

نشریه مرتع و آبخیزداری
دوره ۶۶، شماره ۸، زمستان ۱۳۹۲
۶۰۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۶/۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۱/۱۱

برآورد شوری خاک سطحی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست: مقایسه آمار کلاسیک با مدل‌های آمار مکانی

- ❖ **علی اکبر نوروزی^۱**: دانش‌آموخته دکتری گروه خاک‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس
- ❖ **مهدی همایی***: استاد گروه خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس
- ❖ **عباس فرشاد**: استادیار دانشکده علوم زمین دانشگاه توئنته هلند

چکیده

شوری خاک یکی از عوامل مهم محدودکننده رشد گیاهان و تخریب اراضی است، لیکن مشاهدات زمینی برای تعیین شوری خاک بسیار زمان‌بر و پرهزینه است. کاربرد مدل‌های پیش‌بینی و برآورد شوری خاک به کمک مدل‌های آمار مکانی در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) در مقایسه با آمار کلاسیک، با توجه به فرایند پیچیده آن، مناسب و نسبتاً ارزان است. در این پژوهش با استفاده از داده‌های هدایت الکتریکی خاک به دست آمده از ۲۳۶ نقطه در دشت گرمسار به بررسی رابطه همبستگی بین مقادیر هدایت الکتریکی با ۲۷ متغیر به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای لندست (شامل شاخص‌های پوشش گیاهی، شاخص شوری، باندهای ۱ تا ۷ ماهواره، شاخص مؤلفه‌های اصلی، و شاخص انتقال طیفی) اقدام گردید. به کمک روش تحلیل عاملی و شاخص شباهت در برنامه SPSS متغیرها به سه دسته تقسیم شد و بر اساس بالاترین ضریب همبستگی (۰/۵۸ و ۰/۶۰)، دو مدل به منظور پیش‌بینی شوری و تهیه نقشه هدایت الکتریکی خاک اشتقاق گردید. به موازات این کار، مدل‌های تخمینگر به منظور تهیه نقشه شوری از اطلاعات نقاط نمونه‌برداری شده در محیط ArcGIS با استفاده از مدل آمار مکانی رگرسیون حداقل مربعات معمولی (OLSR) اشتقاق و نقشه خطای تخمین با استفاده از شاخص Morans تهیه شد. نتایج نشان داد میزان دقت مدل‌های به دست آمده از روش OLSR با مدل‌های حاصل از روش‌های آمار کلاسیک یکسان است. مزیت استفاده از روش‌های آمار مکانی ارائه نقشه مقادیر تخمینی شوری و توزیع مکانی خطای تخمین است. بر این اساس، مدل‌های آمار مکانی، افزون بر داشتن دقت مناسب، به دلیل ارائه نقشه پراکنش نقاط، نقشه خطا، و عدم نیاز به تبادل اطلاعات بین نرم‌افزارهای مختلف نسبت به آمار کلاسیک برتری دارند.

واژگان کلیدی: آمار کلاسیک، آمار مکانی، رگرسیون حداقل مربعات معمولی (OLSR)، شاخص Morans

۱. آدرس فعلی: استادیار پژوهشی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

مقدمه

آمار کلاسیک یا آمار سنتی شاخه‌ای از علم آمار است که در آن اجزا یا نمونه‌هایی که از کل جامعه به منظور شناخت برداشت می‌شود فاقد اطلاعات موقعیتی در فضا است و، در نتیجه، مقدار اندازه‌گیری شده یک کمیت معین در یک نمونه خاص هیچ‌گونه اطلاعاتی درباره مقدار آن کمیت در نمونه‌ای دیگر به فاصله معلوم ارائه نخواهد داد. به عبارت دیگر، در آمار کلاسیک به موقعیت فضایی نمونه‌ها توجه نمی‌شود و تحلیل‌ها مستقل از مکان و توزیع فضایی آن‌ها انجام می‌شود. در این روش راه‌های جمع‌آوری، خلاصه‌سازی، و نتیجه‌گیری از داده‌ها بررسی می‌شود و برای گستره وسیعی از علوم کاربرد دارد. هنگامی که داده‌ها از طریق نمونه‌برداری جمع‌آوری شوند، رفتار موجود در یک مجموعه آزمایشی به کمک نتایج عددی، نمودار، و جداول قابل ارائه خواهد بود. در حالی که در روش آمار مکانی، علاوه بر مقدار یک کمیت معین در یک نمونه، به موقعیت مکانی آن نیز توجه می‌شود. بنابراین، می‌توان به موقعیت فضایی نمونه‌ها همراه با مقدار کمیت مورد نظر به صورت توأمان توجه کرد.

شوری یکی از عوامل مهم تخریب اراضی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که از طریق محدود کردن رشد گیاه باعث کاهش تولیدات کشاورزی می‌شود. شناسایی و پهنه‌بندی خاک‌های شور غالباً، به دلیل تغییرپذیری زمانی و مکانی آن، مشکل است [۹]. به منظور تهیه نقشه‌های موضوعی با استفاده از روش‌های سنتی به آنالیز تعداد زیادی نمونه در آزمایشگاه نیاز است که با صرف هزینه و زمان همراه است. در این میان، کاربرد روش‌های دورکاری ماهواره‌ای باعث صرفه‌جویی زیادی در هزینه و زمان می‌شود و حتی موجب افزایش دقت

تخمین‌ها می‌گردد. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که همبستگی بالایی بین مقادیر بازتاب در تصاویر ماهواره‌ای با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سطح خاک، به‌ویژه شوری خاک، وجود دارد [۹]. این ارتباط معمولاً با استفاده از روش‌های رگرسیونی بررسی شده است. بر این اساس، با در اختیار داشتن اطلاعات رقومی باندهای مختلف ماهواره‌ای می‌توان به شناسایی ویژگی‌های خاک اقدام نمود [۱۱، ۱۶]. در برخی تحقیقات، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، عکس‌های هوایی و بازتاب‌سنجی زمینی در قالب بررسی همبستگی شاخص‌های شوری با میزان شوری خاک نقشه‌های پهنه‌بندی شوری خاک تهیه شده است [۹، ۱۷]. تحقیقات نسبتاً زیادی در زمینه استفاده از روش‌های آماری و زمین آماری برای به نقشه درآوردن ویژگی‌های خاک به کمک سری زمانی داده‌های ماهواره‌ای انجام شده است. مثلاً از داده‌های TM ماهواره لندست و داده‌های AVHRR حاصل از NOAA [۳، ۱۲] و نیز داده‌های ETM⁺ و ASTER برای بررسی غلظت فسفر [۱۳] و از داده‌های ماهواره SPOT2 برای شناسایی شوری خاک بهره گرفته شده است [۵].

