

## مروری بر چالش‌های انتخاب شاخص‌های مناسب دورسنجی در مطالعات شوری خاک

شهلا رحمانی سیالرز و علی کشاورزی<sup>۱\*</sup>

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران. [shahla.rahmani@ut.ac.ir](mailto:shahla.rahmani@ut.ac.ir)

استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران. [alikeshtarzi@ut.ac.ir](mailto:alikeshtarzi@ut.ac.ir)

دریافت: مرداد ۱۴۰۱ و پذیرش: بهمن ۱۴۰۱

### چکیده

شوری خاک به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی است. شوری خاک به‌طور طبیعی و یا توسط انسان ایجاد می‌شود. مقدار زیاد شوری خاک بر رشد محصول و بهره‌وری آن تأثیر منفی می‌گذارد و در نهایت منجر به تخریب اراضی می‌گردد. نظارت و نقشه‌برداری شوری خاک به دلیل مشکلات جدی گسترش این مسئله بر اکولوژی منطقه‌ای، امنیت غذایی و توسعه کشاورزی در مراحل اولیه برای اجرای یک برنامه مؤثر احیای خاک در راستای جلوگیری و کاهش شوری خاک امری ضروری است. علم سنجش‌ازدور نسبت به روش‌های سنتی برای ارزیابی شوری خاک عملکرد بهتری نشان داده و تکنیک‌های سریع و مقرون‌به‌صرفه در راستای پایش و نقشه‌برداری شوری خاک ارائه می‌دهد. شوری خاک را می‌توان با استفاده از شاخص‌های مستقیم که به ویژگی‌های نمک‌های خاک سطحی مرتبط است و همچنین شاخص‌های غیرمستقیم شناسایی کرد. هدف این مطالعه مروری بر چالش‌های انتخاب شاخص‌های مناسب دورسنجی در مطالعات شوری خاک از طریق بررسی پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه شوری خاک و شاخص‌های طیفی به‌کاررفته در تحقیقات شوری خاک است که در سطح مدیریت اراضی در مقیاس منطقه‌ای، کمک شایان توجهی می‌نمایند که در این راستا رایج‌ترین شاخص‌های پوشش گیاهی و شوری مورد استفاده برای تشخیص و نقشه‌برداری شوری خاک مورد بحث و بررسی قرار گرفتند. محققین زیادی از شاخص‌های مختلف سنجش‌ازدور برای تهیه نقشه شوری خاک استفاده کرده‌اند. در این میان شاخص‌های درخشندگی BI، شاخص شوری SI، شاخص تفاضلی پوشش گیاهی نرمال شده NDVI و شاخص شوری نرمال شده NDSI بیش‌ترین همبستگی را با داده‌های زمینی در خاک‌های تحت تأثیر شوری نشان دادند. انتخاب مناسب‌ترین باند یا شاخص‌ها بستگی به شرایط خاک، منطقه جغرافیایی، شرایط اقلیمی، داده‌های ماهواره‌ای، فیزوگرافی منطقه و نوع استفاده از اراضی دارد. **واژه‌های کلیدی:** سنجش‌ازدور، شاخص‌های دورسنجی، تصاویر ماهواره‌ای، شاخص پوشش گیاهی، شاخص شوری

<sup>۱</sup> - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: [alikeshtarzi@ut.ac.ir](mailto:alikeshtarzi@ut.ac.ir)

نوع مقاله: مروری



## مقدمه

(وانگ و همکاران، ۲۰۲۱). در سال‌های اخیر، بسیاری از سیاست‌های ملی و بین‌المللی بر حفاظت خاک در برابر تهدیدات خاک متمرکز شده‌اند (ورمن و همکاران، ۲۰۲۰). کسب به‌موقع و دقیق اطلاعات شوری خاک اهمیت بسیار مهمی برای پیشگیری و کنترل تخریب سرزمین و احیای اکولوژیک در مناطق خشک دارد. پایش شوری خاک یک کار اساسی برای آشکارسازی وقوع، پویایی و توزیع شوری است (یانگ و همکاران، ۲۰۲۰). پایش سنتی شورشدن خاک به‌سختی اطلاعات توزیع شوری در مقیاس بزرگ را به دست می‌آورد و نظارت بر پویایی شوری خاک در مقیاس بزرگ دشوار است (گنو و همکاران، ۲۰۱۹؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۸). استفاده از پتانسیل تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا همراه با تکنیک‌های سنجش‌ازدور<sup>۲</sup> یک روش امیدوارکننده برای نقشه‌برداری شوری خاک است، زیرا دقت و کارایی بالایی برای نظارت مقیاس‌های بزرگ ارائه می‌کند (تقدسی و همکاران، ۲۰۱۹).

فناوری سنجش‌ازدور به‌عنوان یک تکنیک مؤثر برای پایش مؤثر شوری خاک، به‌طور گسترده‌ای برای تخمین شوری خاک در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته است این تکنیک به دلیل دقت قابل‌توجه، مقرون‌به‌صرفه بودن و تداوم در مشاهدات، برای تخمین شوری خاک توسعه و مورد توجه قرار گرفته است (فرهمند و صادقی، ۲۰۲۰). در دسترس بودن داده‌های سنجش‌ازدور پردازش شده با روشی تا حدی جدید یک راه‌حل بالقوه را ارائه می‌دهد که می‌تواند به‌راحتی و با قیمت مناسب جایگزین روش‌های نظارت در محل شود (مورگان و همکاران، ۲۰۱۸). در حال حاضر، داده‌های سنجش‌ازدور به‌طور گسترده در پایش شوری خاک به کار گرفته شده‌اند. در سال‌های اخیر، داده‌های سنجش‌ازدور ماهواره‌ای نقش مهمی در پایش و نقشه‌برداری منطقه‌ای و حتی جهانی شوری خاک ایفا کرده‌اند (گنو و همکاران، ۲۰۱۹؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۸).

شور شدن خاک یکی از مهم‌ترین خطرات زیست‌محیطی خاک در سطح جهان است که منجر به تخریب شدید زمین و بیابان‌زایی می‌شود (اولسون و همکاران، ۲۰۱۹). شوری خاک یک بحران زیست‌محیطی جدی است (آلبد و کومار، ۲۰۱۳). این پدیده اگرچه ممکن است به‌اندازه زلزله یا زمین‌لغزش‌های شدید و ناگهانی آسیب‌زا به نظر نرسد، اما به‌طور جدی تولید محصولات کشاورزی، بهره‌وری خاک و کشاورزی پایدار را به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک تهدید می‌کند و به‌عنوان یک خطر محیطی شدید محسوب می‌گردد (شهر آیینی و نوروزی، ۲۰۲۲؛ مترنیچ و زینک، ۲۰۰۳). تقریباً یک‌سوم زمین‌های کشاورزی جهان شور گزارش شده‌اند (کولماتو و همکاران، ۲۰۲۱). خاک‌های شور عمدتاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک، در مکان‌هایی که تبخیر و تعرق بیشتر از بارندگی است و همچنین در مناطق ساحلی در نتیجه نفوذ آب دریا و طغیان جزرومد ساحلی رخ می‌دهد (ورمن و همکاران، ۲۰۲۰).

تجمع نمک در سطح خاک یا در ناحیه ریشه باعث از بین رفتن حاصلخیزی و تغییر خواص فیزیکی و شیمیایی خاک می‌شود (محمد و همکاران، ۲۰۱۸). شوری خاک مستقیماً روی خصوصیات مانند ساختار خاک، فعالیت میکروبی خاک و غیره تأثیر می‌گذارد که به نوبه خود بر بهره‌وری خاک و در دسترس بودن مواد مغذی تأثیرگذار است. در عین حال، شور شدن خاک جذب آب و مواد مغذی توسط گیاهان را مهار می‌کند و در نتیجه بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمی گیاهان اثر می‌گذارد (حافظ و همکاران، ۲۰۲۱). این خاک‌ها که در مساحت‌های کوچک و نقاط مختلف پراکنده‌اند اراضی مجاور خود را نیز مورد تهدید قرار می‌دهند (خوان یغما و همکاران، ۲۰۱۶؛ جمشیدی و همکاران، ۱۳۹۴).

پایش دقیق شوری خاک نقش کلیدی در امنیت اکولوژیکی و توسعه کشاورزی پایدار مناطق خشک دارد

(ESP)<sup>۴</sup> کمتر از ۱۵ و pH کمتر از ۸/۵ در گروه خاک‌های شور قرار می‌گیرند (آلبد و کومار، ۲۰۱۳).

### عوامل شوری

عوامل مؤثر بر شوری خاک عبارت‌اند از شورشدن خاک در اثر آب آبیاری، شورشدن خاک از طریق آب‌های زیرزمینی و شورشدن خاک از طریق صعود موئینه-ای است. از جمله عواملی که در شورشدن خاک از طریق صعود موئینه‌ای آب از سطح ایستایی به سطح زمین مؤثر است می‌توان تأثیر میزان تبخیر و همچنین کاربری اراضی را نام برد (هاگو، ۲۰۰۶). هر ساله مقدار زیادی از زمین‌های قابل کشت به دلیل شورشدن اولیه (طبیعی) و ثانویه (ناشی از انسان) رها می‌شوند. هوازدگی شیمیایی یا فیزیکی سنگ‌ها، وجود مواد اولیه و کانی‌های نمکی در خاک مانند فلدسپات یا کربنات همراه با ذخایر زمین‌شناسی از جمله منابع اصلی شوری اولیه هستند (آلکساکیس و همکاران، ۲۰۱۸).

به‌طورکلی چنانچه شوری خاک مربوط به نوع سنگ مادری و ماده اولیه تشکیل‌دهنده خاک باشد آن را شوری اولیه یا شوری باقی‌مانده گویند و در اراضی که علت شوری خاک معمولاً تجمع تدریجی نمک در لایه سطحی خاک است شورشدن فرایندی است که عکس شست‌وشو انجام می‌شود، یعنی نمک‌هایی که قبلاً از لایه سطحی خاک شسته و خارج شده‌اند دوباره به لایه سطحی برگشت می‌کنند؛ لذا این نوع شوری را ثانویه گویند (لیتالین و زب، ۲۰۲۰). مهم‌ترین عامل شوری ثانویه در خاک‌ها انسان است که با آبیاری نمک‌ها را وارد سطح خاک می‌کند که در اثر تبخیر شدید از سطح خاک آب از خاک خارج شده و نمک‌ها در سطح خاک باقی می‌ماند (درویش و همکاران، ۲۰۰۵). در دهه‌های اخیر، فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه گسترش کشاورزی و آبیاری اراضی با آب شور آسیب‌های قابل‌توجهی به ساختار خاک وارد کرده و منجر به شورشدن خاک شده است (خسانو و همکاران، ۲۰۲۲).

شناسایی و پهنه‌بندی خاک‌های شور غالباً، به دلیل تغییرپذیری زمانی و مکانی آن و نیاز به نمونه‌برداری و کارهای آزمایشگاهی مشکل است. فناوری سنجش‌ازدور، به علت توانایی در شناسایی پدیده‌ها همواره موردتوجه متخصصین بوده است. اطلاعات به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای کمک زیادی به مطالعه پدیده‌های مختلف می‌کند و می‌تواند در تشخیص تغییرات پدیده‌ها بسیار مفید عمل کند (پیش‌نماز احمدی و همکاران، ۱۳۹۶). فناوری سنجش‌ازدور با قابلیت بالا در تولید به‌روز تصاویر ماهواره-ای چند طیفی<sup>۳</sup>، با پوشش وسیع و دامنه متنوع قدرت تفکیک مکانی، طیفی و زمانی، در برطرف کردن نگرانی‌های دانشمندان علوم خاک‌شناسی و مدیران اجرایی در تهیه نقشه‌های دقیق از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک با هزینه کم پتانسیل ویژه‌ای دارد (زادی و همکاران، ۲۰۱۳؛ مترنیچ و زینک، ۲۰۰۸).

