



سنجش از دور

GIS ایران



سال دوم، شماره یکم، بهار ۱۳۸۹  
Vol.2, No.1, Spring 2010

سنجش از دور و GIS ایران  
Iranian Remote Sensing & GIS

۲۳-۳۶

## برآورد مؤلفه‌های شوری خاک، با استفاده از تبدیل طیفی تصاویر ETM+ و ASTER به رادیانس و بازتابش سطحی (مطالعه موردی: پلایای کویر ابرکوه، یزد)

زهره ابراهیمی خوسفی<sup>۱</sup>، سیدرشید فلاح‌شمسی\*<sup>۲</sup>، مزدا کمپانی زارع<sup>۳</sup>، محسن ابراهیمی خوسفی<sup>۴</sup>، محمدرضا اختصاصی<sup>۵</sup>، سید زین‌العابدین حسینی<sup>۶</sup>

۱. کارشناس ارشد مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

۲ و ۳. استادیار بخش مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

۴. کارشناس ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه شهید بهشتی

۵. استادیار آموزشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد

۶. مربی آموزشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۸۹/۹/۲۰

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۳/۲۴

### چکیده

پایش و مدیریت شوری، از مهم‌ترین موضوعات زیست‌محیطی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. به‌منظور دستیابی به این هدف بهره‌گیری از ابزارهای نو مانند سنجش از دور اجتناب‌ناپذیر است. هدف از این مطالعه برآورد مؤلفه‌های شوری خاک (کلر، سولفات و هدایت الکتریکی) با استفاده از تبدیل طیفی تصاویر ETM+ و ASTER به رادیانس و بازتابش سطحی در محدوده کویر ابرکوه در منطقه‌ای به وسعت ۸۷/۴ کیلومترمربع است. بدین منظور از تصاویر ماهواره‌ای ETM+ (اکتبر ۲۰۰۲) و ASTER (ژوئن ۲۰۰۶) و همچنین نتایج آنالیز شیمیایی مربوط به ۲۹ نمونه خاک برداشت شده در مطالعات میدانی در ژوئن ۲۰۰۶ استفاده شده است. در ابتدا، پس از تصحیح هندسی تصاویر، با اعمال تبدیل‌های طیفی بر روی تصاویر، به تخمین مؤلفه‌های شوری خاک در یک مدل همبستگی گام به گام اقدام شده است. سپس مدل‌های تخمین با استفاده از معیارهای خطای نسبی تخمین و تأیید، مجذور میانگین مربعات خطا، ضریب همبستگی و ضریب کارایی مورد ارزیابی قرار گرفته و با نتایج به دست آمده از ۹ نمونه برداشت‌شده زمینی به عنوان نمونه شاهد مستقل، اعتبارسنجی شده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داد که تأثیر تبدیل‌های مذکور بر ارتقای معیارهای مدل همبستگی در یون‌های مختلف متفاوت است و نشان از بهبود دقت نتایج مدل‌های برآورد مؤلفه‌های شوری خاک (به عنوان مثال، ۳۵ درصد افزایش در برآورد مقدار کلر به‌وسیله سنجنده ETM+ و ۱۰ درصد افزایش در برآورد مقدار EC از طریق سنجنده ASTER)، پس از تبدیل مقادیر ثبت‌شده به‌وسیله سنجنده به بازتابش سطحی دارد؛ و اهمیت بازتابش سطحی را در این‌گونه محاسبات نمایان می‌سازد.

**کلیدواژه‌ها:** شوری خاک، رادیانس، بازتابش سطحی، ETM+، ASTER.

\* نویسنده مکاتبه‌کننده: شیراز، باجگاه، دانشگاه شیراز، دانشکده کشاورزی. تلفن: ۰۷۱۱-۲۲۸۷۱۵۹

## ۱- مقدمه

شور شدن خاک فرایند غالب در تخریب خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک به شمار می‌رود که موجب ممانعت از رشد بسیاری از گیاهان و نیز فرسایش خاک و تشدید بیابان‌زایی می‌گردد. اراضی طبیعی حاشیه نواحی کویری و بیابانی تحت تأثیر جریان‌های آب در خاک و مدیریت ناکارآمد منابع آب و خاک غالباً در معرض شور شدن و افزایش شوری قرار دارند. آگاهی از میزان شوری و تهیه نقشه از الگوی شوری خاک نقش مؤثری در مدیریت منابع آب و خاک هر کشور دارد؛ لیکن طبیعت مناطق خشک و بیابانی به گونه‌ای است که تهیه چنین نقشه‌هایی را به شیوه عملیات میدانی، بسیار دشوار و پرهزینه می‌سازد. این موضوع سبب شده است تا استفاده از فنون سنجش از دور در این زمینه اهمیت فراوان بیابد. خاک به‌عنوان لایه پوشش‌دهنده سطح زمین از نظر ویژگی‌های ظاهری - مانند شکل، بافت، الگو، رنگ و جز اینها - بسیار متنوع است، به‌طوری‌که این موضوع بر میزان بازتاب‌های طیفی آنها تأثیر می‌نهد و الگوی بازتاب‌های سطحی<sup>۱</sup> آنها را بسیار پیچیده می‌سازد. این پیچیدگی هنگامی افزایش می‌یابد که مؤلفه‌های بازتابش ناشی از پدیده‌های مختلف که در مجاورت یکدیگر قرار گرفته‌اند، در هم بیامیزند. در طول موج معین و برای هر پدیده مشخص، گرچه مقدار و نسبت انرژی الکترومغناطیسی در هر رفتار طیفی (انعکاس، جذب و عبور) از پدیده تقریباً ثابت است، اما این آمیختگی طیفی سبب می‌شود که حتی اغلب پدیده‌های ظاهراً یکسان نیز بازتاب نهایی متفاوتی داشته باشند (علوی‌پناه، ۱۳۸۵). در سنجش از دور طیفی، که کسب اطلاعات از پدیده‌های سطحی زمین در آن بر پایه دریافت و تحلیل و تفسیر تصاویر به دست آمده از ثبت دامنه‌های الکترومغناطیسی استوار شده است، توجه به این آمیختگی و تلاش برای کاهش تأثیر آن بسیار پراهمیت است. مؤلفه بازتابش ناشی از تأثیر مولکول‌های تشکیل‌دهنده جو زمین، از مهم‌ترین مؤلفه‌های بازتابشی است که ضمن اختلاط با بازتاب طیفی پدیده‌های سطح زمین، موجب تغییر در مؤلفه

برآیند (بازتاب طیفی نهایی) پدیده‌های سطحی می‌شود. بنابراین تردیدی وجود ندارد که به واسطه این تأثیر، ارزش ثبت‌شده<sup>۲</sup> برای هر پیکسل در هر دامنه معین طیفی با مقدار رادیانس<sup>۳</sup> دریافت شده از منبع گسیل طیف و مقدار بازتابش سطحی پیش از عبور از جو و وصول به ابزار گیرنده دقیقاً معادل نیست. قوانین پایه فیزیک مانند ترمودینامیک و اپتیک مشخص می‌سازند که مقدار جذب رادیانس گسیل شده به هر جسم یا پدیده و بازتاب سطحی آن، ارتباط نزدیکی با ماهیت فیزیکی و شیمیایی آن جسم دارند. موضوعاتی چون ظرفیت گرمایی ویژه جسم، بازتابش دوجبهتی و سطوح لامبرتیته از مصادیق این ارتباط به شمار می‌روند (مباشری، ۱۳۸۵).

