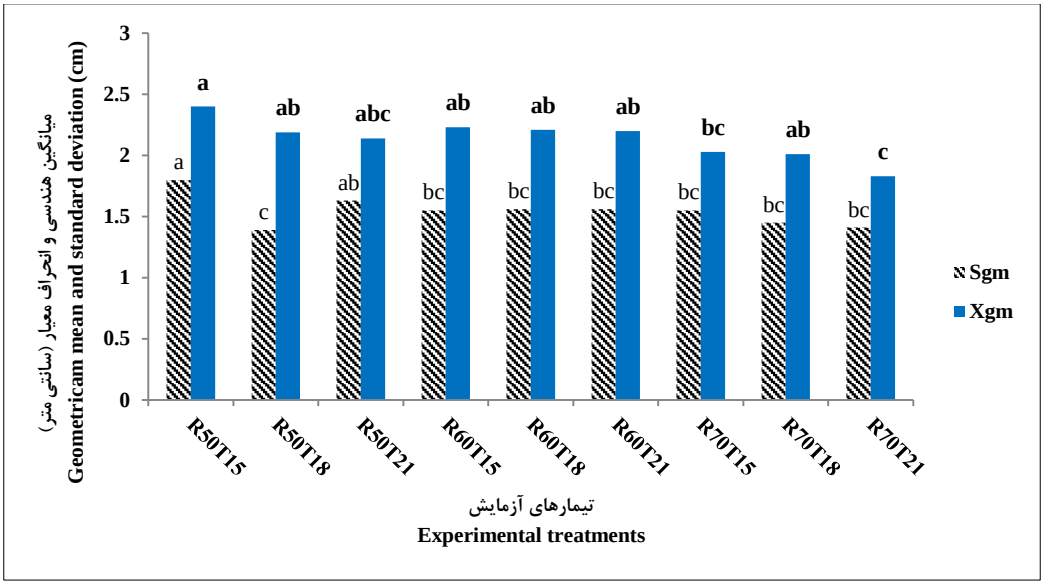
اثر سرعت مارپیچ و زمان بر خرد شدن مواد مخلوط

ترکیب تیمارهای سرعت مارپیچ (۵۰، ۶۰ و ۷۰ دور بر دقیقه) و زمان مخلوط شدن مواد علوفه (۱۵، ۱۸ و ۲۱ دقیقه) در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به داده‌های ارائه شده، بیشترین مقدار خرد شدن جیرهٔ کاملا مخلوط (کمترین مقدار در میانگین هندسی اندازه قطعات)، در سرعت مارپیچ ۷۰ دور بر دقیقه و زمان ۲۱ دقیقه با ۱/۸۳ سانتی‌متر و کمترین مقدار خرد شدن این مواد (بیشترین مقدار در میانگین هندسی اندازه قطعات)، در سرعت مارپیچ ۵۰ دور بر دقیقه و زمان ۱۵ دقیقه با ۲/۴۰ سانتی‌متر به دست آمد ($P<0.05$). بقیه تیمارها با اختلاف کم در یک کلاس آماری قرار گرفتند ($P>0.05$). از شکل ۴ چنین استنباط می‌شود که در تیمارهایی که سرعت مارپیچ آن‌ها یکسان است، افزایش زمان مخلوط شدن باعث

کاهش میانگین هندسی قطعات شده است. در ارتباط با انحراف معیار اندازهٔ قطعات، کمترین مقدار مربوط به تیمار $R_{50}T_{18}$ (۵۰ دور بر دقیقه و زمان ۱۸دقیقه مارپیچ) با ۱/۳۹ سانتی متر و بیشترین انحراف معیار مربوط به تیمار $R_{50}T_{15}$ با ۱/۸۰ سانتی‌متر است ($P<0.05$). نکته قابل توجه این است که تقریباً در تمام تیمارها افزایش سرعت مارپیچ از ۵۰ به ۶۰ دور بر دقیقه، افزایش اندازه قطعات موجود در جیره و افزایش سرعت مارپیچ از ۶۰ به ۷۰ دور بر دقیقه کاهش اندازه قطعات جیره را به همراه دارد. به غیر از تیمارهای $R_{50}T_{15}$ و $R_{50}T_{18}$ که بیشینه و کمینه مقدار انحراف معیار اندازه قطعات را ایجاد کرده‌اند، در سایر تیمارها، اختلاف معنی‌داری از نظر انحراف معیار اندازه قطعات ایجاد نشده است (شکل ۴). نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد برای خرد شدن مواد موجود در جیرهٔ کاملا مخلوط می‌توان از سرعت‌های کمتر و زمان‌های کوتاه‌تر استفاده کرد. نتایج پژوهش دیگر محققان (Ansuree *et al.*, 2021) نشان می‌دهد که با افزایش سرعت محور مارپیچ و زمان اختلاط در ماشین خوراک‌ساز دام، اندازهٔ قطعات مواد موجود در جیرهٔ کاملا مخلوط کاهش می‌یابد که نتایج تحقیق را تأیید می‌کند.

