

جغرافیا و توسعه شماره ۳۶ پاییز ۱۳۹۳

وصول مقاله : ۱۳۹۱/۴/۱۰

تأیید نهایی : ۱۳۹۲/۹/۱۳

صفحات : ۳۰ - ۱۷

## انتخاب نسبت طیفی بهینه به منظور تشخیص میزان کاتیون‌ها و آنیون‌های خاک

### با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ASTER

#### مطالعه موردی: کویر دره انجیر - بافق

زهره ابراهیمی خوسفی<sup>۱</sup>، محسن ابراهیمی خوسفی<sup>۲</sup>، محمدجواد قانع‌باقتی<sup>۳</sup>

علی خادم‌آستانه<sup>۴</sup>، دکتر سید زین‌العابدین حسینی<sup>۵</sup>

#### چکیده

نسبت‌گیری طیفی یکی از رایج‌ترین روش‌های محاسباتی بارزسازی پدیده‌های سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای محسوب می‌شود و کاربردهای زیادی در زمین‌شناسی، کشاورزی، اکولوژی و غیره دارد. هدف از تحقیق حاضر استفاده از نسبت‌گیری‌های طیفی مختلف جهت تفکیک کاتیون‌ها و آنیون‌های خاک و انتخاب نسبت طیفی بهینه با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای استر در کویر دره انجیر بافق می‌باشد. بدین منظور پس از تصحیحات هندسی و رادیومتریک تصاویر ماهواره‌ای و اعمال فیلتر میانگین، ۵۶ نسبت مختلف طیفی ساخته شد. سپس نمونه‌برداری از خاک (۴۲ نمونه) از سطح ۵-۱۰ سانتیمتر انجام و مقادیر کاتیون‌ها و آنیون‌های آنها اندازه‌گیری گردید. نقشه نقطه‌ای تهیه شده از محل پروفیل‌ها با تمامی لایه‌های اطلاعاتی حاصل از نسبت‌گیری‌های طیفی تلافی داده شد و ارزش بازتاب هر پروفیل استخراج گردید. از روش اعتبارسنجی تقاطعی به منظور اندازه‌گیری میزان همبستگی و میانگین مربعات مجذور خطای بین مقادیر تخمینی هر نسبت طیفی و مقادیر آزمایشگاهی مربوط به هر پروفیل استفاده شد. نتایج نشان داد که نسبت باندهای ۵ به ۶، ۵ به ۸ و ۱ به ۲، ۱۱ به ۱۲ و ۶ به ۹ و ۱ به ۲ به ترتیب جهت بارزسازی کلسیم، پتاسیم و منیزیم و نسبت باندهای ۱۱ به ۱۲ و ۷ به ۹ و ۱۱ به ۱۰ به ترتیب جهت بارزسازی آنیون‌های سولفات و بی‌کربنات خاک می‌توانند با دقت مناسب ( $R^2 > 0.5$ ,  $RMSE < 13.61$ ) مورد استفاده قرار بگیرند. کلیدواژه‌ها: نسبت‌گیری طیفی، بارزسازی، کاتیون، آنیون، تصاویر استر، کویر دره انجیر.

۱- دانشجوی دکتری بیابان‌زدایی، دانشگاه کاشان (نویسنده مسؤل)

۲- دانشجوی دکتری سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه کاشان

۳- دانشجوی دکتری بیابان‌زدایی، دانشگاه تهران

۴- کارشناس ارشد سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور

۵- استادیار سنجش از دور و GIS، دانشگاه یزد

z\_brahim@grad.kashanu.ac.ir

mohsen\_brahim@ut.ac.ir

Ghaneibafghi@ut.ac.ir

a.khadema@yahoo.com

zhosseini@yazd.ac.ir

## مقدمه

شناخت ویژگی‌های بازتاب طیفی انواع گونه‌های گیاهی، خاک‌های مختلف، آب و سایر عناصر سطح زمین پایه و اساس تجزیه و تحلیل فرآیند تفسیر داده‌های سنجنش از دور را تشکیل می‌دهد. بدیهی است که ویژگی‌های طیفی انواع پدیده‌های سطح زمین ثابت نبوده و بر حسب شرایط پیچیده، مربوط به زمان و مکان در حال تغییر و تحول می‌باشد. تفکیک‌پذیری خاک‌های شور با استفاده از فناوری سنجنش از دور نیز به نحو عمده به ویژگی‌های بازتاب طیفی این خاک‌ها برمی‌گردد. گرچه تفاوت در مقدار و نوع کانی نمک، مقدار رطوبت، رنگ و زبری سطح بر روی بازتاب تأثیرگذار می‌باشد (Mougenot et al, 1993: 248)، اما بیشتر اشکال در طیف کانی‌های نمک به جنبش داخلی گروه‌های مولکولی خاص بویژه کربنات‌ها، بورات‌ها، هیدروکسل و مولکول‌های آب نسبت داده می‌شوند و نوع کانی تشکیل‌دهنده‌ی نمک‌ها، کربنات‌ها، سولفات‌ها و کلریدها وجود یا عدم وجود باندهای جذبی را در محدوده‌ی طیف الکترومغناطیسی نشان می‌دهد (Farifteh et al, 2005: 194). همچنین برای متمایز ساختن تغییراتی که توسط تغییرات روشنایی در باندها ممکن نیست می‌توان از نسبت‌گیری طیفی استفاده کرد. علت اینکه با این عمل بسیاری از پدیده‌هایی که در حالت تک‌باندی قابل تفکیک نیستند را می‌توان متمایز ساخت این است که نسبت‌گیری، تغییرات شیب منحنی بازتاب‌های طیفی بین دو باند را به تصویر می‌کشد (علوی‌پناه، ۱۳۸۵: ۱۶۸). در تصاویر نسبت‌گیری<sup>۱</sup> تغییرات ظریف طیفی پدیده‌ها نسبتاً از تصاویر اصلی نمایان می‌گردند. بسته به منطقه و نوع کاربرد باید باندهای مناسب را بر هم تقسیم نمود تا بهترین نتیجه عاید گردد. هر چند که از  $n$  باند

سنجنده می‌توان  $n \times (n-1)$  باند نسبی ایجاد نمود اما تمامی این باندهای نسبی دارای کارایی یکسانی نخواهد بود (علوی‌پناه، ۱۳۸۵: ۱۶۸). یکی از ابزارهای مؤثر در مطالعات شوری خاک، استفاده از فن‌آوری دورسنجی و بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای است. استفاده از تصاویر ماهواره‌ای توسط محققان زیادی در زمینه‌ی علوم خاک با اهداف مختلفی بررسی شده است. بطوری‌که در مطالعه و بررسی تفکیک‌پذیری خاک‌های مناطق خشک با استفاده از داده‌های سنجنده استر<sup>۲</sup> در منطقه‌ی آران-بیدگل مشخص شد که باندهای محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک قابلیت تفکیک خاک‌های با پوسته‌های نمکی را دارند و همه باندهای سنجنده مذکور قابلیت تفکیک خاک‌های با سطوح زبر و ناهموار (بافت درشت، سنگ و سنگریزه و یا پوسته‌های ناهموار) را از خاک‌های شور با پوسته‌های صاف و تیره دارند و بطور کلی داده‌های سنجنده استر برای شناسایی خاک‌های مناطق خشک می‌تواند مناسب باشد (متین‌فر و همکاران، ۱۳۸۵: ۶۷).