مروری بر مطالعات گذشته، ضمن تأکید بر تفاوت‌های موجود در ماهیت مقادیر DN، رادیانس و بازتابش سطحی، نشان می‌دهد که با به‌کارگیری فنون تبدیل طیفی و محاسبه مقادیر رادیانس و بازتابش سطحی به جای DN تصاویر ماهواره‌ای می‌توان به دقت و صحت بالاتری در نتایج استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای دست یافت. دکامپز<sup>۴</sup> و همکاران (۱۹۸۳) نشان می‌دهند که مقدار DN با مقدار واقعی رادیانس از سطح جسم معادل نیست. آنان مشخص ساختند که تغییرات ناشی از وضعیت هندسی استقرار خورشید نسبت به شیء مورد نظر (ارتفاع خورشید، زاویه آزیموت خورشید، شیب زمین و پستی و بلندی) نیز می‌تواند بر میزان ارزش رقومی ثبت‌شده در هر پیکسل تأثیر بگذارد. سوئیتزر<sup>۵</sup> و همکاران در سال ۱۹۸۱ با بیان این موضوع که تبدیل طیفی رادیانس و بازتابش نیازمند اطلاعاتی از ارتفاع و زاویه سمت‌الرأسی خورشید و تعیین زاویه دید سنجنده است، روشی را برای تخمین

1. Reflectances
2. Digital Number
3. Radiance
4. Deschamps
5. Switzer

مدل‌های ریاضی در تخمین مؤلفه‌های شوری خاک است. فرضیه تحقیق حاضر این است که مقادیر رادیانس و بازتابش سطح پدیده‌ای مشخص در دامنه معین طیف الکترومغناطیس بهتر از ارزش DN اولیه تصاویر ماهواره‌ای به توصیف خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک می‌پردازد.

## ۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه جزو حوزه باتلاق گاوخونی و به مساحت ۸۷/۴ کیلومترمربع در نزدیکی شهر ابرکوه واقع شده است. مختصات جغرافیایی حوزه ۴۰° و ۵۲° تا ۴۴° و ۵۳° طول شرقی و ۴۱° و ۳۰° تا ۳۱° عرض شمالی است که کفه ابرکوه را در خود جای داده است. اقلیم منطقه گرم و خشک است و خاک‌های منطقه پلایا عموماً حاصل از تخریب فیزیکی است. ۵ رخساره حاشیه مرطوب، پف کرده نمکی، شخم‌خورده، صاف - مرطوب - چسبناک و پلی‌گون‌های بزرگ نمکی در محدوده مورد مطالعه به چشم می‌خورد. در طبقه‌بندی خاک به روش امریکایی، خاک‌ها در دو رده اینتی سول<sup>۶</sup> و اریدی سول<sup>۷</sup> قرار گرفته‌اند. به‌طور کلی تجزیه و تخریب شیمیایی در منطقه بسیار ضعیف و یا عملاً متوقف است. وجود رسوبات تبخیری (تشکیلات گچی و نمکی همراه با رس شور) از ویژگی‌های کفه است که سطح آن را لایه‌ای از نمک به قطر چند سانتی‌متر می‌پوشاند. حاشیه این کویر کاملاً تحت تأثیر میزان رطوبت و آبداری کویر و فرسایش ناشی از اثر باد قرار دارد و به هنگام کاهش سطح ایستابی<sup>۸</sup>، حاشیه کویر تا حدودی رطوبت خود را از دست می‌دهد. سطح پلایا تحت شرایط فصول خشک و مرطوب تغییر شکل

رادیانس با استفاده از روابط آماری برای باندهای سنجنده لندست MSS<sup>۱</sup> ارائه کرده‌اند. یوکسل<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۸) در مطالعه خود بر روی منطقه‌ای از ترکیه، برای طبقه‌بندی و تعیین کاربری اراضی، از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده ASTER استفاده کردند.

آنها با تبدیل طیفی تصاویر از رادیانس به بازتابش سطحی به این نتیجه رسیدند که استفاده از داده‌های بازتابش سطحی باعث افزایش صحت کلی<sup>۳</sup> و ضریب کاپا<sup>۴</sup> می‌شود. نیلد<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از تصاویر ETM+ به تهیه نقشه خاک‌های سدیمی و گچی در منطقه‌ای از امریکا پرداختند. آنها رفتار طیفی خاک‌های گچی و سدیمی را مورد بررسی قرار دادند و برای رسیدن به نتیجه مطلوب از نسبت‌گیری طیفی استفاده کردند. دشتکیان و همکاران (۱۳۷۸) به بررسی روش‌های تهیه نقشه شوری خاک با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای لندست در منطقه مروست پرداختند. نتایج نشان داد که مناسب‌ترین روش برای تهیه نقشه شوری خاک، روش میانگین رگرسیون‌ها با باندهای ۱ و ۲ و ۳ است. دماوندی (۱۳۷۶) بررسی امکان کاربرد داده‌های ماهواره‌ای را برای شناسایی و طبقه‌بندی اراضی شور به روش رقومی، در منطقه دریاچه حوض سلطان قم مورد مطالعه قرار داد. مهم‌ترین هدف این تحقیق، بررسی امکان تهیه نقشه شوری خاک با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای TM و همچنین تعیین میزان همبستگی از طریق رگرسیون و رابطه میان مقادیر بازتاب طیفی (DN) و شوری خاک (EC) بود. هر چند در تحقیق مذکور رابطه میان EC و DN در اکثر حالت‌ها از نظر آماری معنی‌دار بود و بر نقش باند حرارتی ۶ و سه باند انعکاسی ۳ و ۴ و ۵ در تشخیص خاک‌های شور از خاک‌های گچی و خاک‌های شور از خاک‌های غیرشور تأکید گردید، لیکن به دلیل پایین بودن نسبی ضرایب همبستگی به تهیه نقشه شوری منتهی نشد. هدف اصلی این تحقیق، بررسی همبستگی و قابلیت تبدیل‌های طیفی رادیانس و بازتابش سطح تصاویر ETM+ و ASTER برای افزایش کارایی و صحت

