

Original Article



Evaluation of Soil Calcium Carbonate Using of Satellite Images and NIR Spectroscopy

Parinaz Abdoli¹ and Soheila Sadat Hashemi^{2*} **Affiliation**

1. M.Sc. of Soil Science,
Faculty of Agriculture,
Malayer University,
Malayer, Iran
2. Assistant Professor,
Department of Soil Science,
Faculty of Agriculture,
Malayer University,
Malayer, Iran

ABSTRACT

Introduction: One of the advantages of remote sensing and visible-near infrared (Vis-NIR) spectroscopy is the speed, simplicity, and cost-effectiveness of analysis compared to traditional methods. Remote sensing is a scientific discipline that involves collecting data while minimizing direct physical contact with the objects being studied. To fully leverage the rapid analysis capabilities of Vis-NIR spectroscopy, it is essential to exploit its advantages over conventional analytical techniques. The aim of this research is to utilize Landsat 8 satellite sensors and the near-infrared spectrum for agricultural and forestry applications in the Gyan Nahavand plain of Hamadan Province to estimate soil calcium carbonate.

Material and methods: Forty-eight soil samples were collected from the surface layer (0-30 cm), followed by air drying and sieving to a 2-mm particle size. Several physicochemical characteristics of the soils were analyzed. A Landsat 8 image from September 2019 was utilized for remote sensing studies. The calculated values for each sample unit were generated using ERDAS Imagine 9.1 software. The values for each band at the 48 sampling points were entered into Excel, and the variables were statistically described. In the remote sensing method, the spectral reflectance of the samples was extracted and processed across ten primary bands. In addition to the primary bands, combinations of bands and calcite indices were also employed. Correlations between the values of the primary bands, band compositions, calcite indices, and the amount of soil calcite were analyzed. The best model was selected by fitting various multivariate regressions without excluding outlier data. Spectral analysis of the targeted soils was conducted using a FieldSpec 3 spectroradiometer, with a wavelength range of 350-2500 nm. After recording the spectra, various preprocessing methods were evaluated. The Pearson correlation test and linear regression analyses were performed using SPSS 24.1 software.

Results and discussion: Laboratory results indicated that the average soil calcium carbonate content in agricultural and forested areas was 30% and 22.22%, respectively. The findings revealed that bands 10 and 11 exhibited a significant correlation with soil calcite in forested areas ($p < 0.05$). Twelve band compositions at the 5% significance level and six band compositions at the 1% significance level demonstrated a significant correlation with the amount of soil calcite. Additionally, the R1 index ((Band5/Band4)/(Band5/Band2)) showed a significant correlation with soil calcite ($p < 0.05$). The correlation between the measured calcite in the laboratory and the equation derived from satellite imagery was found to be moderate ($r^2 = 0.45$) for agricultural use. In the spectroscopic analysis, the highest correlation was observed at a wavelength of 612 nm ($r^2 = 0.85^{**}$). Based on modeling using Partial Least Squares Regression (PLSR), the determination coefficient for the calibration group for calcite was 0.8, with a Root Mean Square Error (RMSE) of 4.8%. In the validation group, the determination coefficient was 0.5, and the RMSE was 7.8%. Among the models fitted using multivariate regression with satellite images, the Stepwise Multivariate Linear Regression (SMLR) model is recommended as a suitable approach for estimating calcite. The Partial Least Squares Regression (PLSR) model has also proven to be nearly suitable for estimating calcite using the spectroscopic method.

Conclusion: The overall results indicate that the model developed using regression statistical methods in remote sensing has effectively estimated the amount of soil calcite in agricultural lands. The quantities obtained through remote sensing and laboratory analyses show minimal differences. Therefore, it can be concluded that the remote sensing method is successful in estimating soil calcite levels. Additionally, the results from spectrometry demonstrate that the PLSR model is suitable for estimating soil calcite, provided that a larger number of samples is utilized. In general, we can conclude that the Vis-NIR spectroscopy method offers greater accuracy compared to remote sensing and titration methods, although it requires a more extensive sample set. It is recommended to increase the number of spectroscopic samples to enhance the accuracy of the findings and to ensure that the same number of samples is used for a more effective comparison between the two land uses.

Keywords: Gyan, Landsat 8, Land use, Calcite.

Citation: Abdoli P., Hashemi S.S., Evaluation of Soil Calcium Carbonate Using of Satellite Images and NIR Spectroscopy, Iran J Remote Sens GIS. 16(4):77-94.

* Corresponding Author: s.hashemi@malayeru.ac.ir
DOI: <https://doi.org/10.48308/GISJ.2023.103395>

Received: 2023.09.17
Accepted: 2024.01.13



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.



برآورد کربنات کلسیم خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک

پری‌ناز عبدلی^۱ و سهیلا سادات هاشمی^{۲*}

سمت

۱. کارشناسی ارشد علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران
۲. استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

چکیده

سابقه و هدف: از مزایای دانش سنجش از دور و طیف‌سنجی مرئی-فروسرخ نزدیک، سرعت و سادگی و هزینه اندک آن، در مقایسه با روش قدیمی است. سنجش از دور دانش گردآوری داده‌ها، با حداقل تماس مستقیم فیزیکی با اشیای مورد اندازه‌گیری است. طیف‌سنجی مرئی-فروسرخ نزدیک دامنه‌ای از جذب را با سرعت آنالیز بالا، در مقایسه با روش سنتی، برآورد می‌کند. هدف از این تحقیق به‌کاربردن داده‌های ماهواره‌لندست ۸ و طیف فروسرخ نزدیک، در کاربری‌های کشاورزی و جنگل در دشت گیان نهاوند، استان همدان، برای تخمین کربنات کلسیم خاک است.

مواد و روش‌ها: ۴۸ نمونه خاک از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری برداشته و سپس هواخشک، و از الک دومیلی‌متری عبور داده شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها اندازه گرفته شد. به‌منظور مطالعات سنجش از دور، تصویر لندست ۸ متعلق به تاریخ نمونه‌برداری (سپتامبر ۲۰۱۹) به کار رفت. مقادیر محاسبه‌شده هریک از قطعات نمونه در محیط ERDAS imagine 9.1 ایجاد شد. ارزش هر باند، برای ۴۸ نقطه، در محیط اکسل وارد و در نهایت، مراحل توصیف‌های آماری متغیرها انجام شد. در روش سنجش از دور، انعکاس طیفی نمونه‌ها روی ده باند اصلی استخراج و پردازش شد. سپس همبستگی بین ارزش باندهای اصلی، ترکیب باندها، و شاخص‌های کلسیت با مقدار کلسیت خاک انجام شد. با برازش انواع رگرسیون‌های چندمتغیره بدون حذف داده‌های پرت، بهترین مدل انتخاب شد. آنالیز طیفی خاک‌های مورد نظر با استفاده از دستگاه طیف‌سنج زمینی، با دامنه طول‌موج ۲۵۰۰-۳۵۰ نانومتر، انجام شد. پس از ثبت طیف‌ها، انواع روش‌های پیش‌پردازش مورد ارزیابی قرار گرفت. همبستگی پیرسون و رگرسیون خطی در محیط SPSS 24.1 سنجیده شد.

نتایج و بحث: نتایج آزمایشگاهی نشان داد که میانگین کربنات کلسیم خاک، در کاربری کشاورزی و جنگل، به‌ترتیب ۳۰ و ۲۲/۲۲٪ است. طبق نتایج، باندهای ۱۰ و ۱۱ رابطه معنی‌داری با کلسیت خاک در کاربری جنگل داشته‌اند ($p < 0.05$). دوازده ترکیب باندی در سطح ۵٪ و شش ترکیب باندی در سطح ۱٪ با میزان کلسیت خاک، ارتباط معنی‌داری نشان دادند. همچنین شاخص R_1 ((باند ۲/باند ۵)/(باند ۴/باند ۵))، با کلسیت خاک، رابطه معنی‌داری داشت ($p < 0.05$). رگرسیون بین کلسیت محاسبه‌شده در آزمایشگاه و معادله حاصل از تصویر ماهواره‌ای، در کاربری‌های کشاورزی، برابر $(r^2 = 0.45)$ به دست آمد. در روش طیف‌سنجی، بیشترین همبستگی در طول‌موج ۶۱۲ نانومتر ($r^2 = 0.85^{**}$) مشاهده شد. براساس مدل‌سازی با رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR)، مقدار ضریب تبیین در گروه کالیبراسیون درمورد کلسیت ۰/۸ و مقادیر RMSE برابر با ۴/۸٪، مقدار ضریب تبیین در گروه اعتبارسنجی برابر با ۰/۵ و مقدار RMSE برابر با ۷/۸٪ محاسبه شد. از بین مدل‌های برازش‌یافته با رگرسیون چندمتغیره، در تصاویر ماهواره‌ای، مدل SMLR برای برآورد کلسیت مناسب به نظر می‌رسد. مدل رگرسیونی حداقل مربعات جزئی، برای برآورد کلسیت به‌روش طیف‌سنجی نیز، تقریباً مناسب بوده است.

نتیجه‌گیری: نتایج کلی نشان داد که مدل برآوردشده از روش آماری رگرسیون، در سنجش از دور، توانسته است میزان کلسیت خاک را در اراضی کشاورزی برآورد کند و میزان به‌دست‌آمده براساس روش سنجش از دور و آزمایشگاه اختلاف ناچیزی با یکدیگر دارند. بنابراین می‌توان گفت روش سنجش از دور، در برآورد کلسیت خاک، موفق بوده است. نتایج طیف‌سنجی نیز نشان داد که مدل PLSR، در برآورد مقدار کلسیت خاک، مدل مناسبی است؛ به‌شرط آنکه تعداد نمونه‌ها بیشتر باشد. در برآورد کلی، می‌توان نتیجه گرفت روش طیف‌سنجی مرئی-فروسرخ نزدیک دارای صحت بیشتری از روش سنجش از دور و تیتراسیون است؛ منتها به تعداد نمونه‌های بیشتری نیاز دارد. توصیه می‌شود، برای افزایش صحت کار، تعداد نمونه‌های طیف‌سنجی افزایش یابد و برای مقایسه بهتر بین دو کاربری نیز، تعداد نمونه‌های انتخابی برابر باشد.

