

تهیه نقشه شوری خاک سطحی با استفاده از فن آوری سنجش از دور (مطالعه موردی: اراضی جنوب استان آذربایجان غربی)

خالق سلیمی^۱، ناصر احمدی ثانی^{۲*}، نادر جلیل نژاد^۳

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۷/۰۱

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۹/۲۵

۱-دانش آموخته کارشناسی ارشد آگرواکولوژی، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد

۲-استادیار، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد

۳-دانشجوی دکتری زراعت و اصلاح نباتات، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: n_sani@iau-mahabad.ac.ir

چکیده

شوری خاک یکی 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 که استان آذربایجان غربی نیز از این امر مستثنی نیست. هدف از انجام تحقیق حاضر، بررسی امکان تهیه نقشه شوری خاک سطحی در مساحتی برابر ۶۸۰۰۰ هکتار از اراضی جنوب استان آذربایجان غربی با کاربرد سنجش از دور می‌باشد. برای تهیه نقشه شوری خاک (۱۵-۰ cm)، از روش نمونه‌برداری سیستماتیک تصادفی (۱۴۷ نمونه خاک ۵۰۰ گرمی) و تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی استفاده شد. در این تحقیق، تصاویر ماهواره IRS-P6 (باندهای چندطیفی و پانکروماتیک) به-کار گرفته شده و تصحیح هندسی تصاویر با کاربرد مدل رقومی ارتفاع و نقشه جاده‌ها و آبراه‌ها صورت گرفت. شاخص‌های متعددی با استفاده از روش‌های مختلف نسبت‌گیری و تحلیل مولفه‌های اصلی، تهیه و در طبقه‌بندی‌ها استفاده شدند. پس از انتخاب نمونه‌های آموزشی مناسب، طبقه‌بندی با تعداد کلاسه‌های مختلف با روش نظارت‌شده و الگوریتم‌های مختلف صورت گرفت. نتایج ارزیابی صحت‌سنجی نشان داد که بیش‌ترین درصد صحت کلی و ضریب کاپا (۸۷/۹۶٪ و ۰/۷۷) مربوط به طبقه‌بندی دوکلاسه با ترکیب چهاربندی و الگوریتم حداکثر احتمال بود. همچنین نتایج بیان-گر قابلیت بالای سنجش از دور و داده‌های IRS-P6 برای تهیه نقشه شوری خاک سطحی در مقیاس محلی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تهیه نقشه، داده‌های IRS-P6، شوری خاک، صحت‌سنجی، طبقه‌بندی

Mapping Soil Salinity Using Remote Sensing Technology (Case Study: South Lands of West Azarbaijan province)

Kh Salimi¹, N Ahmadi Sani^{2*}, N Jalilnejad³

Received: August 23, 2017 Accepted: December 16, 2018

¹M.Sc. Graduate of Agroecology, Mahabad Branch, Islamic Azad University, Mahabad, Iran

²Assist. Prof., Faculty of Agriculture and Natural Resources, Mahabad Branch, Islamic Azad University, Mahabad, Iran

³Ph.D. Student of Plant Breeding, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

* Corresponding Author, Email: n_sani@iau-mahabad.ac.ir

Abstract

Soil salinity is one of the most important limiting factors in crop production and more than 50% of the world irrigated lands have different levels of salinity. Also, one of the most important agricultural problems in Iran is soil salinity where West Azerbaijan province is no exception from this problem. The aim of present study was investigating the possibility of surface soil salinity mapping in an area of 68000 ha in the south of West Azarbaijan province using remote sensing. A systematic random sampling method was used to prepare a ground truth map of surface soil salinity (including 147 soil samples from a depth of 0-15 cm). In this research, *IRS-P6* satellite data (multispectral and panchromatic bands) were used. Geometric correction of images was done using digital elevation model and road and river maps. Various indices were generated, using ratioing and principal component analysis methods, and were used in the classifications. After selection of suitable training samples, classification was performed with different number of classes by a supervised method and different algorithms. The results of the accuracy assessment showed that the highest overall accuracy percentage and *Kappa* coefficient (87.96% and 0.77) were related to the classification of the two classes with 4-band combination and the maximum likelihood algorithm. Also, the results revealed high potential of remote sensing and *IRS-P6* data for surface soil salinity mapping on a local scale.

Keywords: Accuracy assessment, Classification, *IRS-P6* data, Mapping, Soil salinity

مقدمه

به‌وسیله مداخلات انسانی عمدتاً شامل آبیاری با آب شور یا دیگر عملیات آبیاری نامناسب تحت شرایط زهکشی ضعیف به‌وجود می‌آید (فان و همکاران ۲۰۱۲، ترنکا و همکاران ۲۰۱۳). شورشیدن خاک شامل فرایند تجمع زیاد نمک (خاک‌های شور)، تجمع زیاد یون سدیم (خاک‌های سدیمی) و اسیدیته بالا (خاک‌های قلیایی) در نتیجه تجمع زیاد بی‌کربنات‌ها در خاک می‌باشد. شورشیدن می‌تواند در هر دو محیط طبیعی و انسان-ساخت رخ دهد (دالیاکوپولوس و همکاران ۲۰۱۶). امروزه یکی از چالش‌های بزرگ و عامل اصلی محدودکننده پایداری اراضی کشاورزی در جهان، خاک‌های شور و سدیمی می‌باشند (فان و همکاران ۲۰۱۱، ماکسیمو و همکاران ۲۰۱۳، زاگر و همکاران

امروزه رشد روزافزون جمعیت، باعث نیاز بیشتر بشر به مواد غذایی، توسعه ناپایدار کشاورزی و تأثیرات سوء آن بر خاک شده است. از عوارض زیست‌محیطی بهره‌برداری بیش از حد از زمین می‌توان به فرسایش خاک و کاهش آب جاری شیرین و در نتیجه افزایش شوری خاک در اثر مدیریت نادرست و استفاده از آب‌های شور، اشاره نمود (قنبری و برقی ۱۳۸۷). شوری یکی از قدیمی‌ترین مشکلات زیست‌محیطی و یکی از دلایل اصلی بیابان‌زایی است (مرشد و همکاران ۲۰۱۶). شوری اولیه به‌وسیله توسعه نمک‌ها از طریق فرآیندهای طبیعی شامل هوازدگی فیزیکی و شیمیایی، حمل مواد مادری، نهشته‌های زمین‌شناسی و آب زیرزمینی است. شوری ثانویه نیز