هدف این مطالعه بررسی پژوهش‌های انجام شده در زمینه شوری خاک و شاخص‌های طیفی به‌کاررفته در مطالعات شوری خاک است که در سطح مدیریت اراضی در مقیاس منطقه‌ای، کمک شایان توجهی می‌نمایند که در این راستا رایج‌ترین شاخص‌های پوشش گیاهی و شوری مورد استفاده برای تشخیص و نقشه‌برداری شوری خاک مورد بحث و بررسی قرار گرفتند. سپس با بهره‌گیری از علم سنجش‌ازدور و شاخص‌های شوری استخراج شده از ترکیب‌های بانندی مختلف سعی بر معرفی مناسب‌ترین شاخص‌ها برای بررسی مطالعات شوری خاک در ایران شد.

### شوری خاک

خاک شور، به خاکی گفته می‌شود که دربردارنده نمک محلول اضافی است و منجر به کاهش رشد اغلب محصولات کشاورزی می‌شود (سونون و همکاران، ۲۰۱۲). بر اساس نظر محققین شوری خاک ایالات متحده آمریکا، خاک با قابلیت هدایت الکتریکی بالاتر از چهار دسی‌زیمنس بر متر در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، درصد سدیم تبدلی

## شوری در خاک کشور

شوری خاک یک خطر بزرگ زیست‌محیطی بزرگ در سراسر جهان به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران است (خواجه‌زاده و همکاران، ۲۰۲۲؛ فرهمند و صادقی، ۲۰۲۰). شوری در خاک‌ها منجر به کاهش قابل‌توجهی از ارزش و بهره‌وری اراضی در سراسر جهان شده است (ژائو و همکاران، ۲۰۲۲؛ الهاگ، ۲۰۱۶). این مسئله از مهم‌ترین عوامل محدودکننده کشت محصولات کشاورزی است و بیش از ۵۰٪ اراضی آبی دنیا دچار شوری با درجات مختلف هستند. یکی از مهم‌ترین مشکلات کشاورزی در ایران نیز، شوری خاک است (سلیمی و همکاران، ۱۳۹۸).

فلات ایران با داشتن اراضی وسیع در مناطق خشک و نیمه‌خشک، بیشتر در معرض این آسیب زیست‌محیطی قرار دارد. از این رو به‌دست‌آوردن اطلاعات از مناطقی که تحت تأثیر و یا در خطر پدیده شوری قرار دارند می‌تواند برای شناخت این پدیده و جلوگیری از گسترش آن مؤثر باشد (قدیر و همکاران، ۲۰۰۸). کشور ایران به دلیل تکیه بر کشاورزی فاریاب برای تولید محصولات کشاورزی به‌شدت در معرض شورش اراضی است. در شرایط آب‌وهوایی فعلی کشور، حدود ۹۰٪ از محصولات بر روی اراضی آبی تولید می‌شوند. از مجموع حدود هشت میلیون هکتار اراضی آبی کشور، ۶/۸ میلیون هکتار مبتلا به درجات مختلف شوری‌اند (جمشیدی و همکاران، ۱۳۹۴).

## پایش شوری خاک با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور

توزیع مکانی و زمانی نمک‌ها در خاک، گستردگی زیاد کویرهای ایران و شرایط نامساعد اقلیمی حاکم بر آن‌ها، تعیین دقیق پارامترها و اندازه‌گیری‌های میدانی را در برخی موارد دشوار می‌سازد. در دو دهه اخیر، استفاده از تکنیک‌های صحرایی و ترکیب آن‌ها با داده‌های سنجش‌ازدور کمک قابل‌توجهی به تهیه نقشه‌های پایه در خاک‌های شور کرده است. بسیاری از محققان در سراسر جهان نقشه‌های

شوری خاک را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، عکس‌های هوایی، تکنیک‌های زمینی و رادیومتری بر اساس همبستگی بین بازتاب طیفی نمک و شاخص‌های شوری خاک تهیه کرده‌اند (گمرکچی و همکاران، ۲۰۲۰). برای شناخت بیشتر خاک‌های مناطق شور و قلیا تنها بررسی مشخصات فیزیکی، شیمیایی و مورفولوژیکی خاک‌ها کافی نیست، بلکه بهتر است جهت مطالعه و بررسی این مناطق در مقیاس‌های وسیع از فن سنجش‌ازدور (شکل ۱) نیز بهره گرفته شود. استفاده از این فن در مطالعه خصوصیات مناطق خشک و نیمه‌خشک ضمن کاهش محدودیت‌های مکانی، موجب صرفه‌جویی در زمان نیز می‌شود (اخضری و اسدی می-آبادی، ۱۳۹۵). باتوجه‌به اینکه ماهواره‌های سنجش‌ازدور بازتاب سطحی پدیده‌های مختلف را ثبت می‌کنند، امواج منعکس‌شده از پدیده‌ها بیانگر ویژگی‌های سطحی آن‌ها است؛ بنابراین ویژگی سنجنده‌های سنجش از دوری، عمق مطالعات شوری خاک عموماً ۳۰ سانتی‌متر سطحی خاک را مورد بررسی قرار می‌دهد (احمدیان و همکاران، ۱۳۸۹). تقاضا برای تشخیص اقتصادی و سریع پایش زمانی شوری خاک اخیراً افزایش یافته است. تصاویر ماهواره‌ای و رویکردهای سنجش‌ازدور ابزار مهمی برای پیش‌بینی و نقشه‌برداری دقیق شوری خاک در مناطق مختلف جهان هستند (گرچی و همکاران، ۲۰۲۰). این علم به‌عنوان ابزاری قوی، به دلیل صرف زمان و هزینه کمتر در مطالعات خاک‌شناسی بسیار مفید است (سواری و همکاران، ۱۳۹۴). استفاده از دورسنجی در مطالعات خاک، به دلیل قدرت تفکیک مکانی و طیفی متغیر، تصاویر به‌هنگام و پوشش وسیع، بسیار مؤثر است (منگ و همکاران، ۲۰۱۶). از طرفی، سنجش‌ازدور اطلاعاتی از سطوح گسترده در مدت‌زمان نسبتاً کوتاه فراهم می‌آورد که بایستی به این ویژگی، فقدان محدودیت دسترسی به مناطق صعب‌العبور یا شرایط خطرناک محیطی را نیز افزود (فرهیفته و همکاران، ۲۰۰۶). سنجنده‌های چند طیفی ماهواره‌ای شدت تابش‌های الکترومغناطیسی پدیده‌های زمینی را اندازه‌گیری و ثبت می‌کنند. شدت تابش بازتاب شده از پدیده‌ها در محدوده‌های

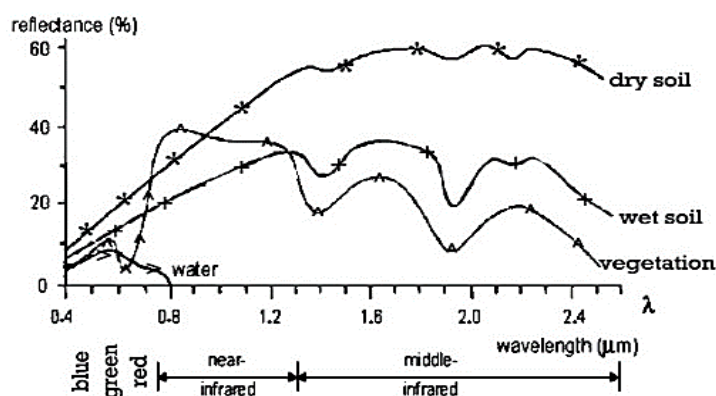
گیاهی و خاک به‌عنوان مهم‌ترین متغیرهای شاخص سنجش‌ازدوری برای تشخیص وضعیت اکوسیستم‌های در معرض خطر تغییرات بیابان‌زایی هستند (علوی پناه، ۱۳۸۲). بازتاب طیفی پدیده‌های مختلف در مقایسه با هم و هر یک از آن در طول‌موج‌های مختلف، تفاوت دارند. بازتاب در محدوده مرئی (۰/۷ - ۰/۴ میکرومتر) برای آب، خاک و گیاه به هم نزدیک هستند و انعکاس گیاه و خاک در دو ناحیه فرورسرخ میانی و نزدیک (۱/۴، ۱/۹، ۲/۶ میکرومتر) بر عکس هم هستند (حسینی، ۱۳۸۲).

تفاوت گیاه و خاک در طول طیفی بازتابیده در ناحیه فرورسرخ خیلی نزدیک امکان‌پذیر است؛ چون گیاهان در ناحیه فرورسرخ خیلی نزدیک بازتاب خوبی دارند، لذا داده‌های رقومی تکنیک دورسنجی برای ارزیابی مناطق پوشیده از گیاهان، بازتاب طیفی در فرورسرخ خیلی نزدیک را با بازتاب در ناحیه مادون‌قرمز مقایسه می‌کنند. هرچقدر نسبت این دو زیادتر باشد پوشش گیاهی متراکم‌تر است (زبیری و مجد، ۱۳۸۳).

طیفی مختلف ثبت می‌شوند. اختلاف در بازتاب طیفی تصاویر برای شناسایی عوارض مختلف استفاده می‌گردد (آلبد و همکاران، ۲۰۱۴). سنجش‌ازدور به‌عنوان ابزاری قوی و امیدوارکننده در شناسایی، پهنه‌بندی و پایش شوری خاک شناخته شده و رو به گسترش است (فرح و همکاران، ۲۰۲۱؛ نظم‌فر و همکاران، ۱۳۹۳). در صورت موجود بودن تصاویر می‌توان با تعداد نقاط محدود و صرف هزینه کم نقشه‌های به نسبت دقیق تهیه کرد و از آن‌ها به نحو مطلوب در مدیریت مزارع استفاده نمود (اژیرابی و عبدی، ۲۰۱۵).

### رفتار طیفی خاک

واکنش طیفی خاک، آب و گیاه در هر یک از طول‌موج‌های مختلف با یکدیگر متفاوت است. شکل ۱ رفتار طیفی پوشش گیاهی، آب، خاک مرطوب و خشک را در حالت ایده آل و طول‌موج‌های مختلف نشان می‌دهد (صادقیان و آخوندزاده، ۱۳۸۳). بازتاب طیفی پوشش



شکل ۱- رفتار طیفی پوشش گیاهی، خاک و آب در طول‌موج‌های مختلف (صادقیان و آخوندزاده، ۱۳۸۳)

آلودگی‌ها، ترکیب عناصر و ساختمان بلوری هستند (هانت و سیستورس، ۱۹۷۱). خاک تحت تأثیر نمک بازتاب بالاتری نسبت به نمک متوسط به‌ویژه هنگامی که خاک‌های برهنه و فاقد پوشش در مقایسه با خاک‌های دارای پوشش گیاهی هستند وجود دارد (بیبیکر و همکاران، ۲۰۱۸). به‌طورکلی خاک‌های تحت تأثیر نمک در طول‌موج‌های مرئی (۰/۵۵ تا ۰/۷۷ میکرومتر) و مادون‌قرمز نزدیک (۰/۹

### ویژگی‌های بازتاب طیفی خاک شور

سطوح شور پویایی بالایی دارند، این پویایی شناسایی و پایش خاک‌های شور و فرایند شورشدن را تحت تأثیر قرار می‌دهد (علوی پناه، ۱۳۹۲). در شرایط طبیعی به علت مخلوط شدن نمک‌ها با یکدیگر، خصوصیات طیفی کانی‌های نمکی علاوه بر اثر توزیع اندازه ذرات خاک و تداخل با خصوصیات دیگر خاک، تحت تأثیر عواملی نظیر،

می‌دهد (دهان و تیلر، ۲۰۰۳). به دلیل تفاوت در بازتاب‌های متفاوت و شرایط مختلف خاک، طول‌موج و پیک‌های خاک‌های مختلف ممکن است مشابه نباشد (پینه‌یرو و همکاران، ۲۰۱۷) که به‌طور کلی، تفاوت‌های طیفی از طریق شکل کلی منحنی‌های طیفی، شدت بازتاب، باندهای جذبی و زاویه جهت روند آن‌ها قابل تشخیص هستند (دماته، ۲۰۰۲).