کلیدواژه‌ها: گیان، لندست ۸، کاربری اراضی، کلسیت.

استناد: عبدلی، ب. و هاشمی، س.

برآورد کربنات کلسیم خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، سال ۱۶، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳: ۷۷-۹۴.

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۳



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: s.hashemi@malayeru.ac.ir

شناسه دیجیتال مقالات: <https://doi.org/10.48308/GISJ.2023.103395>

۱- مقدمه

تعداد کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ‌ها و خاک‌ها زیاد است و مهم‌ترین آنها کوارتز، سیلیکات و کربنات‌ها هستند. کربنات‌ها نمک‌های اسیدکربنیک با کلسیم و منیزیم‌اند و بهترین ماده اولیه برای تشکیل آهک و گازکربنیک به شمار می‌روند (Islam et al., 2003). بسیاری از خاک‌ها، به‌ویژه آنهایی که در مناطق خشک و نیمه‌خشک گسترش دارند، در فاز جامد خود شامل مقادیر زیادی از کربنات‌ها می‌شوند (Danesh et al., 2009). کانی‌های کربناته در مقایسه با بسیاری از کانی‌های خاک، از جمله کوارتز و فلدسپارها، حلالیت بیشتری دارند و همچنین واکنش‌پذیر و دارای ویژگی قلیایی‌اند؛ به این دلایل، به‌منزله عاملی بافری در خاک عمل می‌کنند. اسیدیته اغلب خاک‌های آهکی در دامنه ۷/۵ تا ۸/۵ است (Loeppert et al., 1984). کربنات‌های معدنی معمولاً به‌صورت نمک‌های کم‌محلول کلسیت (CaCO_3)، کلسیت منیزیم‌دار ($\text{Ca}_{1-x}\text{Mg}_x\text{CO}_3$) و دولومیت ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) در خاک حضور دارند. کلسیت شکل عمده و فعال کربنات‌ها در محیط خاک است و کربنات‌های سدیم و منیزیم و هیدروکسی کربنات‌ها اغلب در رسوبات تبخیری و در خاک‌های شور دیده می‌شوند (Nelson, 1986). امروزه نیاز جهانی به جمع‌آوری اطلاعات مکانی خاک، به‌منظور پایش محیط‌زیست، و نیز مدیریت مکانی خاک بسیار چشمگیر است. بنابراین گردآوری این اطلاعات، از سطح وسیع، نیازمند تکنیک‌های جدیدی است که ساده، ارزان و در حداقل زمان ممکن بتواند اطلاعات چندین ویژگی خاک را ثبت کند (Summers et al., 2011). با استفاده از داده‌های سنجش از راه دور می‌توان، با صرف وقت و هزینه کمتری، به اطلاعات دقیق‌تر و مورد اطمینانی در زمینه ویژگی‌های محیط و تغییرات آنها در مکان و زمان دست یافت (Doner & Lynn, 1989). نینومیا و فو^۱ (۲۰۰۵)، با به‌کارگیری تکنیک سنجش از دور، سه شاخص را به‌منظور تفکیک و جداسازی کانی‌های کوارتزی، کانی‌های مافیک و

کربنات‌ها معرفی کردند. روزین^۲ و همکاران (۲۰۲۳) نیز، با کمک داده‌های سنجش از دور، کانی‌های هماتیت، گوتیت، کائولینیت و گیبسایت را جداسازی کردند و نقشه‌های حاصل با نقشه‌های خاک‌شناسی، زمین‌شناسی و توپوگرافی انطباق بسیاری داشته است. واتانابه^۳ (۲۰۰۲)، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای استر و ترکیب باندهای گوناگون، فرمولی برای شاخص سیلیس و همچنین شاخص‌هایی برای تفکیک کانی‌های کلسیت، آلونیت، مونت‌موریونیت به دست آورد که براساس ترکیبات باندهای ماهواره استر، در نوادا مطرح و در آن منطقه آزموده شد. استفاده از طیف‌سنجی انعکاسی مرئی-فروسرخ نزدیک، در کنار دانش سنجش از راه دور، در دو دهه اخیر توجه فراوانی را به خود جلب کرده است. از مهم‌ترین مزایای تکنیک طیف‌سنجی مرئی-فروسرخ نزدیک، این است که روش یادشده غیرمخرب، سریع، ارزان، دارای حداقل آماده‌سازی نمونه و بدون ضرر و تخریب برای محیط‌زیست است (Fatemi & Rezaei, 2013; Rangzan et al., 2019). طیف‌سنجی مرئی-فروسرخ روشی سریع است که برای تجزیه و تحلیل برخی ترکیبات ضروری خاک، مانند کانی‌های رسی و ماده آلی که در شرایط رشد و تغذیه گیاه تأثیر چشمگیری دارند، مناسب است (Wetterlind et al., 2013). این روش امروزه در شناخت بسیاری از کانی‌های سنگ‌ها و خاک به کار می‌رود (Rangzan et al., 2022; 2023). رطوبت خاک، ماده آلی، اکسیدهای آهن و آلومینیوم و نوع رس از اجزای اصلی خاک‌اند که طیف بازتابی را مستقیماً تحت تأثیر قرار می‌دهند و در این مورد، با نام متغیرهای اولیه شناخته می‌شوند (Stenberg et al., 2010). کربنات کلسیم یکی از رایج‌ترین کربنات‌ها در خاک، به‌ویژه در اقلیم خشک، نیمه‌خشک و نیمه‌مرطوب است. کربنات‌ها در طیف مرئی-فروسرخ،

1. Ninomiya & Fu
2. Rosin
3. Watanabe

۳۴° شمالی و طول جغرافیایی ۴۸° ۱۴' ۵۶" تا ۴۶° ۱۹' ۴۸" غربی است. منطقه در ارتفاع ۱۵۶۳ متر از سطح دریا قرار گرفته و اراضی آن، از نظر ژئومورفولوژی، در دشت دامنه‌ای و مخروط افکنه رسوب واریزه‌ای واقع شده است. به‌طور کلی آب‌وهوای محدوده مورد مطالعه، براساس روش دومارتن، نیمه‌خشک با زمستان‌های سرد و تابستان‌های ملایم و خشک است. متوسط نزولات جوی سالیانه در آن ۳۵۴ میلی‌متر و میانگین دمای سالیانه آن ۱۲/۸ درجه سانتی‌گراد است. این منطقه دارای رژیم رطوبتی زیرک (به‌طور پیوسته، بیش از ۴۵ روز پس از انقلاب زمستانه مرطوب و به‌طور پیوسته، بیش از ۴۵ روز پس از انقلاب تابستانه خشک) و رژیم حرارتی مزیک (متوسط دمای سالیانه خاک، در عمق ۵۰ سانتی‌متر، بین ۸ تا ۱۵ درجه سانتی‌گراد) است (Banaei, 1998). شکل ۱ موقعیت دشت گیان در استان همدان را همراه با نقاط نمونه‌برداری نشان می‌دهد.

۲-۲- نمونه‌برداری و تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی

با توجه به نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه، نواحی مورد نظر برای جمع‌آوری نمونه انتخاب شدند. نمونه‌برداری خاک از عمق (۳۰-۰ سانتی‌متر)، در دو کاربری جنگل و کشاورزی در منطقه گیان، طی مهر ۱۳۹۸ انجام شد. شکل ۱ پراکنش نقاط نمونه‌برداری خاک را در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد. بعد از نمونه‌برداری و خشک‌کردن نمونه‌ها و گذراندن آنها از الک دومیلی‌متری، از بین ۶۳ نقطه نمونه‌برداری، ۴۸ نمونه که دارای فاصله‌های منظم‌تری بودند به‌منظور تعیین پارامترهای خاک در نظر گرفته شدند. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاکی، ازجمله بافت خاک به‌روش هیدرومتر (Gee & Bauder, 1986)، مقدار کربنات کلسیم معادل با روش تیتراسیون (Mc-Lean, 1982)، ظرفیت

در طول موج ۲۳۰۰-۲۳۵۰ و ۲۵۰۰-۲۵۵۰ نانومتر، دارای ویژگی‌های طیفی‌اند (Khayamim et al., 2015). حسنی^۱ و همکاران (۲۰۱۴) همبستگی رس خاک را در طول موج ۴۵۰ نانومتر ($r=0/6$) و همبستگی بین طیف بازتاب خاک و مقدار گچ کل موجود در خاک ($r=0/46$)، همچنین کربنات کلسیم ($r=0/37$) و کربن آلی خاک ($r=0/49$) را در دامنه مرئی طیف بازتابی به دست آوردند. سامرز^۲ و همکاران (۲۰۱۱)، با بررسی سید نقطه از خاک جنوب استرالیا، روش طیف‌سنجی مرئی-فروسرخ نزدیک را در برآورد کربن آلی، مقدار رس، اکسیدهای آهن و کربنات‌های خاک ارزیابی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که ضرایب همبستگی برای درصد رس، مقدار کربن آلی، اکسیدهای آهن و کربنات‌های خاک، به‌ترتیب ۰/۶۶، ۰/۵۷، ۰/۶۱ و ۰/۶۹ است.