دستیابی به این هدف، بهره‌گیری از تکنیک‌های سنجش از دور و GIS، اجتناب ناپذیر بوده و توصیه می‌شود (وانگ و همکاران ۲۰۱۳، آمال و همکاران ۲۰۱۴، افراسینی و همکاران ۲۰۱۷). سنجش از دور به‌عنوان ابزاری قوی در شناسایی، پهنه‌بندی و پایش شوری خاک شناخته شده و رو به گسترش است (علوی‌پناه و همکاران ۱۳۹۳). 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). در مطالعات گذشته، داده‌های متعددی از جمله داده‌های سنجنده‌ها و ماهواره‌هایی مانند *Modis* و *Ikonos IRS-Liss Aster Spot Landsat* برای تعیین میزان شوری خاک به‌کار برده شده‌اند (عباس و همکاران ۲۰۱۳، الیا و همکاران ۲۰۱۴، ناوار و همکاران ۲۰۱۵، منگ و همکاران ۲۰۱۶). تکنیک‌های سنجش از دور متعددی مانند عکس‌های هوایی، تصاویر ویدیویی، دمانگاری مادون قرمز، داده‌های چندطیفی مرئی و مادون قرمز و تصاویر میکروویو نیز برای پایش و شناسایی مناطق شور به‌کار برده می‌شوند (فوراتی و همکاران ۲۰۱۵). از سوی دیگر، روش‌های تهیه نقشه دقیق شوری به‌طور مستقیم به مقیاس مکانی مورد مطالعه وابسته هستند. برای مثال نقشه‌های ماکروسکوپیک خاک‌های شور در مقیاس جهانی ممکن است مشکلات زیست‌محیطی را به‌خوبی نشان ندهند (لی و همکاران ۲۰۱۴، دالیاکوپولوس و همکاران ۲۰۱۶). بنابراین تهیه نقشه شوری در مقیاس محلی ضروری است. همچنین اگرچه پایش در سطح مزرعه و مقیاس زمینی می‌تواند از طریق سنجنده‌های محلی، نمونه‌برداری و روش‌های ژئوفیزیکی انجام شود (دومراکانا و همکاران ۲۰۱۵)، اما ارزیابی شوری در سطوح بزرگ‌تر بایستی براساس سنجش از دور و در ترکیب با اندازه‌گیری‌های زمینی مورد بررسی قرار گیرد (دالیاکوپولوس و همکاران ۲۰۱۶). بنابراین، هدف از این مطالعه، تهیه نقشه شوری خاک سطحی در

۲۰۱۸). براساس برآوردهای انجام شده ۷٪ از اراضی جهان، شور و ۳٪ بسیار شور یا سدیمی هستند. در جهان ۲۰٪ اراضی کشاورزی آبی مشکل تجمع نمک در خاک دارند. حدود ۷۷ میلیون هکتار از اراضی جهان به‌دلیل فعالیت‌های انسانی و مدیریت‌های نادرست شور شده‌اند (عباس و همکاران ۲۰۱۳) و هر سال با نرخ بالایی تا دو میلیون هکتار افزایش می‌یابند. هزینه شوری ناشی از آبیاری معادل ۱۱ بیلیون دلار در سال در کل جهان برآورد شده است (مرشد و همکاران ۲۰۱۶). در ایران نیز، یکی از مهم‌ترین مشکلات کشاورزی، شوری اراضی است. کشور ایران به دلیل تکیه بر کشاورزی فاریاب برای تولید محصولات کشاورزی به‌شدت در معرض شورشدن اراضی است. در شرایط آب و هوایی فعلی کشور، حدود ۹۰٪ از محصولات بر روی اراضی آبی تولید می‌شوند. از مجموع حدود ۸ میلیون هکتار اراضی آبی کشور، ۶/۸ میلیون هکتار مبتلا به درجات مختلف شوری‌اند (جمشیدی و همکاران ۱۳۹۴). این خاک‌ها در مساحت‌های کوچک و نقاط مختلف پراکنده‌اند که اراضی مجاور خود را نیز مورد تهدید قرار می‌دهند. یکی از مناطق مستعد کشاورزی در ایران نیز، استان آذربایجان غربی است که اراضی کشاورزی آن با بیش از ۶/۵٪ کل اراضی مزروعی کشور، با مشکل شوری خاک مواجه هستند (جمشیدی و همکاران ۱۳۹۴، خوان‌یغما و همکاران ۱۳۹۴). برای اصلاح خاک‌های متأثر از نمک و جلوگیری از شورشدن بیش‌تر، دستیابی به اطلاعات شوری و پراکنش مکانی آن شرط لازم است و بنابراین پایش و مدیریت شوری یکی از مهم‌ترین مسائل جوامع کشاورزی است. از سوی دیگر روش‌های سنتی نمونه‌برداری و آنالیز آزمایشگاهی آن‌ها جهت ارزیابی شوری خاک زمان‌بر و پرهزینه هستند و نمی‌توانند تغییرات مکانی و زمانی را بازیابی کنند (اخضری و اسدی می‌آبادی ۱۳۹۵، عبدالصمد و همکاران ۲۰۱۵، فوراتی و همکاران ۲۰۱۵). به‌منظور

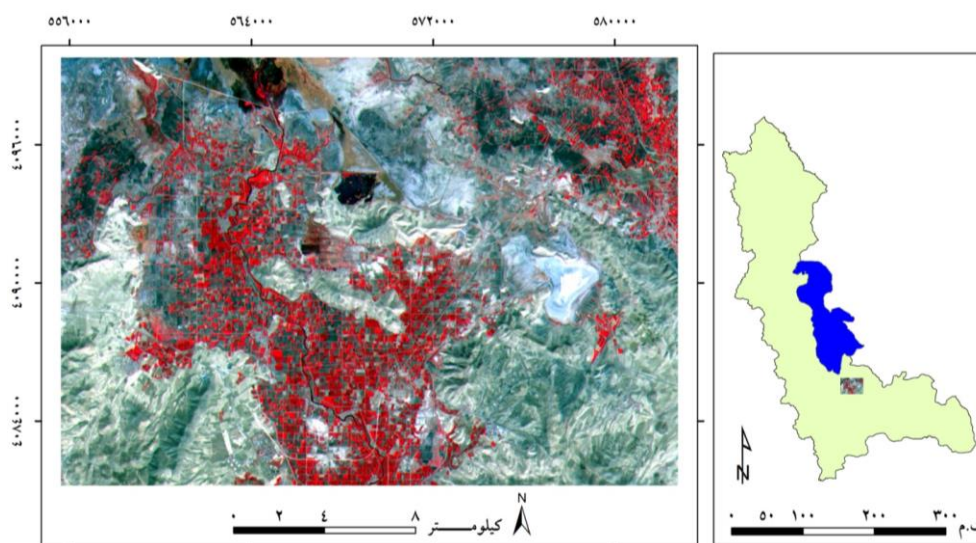
آذربایجان غربی واقع شده است. این منطقه بین عرض جغرافیایی $36^{\circ} 52'$ و $37^{\circ} 02'$ شمالی و طول جغرافیایی $45^{\circ} 37'$ و $45^{\circ} 55'$ شرقی قرار دارد. بیشتر سطح منطقه در شهرستان مهاباد و قسمت‌هایی نیز در محدوده شهرستان‌های نقده و میاندوآب قرار دارد. ارتفاع متوسط منطقه از سطح دریا ۱۳۲۰ متر و آب و هوا معتدل کوهستانی است (شکل ۱).

مقیاس محلی با کاربرد سنجش از دور برای استفاده در برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه اراضی در کشاورزی پایدار و همچنین ارزیابی قابلیت داده‌های ماهواره‌ای IRS-P6 می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با مساحت حدود ۶۸۰۰۰ هکتار و به‌صورت یکپارچه در اراضی جنوب استان



شکل ۱- تصویر ماهواره‌ای (ترکیب رنگی کاذب RGB_{432}) و موقعیت منطقه مورد مطالعه.