در بیشتر مطالعاتی که در سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی^۱ (GIS) انجام یافته از مدل‌های آمار مکانی به منظور بررسی روابط آماری بین نقاط نمونه‌برداری شده استفاده شده است. تحقیقات متعددی در زمینه کاربرد مدل‌های آمار مکانی در پیش‌بینی شوری خاک در دنیا انجام شده است [۱، ۴، ۶، ۱۳، ۱۵]. در همه این مطالعات، شوری خاک از طریق بررسی و تحلیل آماری آن با عوامل محیطی و شاخص‌های طیفی ماهواره‌ای برآورد گردیده است. از جمله مدل‌های

1. Geographic Information System

روش شناسی منطقه مطالعاتی

محدوده مورد مطالعه بخشی از دشت گرمسار در شهرستان گرمسار استان سمنان است. این دشت با وسعت ۵۱۳۵ کیلومتر مربع، از نظر موقعیت جغرافیایی، بین طول‌های $52^{\circ}30'$ و $52^{\circ}00'$ شرقی و عرض‌های $35^{\circ}20'$ تا $35^{\circ}00'$ شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). متوسط بارندگی طولانی مدت سالانه منطقه برابر ۱۲۰ میلی‌متر، میزان تبخیر و تعرق ۱۲۰۰ میلی‌متر در سال، حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته برابر ۷۰ میلی‌متر، میانگین حداکثر و حداقل دما به ترتیب ۴۵٫۸ و ۲۲- درجه سانتی‌گراد است. اقلیم منطقه بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن اصلاح‌شده فراخشک سرد تا خشک بیابانی است.

جمع‌آوری داده‌ها نمونه‌برداری خاک

در این پژوهش تعداد ۲۳۶ نمونه خاک به روش نمونه‌برداری تصادفی (در داخل شبکه‌های 1×1 کیلومتری) از عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری سطح خاک تهیه شد و، پس از آماده‌سازی‌های اولیه، برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل توزیع اندازه ذرات، هدایت الکتریکی عصاره اشباع، و واکنش نمونه‌های خاک با روش‌های استاندارد آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد. پیمایش صحرائی و نمونه‌برداری از خاک منطبق بر زمان اخذ تصاویر ماهواره‌ای و مختصات دقیق نقاط نمونه‌برداری به کمک سامانه مکان‌یابی جغرافیایی^۴ (GPS) ثبت گردید.

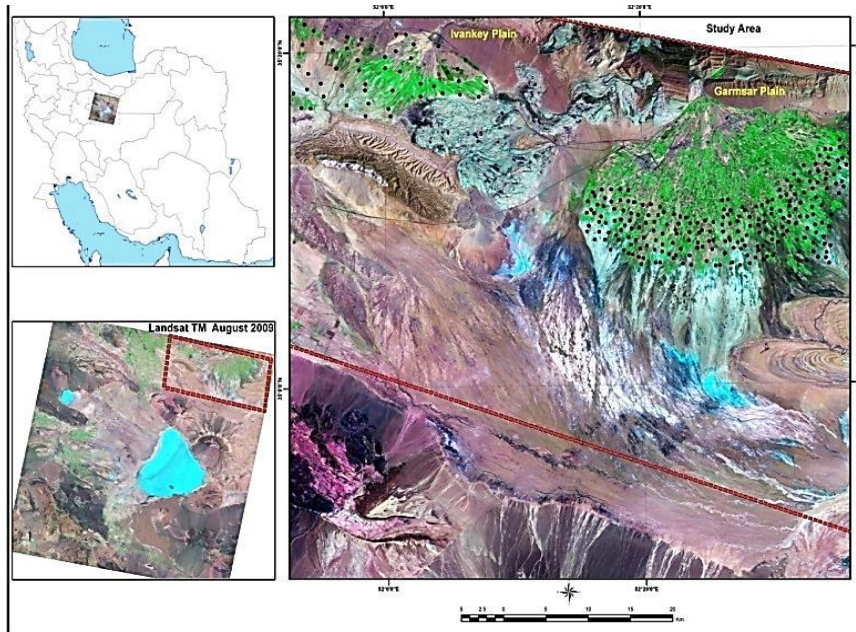
آمار مکانی موجود در محیط GIS می‌توان به روش رگرسیون حداقل مربعات معمولی^۱ (OLSR) اشاره کرد. در این روش مقدار کمیت مورد نظر به گونه‌ای برآورد می‌شود که کمترین فاصله را با مقادیر مشاهده‌ای داشته باشد. بررسی میزان رابطه بین متغیر وابسته با سایر متغیرهای مستقل از طریق ارائه نقشه پراکنش خطا بیان می‌شود [۱، ۱۰].

سه مدل آماری شامل OLSR، رگرسیون مکانی^۲، و مدل کریجینگ با باقی‌مانده تصحیح‌شده^۳ به منظور تخمین شوری خاک از روی داده‌های ماهواره‌ای مقایسه شدند. نتایج نشان داد که الگوی مکانی در باقی‌مانده‌های حاصل از مدل‌های رگرسیون حداقل مربعات معمولی همیشه با خودهمبستگی همراه است و وقتی که این باقی‌مانده‌ها با این مدل‌های رگرسیونی ترکیب می‌شوند، نتایج دقیق‌تری به‌دست خواهد آمد [۷]. در پژوهشی دیگر دقت تصاویر ماهواره‌ای IKONOS، LANDSAT، و ASTER را در تخمین شوری خاک بررسی نمودند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که داده‌های IKONOS، به دلیل دارا بودن قدرت مکانی بسیار بالا، دقت بیشتری در تفکیک اراضی شور از غیر شور دارد [۸]. همچنین، در برخی دیگر از تحقیقات به دقت مناسب تصاویر LANDSAT و SPOT در پایش شوری خاک اشاره شده است [۱۴].