یکنواختی جیرهٔ کاملا مخلوط در کل الک‌ها

در جدول ۴، اثر سرعت مارپیچ و زمان مخلوط شدن، روی یکنواختی جیرهٔ کاملا مخلوط نشان داده شده است.



شکل ٤- اثر سرعت مارپیچ و زمان بر شاخص‌های خردشدن مواد مخلوط (کل الک‌ها)

Fig. 4- Effect of spiral rotation and mixing time on the crushing indices of mixed ration (total sieves)

S_{gm}=انحراف معیار اندازه قطعات (سانتی‌متر), X_{gm}= انحراف معیار اندازه قطعات (سانتی‌متر)

میانگین‌های با حروف متفاوت اختلاف معنی‌دار ($P<0.05$) دارند.

The means with different letters are significantly different ($P<0.05$).

جدول ٤- اثر سرعت مارپیچ و زمان بر شاخص‌های یکنواختی جیره کاملا مخلوط (کل الک‌ها)

Table 4- Effect of spiral rotation and mixing time on the homogeneity indices of mixed ration (total sieves)

ضریب تغییرات (درصد) CV	میانگین وزن مواد (گرم) Mean	انحراف معیار وزن مواد (گرم) S_d	تیمار Treatment
83.56 ab	3.07 ab	2.56 a	$R_{50}T_{15}$
62.00 c	2.60 cd	1.63 bc	$R_{50}T_{18}$
68.46 abc	2.87 bc	1.97 b	$R_{50}T_{21}$
63.15 c	2.95 bc	1.86 bc	$R_{60}T_{15}$
85.73 a	3.33 a	2.56 a	$R_{60}T_{18}$
66.56 bc	2.85 bc	1.91 bc	$R_{60}T_{21}$
69.54 abc	2.76 bcd	1.92 bc	$R_{70}T_{15}$
72.32 abc	2.89 bc	2.10 ab	$R_{70}T_{18}$
55.60 c	2.48 d	1.38 c	$R_{70}T_{21}$

میانگین‌های با حروف متفاوت اختلاف معنی‌دار ($P<0.05$) دارند.

The means with different letters are significantly different ($P<0.05$).

با توجه به جدول ۴، سرعت مارپیچ و زمان مخلوط شدن جیره دو عامل تأثیرگذار بر یکنواختی جیرهٔ کاملا مخلوط در کل الک‌هاست. بیشترین یکنواختی (کمترین انحراف معیار) جیرهٔ کاملا مخلوط در تیمار سرعت مارپیچ ۷۰ دور بر دقیقه و زمان ۲۱ دقیقه ($R_{70}T_{21}$) با ۱/۳۸ گرم به دست آمد. این تیمار کمترین میانگین هندسی اندازهٔ قطعات (۱/۸۳ سانتی‌متر) را نیز دارد (شکل ۴). کمترین مقدار یکنواختی (بیشترین انحراف معیار) در تیمار $R_{50}T_{15}$ و $R_{60}T_{18}$ با ۲/۵۶ گرم به دست آمده است. دیگر تیمارهای بین دو تیمار بیشینه و کمینه از نظر آماری اختلاف معنی‌داری ($P>0.05$) با یکدیگر ندارند. مقایسهٔ تیمارهای $R_{50}T_{18}$، $R_{60}T_{18}$ و $R_{70}T_{18}$ نشان می‌دهد که در زمان یکسان (۱۸ دقیقه)، افزایش سرعت مارپیچ از ۵۰ به ۶۰ دور بر دقیقه کاهش یکنواختی جیرهٔ کاملا مخلوط را به همراه دارد و افزایش سرعت مارپیچ از ۶۰ به ۷۰ دور بر دقیقه، باعث افزایش یکنواختی مواد موجود در جیره شده است. کاهش و افزایش یکنواختی با افزایش و کاهش سرعت محور مارپیچ و زمان‌های مختلف را دیگر محققان (Ansuree *et al.*, 2021) نیز گزارش کرده‌اند.