داده‌های ماهواره‌ای

شوری خاک، تصاویری هستند که در زمان تصویربرداری، سطح خاک دارای حداقل پوشش گیاهی باشد. بازتاب طیفی خاک‌ها به رطوبت خاک نیز وابسته است. هرچه خاک خشک‌تر باشد، تبلور و رسوب نمک‌ها در سطح خاک و انعکاس سطحی افزایش می‌یابد (حسنوندی و همکاران ۱۳۹۳).

تهیه نقشه واقعیت زمینی

برای تهیه این نقشه از داده‌های نمونه‌برداری شده در تحقیقات گذشته (خوان‌یغما و همکاران ۱۳۹۴) استفاده گردید. تغییرات زمانی داده‌های زمینی و تصاویر، صحت نتایج را تحت تاثیر قرار می‌دهند

در این تحقیق از باند پانکروماتیک سنجنده LISS IV و چهار باند طیفی سنجنده LISS III ماهواره IRS-P6 استفاده گردید. سنجنده‌های این ماهواره شامل LISS III با اندازه تفکیک ۲۳ متر (چهار باند چندطیفی سبز، قرمز و مادون قرمز نزدیک و میانی)، سنجنده LISS IV با اندازه تفکیک ۵/۸ متر (یک باند پانکروماتیک و سه باند چندطیفی سبز، قرمز و مادون قرمز نزدیک) و سنجنده AWIFS با اندازه تفکیک مکانی ۷۰ متر می‌باشد. داده‌ها مربوط به تابستان سال ۱۳۹۰ بودند؛ زیرا بهترین تصاویر برای مطالعات

دیگر پوشش‌های زمینی می‌شوند. در این تحقیق با کاربرد روش‌های مختلف نسبت‌گیری و تحلیل مولفه‌های اصلی، برخی از شاخص‌های سنجش از دور تهیه شده و در طبقه‌بندی کلاسه‌های مختلف شوری مورد استفاده قرار گرفتند (جدول ۱).

نسبت‌گیری و تحلیل مولفه‌های اصلی جزو تبدیل‌های طیفی در سنجش از دور می‌باشند. این تبدیل‌ها از جمله روش‌های پردازش تصویر برای استخراج بهتر اطلاعات از تصاویر ماهواره‌ای می‌باشند. 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 بارزسازی تصاویر استفاده می‌شود. باندهای حاصل از نسبت‌گیری، اصطلاحاً شاخص نامیده می‌شوند (مخدوم و همکاران ۲۰۱۳). شاخص‌های مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ آورده شده‌اند. همبستگی زیاد بین باندهای طیفی، ناشی از تشابه انعکاس پدیده‌ها، تکرار اطلاعات محسوب می‌شود که به وسیله تکنیک تحلیل مولفه‌های اصلی، می‌توان اطلاعات باندهای با همبستگی بالا را در یک باند متمرکز کرد. در این روش از تعداد n باند ورودی در تبدیل، n باند جدید ایجاد می‌شود که فاقد همبستگی بالا با یکدیگر هستند. باند اول دارای حداکثر اطلاعات می‌باشد و معمولاً از این باند در تجزیه و تحلیل‌ها استفاده می‌شود (پاتانایک و همکاران ۲۰۰۸).

در این مطالعه، تکنیک تحلیل مولفه‌های اصلی روی مجموعه‌های مختلف از باندهای سبز (B2)، قرمز (B3)، مادون قرمز نزدیک (B4)، مادون قرمز میانی (B5) و باند پانکروماتیک (Pan) به کار برده شد و مولفه‌های اول (PC1) حاصل از هر تحلیل به عنوان یک باند مصنوعی در ترکیبات مختلف باندی در طبقه‌بندی مورد استفاده قرار گرفتند.

(فوراتی و همکاران ۲۰۱۵). بنابراین جهت کاهش فاصله زمانی بین تصویربرداری و نمونه‌برداری، برداشت نمونه‌ها نیز در شهریور ۱۳۹۰ صورت گرفته و تعداد ۱۴۷ نمونه خاک ۵۰۰ گرمی از عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری به صورت سیستماتیک تصادفی برداشت گردید. میزان شوری خاک با روش هدایت الکتریکی نمونه‌ها در عصاره اشباع اندازه‌گیری و برای اجتناب از اثر دما و تعیین میزان نمک محلول در خاک یا آب، هدایت الکتریکی براساس دسی‌زیمنس در متر در ۲۵ درجه سلسیوس اندازه‌گیری شد (دالیاکوپولوس و همکاران ۲۰۱۶). این مقادیر، در محیط GIS به یک نقشه نقطه‌ای با تعریف طبقات غیرشور، شوری کم، شوری متوسط، شوری زیاد با خاک خشک و شوری زیاد با خاک مرطوب تبدیل و به عنوان نقشه واقعیت زمینی جهت تهیه نمونه‌های تعلیمی و ارزیابی صحت نتایج طبقه‌بندی‌ها، مورد استفاده قرار گرفت.

تصحیح تصاویر ماهواره‌ای

داده‌های ماهواره‌ای خام دارای خطای هندسی می‌باشند. خطاهای رادیومتری در صورت وجود قابل رؤیت هستند. در این تحقیق، خطای رادیومتری قابل ملاحظه‌ای وجود نداشت. تصحیحات هندسی به دو صورت و با دقت زیر یک پیکسل انجام گرفت. ۱- تصحیح تصویر به نقشه با روش *Orthorectification* و با کاربرد نقشه جاده‌ها و مدل رقومی ارتفاع جهت تصحیح باند پانکروماتیک. ۲- تصحیح تصویر به تصویر، با استفاده از باند پانکروماتیک تصحیح شده، برای تصحیح باندهای چندطیفی.

باندهای مصنوعی و شاخص‌ها

محققین زیادی از شاخص‌های مختلف سنجش از دور 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

جدول ۱ - شاخص‌های مورد استفاده در این تحقیق و فرمول و منبع آن‌ها.

ردیف	نام شاخص	فرمول	برخی منابع
۱	شاخص روشنایی	BI (Brightness Index)	فوراتی و همکاران ۲۰۱۵
۲	شاخص تنش رطوبت	MSI (Moisture Stress Index)	منگ و همکاران ۲۰۱۶ اخضری و اسدی می‌آبادی ۱۳۹۵
۳	شاخص شوری استاندارد شده	NDSI (Normalized Difference Salinity Index)	الحاج و بحرایی ۲۰۱۷ اخضری و اسدی می‌آبادی ۱۳۹۵
۴	شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی	NDVI (Normalized Differential Vegetation Index)	دالیاکوپولوس و همکاران ۲۰۱۶ مرشد و همکاران ۲۰۱۶ مدجانی و همکاران ۲۰۱۷
۵	شاخص شوری	Salinity 1	
۶	شاخص شوری	Salinity 2	اخضری و اسدی می‌آبادی ۱۳۹۵
۷	شاخص شوری	Salinity 3	پیش‌نماز و همکاران ۱۳۹۶ منگ و همکاران ۲۰۱۶
۸	شاخص نسبت	Ratio	خوان‌یغما و همکاران ۱۳۹۴ اخضری و اسدی می‌آبادی ۱۳۹۵
۹	مولفه اول حاصل از تحلیل مولفه‌های اصلی روی باندهای سبز و قرمز	PC1 (B2, B3)	
۱۰	مولفه اول حاصل از تحلیل مولفه‌های اصلی روی باندهای مادون قرمز نزدیک و میانی	PC1 (B4, B5)	نوروزی و همکاران ۱۳۹۲
۱۱	مولفه اول حاصل از تحلیل مولفه‌های اصلی روی باندهای چندطیفی سبز، قرمز، مادون قرمز نزدیک و میانی	PC1 (B2, B3, B4, B5)	دالیاکوپولوس و همکاران ۲۰۱۶ مدجانی و همکاران ۲۰۱۷
۱۲	مولفه اول حاصل از تحلیل مولفه‌های اصلی روی باندهای چندطیفی و باند پانکروماتیک	PC1 (B2, B3, B4, B5, Pan)	