با توجه به اینکه تا کنون تحقیقات چندانی در زمینه تخمین میزان شوری خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور با استفاده از تلفیق روش‌های آمار مکانی و داده‌های ماهواره‌ای انجام نگردیده است، این پژوهش با هدف مقایسه روش‌های آمار کلاسیک و آمار مکانی برای مدل‌سازی و برآورد شوری خاک و تلفیق آن با تصاویر ماهواره‌ای لندست در محیط GIS در دشت گرمسار انجام شد.

1. Ordinary Least Square
3. Modified Residual Kriging Model

2. Spatial Autoregressive
4. Global Positioning System



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی و محل نقاط نمونه‌برداری شده خاک

مدل گرافیکی^۵ (GMD) تهیه و آزمون شد. شاخص‌های ایجادشده شامل ۵ شاخص پوشش گیاهی (SAVI, SATVI, MSAVI, EVI, NDVI)، ۶ شاخص شوری، رطوبت و روشنایی (SI3, SI2, SI1)، ۳ مؤلفه اصلی (PCA2, PCA1)، ۶ شاخص انتقال طیفی (PCA3 Tasseled cap 1, 2, 3, 4, 5, 6)، و ۷ باند تصویر ماهواره‌ای لندست است که در مجموع ۲۷ متغیر برای تجزیه و تحلیل آماری و تعیین ارتباط با شوری خاک استفاده شد. در مرحله بعد، داده‌های هدایت الکتریکی افق سطحی خاک با استفاده از برنامه ARCGIS بر روی هر یک از ۲۷ متغیر همپوشانی^۶ شد و پس از تلاقی^۷ مقادیر طیفی هر یک از شاخص‌ها بر اساس مختصات هر نقطه به صورت جداول توصیفی استخراج و ارائه گردید. سپس، این جداول در برنامه SPSS تجزیه و تحلیل شد و روابط حاکم بین متغیرها با روش حداقل مربعات معمولی به دست آمد.

تهیه تصاویر ماهواره‌ای

در این پژوهش، تصاویر سنجنده^۱ TM ماهواره لندست در ردیف ۳۶ و گذر ۱۶۴ از آرشیو تارنمای سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده^۲ (USGS) تهیه شد. سنجنده TM دارای قدرت تفکیک مکانی و زمانی ۳۰ متر و ۱۶ روز و ۷ باند طیفی (باندهای ۱، ۲، و ۳ در گستره طیف مرئی، باندهای ۴، ۵، و ۷ در گستره طیف مادون قرمز نزدیک تا دور، و باند ۶ در طیف حرارتی) است.

استخراج شاخص‌های طیفی

تصاویری که دارای تصحیحات اتمسفری، رادیومتری، و هندسی بود با نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ کنترل و سپس از آن‌ها استفاده شد. در مرحله بعد شاخص‌های پوشش گیاهی، شوری، مؤلفه‌های اصلی^۳ (PCA)، و انتقال طیفی^۴ به صورت یک

1. Thematic Mapper
4. Tasseled Cap

2. United States Geological Survey
5. Graphic Meta Data

3. Principal Component Analysis
6. Overlay

7. cross

متناسب با قابلیت هر یک از آن‌ها در هر مرحله استفاده گردید.

برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای، تولید لایه‌های اطلاعاتی، و تهیه نقشه از نرم‌افزارهای ArcGIS 9.3، ENVI 4.7، ERDAS 9.2، و IDRISI 15

جدول ۱. مقادیر میانگین و انحراف معیار متغیرها و تحلیل همبستگی هر یک از آن‌ها با مقدار هدایت الکتریکی خاک