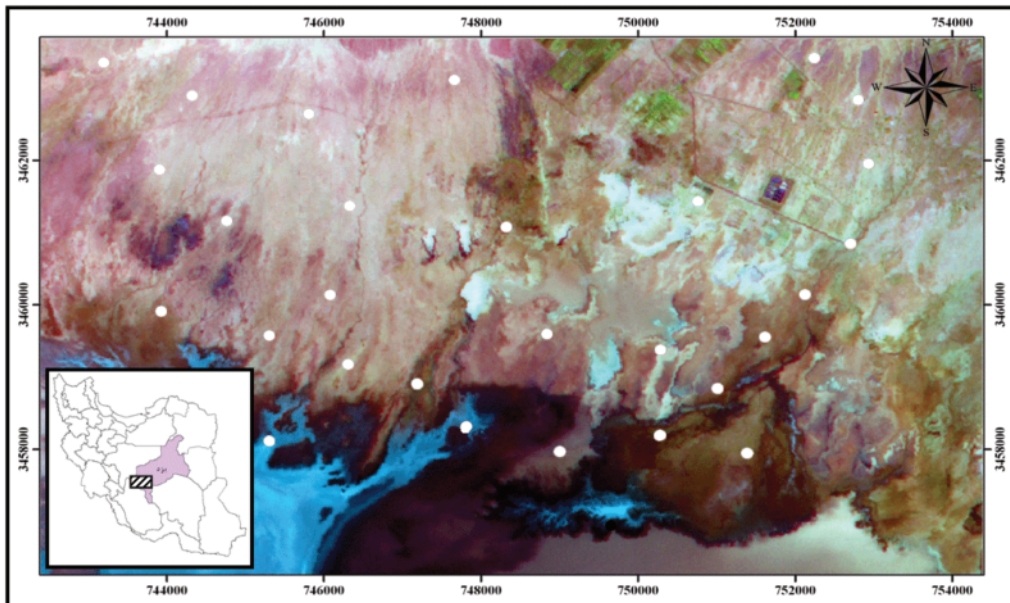
1. Multi-Spectral Scanner(MSS)
2. Yuksel
3. Overall Accuracy
4. Kappa Coefficient
5. Niild
6. EntiSol
7. Adirisol
8. Water Table

ژوئن سال ۲۰۰۶ میلادی (با توجه به سهولت دسترسی به این تصاویر و همچنین قدرت تفکیک طیفی و مکانی مناسب) استفاده گردیده است. برای تصحیح هندسی تصاویر مذکور از نقشه‌های توپوگرافی ۱/۵۰۰۰، و به منظور تشکیل مدل‌های برآورد مؤلفه‌های خاک و همچنین اعتبارسنجی نتایج، از آنالیز شیمیایی (مقادیر کلر، سولفات و هدایت الکتریکی خاک) ۲۹ نمونه خاک برداشت شده در مطالعات میدانی استفاده شده است. جدول ۱ بیانگر محدوده، میانگین و انحراف معیار داده‌های برداشت شده زمینی است.

می‌دهد، و بر میزان و تنوع و تراکم آنها در فصل خشک (تابستان) می‌افزاید. رس واقع در زیر چندضلعی‌های نمکی فوق‌العاده چسبنده و دیواره آبراهه‌ها از نمک‌های تغییررنگ یافته تشکیل شده است. در محدوده میانی کویر به دلیل نمک بسیار زیاد؛ گیاهان نمک‌دوست به چشم نمی‌خورد. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را در ایران و استان یزد نشان می‌دهد.

### ۳- داده‌های مورد استفاده

به منظور انجام تحقیق حاضر، از تصاویر ETM+ متعلق به ۲۸ اکتبر سال ۲۰۰۲ و تصاویر ASTER متعلق به ۲



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه در ایران و استان یزد به همراه موقعیت نقاط نمونه‌برداری

جدول ۱. مشخصات آماری داده‌های برداشت شده زمینی برای ۲۹ نمونه خاک

	Ec	Cl	SO4
مقدار حداقل	۶۷/۲۲	۶۴۰	۶۰/۱۹
مقدار حداکثر	۵۴۳/۲	۵۰۰۰	۲۷۶۲/۱۵
میانگین	۳۸۶/۷۵	۳۶۱۰/۷	۹۷۵/۳۰
انحراف معیار	۱۳۲/۳۶	۱۳۴۲/۲۴	۷۶۳/۳

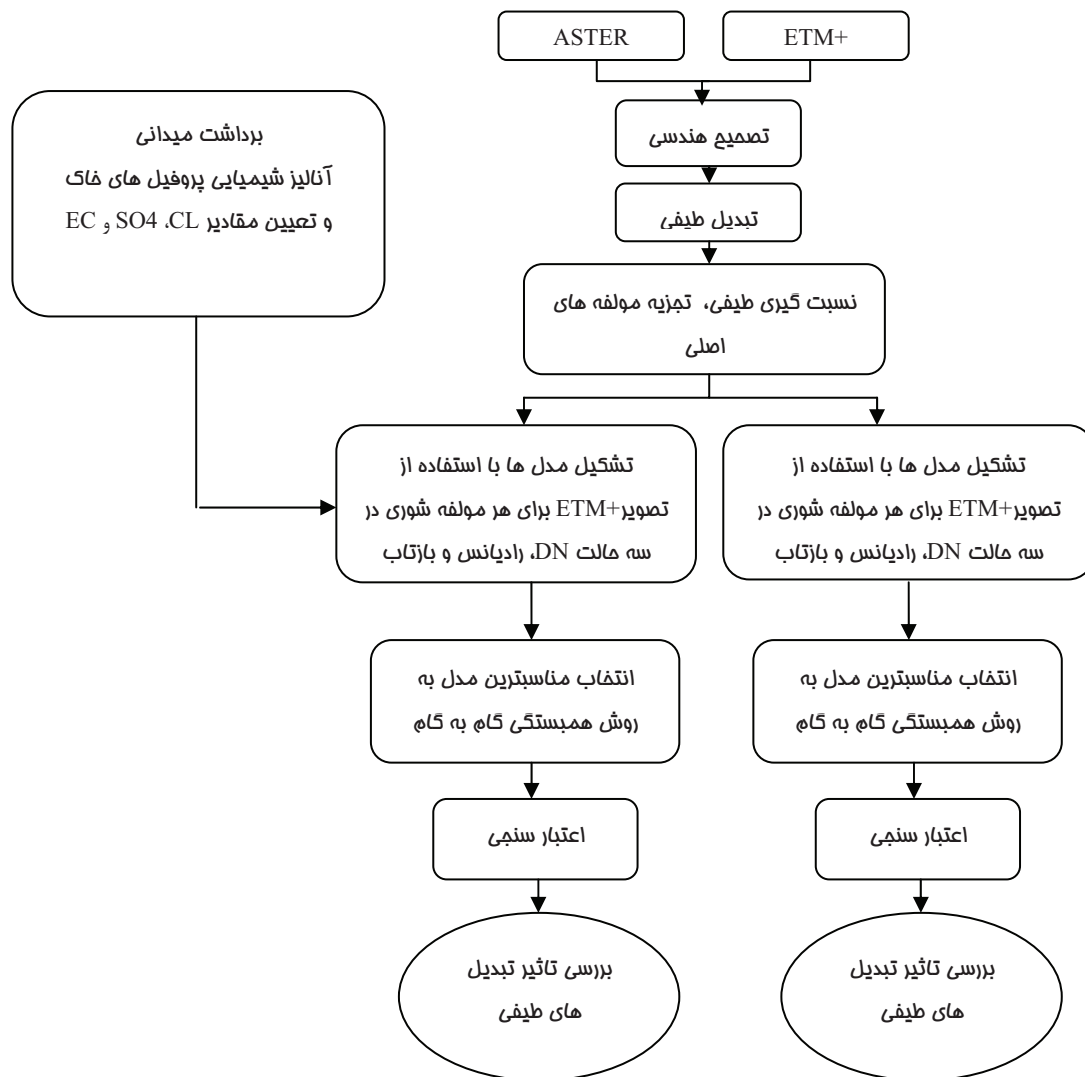
#### ۴- روش کار

نمودار جریانی مراحل مختلف انجام تحقیق حاضر در شکل ۲ نشان داده شده است.