تهیه نمونه‌های تعلیمی

با توجه به اینکه طبقه‌بندی نظارت شده عمدتاً براساس مشخصات طیفی نمونه‌های تعلیمی صورت می‌گیرد، تهیه نمونه‌ها نقش زیادی در صحت نتایج ایفا می‌نماید. نمونه‌های تعلیمی برای همه کلاسه‌های مورد نظر (شامل شور و غیرشور و طبقات مختلف شوری) با استفاده از نقشه واقعیت زمینی تهیه شدند. نمونه‌های تعلیمی متعدد و کوچک با پراکنش مناسب در هر کلاسه، انتخاب و سپس جهت بهبود طبقه‌بندی، کیفیت نمونه‌ها مورد بازبینی و اصلاح قرار گرفتند.

طبقه‌بندی

در این مطالعه، طبقه‌بندی با روش نظارت شده و با الگوریتم‌های متوازی‌السطوح، حداقل فاصله از میانگین و حداکثر احتمال انجام گرفت. در روش نظارت-شده، مجموعه‌های کوچکی از پیکسل‌ها (نمونه‌های تعلیمی) به‌عنوان نمونه‌هایی از کلاسه‌ها روی تصویر تعیین می‌گردند و پیکسل‌های تصویر توسط الگوریتم-های مختلف به کلاسه‌ها اختصاص می‌یابند (مخدوم و همکاران ۲۰۱۳). تفاوت الگوریتم‌های مختلف در تعیین مرز ارزش پیکسل‌ها می‌باشد. در روش متوازی-السطوح، طبقه‌بندی براساس واریانس نمونه‌های تعلیمی

گیرند و محاسباتی نظیر میانگین، انحراف معیار، مد و میان برای پنجره فیلتر انجام می‌شود.

صحت‌سنجی

برای ارزیابی صحت یک نقشه می‌توان آن را به صورت پیکسل به پیکسل با نقشه واقعیت زمینی مقایسه کرد و معیارهای کمی مانند صحت کلی و ضریب کاپا را محاسبه نمود. صحت کلی نسبت تعداد پیکسل‌های درست طبقه‌بندی شده به پیکسل‌های مورد مقایسه می‌باشد. در محاسبه ضریب کاپا، پیکسل‌هایی که نادرست طبقه‌بندی شده‌اند نیز دخالت داده می‌شوند (مخدوم و همکاران ۲۰۱۳). در این پژوهش، بعد از انجام هر طبقه‌بندی، با مقایسه نقشه‌های حاصله با واقعیت زمینی، معیارهای صحت کلی و ضریب کاپا استخراج شدند.

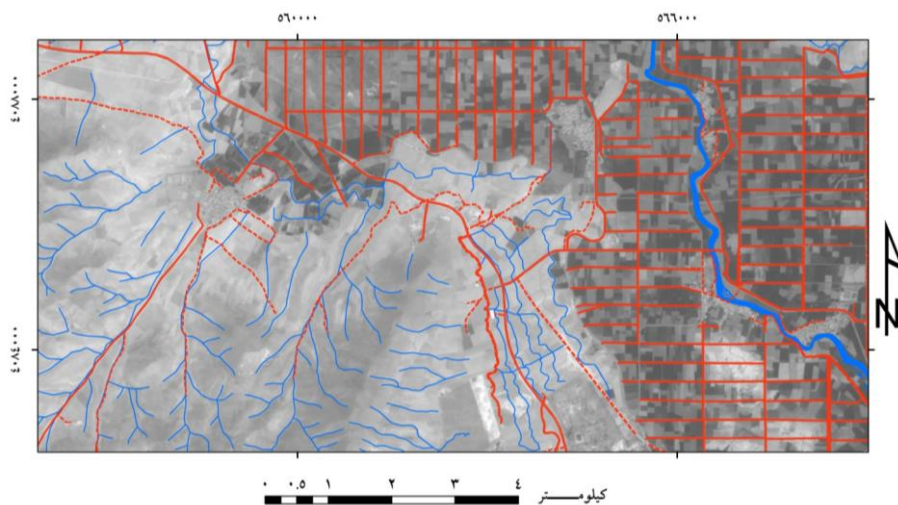
نتایج و بحث

تصحیح هندسی تصاویر

خطای جابجایی ناشی از پستی و بلندی، با روش *Orthorectification* با خطای کم‌تر از یک پیکسل تصحیح شد که انطباق دقیق جاده‌ها، شبکه‌های زهکشی و آبراه‌ها روی تصاویر، بیانگر تطابق هندسی دقیق می‌باشد (شکل ۲).

و تعیین محدوده طیفی طبقات صورت می‌گیرد. در روش حداقل فاصله از میانگین، مرز طبقات به فواصل مساوی از میانگین‌ها و بدون توجه به واریانس ارزش طبقات تعیین می‌شود. در روش حداکثر احتمال، میانگین و جدول کوواریانس برای باندهای مورد استفاده محاسبه می‌شود و اختصاص پیکسل‌ها به طبقات، براساس بالاترین احتمال تعلق پیکسل‌ها به طبقه‌ها صورت می‌گیرد (لیلساند و همکاران ۲۰۱۴).

طبقه‌بندی به حالت‌های، پنج‌کلاسه (یک کلاس غیرشور و چهار کلاس شور)، چهارکلاسه (یک کلاس غیرشور و سه کلاس شور)، چهارکلاسه شوری (کم، متوسط، زیاد مرطوب و زیاد خشک)، سه‌کلاسه شوری (کم، متوسط و زیاد) و دوکلاسه (شور و غیرشور) صورت گرفت. بعد از انجام طبقه‌بندی‌ها، فیلتر مد با اندازه پنجره‌های 3×3 ، 5×5 و 7×7 جهت حذف نویز و پیکسل‌های منفرد روی تصاویر طبقه‌بندی شده اعمال شد. فیلترها جزو متداول‌ترین تبدیل‌های مکانی در سنجش از دور می‌باشند که جهت استخراج بهتر اطلاعات به کار می‌روند. فیلتر در واقع یک پنجره متحرک با ابعاد مختلف می‌باشد که پیکسل به پیکسل روی تمامی تصویر به حرکت در می‌آید. هر یک از پیکسل‌های تصویر یک بار در مرکز پنجره قرار می‌



شکل ۲- باند پانکروماتیک و انطباق جاده‌ها، شبکه‌های زهکشی و آبراه‌ها.

