

## مدل‌سازی و نقشه‌برداری شوری و رطوبت خاک با استفاده از سنجش از دور طیفی و راداری

صلاح شاه مرادی<sup>۱\*</sup>، حمیدرضا غفاریان مالامیری<sup>۲</sup>، محمد شریفی پیچون<sup>۳</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۹/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۴/۱۴)

### چکیده

شوری خاک ناشی از فرآیندهای طبیعی یا انسانی و یک خطر عمده زیست محیطی می‌باشد. همچنین کمبود رطوبت خاک که تأثیر منفی بر فعالیت‌های کشاورزی در مناطق کوهستانی که اکثر آب و هوای نیمه مرطوب می‌گذارند دارد. هدف اصلی این تحقیق نقشه‌برداری از شوری و رطوبت خاک واقع در قسمت غرب دریاچه ارومیه در کشور ایران با استفاده از تصاویر ماهواره‌های سنتینل ۱ و ۲ همراه با پنج الگوریتم شبکه عصبی می‌باشد. مدل‌های یادگیری، شبکه‌های عصبی چند لایه (MLP-NN)، عملکرد تابش پایه شعاعی (RBF-NN)، فرآیندهای گاوسی (GP)، رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) و جنگل-های تصادفی (RF) می‌باشند. ابتدا با استفاده از الگوریتم‌های مختلف شاخص‌های مختلف شوری و رطوبت خاک بدست آورده شدند. سپس با استفاده از ۶۰ نمونه خاک که از عمق ۵ تا ۱۵ سانتی‌متری خاک در طول بررسی میدانی در تاریخ ۱۳۹۸/۰۶/۱۸ همراه با زمان تصویر برداری سنتینل ۱ و ۲ برداشت شد، دقت‌سنجی انجام گرفت. در شاخص‌های شوری خاک مورد استفاده در تصاویر اپتیکی شاخص Salinity index با  $R^2 = 0/96$  شاخص بهینه برای برآورد شوری خاک با توجه به مقایسه با داده‌های زمینی بود. شاخص NDWI نیز برای برآورد رطوبت در تصاویر اپتیکی با دقت  $0/89$  دارای بالاترین میزان دقت در شاخص‌های مورد استفاده این پژوهش بوده است. میزان دقت برآورد رطوبت و شوری خاک در تصاویر رادار به ترتیب  $R^2 = 0/80$  و  $R^2 = 0/89$  بوده است. عملکرد پنج الگوریتم برای مدل‌سازی نیز با استفاده از خطای میانگین مربعات (RMSE) و ضریب همبستگی ( $R^2$ ) ارزیابی و مقایسه شد. نتایج نشان دادند که مدل GP بالاترین عملکرد پیش‌بینی (RMSE = 2 و  $R^2 = 0/82$ ) را نسبت به سایر مدل‌های یادگیری ماشین مورد استفاده در این تحقیق داشته است.

**واژه‌های کلیدی:** تصاویر اپتیکی، دریاچه ارومیه، سنتینل، شاخص‌های رطوبت و شوری خاک، شبکه عصبی مصنوعی

شاه‌مرادی ص، غفاریان مالامیری ح، شریفی پیچون م. ۱۴۰۱. مدل‌سازی و نقشه‌برداری شوری و رطوبت خاک با استفاده از سنجش از دور طیفی و راداری. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۰، شماره ۳. صفحه: ۴۳-۶۵.

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی-سنجش از دور گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه یزد، ایران

۲- استادیار گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه یزد، ایران

۳- استادیار گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه یزد، ایران

\* پست الکترونیک: [salah.shahmoradi@gmail.com](mailto:salah.shahmoradi@gmail.com)

## مقدمه

خاک و آب به دلیل نیاز آنها در تأمین غذا مورد استفاده بشر بخصوص در زمان کنونی با رشد فزاینده جمعیت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. منظور از اجزاء خاک، ذرات جامد، آب و هوا می‌باشد. نسبت این اجزاء و روابط آنها در خاک اهمیت زیادی در کشاورزی و رشد و نمو گیاهان داشته و در حاصلخیزی خاک تأثیر بسزایی دارند (Sharifi Kia, 2012). در این راستا یکی از مهمترین مسائل و مشکلاتی که در زمینه بهره‌وری از خاک به وجود می‌آید، مسئله شوری خاک<sup>۱</sup> است. شور شدن خاک‌ها و توسعه آن در مناطق خشک و نیمه خشک از جمله مخاطرات محیطی و انسانی است که در سال‌های اخیر مورد توجه واقع شده است و دامنه آن روزبه‌روز در حال افزایش است. هرچند که شور شدن خاک مانند سایر مخاطرات محیطی اثرات سریع و آنی ندارد اما به دلیل عواقبی که در زندگی بشر دارد در دنیای امروز بسیار مورد توجه قرار گرفته و به عنوان یک مخاطره شدید مدنظر قرار می‌گیرد، فرناندز و همکاران (Fernandez et al, 2006). خاک‌های شور یکی از معضله‌های کشاورزی در بسیاری از نقاط جهان به شمار می‌آیند، به طوری که شوری، ۷ درصد از زمین‌های دنیا (حدود ۹۳۰ میلیون هکتار) را تحت تأثیر قرار داده و روزبه‌روز در حال گسترش می‌باشد، قریشی و همکاران (Qureshi et al, 2007) و هلموت و همکاران (Helmut et al, 2013). کشور ایران نیز به دلیل تکیه بر کشاورزی فاریاب برای تولید محصولات کشاورزی به شدت در معرض شور شدن اراضی است. بر اساس آمار موجود در سطح جهان، ایران پس از چین، هند و پاکستان بیشترین درصد اراضی شور را به خود اختصاص داده است (Kafi et al, 2009). اراضی شور باعث ایجاد ضررهای زیادی به زیر ساخت‌ها و مزارع و غیره می‌شود. به طور مثال تحقیقاتی که بر روی ارزیابی ریسک شوری در استرالیا انجام شده است، حساسبرسی و منابع آب (Sensitization & Water Resources, 2000)، برآورد می‌کند که حدود ۲۰،۰۰۰ کیلومتر جاده-های اصلی و ۱۶۰۰ کیلومتر راه آهن در حال حاضر در معرض خطر هستند و احتمال بالقوه به ۵۲۰۰۰ و ۳۶۰۰ کیلومتر تا سال ۲۰۵۰، مگر آنکه اقدامات لازم برای توقف

تخریب انجام شود. یکی دیگر از اجزای تشکیل دهنده خاک، همانطور که قبلاً گفته شده رطوبت خاک می‌باشد. اطلاع دقیق از میزان رطوبت خاک و نوسان‌های مکانی و زمانی آن می‌تواند منجر به بهره‌برداری بهینه از امکانات زمین گردد (Movahedi Naini, 2008). همچنین رطوبت خاک<sup>۲</sup> بسیاری از فرایندها را در سیستم آب و هوایی کنترل و یک ارتباط مهم برای چرخه جهانی آب، انرژی و کربن است. رطوبت خاک یکی از پارامترهای بنیادی محیط زیست می‌باشد که بر زندگی گیاهی، جانوری و میکروارگانیسم‌ها مستقیماً تأثیر گذار است. به همین دلیل توزیع مکانی و تغییرات زمانی آن، یکی دیگر از اجزای بسیار مهم در مدل‌های آب و هوایی، اکولوژی و هیدرولوژی در مقیاس جهانی، منطقه‌ای و محلی محسوب می‌شود (Shirani, 2000). رطوبت خاک، به ویژه رطوبت سطحی خاک نقش بسیار مهمی در مدیریت منابع آب و خاک دارد و همچنین نقش مهمی در چرخه آبی طبیعت، به ویژه در توزیع باران بین رواناب سطحی و نفوذ، که فرآیند مهمی بعد از فرآیندهای هیدرولوژیک و ژئومورفولوژیک است، ایفا می‌کند.

