Vol 28, No. 1, Spring 2026

University of Tehran Press

Journal of Animal Production

Online ISSN: 2382-994X

Homepage: https://jap.ut.ac.ir/

Comparison of NIR and wet chemistry methods for evaluation of chemical composition and nutrient digestibility in forage legumes

Jaber Khani Yousef Reza[1] | Ali Assadi-Alamuoti[2]✉ | Mojtaba Yari[3]

1. Department of Animal and Poultry Sciences, Aburayhan Faculty of Agricultural Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: j_khani@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Animal and Poultry Science, Aburayhan Faculty of Agricultural Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: a.alamouti@ut.ac.ir
3. Department of Animal Science, Faculty of Agriculture, Malayer University, Malayer, Iran. E-mail: myari@malayeru.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 19 July 2025
Received in revised form
21 January 2026
Accepted 14 February 2026
Published online 9 March 2026

Keywords:
CNCPS, forage quality
near-infrared reflectance spectroscopy
reference analytical methods
statistical agreement

ABSTRACT

Objective: Understanding chemical composition and nutritional quality of feedstuffs, especially forage crops, are important components of ration formulation, livestock performance, and production costs. Near-infrared reflectance (NIR) spectroscopy is becoming popular as a rapid, non-destructive, and cost-effective alternative to traditional wet chemistry methods for determining chemical composition and nutritional quality of feedstuffs. The objective of this study was to compare the accuracy of NIR with standard laboratory procedures in determining chemical constituents, protein and carbohydrate fractions according to the Cornell Net Carbohydrate and Protein System (CNCPS), and nutritional attributes of four legume forages.

Method: Organic matter (OM), ash, acid detergent lignin (ADL), crude protein (CP), neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF), starch, and CNCPS-based fractionation of protein and carbohydrates, and nutritional attributes such as potential dry matter intake (DMI), total digestible nutrients (TDN), digestible energy (DE), metabolizable energy (ME), and quality index (QI) were measured in forage samples from four species including two cultivars of common vetch (*Vicia sativa*) and hairy vetch (*Vicia villosa*), one cultivar of forage pea (*Pisum arvense*), and second-year alfalfa (*Medicago sativa*, used as the control crop). All analyses were conducted in parallel using NIR and the reference wet chemistry methods and statistical agreement and precision between the two methods were assessed using mean bias, root mean square error (RMSE), concordance correlation coefficient (CCC), and Bland–Altman limits of agreement (LOA).

Results: The NIR results were highly accurate and highly correlated (CCC> 0.85, P> 0.05) with wet chemistry methods for key components (CP, OM, starch, total carbohydrates, and fraction B1 (B1)), but acceptable precision was observed for predicting energy-related parameters (TDN, DE, and ME) which are critical for ration formulation. However, the accuracy and concordance declined, and statistically significant differences were observed for structural constituents (ADL, NDF, protein fractions (ADIP, NADIP) and carbohydrates (B2, B3, and C). This indicates that NIR has limited spectral sensitivity when evaluating slowly degradable or indigestible fractions of carbohydrate and protein, which are the parameters of dynamic nutritional models such as CNCPS.

Conclusions: Owing to special advantages, particularly speed, ease of operation, and applicability to field analyses, NIR can replace routine proximate analysis in feed laboratories; but conventional chemical methods provide more benefits for evaluation of CNCPS model components, especially those that resist digestion. The NIR integrated with classical approaches may represent a rational cost-effective strategy for extensive feed analyses.

Cite this article: Khani Yousef Reza, J., Assadi-Alamuoti, A., & Yari, M. (2026). Comparison of NIR and wet chemistry methods for evaluation of chemical composition and nutrient digestibility in forage legumes. *Journal of Animal Production*, 28 (1), 15-26. DOI: https://doi.org/10.22059/jap.2026.398903.623859

© The Author(s).
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/jap.2026.398903.623859

دوره بیست و هشتم، شماره اول، بهار ۱۴۰۵

انتشارات دانشگاه تهران

تولیدات دامی

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۲-۹۹۴x

Homepage: https://jap.ut.ac.ir/

مقایسه روش‌های NIR و شیمی مرطوب در ارزشیابی ترکیب شیمیایی و قابلیت هضم مواد مغذی در بقولات علوفه‌ای

جابر خانی‌یوسف‌رضا[۱] | علی اسدی‌الموتی[۲]✉ | مجتبی یاری[۳]

۱. گروه علوم دام و طیور، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: j_khani@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم دام و طیور، دانشکده فناوری کشاورزی ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: a.alamouti@ut.ac.ir

۳. گروه علوم دامی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: myari@malayeru.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۱۸

کلیدواژه‌ها:
توافق آماری
روش مرجع
اندازه‌گیری
طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک
کیفیت علوفه
CNCPS

چکیده

هدف: ارزیابی دقیق ترکیبات شیمیایی و کیفیت تغذیه‌ای خوراک‌های دامی، به‌ویژه گیاهان علوفه‌ای، نقش کلیدی در تدوین جیره‌های متعادل، ارتقای عملکرد دام و کاهش هزینه‌های تولید دارد. در میان روش‌های موجود، طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک (NIR) به‌عنوان روشی سریع، غیرمخرب، کم‌هزینه و بدون نیاز به مواد شیمیایی، جایگاه ویژه‌ای در آنالیز خوراک پیدا کرده است. این روش به‌دلیل سهولت اجرا و قابلیت تحلیل سریع نمونه‌ها، به‌ویژه در شرایط مزرعه، به‌عنوان جایگزینی عملی برای روش‌های شیمیایی مرسوم مطرح شده است. هدف این پژوهش، مقایسه دقت روش NIR با روش‌های آزمایشگاهی مرجع در برآورد ترکیبات شیمیایی، اجزای پروتئینی و کربوهیدراتی و شاخص‌های تغذیه‌ای گیاهان لگومینه با تمرکز بر مدل CNCPS بود.

روش پژوهش: نمونه‌های علوفه‌ای شامل دو رقم ماشک معمولی (*Vicia sativa*) و گل‌خوشه‌ای (*Vicia villosa*)، یک رقم نخود علوفه‌ای (*Pisum arvense*) و یونجه (*Medicago sativa*) به‌عنوان گیاه شاهد از نظر ماده آلی (OM)، پروتئین خام (CP)، الیاف نامحلول در شوینده خنثی (NDF)، الیاف نامحلول در شوینده اسیدی (ADF)، لیگنین (ADL)، نشاسته، خاکستر خام و بخش‌های پروتئین و کربوهیدرات براساس بخش‌بندی مورداستفاده در سامانه کربوهیدرات و پروتئین خالص کرنل CNCPS در سه تکرار اندازه‌گیری شدند. هم‌چنین شاخص‌های تغذیه‌ای شامل مصرف ماده خشک (DMI)، مجموع مواد مغذی قابل هضم (TDN)، انرژی قابل هضم (DE)، انرژی قابل متابولیسم (ME) و شاخص کیفیت (QI) با دو روش NIRو شیمی مرطوب برآورد شدند. برای بررسی تطابق آماری بین دو روش، از شاخص‌هایی مانند میانگین اختلاف (Bias)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تطابق کونکوردنس (CCC) و حد توافق بلاند–آلتمان (LOA) استفاده شد.

یافته‌ها: یافته‌ها نشان دادند که روش NIR در برآورد ترکیبات شیمیایی کلیدی مانند پروتئین خام، ماده آلی، نشاسته و کربوهیدرات‌های کل (CHO) و بخش B1 از دقت بالا و همبستگی قوی با روش مرجع برخوردار بود (CCC= ۰/۸۵). NIR هم‌چنین در تخمین شاخص‌های انرژی مانند TDN، DE و ME تطابق قابل قبولی داشت. با این‌حال، در ارزیابی اجزای ساختاری نظیر ADL، NDF و دیگر بخش‌های پروتئین (ADIP و NDIP) و بخش‌های کربوهیدرات (B2، B3 و C) دقت و تطابق کاهش یافته و اختلاف‌های آماری معنی‌داری با روش تجزیه شیمیایی مشاهده شد. این نتایج نشان می‌دهد که حساسیت طیفی روش NIR در تشخیص اجزای دیرهضم و غیرقابل تجزیه محدود بوده و برای تحلیل دقیق اجزای دینامیک مدل CNCPS مناسب نیست.

