



Research Paper

Determination of the Physicochemical Properties of Bentonite Samples from South Khorasan Province and Investigation of the Effects of Selected Samples on the Physical Quality of Pelleted Feed

Hossein Mohammadian¹, Mohammad Hassan Fathi Nasri^{*2}, Mohsen Mojtahedi³

1- Former M.Sc. Student of Animal Nutrition, Animal Science Department, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, I.R. Iran

2- Professor, Animal Science Department, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, I.R. Iran,

hfathi@birjand.ac.ir,  0000-0002-0296-7499

3- Former Assistant Professor, Animal Science Department, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, I.R. Iran,

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 28 April 2026
Accepted: 18 June 2026
Published online: Spring 2026

Keywords: Bentonite, Livestock feed, Pellet, Quality index, South Khorasan

ABSTRACT

This study was conducted to determine the characteristics of different bentonite samples from South Khorasan Province and to evaluate their effects on the physical quality (durability or hardness) of pelleted feed. For this purpose, 13 bentonite samples were collected from different mines in South Khorasan Province. After determining their physical characteristics, including moisture content, pH, sedimentation index, swelling index, and water absorption capacity, two samples were selected and designated as A and B. Each selected bentonite sample was then incorporated into a broiler grower concentrate (corn- and soybean-based) at two inclusion levels (1 and 2%), and the concentrates were subsequently pelleted. Five experimental treatments, including the control (concentrate without bentonite), A1 (concentrate containing 1% type A bentonite), A2 (concentrate containing 2% type A bentonite), B1 (concentrate containing 1% type B bentonite), and B2 (concentrate containing 2% type B bentonite), were compared based on the hardness index. The results showed that the addition of bentonite at both 1 and 2% inclusion levels significantly increased the physical durability of the pelleted feed compared with the control concentrate. Among the treatments, B2 exhibited the highest hardness index based on the different tests performed..

Cite this article: Mohammadian, H., Fathi Nasri, M.H., & Mojtahedi, M. (2026). Determination of the Physicochemical Properties of Bentonite Samples from South Khorasan Province and Investigation of the Effects of Selected Samples on the Physical Quality of Pelleted Feed. *Journal of Livestock Research*, 8 (1), 17-30. DOI: 10.22077/jlr.2026.11973.1068

Publisher: The University of Birjand Press.

DOI: <https://doi.org/10.22077/jlr.2026.11973.1068>

Extended Abstract

Introduction

Pelleting is converting of powdered feeds (mesh or flour) to pieces with specified size, which is done by pellet pressing machines. The beneficial effects of diet pelleting on the performance of livestock and poultry have been reported by many researchers. One of the problems in livestock and particularly poultry production systems is that the pellet feed has low durability and in transport, loading and unloading process, the feed tends to produce additional fines. Pellets with low strength to cause more dust and reduce feed consumption. So, many producers and breeders have paid special attention to the physical quality of pellet feeds. Adding cohesive components (binder) to pellet feeds to enhance its physical quality (durability) is recommended in cases where the diet could not reach the quality standards itself. One of these effective ingredients in poultry and livestock feeds is bentonite. Physical quality of the pellets is usually determined with a pellet durability index, PDI. This study was carried out to determine the physical characteristics of different samples of south Khorasan bentonites and their effect on PDI of pellet feed.

Materials and Methods

In this study, 13 bentonite samples were collected from south Khorasan mines and after doing laboratory tests including determination of moisture content, pH, sedimentation index, inflation index and water absorption rate, two samples were selected and added to pelleted broilers diet (based on corn and soybean) in two levels, 1 and 2 percent each. Five examined treatments named control, A₁, A₂, B₁ and B₂, were examined for pellet durability tests. One ton of each pellet feed were prepared and after cooling, pellets were evaluated with three test methods including Tumble, Holman and Kahl.

Results

Studied the physical characteristics of water absorption was the most range (186/75), And the lowest range of the pH (2/46). The concentration mineral elements calcium, potassium and zinc in sample A and the amount of sodium, magnesium, manganese, iron in the sample B was higher. Meanwhile, arsenic, tin, mercury and nickel because the amount is very low, not measurable by the device. in the Holman test 1 and 2 percent of each of the two samples A and B Bentonite significant increase PDI index. But the addition of 2% of the bentonite type B the most significant difference with the control sample (no bentonite concentrate) showed. in the tumble test, A₂ sample, did not show significant differences with sample B₁ and B₂ and A₁. In the Kahl test, sample B₂, have most pellet strength index. The results showed that B₂ (adding 2% of B type bentonite) had the best performance, according to different tests, and also it was proved that the Tumble test had a lower coefficient of variation compared to Holman test. Also Holman test had a more accurate PDI.

Conclusion

The results showed that the addition of bentonite at 1 and 2% levels, caused a significant increase in pellet PDI. Different samples of bentonite were completely different in terms of physical and chemical characteristics and necessary tests must be performed when using any type of bentonite samples. Also according to the results, it seems Holman test is the best standard for determining the PDI index of pellet.

Keywords: Bentonite, Livestock feed, Pellet, Quality index, South Khorasan

Author Contributions

“Conceptualization, and methodology M.H.F.N., H.M. and M.M; software, and formal analysis H.M.; review and editing, validation, M.H.F.N. and H.M.; investigation, M.H.F.N. and H.M. resources, M.H.F.N. data curation, M.H.F.N. and H.M; writing—original draft preparation, H.M; visualization, and supervision, M.H.F.N. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.” All authors contributed to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Conflict of interest

The authors have no competing interests.

Ethical consideration

Animal handling and experimental procedures were performed according to the guidelines of Animal manual for animal experiments and animal care protocol was approved by the Department of Animal Science, University of Birjand, Birjand, Iran.