ماشین خوراک‌ساز دام روزانه و تا سه نوبت در گاوداری‌ها استفاده می‌شود و استهلاک زیاد ماشین و تراکتور را به دنبال دارد. با در نظر گرفتن نتایج به دست آمده از تأثیر سرعت محور مارپیچ و زمان مخلوط شدن جیره، باید از تیماری استفاده کرد که مزایای کاربرد بهینه ماشین و یکنواختی لازم را در بر داشته باشد که در جیرهٔ کاملا مخلوط هدف اصلی است. با توجه به توضیحات و داده‌های ارائه شده در جدول ۴، تیمار $R_{50}T_{18}$ با انحراف معیار ۱/۶۳ گرم، و نبود اختلاف معنی‌دار با تیمار بیشینه یکنواختی جیرهٔ کاملا مخلوط، هدف مورد نظر را دنبال می‌کند. این تیمار از نظر استهلاک ماشین، در مقایسه با سرعت‌های زیاد مارپیچ، در حد مناسبی قرار دارد و اضافه بر آن زمان کاربرد ماشین (۱۸ دقیقه) زمان مناسبی برای تهیهٔ جیرهٔ کاملا مخلوط است. لازم است یادآوری شود ماشین‌های خوراک‌ساز دام موجود (مارپیچ عمودی و افقی) جعبه دندهٔ تغییر سرعت مارپیچ ندارند و تغییر سرعت مارپیچ ماشین فقط با تغییر گاز دستی تراکتور ممکن است. بنابراین استفاده از سرعت‌های کمتر، با در نظر گرفتن یکنواختی مناسب جیرهٔ کاملا مخلوط، کاهش استهلاک تراکتور و ماشین خوراک‌ساز دام را

به دنبال دارد. نتایج مطالعات دیگر (Marczuk *et al.*, 2017; Adedeji *et al.*, 2021) نیز نشان می‌دهد که استفاده از زمان‌های کوتاه‌تر در هنگام مخلوط شدن جیرهٔ غذایی در ماشین خوراک‌ساز دام، افزایش یکنواختی را در جیرهٔ کاملا مخلوط به همراه دارد. در پژوهشی نشان داده شده است که افزایش زمان مخلوط شدن مواد جیره غذایی از ۲۰ تا ۳۰ دقیقه، فقط ۱/۵ درصد افزایش یکنواختی را به همراه دارد و افزایش زمان تا ۴۰ دقیقه، باعث کاهش درجهٔ یکنواختی به مقدار یک درصد می‌شود (Krolczyk *et al.*, 2016). استفاده از زمان مناسب برای یکنواخت مخلوط شدن مواد را دیگر محققان (Schmelzle *et al.*, 2015; Yamamoto *et al.*, 2016) نیز گزارش کرده‌اند.

بررسی میانگین مواد باقی‌مانده روی الک‌ها

مقایسهٔ میانگین تیمارها در جدول ۵ نیز با توصیه‌ها در مورد درصد مواد باقی‌مانده روی الک‌های پنسیلوانیا مطابقت دارد. بیشترین مواد روی الک دوم و پس از آن الک‌های سوم و اول قرار دارد.