نتیجه‌گیری: روش NIR با توجه به قابلیت‌های منحصربه‌فرد خود، به‌ویژه سرعت، سهولت اجرا و سازگاری با آنالیزهای میدانی، می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد در غربال‌گری سریع، پایش کیفیت خوراک و کاربردهای روزمره در آزمایشگاه‌های تجزیه خوراک مورداستفاده قرار گیرد. با این‌حال، برای تحلیل دقیق اجزای مدل‌های دینامیکی تغذیه دام مانند CNCPS و اجزای مقاوم‌تر، همچنان استفاده از روش‌های شیمیایی مرجع دارای مزیت است. تلفیق NIR به‌عنوان ابزار مکمل در کنار روش‌های کلاسیک، می‌تواند رویکردی بهینه در آنالیز جامع خوراک دام فراهم سازد.

استناد: خانی‌یوسف‌رضا، جابر، اسدی‌الموتی، علی و یاری، مجتبی (۱۴۰۵). مقایسه روش‌های NIR و شیمی مرطوب در ارزشیابی ترکیب شیمیایی و قابلیت هضم مواد مغذی در بقولات علوفه‌ای. *نشریه تولیدات دامی*، ۲۸ (۱)، ۱۵–۲۶. DOI: https://doi.org/10.22059/jap.2026.398903.623859

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

CC BY NC

۱. مقدمه

علوفه نقش حیاتی در جیره گاوهای شیری و گوشتی دارد و مواد مغذی ضروری را فراهم کرده و از سلامت کلی دام حمایت می‌کند. حبوبات یکی از مهم‌ترین انواع علوفه هستند و به‌عنوان یک منبع غنی پروتئین گیاهی و یک جزء کلیدی تغذیه‌ای برای دام‌ها عمل می‌کنند. استفاده از علوفه‌های لگومینه در مقایسه با بسیاری از محصولات خوراکی دیگر به‌دلیل محتوای بالای پروتئین، بسیار گران قیمت و پرهزینه می‌باشند. به همین دلیل ارزیابی کیفیت تغذیه‌ای گیاهان علوفه‌ای به دلایل اقتصادی و هم‌چنین عملکرد تغذیه‌ای، یکی از ارکان اساسی در تغذیه دام و افزایش بهره‌وری تولیدات دامی به‌شمار می‌رود. تعیین دقیق ترکیبات شیمیایی و قابلیت هضم اجزای خوراکی، مبنای برنامه‌ریزی برای جیره‌نویسی دقیق و بهینه‌سازی هزینه‌های تغذیه‌ای است (Palmonari *et al*., 2016). روش‌های مرسوم آزمایشگاهی برای ارزیابی کیفیت علوفه، از جمله سیستم وینده (Henneberg & Stohman, 1860)، سیستم Van Soest (۱۹۶۴) و روش سنجش قابلیت هضم در شرایط آزمایشگاهی که توسط Tilley & Terry (۱۹۶۳) توسعه یافت، طی دهه‌ها به‌طور گسترده برای تعیین ترکیب مواد مغذی و قابلیت هضم مورداستفاده قرار گرفته‌اند. روش‌های مرسوم تجریه آزمایشگاهی (اصطلاحاً شیمی مرطوب) با وجود دقت بالا، فرآیندی زمان‌بر، پرهزینه و نیازمند مواد شیمیایی است که اجرای گسترده آن در سطح مزرعه یا در طرح‌های بزرگ را محدود می‌سازد. روش طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک (Near Infrared Reflectance Spectroscopy, NIR) در دهه‌های اخیر به‌عنوان روشی سریع، غیرمخرب و کم‌هزینه معرفی شده که قابلیت پیش‌بینی ترکیبات شیمیایی و ویژگی‌های تغذیه‌ای خوراک‌ها را دارد و استفاده از آن برای تجزیه و تحلیل خوراک دام در سال‌های اخیر افزایش یافته است (Yu *et al*., 2005; Mentink *et al*., 2006). این فناوری با موفقیت در اندازه‌گیری ترکیب و کیفیت خوراک‌های تک‌جزئی و مخلوط مورداستفاده قرار گرفته است (Abrams *et al*., 1988; Hoffman *et al*., 1999; Belanche *et al*., 2013; Simoni *et al*., 2021). هم‌چنین پژوهش‌گران مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر NIR را برای سنجش مواد مغذی پایه در جیره کاملاً مخلوط (TMR) مانند پروتئین خام، نشاسته، NDF الیاف نامحلول در شوینده خنثی (NDF)، الیاف نامحلول در شوینده اسیدی (ADF)، لیگنین (ADL) و الیاف غیرقابل‌هضم (uNDF) و خاکستر خام توسعه داده‌اند (Buonaiuto *et al*., 2021). هم‌چنین، Lundberg و همکاران (۲۰۰۴) نشان دادند که NIR می‌تواند ابزار مؤثری در پیش‌بینی مجموع مواد مغذی قابل‌هضم کل (TDN) و قابلیت هضم ماده آلی در شرایط آزمایشگاهی باشد. هم‌چنین، چندین مطالعه تخمین روش NIR را در پیش‌بینی غلظت ماده خشک، پروتئین خام، نشاسته، خاکستر خام، NDF، ADF، ADL و uNDF در مدفوع دام نشان داده‌اند (Righi *et al*., 2017; Brogna *et al*., 2018). با این‌حال، با وجود گسترش کاربرد روش NIR در تعیین ترکیبات شیمیایی خوراک دام، دقت و تطابق این روش در مقایسه با روش مرجع آزمایشگاهی (مرطوب)، به‌ویژه در برآورد اجزای عملکردی مدل‌های جیره‌نویسی نظیر سیستم پروتئین و کربوهیدرات خالص کرنل (CNCPS)، همچنان مورد تردید است. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی و مقایسه دقت و توان جایگزینی روش NIR به‌جای روش مرطوب برای تعیین ترکیب شیمیایی، اجزای پروتئینی مانند (پروتئین محلول (SP)، نیتروژن نامحلول در شوینده خنثی (NDIP) و اسیدی (ADIP)، کربوهیدرات کل (CHO)، کربوهیدرات غیر الیافی (NFC)، کل کربوهیدرات محلول در اتانول (TESC)، نشاسته و شاخص‌های مربوط به ارزش کیفی گیاهان علوفه‌ای انجام شده است. برای این منظور، از شاخص‌های آماری معتبر از جمله میانگین خطای سیستماتیک (Bias)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)[1]، حد توافق بلاند–آلتمان (LOA) و ضریب تطابق کونکوردنس[2] لین (CCC) (Lin, 1989) بهره گرفته شد تا میزان تطابق و اعتبار دو روش در بازنمایی دقیق اجزای مدل CNCPS و ارزشیابی کیفیت علوفه به‌طور تطبیقی ارزیابی گردد.