سیگال و همکاران برای تشخیص خاک‌های دارای سولفات، باند حرارتی را باند مناسبی دانسته‌اند (در ناحیه ۱۰/۲ میکرومتر، ناحیه جذبی مولکول‌های آب همراه با سولفات‌ها). آنها دریافتند که برای تشخیص و تفکیک طبقات شوری و قلیائیت بویژه قلیائیت استفاده از باند حرارتی مناسب است و با به‌کارگیری باند TM7 طبقه‌بندی قلیائیت بهبود بیشتری می‌یابد زیرا در محدوده ۱۱ تا ۱۲ و ۲/۳۴ میکرومتر کربنات آزاد جذب قوی انرژی دارد (Siegal et al, 1980: 225).

گوپتا نشان داد که باندهای جذبی کربنات‌های عمده در پوسته‌ی زمین شامل کلسیت، دولومیت، مگنزایت و سیدرایت همگی در ناحیه مادون قرمز می‌باشند، اما سیلیکات‌ها، نیترات‌ها و سولفات‌ها باندهای مشخصه‌ای را در این ناحیه نداشته، و ویژگی

در خاک‌های لخت بدون پوشش که حاوی کانی‌های تبخیری هستند عمدتاً بازتاب نزدیک ۸۰۰ نانومتر می‌باشد و خاک شور در ناحیه‌ی طیفی ۱۳۰۰-۸۰۰ نانومتر به علت وجود کانی‌های تبخیری کاهش طول موج را از خود نشان می‌دهد. ویژگی جذب در ناحیه مادون قرمز نزدیک مربوط به خاک‌هایی می‌باشد که دارای کانی‌های تبخیری بوده و موجب شناخت این کانی‌ها از جمله گچ می‌شود (Dehghan et al, 2003:792).

گوتیرز و همکاران با استفاده از تصاویر لندست به بررسی رفتار طیفی اراضی شور شمال مکزیکو پرداخته‌اند و بدین منظور از تبدیل‌های طیفی، تجزیه مؤلفه‌های اصلی و نسبت‌گیری‌های طیفی چندگانه استفاده کرده‌اند (Gutierrez et al, 2010: 49).

دشتکیان و همکاران از باندهای مرئی استاندارد شده، طبقه‌بندی حداکثر احتمال، شاخص شوری و شاخص شوری استاندارد شده برای تهیه نقشه شوری خاک در منطقه مروست استفاده کرده‌اند (دشتکیان و همکاران، ۱۳۸۷: ۱۳۹) تاج‌گردان و همکاران به منظور ارائه‌ی یک مدل مناسب برای تهیه‌ی نقشه شوری از داده‌های ماهواره‌ای ای‌تی‌ام استفاده کرده‌اند. نتایج این پژوهش نشان داد که مقدار هدایت الکتریکی خاک با باند ۴، مؤلفه‌های درخشندگی و سبزی‌نگی خاک و مؤلفه‌ی حاصل از ادغام طیفی باند ۴ با باند پانکروماتیک دارای همبستگی معنی‌دار و دارای ضریب تبیین ۰/۴۴ می‌باشد (تاج‌گردان و همکاران، ۱۳۸۸: ۱).

تقی‌زاده و همکاران با مطالعه بر روی دشت یزد- اردکان با استفاده از تصاویر ای‌تی‌ام نشان دادند که بیشترین ضریب تبیین شوری خاک با باند ۳ سنجنده مذکور و به میزان ۰/۳۴ می‌باشد

(Taghizadeh et al, 2008: 708).

مترنیخ و همکاران در طبقه‌بندی خاک‌های تحت شوری و قلیایی از نسبت‌گیری‌های طیفی و تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی استفاده نمودند و سرانجام با

موقتی آنها در ناحیه مادون قرمز گرمایی دیده می‌شود (Gupta, 1991:25).

خان و همکاران از داده‌های ماهواره IRS سنجنده LISSIII برای طبقه‌بندی خاک‌های شور استفاده نمودند و به این نتیجه رسیدند که نسبت باند ۳ به سایر باندها، شاخص پوشش گیاهی استاندارد شده<sup>۱</sup> و شاخص شوری استاندارد شده<sup>۲</sup> برای شناسایی خاک‌های شور مناسب می‌باشند (Khan et al, 2001:1).

مترنیخ تأثیر استفاده از روش مدل فازی را در برابر روش قطعی متداول در تهیه نقشه‌ی خاک‌های تحت تأثیر شوری بررسی نمود و به منظور انجام تحقیق خود از تیپ‌های نمکی، نسبت آنیونی و تکنیک بیشترین شباهت در کلاس‌های فازی استفاده کرد

(Metternicht, 2003: 379).

نتایج این تحقیق نشان داد که مدل فازی در بالا بردن دقت تهیه‌ی نقشه بسیار مؤثر بوده است و بیشترین افزایش دقت مربوط به تیپ خاک‌های سود-سولفات<sup>۳</sup> در برابر تیپ خاک‌های سولفات-کلرید<sup>۴</sup> بوده است. نیلد و همکاران با استفاده از تصاویر لندست سنجنده‌ی ای‌تی‌ام<sup>۵</sup> رفتار طیفی خاک‌های گچی و سدیمی را مورد بررسی قرار داد و جهت رسیدن به نتیجه‌ی مطلوب از نسبت‌گیری طیفی استفاده نمود و در نهایت به منظور شناسایی خاک‌های گچی استفاده از باندهای ۵ به ۷ جهت تفکیک خاک‌های سدیمی استفاده از نسبت باندی ۵ به ۴ را توصیه کرده است (Niield et al, 2007:243). نقش مؤثر باندهای حرارتی سنجنده ای‌تی‌ام و استر در جداسازی مناطق کلریده از مناطق فاقد کلر در پلایای ابرقو به اثبات رسیده است (ابراهیمی و همکاران، ۱۳۸۹: ۳۲).

دهان و همکاران در خصوص استفاده از بازتاب طیفی جهت تفکیک اراضی شور از گچی بیان کردند که

1-NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

2-NDSI: Normalized Difference Salinity Index

3-Soda-sulphate

4-Sulphate-chloride

5-ETM: Enhanced Thematic Mapper

زمینی می‌تواند امکان تفکیک خاک‌های مناطق خشک را بر اساس میزان کاتیون‌ها و آنیون‌های خاک فراهم نماید.