مناطق خشک و نیمه‌خشک بخش وسیعی از اراضی دنیا را شامل می‌شوند و بخش اعظم ایران نیز در این مناطق واقع شده است. متأسفانه تحقیقات انجام‌شده درباره وضعیت کانی‌های مهم تشکیل‌دهنده خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌دلیل وسعت این مناطق و شرایط دشوار برای بررسی‌های میدانی و صحرایی، بسیار اندک است. بنابراین هدف تحقیق پیش رو تخمین میزان کلسیت خاک، در دو کاربری جنگل و کشاورزی، در منطقه گیان استان همدان است. این کار با استفاده از روش طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک و تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ انجام می‌شود و سپس روش‌های متفاوت در تخمین میزان کلسیت با هم مقایسه می‌شوند؛ بدین ترتیب می‌توان، از بین روش‌ها، مناسب‌ترین روش را در مقیاس‌های بزرگ‌تر به کار برد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در دشت گیان، جنوب شهرستان نهاوند، قرار دارد. موقعیت جغرافیایی آن، روی نقشه ایران، عرض جغرافیایی ۳۴° ۱۱' ۵" تا ۳۴° ۱۲' ۰۰"

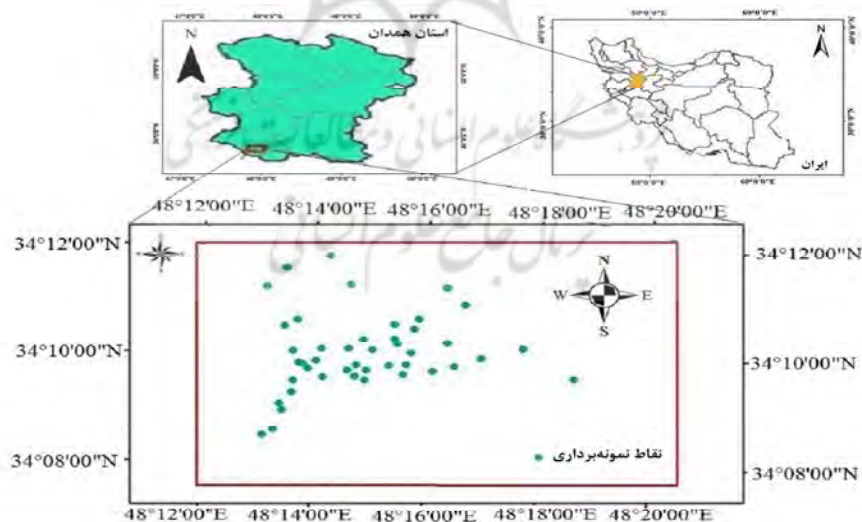
1. Hassani
2. Summers

محل قطعه نمونه با توجه به ابعاد پیکسل درون آن تعیین می‌شود و مشخص کردن جایگاه دقیق آن عملاً امکان‌پذیر نیست؛ از این رو چهار پیکسل اطراف بررسی و میانگین آنها در نظر گرفته شد. تصویر مورد استفاده در این پژوهش فاقد ابر و تصویر کاملاً واضح بود؛ به همین دلیل، تصحیحات اتمسفری انجام نشد. سپس ارزش عددی هر باند، برای ۴۸ نقطه، در محیط اکسل وارد شد و در نهایت، مراحل توصیف‌های آماری متغیرها انجام شد. آزمون همبستگی پیرسون و رگرسیون خطی در محیط SPSS 24.1 انجام شد. در این مطالعه، علاوه بر باندهای اصلی، از سه شاخص R_1 ، R_2 ، R_3 (Askari et al., 2015) و هجده ترکیب باندهای اصلی استفاده شد که در منابع متفاوتی به آنها اشاره شده (Zheng et al., 2016; Meti et al., 2019) و اغلب در شناسایی کانی‌ها، از جمله کربنات خاک، به کار رفته‌اند؛ این موارد در جدول ۲ آورده شده است. سعی شد ترکیب‌های متفاوتی مورد آزمون و خطا قرار گیرند تا بهترین آنها، برای بررسی آهک، استفاده شود.

تبادل کاتیونی^۱ (Sumner & Miller, 1996)، pH خاک در سوسپانسیون ۱:۵ خاک و آب مقطر (Mc-Lean, 1982)، هدایت الکتریکی^۲ در عصاره سوسپانسیون ۱:۵ خاک و آب مقطر (Rhoades, 1996) اندازه‌گیری شد.

۲-۳- تصویر ماهواره‌ای

برای انجام دادن مطالعات سنجش از دور، از تصویر لندست ۸ متعلق به سپتامبر ۲۰۱۹ استفاده شد. مشخصات باندهای لندست ۸ در جدول ۱ آورده شده است. شکل ۲ هم‌پوشانی تصویر با پلی‌گون دشت گیان و استان همدان را نشان می‌دهد. مقادیر محاسبه‌شده هریک از نقاط نمونه در محیط ERDAS imagine 9.1 ایجاد شد. تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ در انواع سطوح مانند سطح پیکسل، سطح صحنه و سطح تصویربرداری در دسترس قرار می‌گیرند؛ در این پژوهش، از سطح پیکسل استفاده شده است. پیش‌پردازش انجام‌شده روی تصاویر، تصحیحات رادیومتریک بوده است. شایان ذکر است که تصحیحات هندسی تصویر ابتدا برای کاهش اعوجاجات و خطاهای هندسی انجام شد.

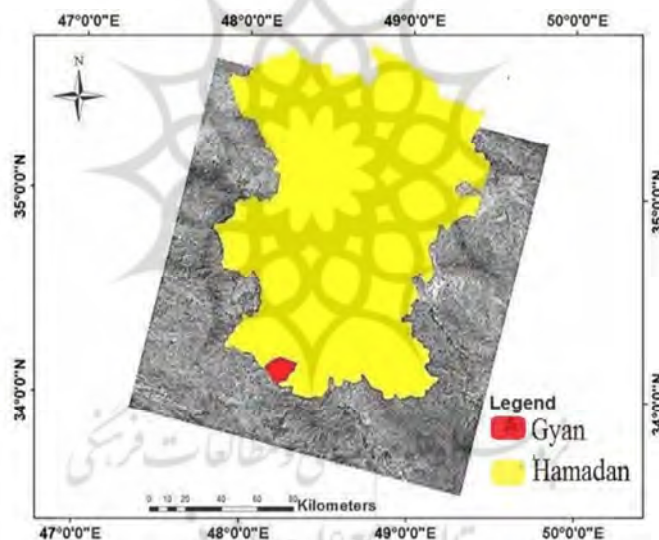


شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری خاک

1. Cation Exchange Capacity
2. Electric Conductivity

جدول ۱. مشخصات باندهای لندست ۸

باند‌ها	طول موج (میکرومتر)	قدرت تفکیک (متر)
Band 1-Ultra Blue	۰/۴۳ - ۰/۴۵	۳۰
Band 2- Blue	۰/۴۵ - ۰/۵۱	۳۰
Band 3- Green	۰/۵۳ - ۰/۵۹	۳۰
Band 4- Red	۰/۶۴ - ۰/۶۷	۳۰
Band 5- Near Infrared (NIR)	۰/۸۵ - ۰/۸۸	۳۰
Band 6- Shortwave Infrared (SWIR) 1	۱/۵۷ - ۱/۶۵	۳۰
Band 7- Shortwave Infrared (SWIR) 2	۲/۱۱ - ۲/۲۹	۳۰
Band 8- Panchromatic	۰/۵ - ۰/۶۸	۱۵
Band 9-Cirrus	۱/۳۶ - ۱/۳۸	۳۰
Band 10- Thermal Infrared (TIRS) 1	۱۰/۶ - ۱۱/۱۹	۱۰۰*(۳۰)
Band 11- Thermal Infrared (TIRS) 2	۱۱/۵ - ۱۲/۵۱	۱۰۰*(۳۰)



شکل ۲. هم‌پوشانی تصویری ماهواره‌ای با پلی‌گون دشت گیان و استان همدان

جدول ۲. شاخص‌ها و ترکیب باندی مورد استفاده برای تعیین کلسیت

شاخص*	ترکیب باندهای اصلی	ترکیب باندهای اصلی	ترکیب باندهای اصلی
R ₁	Band5+Band6	Band3-Band2/Band3+Band2	Band2+Band3
R ₂	Band6+Band7	Band3+Band4	Band3-Band2
R ₃	Band7+Band8	Band4+Band5	Band3/Band2
	Band10-Band9	Band9/Band8	Band8-Band7
	Band10/Band9	Band9- Band8/Band9+Band8	Band8+Band9
	Band10-Band9/Band10+Band9	Band9+Band10	Band9-Band8

*R₁: (Band5/Band4)/(Band5/Band2); R₂: (Band5/Band4)/(Band4/Band3); R₃: (Band5/Band4)/(Band4/Band2)

۴-۲- مطالعات طیف‌سنجی مرئی-فروسرخ

برای برآورد کلسیت خاک به‌روش طیف‌سنجی، طیف خاک‌ها با شرایط استاندارد تهیه شد؛ بدین‌صورت که نمونه‌های هواخشک، در پتری‌دیشی با قطر ۱۰ سانتی‌متر و ضخامت ۱ سانتی‌متر قرار گرفت و نور از فاصله بیست‌سانتی‌متری، با زاویه ۲۰ درجه نسبت به خط عمود، به هر نمونه تابانده شد. بازتاب نیز از طریق چشمی فایبراپتیکی که به‌طور عمودی، با فاصله ۱۵ سانتی‌متر در بالای پتری‌دیش قرار داشت، ثبت شد. سپس چهار قرائت متوالی از هر نمونه انجام شد و در نهایت، از چهار طیف به‌دست‌آمده میانگین‌گیری شد. نمونه‌های خاک با استفاده از دستگاه FieldSpec3 شرکت ASD آمریکا، در آزمایشگاه گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، اسکن شدند. بازتاب مطلق نمونه‌ها در دامنه ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر و با وضوح ۱ نانومتر ثبت شد که در مجموع، ۲۱۵۰ نقطه در هر طیف به دست آمد. از هر نمونه، چهار قرائت بازتاب متوالی گرفته شد و برای هر نمونه خاک، یک طیف که بیانگر طیف بازتابی آن بود، در فایل اصلی داده‌ها ثبت شد. از نرم‌افزارهای Excel و ViewSpecPro برای میانگین‌گیری، پردازش اولیه و تبدیل فرمت طیف‌های خام استفاده شد. به‌منظور پیش‌پردازش طیف‌ها، دو بخش نویزی ابتدا و انتهای طیف‌ها در محدوده بین ۳۵۰ تا ۴۵۰ و ۲۴۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر حذف شد. سپس داده‌های طیفی، با استفاده از نرم‌افزار TheUnscramblerX 10.2، به مشتق اول تبدیل شدند. پس از پیش‌پردازش، به‌کمک آنالیز مؤلفه‌های اصلی، اطلاعات طیفی به‌دست‌آمده خلاصه شد تا بتوان جهاتی را با حداکثر واریانس داده‌های طیفی، جست‌وجو کرد. سپس روش آماری رگرسیون حداقل مربعات جزئی برای پیش‌بینی کلسیت به کار رفت. بدین‌منظور ابتدا مجموعه داده‌ها به‌صورت تصادفی، به دو گروه کالیبراسیون و اعتبارسنجی تقسیم شد. سپس از رگرسیون خطی چندگانه (MLR) برای برآورد کلسیت استفاده شد. مراحل توصیف‌های آماری

متغیرها، پیش‌پردازش طیف‌ها و مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Unscrambler 10.3 انجام شد.