1. Root mean square error
2. Lin’s concordance correlation coefficient

۲. روش پژوهش

کاشت گیاهان علوفه‌ای شامل دو رقم ماشک معمولی (*Vicia sativa*) و ماشک گل‌خوشه‌ای (*Vicia villosa*)، یک رقم نخود علوفه‌ای (*Pisum arvense*) و یونجه (*Medicago sativa*) به‌عنوان گیاه شاهد، در تاریخ هشتم آذرماه ۱۴۰۰ با میزان بذر ۶۰ کیلوگرم در هکتار در زمینی به مساحت ۴ هکتار واقع در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان تهران، واقع در جنوب‌شرق شهر تهران (ارتفاع ۸۴۰ متر از سطح دریا) انجام شد. برداشت کلیه تیمارها در مرحله ۵۰ درصد گلدهی و در مورد یونجه در مرحله آغازین گلدهی انجام شد. برای ارزیابی کیفی علوفه، از هر تیمار پنج پلات تصادفی یک مترمربع) برداشت شد. نمونه‌برداری به‌صورت دستی با داس در ارتفاع پنج سانتی‌متری از سطح خاک انجام گرفت. برای مطالعات آزمایشگاهی، نمونه‌های جمع‌آوری‌شده از هر علوفه، به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شدند و سپس با استفاده از آسیاب با الک یک میلی متری آسیاب شدند و سپس برای آنالیزهای بیش‌تر در شرایط آزمایشگاهی ذخیره شدند. ترکیبات شیمیایی نمونه‌های علوفه شامل ماده خشک (DM)، پروتئین خام (CP)، ماده آلی (OM)، NDF، ADF و ADL به دو روش متفاوت تعیین شد. در روش طیف‌سنجی NIR، آنالیز ترکیبات فوق با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی انعکاس اشعه فروسرخ TANGO-NIR (مدل Bruker Optics GmbH, Ettlingen, Germany) در دانشگاه بولونیا انجام شد. صحت نتایج دستگاه پیش‌تر تأیید شده است (Buonaiuto *et al*., 2018). با استفاده از روش شیمیایی مرجع، اندازه‌گیری DM، OM، CP و خاکستر مطابق روش‌های استاندارد AOAC (۱۹۹۰) انجام شد. NDFو ADF براساس روش Van Soest و همکاران (۱۹۹۱) و با استفاده از آنزیم آلفا آمیلاز مقاوم به حرارت و با تصحیح خاکستر اندازه‌گیری شد. ADL از طریق حل‌کردن سلولز در اسیدسولفوریک ۷۲ درصد به‌دست آمد. محتوای همی‌سلولز از اختلاف بین NDF و ADF و سلولز از اختلاف بین ADF و ADL برآورد شد. کلیه فراسنجه‌های یادشده در هر دو روش با سه تکرار آنالیز شدند. نشاسته براساس روش AOAC (۱۹۹۰، روش ۹۹۶.۱۱) تعیین گردید. مصرف ماده خشک (DMI) (حداکثر توان مصرف خوراک در جیره مبتنی بر علوفه‌در گاو بالغ نژاد شیری)، ماده خشک قابل هضم (DDM)، کل ماده مغذی قابل هضم (TDN)، ارزش نسبی علوفه (RFV)، انرژی خالص شیردهی (NEL)، کیفیت نسبی علوفه (RFQ) و شاخص کیفیت (QI) با استفاده از روابط زیر محاسبه شدند (Moor *et al*., 2002):

رابطه ۱) DMI (درصد وزن زنده) = (درصد ماده خشک NDF) /۱۲۰

رابطه ۲) DDM (درصد ماده خشک) = ۸۸/۹ – ۰/۷۷۹ × ADF (درصد ماده خشک)

رابطه ۳) TDN (درصد ماده خشک) =۱۱۱/۸ – (۰/۹۵ × % CP) – (۰/۳۶ × % ADF) – (۰/۷ × % NDF)

رابطه ۴) RFV = [(۱۲۰/NDF) × (۸۸/۹ – ۰/۷۷۹ × ADF)]/۱/۲۹

رابطه ۵) NEL (مگاکالری/کیلوگرم ماده خشک)= [۰/۰۱۱۹ –(۱/۰۴۴ × ADF)] × ۲/۲۰۵

رابطه ۶) RFQ = (DMI, درصد وزن زنده) × (TDN / ۱/۲۳)

رابطه ۷) QI = ۰/۰۱۲۵ × RFQ + ۰/۰۹۷

جهت تخمین انرژی قابل هضم و انرژی قابل متابولیسم از معادلات (۸) و (۹) استفاده شد (Fox *et al*, 2004):

رابطه ۸) DE (Mcal/kg DM) = (TDN / ۱۰۰) × ۰/۴۰۹

رابطه ۹) ME (Mcal/kg DM) = (DE × ۱/۰۱) – ۰/۴۵ (NRC, 2001)

جهت بخش‌بندی پروتئین با استفاده از روش CNCPS شاخص‌هایی نظیر NDIP و ADIP و SP به هر دو روش NIR و مرطوب اندازه‌گیری شد. هم‌چنین از معادلات Sniffen و همکاران (۱۹۹۲) و Lanzas و همکاران (۲۰۰۷) برای محاسبه بخش‌های CP به‌روش CNCPS استفاده شد که محتوای پروتئین را براساس سرعت تجزیه در شکمبه به پنج

بخش طبقه‌بندی می‌کند؛ نیتروژن غیرپروتئینی (A)، پروتئین حقیقی بالقوه تجزیه‌پذیر (B) که خود به سه زیر بخش B1 (پروتئین سریع‌التجزیه)، B2 (پروتئین با تجزیه متوسط)، B3 (پروتئین با تجزیه کند) تقسیم می‌شود و بخش C (پروتئین غیرقابل‌تجزیه). برای اندازه‌گیری بخش A از تنگستات سدیم استفاده شد و NDIP و ADIP، پس از اندازه‌گیری NDF و ADF با استفاده از روش Van Soest و همکاران (۱۹۹۱) تعیین شدند. نیتروژن غیر پروتئینی (NPN) بعد از رسوب پروتئین حقیقی (TP) با تری کلرو استیک (TCA) و پروتئین محلول (SP) به‌عنوان نسبتی از CP که محلول در بافر فسفات–بیکربنات‌سدیم است، طبق روش Licitra و همکاران (۱۹۹۶) اندازه‌گیری شدند.

برای برآورد بخش‌های کربوهیدرات براساس نرخ تجزیه، از معادلات مدل CNCPS ارائه‌شده توسط Lanzas و همکاران (۲۰۰۷) استفاده شد. در نسخه به‌روزشده، کربوهیدرات‌ها به هشت بخش طبقه‌بندی شده است. با این‌حال، با فرض حضور مقادیر اندک اسیدهای چرب فرّار (A1)، اسید لاکتیک (A2) و مقادیر اندکی از سایر اسیدهای آلی (A3) در علوفه خشک آزمایشی (Hall *et al*., 1999; Lanzas *et al*., 2007a; Jonker *et al*., 2010)، اندازه‌گیری بخش‌های کربوهیدراتی در این مطالعه براساس بخش‌بندی نسخه پیشین مدل CNCPS انجام شد (Lanzas *et al*., 2007a) که شامل بخش A: کربوهیدرات‌های محلول سریع (قابل حل در اتانول)، B1: کربوهیدرات‌های با نرخ تجزیه سریع (نشاسته)، B2: کربوهیدرات‌های با تجزیه‌پذیری متوسط (محاسبه‌شده به‌صورت NFC–TESC– نشاسته)، C: کربوهیدرات‌های غیرقابل تجزیه (۲/۴×(Lignin/ aNDF)×aNDF)، B3: کربوهیدرات‌های با تجزیه کند (aNDF–CC). از روش Hall و همکاران (۱۹۹۹) برای استخراج کربوهیدرات‌های محلول در اتانول استفاده شد.