متغیر	تعریف شاخص‌ها	میانگین	انحراف معیار	همبستگی با EC (r)
EC	Electrical Conductivity (dS/m)	۱۱,۶۷	۷,۴۲	۱
SI1	Salinity Index 1 ($\sqrt{G \times R}$)	۱۴۱,۰۵	۲۰,۷۳	۰,۶۰**
SI2	Salinity Index 2 ($\sqrt{G^2 + R^2 + NIR^2}$)	۱۵۶,۸۷	۲۴,۳۳	۰,۶۵**
SI3	Salinity Index 3 ($\sqrt{G^2 + R^2}$)	۱۱۴,۸۶	۲۷,۰۲	۰,۷۳**
NDSI	Normalized Differential Salinity Index (R-NIR/ R+NIR)	-۰,۰۷۶	۰,۱۳	۰,۶۱**
BI	Brightness Index ($\sqrt{R^2 + NIR^2}$)	۱۴۱,۰۵	۲۰,۷۳	۰,۶۰**
NDVI	Normalized Differential Vegetation Index (NIR-R/ NIR+R)	۰,۰۷۶	۰,۱۳	-۰,۶۱**
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index (NIR-R/ NIR+R+L)	۰,۱۱۴	۰,۱۹	-۰,۶۱**
SATVI	Soil Adjusted Total Vegetation Index	-۸۴,۹	۲,۹۴	-۰,۵۴**
MSAVI	Modified Soil Adjusted Vegetation Index	۰,۱۲	۰,۱۹	-۰,۶۶**
EVI	Enhanced Vegetation Index	-۰,۱۹	۰,۳۰	۰,۶۴**
NDMI	Normalized Differential Moisture Index	-۰,۱۴۳	۰,۰۹	-۰,۵۵**
BAND1	Reflectance Value of Band 1 (Blue visible)	۱۱۴,۸	۲۰,۷	۰,۷۶**
BAND2	Reflectance Value of Band 2 (Green visible)	۶۸,۳	۱۴,۵۵	۰,۷۵**
BAND3	Reflectance Value of Band 3 (Red Visible)	۹۲,۳	۲۳,۰۳	۰,۷۲**
BAND4	Reflectance Value of Band 4 (Near Infrared)	۱۰۵,۳	۱۳,۵۱	۰,۱۸**
BAND5	Reflectance Value of Band 5 (Middle Infrared)	۱۴۲,۱	۲۶,۷۱	۰,۶۷**
BAND6	Reflectance Value of Band 6 (Thermal)	۱۷۰,۳	۵,۸۲	۰,۵۴**
BAND7	Reflectance Value of Band 7 (Far Infrared)	۷۹,۷۶	۲۰,۱۸	۰,۷۲**
PCA1	Principal Component 1	۳۰,۴۳	۳۹,۳	۰,۷۳**
PCA2	Principal Component 2	۰,۹۹	۱۵,۷۴	-۰,۶۵**
PCA3	Principal Component 3	۱,۶۲	۱۸,۶۵	-۰,۶۵**
TAS1	TASSELED CAP1 (Brightness)	۲۴۰,۴	۳۸,۵۳	۰,۷۰**
TAS2	TASSELED CAP2 (Greenness)	-۲۴,۴	۲۱,۵	-۰,۷۱**
TAS3	TASSELED CAP3 (Wetness)	-۲۹,۹	۱۱,۹۷	-۰,۵۵**
TAS4	TASSELED CAP4	۴۳,۷	۶,۱۶	۰,۶۷**
TAS5	TASSELED CAP5	-۱۸,۳	۶,۶۸	-۰,۴۷**
TAS6	TASSELED CAP6	-۲,۷۳	۱,۴۷	-۰,۴۴**

** اختلاف معنی‌دار در سطح ۱٪ ($P < 0.001$)

خاک در آزمایشگاه، آزمون نرمال بودن داده‌ها به روش کلموگروف-اسمیرنف انجام شد. میانگین هدایت الکتریکی خاک سطحی برابر با $۱۱/۶۷ \pm ۷/۴۲$ دسی

نتایج و بحث

آمار توصیفی و تجزیه و تحلیل همبستگی

پس از اندازه‌گیری مقدار هدایت الکتریکی محلول

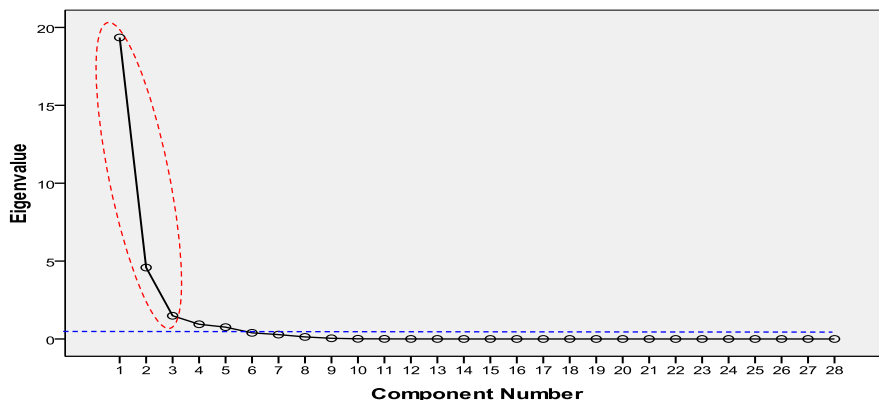
باندهای ۶ و ۷، شاخص انتقال طیفی ۲ و ۳، شاخص‌های NDSI و NDMI؛ گروه دوم (مشمول بر ۱۳ شاخص: باندهای ۱، ۲، ۳، ۴، و ۵ تصاویر لندست، ۴ شاخص شوری و روشنایی، ۳ شاخص مؤلفه اصلی، و ۱ شاخص انتقال طیفی)؛ گروه سوم (مشمول بر ۳ شاخص انتقال طیفی ۴، ۵، و ۶). همان طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، گروه نخست ۴۱ درصد، گروه دوم ۳۹ درصد، و گروه سوم فقط ۳ درصد تغییرات هدایت الکتریکی را پوشش می‌دهد. شاخص‌های گروه سوم، به دلیل آنکه درصد اندکی از واریانس هدایت الکتریکی را پوشش می‌دهد، از تجزیه و تحلیل‌ها حذف شد. بنابراین، در حالت کلی، از ۲۴ متغیر متعلق به گروه‌های ۱ و ۲ در تجزیه و تحلیل‌ها استفاده شد.

رابطه EC با متغیرهای گروه اول

متغیرهای گروه اول (۱۱ متغیر) متغیرهای مستقل در نظر گرفته شد. سپس، با استفاده از روش رگرسیون مرحله‌ای^۳ ارتباط آن‌ها با مقدار هدایت الکتریکی خاک به عنوان متغیر وابسته بررسی شد. در این مرحله تعداد ۸ مدل، که دارای بهترین برازش بودند، انتخاب گردید. بر اساس مقدار ضریب همبستگی (R^2)، خطای استاندارد (SE)، و درجه تورم واریانس از این ۸ مدل یک مدل، که دارای بیشترین دقت بود، شناسایی و انتخاب شد. مدل انتخابی رابطه بین مقدار هدایت الکتریکی خاک با متغیرهای باند ۷ تصاویر لندست و شاخص انتقال طیفی ۳ با ضریب همبستگی برابر ۰/۵۸، درجه تورم واریانس ۶/۰۲، و خطای استاندارد ۴/۸ را نشان می‌دهد (جدول ۲). این به این معناست که مدل به دست آمده قادر است حدود ۵۸ درصد تغییرات شوری در منطقه را پیش‌بینی کند.