در عموم تحقیقات انجام شده در جهت تمایز بین ویژگی‌های طیفی قابلیت هدایت الکتریکی با گچ و آهک به این نتیجه رسیدند که همبستگی قابلیت هدایت الکتریکی با طیف جذبی در همه طول‌موج‌ها منفی است. بدین شکل که با افزایش میزان EC جذب کاهش و میزان بازتاب طیفی افزایش می‌یابد. بیشترین همبستگی منفی EC با طیف جذبی در محدوده مرئی گزارش شد (طاق‌دیس و همکاران، ۱۴۰۰؛ سامرس و همکاران، ۲۰۱۱).

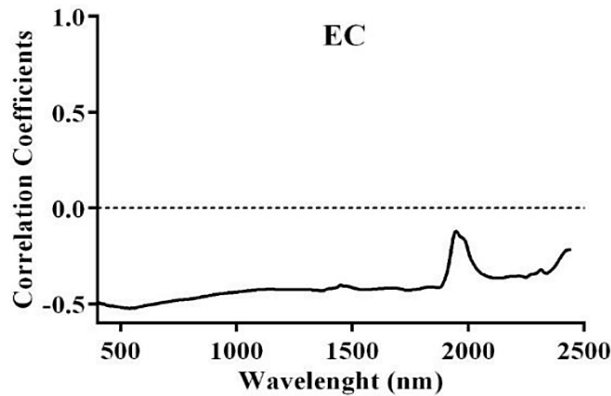
سیفی و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه خود بر روی خاک‌های شور، دو محدوده طول‌موج ۵۵۰ و ۷۵۰ نانومتر و برخی از باندهای جذبی محدوده ۱۴۰۰، ۱۹۰۰، ۲۲۰۰ و ۲۳۵۰ نانومتر را برای تشخیص نمک‌های موجود در خاک گزارش کردند و بیان نمودند که با افزایش کلاس شوری خاک، میزان بازتاب طیفی در محدوده Vis-NIR افزایش می‌یابد. وانگ و همکاران (۲۰۱۸) نیز گزارش کردند که خاک‌های شور به دلیل وجود پوسته سطحی نرم‌تر، میزان بازتاب زیادی در محدوده Vis-NIR دارند. این نتایج توسط موسوی و همکاران (۱۳۹۸) و عزیزی و همکاران (۱۳۹۷) نیز تأیید شده است. پینه‌یرو و همکاران (۲۰۱۷) به این نتیجه رسیدند بیشترین همبستگی EC با طیف مرئی-مادون‌قرمز در طول‌موج‌های ۴۵۶، ۹۸۴ و ۱۰۱۴ نانومتر است. در (شکل ۲) ضرایب همبستگی بین میانگین طیف جذبی در هر طول‌موج با هدایت الکتریکی ترسیم شده است.

تا ۱/۳ میکرومتر) و ناحیه مادون‌قرمز میانی (۱/۹۴ تا ۲/۱۵ میکرومتر) خودشان را نشان می‌دهند (نیک‌پور و همکاران، ۱۴۰۰). سسیلاج و همکارانش (۱۹۹۳) نیز، با استفاده از طیف‌سنجی آزمایشگاهی، شش محدوده طیفی را برای توصیف وضعیت شوری خاک‌های متأثر از فرایندهای متفاوت، شور و قلیایی شدن مشخص کردند. این محدوده‌ها در ناحیه مرئی (۱۷۷۰ - ۵۵۰ نانومتر)، مادون‌قرمز نزدیک (۱۲۷۰-۱۵۲۰ و ۱۰۳۰ - ۹۰۰ نانومتر) و مادون‌قرمز میانی (۲۴۰۰-۲۳۲۰ و ۳۱۵۰-۲۳۰۰، ۲۱۵۰-۱۹۴۰ نانومتر) واقع شده‌اند.

رطوبت خاک، موجب کاهش بازتاب در بخش مرئی و مادون‌قرمز می‌شود. خاک رسی که مقدار زیادی رطوبت در خود نگه می‌دارد، انعکاس کمتری دارد. رطوبت موجب کاهش بازتاب طیفی می‌شود (علوی پناه، ۱۳۸۲). به‌طور کلی خاک‌های شور خشک دارای بازتاب بیشتری نسبت به خاک‌های شور مرطوب دارند. هم‌چنین خاک‌های غیر شور تحت آیش دارای کمترین بازتاب در تمامی باندها هستند (خدادادی و همکاران، ۱۳۸۷).

### تمایز طیفی نمک، گچ و آهک

عواملی مانند تجمعات گچی و وجود آهک در اراضی کشاورزی به علت داشتن بازتاب‌های مشابه با بازتاب اراضی شور در بررسی و تفکیک این اراضی مزاحمت و یا تداخل انعکاسی ایجاد می‌کنند. این مسئله باعث به‌وجود آمدن خطا و کاهش دقت در نقشه‌های تولیدی می‌شود. جهت تفکیک اراضی شور از گچی، در خاک‌های لخت بدون پوشش که حاوی کانی‌های تبخیری هستند عمدتاً بازتاب طیفی حدود ۸۰۰ نانومتر است و خاک شور یک کاهش طول‌موج در ناحیه طیفی ۸۰۰-۱۳۰۰ نانومتر به علت وجود کانی‌های تبخیری از خود نشان

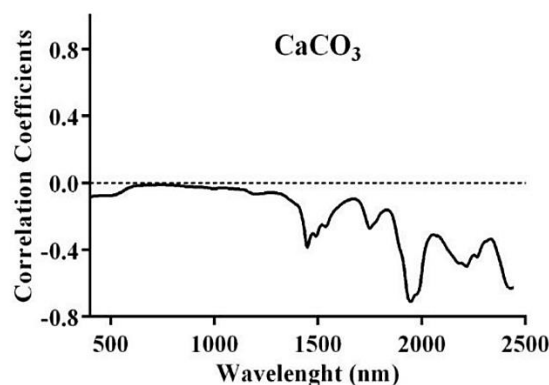


شکل ۲- ضرایب همبستگی بین میانگین طیف جذبی در هر طول موج با هدایت الکتریکی (طاقدیس و همکاران، ۱۴۰۰)

### آهک

کربنات کلسیم است. قاضی و همکاران (۱۳۹۶) نیز در مطالعه خود با بررسی ۲۹ نمونه خاک باندهای حساس تصویر ماهواره‌های لندست ۸<sup>۵</sup> به آهک را با استفاده از روش PLSR باند ۳ (۰,۶۰۰ - ۰,۵۲۵ میکرومتر، سبز) و باند ۴ (۰,۶۸۰ - ۰,۶۳۰ میکرومتر، قرمز) گزارش کردند. در مجموع محدوده طیفی Mid-IR در پیش‌بینی کربنات‌های خاک عملکرد بهتری نسبت به Vis-NIR نشان می‌دهد (عسگری و همکاران، ۱۳۹۸).

طاقدیس و همکاران (۱۴۰۰) به این نتیجه رسیدند که آهک بیشترین میزان همبستگی را در طول موج ۱۹۵۰ نانومتر نشان می‌دهد. آن‌ها همبستگی بین میانگین طیف جذبی در هر طول موج با آهک خاک را به صورت شماتیک (شکل ۳) نمایش دادند. پینه‌رو و همکاران (۲۰۱۷) به این نتیجه رسید که آهک در طول موج‌های ۸۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۶۰۰ نانومتر دارای بیشترین همبستگی با مقادیر



شکل ۳- ضرایب همبستگی بین میانگین طیف جذبی در هر طول موج با آهک خاک (طاقدیس و همکاران، ۱۴۰۰)

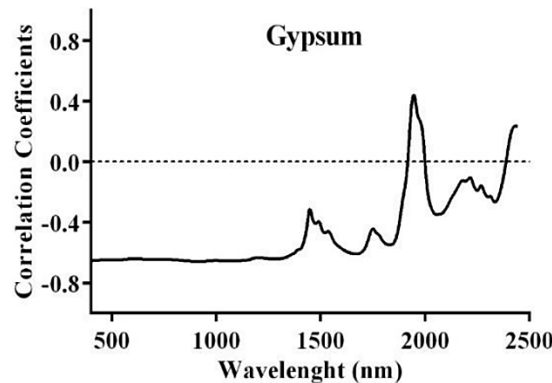
### گچ

به‌عنوان طول موج کلیدی برای گچ خاک معرفی کردند. به‌طور کلی ویژگی جذب در ناحیه فرورسرخ نزدیک مربوط به خاک‌هایی است که دارای کانی‌های تبخیری بوده و باعث شناخت این کانی‌ها از جمله گچ می‌شود (دهان و تیلر، ۲۰۰۳). میزان همبستگی گچ از ۰.۴۵ تا ۰.۶۵ در طول موج‌های مختلف متفاوت است و بیشترین میزان

چترنور و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهش خود باهدف تعیین طول موج کلیدی گچ خاک در منطقه خوزستان ۱۴۲ نمونه خاک جمع‌آوری کردند. آن‌ها محدوده طول موج‌های ۱۴۵۰، ۱۵۵۰، ۱۷۰۰، ۲۱۰۰، ۲۲۰۰ و ۲۴۰۰ نانومتر که دارای بیشترین همبستگی با گچ خاک بودند را

قابل توجهی با افزایش مقدار گچ، میزان جذب افزایش یافته است (طاق‌دیس و همکاران، ۱۴۰۰).

همبستگی مثبت گچ با طیف جذبی در محدوده ۱۹۰۰ نانومتر (شکل ۴) مشاهده شد. در این محدوده، به‌طور



شکل ۴- ضرایب همبستگی بین میانگین طیف جذبی در هر طول‌موج با گچ خاک (طاق‌دیس و همکاران، ۱۴۰۰)

محصول و مرتع و نظارت بر خشکسالی و ... استفاده شده است (ودور و همکاران، ۲۰۲۱).

خاک‌هایی با شوری‌های مختلف دارای ویژگی‌های طیفی متفاوتی هستند که اساس پایش سنجش‌ازدور شوری خاک است. بازتاب طیفی نمونه‌های خاک لزوماً با افزایش شوری خاک افزایش نمی‌یابد این امر استفاده مستقیم از باندهای چند طیفی و شاخص‌های طیفی مشتق شده از آن‌ها برای نظارت و نقشه‌برداری شوری سطح خاک را دشوار می‌کند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۱). محققین زیادی از شاخص‌های مختلف سنجش‌ازدور برای تهیه نقشه شوری خاک استفاده کرده‌اند. این شاخص‌ها علاوه بر افزایش وضوح و طبقه‌بندی بهتر پدیده‌ها، باعث کاهش آثار منفی عوامل نامناسب و اثرات دیگر پوشش‌های زمینی می‌شوند (سلیمی و همکاران، ۱۳۹۸). دقت نظارت بر محتوای نمک خاک با استفاده از شاخص شوری، شاخص پوشش گیاهی و سایر پارامترها بهبود می‌یابد (لیندر و همکاران، ۲۰۱۴).