۲. ۱. تجزیه و تحلیل آماری

برای مقایسه مقادیر حاصل از دو روش اندازه‌گیری، از شاخص‌های آماری توصیفی، شامل میانگین، انحراف معیار، کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار برای تمام صفات مورداستفاده شد. هم‌چنین جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) جهت تعیین دقت پیش‌بینی، انحراف یا تمایل سیستماتیک یا Bias جهت بررسی تمایلات عددی بین دو روش، حدود توافق (LOA) براساس روش بلاند–آلتمان؛ CCC جهت سنجش هم‌راستایی عددی و همبستگی و SEM جهت بررسی پراکندگی داده‌ها تعیین شد. تمام تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۴) انجام شد. برای محاسبه شاخص‌های Lin's CCC و LOA، از کدهای آماده اختصاصی (ماکروها) در محیط SAS استفاده گردید، چراکه این شاخص‌ها به‌صورت پیش‌فرض در دستورهای معمول نرم‌افزار در دسترس نیستند. این ماکروها در واقع برنامه‌های کمکی کوتاهی هستند که در محیط SAS نوشته شده و امکان اجرای محاسبات آماری خاص را فراهم می‌کنند. برای شاخص CCC، ماکرویی براساس روابط آماری ارائه‌شده توسط Lin (۱۹۸۹) به‌کار گرفته شد که با استفاده از داده‌های دو روش (NIR و شیمی مرطوب)، ضریب همبستگی پیرسون و میزان انحراف از خط توافق کامل را محاسبه می‌کند و مقدار نهایی CCC را به‌صورت خودکار گزارش می‌دهد. برای محاسبه LOA نیز از ماکروی مبتنی بر روش بلاند–آلتمان استفاده شد. در این روش، اختلاف میان مقادیر دو روش محاسبه گردید و حدود توافق به‌صورت دو عدد مجزا شامل حد پایین و حد بالا گزارش شدند که این مقادیر، بازه‌ی توافق بین دو روش اندازه‌گیری را نشان می‌دهند.

زمانی‌که مقدار CCC کم‌تر از ۰/۲۱ باشد نشان‌دهنده توان پیش‌بینی بسیار ضعیف یا بدون توافق، بین ۰/۲۱ تا ۰/۴۰، نشان‌دهنده توان پیش‌بینی نسبتاً ضعیف، بین ۰/۴۱ تا ۰/۶۰ نشان‌دهنده توان پیش‌بینی متوسط، بین ۰/۶۱ تا ۰/۸۰ بیانگر توان پیش‌بینی قابل‌توجه (قوی) و بین ۰/۸۱ تا ۱/۰۰ نشان‌دهنده توان پیش‌بینی دقیق و بسیار بالا است (Lin, 1989; Visentin *et al*., 2015). سطح معنی‌داری آماری برای کلیه آزمون‌ها برابر ۰/۰۵ در نظر گرفته شد (P<۰/۰۵).

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

تحلیل داده‌های حاصل از مقایسه روش NIR با روش شیمیایی مرجع (مرطوب) نشان داد که سطح تطابق بین این دو روش بسته به نوع فراسنجه ارزیابی‌شده متفاوت است. به‌منظور ارزیابی دقت و قابلیت جایگزینی روش NIR، نتایج به تفکیک در چهار بخش اصلی موردبررسی قرار گرفتند؛ ترکیبات شیمیایی پایه، اجزای پروتئینی، اجزای کربوهیدراتی و شاخص‌های تغذیه‌ای.

۳. ۱. ترکیبات شیمیایی

آمار توصیفی ترکیبات شیمیایی اندازه‌گیری شده بقولات علوفه‌ای مورد آزمایش در جدول (۱) آورده شده است. در بررسی ترکیبات پایه شامل OM، CP، NDF، ADF، ADL، نشاسته و خاکستر خام، روش NIR توانست در مورد برخی ترکیبات دقت قابل‌قبولی ارائه دهد (جدول ۲). مقدار پروتئین خام بین دو روش بسیار نزدیک بود (۳/۸۹±۲۱/۶۰ در روش مرطوب و ۳/۶۸±۲۱/۷۲ در NIR) و CCC برابر با ۰/۹۸ محاسبه شد که نشان‌دهنده تطابق بسیار بالا و عدم اختلاف معنی‌دار آماری بود. در مورد ماده آلی نیز مقدار CCC برابر با ۰/۷۱ و RMSE برابر با ۱/۲۹ به‌دست آمد که بیانگر دقت نسبی مناسب روش NIR در برآورد OM بود. در مقابل، روش NIR در برآورد NDF عملکرد نسبتاً ضعیفی نشان داد (CCC=۰/۳۷ و RMSE=۴/۲۲)، که می‌تواند ناشی از پاسخ‌پذیری پایین اجزای ساختاری دیواره سلولی به طول موج‌های فروسرخ باشد. برای ADF، تطابق بهبود یافته (CCC=۰/۷۶ و P=۰/۶۷) و خطای سیستماتیک کم‌تری مشاهده شد. هم‌چنین در مورد نشاسته، نتایج رضایت‌بخش بود (CCC=۰/۸۴ و P=۰/۷۰) که از حساسیت مناسب طیف NIR نسبت به نشاسته حکایت داشت. اما در مورد ADL، که ساختاری آروماتیک و جذب طیفی ضعیفی دارد، تطابق بسیار پایین و حتی منفی (CCC=−۰/۰۶) به‌دست آمد که با RMSE بالا (۱/۷۲) همراه بود. در برآورد خاکستر خام نیز تطابق نسبتاً قابل‌قبول بود (CCC=۰/۷۱ و P =۰/۳۱). این یافته‌ها با گزارش Buonaiuto و همکاران (۲۰۲۱) همسو است که دقت پیش‌بینی برخی اجزا مانند ADL را با NIR پایین‌تر از سایر اجزا گزارش کرده‌اند.

جدول ۱. مقادیر آماری توصیفی ترکیبات شیمیایی (درصد ماده خشک) بقولات علوفه‌ای[۱] با روش‌های NIR و شیمی مرطوب (تعداد تکرار = ۳)

فراسنجه	روش	کم‌ترین مقدار	بیش‌ترین مقدار	میانگین ±SD
OM	مرطوب	۸۷/۰۰	۹۱/۸۶	۱/۸۷ ± ۸۸/۹۳
	NIR	۸۷/۸۴	۹۱/۴۷	۱/۵۲ ± ۸۹/۸۱
CP	مرطوب	۱۵/۷۲	۲۵/۷۷	۳/۸۹± ۲۱/۶۰
	NIR	۱۶/۳۹	۲۵/۵۸	۳/۶۸±۲۱/۷۲
NDF	مرطوب	۳۰/۷۳	۴۰/۸۹	۴/۱۰ ± ۳۶/۶۳
	NIR	۳۰/۵۱	۳۸/۹۲	۳/۲۳ ± ۳۴/۶۰
ADF	مرطوب	۲۶/۰۵	۳۵/۷۷	۳/۷۹ ± ۳۰/۵۷
	NIR	۲۵/۷۴	۳۳/۷۶	۳/۱۶ ± ۲۹/۸۰
ADL	مرطوب	۶/۳۹	۹/۲۸	۱/۰۸ ± ۷/۳۱
	NIR	۴/۸۶	۷/۹۱	۱/۰۳ ± ۶/۳۴
Starch	مرطوب	۰/۷۴	۳/۸۸	۱/۱۴ ± ۱/۹۰
	NIR	۰/۵۱	۳/۸۱	۱/۲۶ ± ۱/۶۷
ASH	مرطوب	۹/۸۴	۱۲/۹۷	۱/۸۷ ± ۱۱/۰۶
	NIR	۸/۵۳	۱۲/۱۶	۱/۵۲ ± ۱۰/۱۹

۱. شامل ماشک معمولی (*Vicia sativa*) و ماشک گل خوشه‌ای (*Vicia villosa*) و نخود علوفه‌ای (*Pisum arvense*) و یونجه خشک (*Medicagi sativa*).