سنجش از دور اولین قدم در راه توسعه و برنامه‌ریزی جهت استفاده بهینه از امکانات موجود و دستیابی به آمارها، ارقام و اطلاعات دقیق همراه با سرعت عمل بالاست، چرا که نقطه اتکا مدیریت و برنامه‌ریزی در بخش‌های مختلف در حقیقت اطلاع دقیقی از داشته‌های موجود است که بر اساس آن می‌توان مسیر حرکت به سوی توسعه پایدار را مشخص کرد. با توجه به وجود و ضرورت پرداختن به علم و فن سنجش از دور<sup>۳</sup> که در اواخر قرن بیستم توسعه پیدا کرده، می‌توان با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای به شناسایی پدیده‌های سطح زمین و تا حدی عمق زمین دست یافت. فناوری سنجش از دور موجب رفع نیاز بشر در زمینه دستیابی سریع و دقیق به اطلاعات کره زمین می‌شود. سنجش از دور دارای دو فرآیند اصلی تصویربرداری و تجزیه و تحلیل تصاویر می‌باشد که روش‌های مختلف تصویربرداری عامل تفاوت‌ها و خصوصیات اطلاعات ماهواره‌ای است (Modiri, 1996). امروزه با پیشرفت علوم، استفاده از فناوری‌های جدید مانند دریافت و پردازش داده‌ها (از طریق ماهواره)،

2. Soil Moisture  
3 Remote Sensing

1 Soil Salinity

در طول موج‌های میکروویو، تصاویر رادار آنتن مصنوعی<sup>۴</sup> (SAR) می‌تواند برای نظارت بر شوری و رطوبت خاک قابل اعتمادتر باشد (Saha, 2011)، لی و همکاران (Pham Witt et al, 2013)، فام ویت و همکاران (Myrmzlmly & al., 2019)، میرمضلمی و شهابی (Shahabi, 2016)، باربوچی و همکاران (Barbuchi et al, 2015)، نورمت و همکاران (Normat et al, 2015). از لحاظ تئوری، سنجش از راه دور میکروویو پتانسیل بالایی برای ارزیابی شوری خاک و نقشه‌برداری از مناطق آسیب دیده و همچنین ثابت دی‌الکتریک<sup>۵</sup> خاک را دارد، گونگ و همکاران (Gong et al, 2013). داده‌های سنجش از دور اپتیکی برای اندازه‌گیری شوری و رطوبت خاک یک ابزار مناسب می‌باشد، اما منطقه ارومیه اطراف دریاچه ارومیه به دلیل بالا بودن میزان رطوبت داده‌های راداری دارای دقت بیشتری هستند. بیشتر تحقیقاتی که در اطراف دریاچه ارومیه با استفاده از سنجش از دور صورت گرفته به وسیله داده‌های اپتیکی بوده است. به همین دلیل در این تحقیق با استفاده از داده‌های اپتیکی و راداری به اندازه‌گیری شوری و رطوبت خاک اقدام می‌شود، تا درصد و میزان دقیق شوری و رطوبت خاک بیان شود. همچنین از هوش مصنوعی (Artificial Intelligence) به عنوان ابزاری به روز و کارابیه طور همزمان در اندازه‌گیری شوری و میزان رطوبت خاک در منطقه غرب دریاچه ارومیه به کار می‌رود.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

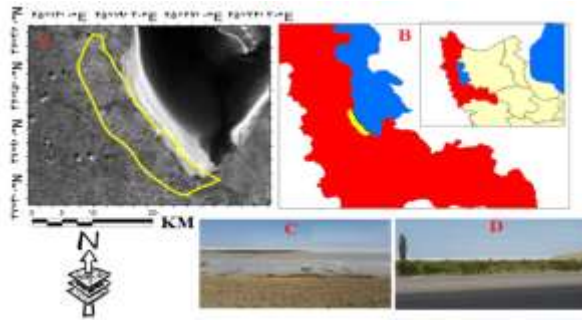
آذربایجان غربی (با احتساب دریاچه ارومیه) ۴۳۶۶۰ کیلومتر مربع وسعت دارد که ۲/۶۵ درصد مساحت کل کشور را تشکیل می‌دهد. از این مقدار، حدود یک میلیون هکتار آن زمین‌های قابل بهره‌برداری می‌باشد. محدوده مطالعاتی در غرب دریاچه ارومیه با مختصات جغرافیایی بین ۴۵°۱۲' تا ۴۵°۳۴' طول شرقی و ۳۷°۳' و تا ۲۰' ۳۷° عرض شمالی، به وسعت ۲۲۰ کیلومتر مربع می‌باشد. در شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.

استفاده از نرم‌افزارها و سیستم‌های پردازش اطلاعات، نقش مهمی در مدیریت منابع محدود آب و خاک دارد. استفاده از سنجش از دور ماهواره‌ای با توجه به ویژگی‌های منحصر بفرد آن از قبیل دید وسیع و یکپارچه، استفاده از قسمت‌های مختلف طیف الکترومغناطیسی<sup>۱</sup> برای ثبت خصوصیت پدیده‌ها، پوشش‌های تکراری و سرعت انتقال و تنوع اشکال داده‌ها، امکان بکارگیری سخت افزارها و نرم افزارهای ویژه رایانه‌ای، در سطح دنیا با استقبال زیادی روبرو شده است. سنجش از دور به عنوان ابزاری مناسب در ارزیابی و نظارت، کنترل و مدیریت منابع آب و خاک، جنگل، مرتع، کشاورزی و محیط زیست بکار گرفته شده و به مرور بر دامنه وسعت کاربری آن افزوده گردیده است. بیشتر تحقیقات انجام شده در زمینه شوری و رطوبت خاک ارزیابی پتانسیل سنجش از راه دور اپتیکی<sup>۲</sup> برای مدیریت مناطق آسیب پذیر و استفاده از طیف گسترده‌ای مرئی و مادون قرمز نزدیک بوده است، پرایس (Price, 1980)، واتریک (Watrlick, 1994)، انگمن و چاوان (Engman & Chavan, 1995) و جکسون و همکاران (Jackson et al, 1995). فرآیندهای پویا در سطح خاک شور نظارت و ارزیابی فرایند نمکی را محدود می‌کند زیرا بر رفتار طیفی، مکانی و زمانی این ویژگی‌ها تأثیر می‌گذارد. از طریق خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله رطوبت خاک، ماده آلی، بافت خاک، انواع رنگ خاک رس و زبری سطح بازتاب طیفی خاک تعیین می‌شود. به دلیل شوری خاک، این خصوصیات تغییر می‌کنند و بر بازتاب طیفی سطح خاک اثر می‌گذارد. سنجش از دور رطوبت و شوری خاک را با استفاده از دامنه طیفی با طول موج<sup>۳</sup> بین ۰.۴ تا ۲.۵ میکرومتر، تابش منعکس شده خورشید را از سطح زمین، که به عنوان انعکاس شناخته می‌شود، اندازه‌گیری می‌کند، صادقی و همکاران (Sadeghi et al, 1984).