#### ۴-۱- برداشت میدانی

ابتدا به منظور انجام مطالعات میدانی، موقعیت تعدادی نقطه در محدوده مورد مطالعه به صورت تصادفی تعیین گردید. در برداشت میدانی، که در ژوئن ۲۰۰۶ انجام گرفت، با استفاده از دستگاه GPS دستی پروفیلی از خاک در ۲۹ نقطه تهیه گردید. لازم به ذکر

است با توجه به محدودیت‌های موجود در برداشت از جمله وجود رخساره‌هایی همانند رخساره‌های شخم‌خورده و چسبنده، محدودیت دسترسی به تجهیزات مورد نیاز نظیر خودروهای کوپرنورد، شرایط سخت آب‌وهوایی و همچنین واقع شدن برخی از نقاط در رخساره پلی‌گون‌های بزرگ نمکی اشباع‌شده از نمک خالص، امکان برداشت تعداد بیشتر نقاط وجود نداشت. در نهایت نمونه‌های خاک در آزمایشگاه مورد تجزیه قرار گرفت و مقادیر مؤلفه‌های خاک پس از تجزیه در آزمایشگاه تعیین و ثبت گردید.



شکل ۲. فلوچارت روش کار تحقیق

#### ۲-۴- پیش پردازش تصاویر

ماکزیمم و مینیمم رادیانس باندهای مختلف سنجنده ETM+ را نشان می‌دهد. به منظور تبدیل طیفی مقادیر رادیانس به DN تصاویر سنجنده ASTER، که از ابتدا به صورت رادیانس دریافت شده‌اند، از رابطه (۲) استفاده شد.

$$DN_i = (L_i / \text{coef}_i) + 1 \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن،  $L_i$  تابندگی (شدت رادیانس) پیکسل مورد نظر،  $DN$  ارزش رقومی پیکسل، و  $\text{Coef}_i$  ضریب تبدیل  $DN$  به رادیانس است. ضریب مذکور برای باندهای ۱ تا ۱۴ سنجنده ASTER به ترتیب عبارت است از: ۱/۶۸۸، ۱/۴۱۵، ۱/۸۶۲، ۰/۲۱۷۴، ۰/۰۶۹۶، ۰/۰۶۲۵، ۰/۰۵۹۷، ۰/۰۴۱۷، ۰/۰۳۱۸، ۰/۰۰۶۸۸۲، ۰/۰۰۶۷۸۰، ۰/۰۰۵۶۹۳ و ۰/۰۰۵۲۲۵.

سپس با استفاده از رابطه (۳)، مقادیر بازتابش سطحی برای باندهای هر دو سنجنده تعیین محاسبه گردید.

$$\rho = \frac{\pi \cdot L \cdot d^2}{ESUN \cdot \cos(Sz)} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن،  $L$  رادیانس پیکسل مورد نظر برحسب  $(\text{Wm}^{-2}\text{Sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1})$ ،  $d$  فاصله زمین - خورشید در واحد نجومی (۱۴۹/۶ میلیون کیلومتر)،  $Sz$  زاویه سمت‌الرأس خورشید (درجه Zenith)، و  $ESUN_i$  ضریب اصلاحی بازتابش اتمسفری برحسب  $(\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1})$  است.

به منظور انجام تصحیح هندسی تصاویر، ابتدا تصویر ETM+ با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱/۵۰۰۰ و ۵۷ نقطه کنترل با روش نمونه‌برداری مجدد<sup>۱</sup> نزدیک‌ترین همسایه<sup>۲</sup> و معادلات پلی‌نومیال درجه یک و دقت ۰/۸۲ پیکسل تصحیح گردید. سپس تصحیح تصویر ASTER با استفاده از روش تصویر به تصویر، نمونه‌برداری مجدد نزدیک‌ترین همسایه، معادلات پلی‌نومیال درجه یک و دقت ۰/۵۱ پیکسل انجام شد. در گام بعدی به منظور حذف خطای ناشی از GPS در برداشت میدانی، فیلتر میانگین ۳ در ۳ روی تصاویر اعمال گردید. در نهایت محدوده مورد مطالعه از روی تصاویر برش داده شد.

#### ۳-۴- تبدیل طیفی تصاویر

تصاویر اولیه دریافتی ETM+ برحسب دامنه DN هشت بیتی<sup>۳</sup> و تصاویر باندهای ASTER برحسب دامنه رادیانس بوده است. ابتدا تبدیل طیفی «DN به رادیانس» تصاویر ETM+ با استفاده از رابطه (۱) انجام گردید.

رابطه (۱)

$$L = L_{\min} + ((L_{\max} - L_{\min}) / DN_{\max}) DN$$

که در آن  $L$  رادیانس پیکسل مورد نظر؛  $DN$  ارزش رقومی پیکسل و  $DN_{\max}$  حداکثر ارزش رقومی ثبت شده به‌وسیله سنجنده (۲۵۵) است. جدول ۲ مقادیر

جدول ۲. مقادیر  $L_{\min}$  و  $L_{\max}$  برای سنجنده ETM+

Band	ETM <sub>1</sub>	ETM <sub>2</sub>	ETM <sub>3</sub>	ETM <sub>4</sub>	ETM <sub>5</sub>	ETM <sub>6-1</sub>	ETM <sub>6-2</sub>	ETM <sub>7</sub>	ETM <sub>8</sub>
$L_{\min}$	-۶/۲	-۶/۴	-۵	-۵/۱	-۱	۰	۳/۲	-۰/۳۵	-۴/۷
$L_{\max}$	۲۹۳/۷	۳۰۰/۹	۲۳۴/۴	۲۴۱/۱	۴۷/۵۷	۱۷/۰۴	۱۲/۶۵	۱۶/۵۴	۲۴۳/۱