### مواد و روش‌ها

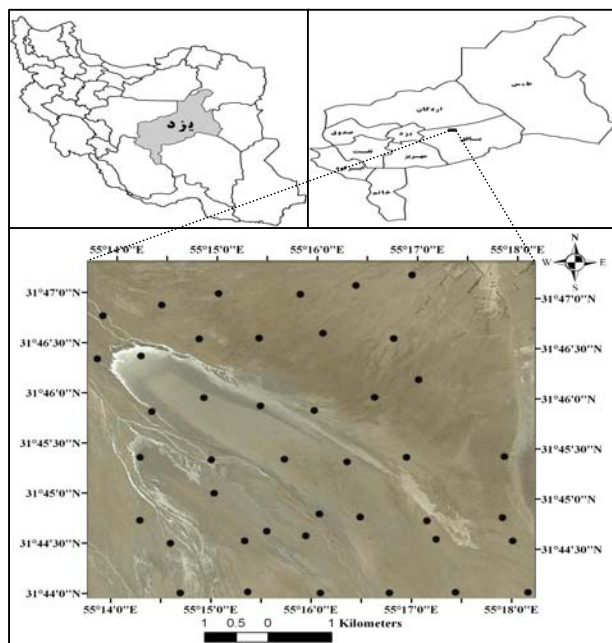
#### خصوصیات منطقه مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه (کویر دره‌ی انجیر بافق) با مساحتی معادل ۳۳ کیلومتر مربع در شمال غرب شهرستان بافق در استان یزد و در محدوده‌ی جغرافیایی  $55^{\circ}14'$  و  $55^{\circ}18'$  طول شرقی تا  $31^{\circ}44'$  تا  $31^{\circ}47'$  عرض شمالی واقع شده است. اقلیم منطقه‌ی گرم و خشک و متوسط بارندگی آن  $57/6$  میلی‌متر می‌باشد و عمدتاً دارای خاک شور است و از نظر ژئومورفولوژی انواع رخساره‌های کویری را می‌توان در آن مشاهده کرد. موقعیت منطقه مطالعاتی و نقاط برداشتی در شکل شماره ۱ آمده است.

مدل به دست آمده توانستند تمایز بین خاک‌های شور و غیرشور را به خوبی نشان دهند. در این مطالعه طول موج‌های مادون قرمز و مرئی بهترین تمایز را بین نواحی تحت شوری و قلیائی نشان داد

(Metternicht et al, 2003:1)

در تحقیقات پیشین بیشتر به چگونگی استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و تکنیک‌های پردازش تصاویر در شناسایی و تفکیک خاک‌های شور و تهیه‌ی نقشه‌های مربوطه پرداخته شده است و به روشی مدون برای گزینش باندهای مناسب برای عملیات نسبت‌گیری طیفی در خاک‌های مذکور و بخصوص جهت بارزسازی کاتیون و آنیون‌های خاک اشاره‌ای نشده است. بر این اساس هدف از تحقیق حاضر، بررسی نسبت‌گیری‌های مختلف طیفی سنجنده استر و انتخاب مناسب‌ترین نسبت‌های طیفی جهت بارزسازی کاتیون‌ها و آنیون‌های خاک می‌باشد. فرضیه‌ی اصلی تحقیق حاضر این است که اعمال پردازش‌ها و استفاده از نسبت‌گیری‌های طیفی بر روی داده‌های چند طیفی ماهواره‌های منابع



شکل ۱: پراکنش نقاط نمونه‌برداری در منطقه‌ی مطالعاتی

مأخذ: مطالعات میدانی نگارندگان، ۱۳۸۶

### داده‌های تحقیق

به منظور انجام تحقیق حاضر، از تصاویر سنجنده استر ماهواره ترا<sup>۱</sup> متعلق به ۹ April سال ۲۰۰۷ میلادی (با توجه به سهولت دسترسی به این تصاویر و همچنین قدرت تفکیک طیفی و مکانی مناسب) و از تصاویر ای‌تی‌ام به منظور زمین مرجع کردن تصویر استر

استفاده شده است. همچنین به منظور بررسی و انتخاب مناسب‌ترین نسبت طیفی از نتایج آزمایشگاهی ۴۲ پروفیل برداشت شده خاک در بهار ۸۶ استفاده شده است. مشخصات آماری داده‌های برداشت شده زمینی در جدول شماره ۱ آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات آماری داده‌های برداشت شده زمینی

	Ca	Mg	Na	k	Hco3	So4	Cl
مقدار حداقل	۰/۶	۰/۱	۰/۵	۰/۰۱	۰/۱	۳/۱	۳/۲
مقدار حداکثر	۱۱/۶	۲/۷	۴۵/۴	۰/۷	۰/۳	۶۶	۵۸/۴
میانگین	۳/۵	۰/۵	۱۶/۸	۰/۲	۰/۲	۲۲/۷	۲۸/۸
انحراف معیار	۲/۲	۰/۵	۱۰/۷	۰/۱	۰/۱	۱۴/۷	۱۵/۶

مأخذ: مطالعات میدانی نگارندگان، ۱۳۸۶

### روش تحقیق

به منظور اندازه‌گیری مقادیر کاتیون‌ها و آنیون‌های خاک در بهار ۱۳۸۶ مطابق با زمان اخذ تصویر، با قرار دادن یک شبکه‌ی نمونه‌برداری منظم تصادفی بر روی تصویر منطقه، موقعیت نقاط نمونه‌برداری (۴۲ نقطه) مشخص گردید. جهت افزایش دقت کار، از محل قرارگیری سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS) در مرکز نقاط نمونه‌برداری به فاصله ۱۵ متر فاصله گرفته و بدین ترتیب از ۸ پیکسل مجاور نیز در عمق ۰ تا ۱۰ سانتیمتر نمونه‌برداری شد و سپس مجموع ۹ پیکسل از هر یک از نقاط نمونه‌برداری با یکدیگر مخلوط شده و نمونه‌های خاک پس از حمل به آزمایشگاه مورد تجزیه قرار گرفت و مقادیر مربوط به مؤلفه‌های سدیم، کلسیم، منیزیم، پتاسیم، کربن، سولفات و بیکربنات خاک تعیین گردید. به منظور زمین مرجع کردن تصاویر استر از روش تصویر به تصویر استفاده گردید. بدین منظور تعداد ۴۹ نقطه به صورت پراکنده بر روی تصاویر ای‌تی‌ام و استر انتخاب و با استفاده از معادلات پلی نومیال

درجه دو با دقت ۰/۷۷ و روش نمونه‌برداری نزدیکترین همسایه، بازنویسی<sup>۳</sup> شد. به منظور حذف خطای ناشی از GPS در برداشت میدانی، فیلتر میانگین ۳ در ۳ روی تصاویر اعمال گردید. جهت دستیابی به بازتاب واقعی زمینی و همچنین تصحیح اتمسفری تصاویر پس از تبدیل ارزش رقومی ثبت شده به رادیانس، از الگوریتم FLAASH در نرم‌افزار ENVI4.7 استفاده شد. در نهایت محدوده‌ی مورد مطالعه از روی تصاویر برش داده شد. نظر به این که هدف از تحقیق حاضر مقایسه‌ی نسبت‌گیری‌های مختلف طیفی و انتخاب بهترین نسبت‌های طیفی جهت بازسازی کاتیون‌ها و آنیون‌های خاک می‌باشد، لذا در گام بعدی اقدام به تهیه همه‌ی نسبت‌گیری‌های ساده طیفی (تقسیم یک باند به باند دیگر) در محدوده‌های طیفی مختلف گردید.