SD: انحراف معیار، OM: ماده آلی، CP: پروتئین خام، NDF: الیاف نامحلول در شوینده خنثی، ADF:الیاف نامحلول در شوینده اسیدی، ADL: لیگنین، Starch:نشاسته، ASH: خاکستر

جدول ۲. شاخص‌های تطابق آماری بین روش‌های NIRو شیمی مرطوب برای فراسنجه‌های ترکیبات شیمیایی (درصد ماده خشک) بقولات علوفه‌ای[۱]

فراسنجه	SD	SEM	P value	RMSE	Bias	LOA	CCC
OM	۱/۰۲	۰/۳۶	۰/۳۱	۱/۲۹	۰/۸۷	−۲/۸۷ −۱/۱۲	۰/۷۱
CP	۰/۵۳	۰/۱۸	۰/۹۵	۰/۵۰	۰/۱۱۶	−۰/۹۲ −۱/۱۵	۰/۹۸
NDF	۳/۹۵	۱/۳۹	۰/۲۹	۴/۲۲	−۲/۰۲	−۹/۷۸ −۵/۷۳	۰/۳۷
ADF	۲/۴۲	۰/۸۵	۰/۶۷	۲/۳۹	−۰/۷۶	−۵/۵۱ −۳/۹۸	۰/۷۶
ADL	۱/۵۲	۰/۵۳	۰/۱۱	۱/۷۲	−۰/۹۶	−۳/۹۵ −۲/۰۱	−۰/۰۶
Starch	۰/۶۳	۰/۲۲	۰/۷۰	۰/۶۳	۰/۲۳	−۱/۴۷ −۱/۰۱	۰/۸۴
ASH	۱/۰۲	۰/۳۶	۰/۳۱	۱/۶۶	−۰/۸۷	−۲/۸۷ −۱/۱۲	۰/۷۱

۱. شامل ماشک معمولی (*Vicia sativa*) و ماشک گل خوشه‌ای (*Vicia villosa*) و نخود علوفه‌ای (*Pisum arvense*) و یونجه خشک (*Medicagi sativa*).

SD: انحراف معیار، SEM: خطای استاندارد میانگین‌ها، RMSE: ریشه میانگین مربعات خطا، Bias سوگیری (انحراف سیستماتیک)، LOA: حدود توافق (Limits of agreement)، CCC: ضریب تطابق کونکوردنس (Concordance correlation coefficient)، OM: ماده آلی، CP: پروتئین خام، NDF: الیاف نامحلول در شوینده خنثی، ADF:الیاف نامحلول در شوینده اسید، ADL: لیگنین، Starch: نشاسته، ASH: خاکستر.

۳. ۲. بخش‌های پروتئین

کم‌ترین، بیش‌ترین و میانگین ارقام به‌دست‌آمده از آنالیز بخش‌های پروتئینی بقولات موردآزمایش در جدول (۳) نشان داده شده است. اجزای پروتئینی بر مبنای مدل CNCPS و به‌صورت بخش‌های ADIP، NADIP، SP، A، B1، B2، B3 و C موردبررسی قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که تطابق بین دو روش برای اجزای محلول و سریع‌التجزیه مناسب‌تر از اجزای مقاوم بود (جدول ۴). به‌عنوان نمونه، بخش PB1 با CCC=۰/۹۳ و RMSE=۱/۲۲ بالاترین تطابق را داشت. در مقابل، بخش‌های NADIP و ADIP تطابق ضعیفی (CCC) نشان دادند (به‌ترتیب ۰/۱۲− و ۰/۱۵) و اختلاف میانگین‌ها در هر دو مورد معنی‌دار بود (P<۰/۰۵). هم‌چنین مقدار SP با CCC=۰/۶۱ و RMSE=۵/۳۸ از تطابق متوسط برخوردار بود، درحالی‌که بخش C، با CCC=۰/۵۵ و خطای پیش‌بینی نسبتاً بالا عملکرد ضعیف‌تری داشت. یافته‌ای که با نتایج Righi و همکاران (۲۰۱۷) نیز همخوانی دارد.

جدول ۳. مقادیر آماری توصیفی اجزای پروتئینی (درصد پروتئین خام) بقولات علوفه‌ای[۱] با روش‌های NIR و شیمی مرطوب (تعداد تکرار = ۳)

فراسنجه	روش	کم‌ترین مقدار	بیش‌ترین مقدار	میانگین ±SD
NDIP	مرطوب	۱/۳۸	۲/۱۷	۰/۳۵ ± ۱/۶۱
	NIR	۲/۰۳	۳/۵۸	۰/۵۹ ± ۲/۸۹
ADIP	مرطوب	۰/۶۶	۰/۸۹	۰/۰۹ ± ۰/۷۷
	NIR	۰/۹۲	۱/۲۶	۰/۱۲ ± ۱/۰۷
SP	مرطوب	۴۲/۵۱	۵۴/۵۵	۵/۵۵ ± ۴۹/۱۶
	NIR	۳۷/۲۳	۴۸/۴۰	۵/۰۳ ± ۴۳/۸۷
A	مرطوب	۳۰/۳۹	۴۶/۳۵	۲/۸۹ ± ۳۹/۹۸
	NIR	۲۶/۵۹	۴۱/۶۹	۴/۸۱ ± ۳۵/۷۴
B1	مرطوب	۳/۶۶	۱۴/۸۸	۳/۹۵± ۹/۹۶
	NIR	۳/۳۵	۱۳/۰۹	۳/۰۸±۸/۶۳
B2	مرطوب	۳۸/۷۲	۴۸/۶۷	۴۳/۵۸ ± ۲/۹۱
	NIR	۳۸/۸۰	۵۱/۸۹	۴۴/۶۱ ± ۴/۹۴
B3	مرطوب	۲/۶۸	۸/۵۶	۴/۳۶ ± ۲/۴۰
	NIR	۵/۷۲	۹/۹۹	۸/۱۰ ± ۱/۶۲
C	مرطوب	۲/۶۵	۵/۲۶	۳/۶۷ ± ۰/۹۶
	NIR	۳/۸۶	۶/۶۹	۴/۷۲ ± ۱/۱۶

۱. شامل ماشک معمولی (*Vicia sativa*) و ماشک گل خوشه‌ای (*Vicia villosa*) و نخود علوفه‌ای (*Pisum arvense*) و یونجه خشک (*Medicagi sativa*).

SD: انحراف معیار، NDIP: پروتئین نامحلول در شوینده خنثی، ADIP: پروتئین نامحلول در شوینده اسیدی، SP: پروتئین محلول، A (نیتروژن غیرپروتئینی)، B1 (پروتئین حقیقی سریع‌التجزیه)، B2 (پروتئین حقیقی با تجزیه متوسط)، B3 (پروتئین حقیقی با تجزیه کند) و C (پروتئین غیر قابل تجزیه).

جدول ٤. شاخص‌های تطابق آماری بین روش‌های NIR و شیمی مرطوب برای اجزای پروتئینی (درصد پروتئین خام) بقولات علوفه‌ای[۱]

فراسنجه	SD	SEM	P value	RMSE	Bias	LOA	CCC
NADIP	۰/۸۱	۰/۲۸	۰/۰۰	۱/۵۰	۱/۲۸	−۰/۳۱ −۲/۸۸	−۰/۱۲
ADIP	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۳۰	۰/۳	۰/۱۵ −۰/۴۴	۰/۱۵
A	۰/۶۱	۰/۲۱	۰/۱۴	۴/۲۰	−۴/۱۶	−۵/۳۶ —−۲/۹۶	۰/۷۶
SP	۱/۱۰	۰/۳۹	۰/۰۵	۵/۳۸	−۵/۲۸	−۷/۴۵ — −۳/۱۱	۰/۶۱
B1	۰/۵۱	۰/۱۸	۰/۵۱	۱/۲۱	−۱/۱۱	−۲/۱۲ — −۰/۱۰	۰/۹۳
B2	۳/۶۲	۱/۲۸	۰/۵۴	۳/۶۳	۱/۲۹	−۵/۸۱ −۸/۴۱	۰/۶۰
B3	۳/۵۹	۱/۲۷	۰/۰۰	۵/۲۱	۳/۹۸	−۳/۰۵ −۱۱/۰۲	−۰/۲۲
C	۰/۴۲	۰/۱۴	۰/۰۳	۱/۴۲	۱/۳۷	۰/۵۴ −۲/۱۹	۰/۵۵

۱. شامل ماشک معمولی (*Vicia sativa*) و ماشک گل خوشه‌ای (*Vicia villosa*) و نخود علوفه‌ای (*Pisum arvense*) و یونجه خشک (*Medicagi sativa*).