AI Tools

The authors would like to acknowledge the use of AI tools for language editing and proofreading or data analysing, in this manuscript.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه بیرجند

مقدمه

عملکرد مطلوب دام و طیور به مصرف بهینه خوراک بستگی دارد. مصرف بهینه خوراک خود تحت تأثیر عواملی از قبیل دمای محیط، مقدار مواد مغذی جیره و کیفیت فیزیکی خوراک قرار می‌گیرد (Abdollahi, 2011). اثرات مفید پلت کردن جیره بر عملکرد دام و طیور توسط محققان زیادی گزارش شده است (Acer et al., 1991؛ EFSA, 2010؛ McKinney & Mojtahedi, 2013 Teeter, 2004). بهبود وزن بدن و ضریب تبدیل غذایی طیور در اثر پلت کردن خوراک، نمونه‌ای از تأثیر یک عامل غیر تغذیه‌ای در افزایش ارزش انرژی‌زایی مؤثر جیره است که ممکن است به افزایش ارزش غذایی جیره و یا کاهش احتیاجات پرند و یا هر دو نسبت داده شود. یکی از مشکلات صنعت پرورش دام و به ویژه طیور این است که غالباً خوراک پلت شده از دوام و استحکام کمی برخوردار است (Moran, 1989). پلت‌های با استحکام کم به دلیل ایجاد خاکه بیشتر، مصرف خوراک را کاهش می‌دهند. نتایج تحقیقات نشان داده افزایش سطح خاکه در خوراک‌های پلت شده تأثیر معنی داری بر کاهش وزن و افزایش ضریب تبدیل جوجه‌های گوشتی داشته است (Rakic, 2012). همچنین یکی از مهم‌ترین مشکلات موجود در خطوط انتقال خوراک در کارخانه‌های خوراک دام نیز مقاومت خوراک پلت در مقابل شکستن است. گاهی میزان مواد نرم و خاکه تولید شده از خوراک پلت به بیش از ۵۰ درصد و یا حتی گاهی ۹۵ درصد می‌رسد (Moran, 1989)، از این رو بسیاری از تولیدکنندگان خوراک و پرورش‌دهندگان طیور به کیفیت فیزیکی خوراک پلت توجه خاصی دارند. کیفیت فیزیکی پلت معمولاً با استفاده از شاخص دوام پلت، $PD\bar{I}$ تعیین می‌گردد. هر چه خوراک پلت دارای شاخص دوام بالاتری باشد نشان دهنده این است که پلت، بیشتر می‌تواند قبل از تغذیه سالم باقی بماند. استفاده از ترکیبات چسباننده (بایندر) به منظور افزایش کیفیت فیزیکی خوراک پلت در مواردی که جیره به خودی خود نمی‌تواند به استانداردهای کیفی برسد توصیه شده است. یکی از ترکیبات مؤثر در پلت سازی خوراک دام و طیور بنتونیت است. این ترکیبات تنها موجب باند شدن و چسبیدن اجزای خوراکی به هم شده و تأثیری بر ارزش تغذیه‌ای خوراک ندارند.

کشور ما و به‌ویژه استان خراسان جنوبی دارای ذخایر معدنی فراوانی از جمله بنتونیت بوده که متأسفانه به دلیل عدم شناخت کافی از ترکیبات و ویژگی‌های آن‌ها، استفاده مؤثری از آن‌ها نمی‌شود و اغلب به صورت خام فروشی مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. این در حالی است که سالانه حجم عظیمی از همین مواد با برندهای مختلف تجاری و با قیمت‌هایی بسیار بالا به کشور وارد می‌شود. از این‌رو هدف از انجام این تحقیق تعیین مشخصات و ارزیابی کیفیت نمونه‌های بنتونیت استان خراسان جنوبی و تعیین اثر آن‌ها بر شاخص کیفیت فیزیکی خوراک پلت بود.

روش‌شناسی پژوهش

آماده‌سازی نمونه‌ها و آنالیزهای آزمایشگاهی

ابتدا ۱۳ نمونه بنتونیت از معادن مختلف استان خراسان جنوبی طبق روش‌های استاندارد نمونه‌گیری و انتخاب گردید. به منظور دریافت نمونه‌های واقعی از هر معدن که تا حد مطلوبی بیانگر نمونه واقعی آن معدن باشد، ابتدا در نقاط مختلف معدن چاهک‌هایی حفر گردیده (۱۰ چاهک) و از هر چاهک یک نمونه تهیه و نمونه‌ها با هم مخلوط شدند. مشخصات چاهک‌ها، ارتفاع چاهک‌ها و نحوه نمونه‌برداری، مطابق با شرایط استاندارد نمونه‌برداری از معادن انجام پذیرفت و نحوه زدن چاهک‌ها، تعداد چاهک‌ها، نحوه مخلوط کردن و نحوه نمونه‌برداری توسط مهندس معدن رعایت شد. نمونه‌های بدست آمده ابتدا خشک شدند و سپس توسط آسیاب غلطکی مخصوص (IKA مدل MF10 BASIC ساخت آلمان) به خوبی پودر شدند. سپس نمونه‌ها با استفاده از الک با اندازه منافذ ۱۰۵ میکرومتر (الک شماره ۳۲۵) غربال شدند. به منظور تعیین محتوای رطوبت، نمونه‌های آزمایشی با دقت وزنی ۰/۰۰۰۱ گرم توزین شده و در آون در دمای 105 ± 5 درجه سانتی‌گراد

قرار داده شدند و در مدت زمان‌های معین (هر نیم ساعت) توزین شدند تا به وزن ثابت برسند. درصد رطوبت نمونه‌ها بر اساس روش ASTM D2974-00 محاسبه گردید (ASTM, 2000).

برای اندازه‌گیری pH، مقدار ۸ گرم نمونه‌ی خشک به آرامی به داخل بشر حاوی ۱۰۰ میلی‌لیتر آب دو بار تقطیر در دمای محیط اضافه گردید. سپس به کمک مگنت به مدت ۵ دقیقه مخلوط شد تا از تشکیل سوسپانسیون یکنواخت اطمینان حاصل گردد. سپس عدد دستگاه pH متر (مدل METROHM 727 pH LAB) قرائت شد (ASTM, 2001).

برای تعیین میزان جذب آب، ۴ گرم نمونه‌ی خشک بر روی کاغذ صافی ریخته شد و سپس کاغذ صافی بر روی صفحه فلزی مخصوص غوطه‌ور در آب قرار داده شد تا به تدریج آب توسط نمونه بنتونیت جذب گردد. پس از ۴ ساعت، نمونه بنتونیت و کاغذ صافی (دارای آب جذب شده) توزین شده و مقدار جذب آب نمونه با کسر وزن اولیه کاغذ صافی و نمونه بنتونیت خشک، محاسبه شد (McDonald & Kawatra, 2017).

برای تعیین شاخص تورم نمونه‌ها طبق روش ASTM D 5890-02 ابتدا مقدار ۲ گرم بنتونیت خشک به استوانه مدرج حاوی ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه گردید و پس از ۱۶ ساعت، حجم نمونه بنتونیت متورم در انتهای استوانه مدرج به عنوان شاخص تورم در نظر گرفته شد (ASTM, 2002).