در مجموع تعداد ۵۶ نسبت طیفی تهیه گردید که از این تعداد ۶ نسبت طیفی مربوط به محدوده‌ی طیف مرئی و مادون قرمز نزدیک<sup>۴</sup>، ۳۰ نسبت طیفی مربوط

3-Resample  
4-VNIR:Visible Near Infra Red

1-Terra  
2-Global Positioning System

اساس آن معادله‌ی محاسبه شده، مقادیر سدیم، کلسیم، منیزیم، پتاسیم، کلر، سولفات و بیکربنات خاک برای یک نقطه‌ای که وارد مدل نشده است محاسبه می‌گردد. این عمل به اندازه  $n$  بار تکرار می‌شود تا مقادیر تخمینی به ازای هر نسبت طیفی، برای هر نقطه محاسبه گردد. سپس بر اساس مقادیر واقعی و مقادیر تخمین زده شده، میزان  $R^2$  و  $RMSE$  به ازای هر نسبت طیفی محاسبه می‌گردد (Geladi & Kowalski, 1986:14) در نهایت بر اساس پارامترهای آماری مذکور دقیق‌ترین نسبت‌گیری طیفی جهت بارسازی مؤلفه‌های مذکور مشخص می‌گردد.

به محدوده‌ی مادون قرمز میانی<sup>۱</sup> و ۲۰ نسبت طیفی مربوط به محدوده‌ی مادون قرمز حرارتی<sup>۲</sup> می‌باشد (جدول ۲). سپس نقشه نقطه‌ای تهیه شده از محل پروفیل‌ها با تمامی لایه‌های اطلاعاتی حاصل از نسبت‌گیری‌های طیفی تلاقی داده شد و ارزش بازتاب هر پیکسل استخراج گردید. به منظور انتخاب نسبت‌گیری‌های طیفی مناسب، از روش اعتبارسنجی تقاطعی<sup>۳</sup> استفاده شد. اساس این روش بدین صورت است که در هر مرحله بر اساس  $n-1$  عدد داده‌ی برداشت شده و مقادیر متناظر آن به ازای هر نسبت طیفی، یک معادله‌ی رگرسیونی محاسبه می‌شود و بر

جدول ۲: نسبت‌های طیفی مختلف تهیه شده از تصاویر استر در محدوده‌های مختلف طیفی

VNIR	TIR			
b1/b3	b10/b11	b11/b13	b13/b10	b14/b12
b1/b2	b10/b12	b11/b14	b13/b11	b14/b13
b2/b3	b10/b13	b12/b10	b13/b12	
b2/b1	b10/b14	b12/b11	b13/b14	
b3/b2	b11/b10	b12/b13	b14/b10	
b3/b1	b11/b12	b12/b14	b14/b11	
SWIR				
b4/b5	b5/b6	b6/b7	b7/b8	b8/b9
b4/b6	b5/b7	b6/b8	b7/b9	b9/b4
b4/b7	b5/b8	b6/b9	b8/b4	b9/b5
b4/b8	b5/b9	b7/b4	b8/b5	b9/b6
b4/b9	b6/b4	b7/b5	b8/b6	b9/b7
b5/b4	b6/b5	b7/b6	b8/b7	b9/b8

مأخذ: مطالعات میدانی نگارندگان، ۱۳۹۰

## بحث

مربوط به بررسی مقادیر مشاهداتی زمینی و مقادیر تخمین زده شده مؤلفه سدیم خاک با استفاده از نسبت‌گیری‌های طیفی بر اساس میزان  $R^2$  و  $RMSE$  اکتفا شده و از ارائه‌ی جداول مربوط به سایر مؤلفه‌ها صرف‌نظر گردیده است و نتایج هر جدول در قالب نمودار ستونی آورده شده است (اشکال ۲ تا ۸).

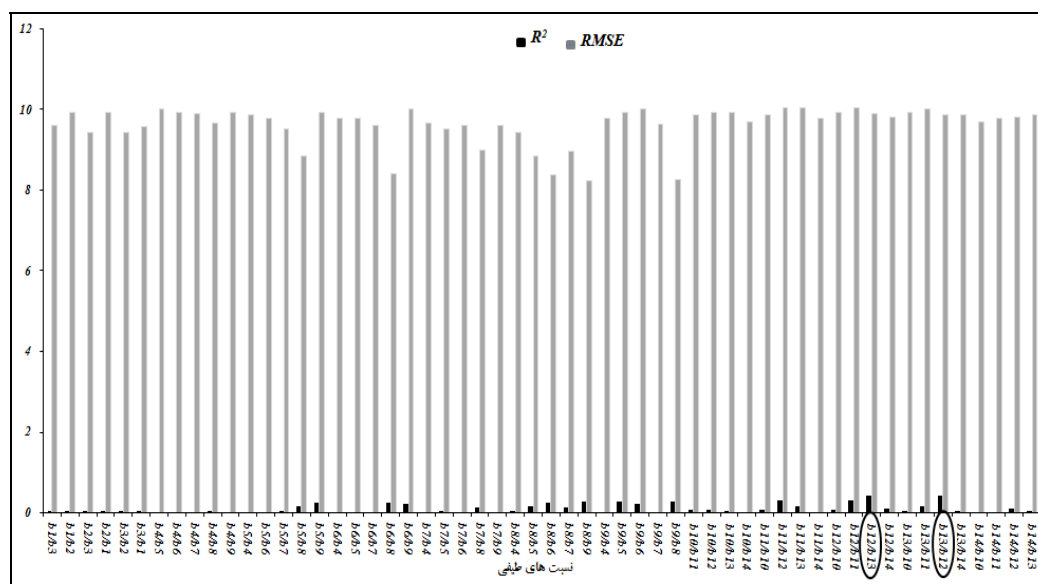
نظر به این که جداول مربوط به مقادیر ضریب تبیین و مجذور میانگین مربعات خطای مربوط به مؤلفه‌های سدیم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، کلر، بیکربنات و سولفات خاک و ۵۶ لایه نسبت‌گیری طیفی طولانی می‌باشد، لذا به عنوان نمونه تنها به ارائه‌ی جدول

1-SWIR: Short Wave Infra Red  
2-TIR: Thermal Infra Red  
3-Cross Validation  
4-Root Mean Square Error

جدول ۳:  $R^2$  و RMSE بین مقادیر مشاهداتی زمینی مربوط به مؤلفه‌ی سدیم خاک و مقادیر تخمین زده شده با استفاده از نسبت‌گیری‌های طیفی به روش اعتبارسنجی تقاطعی