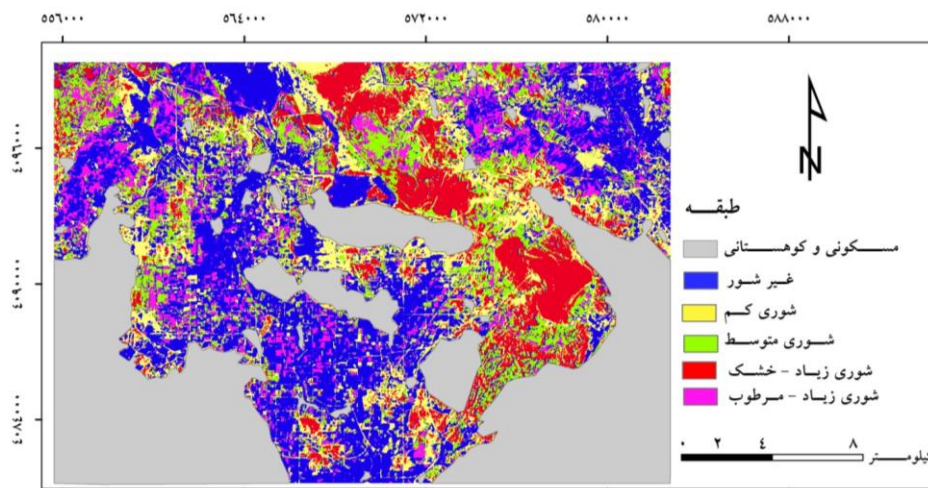
طبقه‌بندی پنج‌کلاسه (چهار کلاس شور و یک کلاس غیرشور)

در این حالت، بهترین نتیجه با ترکیب چهارباندی با صحت کلی ۸۱/۳٪ و ضریب کاپای ۰/۷۱ حاصل گردید. با اعمال فیلتر مد جهت حذف پیکسل‌های منفرد،

بهترین نتیجه توسط فیلتر ۵×۵ با افزایش صحت کلی به ۸۱/۹٪ و ضریب کاپا به ۰/۷۸، حاصل شد (جدول ۲). شکل ۳ نقشه نهایی حاصل از طبقه‌بندی پنج‌کلاسه را نشان می‌دهد.

جدول ۲ - بهترین نتایج در طبقه‌بندی پنج‌کلاسه (چهار کلاس شور و یک کلاس غیرشور).

الگوریتم	الگوریتم	الگوریتم	طبقه‌بندی پنج‌کلاسه
متوازی السطوح	حداقل فاصله از میانگین	حداکثر احتمال	بهترین ترکیب باندی BI + Band 4+ Band 5+ Pan
ضریب کاپا صحت کلی ۵۷/۴۹٪	ضریب کاپا صحت کلی ۷۳٪/۲۱	ضریب کاپا صحت کلی ۸۱٪/۳۱	
۰/۴۶	۰/۶۲	۰/۷۱	



شکل ۳- نقشه نهایی حاصل از طبقه‌بندی پنج‌کلاسه.

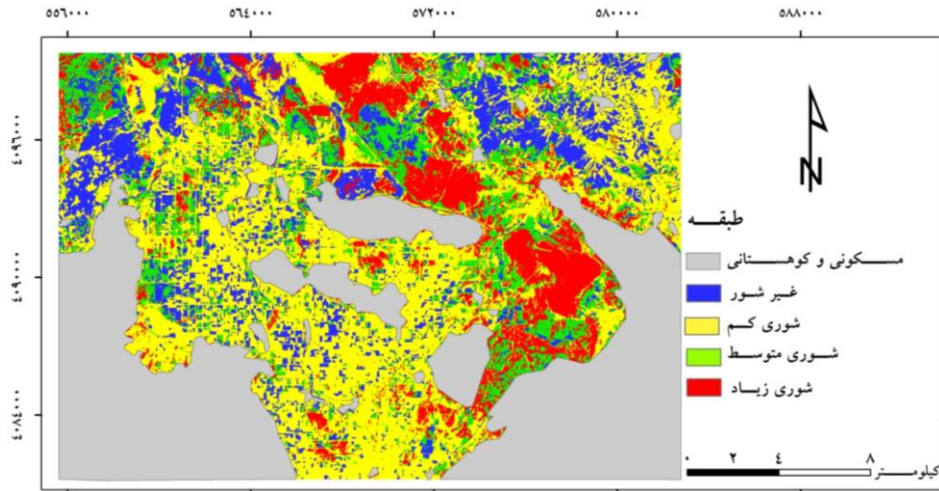
طبقه‌بندی چهارکلاسه (سه کلاس شور و یک کلاس غیرشور)

در طبقه‌بندی چهارکلاسه نیز، بهترین نتیجه با ترکیب چهارباندی و صحت کلی ۸۲/۳٪ و ضریب کاپای

۰/۷۲ حاصل شد (جدول ۳). با اعمال فیلتر مد ۵×۵، میزان صحت کلی به ۸۲/۹٪ و ضریب کاپا به ۰/۷۹ افزایش پیدا کرد. شکل ۴ نقشه حاصل از طبقه‌بندی چهارکلاسه را نشان می‌دهد.

جدول ۳- بهترین نتایج در طبقه‌بندی چهارکلاسه (سه کلاس شور و یک کلاس غیرشور).

الگوریتم	الگوریتم	الگوریتم	طبقه‌بندی چهارکلاسه
متوازی السطوح	حداقل فاصله از میانگین	حداکثر احتمال	بهترین ترکیب باندی BI + Band 5+ Band 4+ Band 2
ضریب کاپا صحت کلی ۶۰/۹۳٪	ضریب کاپا صحت کلی ۷۹٪/۱۱	ضریب کاپا صحت کلی ۸۲٪/۳۱	
۰/۵۰	۰/۶۸	۰/۷۲	



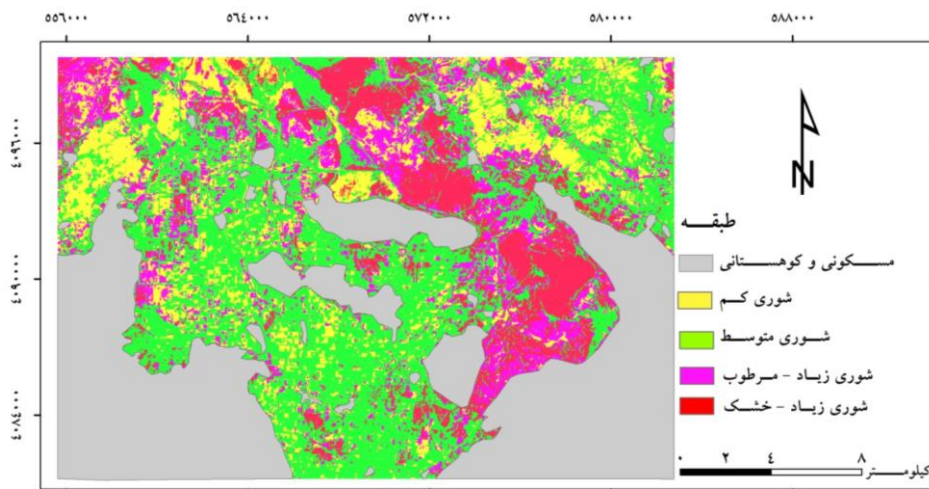
شکل ۴- نقشه نهایی حاصل از طبقه‌بندی چهارکلاسه.