برای تعیین شاخص رسوب، یک گرم نمونه بنتونیت مرطوب با درصد رطوبت مشخص توزین شد و به تدریج داخل بشر حاوی ۹۰ میلی‌لیتر آب مقطر ریخته شد. مخلوط حاصل توسط همزن مغناطیسی با دور بالا به مدت ۵ دقیقه به خوبی هم زده شد تا همگن شود. سپس ۱۰ میلی‌لیتر محلول کلرید آمونیوم یک نرمال به مخلوط اضافه گردید و مخلوط دوباره همزده شد. کلرید آمونیوم نقش پراکنده‌ساز را به عهده دارد. سپس مخلوط حاوی سوسپانسیون بنتونیت و کلرید آمونیوم به داخل استوانه مدرج ۱۰۰ میلی‌لیتری منتقل شدند و پس از ۷۲ ساعت، حجم رسوب در استوانه مدرج اندازه‌گیری گردید. شاخص رسوب، از رابطه زیر محاسبه شد (Kermanshahi et al., 2014).

$$SI = \frac{v}{100} - M \times 100$$

در این معادله، SI شاخص رسوب (میلی‌لیتر بر گرم)، V حجم رسوب بر حسب میلی‌لیتر و M درصد وزنی رطوبت همراه نمونه است.

برای اندازه‌گیری مقدار عناصر معدنی در نمونه‌های بنتونیت از دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی (مدل Conter AA700) استفاده شد. برای این منظور ابتدا از نمونه مورد نظر خاکستر تهیه شد و به آن ۱۰ میلی‌لیتر آب دیونیزه اضافه شد. سپس ۳-۴ میلی‌لیتر اسید نیتریک افزوده و در دمای ۱۰۰ تا ۱۲۰ درجه سانتیگراد حرارت داده شد تا املاح خاکستر به صورت محلول درآید. در مرحله بعد ۱۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک به آن افزوده و به بالن ژوژه ۵۰ میلی‌لیتری منتقل شد. سپس ۱۰ میلی‌لیتر محلول لاتتانیوم ۱۰ درصد اضافه و به حجم رسانده شد. برای تهیه محلول استاندارد با رقیق کردن محلول مادر محلول‌هایی با غلظت‌های متفاوت از عناصر مختلف تهیه شد. غلظت‌های مورد استفاده در محدوده وسعت عمل دستگاه به صورت خطی و متناسب با مقدار عنصر مورد نظر در عصاره نمونه بود. ابتدا دستگاه با محلول استاندارد که حاوی صفر میلی‌گرم در لیتر از عنصر بود روی صفر تنظیم و سپس شدت جذب هر کدام از محلول‌های استاندارد اندازه‌گیری شد. با همین روش شدت جذب نور محلول خاکستر اندازه‌گیری شد. در صورتی که شدت جذب محلول خاکستر خیلی بالا می‌بود مقدار معینی از آن را با آب مقطر رقیق کرده و اندازه‌گیری تکرار می‌شد. از روی شدت جذب محلول خاکستر عناصر معدنی موجود در نمونه اولیه به شرح زیر محاسبه شد (Hoenig & Kersabiec, 1996):

$$100 \times \frac{\text{غلظت محلول رقیق شده}}{\text{وزن نمونه (گرم) + حجم خاکستر رقیق شده}} = \text{عنصر معدنی (درصد)}$$

تهیه خوراک پلت و تعیین سختی آن

بر اساس آنالیزهای آزمایشگاهی فوق و با توجه به تفاوت در میزان جذب آب و همچنین امکان دسترسی گسترده به معادن آن‌ها، دو نمونه بنتونیت (نمونه‌های شماره ۹ با درصد جذب آب بالا و نمونه شماره ۱۱ با درصد جذب آب پایین) برای انجام بخش دوم آزمایش انتخاب شدند و به ترتیب بنتونیت‌های A و B نام‌گذاری شدند. سپس نمونه‌های منتخب هر کدام در سطوح یک و دو درصد به کنسانتره میان‌دان جوجه گوشتی اضافه و پلت گردید (دستگاه پلت مویانگ^۱ چین، دمای کاندیشنر ۷۵-۸۵ درجه سانتیگراد، رطوبت خوراک در کاندیشنر حدود ۱۵ درصد، مدت زمان کاندیشنینگ با بخار حدود ۴۵ ثانیه، رطوبت خوراک پلت شده پس از خنک سازی حدود ۱۲ درصد و سایز پلت ۲ تا ۳ میلیمتر بود و توزیع طول ذرات پلت یکنواخت بود). سپس از هر یک از پنج تیمار آزمایشی شامل شاهد (کنسانتره فاقد بنتونیت)، A₁ (کنسانتره حاوی ۱ درصد بنتونیت نوع A)، A₂ (کنسانتره حاوی ۲ درصد بنتونیت نوع A)، B₁ (کنسانتره حاوی ۱ درصد بنتونیت نوع B) و B₂ (کنسانتره حاوی ۲ درصد بنتونیت نوع B)، مقدار یک تن خوراک پلت شده تهیه گردید و پس از سرد شدن از هر تیمار به طور تصادفی چندین نمونه برداشت شد و برای انجام آزمون تعیین شاخص دوام پلت مورد استفاده قرار گرفتند. آزمون تعیین سختی به سه روش تامبل^۲، هولمن^۳ و کاهل^۴ انجام شد.

تست تامبل: برای انجام این تست از دستگاه *Tumbling boxes (Seedburo)* استفاده شد. بدین منظور مقدار ۱۰۰ گرم از هر نمونه خوراک پلت با الکی با اندازه منافذ ۲ میلی متر، الک شده و به مدت پنج دقیقه در دستگاه با دور موتور ۵۰ دور در دقیقه قرار داده شد و پس از اندازه‌گیری پلت‌های سالم و مقدار خاکه بدست آمده عدد نهایی به صورت درصد گزارش شد (Schieidler, 1995).

$$PDI = \frac{\text{وزن خاکه}}{\text{کل وزن}} \times 100$$

تست هولمن: برای انجام این تست از دستگاه *Holmen NHP 100 (TekPro; Norfolk, GBR)* استفاده شد. بدین منظور ۱۰۰ گرم نمونه خوراک پلت بدون خاکه به مدت ۳۰ ثانیه در دستگاه در معرض فشار هوایی برابر با ۷۰ میلی بار قرار

1. Muiyang
2. Tumbler
3. Holmen
4. Kahl

گرفت. سپس خاکه حاصله در دستگاه جمع‌آوری و توزین شد و شاخص دوام پلت پلت با استفاده از فرمول ارایه شده در روش تست تامل تعیین شد.

تست کاهل: برای انجام این تست از دستگاه *Kahl (Hamburg, GER)* استفاده شد. در این روش پلت در بین دو میله قرار داده شد و به وسیله نیروی وارد شده بوسیله فنر، نیروی لازم برای شکستن پلت مشخص شد و بر اساس واحد نیوتن بر کیلوگرم اندازه‌گیری گردید.