با این حال، برای خاک‌های با لایه‌های سطحی تیره و همچنین در مناطق ساحلی که سطوح خاک به شدت تحت تأثیر رطوبت قرار دارند، تصاویر اپتیکی نتایج نادرستی را ارائه می‌دهند. با توجه به محدودیت‌های سنسورهای ماهواره‌ای اپتیکی در تشخیص شوری و همچنین حساسیت سیگنال به خواص دی‌الکتریک مواد

4 Synthetic Aperture Radar  
5 Dielectric Constant

1 Electromagnetic Spectrum  
2 Optical  
3 Wavelength

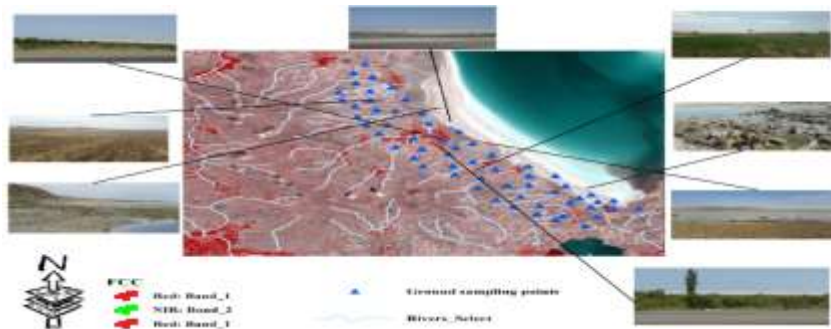


شکل ۱- الف : کشور ایران و آذربایجان غربی، ب: موقعیت منطقه مورد مطالعه، پ، ت: عکس‌های منطقه مورد مطالعه  
Figure 1. A: Iran and West Azerbaijan, B: Location of the study area, C and D: Photos of the study area

برداشت شد. به منظور افزایش دقت نمونه‌برداری، نمونه‌های کمکی تعداد ۱۸۰ نمونه در سه جهت متفاوت از نقطه اصلی با زاویه ۱۲۰ درجه و با فاصله حدود ۱۵ متر از مرکز نقطه، برداشت و با نمونه اصلی مخلوط شد تا در نقشه شوری و سدیمی و رطوبت حاصل از روش دورسنجی، نتایج به ۹ پیکسل اطراف نقطه اصلی برروی تصویر قابل تعمیم باشند (Alizadeh, 2007). در شکل ۲ موقعیت نقاط نمونه‌برداری زمینی نشان داده شده است.

#### داده‌های زمینی

داده‌های زمینی شامل نمونه‌های خاک برای اندازه‌گیری میزان شوری و رطوبت می‌باشد. در این پژوهش نمونه‌برداری زمینی در تاریخ ۱۳۹۸/۰۶/۱۸ همزمان با عبور ماهواره‌های سنتینل ۱ و سنتینل ۲ انجام شد. به منظور نمونه‌برداری خاک از روش شبکه‌ای منظم استفاده شد. شبکه‌های منظم به فاصله‌های ۱۰۰۰ متری برروی منطقه تشکیل و ۶۰ نمونه خاک در عمق ۵-۱۵ سانتی‌متری



شکل ۲- نقاط نمونه‌برداری شده و عکس‌های منطقه مورد مطالعه (الف و ت: دریاچه خشک شده، ب و ح: مناطق کشت گندم، ث: باغات منطقه، س و ش: شوره زار، خ: مناطق کشت یونجه)

Figure 2. Sampling points and photographs of the study area (A and T: dried lake, B and H: wheat cultivation areas, C: gardens of the region, S&SH: saline fields, KH: alfalfa cultivation areas)

#### تصاویر ماهواره‌ای

##### سنتینل-۱

##### جدول ۱- مشخصات سنتینل-۱

Table 1. Sentinel-1 specifications

2014.04.03	The start of the mission
693 Km	Orbital height
98.5	Angle of inclination
6 Day Sun-synchronous	Return period
2021	End of mission
C	Imaging band
10 m	Resolution

## سنیتینل-۲

جدول ۲- مشخصات سنیتینل-۲

Table 2. Sentinel-2 specifications

Band Number	Band Name	Average Wavelength ( $\mu\text{m}$ )	Spatial Resolution (m)
1	Coastal aerosol	0.43	60
2	Blue	0.49	10
3	Green	0.56	10
4	Red	0.65	10
5	Vegetation Red Edge	0.70	20
6	Vegetation Red Edge	0.74	20
7	Vegetation Red Edge	0.78	20
8	NIR	0.84	20
8A	Narrow NIR	0.86	20
9	Water vapour	0.94	60
10	SWIR – Cirrus	1.37	60
11	SWIR	1.61	20
12	SWIR	2.19	20

$$\omega = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} * 100 \quad (1)$$

که در آن؛  $W_2$ ، وزن ظرف و خاک مرطوب قبل از آون،  $W_3$ ، وزن ظرف و خاک خشک بعد از آون،  $W_1$ ، وزن ظرف خالی،  $\omega$ ، درصد رطوبت.

## اندازه‌گیری شوری خاک

روش عصاره گل اشباع برای برآورد شوری خاک (Rhoades *et al.*, 1999). در این روش EC بزرگتر از ۴ خاک شور و EC کوچکتر و یا مساوی ۴ خاک غیرشور نامیده می‌شود. در شکل ۳ مراحل کار آزمایشگاه را نشان می‌دهد.

## عملیات آزمایشگاهی

## اندازه‌گیری رطوبت خاک

میزان رطوبت خاک، بر برخی ویژگی‌های خاک از قبیل مقاومت، نفوذپذیری، میزان نشست تاثیرگذار می‌باشد. هدف از این آزمایش تعیین میزان رطوبت خاک است. روش انجام آزمایش به این صورت است که نمونه را پس از وزن کردن در گرمخانه در دمای  $110 \pm 5$  درجه سانتی‌گراد تا اندازه‌ای خشک می‌کنیم که وزن آن ثابت شود. بر اثر از دست دادن آب موجود در نمونه، وزن آن کاهش می‌یابد. درصد رطوبت به صورت نسبت وزن آب موجود در نمونه به وزن نمونه خشک بیان می‌شود (Shirani, 2000). رطوبت خاک در آزمایشگاه مطابق با معادله ۱ برآورد می‌گردد:



شکل ۳- مراحل کار آزمایشگاه (الف: منطقه نمونه برداری، ب: دستگاه EC متر، پ: الک سه میلیمتری برای جدای سازی خاک ها، ت و ث: نمونه های خاک اشباع شده با آب مقطر، ص: دستگاه قیف بوخنر برای عصاره گیری)

Figure 3. Laboratory work steps (A: sampling area, B: EC meter device, C: 3 mm sieve for soil separation, D and E: soil samples saturated with distilled water, F: Buchner funnel device For extraction)

## پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای

پیش‌پردازش تصاویر سنتینل ۱ (Sentinel-1 - GRD) مراحل تصحیح اتمسفری و هندسی سنتینل ۱ (Sentinel-1 GRD) شامل مراحل زیر می‌باشد که با استفاده از نرم افزار SNAP انجام گرفت، فیلیپونی (Filipponi, 2019):  
 ۱: تصحیح مدار (Apply Orbit File)، ۲: حذف نویز حرارتی (Thermal Noise Removal)، ۳: حذف نویز لبه‌ها (Border Noise Removal)، ۴: کالیبراسیون (Calibration)، ۵: فیلتر کردن (اختیاری) Speckle (filtering optional)، ۶: تصحیح هندسه‌ی براساس روش داپلر (Range Doppler Terrain Correction)، ۷: تبدیل به دسی‌بل (Conversion to dB)

پیش‌پردازش تصاویر سنتینل ۲ (Sentinel-2 - S2A\_MSIL1C)

Sen2Cor یک پردازنده برای تولید و قالب‌بندی محصول Sentinel-2 Level 2A است. این ابزار برای داده‌های ورودی تصحیح اتمسفری انجام می‌دهد. Sen2Cor تصاویر بازتاب تصحیح شده زمین و اتمسفر را ایجاد می‌کند. علاوه بر این، ضخامت نوری آئروسول، بخار آب، نقشه‌های طبقه‌بندی منطقه و شاخص‌های کیفیت برای ابر و برف را نیز تصحیح می‌کند. فرمت محصول خروجی آن معادل سطح محصول کاربر سطح MSIL2A است: تصاویر خروجی در سه وضوح مختلف، ۶۰، ۲۰ و ۱۰ متر یا همه‌ی آنها می‌باشد.

## شاخص‌های شوری و رطوبت خاک

در جدول ۳ به بررسی شاخص‌های شوری و رطوبت خاک پرداخته شده است.

جدول ۳- شاخص‌های شوری و رطوبت خاک مورد استفاده در این پژوهش

Table 3. Salinity and soil moisture indices used in this study

Relationship number	Reference	Formula	Spectral Index	Abbreviation
(1)	Khan <i>et al.</i> , (2005)	$BI = (\text{Sqrt}(R \times R)) \div (G \times G)^2$	Brightness Index	BI
(2)	Khan <i>et al.</i> , (2005)	$SR = (R - NIR) \div (G + NIR)$	Salinity Ratio	SR
(4)	Wald <i>et al.</i> , (1983)	$Int1 = (G + R) \div 2$	Intensity Index 1	Int1
(5)	Wald <i>et al.</i> , (1983)	$Int2 = (G + R + NIR) \div 2$	Intensity Index 2	Int2
(6)	Dowai <i>et al.</i> , (2006)	$Int1re1 = (G + Red\_edge1) \div 2$	Intensity Index 1 red-edge 1	Int1 re1
(7)	Dowai <i>et al.</i> , (2006)	$Int1re2 = (G + Red\_edge2) \div 2$	Intensity Index 1 red-edge 2	Int1 re2
(8)	Dowai <i>et al.</i> , (2006)	$Int1re3 = (G + Red\_edge3) \div 2$	Intensity Index 1 red-edge 3	Int1 re3
(9)	Dowai <i>et al.</i> , (2006)	$Int2re1 = (G + Red\_edge1 + NIR) \div 2$	Intensity Index 2 red-edge 1	Int2 re1
(10)	Dowai <i>et al.</i> , (2006)	$Int2re2 = (G + Red\_edge2 + NIR) \div 2$	Intensity Index 2 red-edge 2	Int2 re2
(11)	Furati <i>et al.</i> , (2015)	$Int2re3 = (G + Red\_edge3 + NIR) \div 2$	Intensity Index 2 red-edge 3	Int2 re3
(12)	Furati <i>et al.</i> , (2015)	$NDSI = (R - NIR) \div (R + NIR)$	Normalized Differential Salinity Index	NDSI
(13)	Wald <i>et al.</i> , (1983)	$S5 = (B \times R) \div G$	Salinity index V	S5
(14)	Wald <i>et al.</i> , (1983)	$S6 = (B \times NIR) \div G$	Salinity index VI	S6
(15)	(Hey <i>et al.</i> , 2015)	$SI = (B \times R) \times 0.5$	Salinity index	SI
(16)	Wald <i>et al.</i> , (1983)	$S1 = (B \div R)$	Salinity index I	S1
(17)	Khan <i>et al.</i> , (2005)	$MSI = SWIR \div NIR$	Moisture Stress Index	MSI

(18)	(Huit, 1998)	$NDWI = (NIR - SWIR(2)) \div (NIR + SWIR(2))$	Normalized Difference Water Index	NDWI
(19)	(Huit, 1998)	$NDMI = (NIR - SWIR(1)) \div (NIR + SWIR(1))$	Normalized Difference Moisture Index	NDMI

در جدول بالا: R=باند قرمز، B=باند آبی، NIR=باند مادون قرمز نزدیک، SWIR=باند مادون قرمز میانی، G=باند سبز و Red-edge=لبه قرمز

$$R_{NIR} = M^{-1}R_{Red} + I \quad (21)$$

فواصل خطوط همتراز خاک از خط  $L$  که از مبدأ گذشته و عمود بر خط خاک می‌باشد، بر این فرض قرار گرفته‌اند که با رطوبت خاک در ارتباطی منسجم هستند و در این فرمول جای گرفته‌اند.

$$D = \frac{1}{\sqrt{M^2 + 1}} (R_{NIR} + MR_{Red}) \quad (22)$$

فاصله  $D$  که نرمال شده است، با حداکثر ( $D_{max}$ ) و حداقل ( $D_{min}$ ) که مربوط به خطوط همتراز در نقاط  $B$  و  $C$  در شکل (۴) هستند، به نمایش درآمده‌اند. و از این رو، درجه خیسندگی خاک،  $W$  به این شکل مطرح گشته است.

$$W = \frac{D_{max} - D}{D_{max} - D_{min}} \quad (23)$$

همان طور که در شکل (۴) نشان داده شده، فرض خطوط هم تراز  $W=0$  و  $W=1$  بر لبه‌های خشک و مرطوب منطبق نیستند (منحنی  $AB$  و  $AC$  به ترتیب).