SD: انحراف معیار، SEM: خطای استاندارد میانگین‌ها، RMSE: ریشه میانگین مربعات خطا، Bias: سوگیری (انحراف سیستماتیک)، LOA: حدود توافق (Limits of agreement)، CCC: ضریب تطابق کونکوردنس (Concordance correlation coefficient)، NADIP: پروتئین نامحلول در شوینده خنثی، ADIP: پروتئین نامحلول در شوینده اسیدی، SP: پروتئین محلول، A (نیتروژن غیر پروتئینی)، B1 (پروتئین حقیقی سریع‌التجزیه)، B2 (پروتئین حقیقی با تجزیه متوسط)، B3 (پروتئین حقیقی با تجزیه کند) و C (پروتئین غیر قابل تجزیه).

۳. ۳. بخش های کربوهیدرات

کم‌ترین، بیش‌ترین و میانگین ارقام به‌دست‌آمده از آنالیز بخش‌های مختلف کربوهیدرات بقولات مورد آزمایش در جدول (۵) نشان داده شده است. هم‌چنین، بررسی اجزای کربوهیدراتی نشان داد که دقت روش NIR در پیش‌بینی اجزای محلول و سریع‌التجزیه بالا، اما در مورد اجزای کند و غیرقابل هضم بسیار پایین است (جدول ۶). بخش CHO با میانگین‌های نزدیک بین دو روش (۶۵/۰۵±۴/۶۶ در روش مرطوب و ۶۵/۰۶±۴/۶۸ در NIR)، مقدار CCC برابر با ۰/۹۶ و P=۰/۹۶، از دقت بالای NIR حکایت داشت. هم‌چنین در مورد B1 نیز CCC=۰/۸۶ و RMSE=۰/۷۲ محاسبه شد که بیانگر عملکرد بسیار خوب NIR بود. در مقابل، بخش‌های B2، B3 و C که نمایانگر کربوهیدرات‌های آهسته‌تجزیه و غیرقابل تجزیه هستند، مقادیر CCC بسیار پایین (به‌ترتیب ۰/۰۳، ۰/۱۶ و ۰/۰۱) و RMSE بالا نشان دادند. هم‌چنین مقدار Bias در B2 معادل ۱۱/۹۲− و در C برابر با ۴/۶۴− بود. این یافته‌ها بیانگر ضعف روش NIR در تمایز اجزای مقاوم‌تر کربوهیدراتی است. این نتایج با یافته‌های Mentink و همکاران (۲۰۰۶) که بر محدودیت دقت NIR در برآورد NDF و اجزای آن تأکید داشتند، همخوانی دارد.

جدول ۵. مقادیر آماری توصیفی اجزای کربوهیدرات بقولات علوفه‌ای[۱] با روش‌های NIR و شیمی مرطوب (تعداد تکرار = ۳)

فراسنجه	روش	کم‌ترین مقدار	بیش‌ترین مقدار	میانگین ±SD
CHO (درصد ماده خشک)	مرطوب	۶۰/۲۲	۷۳/۸۰	۶۵/۰۵ ± ۴/۶۶
	NIR	۵۹/۹۰	۷۲/۶۹	۶۵/۰۶ ± ۴/۶۸
NFC (درصد ماده خشک)	مرطوب	۳/۶۶	۱۴/۸۸	۹/۹۶ ± ۳/۹۵
	NIR	۳۰/۱۳	۳۷/۲۱	۳۳/۳۶ ±۲/۳۸
A (درصد کربوهیدرات)	مرطوب	۳۲/۵۱	۴۷/۵۹	۴/۸۸ ± ۳۸/۰۱
	NIR	۷/۶۷	۱۱/۷۵	۱/۳۳ ± ۱۰/۰۰
B1 (درصد کربوهیدرات)	مرطوب	۱/۲۳	۵/۲۶	۱/۵۲ ± ۲/۵۵
	NIR	۱/۶۵	۴/۸۵	۱/۱۵ ± ۲/۹۷
B2 (درصد کربوهیدرات)	مرطوب	۳۵/۲۵	۵۱/۲۵	۷/۱۸ ± ۴۵/۱۹
	NIR	۳۲/۱۵	۳۶/۷۶	۲/۰۴ ± ۳۳/۹۱
B3 (درصد کربوهیدرات)	مرطوب	۶/۱۱	۲۷/۲۲	۷/۴۱ ± ۱۶/۹۹
	NIR	۱۹/۰۳	۲۴/۴۰	۲/۳۵ ± ۲۲/۲۱
C (درصد کربوهیدرات)	مرطوب	۲۲/۵۹	۳۰/۹۵	۳/۲۱ ± ۲۵/۸۴
	NIR	۱۶/۵۸	۲۷/۹۹	۴/۶۲ ± ۲۱/۶۸

۱. شامل ماشک معمولی (*Vicia sativa*) و ماشک گل خوشه‌ای (*Vicia villosa*) و نخود علوفه‌ای (*Pisum arvense*) و یونجه خشک (*Medicagi sativa*).

SD: انحراف معیار، CHO: کربوهیدرات کل، NFC کربوهیدرات غیرالیافی، A: کربوهیدرات محلول، B1: کربوهیدرات سریع‌التجزیه، B2 کربوهیدرات متوسط تجزیه، B3: کربوهیدرات کند تجزیه، C: کربوهیدرات غیرقابل هضم.

جدول ٦. شاخص‌های تطابق آماری بین روش‌های NIR و شیمی مرطوب برای اجزای کربوهیدراتی بقولات گیاهان علوفه‌ای[۱]

فراسنجه	SD	SEM	P value	RMSE	Bias	LOA	CCC
CHO (درصد ماده خشک)	۱/۳۶	۰/۴۸	۰/۹۶	۱/۲۷	−۰/۱۱	−۲/۷۷ – ۲/۵۵	۰/۹۶
NFC (درصد ماده خشک)	۴/۴۴	۱/۵۷	۰/۰۲	۶/۷۱	−۵/۲۷	−۱۳/۹۸ – ۳/۴۲	۰/۲۶
A (درصد کربوهیدرات)	۰/۲۶	۰/۰۹	۰/۲۰	۰/۹۸	−۰/۹۵	−۹/۷۸ – ۵/۷۳	۰/۸۰
B1 (درصد کربوهیدرات)	۰/۷۰	۰/۲۴	۰/۶۷	۰/۷۲	−۰/۳۰	−۱/۰۷ – ۱/۶۸	۰/۸۶
B2 (درصد کربوهیدرات)	۶/۴۳	۲/۲۷	۰/۰۰	۱۳/۳۵	−۱۱/۹۲	−۲۴/۵۳ – ۰/۶۷	۰/۰۳
B3 (درصد کربوهیدرات)	۷/۳۹	۲/۶۱	۰/۰۴	۹/۸۰	۶/۹۴	−۷/۵۵ – ۲۱/۴۴	۰/۱۶
C (درصد کربوهیدرات)	۵/۱۳	۱/۸۱	۰/۰۲	۶/۶۸	−۴/۶۴	−۱۴/۷۱ – ۵/۴۲	۰/۰۱

۱. شامل ماشک معمولی (*Vicia sativa*) و ماشک گل خوشه‌ای (*Vicia villosa*) و نخود علوفه‌ای (*Pisum arvense*) و یونجه خشک (*Medicagi sativa*).
SD: انحراف معیار، SEM: خطای استاندارد میانگین‌ها، RMSE: ریشه میانگین مربعات خطا، Bias: سوگیری (انحراف سیستماتیک)، LOA: حدود توافق (Limits of agreement)، CCC: ضریب تطابق کونکوردنس (Concordance correlation coefficient)، CHO: کربوهیدرات کل، NFC: کربوهیدرات غیرالیافی، A: کربوهیدرات محلول، B1: کربوهیدرات سریع‌التجزیه، B2: کربوهیدرات متوسط تجزیه، B3: کربوهیدرات کند تجزیه، C: کربوهیدرات غیرقابل هضم.