برای تجزیه تحلیل داده‌های بدست آمده از طرح کاملاً تصادفی به صورت $Y_{ij} = \mu + T_i + e_{ij}$ استفاده شد، که در این طرح Y_{ij} متغیر وابسته، μ میانگین مشاهدات، T_i اثر تیمار و e_{ij} اثر خطا، بودند.

برای تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایش از طرح کاملاً تصادفی استفاده شد و داده‌ها با استفاده از نرم افزار *SAS* (نسخه ۹،۱)، رویه مدل خطی عمومی (GLM) تجزیه و تحلیل آماری شده و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون توکی کرامر در سطح ۵ درصد خطا استفاده گردید.

یافته‌های پژوهش و بحث

بررسی خصوصیات فیزیکی نمونه‌های بنتونیت

همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است تنوع زیادی از نظر خصوصیات فیزیکی در نمونه‌های مختلف بنتونیت به چشم می‌خورد. با این وجود، دامنه تغییرات پارامترهای اندازه‌گیری شده در این تحقیق مطابق با دامنه تغییرات آن‌ها در مطالعات سایر محققان بود (*Hayati ashtiani, 2004, Garcia-Morales et al., 2004, Fahrenholz, 2012, Rainer, 2007, Kermanshahiet al., 2014*). حداکثر و حداقل رطوبت به ترتیب در نمونه‌های شماره ۱۱ و ۲ با ضریب تغییرات ۲۶ درصد، مشاهده شد. (*Mojtahedi (2013)* با بررسی پنج نمونه مختلف بنتونیت، میزان رطوبت آن‌ها را در محدوده ۰/۲۳ تا ۶/۲۵ درصد گزارش کرد. حداکثر و حداقل مقدار pH به ترتیب مربوط به نمونه‌های شماره ۱ و ۵ با ضریب تغییرات ۸/۹ درصد بود که این مقدار نشان می‌دهد کاتیون‌های قلیایی قابل تبادل در بین لایه‌های ساختار نمونه شماره ۱ بیش از سایر نمونه‌ها بوده است که با حل شدن در آب منجر به بالا رفتن میزان pH محلول شده است (*Garcia-Morales, 2014*). *Hayati ashtiani, (2004)* بیان داشتند که مشاهده pH قلیایی در آلومینیوسیلیکات‌ها رایج می‌باشد، همان‌طور که در ترکیبات حاوی مونتموریلونیت دیده می‌شود. (*Mojtahedi (2013)* با آنالیز چند نمونه بنتونیت، pH نمونه‌های آزمایشی را در محدوده ۸/۰۱ تا ۹/۵۱ گزارش کرد. حداکثر و حداقل میزان تورم به ترتیب در نمونه‌های شماره ۵ و ۱۰ با ضریب تغییرات ۲۶ درصد مشاهده شد. بنتونیت یک ماده رسی طبیعی است که کانی مونتموریلونیت، از گروه اسمکتیت‌ها، معمولاً جزء اصلی آن را تشکیل می‌دهد. مونتموریلونیت دارای ساختار لایه‌ای ۲:۱ بوده و هر واحد ساختاری آن از دو ورقه چهاروجهی سیلیس-اکسیژن در طرفین یک ورقه هشت‌وجهی آلومینیوم-اکسیژن تشکیل شده است. جانشینی ایزومورفیک برخی کاتیون‌ها، از جمله جایگزینی Mg^{2+} به جای Al^{3+} در ورقه هشت‌وجهی، موجب ایجاد بار منفی خالص در ساختار بلوری می‌شود. این بار منفی به وسیله کاتیون‌های تبدلی موجود در فضای بین لایه‌ای، از جمله Na^+ ، Ca^{2+} و Mg^{2+} ، جبران می‌گردد. (*García-Romero et al., 2021*). هنگامی که بنتونیت در معرض آب قرار می‌گیرد، مولکول‌های آب به سطح ذرات و فضای بین لایه‌ای وارد شده و موجب آب‌پوشی کاتیون‌های تبدلی و افزایش فاصله بین لایه‌های بلوری می‌شوند. با ادامه جذب آب، نیروهای دافعه الکترواستاتیکی بین سطوح منفی ذرات افزایش یافته و تورم اسمزی رخ می‌دهد. میزان تورم بنتونیت به عواملی مانند مقدار مونتموریلونیت، بار لایه، ظرفیت تبادل کاتیونی، نوع کاتیون تبدلی، ظرفیت و شعاع اتمی کاتیون‌های تبدلی، غلظت الکترولیت و چگالی خشک نمونه وابسته است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی نمونه‌های مختلف بنتونیت مورد مطالعه

Table 1 – Physical characteristics of studied bentonites

شماره نمونه Sample number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	SEM	P-value
رطوبت (درصد) Moisture (%)	6.18 ^e	4.63 ^j	5.42 ^{gh}	5.19 ^h	6.96 ^d	4.68 ⁱ	6.01 ^{ef}	5.12 ^{hi}	5.69 ^{fg}	7.27 ^d	9.94 ^a	8.89 ^b	8.5 ^c	0.1273	0.001
pH	10.18 ^a	10.13 ^a	8.37 ^g	9.42 ^{de}	7.72 ^h	7.86 ^h	9.16 ^e	8.54 ^f	6.46 ^{cde}	8.54 ^f	9.42 ^{cd}	9.61 ^{bc}	9.77 ^b	0.067	0.001
اندیس تورم (میلی لیتر) Inflation index (ml)	12 ^{de}	12 ^{de}	19 ^b	19 ^b	22 ^a	21 ^a	13 ^d	21 ^a	15 ^c	10 ^e	15 ^c	12 ^{de}	21 ^a	0.635	0.001
اندیس رسوب (میلی لیتر) Sedimentation index (ml)	10.65 ^e	11.53 ^e	33.8 ^{bc}	44.2 ^a	33.3 ^{bc}	31.4 ^c	10.63 ^e	44.2 ^a	14.6 ^{de}	11.8 ^{de}	8.3 ^e	21 ^d	36 ^b	1.881	0.001
میزان جذب آب (درصد) Water absorption rate (%)	250 ^e	286 ^d	423.25 ^a	376.75 ^{ab}	350.75 ^{ab}	323.25 ^{cd}	325.25 ^{cd}	376.75 ^{ab}	328 ^{cd}	236.5 ^e	275.75 ^{cd}	320.84 ^{cd}	347.24 ^{bc}	17.38	0.001