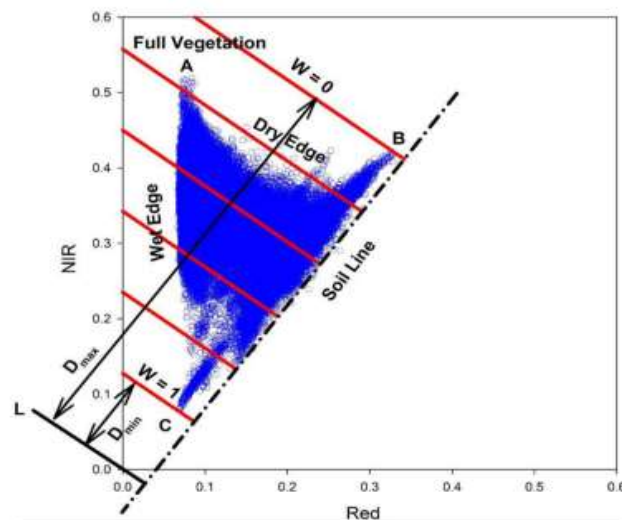
## برآورد رطوبت خاک با استفاده از تصاویر سنتینل ۲ روش Red-NIR

همان طور که در شکل (۴) نشان داده شده، انتشار تصاویر در فضای Red-NIR معمولاً یک محدوده هندسه مثلثی تشکیل می‌دهد که در آن خط  $CB$  خط خاک لخت می‌باشد. داده‌های مشخص شده در لبه خط که منحنی  $AB$  را تشکیل می‌دهد خط خاک خشک است و داده‌های مابین لبه  $AC$  خط مرطوب محسوب می‌گردد. به منظور ارزیابی رطوبت خاک بر پایه این هندسه، خطوط همتراز خاک، عمود بر سطح خاک فرض شده که در شکل (۴) نشان داده شده، غلام و همکاران (Gholam et al, 2007) و ژان و همکاران (Jean et al, 2007).

در مدل CRN خط خاک این گونه تعریف شده است:

$$R_{NIR} = MR_{Red} + I \quad (20)$$

که در آن  $MR_{Red}$  به عنوان تابش باند قرمز و  $R_{NIR}$  به عنوان باند مادون قرمز نزدیک و  $I$  به عنوان سطح شیبدار و عرض از مبدأ خط خاک محسوب می‌شوند. خطوط همتراز رطوبت خاک که با مبدأ تلاقی دارند، این گونه تعریف شده است:



شکل ۴- مدل Red-NIR جهت برآورد رطوبت خاک

Figure 4. Red-NIR model for estimating soil moisture

## بر آورد رطوبت خاک با استفاده از تصاویر رادار

مقدار آب موجود در خاک بر خواص الکتریکی آن و به تبع آن سیگنال پراکنده رادار تأثیر می گذارد. رطوبت خاک یک پارامتر خصوصاً پویا در زمان و مکان است، بنابراین داده های رطوبت خاک در محل به طور کلی همزمان با داده های رادار جمع آوری می شود. توزیع و تراکم مکانی این اندازه گیری ها بستگی به میزان ناهمگونی مکان های مرجع (تغییرات داخل مکان) و اندازه آنها دارد. برای هر قطعه مرجع (اندازه گیری یک هکتار) حداقل ۲۰ اندازه گیری انجام می شود. هنگام انجام مطالعات با استفاده از تصاویر راداری در باندهای  $L$ ،  $C$  و  $X$  برای توصیف رطوبت سطح خاک در مناطق کشاورزی، اندازه گیری رطوبت خاک در عمق بین ۰ تا ۱۰ سانتی متر انجام می - شود. این عمق اندازه گیری مربوط به عمق نفوذ موج رادار  $\delta_p$  است که عموماً در باندهای  $C$  و  $X$  برابر با چند سانتی متر است. در باند  $L$ ، این عمق برای خاک های بسیار خشک می تواند به چند ده سانتی متر برسد. در حقیقت، ضخامت این لایه سطحی به طول موج رادار ( $\lambda$ ) (نفوذ بیشتر با افزایش موج) و ثابت دی الکتریک خاک (محتوای آب و ترکیب خاک) بستگی دارد، بیدیون و همکاران (Bideon et al, 1990).

$$\delta_p \cong \frac{\lambda \sqrt{\epsilon'}}{2\pi \sqrt{\epsilon_r}} \quad (24)$$

که در آن  $\epsilon'$ ، قسمت واقعی ثابت دی الکتریک و  $\epsilon''$  قسمت موهومی آن است. نفوذ طول موج باند  $C$  رادار در خاک لومی بین ۱ تا ۵ سانتی متر است که با افزایش رطوبت این میزان کاهش می یابد (قطبش  $HH$  و زاویه انتشار ۱۵ درجه) هالیکائین و همکاران (Hallicaine et al, 1985). ثابت دی الکتریک یک مقدار فیزیکی است که به عنوان تراکم پیچیده نیز شناخته می شود. این خواص الکتریکی خاک را از نظر تلفات الکتریکی ناشی از انتقال و جذب انرژی حاصل از موج رادار تعریف می کند، بنابراین بر ظرفیت انتقال بازتاب و جذب میکروویوها تأثیر می گذارد. این ثابت یک عدد پیچیده است که به شکل  $\epsilon' - j\epsilon''$  بیان شده است. قسمت واقعی  $\epsilon'$  بیشتر تحت تأثیر رطوبت خاک است، در حالی که قسمت موهومی  $\epsilon''$  اساساً به هدایت الکتریکی محلول خاک بستگی دارد.

متداول ترین مدل های ثابت دی الکتریک مدل هایی هستند که توسط دابسون و همکاران (Dobson et al, 1985)، میرونوف و همکاران (Mironov et al, 2004) و تاپ و همکاران (Top et al, 2004) تولید شده اند. اولین مورد برای طیف وسیعی از فرکانس های بین ۱/۴ تا ۱۸ گیگاهرتز تعریف شده است. این مدل به میزان حجم آب، اندازه ذرات خاک، اجزای مختلف خاک، ثابت دی الکتریک آب و فرکانس رادار بستگی دارد. رابطه تجربی بین محتوای آب حجمی خاک و ثابت دی الکتریک آن که توسط هالیکائین و همکاران (Hallicaine et al, 1985) شرح داده شده است نیز برای سادگی آن بسیار مورد استفاده قرار می گیرد. این رابطه فقط به مشتق کردن مؤلفه واقعی ثابت دی الکتریک اجازه می دهد:

$$mv = (-530 + 292\epsilon - 5.5\epsilon^2 + 0.043\epsilon^3) \cdot 10^{-4} \quad (25)$$

این رابطه برای بسیاری از خاک های معدنی در شرایط مختلف محتوای آب تأیید شده است. فرمول ۲۶ برای بدست آوردن رطوبت خاک می باشد.

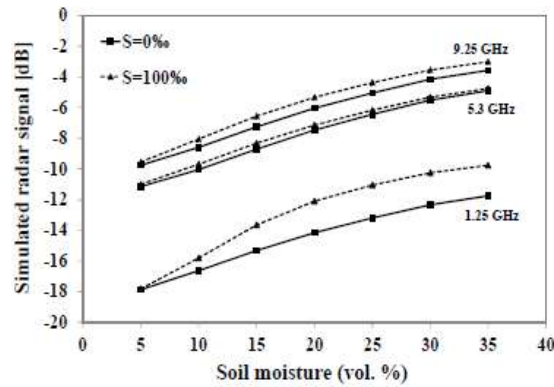
$$\sigma_{dB}^0 = amv + b_1 \quad (26)$$

## تخمین شوری خاک با تصاویر رادار

شبیه سازی ضریب بازگشتی رادار با استفاده از مدل معادله انتگرال (IEM) با افزایش سیگنال شبیه سازی شده با شوری، چشم اندازهایی برای ارائه این پارامتر نشان می - دهد. تنظیمات بهینه برای برآورد شوری از طریق داده - های SAR خاک های مرطوب، فرکانس پایین به عنوان مثال باند  $L$ ، زاویه انتشار شدید و قطبش  $VV$  است، شاو و همکاران (Zaribi et al, 2003; Shaw et al, 2003). Lassen et al, 2008). شکل ۵ پویایی چند فرکانس سیگنال راداری شبیه سازی شده (انتشار ۴۰ درجه، قطبش  $VV$ ) را در رابطه با تغییر شوری نشان می دهد. شبیه سازی ضریب بازگشت رادار توسط مدل IEM در باندهای  $L$ ،  $C$  و  $X$  پتانسیل بالایی را برای تخمین این پارامتر فقط در باند  $L$  نشان می دهد (شکل ۵).