پرکاربردترین شاخص‌های دورسنجی در مطالعات شوری خاک در جدول ۱ آورده شده‌اند که از جمله مهم‌ترین شاخص‌های استفاده شده برای شوری خاک

#### شاخص‌های مختلف دورسنجی در مطالعات شوری خاک

نتیجه تقسیم مقادیر درجه روشنایی یک باند طیفی به باند طیفی قابل انطباق دیگر را نسبت‌گیری طیفی می‌گویند که برای متمایز ساختن تغییراتی که به‌وسیله تغییر در روشنایی تک باندها ممکن نیست، به کار می‌رود (نوروزی و همکاران، ۲۰۱۱). شاخص‌های شوری در سنجش از راه دور هرکدام به‌عنوان یک تصویر استخراج شده ناشی از یک‌سری عملیات ریاضی بر روی باندهای اصلی سنجنده‌های ماهواره‌ها است که از این طریق تا حدود زیادی می‌توان تصاویر با ویژگی‌های طیفی مختلف را استخراج کرد (دهنی و لوئیس، ۲۰۱۲). نسبت‌گیری و تحلیل مؤلفه‌های اصلی جزو تبدیل‌های طیفی در سنجش‌ازدور هستند. این تبدیل‌ها از جمله روش‌های پردازش تصویر برای استخراج بهتر اطلاعات از تصاویر ماهواره‌ای هستند. پردازش در این نوع تبدیل‌ها بدون توجه به موقعیت مکانی پیکسل‌ها در تصویر صورت می‌گیرد. در روش نسبت‌گیری طیفی از عملیات جبری و ترکیب باندها جهت بهبود و بازسازی تصاویر استفاده می‌شود. باندهای حاصل از نسبت‌گیری، اصطلاحاً شاخص نامیده می‌شوند (مخدوم و همکاران، ۲۰۱۳). این شاخص‌ها به‌طور گسترده-ای در جهان برای طبقه‌بندی پوشش گیاهی، تغییرات محیطی، تجزیه و تحلیل بهره‌وری اولیه، برآورد عملکرد



بازتاب طیفی خاک تأثیر می‌گذارند؛ اما پوشش گیاهی یا هالوفیت‌های پراکنده موجود بر روی سطوح خاک می‌تواند به‌عنوان نشانه‌ای از مشکل شوری عمل کند و امکان شناسایی و نقشه‌برداری غیرمستقیم مناطق تحت تأثیر شوری خاک را با استفاده از بازتاب پوشش گیاهی فراهم می‌کند. به‌طورمعمول، پوشش گیاهی ناسالم فعالیت فتوسنتزی کمتری دارد که باعث افزایش بازتاب مرئی و کاهش بازتاب مادون‌قرمز نزدیک از پوشش گیاهی می‌شود (ویس و همکاران، ۲۰۰۱). این الگو در گیاهان مختلف تحت تنش شوری یافت شده است (تگی و همکاران، ۲۰۱۲). مترنیچ و زینک (۲۰۰۳) نشان دادند که به دلیل تأثیر گیاهان در بازتاب شوری، گیاهان می‌توانند به‌عنوان شاخص غیرمستقیم در سنجش‌ازدور خاک مورد استفاده قرار گیرند.

#### شاخص‌های شوری

علاوه بر شاخص‌های غیرمستقیم از شاخص‌های مستقیم شوری مثل پوسته نمک و شوره‌زارها نیز استفاده می‌شود (مترنیچ و زینک، ۲۰۰۳). اساس کاربرد این شاخص‌ها تغییرپذیری ویژگی‌های طیفی بر اساس تغییرپذیری ویژگی‌های خاک است (کرم و همکاران، ۱۳۹۷). خاک تحت تأثیر شدید نمک بازتاب بالاتری نسبت به خاک‌های متأثر از نمک متوسط دارد، به‌ویژه زمانی که خاک‌های لخت در مقایسه با خاک‌های دارای پوشش گیاهی باشند. این شاخص نشان‌دهنده درجات مختلف شوری و سدیمی قابل تشخیص و مشخصه خاک‌های شور و سدیمی شدید است (بیبیکر و همکاران، ۲۰۱۸).

می‌تواند شامل شاخص روشنایی (BI)<sup>۶</sup>، شاخص شوری خاک (SI)<sup>۷</sup>، شاخص پوشش گیاهی (NDVI)<sup>۸</sup> باشد (دهنی و لوئیس، ۲۰۱۲). شوری خاک را می‌توان مستقیماً از داده‌های سنجش‌ازدور از طریق ویژگی‌های نمکی که در سطح خاک قابل مشاهده است، مانند خاک لخت با پوسته‌های نمک سفید، روی سطح (متین فر و همکاران، ۲۰۱۳؛ تگی و همکاران، ۲۰۱۲) یا به‌طور غیرمستقیم از شاخص‌هایی مانند حضور گیاه هالوفیتی، تشخیص داد؛ بنابراین، چندین شاخص گیاهی مانند شاخص گیاهی متمایز نرمال شده (NDVI) و شاخص گیاهی تعدیل شده خاک (SAVI)<sup>۹</sup> به‌عنوان شاخص‌های غیرمستقیم ارزیابی و ترسیم شوری خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند (آلبد و کومار، ۲۰۱۳). این متغیرهای طیفی (شاخص شوری، شاخص پوشش گیاهی و غیره) تحت تأثیر عوامل محیطی زیادی مانند مواد آلی خاک، رطوبت خاک، زبری سطح خاک و محتوای معدنی فلزات خاک قرار دارند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۰؛ زنگ و همکاران، ۲۰۱۹).

#### شاخص‌های پوشش گیاهی

بازتاب طیفی ویژگی‌های نمک در سطح خاک به‌طور گسترده با استفاده از سنجش‌ازدور مورد مطالعه قرار گرفته و به‌عنوان یک شاخص مستقیم برای تشخیص شوری خاک و نقشه‌برداری استفاده می‌شود. باین‌حال، هنگامی که رطوبت خاک بالا باشد یا نمک پوسته روی سطح خاک نامرئی باشد یا با سایر اجزای خاک مخلوط شود، این رویکرد مستقیم پیچیده می‌شود و ممکن است نتایج غیرقابل اعتمادی به همراه داشته باشد؛ زیرا این عوامل بر

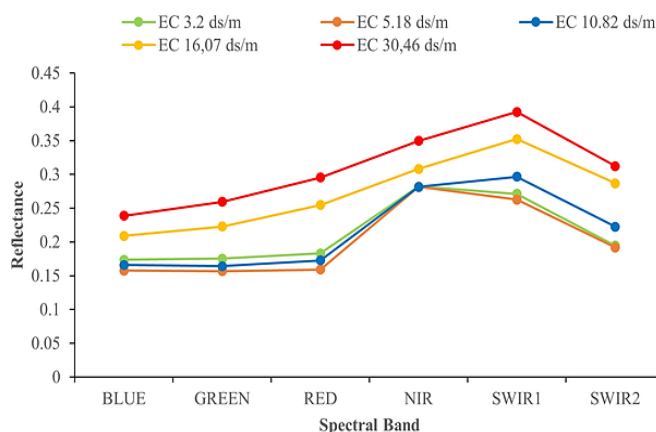
جدول ۱- پرکاربردترین شاخص‌های دورسنجی در مطالعات شوری خاک

شاخص	تعریف	فرمول	منبع
SI	Salinity Index	$\sqrt{BLUE + RED}$	Khan et al., 2005
SI <sub>1</sub>	Salinity Index1	$\sqrt{GREEN * RED}$	Ait Lamqadem et al., 2018
SI <sub>2</sub>	Salinity Index2	$\sqrt{GREEN^2 + NIR^2 + RED^2}$	Ait Lamqadem et al., 2018
SI <sub>3</sub>	Salinity Index3	$\sqrt{GREEN^2 + NIR^2}$	Ait Lamqadem et al., 2018
SI <sub>4</sub>	Salinity Index4	$\frac{BLUE}{RED}$	Khan and Abbas., 2007
SI <sub>5</sub>	Salinity Index5	$\frac{BLUE - RED}{RED + BLUE}$	Khan and Abbas., 2007
SI <sub>6</sub>	Salinity Index6	$\frac{RED * BLUE}{RED + BLUE}$	Khan and Abbas., 2007
SI <sub>7</sub>	Salinity Index7	$\frac{BLUE}{BLUE * RED}$	Khan and Abbas., 2007
SI <sub>8</sub>	Salinity Index8	$\frac{RED}{NIR * RED}$	Khan and Abbas., 2007
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	$\frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$	Bannari et al., 2008
NDSI	Normalized Difference Salinity Index	$\frac{R - NIR}{R + NIR}$	Singh., 2022
VSSI	Vegetation Soil Salinity Index	Green - 5 * (Red + NIR) * 2	Dehni and Lounis., 2012
BI	Brightness Index	$\sqrt{R^2 + NIR^2}$	Singh., 2022
RVI	Ratio vegetation index	$\frac{NIR}{R}$	Wang et al., 2021

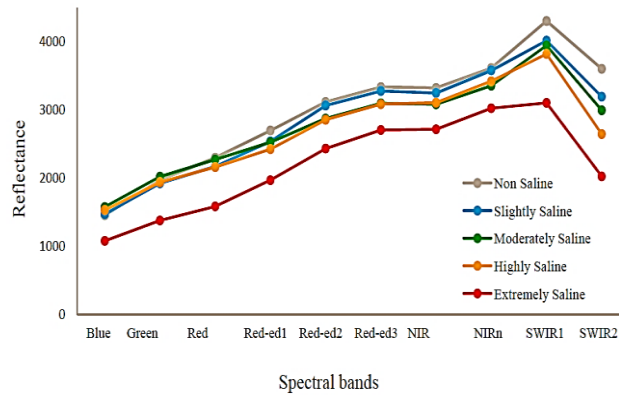
### باند‌های طیفی و ارتباط آن‌ها با شوری

علاوه بر نسبت باندها، استفاده از باندهای طیفی منفرد نیز می‌تواند برای تعیین کمیت خواص خاک مفید باشند (بوتینجر، ۲۰۱۰). (شکل ۵) منحنی طیفی بازتاب مقادیر مختلف هدایت الکتریکی خاک به کمک تصاویر Landsat 8 OLI (گونال و همکاران، ۲۰۲۱) و (شکل ۶) بازتاب طیفی باندهای مختلف ماهواره Sentinel 2A

رابطه با نمونه‌های خاک دارای سطوح مختلف شوری در مطالعه انجام شده توسط گوپالاکریشنان و کومار (۲۰۲۰) را نشان می‌دهد. نتایج مطالعه‌ای در جنوب استان ایلام با به‌کارگیری باندهای طیفی، شاخص‌های پوشش گیاهی و شوری مشتق شده از ماهواره Landsat 8 OLI نیز نشان داد که باندهای Band 10 و Band 11 قوی‌ترین تأثیر بر پیش‌بینی شوری خاک را داشتند (شهرآیینی و نوروزی، ۲۰۲۲).



شکل ۵- منحنی‌های طیف بازتابی ماهواره Landsat\_8 با مقادیر مختلف هدایت الکتریکی خاک



شکل ۶- منحنی‌های طیف بازتابی ماهواره Sentinel\_2 با مقادیر مختلف هدایت الکتریکی خاک

مکانی و زمانی مقدار شوری خاک در لایه بالایی خاک نشان می‌دهد.

در منطقه جنوب غربی استان خوزستان مقادیر شاخص‌های شوری خاک شامل: BI, NDSI, SI, VSSI با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای توسط ظهیرنیا و متین‌فر (۱۳۹۷) محاسبه شد. همبستگی شاخص‌ها با هدایت الکتریکی عصاره اشباع<sup>۱۱</sup> خاک ( $EC_e$ ) نشان داد که شاخص BI بیشترین همبستگی را با هدایت الکتریکی خاک داشته و VSSI, NDSI, SI و پس از آن شاخص‌های BI, NDSI, SI و VSSI به ترتیب ۶۹/۸۰٪، ۵۳/۴۰٪، ۱۹/۵۰٪، ۱۶/۰۰٪، ۱۴/۲۰٪ همبستگی نشان دادند. نتایج نشان داد شاخص‌های شوری خاک به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره لندست ۸ (به‌خصوص BI) قادر به برآورد مناسب مقدار هدایت الکتریکی خاک سطحی بوده و از این لحاظ دارای کارایی بالایی نسبت به سایر شاخص‌های معرفی شده است. آن‌ها به نتایجی مشابه نتایج اژیرایی و عبدی (۲۰۱۵) دست یافتند که نشان داد بالاترین همبستگی بین شوری خاک و شاخص‌های طیفی محاسبه شده در فصول گرم و خشک (وجود حداقل رطوبت در سطح خاک) به‌دست‌آمده و این همبستگی به‌شدت تحت تأثیر پارامترهای محیطی مانند مقدار شوری خاک سطحی، رنگ خاک، درصد رطوبت خاک و همچنین بافت خاک سطحی است. نتایج مطالعه آسفا و همکاران (۲۰۱۸) که به مدل‌سازی و نقشه‌برداری از