جدول ۵- اثر سرعت مارپیچ و زمان بر مواد باقی‌ماندهٔ جیره روی الک‌ها

Table 5- Effect of spiral rotation and time on material remaining on sieves

تیمار	الک اول (درصد)	الک دوم (درصد)	الک سوم (درصد)	صفحهٔ زیرین (درصد)
Treatment	First sieve (%)	Second sieve (%)	Third sieve (%)	Pan (%)
$R_{50}T_{15}$	31.29 a	36.27 d	24.95 e	5.97 bc
$R_{50}T_{18}$	18.45 bc	53.77 ab	21.56 f	4.68 cde
$R_{50}T_{21}$	16.13 bcd	45.04 c	28.67 cd	8.61 a
$R_{60}T_{15}$	12.24 cde	48.66 bc	30.68 ab	6.93 a
$R_{60}T_{18}$	20.05 b	45.54 c	28.90 cd	3.28 e
$R_{60}T_{21}$	11.46 de	54.42 a	28.45 d	4.22 de
$R_{70}T_{15}$	10.96 de	51.75 ab	29.98 bcd	5.85 bcd
$R_{70}T_{18}$	13.31 cde	49.73 abc	30.12 bc	5.57 bcd
$R_{70}T_{21}$	6.62 e	53.07 ab	31.83 a	7.05 b

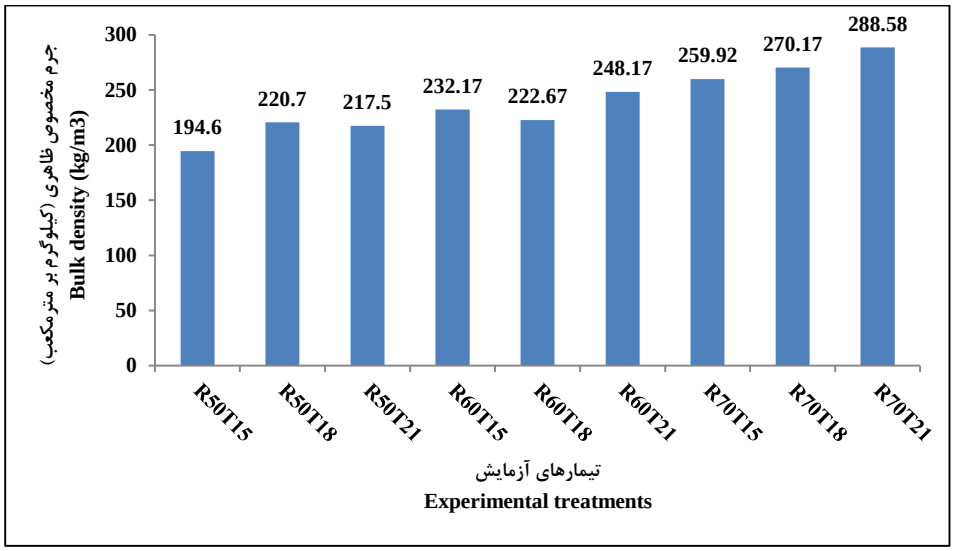
میانگین‌های با حروف متفاوت اختلاف معنی‌دار دارند ($P<0.05$).

The means with different letters are significantly different ($P<0.05$).

با توجه به مطالب ارائه شده و در نظر گرفتن توصیه‌ها در مورد درصد مواد باقی‌مانده روی الک‌ها، می‌توان تیماری را انتخاب کرد که از نظر دور مارپیچ و زمان مخلوط شدن مواد در حد مناسب باشد و استاندارد مواد روی الک‌ها نیز در آن رعایت شده باشد. مقدار قرارگیری مواد جیرهٔ کاملا مخلوط، روی الک‌های اول، دوم و سوم در تیمار $R_{70}T_{21}$ به ترتیب ۶/۶۲، ۵۳/۰۷ و ۳۱/۸۳ درصد است که اختلاف معنی‌داری ($P>0.05$) با تیمار $R_{60}T_{15}$، از نظر درصد باقی‌ماندهٔ مواد جیره روی الک‌ها به ترتیب با ۱۲/۲۴، ۴۸/۶۶ و ۳۰/۶۸ درصد، نشان نمی‌دهد. تیمار $R_{60}T_{15}$ نیز اختلاف معنی‌داری را با تیمار $R_{50}T_{18}$ از نظر مقدار مواد باقی‌مانده روی الک‌ها به ترتیب با ۱۸/۴۵، ۵۳/۷۷ و ۲۱/۵۶درصد، نشان نمی‌دهد. این تیمار ($R_{50}T_{18}$) از نظر طول قطعات و یکنواختی جیرهٔ کاملا مخلوط نیز در حد مناسبی قرار دارد.