اعمال فیلتر مد 5×5 در جدول ۴ نشان داده شده است. نقشه نهایی حاصل از این طبقه‌بندی در شکل ۵ نشان داده شده است.

طبقه‌بندی چهارکلاسه (طبقات شوری) نتایج ارزیابی با بهترین ترکیب باندی در طبقه‌بندی چهارکلاسه با الگوریتم‌های مختلف بعد از

جدول ۴- بهترین نتایج در طبقه‌بندی چهارکلاسه (طبقات شوری).

الگوریتم	الگوریتم	الگوریتم	طبقه‌بندی
متوازی السطوح	حداقل فاصله از میانگین	حداکثر احتمال	چهارکلاسه (طبقات شوری)
ضریب کاپا	ضریب کاپا	ضریب کاپا	بهترین ترکیب باندی
۰/۱۹	۶۱٪/۸۵	۰/۵۰	Band3 + Band4 + Band5 + Salinity2
٪۲۸/۳۵		۶۸٪/۲۴	۰/۵۷



شکل ۵- نقشه نهایی حاصل از طبقه‌بندی چهارکلاسه (طبقات شوری).

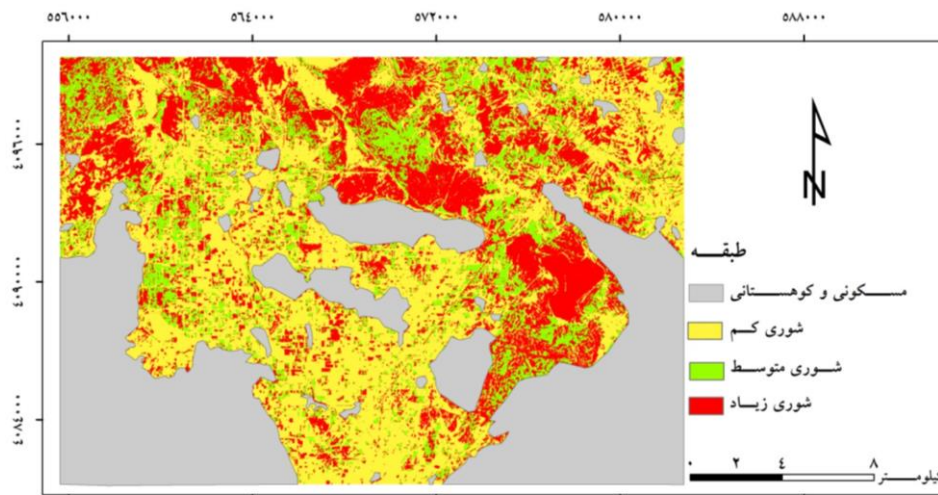
طبقه‌بندی سه‌کلاسه (طبقات شور)

۶۹/۸۲٪ و ضریب کاپا به ۰/۵۹ افزایش یافت. نقشه نهایی حاصل از طبقه‌بندی سه‌کلاسه (طبقات شور) در شکل ۶ نشان داده شده است.

نتایج ارزیابی صحت در این طبقه‌بندی با بهترین ترکیب باندی و با الگوریتم‌های مختلف در جدول ۵ آمده است. بعد از اعمال فیلتر مد ۵×۵ میزان صحت کلی به

جدول ۵- بهترین نتایج در طبقه‌بندی سه‌کلاسه (طبقات شور).

الگوریتم		الگوریتم		الگوریتم		طبقه‌بندی
متوازی السطوح		حداقل فاصله از میانگین		حداکثر احتمال		سه‌کلاسه (طبقات شور)
صحت کلی	ضریب کاپا	صحت کلی	ضریب کاپا	صحت کلی	ضریب کاپا	بهترین ترکیب باندی
۴۳٪/۲۹	۰/۳۲	۶۴٪/۹۴	۰/۵۴	۶۹٪	۰/۵۹	Band2 + Band4 + Band5 + Salinity3



شکل ۶- نقشه نهایی حاصل از طبقه‌بندی سه‌کلاسه (طبقات شور).

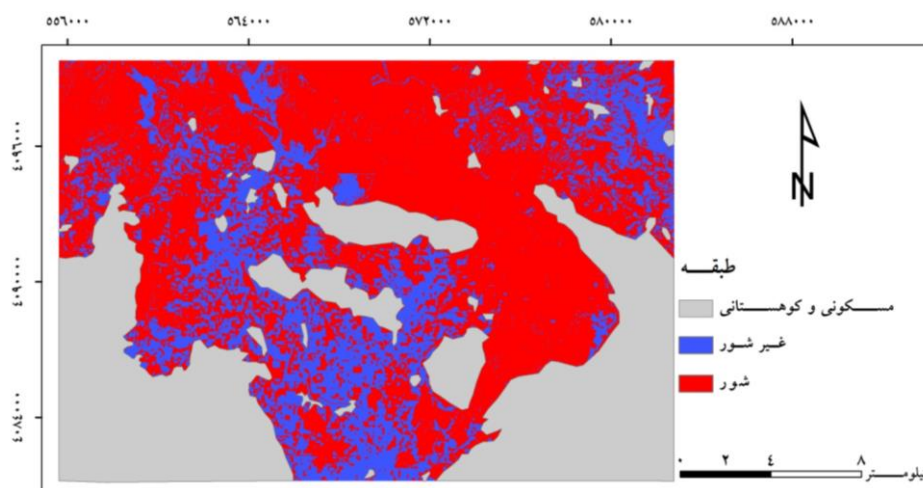
طبقه‌بندی دوکلاسه (شور و غیرشور)

پس از اعمال فیلتر مد ۵×۵ میزان صحت کلی به ۸۸/۱۳٪ و ضریب کاپا به ۰/۷۸ افزایش یافت. شکل ۷ نقشه نهایی حاصل از طبقه‌بندی دوکلاسه را نشان می‌دهد.

نتایج ارزیابی صحت در طبقه‌بندی دوکلاسه (شور و غیرشور) با بهترین ترکیب باندی و با الگوریتم‌های مختلف در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶- بهترین نتایج در طبقه‌بندی دوکلاسه.

الگوریتم		الگوریتم		الگوریتم		طبقه‌بندی
متوازی السطوح		حداقل فاصله از میانگین		حداکثر احتمال		دوکلاسه (شور و غیرشور)
صحت کلی	ضریب کاپا	صحت کلی	ضریب کاپا	صحت کلی	ضریب کاپا	بهترین ترکیب باندی
۶۳٪/۶۰	۰/۵۲	۷۷٪/۸۸	۰/۶۷	۸۷٪/۹۶	۰/۷۷	Band 5+ Band 4+ Band3+ BI



شکل ۷- نقشه نهایی حاصل از طبقه‌بندی دوکلاسه (شور و غیرشور).