BR	$R^2$	RMSE	BR	$R^2$	RMSE	BR	$R^2$	RMSE
b1/b3	۰/۰۱۵	۹/۶۱۵	b6/b8	۰/۲۲۳	۸/۴۰۹	b10/b13	۰/۰۳۴	۹/۹۲۹
b1/b2	۰/۰۲۹	۹/۹۳۹	b6/b9	۰/۱۹۸	۱۰/۰۰۳	b10/b14	۰/۰	۹/۷۰۷
b2/b3	۰/۰۳۹	۹/۴۲۵	b7/b4	۰/۰۰۸	۹/۶۷۴	b11/b10	۰/۰۶۶	۹/۸۶۳
b2/b1	۰/۰۲۴	۹/۹۱۸	b7/b5	۰/۰۱۷	۹/۵۲۶	b11/b12	۰/۳۰۶	۱۰/۰۴۲
b3/b2	۰/۰۳۹	۹/۴۲۱	b7/b6	۰/۰۰۳	۹/۶۱۷	b11/b13	۰/۱۵۵	۱۰/۰۳۰
b3/b1	۰/۰۲۰	۹/۵۶۸	b7/b8	۰/۱۱۶	۹/۰۰۴	b11/b14	۰/۰۱۳	۹/۷۷۲
b4/b5	۰/۰۱۱	۱۰/۰۰۴	b7/b9	۰/۰۱۳	۹/۶۱۷	b12/b10	۰/۰۵۰	۹/۹۲۶
b4/b6	۰/۰۰۴	۹/۹۲۷	b8/b4	۰/۰۴۲	۹/۴۲۱	b12/b11	۰/۳۰۵	۱۰/۰۴۲
b4/b7	۰/۰	۹/۸۸۷	b8/b5	۰/۱۴۲	۸/۸۵۱	b12/b13	۰/۴۰۲	۹/۸۸۳
b4/b8	۰/۰۱۶	۹/۶۶۵	b8/b6	۰/۲۲۸	۸/۳۷۸	b12/b14	۰/۰۸۶	۹/۸۲۰
b4/b9	۰/۰۰۸	۹/۹۳۲	b8/b7	۰/۱۲۳	۸/۹۶۲	b13/b10	۰/۰۳۱	۹/۹۲۳
b5/b4	۰/۰۰۳	۹/۸۵۵	b8/b9	۰/۲۵۴	۸/۲۳۵	b13/b11	۰/۱۵۱	۱۰/۰۲۹
b5/b6	۰/۰۱۱	۹/۷۸۴	b9/b4	۰/۰۰۱	۹/۷۸۳	b13/b12	۰/۴	۹/۸۸۳
b5/b7	۰/۰۱۷	۹/۵۲۶	b9/b5	۰/۲۶۹	۹/۹۲۴	b13/b14	۰/۰۴۱	۹/۸۵۹
b5/b8	۰/۱۴۴	۸/۸۴۱	b9/b6	۰/۱۹۶	۱۰/۰۰۷	b14/b10	۰/۰	۹/۷۰۲
b5/b9	۰/۳۴۴	۹/۹۱۸	b9/b7	۰/۰۱۲	۹/۶۲۳	b14/b11	۰/۰۱۲	۹/۷۷۱
b6/b4	۰/۰	۹/۷۶۷	b9/b8	۰/۳۴۹	۸/۲۶۳	b14/b12	۰/۰۸۶	۹/۸۱۹
b6/b5	۰/۰۱۳	۹/۷۸۸	b10/b11	۰/۰۶۸	۹/۸۶۳	b14/b13	۰/۰۴	۹/۸۵۸
b6/b7	۰/۰۰۳	۹/۶۲۰	b10/b12	۰/۰۵۱	۹/۹۲۶			

مأخذ: مطالعات میدانی نگارندگان، ۱۳۹۰



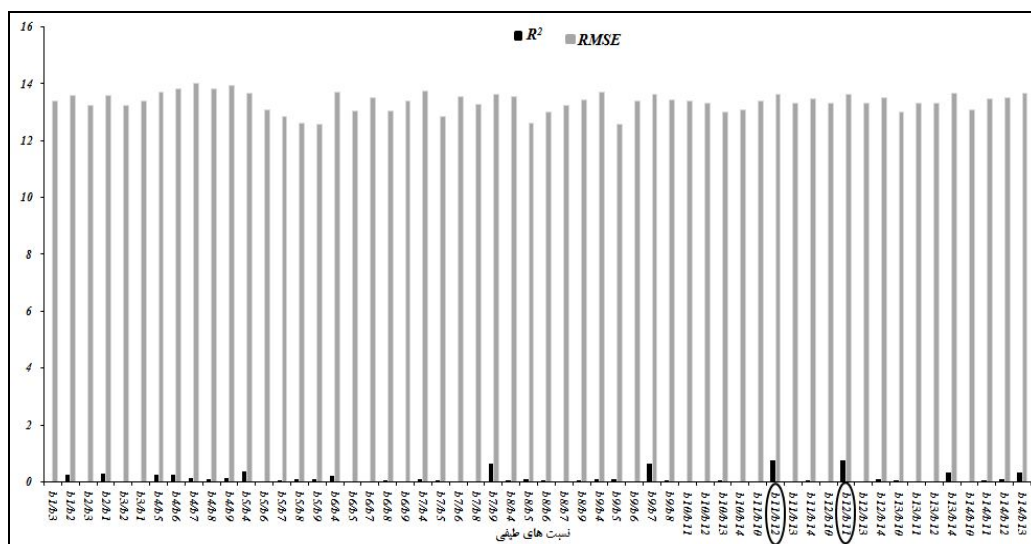
شکل ۲:  $R^2$  و RMSE بین مقادیر مشاهداتی زمینی و مقادیر تخمین زده شده سدیم خاک

مأخذ: مطالعات میدانی نگارندگان، ۱۳۹۰

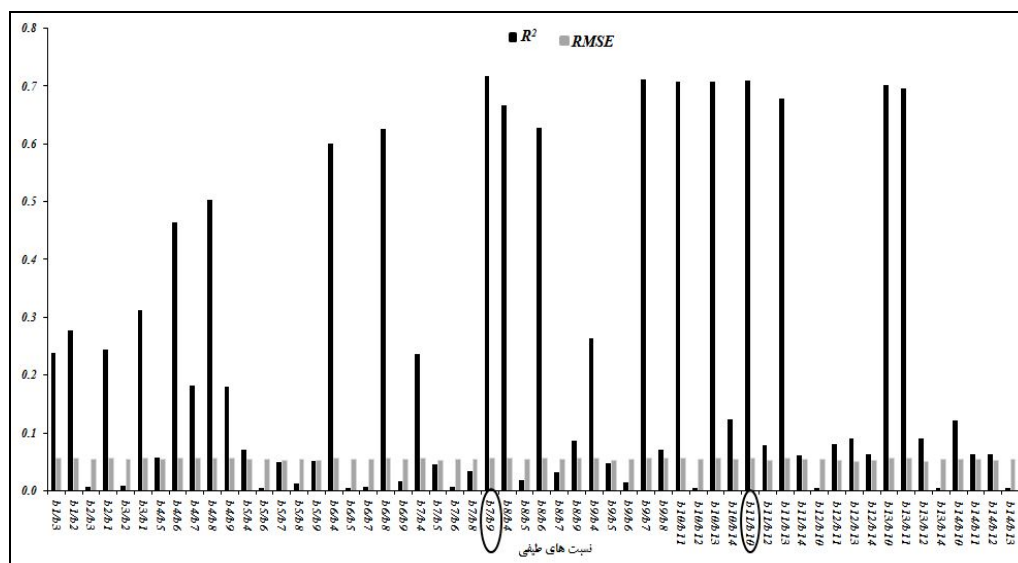








شکل ۷:  $R^2$  و RMSE بین مقادیر مشاهداتی زمینی و مقادیر تخمین زده شده سولفات خاک  
 مأخذ: مطالعات میدانی نگارندگان، ۱۳۹۰