منبع: شونگرت، ۲۰۰۷

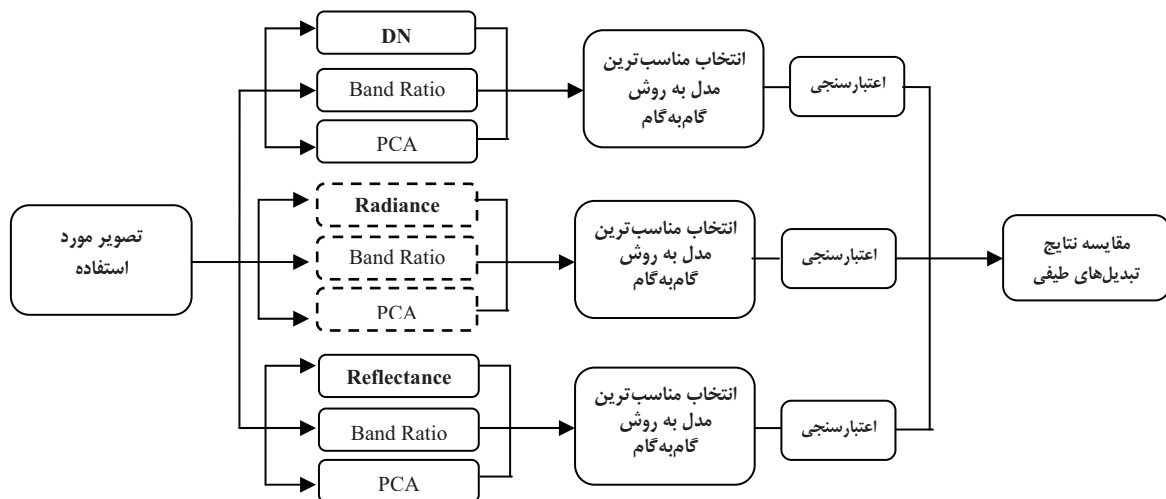
1. Resample
2. Nearest Neighbour
3. Bit



#### ۴-۴- تشکیل و اعتبارسنجی مدل‌ها

به منظور تشکیل مدل‌های برآورد مؤلفه‌های شوری خاک، در ابتدا داده‌های میدانی به طور تصادفی به دو دسته آموزشی (۲۰ نمونه) و شاهد (۹ نمونه) تقسیم گردید. با توجه به مطالعه دماوندی در سال ۱۳۷۶، پارامترهای شوری خاک با نسبت‌های طیفی<sup>۱</sup> و تجزیه مؤلفه‌های اصلی<sup>۲</sup> همبستگی خوبی نشان داده‌اند. بر همین اساس، در تحقیق حاضر علاوه بر ارزش باندهای مختلف تصاویر مورد استفاده، نسبت‌های طیفی مختلف و تجزیه مؤلفه‌های اصلی در سه حالت DN، رادیانس و بازتابش سطحی نیز محاسبه و استفاده شده و سپس ارزش عددی در هر پیکسل در محل نمونه برداری خاک در تمامی حالات پیش‌گفته استخراج گردیده است. در مرحله بعد، با استفاده از داده‌های آموزشی و روش رگرسیون گام به گام<sup>۳</sup> به تشکیل مدل‌های همبستگی برای سه عامل EC، CL و SQ<sub>4</sub> به طور جداگانه و در هر سه حالت DN، رادیانس و بازتابش سطحی اقدام شده است. لازم به توضیح است که این عمل برای تصاویر ETM+ و ASTER به صورت مجزا

انجام شده است. شکل ۳ بیانگر مراحل تشکیل و اعتبارسنجی مدل‌هاست. در گام بعدی، از میان مدل‌های به دست آمده از روش گام به گام، بهترین مدل‌های تخمین مؤلفه‌های شوری بر مبنای کمترین تعداد متغیر شرکت‌کننده، کمترین خطای تخمین، کمترین خطای تأیید، کمترین میزان RMSE، و دارا بودن بالاترین ضریب همبستگی<sup>۴</sup> و ضریب کارایی انتخاب گردید. از آنجا که بالا بودن ضریب تبیین ( $R^2$ ) در مدل انتخابی رگرسیون چندمتغیره، به تنهایی دلیلی بر کارآمد بودن مدل نیست و کارایی هر مدل وقتی به اثبات می‌رسد که بتواند توصیف خوبی از متغیر وابسته ارائه دهد (رضائی و سلطانی، ۱۳۷۷)، به منظور ارزیابی صحت و دقت مدل‌های به دست آمده، چهار معیار خطای نسبی تخمین<sup>۵</sup> (RE)، خطای نسبی تأیید، میانگین جذر مربع خطاها<sup>۶</sup> (RMSE) و ضریب کارایی مورد استفاده قرار گرفت، که معادلات مربوط به آنها در روابط (۴) و (۵) و (۶) آمده است. مدل‌های نهایی نیز با استفاده از ۹ نمونه اعتبارسنجی شده‌اند.



شکل ۳. مراحل تشکیل و اعتبارسنجی مدل‌ها

1. Band Ratio
2. Principle Component Analysis (PCA)
3. Stepwised
4. Corrélation Coefficient
5. Relative Error (RE)
6. Root Mean Square Error (RMSE)

در نهایت، با جای‌گذاری باندهای مندرج در هر مدل به تهیه نقشه EC، CL و SO<sub>4</sub> اقدام شده است.

رابطه (۴)

$$RE = \left| \frac{Q_o - Q_e}{Q_o} \right| \times 100$$

رابطه (۵)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_e)^2}{n}}$$

رابطه (۶)

$$CE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q}_o)^2 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_o - Q_e)^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q}_o)^2}$$

**۵- نتایج**  
مدل‌های تخمین مؤلفه‌های شوری خاک حاصل از تبدیل‌های طیفی رادیانس و بازتابش سطحی و نتیجه ارزیابی و اعتبارسنجی آنها برای سه مؤلفه شوری EC، CL و SQ<sub>4</sub> در سه حالت «DN، رادیانس، و بازتابش سطحی» برای داده‌های سنجنده ETM+ ماهواره لندست و سنجنده ASTER در جداول ۳ و ۴ آمده است. از اعمال آن بر روی باندهای شرکت‌کننده، نقشه تغییرات EC، CL و SO<sub>4</sub> با طبقه‌بندی به روش برش تراکمی<sup>۱</sup> برای تصاویر ETM+ و ASTER تهیه شده است (شکل‌های ۴ و ۵).

در این معادلات خطای نسبی به درصد، Q<sub>e</sub> مقدار مشاهده‌ای متغیر وابسته، Q<sub>o</sub> مقدار تخمینی متغیر وابسته، C<sub>e</sub> ضریب کارایی،  $\bar{Q}_o$  میانگین مقادیر مشاهده‌ای و n تعداد مشاهدات است (Green & Stephenson, 1986; Das, 2000).

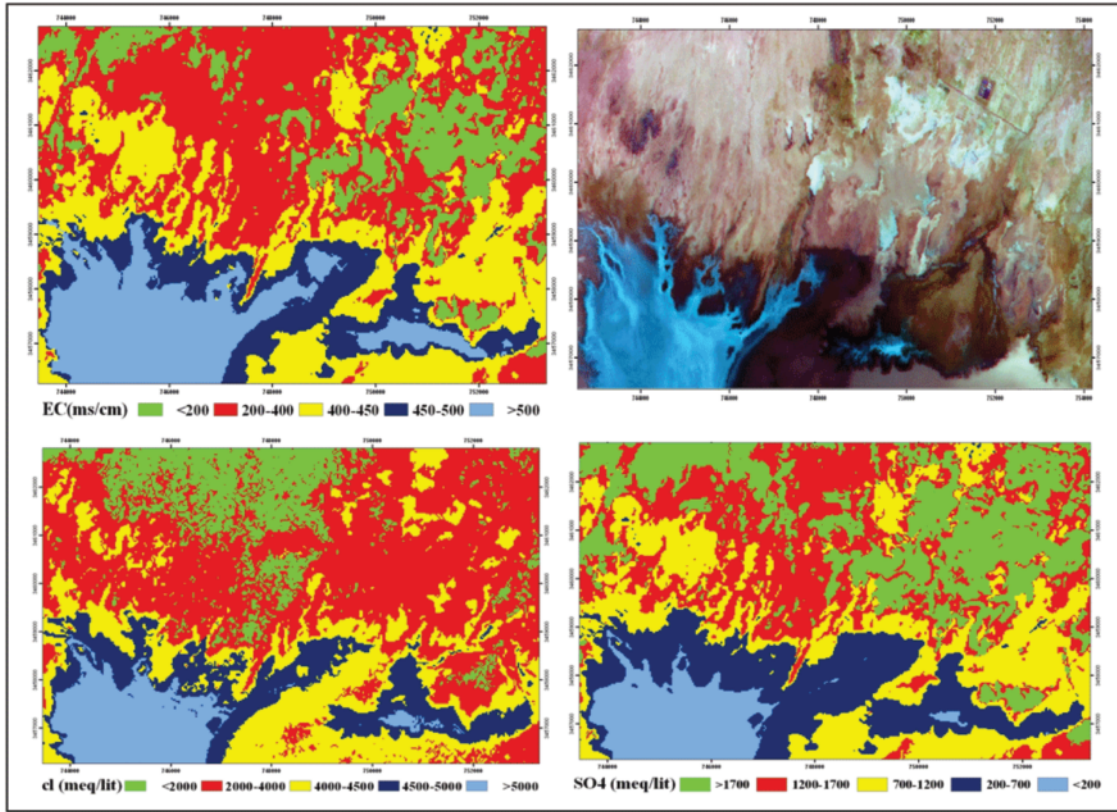
جدول ۳. مدل‌های تخمین مؤلفه‌های شوری، خاک، نتایج ارزیابی و اعتبارسنجی مدل با نمونه‌های مستقل - سنجنده ETM+