زیمنس بر متر اندازه‌گیری شد. جدول ۱ تعداد ۲۷ متغیر به دست آمده از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای لندست را به همراه برخی از روابط ریاضی آن‌ها نشان می‌دهد. این متغیرها مشتمل بر ۵ گروه است: شاخص‌های شوری، شاخص‌های خاک و پوشش گیاهی، باندهای ۱ تا ۷ تصاویر لندست، شاخص مؤلفه‌های اصلی (PCA)، و شاخص انتقال طیفی (Tasseled Cap). میانگین و انحراف معیار این متغیرها به همراه ضریب همبستگی هر یک از آن‌ها با مقدار هدایت الکتریکی خاک (EC) محاسبه گردید (جدول ۱). همان گونه که مشاهده می‌شود، همه شاخص‌ها همبستگی معنی‌داری در سطح ۱ درصد با ضریب هدایت الکتریکی خاک نشان می‌دهند، به طوری که بالاترین ضرایب همبستگی بین هدایت الکتریکی خاک و باندهای ۱، ۲، ۳، و ۷ (به ترتیب برابر ۰/۷۶، ۰/۷۵، ۰/۷۲، و ۰/۷۲)، مؤلفه اصلی ۱ (۰/۷۳)، انتقال طیفی ۱ و ۲ (به ترتیب برابر ۰/۷ و ۰/۷۱-) به دست آمد و کمترین آن در باند ۴ به مقدار ۰/۱۸. همه شاخص‌های پوشش گیاهی با مقدار EC خاک همبستگی معنی‌دار و منفی نشان دادند. این همبستگی منفی منطقی است و دلیل آن کاهش مقدار پوشش گیاهی با افزایش سطح شوری خاک (EC) است.

از آنجا که همه ۲۷ متغیر به دست آمده همبستگی معنی‌داری با هدایت الکتریکی خاک نشان دادند، به منظور کاهش تعداد متغیرها و گروه‌بندی آن‌ها در چارچوب شاخص‌های مرتبط و همسان از روش تجزیه و تحلیل عاملی^۱ استفاده شد. با استفاده از این روش، از بین شاخص‌های ارائه شده تعدادی شاخص با در نظر گرفتن معیار مقادیر ویژه^۲ بالاتر از یک انتخاب گردید. شاخص‌های انتخابی در سه دسته طبقه‌بندی شد: گروه اول (مشمول بر ۱۱ شاخص: ۵ شاخص پوشش گیاهی،



شکل ۲. طبقه‌بندی متغیرها به منظور انتخاب شاخص‌ها بر اساس مقادیر ویژه بزرگ‌تر از یک

می‌شود که کلاس‌های همسایه (از نظر کمی) در مجاور یکدیگر (از نظر مکانی) در منطقه واقع شده‌اند. بر این اساس، می‌توان این احتمال را در نظر گرفت که کلاس‌های پایین با گذشت زمان به تدریج به کلاس‌های مجاور بالاتر خود تبدیل خواهند شد. بنابراین، در این منطقه به اتخاذ رویکردهای مدیریتی مناسب برای جلوگیری از افزایش روند تخریب خاک نیاز است.

شکل ۳ نقشه پهنه‌بندی مقدار هدایت الکتریکی خاک را با استفاده از مدل اشتقاقی متغیرهای گروه اول به دو صورت- مقادیر مطلق و مقادیر طبقه‌بندی‌شده- نشان می‌دهد. تعداد ۵ کلاس شوری شامل ۴، ۸-۴، ۱۶-۸، ۳۲-۱۶، و ۳۲ > دسی‌زیمنس بر متر در منطقه به دست آمد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بخش اعظم منطقه در دو کلاس شوری ۱۶-۸ و ۳۲-۱۶ دسی‌زیمنس بر متر قرار گرفته است که در وضعیت نامطلوبی است. اگر در این نقشه دقت شود، ملاحظه

جدول ۲. رابطه هدایت الکتریکی خاک و متغیرهای انتخابی گروه اول

مدل اشتقاقی	R^2_{adj} (SE)
$EC = -14/55 + 0/476 \times Band_v + 0/393 \times Tasseled\ cap_v$	۰,۵۸ (۴/۸)

SE خطای استاندارد تخمین است و R^2_{adj} ضریب همبستگی تصحیح شده

با هدایت الکتریکی خاک بود (جدول ۳). مقدار ضریب همبستگی در مدل اشتقاق یافته برابر ۰,۶۰ و خطای استاندارد برابر ۴,۷ به دست آمد. بر این اساس، مدل به دست آمده قادر است ۶۰ درصد تغییرات شوری را در منطقه پیش‌بینی نماید.

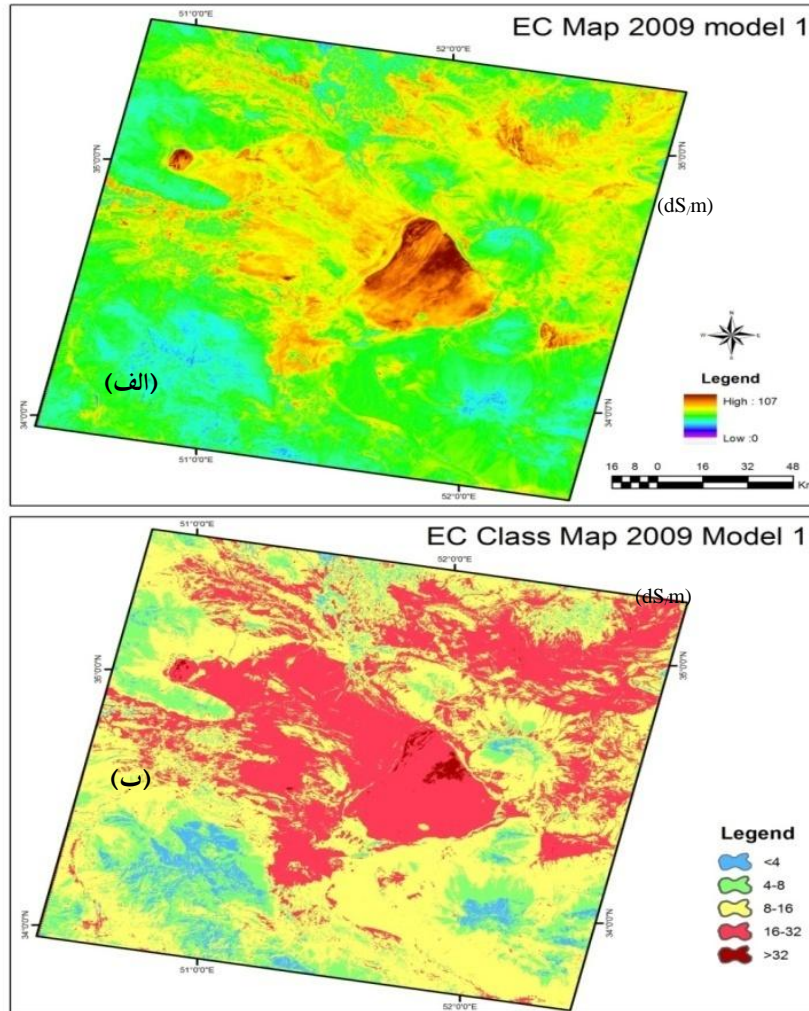
به طور کلی، دو مدل به دست آمده دارای دقت تقریباً یکسانی در تخمین میزان شوری خاک در