اثر سرعت مارپیچ و زمان مخلوط شدن جیرهٔ کاملا مخلوط روی جرم مخصوص ظاهری

با توجه به داده‌های به دست آمده از شکل ۵، افزایش سرعت مارپیچ در زمان‌های مساوی، باعث افزایش جرم مخصوص ظاهری جیره کاملا مخلوط شده است.



شکل ۵- اثر سرعت مارپیچ و زمان بر جرم مخصوص ظاهری مواد کاملا مخلوط

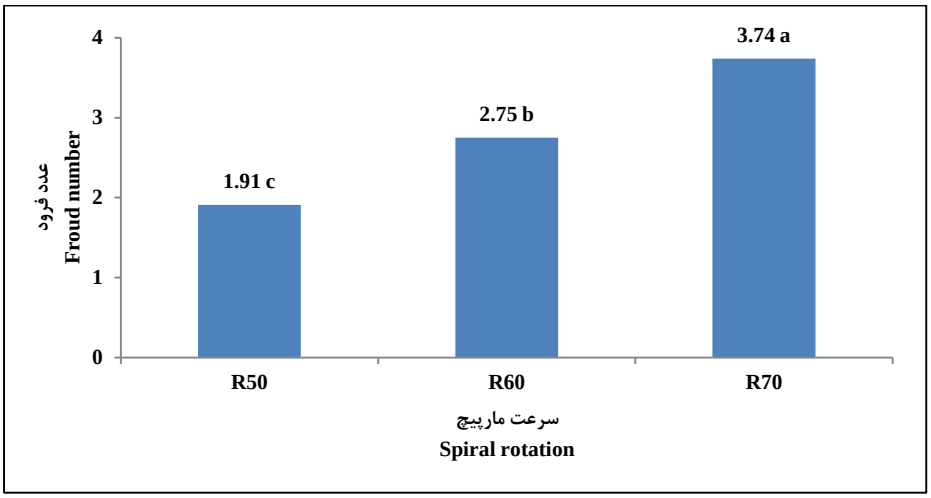
Fig. 5- Effect of spiral rotation and time on the bulk density of total mixed ration

در تیمارهایی که سرعت مارپیچ یکسان دارند اما زمان از ۱۵ به ۱۸ و ۲۱ افزایش می‌یابد، روند مشخصی مشاهده نمی‌شود. نتایج تحقیقات دیگر محققان (Aissa *et al.*, 2011; Yamamoto *et al.*, 2016) نیز نشان می‌دهد که با افزایش زمان مخلوط شدن در جیره غذایی، یکنواختی مخلوط شدن مواد تا زمان مشخصی افزایش و پس از آن ثابت می‌ماند یا کاهش می یابد که یک دلیل آن تغییرات افزایشی یا کاهشی در جرم مخصوص ظاهری است. افزایش سرعت مارپیچ از ۵۰ به ۶۰ و ۷۰ دور در دقیقه در زمان‌های یکسان، با فشاری که روی جیرهٔ کاملا مخلوط وارد می‌کند، فضاهای بین قطعات جیره را کاهش می‌دهد و بنابراین جرم مخصوص ظاهری افزایش می‌یابد. این در حالی است که تغییر در زمان با یک سرعت مارپیچ مشخص باعث می‌شود تا مواد جیرهٔ کاملا مخلوط روی هم بلغزند و تغییرات در جرم مخصوص ظاهری اندک باشد. لازم است گفته شود به طور کلی، تغییر قابل توجهی در این شاخص میان تیمارها مشاهده نشده است.

بررسی عدد فرود و زمان تخلیهٔ جیرهٔ کاملا مخلوط از ماشین خوراک‌ساز دام

تأثیر جریان‌پذیری جیرهٔ کاملا مخلوط با یک عدد بدون بعد[1] به نام عدد فرود بررسی می‌شود. با توجه به اینکه شعاع مارپیچ در ماشین خوراک‌ساز دام و شتاب جاذبه ثابت است، تنها متغیری که روی این عدد تأثیر دارد، سرعت دورانی مارپیچ خواهد بود. مقادیر عدد فرود در شکل ۶ آورده شده است.

1- Dimensionless



شکل ٦- بررسی عدد فرود در سرعت‌های مختلف مارپیچ

Fig. 6- Effect of spiral rotation on Froude number

میانگین‌های با حروف متفاوت اختلاف معنی‌دار ($P<0.05$) دارند.