۳. ۴. شاخص‌های برآورد ارزش تغذیه‌ای تغذیه‌ای

کم‌ترین، بیش‌ترین و میانگین ارقام به‌دست‌آمده از آنالیز شاخص‌های برآورد ارزش تغذیه‌ای بقولات موردآزمایش در جدول (۷) نشان داده شده است. در بررسی برآورد شاخص‌های کیفیت تغذیه‌ای از جمله DMI، DDM، TDN، NEL، RFV، RFQ، QI، DE و ME نتایج متفاوتی به‌دست آمد. شاخص TDN با CCC=۰/۷۶ و RMSE=۳/۰۸ دقت مناسبی را نشان داد و نتایج حاصل از NIR برای DDM و NEL نیز دارای تطابق (CCC) قابل‌قبول بودند (حدود ۰/۷۶ برای هر دو فراسنجه). شاخص‌های DE و ME نیز با RMSE پایین (۰/۱۳) و CCC برابر با ۰/۷۶ از دقت بالای روش NIR برخوردار بودند. در عوض، تطابق (CCC) برای شاخص‌هایRFV، RFQ و QI متوسط بود (بین ۰/۶۷ تا ۰/۷۵) اما خطایRMSE نسبتاً بالا بود، به‌ویژه در RFQ (۲۰/۵۲) که بیانگر حساسیت بالای این شاخص به تغییرات در اجزای کربوهیدراتی و الیاف است. با این‌حال، اختلاف آماری معنی‌داری بین دو روش در اکثر شاخص‌های تغذیه‌ای مشاهده نشد که مؤید توانایی نسبی NIR در برآورد شاخص کیفیت خوراک است (جدول ۸). یافته‌ها با مطالعه Lundberg و همکاران (۲۰۰۴) که دقت نسبی NIR در پیش‌بینی TDN و DMI را گزارش کردند، مطابقت دارد.

جدول ۷. مقادیر آماری توصیفی شاخص‌های برآورد ارزش تغذیه‌ای بقولات علوفه‌ای[۱] با روش‌های NIR و شیمی مرطوب (تعداد تکرار = ۳)

فراسنجه	روش	کم‌ترین مقدار	بیش‌ترین مقدار	میانگین ±SD
DMI (درصد وزن زنده)	مرطوب	۲/۹۳	۳/۹۰	۳/۴۰ ± ۰/۳۳
	NIR	۳/۰۸	۳/۹۳	۳/۵۰ ± ۰/۳۰
DDM (درصد ماده خشک)	مرطوب	۶۱/۰۳	۶۸/۶۰	۶۵/۵۹ ± ۲/۹۵
	NIR	۶۲/۶۰	۶۸/۸۵	۶۵/۸۹ ± ۲/۴۶
TDN (درصد ماده خشک)	مرطوب	۵۵/۱۰	۶۷/۶۴	۶۲/۱۶ ± ۴/۸۱
	NIR	۵۷/۶۹	۶۸/۰۴	۶۳/۷۱ ± ۳/۷۲
RFV	مرطوب	۱۷۴/۴۴	۲۰۷/۶۱	۴/۳۶ ± ۲/۴۰
	NIR	۱۴۹/۵۹	۲۰۹/۸۶	۱۸۳/۰۶ ± ۲۴/۱۹
NEL	مرطوب	۱/۳۶	۱/۶۱	۱/۵۱ ± ۰/۱۰
	NIR	۱/۴۱	۱/۶۳	۱/۵۲ ± ۰/۰۷
RFQ	مرطوب	۱۳۶/۸۵	۲۱۴/۷۳	۱۷۲/۲۴ ± ۳۰/۲۲
	NIR	۱۴۴/۶۴	۲۱۷/۵۹	۱۸۳/۴۳ ± ۲۶/۲۹
QI	مرطوب	۱/۸۰	۲/۷۸	۲/۳۱ ± ۰/۴۰
	NIR	۱/۹۰	۲/۸۱	۲/۳۹ ± ۰/۳۸
DE (Mcal/kg)	مرطوب	۲/۴۲	۲/۹۲	۲/۶۶ ± ۰/۲۱
	NIR	۲/۵۴	۳/۰۰	۲/۷۷ ± ۰/۱۵
ME (Mcal/kg)	مرطوب	۲/۰۰	۲/۵۰	۲/۳۴ ± ۰/۲۲
	NIR	۲/۱۲	۲/۵۸	۲/۴۷ ± ۰/۱۵

۱. شامل ماشک معمولی (*Vicia sativa*) و ماشک گل خوشه‌ای (*Vicia villosa*) و نخود علوفه‌ای (*Pisum arvense*) و یونجه خشک (*Medicagi sativa*).
SD: انحراف معیار، مصرف ماده خشک (DMI)، ماده خشک قابل هضم (DDM)، کل ماده مغذی قابل هضم (TDN)، ارزش نسبی علوفه (RFV)، انرژی خالص شیردهی (NEL)، کیفیت نسبی علوفه (RFQ)، شاخص کیفیت (QI)، انرژی قابل هضم (DE)، انرژی قابل متابولیسم (ME).

جدول ۸. شاخص‌های تطابق آماری بین روش‌های NIR و مرطوب برای شاخص‌های برآورد ارزش تغذیه‌ای بقولات علوفه‌ای[۱]

فراسنجه	SD	SEM	P value	RMSE	Bias	LOA	CCC
DMI (درصد وزن زنده)	۰/۳۶	۰/۱۲	۰/۳۱	۰/۳۸	۰/۱۸	−۰/۵۲ −۰/۹۰	۰/۴۵
DDM (درصد ماده خشک)	۱/۸۸	۰/۶۶	۰/۶۷	۱/۸۶	۰/۶۰	−۳/۱۰ −۴/۲۹	۰/۷۶
TDN (درصد ماده خشک)	۳/۱۲	۱/۱۰	۰/۶۷	۳/۰۸	۰/۹۸	−۵/۱۴ −۷/۱۱	۰/۷۶
RFV	۱۷/۴۴	۶/۱۶	۰/۳۷	۱۹/۸۰	۱۱/۲۱	−۲۲/۹۹ −۴۵/۴۱	۰/۶۷
NEL	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۶۷	۰/۰۶	۰/۰۲	−۰/۱۰ −۰/۱۴	۰/۷۶
RFQ	۱۷/۴۵	۶/۱۷	۰/۴۰	۲۰/۵۲	۱۲/۴۴	−۲۱/۷۶ −۴۶/۶۵	۰/۷۵
QI	۰/۲۱	۰/۰۷	۰/۴۰	۰/۲۵	۰/۱۵	−۰/۲۷ −۰/۵۸	۰/۷۵
DE (Mcal/kg)	۰/۱۳	۰/۰۴	۰/۶۷	۰/۱۳	۰/۰۴	−۰/۲۲ −۰/۳۱	۰/۷۶
ME (Mcal/kg)	۰/۱۳	۰/۰۴	۰/۶۷	۰/۱۳	۰/۰۴	−۰/۲۲ −۰/۳۱	۰/۷۶

۱. شامل ماشک معمولی (*Vicia sativa*) و ماشک گل خوشه‌ای (*Vicia villosa*) و نخود علوفه‌ای (*Pisum arvense*) و یونجه خشک (*Medicagi sativa*).

SD: انحراف معیار، SEM: خطای استاندارد میانگین‌ها، RMSE: ریشه میانگین مربعات خطا، Bias: سوگیری (انحراف سیستماتیک)، LOA: حدود توافق (Limits of agreement)، CCC: ضریب تطابق کونکوردنس (Concordance correlation coefficient)، مصرف ماده خشک (DMI)، ماده خشک قابل هضم (DDM)، کل ماده مغذی قابل هضم (TDN)، ارزش نسبی علوفه (RFV)، انرژی خالص شیردهی (NEL)، کیفیت نسبی علوفه (RFQ)، شاخص کیفیت (QI)، انرژی قابل هضم (DE)، انرژی قابل متابولیسم (ME).