معادله	تشکیل مدل (۲۰ نمونه)				اعتبارسنجی (۹ نمونه)		
	R	RMSE	RE	CE	R	RMSE	RE
$EC_{dn} = (-33/9 \times BR5/4) + 706/7$	۰/۳۵	۱۲۱/۸	۵۰/۵	۰/۱۲	۰/۱۲	۱۶۵/۸	۶۵/۴
$EC_{rad} = (-409 \times BR5/4) + (2039 \times BR4/5) - 1501/1$	۰/۵۲	۱۱۰/۹	۴۴/۸	۰/۲۷	۰/۱۳	۱۵۸/۴	۶۲/۸
$EC_{ref} = (-5/8 \times \frac{b3 - b4}{b2 - b4}) + (5/8 \times b7) + (2166 \times BR7/5) - 807/7$	۰/۷	۹۳/۶۲	۳۴/۱	۰/۴۸	۰/۱۶	۱۲۳/۵	۴۹/۳
$CL_{dn} = (-38 \times b5) + 8288$	۰/۴	۱۲۴۷/۱	۱۰۱۲/۳	۰/۱۶	۰/۳۲	۱۵۱۸/۴	۵۷/۷
$CL_{rad} = (-46 \times b5) + 4075$	۰/۴	۱۲۴۷/۱	۱۰۱۲/۳	۰/۱۶	۰/۳۲	۱۵۱۸/۴	۵۷/۷
$CL_{ref} = (-12449 \times b5) + 7977$	۰/۴	۱۲۴۷/۱	۱۰۱۲/۳	۰/۱۶	۰/۳۲	۱۵۱۸/۴	۵۷/۷
$SO4_{dn} = (21193 \times BR4/3) - 14846$	۰/۵	۶۸۳/۴	۲۶۱/۱	۰/۲۵	۰/۱۲	۷۶۵/۲	۳۱۲/۲
$SO4_{rad} = (5934 \times BR14/1) - 4056$	۰/۵۱	۶۸۱/۲	۲۵۸/۷	۰/۲۳	۰/۱۲	۶۸۹/۳	۳۱۶/۹
$SO4_{ref} = (18801 \times BR14/1) + (192 \times PC2) - 14377$	۰/۵۸	۶۴۲/۸	۱۸۲/۱	۰/۳۴	۰/۱۶	۶۵۱/۲	۳۰۴/۲

## 1. Density Slicing



برآورد مؤلفه‌های شوری خاک، با استفاده از تبدیل طیفی تصاویر ETM+ و ASTER به رادیانس و بازتابش سطحی

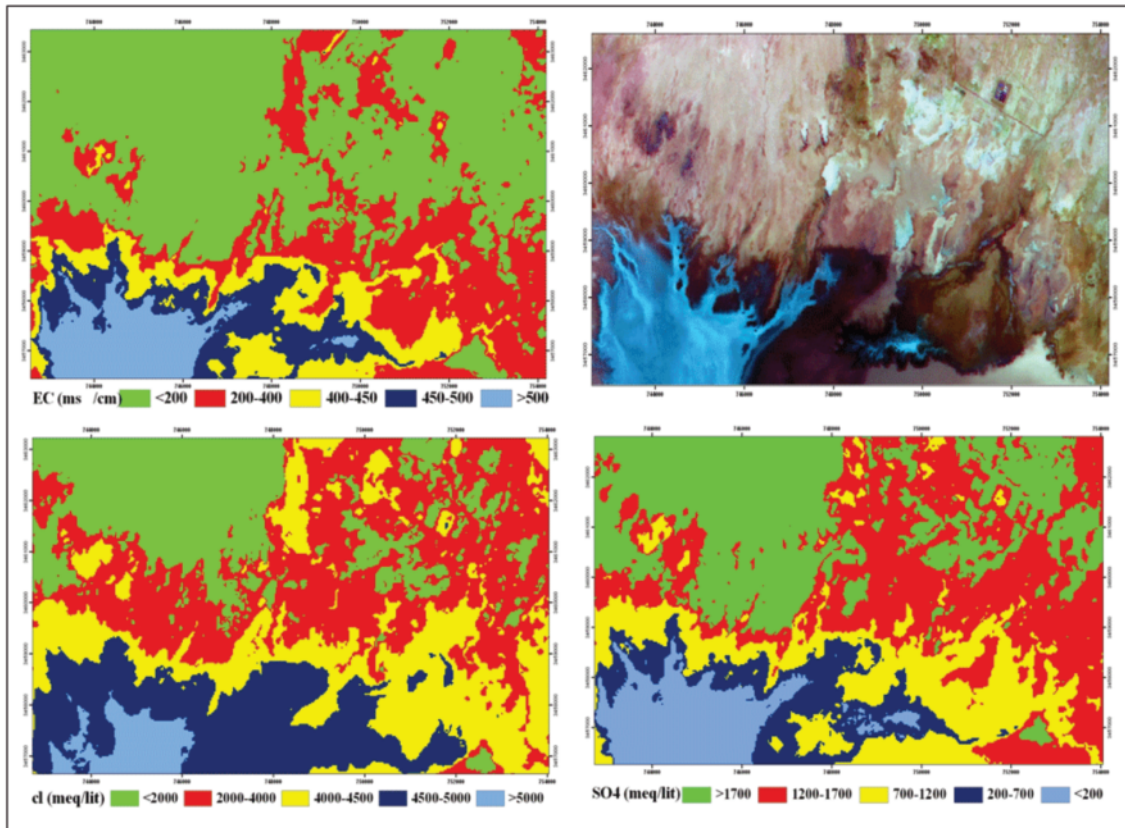


شکل ۴. نقشه طبقات EC، CL و SO<sub>4</sub> حاصل از تصاویر ETM+

جدول ۴. مدل‌های تخمین مؤلفه‌های شوری خاک، نتایج ارزیابی و اعتبارسنجی مدل با نمونه‌های مستقل - سنجنده ASTER