مناسب‌ترین شاخص‌ها و باندهای معرفی شده در مطالعات شوری خاک

بررسی تطبیقی شاخص‌های SI1, SI2, SI3, SI4, SI5, SI6, SI7, SAVI, NDVI, NDSI مستخرج از دو تصویر سنتینل ۲ و لندست ۸ توسط تقدسی و حسنلو در سال (۱۳۹۵) برای منطقه حوض سلطان قم نشان داد که شاخص‌های شوری با دقت بالایی در دو تصویر با یکدیگر مطابقت دارند و می‌توانند معیار قابل‌قبولی برای سنجش شدت شوری بر اساس بازتاب طیفی در تصاویر ماهواره‌ای باشند. نتیجه مطالعه‌ای در رامپال بنگلادش با به‌کارگیری تصاویر ماهواره Landsat 8 سنجنده OLI<sup>۱۰</sup>، شاخص‌های شوری، ترکیب باندهای مشتق شده و محاسبات باندهای نشان داد رابطه معنی‌داری بین بازتاب طیفی و EC خاک وجود دارد. شوری خاک با شاخص‌های VSSI, SI3 و باند NIR ضریب همبستگی بالایی نشان داد که شاخص VSSI دارای بالاترین مقدار  $R^2$  (۰/۸۶۵) بود (حسن و همکاران، ۲۰۲۱). در پژوهشی که توسط نگنن و همکاران (۲۰۲۰) در ویتنام با بهره‌گیری از تصاویر Landsat 8 انجام گرفت گزارش‌ها نشان داد مقادیر طیفی باند مادون‌قرمز نزدیک (NIR) و VSSI با EC: ۱: ۵ (به ترتیب با  $R^2$  ۰/۸ و ۰/۷) نسبت به سایر شاخص‌ها ارتباط بهتری داشتند و تصاویر Landsat 8 OLI پتانسیل بالایی را برای نظارت

10 -Operational Land Imager

11 -Electrical conductivity of the saturation extract

گزارش شده توسط دهنی و لوئیس (۲۰۱۲) در مورد استفاده از شاخص‌های شوری در نقشه‌برداری از منطقه الجزایر مطابقت داشت. موفقیت شاخص‌ها را می‌توان به مقدار بازتاب طیفی بالا در باند Red و NIR، میزان انعکاس طیفی زیاد پوسته نمک تشکیل شده در سطح دریاچه نسبت داد (متین فر و زندی، ۲۰۱۶).

نقشه‌برداری شوری خاک با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین با Sentinel-2 MSI در مناطق خشک، چین نشان داد یک همبستگی آماری قابل توجهی بین ۳۵ متغیر کمکی تولیدشده از داده‌های Sentinel-2 MSI و EC خاک وجود دارد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۱). بررسی تغییرات شوری خاک به کمک پردازش رقومی اطلاعات ماهواره لندست در دشت نهاوند (استان همدان) نشان داد شاخص پوشش گیاهی NDVI بیشترین همبستگی منفی با EC خاک در سطح اعتماد ۹۵ درصد نشان می‌دهد و توجیه این پدیده محدود شدن رویش گیاهان در اثر افزایش غلظت املاح و اثرات نامطلوب نمک بر فیزیولوژی گیاهی است که پیامد آن کاهش درصد پوشش گیاهی در سطح خاک است (احمدیان و همکاران، ۱۳۸۹). مترنیچ و زینک (۲۰۰۳) نیز در نتایج مطالعه خود به منظور بررسی پتانسیل‌ها و محدودیت‌های سنجش‌ازدور شوری خاک بیان کردند بیش‌ترین همبستگی بین هدایت الکتریکی و شاخص NDVI وجود دارد که تفکیک خاک‌های شور و قلیا را از مناطق غیر شور ممکن می‌سازد. در دریاچه ارومیه مطالعه‌ای به منظور پیش‌بینی شوری خاک با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ توسط احمدی و همکاران (۱۳۹۹) انجام گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که شاخص‌های SAVI و NDVI در مناطقی که پوشش گیاهی کمی دارند کارایی کمی داشته درحالی‌که شاخص‌های شوری در این مناطق کارایی بالاتری در تخمین شوری دارند. آن‌ها بیان کردند که شاخص SAVI زمانی برای ارزیابی شوری خاک مناسب است که مناطق تحت شوری کم بوده و توسط گیاهان حساس به شوری احاطه

شوری خاک با استفاده سنجش‌ازدور و GIS<sup>۱۲</sup> در اتیوپی پرداختند نشان داد سه شاخص شوری خاک (SI)، شاخص روشنایی (BI) و شاخص شوری اختلاف نرمال (NDSI) مناسب‌ترین شاخص برای پیش‌بینی شوری خاک هستند. آن‌ها بیان کردند که داده‌های سنجش‌ازدور در تهیه مدل‌ها و نقشه‌های شوری خاک بسیار مناسب می‌باشند.

نتایج تجزیه و تحلیل شوری خاک حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از ۷۰ نمونه خاک، شاخص‌های طیفی و اندازه‌گیری‌های هدایت الکتریکی نشان داد که شاخص‌های شوری خاک استخراج‌شده از دو نوار مرئی Landsat-8 OLI و Sentinel-2A برای نقشه‌برداری شوری خاک در مقیاس بزرگ مؤثر بوده و استفاده از سنسورهای دیگری که دارای این باندهای طیفی هستند می‌توانند به منظور تهیه نقشه‌های شوری مورد استفاده قرار گیرند (گرچی و همکاران، ۲۰۲۰).

مطالعه‌ای به منظور افزایش تنوع مکانی شاخص‌های شوری خاک توسط شاخص‌های سنجش‌ازدور و رویکرد زمین‌آماری توسط بیبیکر و همکاران (۲۰۱۸) انجام گرفت. در این مطالعه از دو شاخص شوری (SI) و شاخص روشنایی (BI) استفاده کردند. نتایج نشان داد به‌طور گسترده‌ای شاخص‌های شوری خاک قدرتمند عمل کردند. مطالعه‌ای که به منظور مقایسه شاخص‌های مختلف استخراج شده از تصاویر ماهواره لندست برای پهنه‌بندی شوری خاک در مزرعه نمونه ارتش گرگان شهرستان آق‌قلا انجام شد نشان داد در میان شاخص‌های مورد مطالعه شاخص‌های SII و SI2 به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۵۷ و ۰/۶۴ بیشترین قابلیت را در بازسازی و تهیه نقشه‌های مقدار شوری خاک دارند (اژیرابی و عبدی، ۲۰۱۵). در دریاچه مهارلو و مراتع اطراف آن مطالعه‌ای با تعداد ۵۰ نمونه سطحی به منظور بررسی کارایی شاخص‌های طیفی مشتق شده از تصاویر لندست ۸ انجام شد. آن‌ها گزارش کردند شاخص‌های SI، BI، SI1، SI2، SI3 و VSSI منطقی و موفقیت‌آمیز عمل کرده‌اند همچنین که این نتیجه با نتایج

و سنجش‌ازدور توسط نبی‌الهی و همکاران (۱۳۹۸) نشان داد شاخص  $SI$ ،  $BI$ ، شاخص  $NDVI$  و باند ۳ و ۷ ماهواره لندست ۸ مهم‌ترین متغیرها برای پیش‌بینی شوری خاک هستند و مهم‌ترین متغیر کمکی برای پیش‌بینی شوری خاک داده‌های طیفی در محدوده طول‌موج مرئی و مادون‌قرمز نزدیک هستند. بررسی شاخص‌های طیفی شامل شاخص روشنایی ( $BI$ )، شاخص پوشش گیاهی ( $NDVI$ ) و شاخص ( $SI$ ) مستخرج از ماهواره لندست ۸، سنجنده  $ETM+$  برای شهرستان اهواز نشان داد شاخص روشنایی و شاخص شوری به‌عنوان مناسب‌ترین شاخص تخمین شوری است و استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور برای تهیه نقشه شوری خاک به‌عنوان یک ابزار قوی، به دلیل صرف زمان و هزینه کمتر و همچنین استفاده از تعداد نقاط نمونه‌برداری در مطالعات خاک‌شناسی بسیار مفید است (سواری و همکاران، ۱۳۹۴).

ارزیابی و نقشه‌برداری مختلف شوری خاک با استفاده از ۱۵۰ نمونه خاک و به‌کارگیری تکنیک‌های سنجش‌ازدور در اکوسیستم‌های خشک، عربستان سعودی نیز نشان داد شاخص‌های شوری ( $SI$ ) مناسب‌ترین شاخص برای نشان دادن مقادیر شوری خاک در منطقه مورد مطالعه بوده است (الهاگ، ۲۰۱۶). برآورد شوری خاک بستر دریاچه خشک شده ارومیه با تعداد ۳۸ نمونه خاک، استفاده از تصاویر Sentinel-2 و مدل‌های رگرسیون غیرخطی نتایج نشان داد که دقت نقشه‌برداری شوری خاک در بین روش‌های مختلف متفاوت است که می‌توان نه تنها به نظریه‌های هر مدل، بلکه به ویژگی‌های شوری (باندهای طیفی و شاخص‌های شوری) نسبت داد. در این مطالعه شاخص‌های  $BI$ ،  $SI2$  و باندهای ۶، ۷، ۸ و  $8a$  به‌عنوان مناسب‌ترین شاخص شوری برای نقشه‌برداری شوری خاک معرفی شدند (فرهمند و صادقی، ۲۰۲۰).

شده باشند. بررسی تغییرات روند شوری با استفاده از سنجش‌ازدور و  $GIS$  برای جنوب خوزستان نشان داد شاخص  $NDVI$  در تفکیک مناطق دارای پوشش گیاهی ضعیف از خاک لخت و همچنین تعیین مقدار نسبی پوشش گیاهی کاربرد دارد. به‌وسیله این شاخص می‌توان به‌صورت غیرمستقیم مناطق شور را تا حدودی مشخص کرد (ممنی و همکاران، ۱۳۹۴). خدادادی و همکاران (۱۳۸۷) به‌منظور بررسی قابلیت داده‌های سنجنده  $ETM+$  جهت تهیه نقشه شوری در بخشی از دشت قزوین از شاخص‌های مختلفی نظیر  $NDVI$ ،  $SAVI$ ،  $SI$ ،  $BI$  استفاده کردند. آن‌ها بیان کردند که در بین شاخص‌های به کار گرفته شده شاخص‌های  $SI$  و  $BI$  نسبت به سایر شاخص‌ها کارایی بیشتری در تفکیک اراضی شور دارا هستند.

نتایج مطالعه‌ای با تعداد ۱۸ نمونه در ایلام به‌منظور پایش شوری خاک در راستای تخریب سرزمین با کمک تکنیک‌های سنجش‌ازدور که برای سال‌های ۲۰۰۵، ۲۰۱۰، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۷ انجام گرفت نشان داد برای شاخص‌های  $SI$  و  $BI$  سطح اطمینان به‌دست آمده در همه سال‌ها ۹۵٪ به دست آمد، به جز سال ۲۰۱۷ که شاخص  $BI$  در این سال در سطح اطمینان ۹۸٪ قابل قبول گزارش شد. در این مطالعه بیان شد که نتایج آزمایش نمونه‌های خاک تقریباً با نتایج سنجش از دوری یکسان است و مناطقی که توسط شاخص‌های شوری به‌عنوان زمین‌های شور معرفی شدند در نتایج آزمایشگاهی نیز به همان نتیجه رسیدند (نیک‌پور و همکاران، ۱۴۰۰).

گزارش‌های مورگان و همکاران (۲۰۱۸) با تعداد ۱۹ نمونه خاک به نقشه‌برداری شوری خاک با استفاده از ماهواره سنتینل ۲ و شبکه عصبی پردازنده بودند نشان داد داده‌های بازتابی باند مادون‌قرمز موج کوتاه،  $SI2$  و شاخص گیاهی ( $NDVI$ ) بهترین عملکرد را ارائه می‌دهند. آن‌ها بیان کردند داده‌های مادون‌قرمز موج کوتاه نقش مهمی در پیش‌بینی شوری خاک داشتند. مقایسه تخمین شوری خاک با استفاده از روش‌های طیف‌سنجی، القاگر الکترومغناطیس

نمک خاک را نشان می‌دهد و  $n$  نشان دهنده تعداد نمونه‌ها است.