۴. نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که روش NIR از توان بالایی برای پیش‌بینی دقیق و سریع برخی ترکیبات شیمیایی کلیدی در گیاهان علوفه‌ای از جمله CP، OM، نشاسته و بخش A کربوهیدرات‌های موجود در علوفه حبوبات برخوردار است. این روش در تخمین شاخص‌های کیفی تغذیه‌ای مانند TDN، DE و ME نیز تطابق آماری قابل قبولی با روش مرجع شیمیایی داشت. با این‌حال، دقت روش NIR در ارزیابی اجزای ساختاری‌تر و مقاوم‌تر، نظیر لیگنین، ADIP، NADIP و بخش‌های B2، B3 و C کربوهیدرات‌ها پایین‌تر و اختلاف آن‌ها با روش شیمی مرطوب معنی‌دار بود. با آگاهی از این محدودیت‌ها، روش NIR می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر در غربال‌گری اولیه، پایش سریع کیفیت و برآورد اولیه ترکیبات در خوراک دام مورداستفاده قرار گیرد.

۵. ملاحظات اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند.

۶. مشارکت نویسندگان

جابر خانی‌یوسف‌رضا: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله؛

علی اسدی‌الموتی: طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله؛

مجتبی یاری: مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله.

۷. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۸. حامی مالی

این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه تهران انجام شده است.

۹. منابع

Abrams, S. M., Shenk, J. S., & Harpster, H. W. (1988). Potential of near infrared reflectance spectroscopy for analysis of silage composition. *Journal of Dairy Science*, *71*(7), 1955-1959.

AOAC (Association of Official Analytical Chemists). (1990). Official Methods of Analysis. 15th ed. AOAC, Washington, DC.

Belanche, A., Weisbjerg, M. R., Allison, G. G., Newbold, C. J., & Moorby, J. M. (2013). Estimation of feed crude protein concentration and rumen degradability by Fourier-transform infrared spectroscopy. *Journal of Dairy Science*, *96*(12), 7867-7880.

Brogna, N., Palmonari, A., Canestrari, G., Mammi, L., Dal Prà, A., & Formigoni, A. (2018). Near infrared reflectance spectroscopy to predict fecal indigestible neutral detergent fiber for dairy cows. *Journal of Dairy Science*, *101*(2), 1234-1239.

Buonaiuto, G., Cavallini, D., Mammi, L. M. E., Ghiaccio, F., Palmonari, A., Formigoni, A., & Visentin, G. (2021). The accuracy of NIRS in predicting chemical composition and fibre digestibility of hay-based total mixed rations. *Italian Journal of Animal Science*, *20*(1), 1730-1739.

Fox, D. G., Tedeschi, L. O., Tylutki, T. P., Russell, J. B., Van Amburgh, M. E., Chase, L. E., & Overton, T. R. (2004). The Cornell Net Carbohydrate and Protein System model for evaluating herd nutrition and nutrient excretion. *Animal Feed Science and Technology*, *112*(1-4), 29-78.

Hall, M. B., Hoover, W. H., Jennings, J. P., & Webster, T. K. M. (1999). A method for partitioning neutral detergent-soluble carbohydrates. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *79*(15), 2079-2086.

Henneberg, W., & Rautenberg, F. (1860). Beiträge zur begründung einer rationellen fütterung der wiederkäuer: Praktisch-landwirthschaftliche und chemischphysiologische untersuchungen. Für landwirthe und physiologen (Vol. 1). CA Schwetschke und sohn.

Hoffman, P. C., Brehm, N. M., Bauman, L. M., Peters, J. B., & Undersander, D. J. (1999). Prediction of laboratory and in situ protein fractions in legume and grass silages using near-infrared reflectance spectroscopy. *Journal of Dairy Science*, *82*(4), 764-770.

Jonker, A., Gruber, M. Y., McCaslin, M., Wang, Y., Coulman, B., McKinnon, J. J., & Yu, P. (2010). Nutrient composition and degradation profiles of anthocyanidin-accumulating L c-alfalfa populations. *Canadian Journal of Animal Science*, *90*(3), 401-412.

Lanzas, C., Sniffen, C. J., Seo, S. A., Tedeschi, L. O., & Fox, D. G. (2007a). A revised CNCPS feed carbohydrate fractionation scheme for formulating rations for ruminants. *Animal Feed Science and Technology*, *136*(3-4), 167-190.

Lanzas, C., Tedeschi, L. O., Seo, S., & Fox, D. G. (2007). Evaluation of protein fractionation systems used in formulating rations for dairy cattle. *Journal of dairy science*, *90*(1), 507-521.

Lin LI-K. (1989). A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility. Biometrics. *Biometrics*, 45(1), 255-268.

Licitra, G., Hernandez, T. M., & Van Soest, P. J. (1996). Standardization of procedures for nitrogen fractionation of ruminant feeds. *Animal feed science and technology*, *57*(4), 347-358.

Lundberg, K. M., Hoffman, P. C., Bauman, L. M., & Berzaghi, P. (2004). Prediction of forage energy content by near infrared reflectance spectroscopy and summative equations. *The Professional Animal Scientist*, *20*(3), 262-269.

Mentink, R. L., Hoffman, P. C., & Bauman, L. M. (2006). Utility of near-infrared reflectance spectroscopy to predict nutrient composition and in vitro digestibility of total mixed rations. *Journal of Dairy Science*, *89*(6), 2320-2326.

Moore, J. E., & Undersander, D. J. (2002). Relative forage quality: An alternative to relative feed value and quality index. In: *Proceedings 13th annual Florida ruminant nutrition symposium.* 16-29.

Palmonari, A. L. B. E. R. T. O., Gallo, A., Fustini, M. A. T. T. I. A., Canestrari, G. I. O. R. G. I. A., Masoero, F., Sniffen, C. J., & Formigoni, A. (2016). Estimation of the indigestible fiber in different forage types. *Journal of Animal Science*, *94*(1), 248-254.

Righi, F., Simoni, M., Visentin, G., Manuelian, C. L., Currò, S., Quarantelli, A., & De Marchi, M. (2017). The use of near infrared spectroscopy to predict faecal indigestible and digestible fibre fractions in lactating dairy cattle. *Livestock Science*, *206*, 105-108.

Simoni, M., Goi, A., De Marchi, M., & Righi, F. (2021). The use of visible/near-infrared spectroscopy to predict fibre fractions, fibre-bound nitrogen and total-tract apparent nutrients digestibility in beef cattle diets and faeces. *Italian Journal of Animal Science*, *20*(1), 814-825.

Sniffen, C. J., O'connor, J. D., Van Soest, P. J., Fox, D. G., & Russell, J. B. (1992). A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: II. Carbohydrate and protein availability. *Journal of Animal Science*, *70*(11), 3562-3577.

Tilley, J. M. A., & Terry, D. R. (1963). A two-stage technique for the in vitro digestion of forage crops. *Grass and Forage Science*, *18*(2), 104-111.

Van Soest, P. J. (1964). Symposium on nutrition and forage and pastures: new chemical procedures for evaluating forages. *Journal of Animal Science*, *23*(3), 838-845.

Van Soest, P. V., Robertson, J. B., & Lewis, B. A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, *74*(10), 3583-3597.

Visentin, G., McDermott, A., McParland, S., Berry, D. P., Kenny, O. A., Brodkorb, A., & De Marchi, M. (2015). Prediction of bovine milk technological traits from mid-infrared spectroscopy analysis in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, *98*(9), 6620-6629.

Yu, P., McKinnon, J. J., Soita, H. W., Christensen, C. R., & Christensen, D. A. (2005). Use of synchrotron-based FTIR microspectroscopy to determine protein secondary structures of raw and heat-treated brown and golden flaxseeds: A novel approach. *Canadian Journal of Animal Science*, *85*(4), 437-448.