۳- نتایج

۳-۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

میانگین برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه، در دو کاربری، در جدول ۳ بیان شده است. تعداد نقاط نمونه‌برداری، در کاربری کشاورزی، ۳۹ و در کاربری جنگل، به‌دلیل مساحت کمتر، ۹ است. نتایج نشان داد که بالاترین میزان درصد کربنات کلسیم در خاک شماره ۲۷ (۵۷/۵٪) با کاربری کشاورزی و کمترین میزان آن در خاک شماره ۱۲ (۱۰/۵٪) با کاربری جنگل وجود دارد. میانگین میزان کلسیت خاک، در کاربری کشاورزی و جنگل، به‌ترتیب ۳۰ و ۲۲/۲۲٪ است (جدول ۳). بافت خاک در بیشتر نمونه‌ها لومی-رسی-شنی است. رطوبت خاک موجب کاهش بازتاب در بخش مرئی و فروسرخ می‌شود؛ بنابراین خاک رسی که رطوبت بسیاری را جذب کلونید می‌کند، انعکاس کمتری در طول‌موج‌های مرئی و فروسرخ نزدیک و میانی دارد زیرا آنها را به‌شدت جذب می‌کند. عامل جذب، در طول‌موج ۱۴۰۰ نانومتر، H_2O + OH و در طول‌موج ۲۲۰۰ نانومتر، گروه Al-OH است (Rangzan et al., 2019). حداکثر و حداقل مقدار شوری، در عصاره‌های خاک، به‌ترتیب ۰/۴۵ و ۰/۹۴ دسی‌زیمنس بر متر در کاربری کشاورزی مشاهده شده است. بیشترین میزان ظرفیت تبادل کاتیونی به خاک شماره ۱۹ (۴۷/۶ سانتی‌مول بر کیلوگرم)، با کاربری جنگل و کمترین میزان آن به خاک شماره ۳۵ (۲۶/۹ سانتی‌مول بر کیلوگرم)، با کاربری کشاورزی تعلق دارد.

۳-۲- آنالیز تصاویر ماهواره‌ای لندست

ماتریس همبستگی بین باندهای متفاوت تصویر ماهواره‌ای لندست در جدول ۴ نشان داده شده است. مطابق این جدول، باند ۵ کمترین همبستگی را با سایر باندها نشان می‌دهد و از این‌رو تابش‌های ثبت‌شده در این باند از سایر باندها متمایز خواهد بود.

جدول ۳. برخی ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک‌های مطالعه‌شده

نوع کاربری	کربن آلی خاک O.C (%)	آهک (%)	هدایت الکتریکی (dSm ⁻¹)	اسیدیته	ظرفیت تبادل کاتیونی (Cmol.kg ⁻¹)
حداقل					
کشاورزی	۰/۱	۱۵	۰/۰۹	۷	۲۶/۹
جنگل	۰/۶	۱۰/۵	۰/۱۶	۷	۲۷/۲
حداکثر					
کشاورزی	۲/۸	۴۷/۵	۰/۴۵	۷/۹	۴۰
جنگل	۲/۶	۳۹/۷	۰/۳۲	۷/۶	۴۷/۶
میانگین					
کشاورزی	۱/۱	۳۰	۰/۲۱	۷/۴	۳۲/۴
جنگل	۱/۹	۲۲/۲	۰/۲۳	۷/۵	۳۸/۵

جدول ۴. ماتریس همبستگی بین باندهای گوناگون تصویر ماهواره‌ای لندست

نام باند	باند ۱	باند ۲	باند ۳	باند ۴	باند ۵	باند ۶	باند ۷	باند ۸	باند ۹	باند ۱۰	باند ۱۱
باند ۲		۱	** ۰/۹۸۹	** ۰/۹۸۹	ns ۰/۱۲۳	** ۰/۹۷۲	** ۰/۹۴۷	** ۰/۹۴۶	** ۰/۸۴۷	** ۰/۶۶۹	** ۰/۲۷۶
باند ۳			۱	** ۰/۹۸۴	ns ۰/۲۱۷	** ۰/۹۷۸	** ۰/۹۱۵	** ۰/۹۳۹	** ۰/۸۷۴	** ۰/۶۲۸	ns ۰/۲۷۶
باند ۴				۱	ns ۰/۱۳۹	** ۰/۹۷۸	ns ۰/۹۴۱	** ۰/۹۴۹	** ۰/۸۷۱	** ۰/۶۷۵	* ۰/۳
باند ۵					۱	ns ۰/۱۹۷	ns ۰/۹۵	ns ۰/۲۰۲	** ۰/۴۲۱	ns ۰/۲۲۲	ns ۰/۰۰۵
باند ۶						۱	** ۰/۹۳۶	** ۰/۹۲۲	ns ۰/۸۸۵	ns ۰/۶۸۸	* ۰/۳۳۶
باند ۷							۱	** ۰/۸۸۰	** ۰/۷۵۸	** ۰/۸۰۹	** ۰/۳۲۸
باند ۸								۱	** ۰/۸۵۰	** ۰/۶۷۷	** ۰/۲۸۸
باند ۹									۱	** ۰/۵۴۶	** ۰/۲۸۷
باند ۱۰										۱	* ۰/۴۹۴
باند ۱۱											۱

*، ** به ترتیب، در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد، معنی‌دار است و ns معنی‌دار نیست.

رگرسیون باندهای اصلی و شاخص‌ها با

کلسیت: میزان انعکاس طیفی نمونه‌ها روی ده باند اصلی، ترکیب باندها و شاخص‌های مورد استفاده استخراج، و رگرسیون بین باندهای اصلی و میزان کلسیت انجام شد. سطح معنی‌داری، یا همان P-value که بیانگر سطح احتمال خطاست، برای بیان رگرسیون داده‌های کلسیت با ارزش‌های عددی باندها، در دو سطح ۱ و ۵٪ بررسی شد. همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، باندهای ۲، ۳، ۶، ۷ و ۹ با میزان کلسیت در سطح احتمال ۱٪ ($p < 0.01$) و باندهای ۴، ۸ و ۱۰ با میزان کلسیت در سطح احتمال ۵٪ ($p < 0.05$) معنی‌دار بودند. باندهای ۵ و ۱۱ با میزان کلسیت رابطه معنی‌داری نداشتند. از بین شاخص‌ها، فقط شاخص R_1 در سطح ۵٪ معنی‌دار بود.

رگرسیون ترکیب باندها با کلسیت: نتایج نشان

داد که از بین هجده ترکیب باندهای اصلی، دوازده ترکیب با میزان کلسیت در سطح ۵٪ ($p < 0.05$) و شش ترکیب باندهای اصلی با کلسیت در سطح ۱٪ ($p < 0.01$) ارتباط معنی‌دار دارند (جدول ۶). باندهای اصلی که برای بررسی کلسیت در منطقه مورد مطالعه استفاده شد، ترکیب آنها نیز ارتباط معنی‌داری را با کلسیت نشان داده است. بر مبنای جدول ۵، باند ۵ با میزان کلسیت خاک، رابطه معنی‌دار ندارد، اما ترکیب این باند، با باندهای ۴ و ۶، به ترتیب رابطه معنی‌داری در سطح ۵٪ و ۱٪ دارند (جدول ۶).

جدول ۵. رگرسیون باندهای اصلی و شاخص‌ها با میزان کلسیت خاک

باند	R ²	باند	R ²	شاخص	R ²
Band2	۰/۳۷**	Band7	۰/۳۹**	R ₁	۰/۳۵*
Band3	۰/۳۷**	Band8	۰/۳۵*	R ₂	۰/۲ ^{ns}
Band4	۰/۳۵*	Band9	۰/۴۱**	R ₃	۰/۲۶ ^{ns}
Band5	۰/۱۸ ^{ns}	Band10	۰/۳۱*		
Band6	۰/۴**	Band11	۰/۰۳ ^{ns}		

*, ** به ترتیب، در سطح احتمال ۵ و ۱٪ معنی‌دار است و ns معنی‌دار نیست.

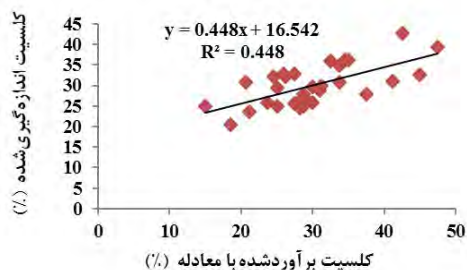
جدول ۶. رگرسیون ترکیب باندها با میزان کلسیت خاک

شماره	ترکیب باندها	R ²	شماره	ترکیب باندها	R ²
۱	Band8-Band7	۰/۲۷*	۱۰	Band2+Band3	۰/۳۷**
۲	Band8+Band9	۰/۳۵*	۱۱	Band3-Band2	۰/۳۶*
۳	Band9-Band8	۰/۳۴*	۱۲	Band3/Band2	۰/۳۷**
۴	Band9/Band8	۰/۳۶*	۱۳	(Band3-Band2)/(Band3+Band2)	۰/۳۸**
۵	(Band9-Band8)/(Band9+Band8)	۰/۳۵۲*	۱۴	Band3+Band4	۰/۳۶*
۶	Band9+Band10	۰/۳۲*	۱۵	Band4+Band5	۰/۳۵*
۷	Band10-Band9	۰/۳۱*	۱۶	Band5+Band6	۰/۳۷**
۸	Band10/Band9	۰/۲۸*	۱۷	Band6+Band7	۰/۴**
۹	(Band10-Band9)/(Band10+Band9)	۰/۳۴*	۱۸	Band7+Band8	۰/۳۸**

*, ** به ترتیب، در سطح احتمال ۵ و ۱٪ معنی‌دار است.