The means with different letters are significantly different ($P<0.05$).

بر اساس شکل ۶، با افزایش سرعت مارپیچ عدد فرود و به دنبال آن جریان‌پذیری مواد از ماشین افزایش می‌یابد. جریان‌پذیری یکنواخت مواد از ماشین خوراک‌ساز دام باعث می‌شود جیرهٔ علوفهٔ کاملا مخلوط در سراسر کانال به طور یکسان توزیع و از گرفتگی دهانهٔ خروجی ماشین جلوگیری شود. در این تحقیق زمان‌های توزیع مواد در فاصلهٔ ۱۲ متری از کانال ریزش علوفه در تیمارهای مختلف بررسی گردید. نتایج به دست آمده در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ٦- زمان خروج جیرهٔ کاملا مخلوط از خروجی ماشین خوراک‌ساز دام

Table 6- Time of exit of total mixed ration from the outlet of the feeder mixer machine

تیمار Treatment	زمان خروج جیره کاملا مخلوط (ثانیه) Time to exit of total mixed ration (s)
$R_{50}T_{15}$	1:20
$R_{50}T_{18}$	1:03
$R_{50}T_{21}$	00:58
$R_{60}T_{15}$	1:01
$R_{60}T_{18}$	1:06
$R_{60}T_{21}$	1:04
$R_{70}T_{15}$	1:06
$R_{70}T_{18}$	00:53
$R_{70}T_{21}$	00:49

* فاصله خروج جیره کاملا مخلوط، ۱۲ متر در نظر گرفته شده است.

The distance from which the total mixed ration exits is considered to be 12 meters.

اعداد جدول ۶ با عدد فرود در ارتباط است. با توجه به نتایج جدول ۶ و شکل ۶، کمترین عدد فرود، ۱/۹۱، در تیمار $R_{50}T_{15}$ به دست آمد. در این تیمار، زمان توزیع مواد در کانال علوفه یک دقیقه و

۲۰ ثانیه به دست آمد. بالاترین عدد فرود، ۳/۷۴ است که در سرعت مارپیچ ۷۰ دور بر دقیقه، معادل کمترین زمان خروج مواد یعنی ۴۹ ثانیه و در تیمار $R_{70}T_{21}$ گزارش شده است. نکتهٔ دیگر این است که با توجه به اینکه در سرعت مشخص محور مارپیچ عدد فرود یکسان است (مثلا ۵۰ دور بر دقیقه، معادل عدد فرود ۱/۹۱)، با این حال به عنوان نمونه، در تیمارهای $R_{50}T_{15}$، $R_{50}T_{18}$و $R_{50}T_{21}$، زمان توزیع جیرهٔ کاملا مخلوط در کانال توزیع علوفه به ترتیب یک دقیقه و بیست ثانیه، یک دقیقه و سه ثانیه، و ۵۸ ثانیه به دست آمد. این امر نشان‌دهنده تأثیر زمان‌های ۱۵، ۱۸ و ۲۱ دقیقه در هنگام مخلوط شدن جیره است. در زمان‌های بیشتر، هم مواد جیره ریزتر می‌شود و هم جیره یکنواخت‌تر مخلوط می‌گردد و بنابراین جریان‌پذیری مواد (عدد فرود)، بیشتر و مدت زمان خروج مواد از دهانه ماشین کمتر است. اثر ارتفاع بیشتر جیره غذایی در مخزن و جریان‌پذیری مواد در خروجی مخزن ماشین خوراک‌ساز دام، را دیگر محققان (Mellmann, 2001; Seilamovicz *et al.*, 2011) گزارش داده‌اند. در تحقیق حاضر نیز، سرعت‌های مختلف مارپیچ و زمان‌های مختلف مخلوط شدن جیره غذایی و اثر آن بر جریان‌پذیری (عدد فرود)، مورد بررسی قرار گرفت.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به دست آمده، افزایش سرعت و افزایش زمان کاربرد ماشین خوراک‌ساز دام باعث یکنواختی جیرهٔ کاملا مخلوط در تغذیه گاوهای شیری خواهد شد. بیشترین مقدار خرد شدن مواد (کمترین مقدار در میانگین هندسی قطعات) در سرعت مارپیچ ۷۰ دور بر دقیقه و زمان ۲۱ دقیقه (تیمار $R_{70}T_{21}$) و کمترین مقدار خردشدن مواد علوفه در سرعت مارپیچ ۵۰ دور بر دقیقه و زمان ۱۵ دقیقه (تیمار $R_{50}T_{15}$) به دست آمد که اختلاف معنی‌دار با یکدیگر دارند. بیشترین یکنواختی نیز در تیمار $R_{70}T_{21}$ حاصل شد. ماشین خوراک‌ساز دام هر روز و تا سه نوبت در گاوداری‌ها استفاده می‌شود و استهلاک زیاد ماشین و تراکتور را به دنبال دارد. بنابراین، باید تیماری توصیه شود که مزایای کاربرد بهینهٔ ماشین و یکنواختی لازم را در بر داشته باشد که هدف اصلی است. با توجه به توضیحات و داده‌های ارائه شده، تیمار $R_{50}T_{18}$ با یکنواختی و انحراف معیار ۱/۶۳ گرم قابل توصیه است. این تیمار، هم از نظر استهلاک ماشین در استفاده از سرعت‌های زیاد مارپیچ در حد مناسبی قرار دارد و هم زمان کاربرد ماشین (۱۸ دقیقه)، زمان مناسبی برای تهیهٔ جیره کاملا مخلوط است.