شکل ۸:  $R^2$  و RMSE بین مقادیر مشاهداتی زمینی و مقادیر تخمین زده شده بیکربنات خاک  
 مأخذ: مطالعات میدانی نگارندگان، ۱۳۹۰

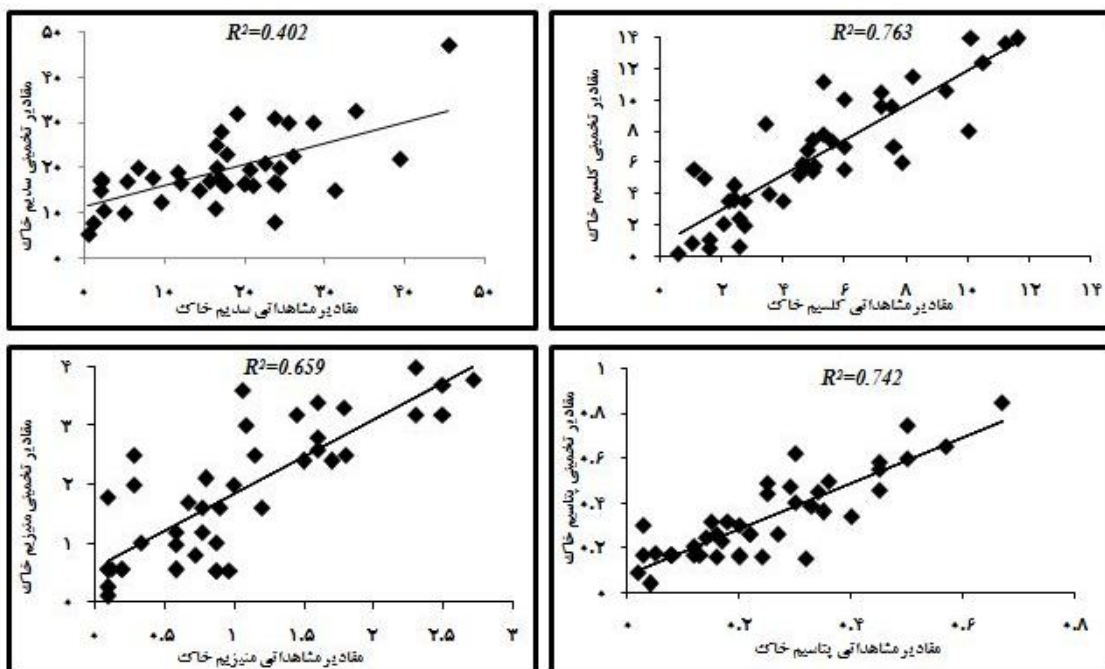
استفاده کرد. بنابراین به منظور درک بهتر، بهترین خط برازش داده شده بین مقادیر مشاهداتی کاتیون‌ها و آنیون‌های خاک با مقادیر تخمین زده شده با استفاده از بهترین نسبت‌گیری طیفی (اشکال ۲ تا ۸، جدول ۴) در اشکال ۹ و ۱۰ نشان داده شده است.

بررسی کلی نمودارهای فوق حاکی از آن است که میزان تغییرات مجذور میانگین خطا در اکثر مؤلفه‌ها نسبت به میزان تغییرات ضریب تبیین کمتر است، لذا می‌توان از ضریب تبیین به عنوان مهم‌ترین عامل مؤثر در انتخاب نسبت باندی بهینه در منطقه‌ی مطالعاتی

جدول ۴: مناسب‌ترین نسبت‌گیری طیفی در محدوده‌های مختلف طیفی جهت بارسازی کاتیون‌ها و آنیون‌های خاک کویر دره‌انجیربافق

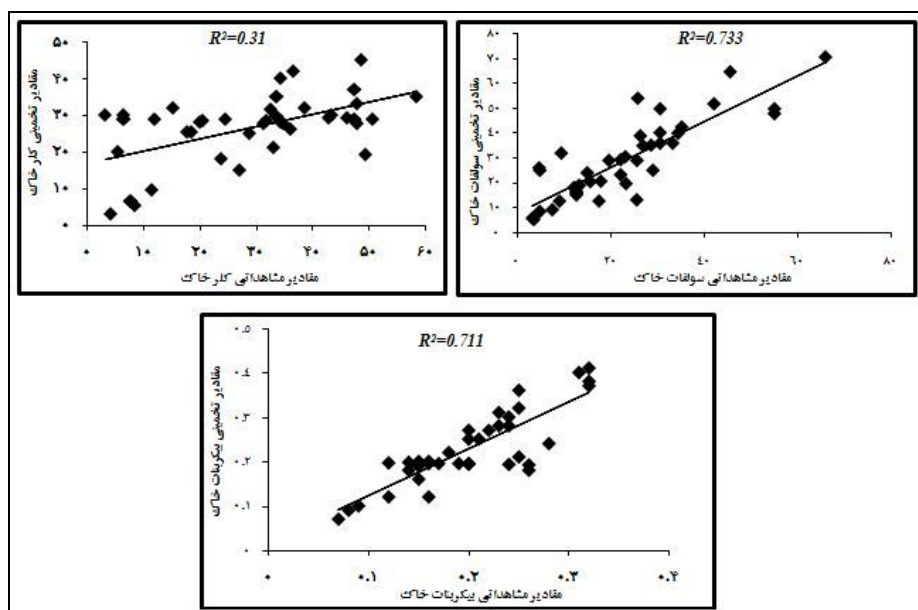
	VNIR	R <sup>2</sup>	RMSE	SWIR	R <sup>2</sup>	RMSE	TIR	R <sup>2</sup>	RMSE
Na	b2/b3	۰/۰۳۹	۹/۴۲۱	b8/b9	۰/۲۵۴	۸/۲۳۵	b13/b12	۰/۴۰۲	۹/۸۸۳
Ca	b1/b2	۰/۵۰۲	۲/۰۸۰	b5/b6,b5/b8	۰/۰۷۶۴/۷۵۳	۲/۰۵۹, ۲/۰۵۳	b11/b10	۰/۲۳۸	۲/۰۷
mg	b1/b2	۰/۶۵۹	۰/۵۰۶	b9/b4	۰/۵۹۲	۰/۵۰۶	b12/b11	۰/۵۴۱	۰/۵۱۲
K	b1/b2	۰/۵۹۷	۰/۱۲۱	b6/b9,b9/b6	۰/۷۳۸	۰/۱۲۱	b11/b12	۰/۷۴۲	۰/۱۲۱
Cl	b1/b2	۰/۱۹۱	۱۴/۵۰۴	b8/b6	۰/۲۹۸	۱۱/۶۲۴	b13/b14,b14/b13	۰/۳۱	۱۰/۵۰۶
SO4	b1/b2	۰/۲۵۹	۱۳/۵۹۱	b7/b9,b9/b7	۰/۶۲۴	۱۳/۶۱۲	b11/b12, b12/b11	۰/۷۳۳	۱۳/۶۱۴
Hco3	b3/b1	۰/۳۱۲	۰/۰۵۶	b7/b9,b9/b7	۰/۷۱۰	۰/۰۵۶	b10/b11,b11/b10	۰/۷۱۱	۰/۰۵۶