رابطه (۱)

$$\begin{aligned} \text{CaCO}_3 = & -4894.706 + 50.191 \text{LogBand2} - \\ & 193.390 \text{LogBand3} - 125.22 \text{Log} \\ & \text{Band4} + 12.265 \text{LogBand5} + 149.034 \text{LogBand6} + 11 \\ & 4.803 \text{LogBand7} - \\ & 2.681 \text{LogBand8} + 1569.214 \text{LogBand9} - 160.891 \\ & \text{LogBand10} - 50.403 \text{LogBand11} \\ R^2 = & ۰/۴۵; R = ۰/۶۶۹ \end{aligned}$$



شکل ۳. رگرسیون کلسیت برآورد شده با معادله و کلسیت اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه، در کاربری کشاورزی

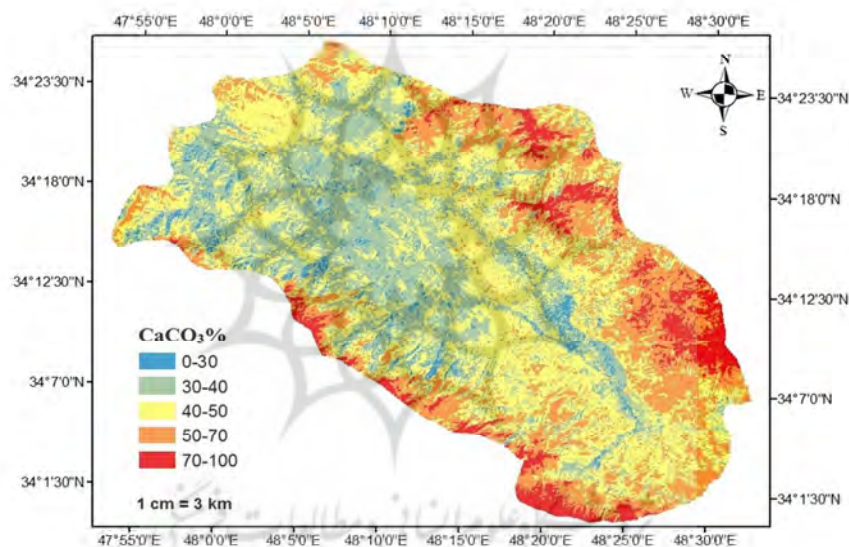
معادله رگرسیون باندهای اصلی با کلسیت در

کاربری کشاورزی و جنگل: با استفاده از روش رگرسیون، معادله‌ی کلسیت نمونه‌ها در کاربری کشاورزی، برای باندهای اصلی، به دست آمد (رابطه (۱)). مقادیر ارزش عددی باندها، برای هر نقطه مورد مطالعه، در معادله (۱) قرار داده شد و در نهایت، با کمک آن، میزان کلسیت تخمین زده شد. سپس داده‌های حاصل از اندازه‌گیری کلسیت، با کمک روش تیتراسیون، با داده‌های تخمین زده شده از رابطه (۱)، رگرسیون گرفته شدند و میزان ارتباط بین آنها به دست آمد (شکل ۳). نقشه کلسیت حاصل از اعمال این معادله در شکل ۴ نشان داده شده است.

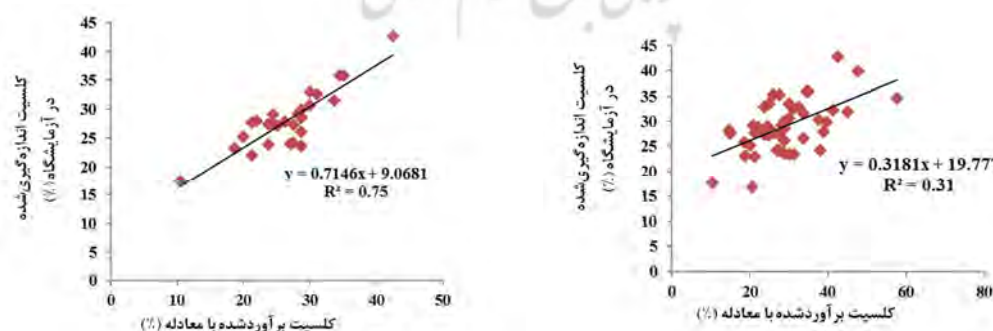
رگرسیون باندهای اصلی با میزان کلسیت، ارزش‌های طیفی باندهای اصلی در معادله قرار گرفت و در نهایت، میزان کلسیت با کمک معادله محاسبه شد. رگرسیون بین کلسیت محاسبه‌شده در آزمایشگاه با کلسیت برآوردشده از طریق معادله، بدون حذف داده‌های پرت در شکل ۵، (سمت چپ) نشان داده شده است. داده‌های پرت حذف و بار دیگر رگرسیون محاسبه شد، که میزان آن بالا ($r^2 = 0.75$) (سمت راست) بدست آمد. نقشه حاصل از این رگرسیون (با حذف داده‌های پرت) بسیار متفاوت با حالت قبلی بود (شکل ۶).

رگرسیون باندهای اصلی با میزان کلسیت، در کاربری جنگل، نیز محاسبه شد و فقط باندهای حرارتی (باند ۱۰ و ۱۱) با میزان کلسیت رابطه معنی‌داری را نشان دادند ($p < 0.05$). تعداد اندک نمونه یکی از علل نامطمئن بودن همبستگی حاصل از داده‌های کاربری جنگل است.

معادله رگرسیون باندهای اصلی، شاخص‌ها و ترکیب باندها با میزان کلسیت: معادله رگرسیون حاصل از باندهای اصلی، در روش Stepwise، در سطح ۱٪ معنی‌دار بود. پس از تعیین معادله حاصل از



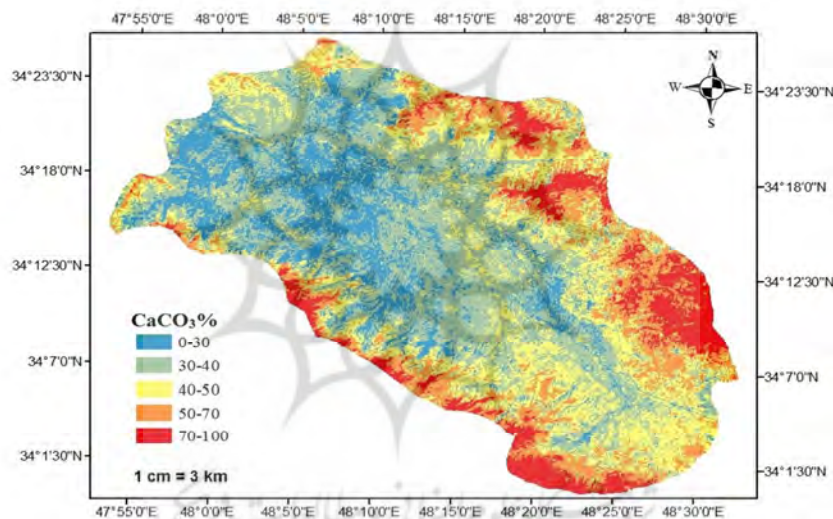
شکل ۴. نقشه کلسیت حاصل از معادله، با کمک داده‌های ماهواره‌ای



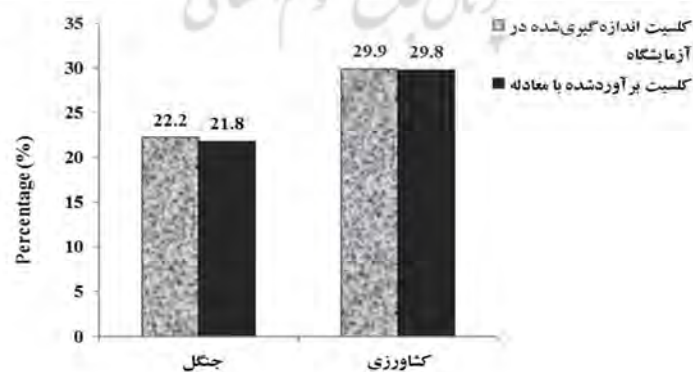
شکل ۵. رگرسیون کلسیت اندازه‌گیری‌شده در آزمایشگاه و کلسیت برآوردشده با معادله حاصل از باندهای اصلی، بدون حذف داده‌های پرت (چپ) و با حذف داده‌های پرت (راست) در تمامی نقاط

شاخص‌ها، در هر دو حالت (مدل رگرسیونی هر سه شاخص و مدل رگرسیونی شاخص R_1)، رگرسیون گرفته شد و در هر دو مورد، ضریب تبیین، پایینی داشتند. همچنین معادله رگرسیونی حاصل از ترکیب باندها نیز معنی‌دار نشد. از این‌رو می‌توان گفت، در روش رگرسیون و تولید معادله حاصل، باندهای اصلی نقش مهم‌تری در ایجاد معادله برای برآورد میزان کلسیت دارند. مقایسه میانگین کلسیت اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه (جدول ۳) و کلسیت تخمین زده شده براساس معادله باندهای اصلی تصویر ماهواره‌ای، در دو کاربری متفاوت، در شکل ۷ نشان داده شده است.