رابطه EC با متغیرهای گروه دوم

مشابه قبل، رابطه بین متغیرهای گروه دوم (۱۳ متغیر) با هدایت الکتریکی خاک به روش رگرسیون مرحله‌ای و بر اساس معیارهای ضریب همبستگی (R^2)، خطای استاندارد (SE)، و درجه تورم واریانس بررسی شد. مناسب‌ترین مدل دربرگیرنده ارتباط بین شاخص‌های باندها ۱ تصاویر لندست و مؤلفه اصلی ۲

نمایانگر کم‌برآوردی مدل در تخمین شوری خاک باشد (جدول ۲ و ۳).

منطقه هستند. از طرف دیگر، عرض از مبدأ در هر دو مدل مقداری منفی به دست آمده است که می‌تواند

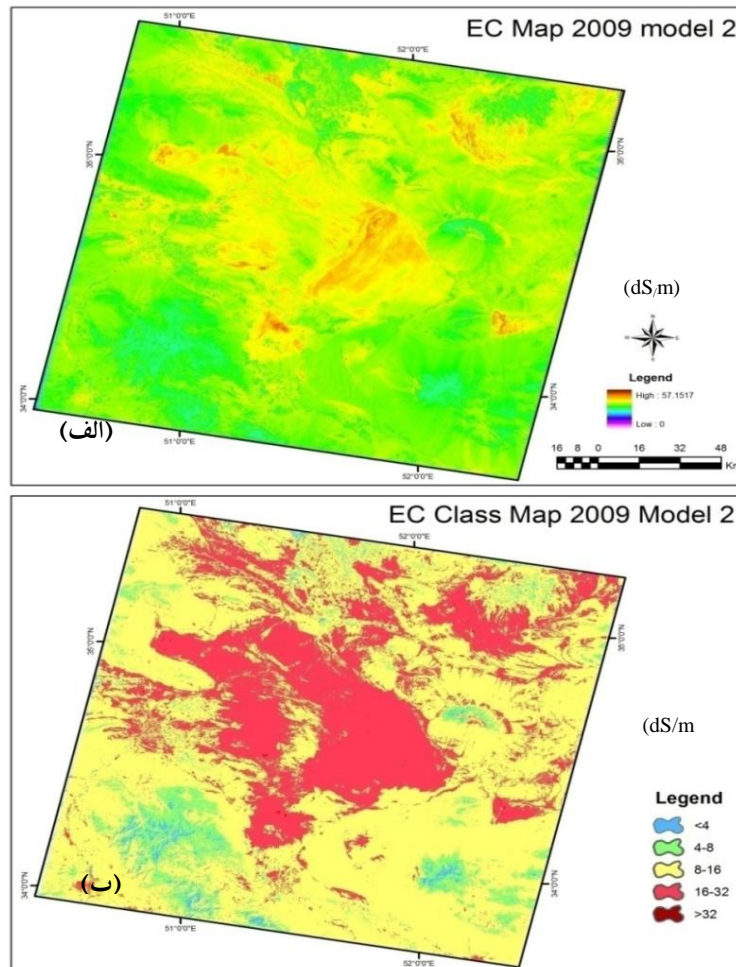


شکل ۳. پهنه‌بندی شوری خاک (EC) به دو صورت مطلق (الف) و طبقه‌بندی شده (ب) بر اساس مدل اشتقاقی گروه اول

جدول ۳. رابطه بین هدایت الکتریکی خاک و متغیرهای انتخابی گروه دوم

مدل اشتقاقی	R^2_{adj} (SE)
$EC = -۳۱/۶۶ + ۰/۳۶۷ \times Band_1 + ۰/۱۴۶ \times PCA_7$	۰/۶۰ (۴/۷)

SE خطای استاندارد تخمین است و R^2_{adj} ضریب همبستگی تصحیح شده



شکل ۴. پهنه‌بندی شوری خاک (EC) به دو صورت مطلق (الف) و طبقه‌بندی شده (ب) بر اساس مدل اشتقاقی گروه دوم

به‌دست‌آمده از روش رگرسیون مرحله‌ای دارند، به طوری که متغیرهای باند ۷ و انتقال طیفی ۳ از میان متغیرهای گروه اول و متغیرهای باند ۱ و مؤلفه اصلی ۲ از بین متغیرهای گروه دوم مناسب‌ترین ارتباط را با شوری خاک نشان دادند. مقدار ضریب همبستگی مدل به ازای متغیرهای گروه اول برابر ۰/۵۷ و در گروه دوم برابر ۰/۵۹ به‌دست آمد. همچنین، مقادیر آماره‌های ضریب تورم واریانس و AIC برای متغیرهای گروه اول برابر ۶/۰۲ و ۱۴۱۶ و برای گروه دوم برابر ۶/۱۷ و ۱۴۰۵ محاسبه شد.