به طور کلی، بنتونیت‌های غنی از سدیم در مقایسه با بنتونیت‌های غنی از کلسیم، ظرفیت تورم بیشتری دارند (Li et al., 2025). از عوامل مهم در تعیین کیفیت بنتونیت‌ها به منظور برخی مصارف، میزان ژله‌ای شدن بنتونیت است. در صورتی که بنتونیت حاوی مقدار زیادی مواد غیر رسی میکا، کوارتز و فلدسپار^۱ باشد، دارای وزن مخصوص بیشتر و در عین حال شاخص تورم پایین‌تری است (Rainer, 2007). بالا بودن میزان تورم برای نمونه شماره ۵ نشان می‌دهد که تعداد مولکول‌های آب که در لایه‌های این نمونه قرار گرفته‌اند بیش از سایر نمونه‌ها می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که فاصله بین لایه‌ای این نمونه بیش از سایر نمونه‌ها بوده است. حداکثر و حداقل مقدار شاخص رسوب مربوط به نمونه‌های شماره ۴ و ۸ با ضریب تغییرات ۵۶ درصد بود. شاخص رسوب توسط Mojtabehi (2013) برای پنج نمونه بنتونیت مورد ارزیابی قرار گرفت و در محدوده ۶ تا ۳۵ گزارش گردید. حداکثر و حداقل میزان جذب آب به ترتیب مربوط به نمونه‌های شماره ۲ و ۱۰ با ضریب تغییرات ۱۶ درصد بود. آزمایش میزان جذب آب، قدرت جذب توسط نمونه‌های مختلف بنتونیت را نشان می‌دهد. پیوند میان ورقه‌ها در بنتونیت، پیوند ضعیف واندروالسی است؛ در نتیجه، لایه‌ها به راحتی روی یکدیگر می‌لغزند و در اثر لمس کردن، به حالت چرب ماندنی حس می‌شوند. در اثر همین خاصیت، موقعی که در محیط آبی قرار می‌گیرند، مولکول‌های آب به راحتی در بین لایه‌ها قرار گرفته به گونه‌ای که هر ذره تا ۲۰ برابر متورم می‌شود (Rainer, 2007). در بین خصوصیات فیزیکی مطالعه شده بیشترین دامنه تغییرات مربوط به میزان جذب آب با ۱۸۶/۷۵ درصد و کمترین دامنه تغییرات مربوط به pH با ۲/۴۶ درصد بود.

در جدول ۲ غلظت عناصر معنی نمونه‌های بنتونیت منتخب ارایه شده است. مقدار عناصر کلسیم، پتاسیم و روی در نمونه A و مقدار عناصر سدیم، منیزیم، منگنز و آهن در نمونه B بیشتر می‌باشد و مقدار عنصر مس در هر دو نمونه برابر است. ضمناً عناصر آرسنیک، قلع، جیوه و نیکل به دلیل مقدار بسیار کم، توسط دستگاه قابل اندازه‌گیری نبودند. با توجه به آزمایش‌های انجام شده این طور به نظر می‌رسد که نمونه بنتونیت A از نوع کلسیمی و نمونه بنتونیت B از نوع سدیمی است.

جدول ۲- غلظت عناصر معدنی در نمونه‌های بنتونیت منتخب

Table 2- Mineral concentration in selected bentonite samples

عنصر (قسمت در میلیون) Element (ppm)	مس Cu	روی Zn	پتاسیم K	آهن Fe	منگنز Mn	سدیم Na	منیزیم Mg	کلسیم Ca
نمونه A Sample A	2.11	0.06	20.35	1.02	0.98	68.9	279	172
نمونه B Sample B	2.11	0.02	18.16	11.59	1.22	75.7	325	104

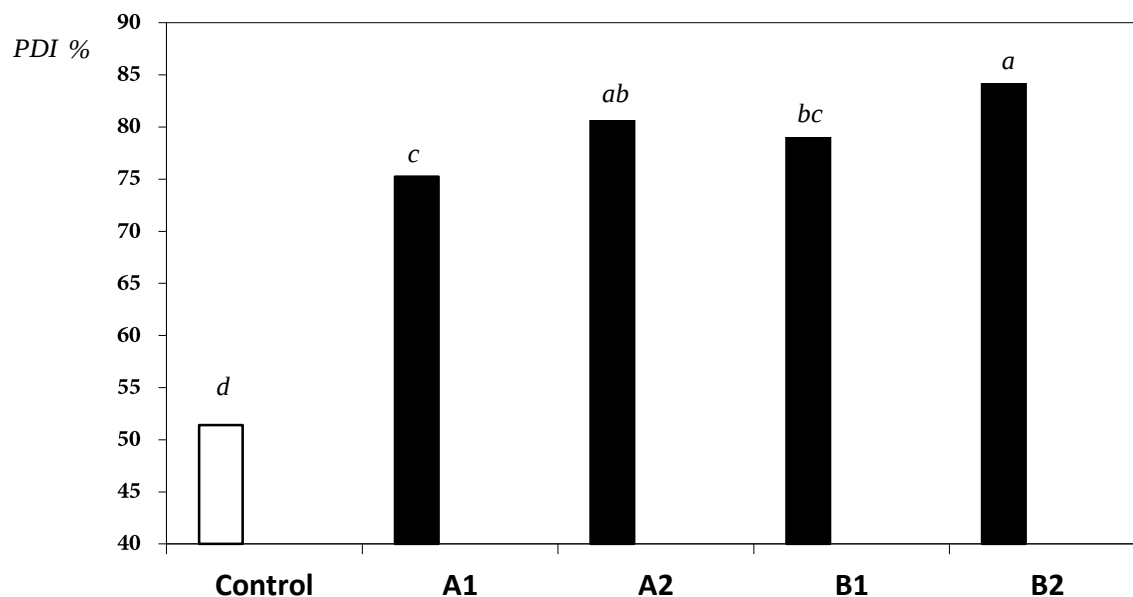
غلظت برخی مواد معدنی موجود در بنتونیت که در آزمایشات مختلف تعیین شده است به شرح جدول ۳ می‌باشد.