همان‌طور که شکل ۵ نشان می‌دهد، رگرسیون کلسیت محاسبه شده با معادله حاصل از باندهای اصلی طیفی و کلسیت اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه، بدون حذف داده‌های پرت، پایین ($R^2=0/31$) است. اما مقدار آن، با حذف داده‌های پرت، بالا بود ($R^2=0/75$). داده پرت ناشی از خطاست و هنگامی که این داده‌ها حذف می‌شود، میزان ضریب تبیین افزایش می‌یابد. در بین مدل‌های رگرسیونی حاصل از شاخص‌های کلسیت، فقط رگرسیون به‌روش Stepwise برای شاخص R_1 معنی‌دار بود ($p<0/05$). کلسیت اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه با کلسیت برآورد شده از معادله حاصل از



شکل ۶. نقشه کلسیت حاصل از معادله با حذف داده‌های پرت، با کمک داده‌های ماهواره‌ای



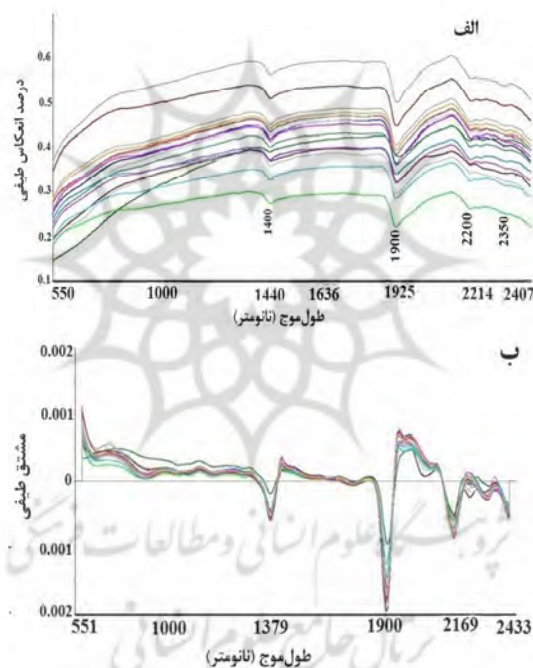
شکل ۷. مقایسه میانگین کلسیت اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و برآورد شده با معادله حاصل از تصویر ماهواره‌ای در دو کاربری

۳-۳- مطالعات طیفی

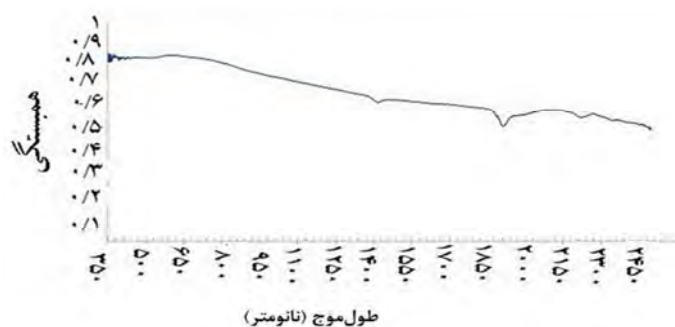
چهار جذب اصلی $\text{OH}+\text{H}_2\text{O}$ در ۱۴۰۰ نانومتر، H_2O در ۱۹۰۰ نانومتر، AL-OH در ۲۲۰۰ نانومتر و کربنات در ۲۳۵۰ نانومتر، در طیف بازتاب خام مشاهده می‌شود (شکل ۸-الف) (Rangzan et al., 2019).

مقدار کربنات کلسیم معادل خاک، با میزان طیف بازتابی، دارای رگرسیون مثبت است. همچنان‌که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، کاهش بازتاب در نمونه خاک آهکی، در محدوده ۱۴۰۰ و ۱۹۰۰ نانومتر است. بیشترین میزان ضریب تبیین در این مطالعه در طول موج ۶۱۲ نانومتر ($r^2=0/85$) مشاهده شد.

طیف بازتابی خام هفده نمونه خاک (شکل ۸-الف) و نیز مشتق اول آنها (شکل ۸-ب) در شکل ۸ نمایش داده شده است. بازتاب خاک به‌طور کلی، در محدوده مرئی، پایین و در محدوده فروسرخ، بالاست. همچنین، در طول موج‌های ۱۴۰۰، ۱۹۰۰ و ۲۲۰۰ نانومتر، عوارض جذبی آشکاری در طیف‌ها دیده شد (Hun, 1980). این باندها، در حقیقت، از OH آب آزاد در ۱۴۰۰ و ۱۹۰۰ نانومتر و نیز OH در طول موج‌های ۱۴۰۰ و ۲۲۰۰ نانومتر (Hun, 1980) ناشی می‌شود. قله‌های جذب به‌طور کلی، در نمودار مشتق اول، بارزتر دیده می‌شوند.



شکل ۸. طیف بازتابی خام (الف) و مشتق اول (ب) از هفده نمونه خاک



شکل ۹. همبستگی بین کلسیت خاک و بازتاب طیفی حاصل از تابش نور مرئی-فروسرخ

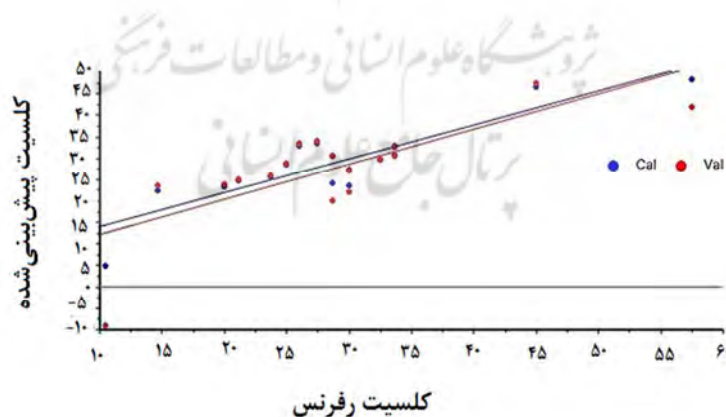
۴- بحث

نتایج حاصل از ویژگی‌های شیمیایی نشان داد که میزان آهک، در کاربری کشاورزی، بیشتر است. عملیات شخم می‌تواند باعث زیرروشدن خاک شود و آهک را از عمق‌های پایین‌تر، به سطح انتقال دهد و بنابراین میزان آهک بیشتری گزارش شود. شست‌وشوی آهک در کاربری جنگل، براساس حلالیت بیشتر آن به دلیل بارش‌های بیشتر در مناطق جنگلی، و حرکت آنها به سمت پایین دشت (اراضی کشاورزی) نیز از علل دیگر است (Khayamim et al., 2015). براساس نتایج به‌دست‌آمده از همبستگی باندهای لندست ۸، باند ۵، همبستگی کمتری با سایر باندها داشته است. طبق نتایج پژوهش پورمحمدی^۱ و همکاران (۲۰۱۶) نیز، باند ۵ در لندست ۷ همبستگی کمتری با سایر باندها داشته است. متی^۲ و همکاران (۲۰۱۹) نیز، با استفاده از تصاویر لندست در برآورد شوری خاک، نشان دادند باند ۵ با مقدار کربنات خاک رابطه معنی‌داری ندارد؛

مقادیر R^2 و RSME حاصل از مدل‌سازی با رگرسیون PLSR، برای کلسیت، در جدول ۷ نشان داده شده است. در روش PLSR، از روش اعتبارسنجی متقابل استفاده شد؛ در این روش، تعداد داده‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی یکسان می‌شود. برای کلسیت، مقدار ضریب تبیین در گروه کالیبراسیون برابر با ۰/۸، مقادیر RMSE برابر ۴/۸؛ مقدار ضریب تبیین در گروه اعتبارسنجی برابر ۰/۵ و مقدار RMSE برابر با ۷/۸ محاسبه شد. در سری اعتبارسنجی، مقادیر R^2 کمتر از سری کالیبراسیون و مقادیر RMSE بیشتر از مقادیر مشابه آن در سری کالیبراسیون است، اما با این حال کارکرد آماری آن تغییر چندانی نداشته است. نتایج نشان داد، اگر سری کالیبراسیون کمتر از سری اعتبارسنجی باشد، از کیفیت برآوردها کاسته می‌شود و این نکته در روش PLSR صادق است. شکل ۱۰ نمودارهای مقادیر اندازه‌گیری‌شده در برابر مقادیر پیش‌بینی‌شده کلسیت را در گروه اعتبارسنجی نشان می‌دهد.

جدول ۷. داده‌های مدل‌سازی کلسیت خاک به روش PLSR

ویژگی خاک		کالیبراسیون		اعتبارسنجی	
		RMSE	R^2	RMSE	R^2
کلسیت		۴/۸	۰/۸	۷/۸	۰/۵



شکل ۱۰. داده‌های بازتاب طیفی پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شده در گروه اعتبارسنجی با روش PLSR

1. Poormohamadi
2. Meti

در صورتی که نسبت باند ۲ و ۳ به باند ۵، با برخی پارامترهای شوری دارای رابطه معنی‌دار است. آنها خاطرنشان کردند تأثیر ترکیب باندی، در دریافت اطلاعات، بیشتر از تک‌باند بودن است. در تحقیق حاضر، باندهای ۲، ۳، ۴، ۶ و ۹ در سطح ۱٪ و باندهای ۴، ۸ و ۱۰ در سطح ۵٪ با میزان کلسیت رابطه معنی‌داری نشان دادند. باندهای ۵ و ۱۱ با میزان کلسیت رابطه معنی‌داری نداشتند. این نتایج با نتایج پژوهش جنگ^۱ و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد. آنها از باندهای فروسرخ نزدیک برای جدا کردن کربنات‌ها استفاده کردند. دانش^۲ و همکاران (۲۰۰۹) بیشترین رگرسیون آهک خاک را با باند فروسرخ نزدیک و پس از آن، با باندهای سبز، قرمز و فروسرخ میانی به دست آوردند؛ این مقادیر در سطح آماری ۱٪ معنی‌دار بودند. از بین سه شاخص کلسیت، فقط شاخص R_1 با میزان کلسیت خاک، در سطح احتمال ۵٪، رابطه معنی‌داری نشان داد. پورمحمدی و همکاران (۲۰۱۶) نیز از این سه شاخص برای شناسایی سازندهای آهکی استفاده کردند و در نتایج، نشان دادند که هر سه شاخص همبستگی بالایی با سازند آهکی دارند. همان‌گونه که بیان شد، باند ۵ با میزان کلسیت رابطه معنی‌دار نداشت، اما ترکیب این باند با باندهای ۴ و ۶، به ترتیب، ارتباط معنی‌داری در سطح ۵٪ و ۱٪ نشان داد. ترکیب باندها می‌تواند مجموع جدید سیگنال‌های باندهای رادیومتری با یکدیگر باشد و در ارائه پارامتر خاکی، نقش مؤثری داشته باشد (Rahmani et al., 2011). براساس نتایج، ترکیب باندها با میزان کلسیت دارای رابطه معنی‌دار است. مطابق شکل ۳، میزان ضریب تبیین کلسیت اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و کلسیت برآورد شده با معادله باندهای طیفی، در کاربری کشاورزی، $R^2=0/45$ محاسبه شد، اما مقادیر محاسبه شده در مورد کاربری جنگل دارای اطمینان کافی نبود. دلیل آن را می‌توان به تعداد اندک نمونه‌ها در کاربری جنگل نسبت داد. به‌طور کل، براساس مقایسه‌ها، میزان کلسیت محاسبه شده در آزمایشگاه و معادله حاصل از داده‌های