در طبقه‌بندی چهارکلاسه، میزان صحت کلی ۶۷٪ و ضریب کاپا ۰/۵۶ و در طبقه‌بندی سه‌کلاسه، صحت کلی ۶۹٪ و ضریب کاپا ۰/۵۹ می‌باشد که با نتایج تحقیق دائم‌پناه و همکاران (۱۳۹۰) با صحت کلی ۶۶/۶٪ و ضریب کاپای ۰/۶۴ نسبتاً مطابقت دارد. در برخی موارد مانند تحقیق پیش‌نماز و همکاران (۱۳۹۶) همخوانی کم‌تری وجود دارد، چراکه در مطالعه مذکور، منطقه از نظر پوشش اراضی شرایط یکنواخت‌تری نسبت به منطقه مورد مطالعه در این تحقیق دارد و منطقی است که اختلاط طیفی کم‌تر و صحت بالاتر باشد. بهترین نتایج برای طبقه‌بندی‌های پنج، چهار و دوکلاسه (شامل مناطق شور و غیرشور)، مانند نتایج عبدی‌زاده و همکاران (۱۳۹۳) مربوط به ترکیب‌های شامل شاخص روشنایی (*BI*) می‌باشد. برای طبقه‌بندی‌های سه‌کلاسه و چهارکلاسه (فقط مناطق شور)، ترکیب شامل شاخص شوری *Salinity2* صحت بیش‌تری را نشان داد که با نتایج محمودی و همکاران (۱۳۹۴)، پیش‌نماز و همکاران (۱۳۹۶) و بو عزیز و همکاران (۲۰۱۱) مطابقت دارد. وجود باندهای مادون قرمز در بهترین ترکیب‌های باندهای نشان‌دهنده قابلیت زیاد این دامنه طیفی در تفکیک پوشش گیاهی و مناطق شور می‌باشد (فوراتی و همکاران ۲۰۱۵). نتایج الگوریتم‌های مختلف طبقه‌بندی

نتایج نشان می‌دهد که طبقه‌بندی‌های دوکلاسه، چهارکلاسه و پنج‌کلاسه، صحت کلی و ضریب کاپای بهتری نسبت به طبقه‌بندی‌های سه‌کلاسه و چهارکلاسه (فقط طبقات شوری) نشان داده‌اند. یکی از دلایل این امر مربوط به وسعت زیاد طبقه غیرشور نسبت به سایر طبقات می‌باشد. وسعت مناطق غیرشور و عدم اختلاط طیفی آن با طبقات شوری باعث افزایش صحت کلی و ضریب کاپا می‌گردد (کیانی و همکاران ۱۳۹۳، مدجانی و همکاران ۲۰۱۷). از سوی دیگر اگرچه مناطق شور به دلیل وجود املاح در سطح خاک و بازتاب بیش‌تر در تصاویر ماهواره‌ای به آسانی از سایر خاک‌ها قابل تشخیص هستند، تشابه طیفی طبقات شوری، میزان تفکیک‌پذیری و صحت کلی را پایین می‌آورد (کارن و همکاران ۲۰۰۱، مدجانی و همکاران ۲۰۱۷). نتایج حاصل از طبقه‌بندی‌های شامل مناطق شور و غیرشور، با نتایج حاصل از تحقیقات دائم‌پناه و همکاران (۱۳۹۰) با صحت کلی ۸۱/۳۳٪ و ضریب کاپای ۰/۷۰، محمودی و همکاران (۱۳۹۴) با صحت کلی ۸۹٪ و ضریب کاپای ۰/۸۰ و مدجانی و همکاران (۲۰۱۷) با صحت کلی ۹۱٪ و ضریب کاپای ۰/۷۹ مطابقت بالایی دارد، به طوری که صحت کلی در همه این تحقیقات بیش از ۸۰٪ و قابل قبول می‌باشد. در طبقه‌بندی‌های شامل طبقات شوری،

نقشه‌های حاصله و دسترسی راحت به داده‌های *IRS-P6*، قابلیت زیاد این داده‌ها برای تهیه نقشه شوری خاک در مقیاس محلی نشان داده شد. همچنین، الگوریتم حداکثر احتمال با ارائه صحت بالاتر نسبت به دیگر الگوریتم‌های متداول کارآیی بالای خود را نشان داد. نتایج حاصل از ترکیب شاخص‌ها با باندهای اصلی، نشان از اهمیت زیاد آن‌ها جهت بهبود صحت نقشه شوری خاک دارد. پیشنهاد می‌شود که در آینده، داده‌های با دامنه طیفی وسیع‌تر، باندهای مادون قرمز میانی و حرارتی و دیگر شاخص‌ها نیز در راستای تهیه نقشه شوری و دیگر پارامترهای خاک مورد ارزیابی قرار گیرند.

نشان داد که بهترین نتیجه مربوط به الگوریتم حداکثر احتمال است که در تحقیقات گذشته نیز به آن اشاره شده است (اکبری و همکاران ۱۳۹۲، یانگ و همکاران ۲۰۰۹، مدجانی و همکاران ۲۰۱۷).

نتیجه‌گیری کلی

با توجه به دسترسی ارزان و آسان و سطح پوشش زیاد تصاویر ماهواره‌ای و مهم‌تر از همه امکان به‌هنگام‌سازی سریع و کم‌هزینه نقشه شوری در سنوات آتی، تکنیک سنجش از دور، برای مالکان اراضی و مدیران بخش‌های خاک و آب جهت برنامه‌ریزی و اصلاح خاک‌های تحت تاثیر شوری بسیار کارآ، اقتصادی و سودمند می‌باشد. با توجه به صحت

منابع مورد استفاده

- Abbas A, Khan S, Hussain N, Hanjra MA and Akbar S. 2013. Characterizing soil salinity in irrigated agriculture using a remote sensing approach. *Physics and Chemistry of Earth* 55: 43-52.
- Abdalsamad A, David CW, Somsubhra C, Aakriti S and Bin L. 2015. Combination of proximal and remote sensing methods for rapid soil salinity quantification. *Geoderma* 239: 34-46.
- Abdizadeh S, Toranjzar H and Ahmadi A. 2014. Evaluation of *SI* and *BI* index in soil salinity mapping in arid and semiarid areas using remote sensing data. Pp. 1-8. Proceedings of the National Conference on Sustainable Ecosystem and Development, Environment office of the Markazi Province. 8 May, Arak, Iran. (In Persian).
- Afrasinei GM, Melis MT, Buttau C, Arras C and Ghiglieri G. 2017. Assessment of remote sensing-based classification methods for change detection of salt-affected areas (Biskra, Algeria). *Journal of Applied Remote Sensing* 11: 16-25.
- Akbari A, Ebrahimi M and Amirahmadi A. 2013. Land use mapping of Sabzevar city using Maximum Likelihood and artificial neural network of Multi-layer Perceptron methods. *Environmental Based Terretorial Planning (Amayesh)* 23(6): 127-148 (In Persian).
- Akhzari D and Asadi Meyabadi A. 2016. Soil salinity map preparation using spectral analysis of *OLI* sensor and field data. *RS & GIS for Natural Resources* 7(2): 87-100 (In Persian).
- Alavipanah SK, Matinfar H and Abdulazimi H. 2014. Remote Sensing of Soil Salinity (Effect on Land Management). 2nd Ed, Tehran University Press, Tehran, 568 p (In Persian).
- Amal A, Lalit K and Priyakant S. 2014. Mapping and modelling spatial variation in soil salinity in the Al Hassa Oasis based on remote sensing indicators and regression techniques. *Remote Sensing* 6: 1137-1157.
- Bouaziz M, Matschullat J and Gloaguen R. 2011. Improved remote sensing detection of soil salinity from a semi-arid climate in northeast Brazil. *Comptes Rendus Geoscience* 343: 795-803.
- Caren CD, David JM and Volker CR. 2001. Phonological difference in *Tasseled Cap* indices improves deciduous forest classification. *Remote Sensing Environment* 80: 460-472.
- Daempanah R, Haghnia G, Alizadeh A and Karimi-Karoyeh A. 2011. Mapping salinity and sodicity of surface soil by remote sensing and geostatistic methods in south side of Mahvalat County. *Journal of Water and Soil* 3(25): 498-508 (In Persian).