مأخذ: مطالعات میدانی نگارندگان، ۱۳۹۰



شکل ۹: نمودار همبستگی مقادیر مشاهده‌ای کاتیون‌های خاک با مقادیر تخمین زده شده با استفاده از بهترین نسبت‌گیری طیفی

مأخذ: مطالعات میدانی نگارندگان، ۱۳۹۰



شکل ۱۰: نمودار همبستگی مقادیر مشاهداتی آنیون‌های خاک با مقادیر تخمین زده شده با استفاده از بهترین نسبت گیری طیفی  
 مأخذ: مطالعات میدانی نگارندگان، ۱۳۹۰

است از آنجایی که بالا بودن ضریب تبیین ( $R^2$ ) دلیل بر کارآمد بودن آن نمی‌باشد و کارایی یک مدل وقتی به اثبات می‌رسد که بتواند توصیف خوبی از متغیر وابسته ارائه دهد، لذا مدل‌های استخراج شده از کاتیون‌ها و آنیون‌ها بر اساس مقادیر بالاتر ضریب تبیین و مقدار پایین‌تر مجذور میانگین مربعات خطا اعتبارسنجی شدند. بررسی جدول ۴ حاکی از آن است که بیشترین همبستگی و کمترین خطا در مقدار کلسیم با نسبت‌های طیفی به ترتیب مربوط به نسبت باندهای ۵ به ۶ و ۵ به ۸ در محدوده‌ی مادون قرمز میانی و نسبت باندهای ۱ به ۲ در محدوده‌ی مرئی می‌باشد. همچنین بر اساس نتایج جدول ۴ نسبت باندهای ۹ به ۶ و ۶ به ۹ در محدوده‌ی مادون قرمز میانی و نسبت باندهای ۱۱ به ۱۲ در محدوده‌ی مادون قرمز حرارتی با مقادیر پتاسیم از بالاترین همبستگی و کمترین خطا برخوردار می‌باشند. اما به دلیل عدم اختلاف معنی‌دار بین نسبت‌های ذکر شده برای مؤلفه‌های کلسیم و پتاسیم ( $P\text{-value} > 0.05$ ) می‌توان

همان‌طور که نمودارهای فوق نشان می‌دهد بهترین خط برازش داده شده بین مقادیر مشاهداتی و تخمینی به ترتیب مربوط به مؤلفه‌های کلسیم، پتاسیم، سولفات، بیکربنات و منیزیم خاک می‌باشد این در حالی است که بین مقادیر مشاهداتی و تخمینی مؤلفه‌های کلر و سدیم خاک میزان همبستگی پایین و فاصله خط برازش داده شده از خط یک به یک (خطی که از مبدأ مختصات می‌گذرد) زیاد می‌باشد که دلیل این امر را می‌توان به بالا بودن خطای اندازه‌گیری میزان سدیم و کلر خاک در برخی از نمونه‌های برداشت شده از منطقه و یا بازتاب تقریباً مشابه یون‌های مذکور در قسمت وسیعی از منطقه مطالعاتی نسبت داد.

### نتیجه

بررسی نتایج حاصل از جدول ۳ نشان می‌دهد نسبت‌های طیفی که از بیشترین ضریب تبیین و کمترین مجذور میانگین مربعات خطا با مقادیر سدیم برخوردار هستند به عنوان مناسب‌ترین نسبت‌ها جهت بارزسازی این خاک‌ها قلمداد می‌شوند. شایان ذکر

از هر سه نسبت طیفی جهت بارزسازی خاک‌های کلسیمی و یا خاک‌های پتاسیمی از سایر خاک‌ها استفاده کرد. بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد محققینی چون گوپتا (۱۹۹۱)، متین‌فر (۱۳۸۵) و نیلد (۲۰۰۷) نیز در تحقیقات خود از این باندها برای مطالعات خاک استفاده کرده‌اند. بیشترین دقت در برآورد مؤلفه‌ی منیزیم مربوط به نسبت باندهای ۱ به ۲ در محدوده‌ی طیف مرئی می‌باشد که به دلیل نقش مؤثر باندهای مرئی سنجنده استر در تفکیک خاک‌های منیزیم‌دار از سایر خاک‌ها در منطقه مطالعاتی می‌باشد. پیش از این زارع (۱۳۸۸) و احمدی (۱۳۸۹) نیز به نقش مؤثر باندهای مرئی سنجنده‌های MODIS و IRS-LISSIII در تفکیک خاک‌های منیزیم‌دار از سایر خاک‌ها اشاره کرده‌اند که نتایج این تحقیقات در مورد به کارگیری باندهای مرئی جهت بارزسازی خاک‌های منیزیم‌دار مؤید نتایج تحقیق حاضر می‌باشد. در بررسی همبستگی آنیون‌های بیکربنات و سولفات با نسبت‌های طیفی همان‌طور که در جدول ۴ نیز مشهود است بیشترین همبستگی و کمترین خطا در محدوده‌ی مادون قرمز حرارتی می‌باشد. گرچه میزان همبستگی مؤلفه بیکربنات با نسبت باندهای ۷ به ۹ در محدوده‌ی مادون قرمز میانی نیز بالاست اما اختلاف معنی‌داری در میزان ضریب تبیین و مجذور میانگین مربعات خطای مربوط به بهترین نسبت‌گیری‌های طیفی به دست آمده در محدوده‌های طیفی مادون قرمز حرارتی و میانی وجود ندارد ( $P\text{-value} > 0.05$ ) و می‌توان از این دو نسبت طیفی جهت بارزسازی و تفکیک آنیون‌های مذکور در منطقه مطالعاتی استفاده کرد. همچنین نتایج تحقیق حاضر حاکی از نقش مهم باندهای حرارتی سنجنده استر در جداسازی مناطق کلریده از مناطق فاقد کلر می‌باشد. بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد که سیگال و همکاران (۱۹۸۰) و گوپتا (۱۹۹۱)، به نقش باند حرارتی سنجنده ای‌تی‌ام برای تشخیص خاک‌های سولفات و ابراهیمی (۱۳۸۹) به نقش باندهای