به منظور ارزیابی توانمندی روش‌های مدل‌سازی مبتنی بر آمار مکانی نسبت به روش رگرسیون مرحله‌ای برنامه SPSS از روش حداقل مربعات معمولی (OLSR) در برنامه ArcGIS استفاده شد. در این روش میزان همبستگی واریانس مقادیر باقی‌مانده‌ها^۱ با میزان تغییرات متغیرهای وابسته مد نظر قرار می‌گیرد [10]. همان‌گونه که در جداول ۴ و ۵ نشان داده شده است، مدل‌های اشتقاق‌یافته بر اساس روش OLSR تطابق بسیاری با مدل‌های

1. residual

جدول ۴. مدل اشتقاقی و دقت آن با استفاده از متغیرهای گروه اول در محیط ArcGIS

مدل اشتقاقی	VIF	AIC	R ² _{adj}
$EC = -14/5 + 0/476 \times Band_v + 0/39 \times Tasseled\ cap_r$	۶,۰۲	۱۴۱۶	۰,۵۷

SE خطای استاندارد تخمین است، R²_{adj} ضریب همبستگی تصحیح شده، و VIF درجه تورم واریانس و AIC (Akaike's Information Criterion)

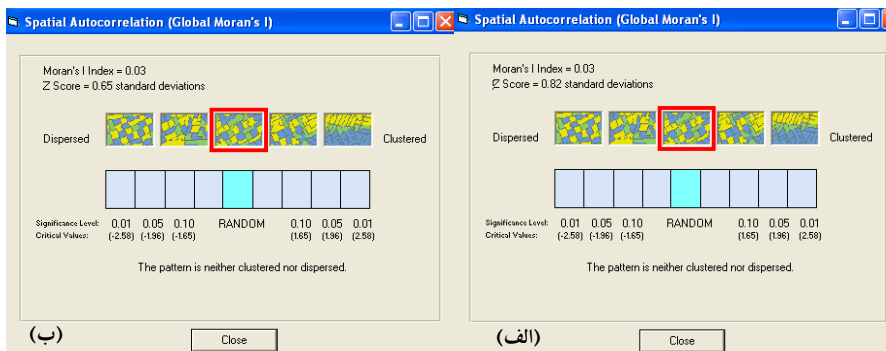
جدول ۵. مدل اشتقاقی و دقت آن بر مبنای متغیرهای گروه دوم در محیط ArcGIS

مدل اشتقاقی	VIF	AIC	R ² _{adj}
$EC = -31/6 + 0/376 \times Band_1 + 0/147 \times PCA_r$	۶,۱۷	۱۴۰۵	۰,۵۹

SE خطای استاندارد تخمین است، R²_{adj} ضریب همبستگی تصحیح شده، و VIF درجه تورم واریانس و AIC (Akaike's Information Criterion)

خطا یا باقی مانده را بررسی کرد. مقدار مطلوب این شاخص زمانی است که توزیع خطا به صورت کاملاً تصادفی باشد و توزیع خوشه‌ای یا پخشیده حالت مناسبی نداشته باشد. بر اساس شکل ۵، توزیع مقادیر باقی مانده در متغیرهای گروه‌های اول و دوم به صورت تصادفی و با مقدار شاخص مورانز برابر با ۰,۳۳ به دست آمد. این نمایانگر توانمندی روش OLSR در مدل‌سازی تخمین میزان شوری خاک است. از دیگر مزایای استفاده از روش‌های آمار مکانی در برنامه ArcGIS می‌توان به صرفه‌جویی در زمان از طریق کاهش تبادل اطلاعات بین نرم‌افزارهای آماری و GIS اشاره کرد.

مزیت روش OLSR در برنامه ArcGIS آن است که در این روش، افزون بر امکان محاسبه خطای استاندارد، می‌توان متغیرهای تکراری و همگرا را از طریق محاسبه درجه تورم واریانس (VIF) از محاسبات حذف کرد. آزمون بروش-پگان (Brush-Pagan) نشان داد که خطای مدل به صورت ناهمگن و دارای حالت غیرایستگاهی است. ابزار آمار مکانی در نرم‌افزار ARCGIS قابلیت محاسبه خطای استاندارد را دارد و متغیرهای تکراری و همگرا را با برآورد درجه تورم واریانس (VIF) از محاسبات حذف می‌نماید. همچنین، با استفاده از شاخص مورانز^۱ ارائه شده در این برنامه می‌توان توزیع مقادیر

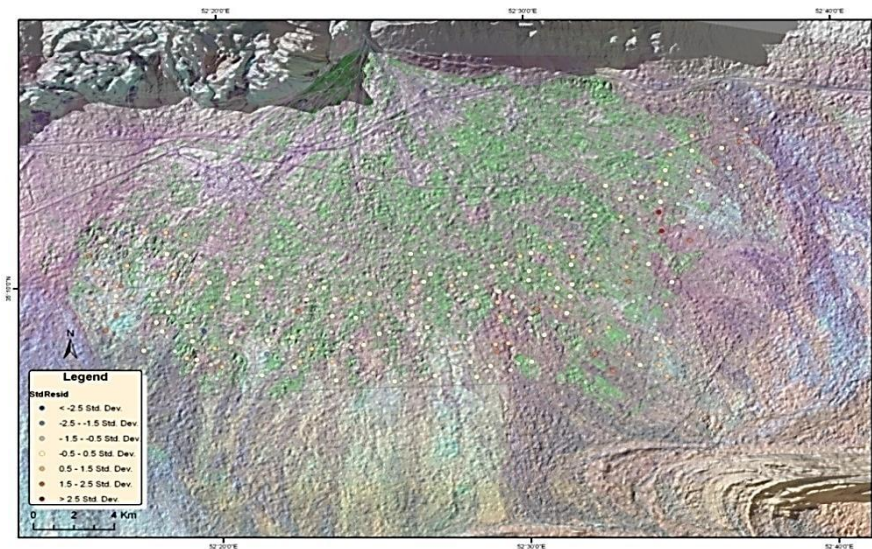


شکل ۵. توزیع شاخص مورانز در متغیرهای گروه اول (الف) و گروه دوم (ب)

1. Moran's I

نقاط قرمز رنگ خطای بیش از حد انتظار ($>2/5$ SE) و نقاط آبی رنگ خطای کمتر از حد انتظار ($<2/5$ SE) را نشان می‌دهند. میزان خطا در نقاط زرد رنگ حالت حد واسط را داراست (شکل ۶).