ضریب برگشت پذیری تصاویر رادار از ۰ تا ۱۰۰ درصد متغیر است. در جدول ۴ تمام خصوصاتی که برای تجزیه و تحلیل با فرمول برای شوری خاک نشان داده شده است.





شکل ۵- شبیه‌سازی ضریب برگشتی (VV-40°) از مدل IEM به عنوان تابعی از رطوبت خاک، برای دو شرایط شوری  $S=0$  و  $S=100\%$  و  $C=L$  و  $X=100$  درصد با سه باند فرکانس: X و C و L

Figure 5. Simulation of return factor (VV-40-) from IEM model as a function of soil moisture, for two salinity conditions  $S = 0$  and  $S = 100\%$  with three frequency bands: L, C and X

جدول ۴- تمام خصوصیتانی که برای تجزیه و تحلیل با فرمول برای شوری خاک با تصاویر رادار

Table 4. All properties for analysis with formula for soil salinity with radar images

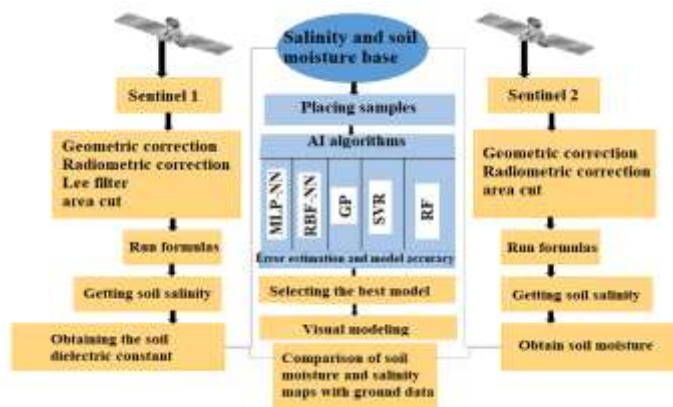
Relationship Number	Source	Formula	Name	Title
(27)	Lee and Poeter, ) (2009	$A = \sqrt{E_{0,x}^2 + E_{0,y}^2}$	Domain	
(28)	(Lee et al, 1994)	$\sigma^0 = \frac{4\pi r^2  E_S^2 }{A_0  E_l ^2}$	Zero sigma range	Radar power
(29)	(Lee et al, 1994)	$\sigma^0 VH / \sigma^0 VV, / VH / A_{VV}, / VV, / A_{VH}$	Coefficient	
(30)	MetaTerka & ) (Sterzlik, 1998	$M = \sum_{i=1}^{N_g} ip(1)$	Middle	
(31)	MetaTerka & ) (Sterzlik, 1998	$\sigma^2 = \sum_{i=1}^{N_g} (i-)^2 p(i)$	Variance	
(32)	MetaTerka & ) (Sterzlik, 1998	$S = \sigma^{-3} = \sum_{i=1}^{N_g} (i-)^3 p(i)$	Skewness	
(33)	MetaTerka & ) (Sterzlik, 1998	$k = \sigma^{-4} = \sum_{i=1}^{N_g} (i-)^4 p(i) - 3$	Peak degree in a statistical graph	Texture based histogram (first order)
(34)	MetaTerka & ) (Sterzlik, 1998	$E_{FO} = - \sum_{i=1}^{N_g} p(i) \log_2 p(i)$	Entropy	
(35)	(Vijayarekha, 2014)	$G_{FO} = - \sum_{i=1}^{N_g} p(i)^2$	Energy	
(36)	(Vijayarekha, 2014)	$R = - \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} \frac{(i-x)(j-y)p(i,j)}{\sigma_x \sigma_y}$	Correlation	

(37)	(Vijayarekha, 2014)	$C = - \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g}  i-j ^2 p(i,j)$	Conflict	Co-occurrence gray matrix textures (second order)
(38)	(Vijayarekha, 2014)	$H = - \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} \frac{p(i,j)}{1 +  i-j ^2}$	Homogeneity	
(39)	(Vijayarekha, 2014)	$D = - \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g}  i-j  p(i,j)$	Dissimilarity	
(40)	(Vijayarekha, 2014)	$E_{SO} = - \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} [p(i,j)]^2$	Entropy	
(41)	(Vijayarekha, 2014)	$G_{SO} = - \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} p(i,j) \log_2 [p(i,j)]$	Energy	

عصبی چند لایه (MLP-NN)، شبکه‌های عصبی تابع پایه شعاعی (RBF-NN)، فرایندهای گاوسی (GP)، رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) و جنگل‌های تصادفی (RF) در نظر گرفته شده است. بحث تکمیل شده این الگوریتم‌ها توسط بیشپ (Bishop, 2006) کامل بیان شده است. شکل ۶ مراحل اجرای این پژوهش را نشان می‌دهد.

### مدل سازی

از آنجا که دقت نقشه برداری شوری و رطوبت خاک به روش مورد استفاده بستگی دارد و هیچ روشی برای همه مناطق بهترین روش نیست. بنابراین، در این تحقیق، پنج الگوریتم یادگیری پیشرفته در نظر گرفته شده شبکه‌های



شکل ۶- فلوچارت مراحل اجرای کار  
Figure 6. Flowchart of work steps

این شاخص بین صفر تا یک می‌باشد و اگر از ۰/۶ بیشتر باشد نشان می‌دهد متغیرهای مستقل تا حد زیادی توانسته‌اند تغییرات متغیر وابسته را تبیین کنند. که در رابطه زیر بیان شده است.

$$R = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n\sum x^2 - (\sum x)^2][n\sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (42)$$

### اعتبارسنجی

#### ضریب تعیین (تشخیص) رگرسیون

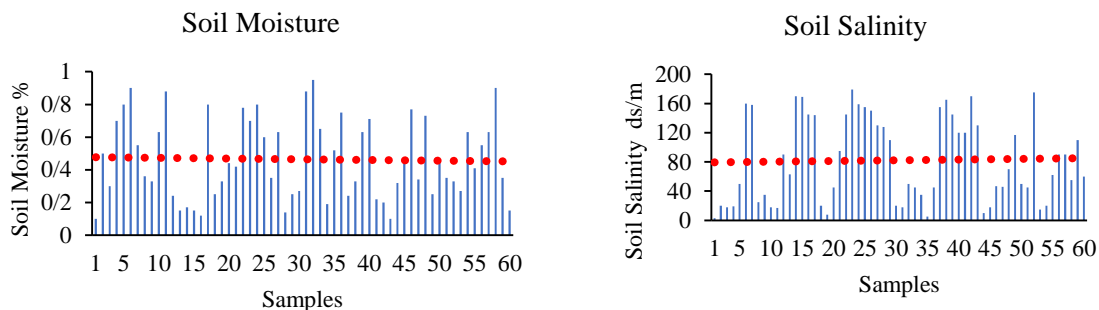
ضریب تعیین یا ضریب تشخیص Coefficient Of Determination قدرت توضیح دهنده‌گی مدل را نشان می‌دهد. ضریب تعیین نشان می‌دهد که چند درصد از تغییرات متغیر وابسته توسط متغیرهای مستقل توضیح داده می‌شود. تغییرات کل متغیر وابسته برابر است. مقدار

## بحث و نتایج

## نتایج رطوبت و شوری خاک زمینی

شکل زیر نمایش داده شده است. در نتایج شوری خاک حداقل ۲ و حداکثر ۱۷۵ دسی‌زیمنس برمتر و رطوبت خاک نیز بین ۰ تا ۹۳ درصد بوده است.