جدول ۳- غلظت برخی مواد معدنی (درصد ماده خشک) موجود در بنتونیت در آزمایشات مختلف
Table 3- Concentration of some minerals (percentage of dry matter) in bentonite in different experiments

عنصر معدنی	کارالک و همکاران (۲۰۰۶)	آهونن (۲۰۰۸)	خانه بنتونیت ایران (۲۰۱۶)
TiO ₂	0.08	–	0.69
K ₂ O	0.11	0.6	0.29
Na ₂ O	–	2.1	2.78
CaO	2.19	1.4	2.38
MgO	3.8	2.6	2.8
MnO	0.16	–	–
Fe ₂ O ₃	1.74	3.9	6.9
Al ₂ O ₃	14.18	20.4	13.30
SiO ₂	58.48	61.8	57.58

بررسی تأثیر افزودن بنتونیت بر کیفیت فیزیکی (سختی) خوراک پلت

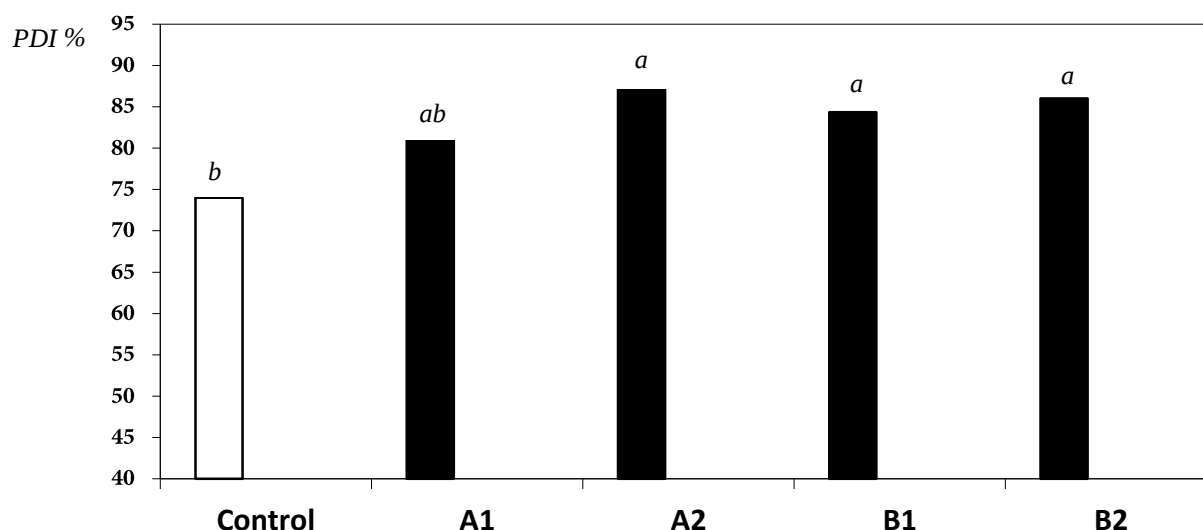
تست هولمن: همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است افزودن ۱ و ۲ درصد از هر یک از دو نمونه بنتونیت A و B باعث افزایش معنی دار ($P < 0.05$) شاخص PDI خوراک پلت شد، اما افزودن ۲ درصد از بنتونیت نوع B بیشترین اختلاف معنی داری را با نمونه شاهد (کنسانتره فاقد بنتونیت) نشان داد. کمترین اختلاف با نمونه شاهد مربوط به نمونه A₁ بود. افزودن ۱ درصد از بنتونیت نوع B در مقایسه با افزودن ۲ درصد از بنتونیت نوع A اختلاف بسیار اندکی را نشان داد، پس با توجه به فرمول جیره و وضعیت اقتصادی، می‌توان برای کاربردهای مختلف تصمیم مناسب را گرفت. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که بنتونیت نوع B اثر بیشتری از بنتونیت نوع A، برای استحکام بخشیدن بیشتر به خوراک پلت را داشت و احتمالاً در کارخانه و مسیر انتقال از کارخانه تا مزرعه و همچنین در خطوط انتقال خوراک در مزرعه کمترین شکستگی خوراک پلت را سبب خواهد شد. علت این امر می‌تواند مربوط به خواص فیزیکی و شیمیایی بنتونیت نوع B باشد. همانگونه که گفته شد بنتونیت نوع B از نوع سدیمی می‌باشد و بنتونیت‌های نوع سدیمی معمولاً دارای قابلیت چسبندگی و شکل‌پذیری و قابلیت انقباض و انبساط بالاتری هستند. تحقیقات کمی در مورد اثر ترکیبات معدنی پلت چسبان بر کیفیت فیزیکی خوراک پلت انجام شده است. Briggs et al. (1999) و Gilpin et al. (2002) یک همبستگی منفی بین استحکام پلت و تولید خاکه‌های پلت مشاهده نمودند. Fahrenholz (2012) نیز نشان داد که افزودن ۲ درصد بنتونیت به پلت‌های دارای مقدار متوسط ذرت و سویا، میزان خاکه پلت را از ۱۱/۷ به ۸/۷ درصد کاهش داد. نتایج مشابهی توسط کمیته امنیت غذای اروپا (EFSA, 2010) بدست آمد. نتایج تحقیق حاضر نیز نشان داد که با افزایش استحکام پلت تولید خاکه کم می‌شود و با افزایش میزان بنتونیت در خوراک پلت از ۱ به ۲ درصد، استحکام پلت نیز افزایش یافت، هر چند که در تحقیق حاضر با بالا رفتن میزان بنتونیت در خوراک پلت افزایش زیادتری در مقایسه با آزمایشات فوق در شاخص PDI آن مشاهده شد.



شکل ۱- تاثیر نوع و سطح بنتونیت مورد مطالعه بر شاخص PDI خوراک پلت (به روش تست هولمن)
Figure 1- Effect of bentonite type and level on PDI index of pelleted feed (Holmen testing method)

A₁: افزودن ۱ درصد بنتونیت نوع A، A₂: افزودن ۲ درصد بنتونیت نوع A، B₁: افزودن ۱ درصد بنتونیت نوع B، B₂: افزودن ۲ درصد بنتونیت نوع B

تست تامبل: نتایج مربوط به تست تامبل در شکل ۲ ارائه شده است. با افزودن سطوح مختلف بنتونیت تغییر واضحی در کیفیت فیزیکی خوراک پلت مشاهده شد. در این تست بر خلاف تست هولمن نمونه A₂ بیشترین PDI را به لحاظ عددی نشان داد اما از لحاظ آماری نمونه A₂ با نمونه B₁ و B₂ و A₁ تفاوت معنی داری را نشان نداد. همچنین نمونه A₁ با نمونه شاهد تفاوت معنی دار آماری نداشت.