ماهواره‌ای، در کاربری کشاورزی، بیشتر از کاربری جنگل است. شکل غالب کربنات معدنی، در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، کربنات کلسیم است. تحقیقات نشان داده‌اند که تغییر کاربری اراضی باعث ایجاد تفاوت معنی‌دار در مقدار کربنات کلسیم کاربری‌های متفاوت می‌شود. از آنجا که هدایت هیدرولیکی اراضی جنگلی از اراضی کشاورزی بیشتر است، این احتمال وجود دارد که بر اثر افزایش آب نفوذ یافته و آب‌شویی بیشتر، آهک از خاک زمین‌های جنگلی خارج شود و مقدار آن کاهش یابد. شخم‌زدن خاک اراضی کشاورزی را نیز می‌توان دلیل دیگری برای افزایش آهک در بخش سطحی برشمرد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده شد، مدل برآورد شده با روش آماری رگرسیون در سنجش از دور به‌خوبی توانسته است میزان کلسیت خاک را در اراضی کشاورزی برآورد کند و میزان حاصل از روش سنجش از دور و آزمایشگاه اختلاف ناچیزی با یکدیگر دارند. از این رو می‌توان گفت روش سنجش از دور، در برآورد کلسیت خاک، موفق بوده است.

با توجه به بازتاب‌های طیفی مشاهده شده در شکل ۸، با افزایش طول موج از دامنه مرئی، مقدار بازتاب طیفی خاک به تدریج افزایش می‌یابد و حداکثر به مرز ۵۵٪ می‌رسد و از سویی، در طول موج‌های بین ۱۳۷۰ تا ۱۵۰۰، ۱۸۶۰ تا ۲۰۵۰ و ۲۲۰۰ تا ۲۲۳۰ نانومتر، مقادیر بازتاب طیفی خاک‌ها به شدت کاهش می‌یابد. این طول موج‌ها را طول موج‌های جذبی می‌نامند و به جذب آب (طول موج ۱۴۱۴)، پیوندهای H-O-H مولکول‌های آب (طول موج ۱۹۱۳) و پیوندهای OH با فلزات آلومینیوم (Al-OH)، (طول موج ۲۲۰۷) اشاره دارند (Ben-Dor & Banin, 1994). طبق نتایج حاصل از رگرسیون کربنات کلسیم معادل خاک با طیف بازتابی، رابطه معنی‌دار را نشان داد (شکل ۹) و کاهش بازتابی،

1. Zheng
2. Danesh

(۲۰۱۶) مدل‌های رگرسیونی حداقل مربعات جزئی (PLSR) و رگرسیون خطی چندمتغیره گام‌به‌گام (SMLR) را به‌منظور مطالعه توالی زمانی خاک، با استفاده از طیف‌سنجی، به کار بردند و صحت بالایی را گزارش کردند. خیامیم و همکاران (۲۰۱۵) نیز، با کمک مدل PLSR، ضریب تبیین ۰/۵۲ را برای آهک و ۰/۸ را برای گچ نشان دادند. فورکوئر^۴ و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه برخی ویژگی‌های خاک‌های بورکینافاسو با تصاویر لندست، در کنار سایر مدل‌ها، از مدل آماری MLR استفاده کردند ولی این مدل قادر به مقایسه مطلوب بین متغیرهای وابسته و غیروابسته نبود. نتایج مطالعه حاضر بازگو می‌کند مدل PLSR برای برآورد مقدار کلسیت خاک مناسب است؛ به شرط آنکه تعداد نمونه‌ها برای طیف‌سنجی بیشتر باشد. فنگ^۵ و همکاران (۲۰۱۸) نیز، در مطالعات خود، مدل PLSR را به دلیل سرعت بالا، در زمینه خاک‌شناسی مناسب معرفی کرده‌اند. کوآنگ و موازن^۶ (۲۰۱۲) پیشنهاد کردند که حداقل پنجاه نمونه برای دقت خوب و حداقل هزینه برای پیش‌بینی طیفی، در مقایسه مزرعه‌ای، برای برآورد کربن آلی، مقدار رطوبت و ازت کل کافی است.

۵- نتیجه‌گیری کلی

براساس نتایج، باندهای ۲، ۳، ۴، ۶، ۷ و ۹ تصویر لندست ۸ با کلسیت در سطح ۱٪ و باندهای ۴، ۸ و ۱۰ با کلسیت در سطح ۵٪ معنی‌دار بودند و بین باندها و میزان کلسیت، در کاربری کشاورزی، رابطه معنی‌داری وجود نداشت. اما در کاربری جنگل، باندهای حرارتی با کلسیت در سطح ۱٪ معنی‌داری بودند. ترکیب باندها نیز، ارتباط معنی‌داری با کلسیت خاک نشان داده‌اند.

در نمونه خاک آهکی، در محدوده ۱۴۰۰ و ۱۹۰۰ نانومتر اتفاق افتاده است. می‌توان گفت که ویژگی جذبی مولکول آب، به‌علاوه OH در ۱۴۰۰ نانومتر و مولکول آب در ۱۹۰۰ نانومتر، به‌علت فرکانس ارتعاشات پایه مولکول آب، شامل کشش متقارن و نامتقارن پیوند O-H و خمش O-H می‌شود (Hunt, 1980). یون کربنات، در باند ۲۳۵۰ نانومتری، جذب قوی و در ۱۹۹۰ نانومتری، جذب ضعیفی دارد (Fang et al., 2018). زینی^۱ و همکاران (۲۰۱۲) در بررسی ذرات کلسیت و دولومیت به‌شکل خالص و مخلوط با کانی‌ها، از دامنه فروسرخ نزدیک (۲۳۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر) و فروسرخ حرارتی (۱۱۵۰ تا ۱۴۰۰ نانومتر) استفاده کردند. آنها نشان دادند که مقدار باندهای جذب حاصل از آن و موقعیت باندها، در هر دو دامنه طیفی، کاملاً تحت تأثیر مقدار کلسیت و دولومیت است. اندازه ذرات کانی و همچنین میزان مخلوط‌بودن آنها نیز در موقعیت جذب و شدت آن اثرگذار است. یان‌بینگ^۲ و همکاران (۲۰۲۱) طی مطالعه ۲۴۶ نقطه در هفت نمونه خاک استان شانکسی چین، برای برآورد کربنات کلسیم خاک، از طیف فروسرخ نزدیک- مرئی (۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر) استفاده کردند. در تحقیق آنها، تمامی مدل‌های ایجادشده با طیف‌سنجی، رابطه معنی‌داری بالایی با کربنات کلسیم ($R^2 \geq 0.96$) داشتند. بر مبنای نتایج، می‌توان مدل رگرسیونی حداقل مربعات جزئی را برای برآورد صحت داده‌های طیفی به کار برد. براساس مدل‌سازی با رگرسیون PLSR، درمورد کلسیت، مقدار ضریب تبیین در گروه کالیبراسیون برابر با ۰/۸، مقادیر RMSE برابر ۰/۴/۸، مقدار ضریب تبیین در گروه اعتبارسنجی برابر ۰/۵ و مقدار RMSE برابر ۰/۷/۸ محاسبه شد. در پژوهش بن‌دور و بنانین^۳ (۱۹۹۴)، ضریب تبیین ۰/۶۹ برای مقدار کربنات کلسیم و ۰/۸۶ برای مقدار رس به دست آمد. در این مطالعه، نتایج تقریباً مشابهی درمورد کربنات کلسیم حاصل شد. در برخی مطالعات، صرفاً گستره‌های ۵۰۰ تا ۹۰۰ و ۱۳۵۰ تا ۱۴۶۰ نانومتر استفاده می‌شود. جنگ و همکاران