در این پژوهش که از ۶۰ نمونه خاک برای شوری و ۶۰ نمونه برای رطوبت خاک استفاده شده است، نتایج آن در



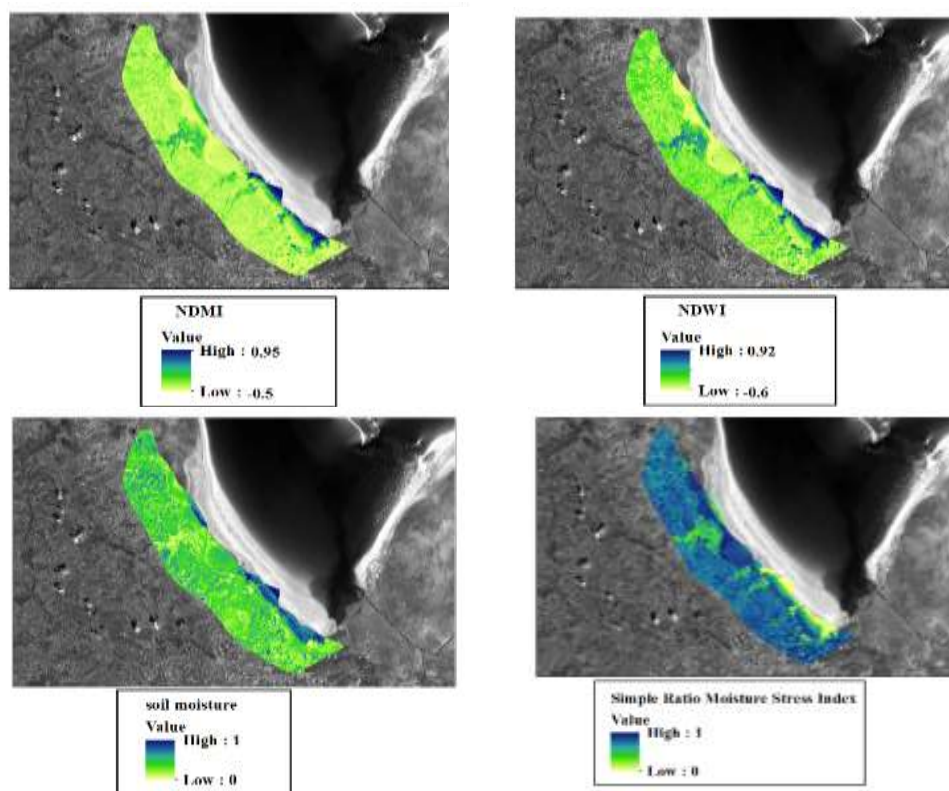
شکل ۷- میزان شوری و رطوبت خاک داده های زمینی

Figure 7. Salinity and soil moisture content of terrestrial data

پوشش گیاهی انبوه میزان رطوبت سطحی خاک آن ۰/۵ تا ۰/۶ که نسبت به شاخص NDMI ۰/۱ بیشتر است. شاخص SRMSI که یک نسبت ساده برای بدست آوردن رطوبت سطحی خاک است. نتایج این شاخص کاملا برعکس است به این معنی که هر چه میزان شاخص به صفر نزدیک تر باشد میزان رطوبت سطحی خاک زیاد و بلعکس. نتایج این شاخص که بین ۰ و ۱ است تا حد زیاد با شاخص NDMI و شاخص NDWI رابطه نزدیک و مطابقت دارد. شاخص رطوبتی SM که با استفاده از فضای طیفی باند قرمز و مادون قرمز بدست آمده است. علت استفاده از باند قرمز و مادون قرمز در این تحقیق به جای استفاده از شاخص پوشش گیاهی و دمای سطح زمین برای برآورد رطوبت سطحی خاک عدم وجود باند حرارتی در سنتینل ۲ می باشد. مناطق مرطوب و حداکثر رطوبت سطحی خاک در این مناطق ۰/۹۵ می باشد. بیشتر مناطق طبق این شاخص بین ۰/۱ تا ۰/۳ قرار دارد.

## نتایج رطوبت خاک تصاویر اپتیک

شکل ۸ شاخص های مختلف رطوبت خاک حاصل از تصاویر اپتیک را نشان می دهد. در این پژوهش برای ارزیابی دقت بهتر نتایج، شاخص های متعددی استفاده شده است. شاخص NDMI میزان رطوبت سطحی خاک آن بین ۰/۵- تا ۰/۹۵ قرار دارد. حداکثر رطوبت در قسمت جنوب منطقه مورد مطالعه و شامل همان مناطق خشک شده دریاچه می باشد. طبق نتایج شاخص NDMI مناطق با پوشش گیاهی انبوه دارای رطوبت بین ۰/۴ تا ۰/۵ می باشد. بیشتر مناطق را نیز حداقل رطوبت ۰ تا ۰/۲ فرار گرفته، چون این مناطق بیشتر کشاورزی دیم و خاک می باشد. شاخص رطوبتی NDWI که یک شاخص دقیق و نتایج آن نیز در بسیاری از تحقیق های دیگر نیز ثابت شده است. طبق این شاخص حداقل رطوبت ۰/۶- و حداکثر ۰/۹۲ می باشد. طبق نتایج این شاخص برای مناطق خیلی مرطوب شبیه شاخص NDMI است ولی برای مناطق با