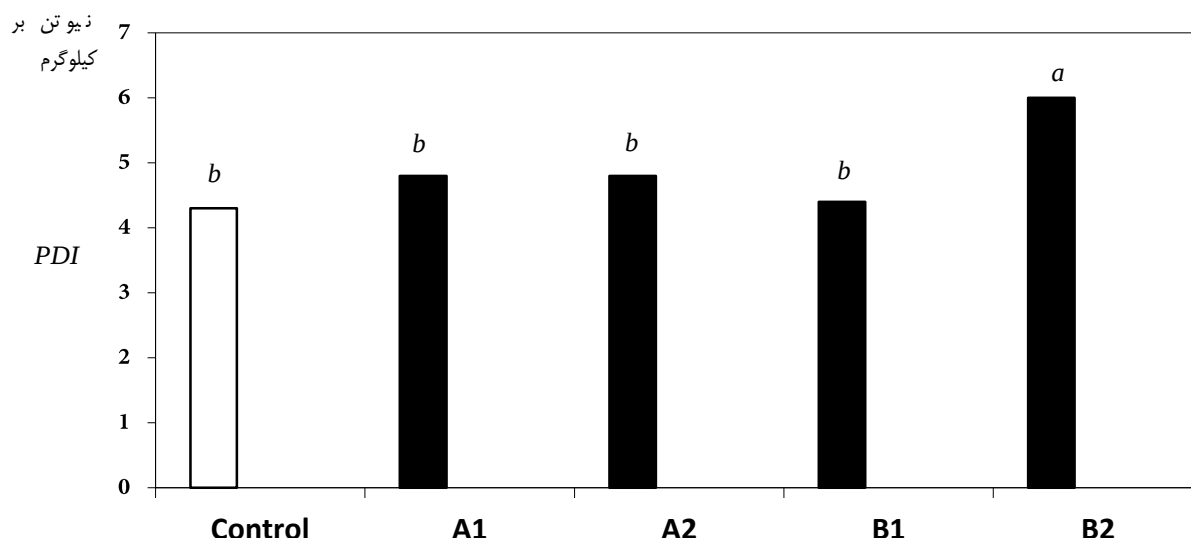


شکل ۲- تاثیر نوع و سطح بنتونیت مورد مطالعه بر شاخص PDI خوراک پلت (به روش تست تامبل)
Figure 2- Effect of bentonite type and level on PDI index of pelleted feed (Tumbler testing method)

A₁: افزودن ۱ درصد بنتونیت نوع A، A₂: افزودن ۲ درصد بنتونیت نوع A، B₁: افزودن ۱ درصد بنتونیت نوع B، B₂: افزودن ۲ درصد بنتونیت نوع B

تست کاهل: این تست بر خلاف تست هولمن و تست تامبل، نشان دهنده قدرت استحکام پلت در مقابل ضربه می‌باشد. نتیجه آزمایش با این تست نشان دهنده توانایی خوراک پلت در برابر فشار و ضربات وارده به خوراک پلت شده در مخزن یا درون کیسه را بیان می‌کند؛ اما تست‌های سایشی (هولمن و تامبل) برای تشخیص کیفیت خوراک پلت در برابر فشارهایی مانند استفاده از انتقال دهنده‌های مارپیچی یا سایر انتقال دهنده‌ها استفاده می‌شود.

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود تیمار B_2 بیشترین شاخص استحکام پلت را داشت. تیمارهای A_2 و A_1 به لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد نداشتند.



شکل ۳ - تاثیر نوع و سطح نمونه‌های بنتونیت مورد مطالعه بر شاخص PDI خوراک پلت (به روش تست کاهل)
Figure 3 - Effect of bentonite type and level on PDI index of pelleted feed (Kahl testing method)

A_1 : افزودن ۱ درصد بنتونیت نوع A، A_2 : افزودن ۲ درصد بنتونیت نوع A، B_1 : افزودن ۱ درصد بنتونیت نوع B، B_2 : افزودن ۲ درصد بنتونیت نوع B

از بین روش‌های رایج برای تعیین استحکام خوراک پلت سه روش تست هولمن، تست تامبل و تست کاهل بیشترین کاربرد را دارند. تست تامبل به عنوان یک روش استاندارد بیشترین استفاده را در آمریکا دارد، در حالی که کشورهای اروپایی بیشتر از تست هولمن استفاده می‌کنند (Calarge et al., 2006). Winowski (1998) بیان کرد که کار با دستگاه هولمن در مقایسه با دستگاه تامبل سخت‌تر ولی نتیجه‌ی آن مقدار PDI دقیق‌تر است. Thomas & Vanderpoel (1996) کیفیت فیزیکی خوراک پلت حیوانات را بوسیله دستگاه‌های هولمن و تامبل مورد آزمون قرار دادند و نتیجه گرفتند که نتایج تست هولمن از ضریب تغییرات بیشتری برخوردار است (۶۰ تا ۹۵ درصد) و سرعت انجام کار بیشتر است. در حالی که نتایج تست تامبل دارای ضریب تغییرات کمتری است (۹۱ تا ۹۸ درصد) و سرعت انجام کار کندتر است. Fahrenholz (2012) استفاده از روش تامبل را برتر از روش هولمن دانست و علت آن را استفاده از حجم نمونه بزرگتر و در نتیجه انتخاب پلت‌های متفاوت‌تر بیان نمود. وی همچنین بیان کرد که استفاده از تجهیزات ساده‌تر در طراحی دستگاه تامبل باعث کاهش خطا می‌گردد. نتایج این پژوهش با نتایج Winowski (1998) و Thomas & Vanderpoel (1996) ، مبنی بر دقت بالاتر دستگاه هولمن مطابقت دارد و با نتایج Fahrenholz (2012)، مبنی بر کاهش درصد خطا در دستگاه تامبل نسبت به دستگاه هولمن مغایر است. هنگامی که کیفیت پلت‌ها پایین است استفاده از دستگاه تامبل مناسب‌تر می‌باشد در حالی که استفاده از دستگاه هولمن به علت دقت کار بالاتر هنگامی که پلت‌ها دارای کیفیت بالایی هستند

توصیه می‌شود (Calarge et al. 2006). مقایسه دیگری بین دستگاه تامل و هولمن توسط (Winowski 1998) انجام شد. وی اظهار داشت که یک ارتباط معنی داری بین نتایج تست تامل و تست هولمن وجود دارد و می‌توان از نتایج یک تست برای پیشگویی نتایج تست دیگر استفاده کرد.

نتایج آزمایش حاضر نشان داد تست تامل دامنه تغییرات کمتری نسبت به تست هولمن داشت (۶/۷ درصد در مقابل ۱۷ درصد) و این بدان معنی است که تست هولمن *PDI* دقیق‌تری را ارائه می‌نماید زیرا قادر است اختلاف بین نمونه‌ها را بهتر نشان دهد.

نتیجه‌گیری

نتایج این آزمایش نشان داد افزودن بنتونیت در سطوح ۱ و ۲ درصد باعث افزایش معنی دار دوام خوراک پلت می‌گردد و نمونه‌های مختلف بنتونیت به لحاظ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و همچنین غلظت عناصر معدنی کاملاً متنوعند و باید هنگام استفاده از هر نوع نمونه بنتونیت حتماً آزمایشات لازم برای اطمینان از میزان خلوص و دیگر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن انجام پذیرد. همچنین انجام آزمایشات مزرعه‌ای جهت اندازه‌گیری شاخص‌هایی مانند مصرف خوراک، ضریب تبدیل غذایی، رشد و قابلیت هضم مواد مغذی پیشنهاد می‌شود. همچنین با توجه به نتایج بدست آمده از این آزمایش، به نظر می‌رسد تست هولمن، استاندارد بهتری برای تعیین کیفیت فیزیکی پلت و تعیین شاخص *PDI* می‌باشد.