- Daliakopoulos IN, Tsanis IK, Koutroulis A, Kourgialas NN, Varouchakis AE, Karatzas GP and Ritsema CJ. 2016. The threat of soil salinity: A European scale review. *Science of the Total Environment* 573: 727-739.
- Domra Kana J, Djongyang N, Raïdandi D, Njandjock Nouck P and Dadje A. 2015. A review of geophysical methods for geothermal exploration. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 44: 87-95.
- Elhag M and Bahrawi JA. 2017. Soil salinity mapping and hydrological drought indices assessment in arid environments based on remote sensing techniques. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems* 6: 149-158.
- Elia S, Todd HS and Dennis LC. 2014. Regional scale soil salinity evaluation using *Landsat 7*, western San Joaquin Valley, California. *USA Geoderma Regional* 2: 82-90.
- Fan Y, Guangxin Z, Xiongrui Y and Zhijun L. 2011. Field-scale spatial variation of saline-sodic soil and its relation with environmental factors in western Songnen of China. *International Journal Environmental Research and Public Health* 8: 374-387.
- Fan X, Pedroli B, Liu G, Liu Q, Liu H and Shu L. 2012. Soil salinity development in the Yellow River delta in relation to groundwater dynamics. *Land Degradation & Development* 23: 175-189.
- Fourati HT, Bouaziz M, Benzina M and Bouaziz S. 2015. Modeling of soil salinity within a semi-arid region using spectral analysis. *Arabian Journal of Geosciences* 8: 11175-11182.
- Hasanvandi N, Landi A, Mateinfer H and Taherzadeh M. 2014. Soil surface salinity mapping using *ETM+* data in south of Ahvaz. *Agricultural Engineering* 1(37): 23-32 (In Persian).
- Ghanbari E and Barghi H. 2008. Key challenges in sustainable agriculture development in Iran. *Development strategy* 16(1): 218-234 (In Persian).
- Jamshidi M, Eftekhari K, Navidi N and Momeni A. 2015. Forty Years of Soil Studies in Soil and Water Research Institute. Agricultural Research Education and Extension Organization Press, Tehran, 62 p (In Persian).
- Khanyaghama M, Ahmadi-Sani N and Jalilanejad N. 2015. Investigating potentiality of *IRS-P6* images for soil salinity modeling. *Water and Soil Science- University of Tabriz* 26(2):177-187 (In Persian).
- Kiani V, Alizadeh-Shabani A and Nazari-Samani A. 2014. Accuracy assessment of *IRS-p6* data using *Google Earth* database for land use mapping. *Geographical Data* 90(23): 50-60 (In Persian).
- Li J, Pu L, Zhu M, Dai X, Xu Y, Chen X, Zhang L and Zhang R. 2014. Monitoring soil salt content using *HJ-1A* hyperspectral data: a case study of coastal areas in Rudong County, Eastern China. *Chinese Geographical Science* 25: 1-11.
- Lillesand T, Kiefer RW and Chipman J. 2014. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons, New Jersey.
- Mahmoudi F, Jafari R, Karimzadeh H and Ramezani N. 2015. Salinity zonation of soils in the southeastern region of Isfahan province using terrestrial and *TM* data. *Journal of Water and Soil Science* 71(19): 31-44 (In Persian).
- Makhdoum M, Darvishsefat AA, Jafarzadeh H and Makhdoum A. 2013. *Environmental Evaluation and Planning by Geographic Information System*. Tehran University Press, Tehran (In Persian).
- Maximo FA, Dennis LC, James DO, John M and Stephen RK. 2013. Modeling a sustainable salt tolerant grass-livestock production system under saline conditions in the western San Joaquin Valley of California. *Sustainability* 5: 3839-3857.
- Medjani F, Aissani B, Labar S, Djidel M, Ducrot D, Masse A and Hamilton CML. 2017. Identifying saline wetlands in an arid desert climate using Landsat remote sensing imagery. Application on Ouargla Basin, southeastern Algeria. *Arabian Journal of Geosciences* 10: 176.
- 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.
- Morshed M, Islam T and Jamil R. 2016. Soil salinity detection from satellite image analysis: an integrated approach of salinity indices and field data. *Environmental Monitoring and Assessment* 188: 119.
- Nawar S, Buddenbaum H and Hill J. 2015. Digital mapping of soil properties using multivariate statistical analysis and *ASTER* data in an arid region. *Remote Sensing* 2: 1181-1205.
- Norouzi A, Homaie M and Farshad A. 2013. Estimation of surface soil salinity using Landsat satellite images: Comparison of classical statistic with spatial statistic models. *Journal of Range and Watershed Management* 4(66): 609-620 (In Persian).

- Pattanaaik, SK, Singh OP, Sahoo RN and Singh DK. 2008. Irrigation induced soil salinity mapping through principal component analysis of remote sensing data. *Journal of Agricultural Physics* 8: 29-36.
- Pishnamaz M, Rezaei Moghadam MH and Feizizadeh B. 2017. Study indexes and mapping of soil salinity using remote sensing data. *RS & GIS for Natural Resources* 8(6): 85-96.
- Trnka M, Kersebaum KC, Eitzinger J, Hayes M, Hlavinka P, Svoboda M, Dubrovsky M, Semeradova D, Wardlow B, Pokorny E, Mozny M, Wilhite D and Zalud Z. 2013. Consequences of climate change for the soil climate in central Europe and the central plains of the United States. *Climate Change* 120: 405-418.
- Wang F, Chen X, Luo G, Ding J and Chen X. 2013. Detecting soil salinity with arid fraction integrated index and salinity index in feature space using Landsat TM imagery. *Journal of Arid Land* 5: 340-353.
- Yang C, Everitt JH, Fletcher RS, Jensen RR and Mausel PW. 2009. Evaluating AISA hyperspectral imagery for mapping black mangrove along the South Texas Gulf Coast. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 75: 425-435.
- Zaker M, Emami H, Astaraei A and Fotovat A. 2018. Soil physical properties as affected by potassium and salinity of irrigation water. *Applied Soil Research*, 6(1): 51-61 (In Persian).