حرارتی سنجنده ای‌تی‌ام و استر به منظور جداسازی مناطق کلریده از مناطق فاقد کلر اشاره کرده‌اند که نتایج تحقیقات مذکور در مورد به کارگیری باندهای حرارتی در بارزسازی آنیون‌های خاک مؤید نتایج تحقیق حاضر می‌باشد. این در حالی است که نتایج تحقیقات تاج‌گردان (۱۳۸۸) و تقی‌زاده (۲۰۰۸) در راستای به کارگیری باندهای محدوده مرئی و مادون قرمز میانی به منظور شناسایی خاک‌های شور از گچی با نتایج تحقیق حاضر همخوانی ندارد. که دلیل این امر را می‌توان به متفاوت بودن بازتاب خاک‌های شور در مناطق مختلف نسبت داد. در بررسی مؤلفه‌های سدیم و کلر باید اذعان کرد که گرچه نسبت باندهای ۱۲ به ۱۳ و ۱۳ به ۱۴ از بیشترین ضرایب تبیین و کمترین میزان خطا با مؤلفه‌های مذکور برخوردار می‌باشند اما چون مقدار ضریب تبیین کمتر از ۵۰ درصد است و از طرفی در علم‌آمار  $R^2$  کمتر از ۵۰ درصد نمی‌تواند برآورد مناسبی را از متغیر مورد بررسی نشان دهد لذا می‌توان اذعان کرد که استفاده از روش اعتبارسنجی تقاطعی نمی‌تواند برآورد مناسب و دقیقی را از مقادیر کلر و سدیم در منطقه‌ی مطالعاتی نشان دهد و بنابراین نسبت‌های طیفی انتخاب شده بر اساس این روش جهت بارزسازی و شناسایی خاک‌های سدیمی و کلریده در کویر دره انجیر مناسب نمی‌باشد. اما این روش می‌تواند روشی مناسب جهت تفکیک خاک‌های منطقه مطالعاتی بر اساس مقادیر کلسیم، پتاسیم، منیزیم، سولفات و بیکربنات خاک باشد. بنابراین بر اساس نتایج تحقیق حاضر می‌توان گفت که اعمال نسبت‌گیری‌های مختلف طیفی بر روی داده‌های چند طیفی ماهواره‌های منابع زمینی می‌تواند امکان تفکیک خاک‌های مناطق خشک را بر اساس مقادیر کلسیم، پتاسیم، منیزیم، سولفات و بیکربنات خاک فراهم نماید که این نتایج فرضیه تحقیق را نیز تأیید می‌کند. اما نظر به اینکه با استفاده از روش اعتبارسنجی تقاطعی نمی‌توان اقدام به تفکیک

- متین فر، حمیدرضا؛ سید کاظم علوی پناه؛ فریدون سرمدیان (۱۳۸۵). مطالعه تفکیک پذیری خاک‌های مناطق خشک با استفاده از داده‌های سنجنده استر (مطالعه موردی: استان اصفهان)، فصلنامه زمین‌شناسی ایران. جلد ۲. شماره ۵.

- Dehghan, R., and G.R. Tayler (2003). Image derived spectral endmembers as indicators of salinization. *International journal of remote sensing*, 24.
- Farifteh, J., Farshad, A. and George, R.J (2005). Assessing salt-affected soils using remote sensing, solute modeling and geophysics. *Geoderma*, 130.
- Geladi, P., & Kowalski B (1986). Partial least square regression: A tutorial. *Analytica Chimica Acta*, 35.
- Gupta, R. P. (1991). Remote sensing in geology. Chapter 3.
- Gutierrez, M., Johnsin, E (2010). Temporal Variation of Natural Soil Salinity in an Arid Environment using Satellite Images, *Journal of South American Earth Science*, Vol. 73.
- Khan, M. N., Rastoskuev, V.V., Shalina, E.V. and Sato, Y (2001). Mapping salt affected soils using remotesensing Indicators- a simple approach with the use of GIS IDRISI. In: *Proceedings of The twentysecond Asian Conference on remote sensing*.
- Metternicht, G., and J. A. Zink (2003). Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. *Remote Sensing of environment*. Vol. 85.
- Metternicht, G. I (2003). *Categorical Fuzziness: a Comparison between Crisp and Fuzzy Class Boundary Modeling for Mapping Salt- affected Soils using Landsat-TM Data and a Classification Based on Anion Ratios, Ecological Modeling*, Vol. 168.
- Mougnot, B., Pouget, M., and Epema, G (1993). Remote sensing of salt affected soils. *Remote Sensing Reviews*, 7.
- Nield, S. J., J. L., Boettinger & R.D. Ramsey (2007). Digitally Mapping Gypsic and Natric Soil Areas Using Landsat ETM Data, *Soil Science Society of American Journal*, 71.
- Taghizadeh Mehrjardi, R., Mahmoodi, Sh., Taze, M., Sahebjalal, E (2008). Accuracy Assessment of Soil Salinity Map in Yazd-Ardakan Plain, Central Iran, Based on Landsat ETM Imagery, *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, 3 (5): 708-712.

خاک‌های سدیمی و کلریده کرد، لذا به منظور شناسایی بهتر این خاک‌ها استفاده از سایر روش‌های پردازش تصویر از قبیل فیلترینگ، تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی و بهبود کنتراست و یا استفاده از سایر روش‌های آماری از قبیل روش‌های رگرسیون‌گیری گام به گام مرحله‌ای، حذف پس‌رونده و یا حذف پیش‌رونده پیشنهاد می‌گردد.

### منابع

- ابراهیمی خوسفی، زهره؛ سیدرشید فلاح‌شمسی؛ مرزا کمپانی زارع؛ محسن ابراهیمی خوسفی؛ محمد رضا اختصاصی؛ سیدزین‌العابدین حسینی (۱۳۸۹). برآورد مؤلفه‌های شوری خاک با استفاده از تبدیل طیفی تصاویر ای‌تی‌ام و استر به رادینس و بازتابش سطحی، نشریه سنجش از دور و GIS ایران. جلد دوم، شماره ۱.
- احمدی، عذرا (۱۳۸۹). پهنه‌بندی رخساره‌های کویری پلایای طبس با استفاده از تکنیک سنجش از دور، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده منابع طبیعی. دانشگاه یزد.
- تاج‌گردان، تکتیم؛ شمس‌الله ایوبی؛ شعبان شتایی؛ فرهاد خرمالی (۱۳۸۸). تهیه نقشه شوری خاک سطحی با استفاده از داده‌های دورسنجی ای‌تی‌ام، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. جلد ۱۶. شماره ۲.
- دشتکیان، کاظم؛ مجتبی پاک‌پرور؛ جلال عبدالهی (۱۳۸۷). بررسی روش‌های تهیه نقشه‌ی شوری خاک با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای لندست در منطقه مروست، فصلنامه علمی پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان. شماره ۲.
- درویش‌صفت، علی‌اکبر (۱۳۷۷). جزوه درسی سنجش از دور، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل. دانشکده منابع طبیعی. دانشگاه تهران.
- علوی پناه، سید کاظم (۱۳۸۵). کاربرد سنجش از دور در علوم زمین (علوم خاک)، چاپ دوم. انتشارات دانشگاه تهران.