منابع

- Abdollahi, M. R. (2011). Influence of feed processing on the performance, nutrient utilisation and gut development of poultry and feed quality. Ph.D. Thesis. Massey University, Palmerston North. New Zealand.
- Acer, N., E. T. Moran, W. H. Revington, and S. F. Bilgili. (1991). Effect of improved pellet quality from using a calcium lignosulphonate binder on performance and carcass yield of broiler reared under different marketing schemes. *Poultry Science*, 70: 1339-1344.
- Ahonen, L., Korkeakoski, P., Tiljander, M., Kivikoski, H., Laaksonen, R. (2008). Quality assurance of the bentonite material. POSIVA OY. Working Report, 33.
- ASAE. (1997). Cubes, pellets, and crumbles-definitions and methods for determining density, durability, and moisture content. ASAE Standard S269.4. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, MI.
- ASTM D2974-00, (2000). Standard test method for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soil. ASTM international, West Conshohocken, PA, United States.
- ASTM D4972-1, (2001). Standard test method for pH of soils. ASTM International, West Conshohocken, PA, United States.
- ASTM D5890-02, (2002). Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Briggs, J. L., D. E. Maier, B. A. Watkins, and K. C. Behnke. (1999). Effects of ingredients and processing parameters on pellet quality. *Poultry Science*, 78: 1464-1471.
- Calarge, L., Meunier, A., Lanson, B., Formoso, M. (2006). Chemical signature of two Permian volcanic ash deposits within a bentonite bed from Melo, Uruguay. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, 78(3): 525-541.
- EFSA Panel on Additives and Products or Substances Used In Animal Feed (FEEDAP). (2010). Scientific opinion on the safety and efficacy of bentonite as a technological feed additive for all species. *European Food Safety Authority Journal*, 10(7): 2787. 19 pp.
- Fahrenholz, A. C. (2012). Evaluating factors affecting pellet durability and energy consumption in a pilot feed mill and comparing methods for evaluating pellet durability. Ph.D. Thesis. Kansas State University, Manhattan.
- Frank, M., and A. Rey. (2006). Improving pellet quality and efficiency. *Feed Technology Journal*, 10(3): 12-15.

- Garcia-Morales, A. R., R. Rosiles-Martinez., J. A. Bautisa-Ordonez, and E. vila-Gonzalez. (2004). In vitro binding ability of ochratoxin a by commercial mycotoxin binders available in Mexico. *Veterinary Medicine Journal*, 35(4): 351- 358.
- García-Romero, E., García-Vicente, A., Morales, J., García-Rivas, J., Suárez, M. (2021). On the structural formula of smectites: a review and new data on the influence of exchangeable cations. *Clay Minerals*, 56(1), 1–20.
- Gilpin, A. S., T. J. Herrman., K. C. Behnke, and F. J. Fairchild. (2002). Feed moisture, retention time, and steam as quality and energy utilization determinants in the pelleting process. *Applied Engineering in Agriculture*, 18(3): 331-338.
- Hayati ashtiani, M. 2004. Factors affecting the activation of bentonite. M.Sc. Thesis. University of Science and Technology of Iran.,T ehran. (In Persian).
- Hoenig, M., & de Kersabiec, A. M. (1996). Sample preparation steps for analysis by atomic spectroscopy methods: Present status. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 51(11), 1297–1307.
- Institute of Standards and Industrial Research of Iran. (2002). standard number 5857.
- Kannewische, I., M. G. Tenorio-Arvide, G. N. White, and J. B. Dixon. (2006). Smectite clays as adsorbents of aflatoxin B1: Initial steps. *Clay Science Journal*, 12(2):199-204.
- Kermanshahi, H., A. Attar., A. Abbaspoor, and E. Bayat. (2014). *Comprehensive guide technology and processing livestock and poultry and fish feed*. Pages 268-274. Vol 1. Kherad Tarjoman, Tehran. (In Persian).
- Li, L., Sun, H., Fang, X., Lu, L. (2025). The influence of temperature on the microstructure, atterberg limits, and swelling pressure of bentonite clay: A Review. *Geosciences*, 15(6), 233.
- McDonald, J., & Kawatra, S. K. (2017). Plate Water Absorption as an Assessment Tool for Organic Binders. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 38(4), 250–253.
- Mckinney, L. J. and R. G. Teeter. (2004). Predicting effective caloric value of nonnutritive factors: i. pellet quality and ii. prediction of consequential formulation dead zones. *Poultry Science Journal*, 83(7): 1165-1174.
- Mojtahedi, M. (2013). Characterization of nanostructured and nanoporous adsorbents bentonite and their efficacy in vitro and invivo to detoxify aflatoxin B1. Ph.D. Thesis. Ferdowsi University, Mashhad. (In Persian).
- Moran, E. T. (1989). Effect of pellet quality on the performance of meat birds. Pages 87-108 in: recent advances in animal nutrition. W. Haresign and D. J. A. Cole, ed. Butterworths, London.
- Mortiz, J. S. and K. G. S. Lilly. (2010). Production strategies and feeding opportunities for pellets of high quality. Pages 85-90 In Proc. Proceedings of the 8 annual mid-atlantic nutrition conference. University Of Maryland, College Park, Md.
- Rainer, L. (2007). Judging pellet stability as part of pellet quality. Research Institute of Feed Technology of IFF Braunschweig, Germany, Available at <http://www.Engormix.Com>.
- Rakic, L. (2012). Feed Structure: Effects on physical quality of the feed, chemical status of the feed and nutritional consequence. M.Sc. Thesis. Norwegian University of Life Science., Norway.
- Ralph, E. G. (1968). Clay Mineralogy. Page 596. Vol. 1. McGraw-Hill Book Co, New York, USA.
- Rollins, D., & M. Kenny. (2007). Feed physical quality. Available at <http://www.Aviagen.Com>.
- Schieldler, S. E. (1995). Is pelleting cost effective? *Feed Management Journal*. 46(1):21-26.
- Thomas, M., and A. F. B. Vanderpoel. (1996). Physical quality of pelleted animal feed criteria for pellet quality. *Animal Feed Science and Technology*, 61(1-4): 89-112.
- Wilson, T. (2010). Factors affecting wood pellet durability. M.Sc. Thesis. The Pennsylvania State University, Pennsylvania.
- Winowiski, T. (1998). Examining a new concept in measuring pellet quality: which test is best? *Feed Management Journal*, 49(1): 23-26.