قدردانی

از مدیریت محترم مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس برای حمایت‌هایشان در اجرای این پروژهٔ تحقیقاتی قدردانی می‌شود.

تعارض منافع

نویسندگان در خصوص انتشار مقاله ارائه شده به طور کامل از سوء اخلاق نشر، از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پرهیز نموده‌اند و منافعی تجاری در این راستا وجود ندارد.

مراجع

Adedeji, M. A., Adegboye, T. A., Adesina, I. K., Ajayi, O. O., & Azeez, N. A. (2021). Construction and evaluation of a vertical motorized feed mixer. *Advanced Journal of Science, Technology and Engineering, 1*(1), 27-41. https://doi.org/10.52589/AJSTE-UIXXE0N2.

Adusei-Bonsu, M., Amanor, I. N., Obeng, G. Y., & Mensah, E. (2021). Performance evaluation of mechanical feed mixers using machine parameters, operational parameters and feed characteristics in Ashanti and Brong Ahafo regions, Ghana. *Alexandria Engineering Journal, 60*(5), *4905-4918.* https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.03.061.

Aissa, A. A., Duchesne. C., & Rodrigue, D. (2011). Effect of friction coefficient and density on mixing particles in the rolling regime. *Powder Technology, 212*, 340-347. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.06.009.

Ansuree, P., Sudajan, S., Junsiri, C., & Laloon, K. (2021). Effect of mixing speed and time on the homogeneity of multi-particle size sugarcane leaves product in horizontal paddle mixer for pelletized. *Bulgarian Journal of Agricultural Science, 27*(5), 1009–1019.

Dimaiwat, M. I., Belen, G. C. C., Angeles, E. P., Reyes, F. C. C., & Angeles, A. A. (2018). Analysis of feed mixer efficiencies of commercial feed manufacturers in the Philippines from 2012 to 2016. *Philippine Journal of Veterinary and Animal Sciences, 44*(2), 103-110.

Keller, N. K. G. (2012). Mixing and segregation in 3D multi-component, two phase fluidized beds (Ph.D. Thesis), Department of Mechanical Engineering, Iowa State University. U.S.A.

Krolczyk, J. B. (2016). The effect of mixing time on the homogeneity of multi-component granular systems. *Transactions of Famena, 9*(1), 45-56.

Marczuk, A., Caban, J., Savinykh, P., Turubanov, N. & Zyryanov, D. (2017). Maintenance research of a horizontal ribbon mixer. *Eksploatacja I Niezawodnosc – Maintenance and Reliability, 19*(1), 121–125.

Mellmann, J. (2001). The transverse motion of solids in rotating cylinders – forms of motion and transition behavior. *Powder Technology*, 118, 251-270.