معادله	تشکیل مدل (۲۰ نمونه)				اعتبارسنجی (۹ نمونه)		
	R	RMSE	RE	CE	R	RMSE	RE
$EC_{dn} = (60 \times \frac{b2+b3}{b2-b3}) + 932/3$	۰/۴۵	۱۱۶	۴۵/۱۶	۰/۲۱	۰/۵	۱۳۹/۹	۴۸/۵
$EC_{rad} = (4/1 \times BR2/3) + 563/5$	۰/۴۷	۱۱۵/۶	۴۳/۶۵	۰/۲۲	۰/۴۷	۱۴۰/۴	۴۷/۸
$EC_{ref} = (-1945 \times BR2/3) - (2961 \times \sqrt{b2 \times b3}) + 4459$	۰/۵۵	۱۰۹/۸	۴۱/۴۶	۰/۳	۰/۵۳	۱۲۷/۵	۲۲/۸۶
CL <sub>dn</sub>	*	*	*	*	*	*	*
CL <sub>rad</sub>	*	*	*	*	*	*	*
$CL_{ref} = (35 \times \frac{b2+b3}{b2-b3}) + 5017$	۰/۴۶	۱۲۷۱/۱	۵۰/۱	۰/۱۳	۰/۲۲	۱۳۰۷/۰۴	۵۲/۸
SO <sub>4</sub> <sub>dn</sub>	*	*	*	*	*	*	*
SO <sub>4</sub> <sub>rad</sub>	*	*	*	*	*	*	*
$SO4_{ref} = (-8546 \times BR4/5) + 96187PC1 + 10670$	۰/۵	۶۸۵/۵	۲۰۹/۹	۰/۲۵	۰/۳۸	۸۲۴/۲	۳۰۸/۸

\* فقدان همبستگی معنی‌دار



شکل ۵. نقشه طبقات EC، CL و SO<sub>4</sub>، حاصل از تصاویر ASTER

## ۵- بحث و نتیجه گیری

می توان مشاهده کرد، پس از برقراری مدل همبستگی بین مؤلفه سولفات خاک و همچنین مؤلفه کلر در حالات DN و رادیانس، هیچ ارتباط معنی داری بین آنها ایجاد نشد. این در حالی است که در حالت بازتابش سطحی رابطه معنی داری بین دو آنیون (SO<sub>4</sub> و CL) و باندها ایجاد گردیده است. بهبود معیارهای ارزیابی مدل در مورد این دو یون به دلیل تأثیر ترکیبات سولفات و کلرید بر بازتاب سطحی خاک منطقه و همزمانی ظهور ترکیبات سولفات دار و کلردار با تغییرات فیزیکی در ناهمواری های سطحی پلایای کویری بازمی گردد.

در شناسایی یون سولفات در خاک برای سنجنده ETM+، به واسطه تبدیل رادیانس و بازتابش سطحی، ضریب تعیین مدل های تخمین و ضریب کارایی مدل ها به میزان جزئی تغییر کرده، اما به طور کلی در حالت بازتابش سطحی در مقایسه با دو حالت دیگر این

با توجه به مدل های تخمین CL در جدول ۳، در صورتی که حساسیت طیفی به مؤلفه مورد نظر از شوری خاک تنها به یک باند خاص محدود شود، تبدیل طیفی رادیانس و بازتابش سطحی موجب بهبود در معیارهای همبستگی نمی شود، زیرا روابط موجود نسبی اند و مقادیر رادیانس و بازتابش سطحی با استفاده از نسبتی معین از DN، ضرایب تصحیح و مقادیر واسنجی گیرنده های هر باند - که خود مقادیری ثابت اند- محاسبه می گردد.

به طور کلی اعمال تبدیل طیفی به مقادیر رادیانس و بازتابش سطحی در تخمین مؤلفه های خاک منجر به افزایش معیارهای ارزیابی و اعتبار مدل تخمین، هم برای سنجنده ETM+ و هم سنجنده ASTER شده است (جدول ۳ و ۴). همان طور که در جدول ۴

می‌توان اذعان کرد که این محدوده طیفی در هر دو سنجنده دارای اهمیت یکسانی در شناسایی نمک‌ها و یون‌های مولد شوری خاک است. بدین ترتیب از مقایسه جداول ۳ و ۴ مشخص می‌شود که مناسب‌ترین مدل‌های تخمین مقدار یون سولفات در منطقه به مدل‌های منتج از بازتابش سطحی تعلق دارند. همچنین طبق گزارش سیگال و گیلسی (۱۹۸۰) و مولدرز (۱۹۸۷)، برای تشخیص خاک‌های دارای سولفات، باند ۶ (حرارتی) سنجنده ETM+، باند مناسبی است، زیرا در ناحیه ۱۰/۲ میکرومتر ناحیه جذبی وجود دارد که تحت تأثیر مولکول‌های آب همراه سولفات‌ها قرار دارد. نظر به اینکه باند ۵ و ۷ سنجنده ETM+ به ترتیب با باند ۴ و ۵ سنجنده ASTER از لحاظ محدوده طیفی مطابقت دارد، لذا نتایج تحقیق حاضر در مورد مدل سولفات مربوط به سنجنده ASTER مؤید بررسی‌های گذشته است.

بررسی مدل‌های مربوط به مؤلفه EC خاک در جداول ۳ و ۴ نیز حاکی از نقش باندهای ۲ و ۳ سنجنده ASTER در هر سه حالت DN، رادیانس و بازتابش سطحی، نقش باندهای ۴ و ۵ سنجنده ETM+ در حالت DN و رادیانس و همچنین نقش مهم نسبت باند ۳ به ۲ (BR ۳/۲)، نسبت باند ۷ به ۵ (BRV/۵) و باند ۷ این سنجنده با مؤلفه شوری خاک است. بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد که باندهای ۴ و ۵ سنجنده TM و نیز PCA تهیه شده از باندهای ۴ و ۵ و ۷ و نسبت باند ۳ به ۴ و شاخص<sup>۱</sup> NDVI در سطح ۵ درصد آماری (دماوندی، ۱۳۷۶) و باندهای ۱ و ۲ در سطح ۱ درصد آماری دارای همبستگی معنی‌داری با EC بوده‌اند (دشتکیان، ۱۳۷۸). از طرفی، می‌توان نتایج تحقیق دماوندی (۱۳۷۶) و دشتکیان (۱۳۷۸) را مؤید نتیجه حاصل از این تحقیق دانست، زیرا محدوده طیفی باندهای ۳ و ۴ سنجنده ETM+ با محدوده طیفی باندهای ۲ و ۳ سنجنده ASTER مطابقت می‌کند.

ضرایب افزایش یافته‌اند و از مقدار خطای مدل‌ها نیز کاسته شده است (جدول ۳).