1. Zaini
2. Yanbing
3. Ben-Dor & Banin
4. Forkuor
5. Fang
6. Kuan & Mouazen

- Cozzolino, D. & Moron, A., 2003, **The Potential of Near Infrared Reflectance Spectroscopy to Analyze Soil Chemical and Physical Characteristics**, Journal Agricultural Science, 140, PP. 65–71. <https://doi.org/10.1017/S0021859602002836>.
- Danesh, M., Bahrami, H.A., Alavipanah, S.K. & Norouzi, A.A., 2009, **The Investigation of Particles diameter Geometric Mean and Soil Calcite by Using Remote Sensing Data (study area: west southern of Lorestan province, Poldokhtar area)**, Iran Geology Journal, 10, PP. 25–36. <https://dori.net/dor/20.1001.1.16807073.2010.12.4.4.6>.
- Doner, H.E. & Lynn, W.C., 1989, **Carbonate, Halide, Sulfate and Sulfide Minerals**, Minerals in the Soil Environment, 13, PP. 279–330.
- Fang, Q., Hong, H., Zhao, L., Kukulich, S., Yin, K. & Wang, Ch., 2018, **Visible and Near-Infrared Reflectance Spectroscopy for Investigating Soil Mineralogy: A Review**, Journal of Spectroscopy, 168974. <https://doi.org/10.1155/2018/3168974>.
- Fatemi, S.B. & Rezaei, Y., 2013, **Introduction to Remote Sensing**, BualiSina University Press, Hamadan.
- Forkuor, G., Hounkpatin, O.K.L., Welp, G. & Thiel, M., 2017, **High Resolution Mapping of Soil Properties Using Remote Sensing Variables in South-Western Burkina Faso: A Comparison of Machine Learning and Multiple Linear Regression Models**, PLoS ONE, 12(1), P. e0170478. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0170478>.
- Gee, G.W. & Bauder, J.W., 1986, **Particle-Size Analysis**, In: Methods of Soil Analysis Part I, Physical and Mineralogical Methods, Edited by: Klute A. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA.
- Hassani, A., Bahrami, H.A., Noroozi, A.A. & Ostan, Sh., 2014, **Visible-Near Infrared Reflectance Spectroscopy for Assessment of Soil Properties in Gypseous and Calcareous Soils**, Watershed Engineering and Management, 6(2), PP. 234–245. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2014.101721>.
- طبق نتایج رگرسیون، ضریب تبیین حاصل از کلسیت محاسبه شده در آزمایشگاه با تصویر ماهواره‌ای در ۴۸ نقطه، برابر با $R^2=0/31$ بدست آمد. از بین شاخص‌های مورد استفاده برای کلسیت، تنها شاخص R_1 با کلسیت خاک رابطه معنی‌داری در سطح ۵٪ دارد. بنابراین می‌توان گفت که روش سنجش از دور، در برآورد میزان کلسیت خاک، موفق بوده است. نتایج طیف‌سنجی گویای آن است که طول‌موج ۶۱۲ نانومتر ($r^2=0/85$) بیشترین میزان ضریب تبیین با کلسیت را دارد. مقادیر R^2 و RSME حاصل از مدل‌سازی، با رگرسیون PLSR، در مورد کلسیت نشان داد که مدل PLSR می‌تواند مدل خوبی برای برآورد کلسیت خاک باشد. به‌طور کلی روش طیف‌سنجی دقیقی بیشتر از روش سنجش از دور و آزمایشگاهی دارد. تخمین این روش، در مقایسه با روش سنجش از دور، کمتر است زیرا به نمونه‌های بیشتر برای اندازه‌گیری نیاز دارد. روش آزمایشگاهی پرهزینه‌تر و زمان‌برتر از دو روش سنجش از دور و طیف‌سنجی است. از این‌رو، برای صرفه‌جویی در وقت، روش طیف‌سنجی مناسب و برای صرفه‌جویی در هزینه، با توجه به هزینه بالای طیف‌سنجی، می‌توان روش سنجش از دور را پیشنهاد کرد.

۶- منابع

- Askari, M.S., Rourke, Sh.M. & Holden, N.L., 2015, **Evaluation of Soil Quality for Agricultural Production Using Visible Near Infrared Spectroscopy**, Geoderma, 243(244), PP. 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.12.012>.
- Banaei, M.H., 1998, **Soil Moisture and Temperature Regimes Map of Iran**, Soil and Water Research Institute of Iran.
- Ben-Dor, E. & Banin, A., 1994, **Visible and Near Infrared (0.4-1.1 mm) Analysis of Arid and Semiarid Soils**, Remote Sensing of Environment, 48, PP. 261–274. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90001-9).

- Hunt, G.R., 1980, **Spectroscopy Properties of Rock and Minerals**, In: Handbook of Physical Properties of Rocks. Edited by: Stewart, C.R., CRC Press Inc, Florida.
- Islam, K., Singh, B. & McBratney, A., 2003, **Simultaneous Estimation of Several Soil Properties by Ultraviolet Visible and Near Infrared Reflectance Spectroscopy**, Australian Journal Soil Research, 41, PP. 1101–1114. <https://doi.org/10.1071/SR02137>.
- Khayamim, F., Wetterlind, J., Khademi, H. & Stenberg, B., 2015, **Using Visible and Near Infrared Spectroscopy to Estimate Carbonates and Gypsum in Soils in Arid and Sub humid Regions of Isfahan, Iran**. J. of Near Infrared Spectroscopy, 23, PP. 155–165. <https://doi.org/10.1255/jnirs.1157>.
- Kuang, B. & Mouazen, A.M., 2012, **Influence of the Number of Samples on Prediction Error of Visible and Near Infrared Spectroscopy of Selected Soil Properties at the Farm Scale**. J. Soil Science, 63(3), PP. 421–429. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2012.01456.x>.
- Loeppert, R.H., Hallmark, C.T. & Koshy, M.M., 1984, **Routine Procedure for Rapid Determination of Soil Carbonates**, Soil Science Society of America Journal, 48(5), PP. 1030–1033. <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800050016x>.
- Loppert, R.H. & Suarez, D.L., 1996, **Carbonate and Gypsum**, In: Method of soil analysis. Part III, 3rd Ed, Edited by: Sparks, D.L., American Society of Agronomy, Madison, WI. USA. PP. 437–474.
- Meti, S., Hanumesh, S., Lakshmi, P.D., Nagaraja, M.S. & Shreepad, V., 2019, **Sentinel2 and Landsat-8 Bands Sensitivity Analysis for Mapping of Alkaline Soil in Northern Dry Zone of Karnataka, India**, Workshop on “Earth Observations for Agricultural Monitoring”, 18–20 February. New Delhi, India. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W6-307-2019>.
- Mc-Lean, E.O., 1982, **Soil pH and Lime requirement**, In: Methods of Soil Analysis. Part 2, Chemical and Microbiological Properties, American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, PP. 199–224.
- Nelson, R.E., 1986, **Carbonate and Gypsum**, In: Methods of Soil Analysis, Part III, 3rd Ed, Edited by: Sparks, D.L., American Society of Agronomy, Madison, WI. USA. PP. 961–1010.
- Ninomiya, Y. & Fu, B., 2005, **Detecting Lithology with Advanced Spaceborne thermal Emission and Reflectance Radiometer (ASTER) Multispectral Thermal Infrared**, Journal of Remote Sensing of Environment, 99, PP. 127–139. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.06.009>.
- Poormohamadi, S., Ekhtesasi, M.R., Rahimian, M.H., 2016, **Identification and Separation of Massive and Debris Lime Stones by Integrated Application of Remote Sensing and Geomorphology Approaches (Case Study: Bahadoran region in Yazd province)**, Journal of Engineering Geology, 4, PP. 3113–3130. <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jeg.9.4.3113>.
- Rahmani, N., Shahedi, K. & Miryaghobzadeh, M.H., 2011, **The Evaluation of Vegetation Indices Using for Remote Sensing (Case Study: Herisk Basin)**, 24th Geomatic Congress, Survey Institute, Tehran, PP. 163–215. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)07005-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)07005-7).
- Rangzan, K., Kabolizadeh, S.S., Karimi, D. & Saberi, A., 2019, **Applied Spectroscopy of Minarals**, Shahid Chamran University of Ahvaz.
- Rangzan, K., Kabolizadeh, M., Zareie, S., Saki, A. & Karimi, D., 2022, **The Capability of Sentinel-2 Image and FieldSpec3 for Detecting Lithium-Containing Minerals in Central Iran**, Frontiers of Earth Science, 16(3), PP. 678–695.
- Rangzan, K., Kabolizadeh, M., Mousavi, S.S., Karimi, D. & Rashnoei, A., 2023, **Assessing the Potential of Sentinel-2 Imagery and Spectroscopy for Determining the Origin of Ancient Artifacts in Khuzestan, Iran**, The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 26(3), PP. 455–476.

- Rhoades, J.D., 1996, **Salinity: Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids**, In: Methods of Soil Analysis, Part III, 3rd, Edited by: Sparks D.L. American Society of Agronomy, Madison, WI. USA.
- Rosin, N.A., Demattê, J.A.M., Poppiel, R.R., Silvero, N.E.Q., et al., 2023, **Mapping Brazilian Soil Mineralogy Using Proximal and Remote Sensing Data**, Geoderma, 432, P. 116413. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116413>.
- Stenberg, B., Rossel, R.A.V., Mouazen, A.N. & Wetterlind, G., 2010, **Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science**, Advance in Agronomy, 107.
- Sumner, M.E. & Miller, W.P., 1996, **Cation Exchange Capacity and Exchange Coefficients**, In Methods of Soil Analysis, Part III, Edited by: Sparks, D.L. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Summers, D., Lewis, M., Ostendorf, B. & Chittleborough, D., 2011, **Visible Near Infrared Reflectance Spectroscopy as a Predictive Indicator of Soil Properties**, Ecology Indicator, 11, PP. 123–131.
- Watanabe, H., 2002, **Rock Type Classification by Multi-band TIR of ASTER**, Burlington House, Piccadilly, London, UK.
- Wetterlind, J., Stenberg, B., Raphael, A. & Rossel, V., 2013, **Soil Analysis Using Visible and Near Infrared Spectroscopy**, Plant Mineral Nutrients, 953, PP. 95–107. https://doi.org/10.1007/978-1-62703-152-3_6.
- Yanbing, Q., Xin, Q., Qianru, Q. & Manoj, K.Sh., 2021, **Prediction of Soil Calcium Carbonate With Soil Visible-Near-Infrared Reflection (Vis-NIR) Spectral in Shaanxi Province, China: Soil Groups vs. Spectral Groups**, International Journal of Remote Sensing, 42. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1854892>.
- Zaini, N., Meer, F. & Werff, H., 2012, **Effect of Grain Size and Mineral Mixing on Carbonate Absorption Features in the SWIR and TIR Wavelength Regions**, Remote Sensing, 4, PP. 987–1003. <https://doi.org/10.3390/rs4040987>.
- Zheng, G., Jiao, C., Zhou, S. & Shang, G., 2016, **Analysis of Soil Chronosequence Studies Using Reflectance Spectroscopy**, International Journal of Remote Sensing, 37(8), PP. 1881–1901. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1163751>.