نتایج گرجی و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که شاخص‌های شوری خاک استخراج شده از هر دو ماهواره Landsat-8 OLI و Sentinel-2A شوری خاک را به ترتیب با دقت قابل قبول  $R^2$  ۰/۷۳ و ۰/۷۴ برآورد کردند. در این مطالعات اغلب داده‌ها به‌طور تصادفی به دو گروه ۷۰ و ۳۰ درصدی تقسیم و سپس از هر دو گروه یک بار به‌عنوان سری واسنجی و بار دیگر به‌عنوان سری اعتبارسنجی استفاده می‌شود (عسگری و همکاران، ۱۳۹۸؛ حسنی و همکاران، ۱۳۹۳). از این رو در (جدول ۲) صحت سنجی (تعیین دقت نتایج) برخی شاخص‌های استفاده شده در مطالعات مختلف ذکر شده است.

### صحت سنجی و ارزیابی دقت نقشه‌های شوری خاک

در بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده پیرامون شوری خاک، دقت نقشه‌ها و اطلاعات به‌دست‌آمده با استفاده از پارامترهایی مانند ضریب تعیین ( $R^2$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) محاسبه و ارزیابی می‌شوند؛ که هر چه مقدار  $R^2$  بیشتر و مقدار RMSE کمتر باشد دقت کار بالاتر می‌رود (ژائو و همکاران، ۲۰۲۲).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (2)$$

که در این معادلات به ترتیب  $\hat{y}_i$ ،  $y_i$  و  $\bar{y}$  مقادیر پیش‌بینی شده، اندازه‌گیری شده و میانگین اندازه‌گیری شده محتوای

جدول ۲- تعیین دقت نتایج برخی از شاخص‌ها در مطالعات شوری خاک

شاخص/باند	$R^2$	RMSE	محققین/ ماهواره
B6	0.88	21.85	Farahmand & Sadeghi, 2020 Sentinel_2
B7	0.88	21.33	
B8a	0.89	20.85	
B8	0.85	24.23	
BI	0.83	25.86	
SI3	0.83	25.89	
NIR	0.80	1.194	Hassan et al., 2021 Landsat_8
SI2	0.79	1.153	
SI3	0.84	1.047	
SI4	0.83	1.090	
VSSI	0.86	0.988	Asfaw et al., 2018 Landsat_8
SAVI	0.79	1.224	
SI	0.78	0.54	Gunal et al., 2021 Landsat_8
BI	0.79	0.61	
SAVI	0.54	0.29	

شاخص‌های طیفی مختلفی را برای ارزیابی شوری خاک مناسب معرفی کرده‌اند. باین وجود که ممکن است یک باند یا یک شاخص طیفی در منطقه‌ای مناسب‌تر گزارش شود. در اکثر مواقع بهترین و بالاترین همبستگی بین شوری خاک و شاخص‌های محاسبه‌شده در فصول گرم و خشک (وجود

### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با بررسی پژوهش‌های انجام‌شده در ارتباط با پایش شوری خاک، می‌توان بیان کرد استفاده از سنجش‌زدور، منطقه‌ای بوده و وابسته به زمان و مکان مورد مطالعه است. به همین دلیل محققان باندها و

است. با بررسی شاخص‌های مختلف برای تعیین مناسب-ترین شاخص جهت استخراج اطلاعات از داده‌های ماهواره‌ای در راستای بهبود مطالعات شوری خاک به‌طورکلی می‌توان به این نتیجه رسید که انتخاب مناسب-ترین شاخص‌ها بستگی به شرایط خاک، منطقه جغرافیایی، شرایط اقلیمی، داده‌های ماهواره‌ای و نوع استفاده از اراضی دارد؛ بنابراین اگرچه تصاویر ماهواره‌ای و استفاده از شاخص‌ها قابلیت زیادی برای مشخص کردن شوری اراضی دارد؛ اما به‌طورکلی نمی‌توان استفاده از شاخص‌های یکسانی را در کلیه مناطق، برای تهیه نقشه شوری تعریف کرد. حضور گچ و آهک نیز در سطح اراضی خاک‌های شور ممکن است بازتاب مشابهی بانمک داشته و در بررسی و تفکیک این اراضی مزاحمت و یا تداخل انعکاسی ایجاد می‌کنند؛ از این‌رو برای جلوگیری در به وجود آمدن خطا و افزایش دقت با توجه به مشابه نبودن بازتاب‌های مختلف، طول‌موج و پیک‌های خاک‌های مختلف محدوده طیف مرئی برای برآورد و تشخیص هدایت‌الکتریکی خاک و محدوده مادون‌قرمز نزدیک برای آهک و گچ اطلاعات مفیدی ارائه می‌دهند. اکثر مطالعات با ترکیب تصاویر چند زمانه با اطلاعات کمکی مانند داده‌های خاک و ویژگی‌های سرزمین، بر محدودیت‌های طیفی - مکانی تصاویر ماهواره-ای فائق آمدند و نتایج رضایت‌بخشی را به دست آوردند. در تهیه نقشه‌های شوری خاک نه تنها باید مقدار  $R^2$  و  $RMSE$  مورد محاسبه قرار گیرند؛ بلکه باید تجزیه و تحلیل بیشتری انجام پذیرد تا بتوان مطمئن‌ترین و کارآمدترین شاخص‌ها را انتخاب و به کاربرد؛ زیرا عواملی مانند موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه، شرایط آب‌وهوایی، نوع خاک، کاربری اراضی و یا سایر عوامل محیطی بر سطح شوری خاک تأثیر به‌سزایی دارند بنابراین، در نظر گرفتن این پارامترها برای طراحی نمونه‌برداری خاک و جمع‌آوری تصاویر ماهواره‌ای امری ضروری است. به‌طورکلی می‌توان برداشت نمود که داده‌های ماهواره‌ای دارای قابلیت بالا استفاده در تهیه نقشه‌های مختلف خاک در مدت‌زمان کوتاه‌تر و با هزینه پایین‌تر است. با استفاده از

حداقل رطوبت در سطح خاک) گزارش شده است، این همبستگی بالا به‌شدت تحت تأثیر پارامترهای محیطی مانند درصد رطوبت خاک، رنگ خاک، مقدار شوری خاک سطحی و بافت خاک سطحی است. به‌طورکلی، خاک‌های شور خشک دارای بازتاب طیفی بیشتری نسبت به خاک‌های شور مرطوب دارند. طی مطالعات انجام‌شده در این زمینه نشان داده شد که خاک‌های تحت تأثیر شوری پاسخ طیفی بالایی را در محدوده طول‌موج مرئی نسبت به خاک‌های غیر شور نشان می‌دهند. انتخاب مناسب‌ترین باندها بستگی به شرایط اقلیمی، منطقه جغرافیایی مورد مطالعه، شرایط خاک، داده‌های ماهواره‌ای و همچنین نوع استفاده اراضی دارد. در تحقیقات مختلف انجام‌شده در این مورد از شاخص‌های مختلف سنجش‌ازدور برای طبقه‌بندی خاک-های شور استفاده نمودند. این تحقیقات نشان دادند اساس کاربرد این شاخص‌ها تغییرپذیری خصوصیات طیفی بر اساس خصوصیات خاک است. اساس کاربرد شاخص‌ها، تغییرپذیری خصوصیات طیفی بر اساس خصوصیات خاک است به همین دلیل محققان شاخص‌های مختلفی را برای ارزیابی شوری خاک مناسب دانسته‌اند. بررسی دقیق شوری خاک مستلزم استفاده توأم از داده‌های واقعی زمینی و داده-های سنجش‌ازدور است. در این میان شاخص‌های طیفی درخشندگی  $BI$  و شاخص شوری  $SI$ ، شاخص تفاضلی پوشش گیاهی نرمال شده  $NDVI$  و شاخص شوری نرمال شده  $NDSI$  بیش‌ترین همبستگی را با داده‌های زمینی در خاک‌های تحت تأثیر شوری نشان دادند. به‌وسیله شاخص گیاهی  $NDVI$  می‌توان به‌صورت غیرمستقیم مناطق شور را تا حدودی مشخص کرد. این شاخص می‌تواند بسیار کمک‌کننده در تفکیک مناطق دارای پوشش گیاهی ضعیف از خاک لخت و همچنین تعیین مقدار نسبی پوشش گیاهی باشد. شاخص  $BI$  توانایی جداسازی نواحی با شوری شدید و شوری خیلی زیاد را با بالاترین ارزش رقومی و پوشش گیاهی شاداب و حساس به شوری را با کمترین ارزش رقومی را دارد. شاخص  $SI$  نیز با دقت بالایی در اکثر مطالعات نواحی غیر شور را از اراضی شور تفکیک نموده

از شاخص‌ها و محدوده‌های طیفی که می‌توانند باعث تمایز بین ویژگی‌های طیفی گچ و کربنات با هدایت الکتریکی می‌شود استفاده شود. البته نباید فراموش کرد که استفاده از داده‌های به‌روز در مطالعات سنجش‌ازدور و سعی بر تهیه تصاویر ماه‌های گرم و خشک سال به دلیل کمتر بودن رطوبت نسبت به سایر ماه‌های سال استفاده شود.

الگوریتم‌های سنجش از دوری مناسب و با داشتن داده‌های زمینی که به‌صورت صحیح و مناسب برداشت شده‌اند می‌توان اقدام به تهیه نقشه‌های خاک با دقت قابل قبول و توجیه‌پذیر نمود. در این مطالعات پیشنهاد می‌شود که از تصاویر ابر طیفی که دارای محدوده طیفی وسیع‌تری نسبت به تصاویر لندست و سنتینل هستند استفاده شود. همچنین

### فهرست منابع

۱. احمدی، ز. عباسی، آ. شهابی، م و بوعلی، ع. ۱۳۹۹. مقایسه روش‌های درخت تصمیم و شبکه‌عصبی در پیش‌بینی شوری خاک در غرب دریاچه ارومیه. تخریب و احیاء اراضی طبیعی، ۱(۱): ۸۲-۹۱.
۲. احمدیان، م. پاک‌پور، م و عاشورلو، د. ۱۳۸۹. بررسی تغییرات شوری خاک به کمک پردازش رقومی اطلاعات ماهواره لندست در دشت نهاوند (استان همدان). پژوهش‌های خاک، ۲۴(۲): ۱۷۹-۱۹۱.
۳. اخضری، د و اسدی می‌آبادی، ا. ۱۳۹۵. تهیه نقشه شوری خاک با استفاده از تحلیل طیفی داده‌های سنجنده OLI و داده‌های میدانی (مطالعه موردی: جنوب دشت ملایر) سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۷(۲): ۸۷-۱۰۰.
۴. پیش‌نماز احمدی، م. رضائی مقدم، م، ح و فیضی زاده، ب. ۱۳۹۶. بررسی شاخص‌ها و تهیه نقشه شوری خاک با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور (مطالعه موردی: دلتای آجی‌چای). سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۲۶(۸): ۸۵-۹۶.
۵. تقدسی، م و حسنلو، م. ۱۳۹۵. پایش شوری خاک با بررسی تطبیقی شاخص‌های شوری در تصاویر سنتینل ۲- و لندست ۸- اولین همایش ملی سنجش‌ازدور و GIS محیطی، مؤسسه آموزش عالی آبان هراز آمل - انجمن سنجش‌ازدور و GIS ایران.
۶. جمشیدی، م. افتخاری، ک. نویدی، م و مؤمنی، ع. ۱۳۹۴. چهل سال مطالعات خاکشناسی در مؤسسه تحقیقات خاک و آب. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ۶۲ صفحه.
۷. چترنور، م. لندی، ا. فرخیان فیروزی، ا و بهرامی، ح. ۱۳۹۹. کاربرد طیف‌سنجی مرئی - مادون قرمز در کمی‌سازی میزان گچ‌خاک در کانون‌های مستعد تولید ریزگرد استان خوزستان. تحقیقات کاربردی خاک، ۸(۳): ۱-۱۳.
۸. حسنی، ا. بهرامی، ح. نوروزی، ع و اوستان، ش. ۱۳۹۳. استفاده از روش طیف‌سنجی بازتابی مرئی-فروسرخ در برآورد برخی ویژگی‌های خاک در خاک‌های گچی-آهکی. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۶(۲): ۱۲۵-۱۳۸.
۹. حسینی، ز. ۱۳۸۲. بررسی قابلیت داده‌های ماهواره لندست ETM+ جهت تهیه نقشه کاربری اراضی (مطالعه موردی: منطقه چمستان استان مازندران). پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
۱۰. خدادادی، م. سرمیدیان، ف. عسکری، م. رفاهی، ح. نوروزی، ا و حیدری، ا. ۱۳۸۷. تهیه نقشه خاک‌های تحت تأثیر شوری و قلیایی با استفاده از داده‌های سنجنده ETM+ در بخشی از دشت قزوین. مجله منابع طبیعی ایران، ۶۱(۱): ۱۱۴۳-۱۱۵۶.
۱۱. زبیری، م و مجلد، ع. ۱۳۸۳. آشنایی با فن سنجش‌ازدور و کاربرد در منابع طبیعی. مؤسسه چاپ و انتشار دانشگاه تهران. چاپ پنجم، ۳۲۲ صفحه.