Nikkhah, A., Nosoohi, M., & Zali, A. (2005). Determination of alfalfa particle size by penn state particle separator and It's effect on lactating dairy cows. *Iranian Journal of Agriculture Science, 36*(1), 99-107. (in Persian)

Patricia, M., Marianthi, G. I., & Fernando, J. M. (2009). Effects of rotation rate, mixing angle, and cohesion in two continuous powder mixers– A statistical approach. *Powder Technology, 194*, 217-227. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.04.010.

Razavi, M. A., & Akbari, R. (2023). *Biophysical properties of agricultural & food materials.* Mashhad: Ferdowsi University of Mashhad Press. (in Persian)

Schmelzle, S., Leppert, S., & Nirschl, H. (2015). Influence of impeller geometry in a vertical mixer described by DEM simulation and the dispersion model. *Advanced Powder Technology, 26*(5), 1473-1482. https://doi.org/10.1016/j.apt.2015.08.003.

Seilamovicz, I., Czech, M., & Kowalewski, T. A. (2011). Empirical description of granular flow inside a model silo with vertical walls. *Biosystems Engineering, 108*, 334-344. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.01.004.

Vakili, R. (2024). Evaluation of vertical animal feed mixer at different times of mix. *Food Processing: Techniques and Technology, 45*(1), 39-44. https://doi.org/10.22092/aasrj.2023.362806.1273.

Yamamoto, M., Ishihara, S., & Kano, J. (2016). Evaluation of particle density effect for mixing behavior in a rotating drum mixer by DEM simulation. *Advanced Powder Technology*, 27(3), 864-870. https://doi.org/10.1016/j.apt.2015.12.013.

Agricultural Mechanization and Systems Research/Vol.25/No.91/Autumn 2024/P:37-52
Journal Home Page: https://amsr.areeo.ac.ir

Original Paper

Assessment of Factors Affecting the Homogeneity of Total Mixed Rations in Feeder Mixer Machine

Mohammad-Ali Behaeen

Assistant Professor at Department of Agricultural Engineering Research, Research and Training Center for Agriculture and Natural Resources in Fars province, Agricultural Rerearch, Education and Extension Organization, Shiraz, Iran
Received: 16 December 2025, Accepted: 13 March 2025
https://doi.org/10.22092/amsr.2026.371789.1531

Abstract

Increasing and improving feed conversion ratio in the livestock industry is achieved by using total mixed rations. Providing adequate and balanced nutrients in the ration to increase production is achieved by mixing feed ingredients. The important point in preparing this type of animal feed, is the homogeneity of mixing of the ingredients and the same distribution in each animal. Feeder mixer machines are suitable implement for preparing a total mixed ration in animal husbandry. In order to investigate the homogeneity of the total mixed ration in a feeder mixer machine, the effect of three levels of spiral rotation of 50(R_{50}), 60(R_{60}) and 70(R_{70}) rpm, and the mixing time at three levels of 15(T_{15}), 18(T_{18}) and 21(T_{21}) minutes were compared in a factorial experiment in a completely randomized design with three replications. A mixture of straw, alfalfa, corn silage, sugar beet pulp pellets, livestock concentrate, and water was used to prepare the ration in a feeder mixer machine. The parameters studied included measuring the crushing of mixed ration, measuring and calculating the homogeneity of mixed materials, and examining the flowability of mixed materials (Froude number). The data obtained were analyzed with SAS software and means were compared with Duncan's multiple range test. The results showed that the highest amount of material crushing (the lowest in the geometric mean of material) was obtained at a spiral rotation of 70 rpm and a time of 21 minutes (treatment $R_{70}T_{21}$) and the lowest amount of forage material crushing was obtained at a spiral rotation of 50 rpm and a time of 15 minutes (treatment R50T15) with a significant difference between them ($P<0.05$). The highest homogeneity was also achieved in the R70T21 treatment. Considering the widespread use of feeder mixer machine in dairy farms and the time savings in preparing total mixed ration, a treatment should be provided that has a small spiral axis and the time spent using the machine in preparing the total mixed ration is appropriate. Based on the studies conducted, the $R_{50}T_{18}$ treatment with a standard deviation of 1.39 cm in piece length (S_{gm}) and a homogeneity of mixed materials of 1.63 g (S_d), is recommended.

Keywords: Bulk Density, Crushing, Flowability, Froude Number, Pennsylvania Sieve

© 2024 Agricultural Mehanization and Systems Research, Karaj, Iran. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)