شکل ۶ نقشه توزیع خطا را در منطقه نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، توزیع خطا به صورت تصادفی است. به عبارتی، بین نقاط دارای خطا هیچ گونه ارتباطی وجود ندارد. این عدم ارتباط از طریق بررسی میزان نقاط داغ صورت می‌گیرد.



شکل ۶. نقشه توزیع خطا (نقاط قرمز نمایانگر بیش برآوردی است و نقاط آبی نمایانگر کم برآوردی مدل در تخمین شوری خاک)

برای تحلیل‌های لازم حذف می‌نماید و با توجه به دقت یکسان و مشابه با آنان روشی مناسب و مقرون به صرفه از نظر زمانی است. همچنین، نتایج به صورت نقشه‌های مکانی است و کاربر می‌تواند نقاط با خطای بالا را نیز مجدداً بررسی کند و یا از تحلیل‌های آماری حذف نماید.

تشکر و قدردانی

از همکاری‌های پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، دانشکده ITC هلند، و وزارت جهاد کشاورزی در تهیه تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی تشکر و قدردانی می‌شود.

نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان داد که کاربرد داده‌های ماهواره‌ای لندست روشی مناسب و کم هزینه برای برآورد شوری خاک سطحی است. همچنین، روش‌های مبتنی بر آمار مکانی، مانند روش رگرسیون حداقل مربعات معمولی، افزون بر دارا بودن دقت مناسب، نسبت به روش‌های آمار کلاسیک در توصیف رابطه بین شوری خاک و شاخص‌های طیفی آن، می‌تواند نقشه شوری و توزیع خطای مقادیر برآوردی را نیز به خوبی ارائه نماید که با نتایج محققان دیگر تطابق دارد [۸]، به طوری که نقل و انتقال داده‌های مکانی (GIS) به نرم‌افزارهای آماری را

References

- [1]. Al-Hassoun, S. (2009). Remote sensing of soil salinity in an arid areas in Saudi Arabia. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, IJCEE-IJENS 1(2).
- [2]. Andri Baltensweiler, S.Z. (2010). Modeling soil Acidity in Switzerland using spatial statistics tools. *Proceedings of the ESRI International User Conference*, July 12-16, 1493.
- [3]. Bishop, T.F.A., McBratney, A.B. (2001). A comparison of prediction methods for the creation of field extent soil property maps. *Geoderma*, 103: 149-160.
- [4]. Brunner, P., Li, H.T., Li, W.P., Kinzelbach, W. (2006). Generating electrical conductivity maps of soil by integrating measurements on the ground and remote sensing data, *International Journal of Remote Sensing*.
- [5]. Douaoui, A.E.K., Nicolas, H., Walter, C. (2006). Detecting salinity hazards within a semiarid context by means of combining soil and remote sensing data. *Geoderma*, 134: 217-230.
- [6]. Eldiery, A., Garcia, L., Reich, R.M. (2005). Estimating soil salinity from Remote sensing data in Corn Fields. Hydrology days, <http://hydrologydays.colostate.edu>.
- [7]. Eldeiry, A., Garcia, L.A. (2008a). Detecting soil salinity in alfalfa fields using spatial modeling and remote sensing. *Soil Science Society of American Journal*, 72(1), 201-211.
- [8]. Eldeiry, A., Garcia, L.A. (2008b). Spatial modeling of soil salinity using remote sensing, GIS, and field data, *VDM Verlag*, Saarbrücken, Germany.
- [9]. Fernández-Buces, N., Siebe, C., Cram, S., Palasio, J.L. (2006). Mapping soil salinity using a combined spectral response index for bare soil and vegetation (Case study in the former lake Texcoco, Mexico), *Journal of Arid Environments*, 65: 644-667.
- [10]. Fotheringham, A.S., Brunson, C., Charlton, M. (2002). Geographically Weighted Regression: The analysis of spatially varying relationships. Wiley and Sons, *Chichester*.
- [11]. Goulard, M., Voltz, M. (1992). Linear coregionalization model: tools for estimation and choice of cross variogram matrix. *Mathematical Geology*, 24: 269-286.
- [12]. Kertesz, M., Toth, T. (1994). Soil survey based on sampling scheme adjusted to local heterogeneity. *Agrokémia és Talajtan*, 43(1-2): 113-132.
- [13]. Rivero, R.G., Grunwald, S., Bruland, G.L. (2007). Incorporation of spectral data into multivariate geostatistical models to map soil phosphorus variability in a Florida wetland. *Geoderma*, 140: 428-443.
- [14]. Robbins, C.W., Wiegand, C.L. (1990). Field and laboratory measurements. *Agric. salinity assess and manage*, K.K. Tanji, ed., ASCE, Reston, Va., 203-219.
- [15]. Shrestha, R.P. (2006). Relating soil electrical conductivity to remote sensing and other soil properties for assessing soil salinity in northeast Thailand. *land degradation and development*, 17: 677-689.
- [16]. Van der Meer, F. (2000). Geostatistical approaches for image classification and assessment of uncertainty in geologic processing. In: *Advances in remote sensing and GIS analysis*. P.M. Atkinson and N.J. Tate (Eds.), 147-166.
- [17]. Verma, K.S., Saxena, R.K., Barthwal, A.K., Deshmukh, S.N. (1994). Remote sensing technique for mapping salt affected soils. *International Journal of Remote Sensing*, 15(9): 1901-1914.