۱۲. سلیمی، خ. احمدی ثانی، ن و جلیل نژاد، ن. ۱۳۹۸. تهیه نقشه شوری خاک سطحی با استفاده از فناوری سنجنش ازدور (مطالعه موردی: اراضی جنوب استان آذربایجان غربی). دانش آب و خاک، ۲۹(۲): ۱۱۵-۱۲۸.
۱۳. سواری، ز. حاجتی، س و تقی زاده مهرجردی، ر. ۱۳۹۴. ارزیابی شاخص های شوری مختلف در تهیه نقشه شوری خاک سطحی با استفاده از داده های سنجنش ازدور. سومین همایش ملی پژوهش های محیط زیست و کشاورزی ایران.
۱۴. صادقیان، س و آخوندزاده، م. ۱۳۸۳. ماهنامه نقشه برداری. سال پانزدهم شماره ۵ (مهر ۱۳۸۳). ۴۲ صفحه.
۱۵. طاقدیس، س. فرپور، م، ه. فکری، م و محمودآبادی، م. ۱۴۰۰. برآورد برخی خصوصیات خاک با استفاده از تحلیل داده های طیفی (Vis-NIR) و انواع روش های پیش پردازش. تحقیقات آب و خاک ایران، ۶(۵۲): ۱۵۵۷-۱۵۶۹.
۱۶. ظهیرنیا، ع و متین فر، ح، ر. ۱۳۹۷. مقایسه شاخص های مختلف استخراج شده از تصاویر ماهواره لندست به منظور بررسی تغییرات شوری خاک در منطقه جنوب غربی استان خوزستان. اولین همایش بین المللی و سومین همایش ملی مدیریت پایدار منابع خاک و محیط زیست، کرمان.
۱۷. عزیزی، ک. نبی الهی، ک و داوری، م. ۱۳۹۷. ارزیابی قابلیت روش طیف سنجنی در تخمین برخی ویژگی های خاک های مبتلا به نمک. مهندسی زراعی، ۴۱(۳): ۱-۱۶.
۱۸. عسگری هفشجانی، ن. ایوبی، ش. دمته، ا و خادمی، ح. ۱۳۹۸. ارزیابی قابلیت طیف سنجنی بازتابی در پیش بینی کربنات های خاک (مطالعه موردی: منطقه جونقان در استان چهارمحال و بختیاری). مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی)، ۴۲(۳): ۱۱۳-۱۲۸.
۱۹. علوی پناه، س، ک. ۱۳۸۲. کاربرد سنجنش ازدور در علوم زمین (علوم خاک). انتشارات دانشگاه تهران، ۴۷۸ صفحه.
۲۰. علوی پناه، س، ک. ۱۳۹۲. کاربرد سنجنش ازدور در علوم زمین. چاپ چهارم. تهران، دانشگاه تهران، ۴۳۸ صفحه.
۲۱. قاضی، م. بهرامی، ح، ع. درویشی بلورانی، ع و میرزایی، س. ۱۳۹۶. تخمین میزان آهک خاک در کانون های گردوغبار با استفاده از طیف سنجنی VNIR و تصاویر ماهواره ای سنجنده OLI. سنجنش ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۸(۴): ۱-۱۶.
۲۲. کرم، ا. کیانی، ط. دادرسی سبزواری، ا و داورزنی، ز. ۱۳۹۷. برآورد شوری خاک با استفاده از داده های دورسنجنی و آمار مکانی در منطقه سبزواری. پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، ۷(۴): ۳۱-۵۳.
۲۳. ممبنی، م. آرخی، ص و آرامی، س، ع. ۱۳۹۴. تغییرات روند شوری با استفاده از سنجنش ازدور و GIS (مطالعه موردی: جنوب خوزستان). مجله علمی پژوهشی اکوسیستم بیابان، ۴(۶): ۳۷-۲۷.
۲۴. موسوی، ف. عبدی، ا. قلندرزاده، ع. بهرامی، ح، ع و مجنونیان، ب. ۱۳۹۸. بررسی قابلیت طیف سنجنی بازتابی در برآورد برخی ویژگی های شیمیایی خاک جنگل خیرود. مجله جنگل ایران، ۱۱(۴): ۴۴۳-۴۵۸.
۲۵. نبی الهی، ک. عزیزی، ک و داوری، م. ۱۳۹۸. مقایسه تخمین شوری خاک با استفاده از روش های طیف سنجنی، الفاکر الکترومغناطیس و سنجنش ازدور. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱(۹): ۱۰۱-۱۱۷.
۲۶. نظم فر، ح. سرمستی، ن و علوی پناه، س، ک. ۱۳۹۳. پایش دریاچه نمکی مهارلو با تکنیک های پردازش تصاویر ماهواره ای چند طیفی. محیط شناسی، ۴۰(۳): ۶۶۹-۶۷۷.

۲۷. نیک‌پور، ن. فتوحی، ص. نگارش، ح. بهرامی، ش و حسینی، س، ز. ۱۴۰۰. پایش شوری خاک در راستای تخریب سرزمین با کمک تکنیک‌های سنجش از راه دور (مطالعه موردی استان ایلام). مخاطرات محیط طبیعی، ۱۰(۲۷): ۱-۲۰.
28. Ait Lamqadem, A., Pradhan, B., Saber, H. and Rahimi, A., 2018. Desertification sensitivity analysis using MEDALUS model and GIS: a case study of the Oases of Middle Draa Valley, Morocco. *Sensors*, 18(7), 2230.
29. Alexakis, D.D., Daliakopoulos, I.N., Panagea, I.S. and Tsanis, I.K., 2018. Assessing soil salinity using WorldView-2 multispectral images in Timpaki, Crete, Greece. *Geocarto International*, 33(4), 321-338.
30. Allbed, A. and Kumar, L., 2013. Soil salinity mapping and monitoring in arid and semi-arid regions using remote sensing technology: a review. *Advances in remote sensing*.
31. Allbed, A., Kumar, L. and Aldakheel, Y.Y., 2014. Assessing soil salinity using soil salinity and vegetation indices derived from IKONOS high-spatial resolution imageries: Applications in a date palm dominated region. *Geoderma*, 230, 1-8.
32. Asfaw, E., Suryabhagavan, K.V. and Argaw, M., 2018. Soil salinity modeling and mapping using remote sensing and GIS: The case of Wonji sugar cane irrigation farm, Ethiopia. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17(3), 250-258.
33. Azhirabi, R. and Abdi, O., 2015. Comparison of different indices adopted from Landsat images to map soil salinity in the army field of Gorgan. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 5(1), 173-186.
34. Babiker, S., Abulgasim, E. and Hamid, H.S., 2018. Enhancing the spatial variability of soil salinity indicators by remote sensing indices and geo-statistical approach. *J. Earth Sci. Clim. Change*, 9(04).
35. Bannari, A., Guedon, A.M., El-Harti, A., Cherkaoui, F.Z. and El-Ghmari, A., 2008. Characterization of slightly and moderately saline and sodic soils in irrigated agricultural land using simulated data of advanced land imaging (EO-1) sensor. *Communications in soil science and plant analysis*, 39(19-20), 2795-2811.
36. Boettinger, J.L., 2010. Environmental covariates for digital soil mapping in the western USA. *Digital soil mapping: Bridging research, environmental application, and operation*, 17-27.
37. Csillag, F., Pasztor, L. and Biehl, L.L., 1993. Spectral band selection for the characterization of salinity status of soils. *Remote sensing of environment*, 43(3), 231-242.
38. Darwish, T., Atallah, T., El Moujabber, M. and Khatib, N., 2005. Salinity evolution and crop response to secondary soil salinity in two agro-climatic zones in Lebanon. *Agricultural water management*, 78(1-2), 152-164.
39. Dehaan, R. and Taylor, G.R., 2003. Image-derived spectral endmembers as indicators of salinisation. *International Journal of Remote Sensing*, 24(4), 775-794.
40. Dehni, A. and Lounis, M., 2012. Remote sensing techniques for salt affected soil mapping: application to the Oran region of Algeria. *Procedia Engineering*, 33, 188-198.
41. Dematte, J.A.M., 2002. Characterization and discrimination of soils by their reflected electromagnetic energy. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 37, 1445-1458.
42. Elhag, M., 2016. Evaluation of different soil salinity mapping using remote sensing techniques in arid ecosystems, Saudi Arabia. *Journal of Sensors*.
43. Farah, A., Algouti, A., Algouti, A., Ifkirne, M. and Ezziyani, A., 2021. Mapping of soil degradation in semi-arid environments in the ouarzazate basin in the south of the central High Atlas, Morocco, using sentinel 2A data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 23, 100548.
44. Farahmand, N. and Sadeghi, V., 2020. Estimating soil salinity in the dried lake bed of Urmia lake using optical Sentinel-2 images and nonlinear regression models. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48(4), 675-687.
45. Farifteh, J., Farshad, A. and George, R.J., 2006. Assessing salt-affected soils using remote sensing, solute modelling, and geophysics. *Geoderma*, 130(3-4), 191-206.