با توجه به جدول ۳ در تخمین یون کلر، باند ۵ سنجنده ETM+ در هر سه حالت «DN، رادیانس و بازتابش سطحی» به مدل وارد شده است. از آنجا که این باند به رطوبت خاک حساس است، بنابراین همبستگی باند ۵ با مقادیر کلر را می‌توان ناشی از پراکنش این یون در ترکیب نمک معمولی سطحی و جریان‌های رطوبتی سطح خاک در ناحیه پلاپای کویری دانست. مدل‌های مربوط به این مؤلفه در تهیه نقشه مناطق صاف و مرطوب پلایا می‌تواند در خور اهمیت باشد. خوانین‌زاده (۱۳۸۱) با اعمال وزن‌های مختلف بر روی متغیر وابسته (کلر) به این نتیجه رسید که لگاریتم نپرن معکوس متغیر کلر، رابطه معنی‌داری را با باندهای ۲ و ۳ و ۵ ETM+ نشان می‌دهد که نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیق خوانین‌زاده مطابقت دارد.

بررسی مدل‌های تخمین سولفات در جدول ۳ بیانگر این نکته است که نسبت باند ۴ به ۳ سنجنده ETM+ در حالت DN، نسبت باند ۴ به ۱ (شاخص رطوبت خاک) در حالت رادیانس و مؤلفه دوم، حاصل از تجزیه و تحلیل اصلی باندهای ۱ تا ۵ این سنجنده به همراه تأثیر شاخص رطوبت خاک (BR ۴/۱) در حالت بازتابش سطحی با مؤلفه‌های شوری خاک مخصوصاً یون سولفات همبسته است، که به نظر می‌رسد از مجاورت و همراهی ترکیبات سولفات‌دار با مولکول‌های آب و حساسیت باند ۴ سنجنده ETM+ به ویژگی جذبی آب ناشی شده باشد.

همان‌طور که در جدول ۴ نیز دیده می‌شود، سولفات خاک با مؤلفه اول حاصل از تجزیه مؤلفه‌های اصلی باندهای ۱ تا ۳ و همچنین نسبت باندهای ۴ و ۵ سنجنده ASTER تنها در حالت بازتابش سطحی به مدل وارد شده است. مقایسه دامنه طیفی باندهای سنجنده ASTER با ETM+، این نکته را تأیید می‌کند که محدوده طیفی باند ۴ و ۵ این سنجنده تقریباً با باندهای ۳ و ۴ سنجنده ETM+ انطباق دارد. در نتیجه

1. Normalized Difference Vegetation Index

خاک نیز موضوعی است که می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

#### ۶- منابع

Alavipanah, S.K., 2006, **Application of Remote Sensing in Earth Science**, Tehran University Press, Second Edition, p. 478.

Damavandi, A.A., 1997, **Investigation on Possibility of Using Satellite Data to Detect and Classify of Saline Lands by Digital Method**, M.Sc. Thesis Research, Center of Researches the Kavir and Desert Regions of Iran, p. 112.

Das, G., 2000, **Hydrology and Soil Conservation Engineering**, Prentice-Hall of India Press, p. 489.

Dashtakian, K., Pakpavar, M & Abdollahi, G., 1998, **Investigation on Methods to Produce Soil Salinity Map**, Using at Landsat Data; Case study: Marvast Region, Seasonal Scientific- Researches, Iran Research Institute of Rang land and Desert, 15: 139-157.

Deschamps, P.Y., M. Herman & D. Tanre, 1983, **Definition of Atmospheric Radiance and Transmittance in Remote Sensing**, Remote Sensing of Environment, 13: 89-92.

Green I.R.A. & D. Stephenson, 1986, **Criteria for Comparison of Single Event Model**, Hydrological Sciences Journal, 31: 395-411.

Mobasheri, M.R., 2006, **Remote Sensing and Satellite Technology**, Khaje Nasir Toosi Poly-technique University Press, 1st edition, p. 335.

همچنین نیلد و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از تصاویر ETM+ برای تشخیص خاک‌های شور و گچی از نسبت باندهای ۵ و ۷ استفاده کردند که نتایج تحقیق حاضر در مورد مدل EC با نتیجه تحقیق نیلد نیز مطابقت دارد.

به طور کلی بررسی مدل‌ها نشان می‌دهد که استفاده از تبدیل‌های طیفی رادیانس و بازتابش سطحی در شناسایی اختصاصی یون‌های خاک موجب بهبود معنی‌داری در ضریب تعیین و دیگر معیارهای ارزیابی همبستگی در مدل می‌شوند که خود نشان‌دهنده قابلیت استفاده از این روش در تهیه نقشه‌های صحیح و قابل اتکای خاک مناطق خشک و بیابانی است. تحقیق جاری همچنین نشان می‌دهد که انتخاب مناسب‌ترین مدل تخمین، آن هم تنها براساس بزرگی ضریب تعیین توابع همبستگی نمی‌تواند بیانگر بهینگی قطعی مدل در برآورد مؤلفه‌های خاک باشد. بنابراین برای اعتبارسنجی مدل‌ها، استفاده از سایر معیارهای ارزیابی از جمله خطای نسبی تخمین، خطای نسبی تأیید، جذر میانگین مربع خطاها و ضریب کارایی مدل‌ها را نباید از نظر دور داشت. گرچه مدل‌های ارائه شده در این تحقیق از نظر علم آمار چندان قوی به نظر نمی‌رسند، لیکن با توجه به دو نکته اجرایی مهم در مدیریت منابع طبیعی، یعنی استفاده از طبقات مؤلفه‌های شوری خاک به جای مقدار مطلق عددی آنها در هر نقطه (پیکسل) از سرزمین و نیز پذیرش دامنه وسیع‌تری از حدود اعتماد برای نتیجه تخمین این مؤلفه‌ها از مدل برای استفاده در عملیات اجرایی، می‌توان از این مدل‌ها در برآوردهای کلی سود جست. این به‌ویژه از آن روست که اغلب نقاط واقع بر پلاهای کویری دسترسی‌ناپذیرند و کسب اطلاع از آنها به شیوه‌های دیگر و مخصوصاً عملیات میدانی، بسیار دشوار و یا حتی ناممکن است. با توجه به تنوع دامنه حساسیت طیفی سنجنده‌های مختلف در ثبت رادیانس و بازتابش سطحی، انجام تبدیل‌های طیفی بر روی تصاویر سنجنده دیگر ماهواره‌های منابع زمینی در شناسایی مؤلفه‌های شوری

- Mulders, M.A., 1987, **Remote Sensing Development in Soil Science: Developments in Soil Science**, Amsterdam Elsevier, p. 379.
- 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: 245-252.
- Rezaei, A. & Soltani, A. 1998, **Introduction to Applied Regression Analysis**, Isfahan University Publishing Center, P. 294.
- Schowengerdt, R.A., 2007, **Remote Sensing; Models and Methods for Image Processing**, 3rd Edition, Academic Press, Elsevier, California, USA, p. 515.
- Siegal, B., & A.O. Gillespie, 1980, **Remote Sensing in Geology**, New York: John Wiley.
- Switzer, P., W.S., Kowalik & R.J.P. Lyon, 1981, **Estimation of Atmospheric Path Radiance by the Covariance Matrix Method**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 47: 1469-1476.
- Yuksel, A., & R. Gundogan, 2008, **Using ASTER Imagery in Land Use/Cover Classification of Eastern Mediterranean Landscapes According to CORINE Land Cover Project**, ISSN: 1424-8220.