46. Gomrokchi, A., Akbari, M., Hassanoghli, A. and Younesi, M., 2020. Monitoring soil salinity and vegetation using multispectral remote sensing data in interceptor drain of salt marsh in Qazvin Plain. *Geography and Environmental Sustainability*, 10(1), 37-52.
47. Gopalakrishnan, T. and Kumar, L., 2020. Modeling and mapping of soil salinity and its impact on Paddy Lands in Jaffna Peninsula, Sri Lanka. *Sustainability*, 12(20), 8317.
48. Gorji, T., Yildirim, A., Hamzehpour, N., Tanik, A. and Sertel, E., 2020. Soil salinity analysis of Urmia Lake Basin using Landsat-8 OLI and Sentinel-2A based spectral indices and electrical conductivity measurements. *Ecological Indicators*, 112, 106173.
49. Gunal, E., Wang, X., Kılıc, O.M., Budak, M., Al Obaid, S., Ansari, M.J. and Brestic, M., 2021. Potential of Landsat 8 OLI for mapping and monitoring of soil salinity in an arid region: A case study in Dushak, Turkmenistan. *Plos one*, 16(11), e0259695.
50. Guo, B., Yang, F., Han, B., Fan, Y., Chen, S., Yang, W. and Jiang, L., 2019. A model for the rapid monitoring of soil salinization in the Yellow River Delta using Landsat 8 OLI imagery based on VI-SI feature space. *Remote Sensing Letters*, 10(8), 796-805.
51. Hafez, E.M., Omara, A.E.D., Alhumaydhi, F.A. and El-Esawi, M.A., 2021. Minimizing hazard impacts of soil salinity and water stress on wheat plants by soil application of vermicompost and biochar. *Physiologia Plantarum*, 172(2), 587-602.
52. Haque, S.A., 2006. Salinity problems and crop production in coastal regions of Bangladesh. *Pakistan Journal of Botany*, 38(5), 1359-1365.
53. Hassan, R., Ahmed, Z., Islam, M.T., Alam, R. and Xie, Z., 2021. Soil Salinity Detection Using Salinity Indices from Landsat 8 Satellite Image at Rampal, Bangladesh. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*, 4, 1-12.
54. Hunt, G and Siseurs .J. 1971. Visible and near - infrared spectra of minerals and rocks. II Carbonates. *Modern Geology*, 2, 23-30.
55. Khajehzadeh, M., Afzali, S.F., Honarbakhsh, A. and Ingram, B., 2022. Remote sensing and gis-based modeling for predicting soil salinity at the watershed scale in a Semi-arid region of Southern Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(5), 423.
56. Khan Yaghma, M., Ahmadi, N. and Jalilnazhad, N., 2016. Investigating potentiality of IRS-P6 images for soil salinity modeling. *Water and Soil Science*, 26(2-2), 177-187.
57. Khan, N.M., Rastoskuev, V.V., Sato, Y. and Shiozawa, S., 2005. Assessment of hydrosaline land degradation by using a simple approach of remote sensing indicators. *Agricultural Water Management*, 77(1-3), 96-109.
58. Khan, S. and Abbas, A., 2007. Using remote sensing techniques for appraisal of irrigated soil salinity. *Int. Congr. Model. Simul.(MODSIM)*, Model. Simul. Soc. Aust. New Zealand, Bright, (January), 2632-2638.
59. Khasanov, S., Li, F., Kulmatov, R., Zhang, Q., Qiao, Y., Odilov, S., Yu, P., Leng, P., Hirwa, H., Tian, C. and Yang, G., 2022. Evaluation of the perennial spatio-temporal changes in the groundwater level and mineralization, and soil salinity in irrigated lands of arid zone: as an example of Syrdarya Province, Uzbekistan. *Agricultural Water Management*, 263, 107444.
60. Kulmatov, R., Khasanov, S., Odilov, S. and Li, F., 2021. Assessment of the space-time dynamics of soil salinity in irrigated areas under climate change: a case study in Sirdarya Province, Uzbekistan. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232, 1-13.
61. Lindner, C., Bromiley, P.A., Ionita, M.C. and Cootes, T.F., 2014. Robust and accurate shape model matching using random forest regression-voting. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 37(9), 1862-1874.
62. Litalien, A. and Zeeb, B., 2020. Curing the earth: A review of anthropogenic soil salinization and plant-based strategies for sustainable mitigation. *Science of the Total Environment*, 698, 134235.
63. Makhdoum, M.F., Darvishsefat, A.A., Jafarzadeh, H. and Makhdoum, A.F., 2002. Environmental evaluation and planning by geographic information system. Tehran university publication, Tehran, Iran.
64. Matinfar, H.R. and Zandie, V., 2016. Efficiency of spectral indices derived from Landsat-8 images of Maharloo Lake and its surrounding rangelands. *Journal of Rangeland Science*, 6(4), 334-343.

65. Matinfar, H.R., Alavi Panah, S.K., Zand, F. and Khodaei, K., 2013. Detection of soil salinity changes and mapping land cover types based upon remotely sensed data. *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 913-919.
66. Meng, L., Zhou, S., Zhang, H. and Bi, X., 2016. Estimating soil salinity in different landscapes of the Yellow River Delta through Landsat OLI/TIRS and ETM+ Data. *Journal of Coastal Conservation*, 20, 271-279.
67. Metternicht, G. and Zinck, A., 2008. Remote sensing of soil salinization: Impact on land management. CRC Press.
68. Metternicht, G.I. and Zinck, J.A., 2003. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. *Remote sensing of Environment*, 85(1), 1-20.
69. Mohamed, E.S., Saleh, A.M., Belal, A.B. and Gad, A., 2018. Application of near-infrared reflectance for quantitative assessment of soil properties. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 21(1), 1-14.
70. Morgan, R.S., El-Hady, M.A. and Rahim, I.S., 2018. Soil salinity mapping utilizing sentinel-2 and neural networks. *Indian Journal of Agricultural Research*, 52(5), 524-529.
71. Nguyen, K.A., Liou, Y.A., Tran, H.P., Hoang, P.P. and Nguyen, T.H., 2020. Soil salinity assessment by using near-infrared channel and Vegetation Soil Salinity Index derived from Landsat 8 OLI data: a case study in the Tra Vinh Province, Mekong Delta, Vietnam. *Progress in Earth and Planetary Science*, 7(1), 1-16.
72. Noroozi, A.A., Homaei, M. and Abbasi, F., 2011. Integrated application of remote sensing and spatial statistical models to the identification of soil salinity: A case study from Garmsar Plain, Iran, 9(1), 59-74.
73. Olsson, L., Barbosa, H., Bhadwal, S., Cowie, A., Delusca, K., Flores-Renteria, D., Hermans, K., Jobbagy, E., Kurz, W., Li, D. and Sonwa, D.J., 2019. Land degradation: IPCC special report on climate change, desertification, land 5 degradation, sustainable land management, food security, and 6 greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. In *IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land 5 Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and 6 Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
74. Pinheiro, E.F., Ceddia, M.B., Clingensmith, C.M., Grunwald, S. and Vasques, G.M., 2017. Prediction of soil physical and chemical properties by visible and near-infrared diffuse reflectance spectroscopy in the central Amazon. *Remote Sensing*, 9(4), 293.
75. Qadir, M., Qureshi, A.S. and Cheraghi, S.A.M., 2008. Extent and characterisation of salt-affected soils in Iran and strategies for their amelioration and management. *Land Degradation & Development*, 19(2), 214-227.
76. Seifi, M., Ahmadi, A., Neyshabouri, M.R., Taghizadeh-Mehrjardi, R. and Bahrami, H.A., 2020. Remote and Vis-NIR spectra sensing potential for soil salinization estimation in the eastern coast of Urmia hyper saline lake, Iran. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20, 100398.
77. Shahraini, E. and Noroozi, A.A., 2022. Modeling and Mapping of Soil Salinity and Alkalinity Using Remote Sensing Data and Topographic Factors: A Case Study in Iran. *Environmental Modeling & Assessment*, 27(5), 901-913.
78. Singh, A., 2022. Soil salinity: A global threat to sustainable development. *Soil Use and Management*, 38(1), 39-67.
79. Sonon, L.S., Saha, U. and Kissel, D.E., 2012. Soil salinity testing, data interpretation and recommendations. The University of Georgia, Cooperative Extension, College of Agricultural and Environmental Sciences, Circular, (1019).
80. Summers, D., Lewis, M., Ostendorf, B. and Chittleborough, D., 2011. Visible near-infrared reflectance spectroscopy as a predictive indicator of soil properties. *Ecological Indicators*, 11(1), 123-131.
81. Taghadosi, M.M., Hasanlou, M. and Eftekhari, K., 2019. Retrieval of soil salinity from Sentinel-2 multispectral imagery. *European Journal of Remote Sensing*, 52(1), 138-154.
82. Teggi, S., Costanzini, S., Despini, F., Chiodi, P. and Immordino, F., 2012, October. SPOT5 imagery for soil salinity assessment in Iraq. In *Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications*, 198-209.

83. Vaudour, E., Gomez, C., Lagacherie, P., Loiseau, T., Baghdadi, N., Urbina-Salazar, D., Loubet, B. and Arrouays, D., 2021. Temporal mosaicking approaches of Sentinel-2 images for extending topsoil organic carbon content mapping in croplands. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 96, 102277.
84. Veerman, C., Correia, T.P., Bastioli, C., Biro, B., Bouma, J., Cienciala, E., Emmett, B., Frison, E.A., Grand, A., Filchev, L.H. and Kriauciunienė, Z., 2020. Caring for soil is caring for life: ensure 75% of soils are healthy by 2030 for healthy food, people, nature and climate: interim report of the mission board for soil health and food.
85. Wang, J., Ding, J., Abulimiti, A. and Cai, L., 2018. Quantitative estimation of soil salinity by means of different modeling methods and visible-near infrared (VIS-NIR) spectroscopy, Ebinur Lake Wetland, Northwest China. *PeerJ*, 6, e4703.
86. Wang, J., Peng, J., Li, H., Yin, C., Liu, W., Wang, T. and Zhang, H., 2021. Soil salinity mapping using machine learning algorithms with the Sentinel-2 MSI in arid areas, China. *Remote Sensing*, 13(2), 305.
87. Wang, Z., Zhang, X., Zhang, F., weng Chan, N., Liu, S. and Deng, L., 2020. Estimation of soil salt content using machine learning techniques based on remote-sensing fractional derivatives, a case study in the Ebinur Lake Wetland National Nature Reserve, Northwest China. *Ecological Indicators*, 119, 106869.
88. Weiss, E., Marsh, S.E. and Pfirman, E.S., 2001. Application of NOAA-AVHRR NDVI time-series data to assess changes in Saudi Arabia's rangelands. *International Journal of Remote Sensing*, 22(6), 1005-1027.
89. Yang, J., Zhao, J., Zhu, G., Wang, Y., Ma, X., Wang, J., Guo, H. and Zhang, Y., 2020. Soil salinization in the oasis areas of downstream inland rivers—Case Study: Minqin oasis. *Quaternary International*, 537, 69-78.
90. Zaady, E., Arbel, S., Barkai, D. and Sarig, S., 2013. Long-term impact of agricultural practices on biological soil crusts and their hydrological processes in a semiarid landscape. *Journal of Arid Environments*, 90, 5-11.
91. Zhang, K., Chao, L.J., Wang, Q.Q., Huang, Y.C., Liu, R.H., Hong, Y., Tu, Y., Qu, W. and Ye, J.Y., 2019. Using multi-satellite microwave remote sensing observations for retrieval of daily surface soil moisture across China. *Water Science and Engineering*, 12(2), 85-97.
92. Zhao, W., Zhou, C., Zhou, C., Ma, H. and Wang, Z., 2022. Soil salinity inversion model of oasis in arid area based on UAV multispectral remote sensing. *Remote Sensing*, 14(8), p.1804.

## **An overview of the challenges facing the selection of proper remote sensing indices in soil salinity studies**

**Sh. Rahmani Siyalarz and A. Keshavarzi\***

MS.c. Student, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tehran.

[shahla.rahmani@ut.ac.ir](mailto:shahla.rahmani@ut.ac.ir)

Assistant Prof., Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tehran,

[alikeshtarzi@ut.ac.ir](mailto:alikeshtarzi@ut.ac.ir)

Received: July 2022 and Accepted: January 2023

### **Abstract**

Soil salinity, caused by nature and/or human activities, is a major environmental problem, especially in arid and semi-arid regions. High soil salinity negatively affects crop growth and productivity that ultimately leads to land degradation. It is, therefore, essential to monitor and map soil salinity, especially because an early-enough effective soil rehabilitation program can be developed and implemented to prevent and control the adverse effects on regional ecology, food security, and agricultural development. Soil salinity can be identified using both direct indicators that reflect surface soil salt properties and indirect indices. In this regard, remote sensing has been found to outperform traditional techniques as it offers fast and cost-effective monitoring and mapping techniques for soil salinity assessment. The present review study strives to identify not only the challenges in selecting relevant remote-sensing indicators as reported in previous studies of soil salinity but also the spectral indices used in soil salinity investigations that might be of help to land management at a regional level. This endeavor involves vegetation and salinity indices most commonly used in detecting and mapping soil salinity. Using the different remote sensing indicators, of brightness index (BI), salinity index (SI), normalized differential vegetation index (NDVI), and normalized differential salinity index (NDSI) were found to reveal the highest correlations between ground data and those obtained from satellite images of salinity-affected soils. Moreover, the choice of appropriate bands or indices for remote-sensing were found to depend on soil conditions, geographical area, climatic conditions, satellite data, physiography of the area, and land use.

**Keywords:** Remote Sensing, Remote sensing indices, Satellite images, Vegetation index, Salinity index

---

\* - Corresponding author's email: [alikeshtarzi@ut.ac.ir](mailto:alikeshtarzi@ut.ac.ir)