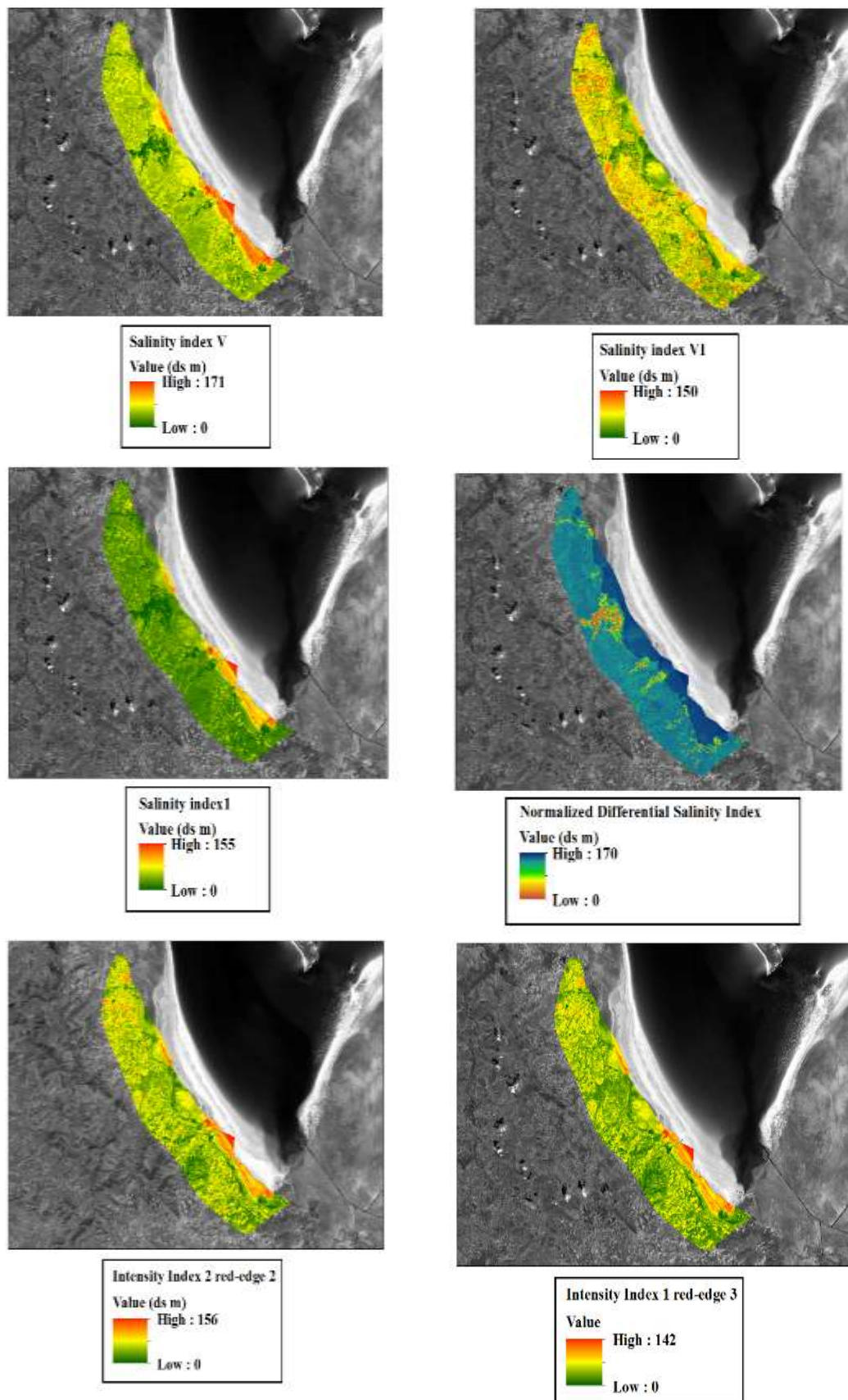


شکل ۸- شاخص‌های رطوبت خاک تصاویر اپتیکی  
Figure 8. Soil Moisture Indicators Optical Images

۰ تا  $163 \text{ dS m}^{-1}$  نشان داده است. نتایج این چهار شاخص تا حد زیاد بر شاخص BI مطابقت دارد. شاخص شوری (SI) که حداقل و حداکثر آن بین ۰ تا  $173 \text{ dS m}^{-1}$  قرار گرفته و بیشترین میزان شوری خاک در مناطق خشک شده دریاچه و کمترین آن در مناطق با پوشش انبوه گیاهی قرار دارد. طبق این چهار شاخص بیشتر مناطق شوری بین ۰ تا  $20 \text{ dS m}^{-1}$  دارند. شاخص (II 2) و سه شاخص آن (II 2 RE 1, II 2 RE 2, II 2 RE 3) با استفاده از لبه‌ی قرمز و شاخص (NDSI) و شاخص (SI 1) نشان داده شده است. نتایج شاخص (II 2) تا حد زیادی شبیه شاخص شده (II 1) که در شکل ۵-۳ ارائه شده بود می‌باشد. در شاخص (NDSI) حداقل و حداکثر شوری خاک بین ۰ تا  $170 \text{ dS m}^{-1}$  می‌باشد. کمترین میزان شوری خاک مربوط به مناطق با پوشش گیاهی انبوه و متوسط می‌باشد و طبق این شاخص مناطق با حداکثر شوری بیشتر از شاخص‌های دیگر می‌باشد. شکل ۸ و ۹ نیز شاخص‌های مختلف ساخته شده با استفاده از ۱۲ باند سنتینل ۲ را نشان می‌دهد و تا حد زیاد شبیه به نتایج سایر شاخص‌ها می‌باشد.

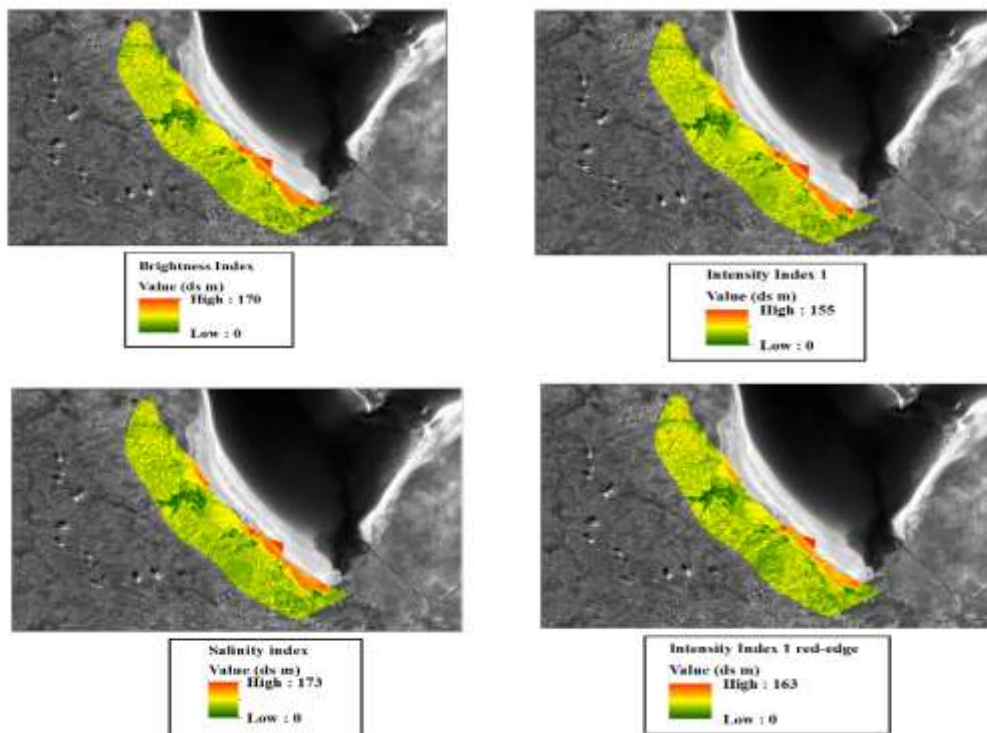
#### نتایج شوری خاک تصاویر اپتیکی

با استفاده از تصاویر اپتیکی شاخص‌های متفاوتی که در شکل ۹، ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده، بدست آمد. در پژوهش حاضر از شاخص‌های مختلفی مانند NDSI و SI و غیره جهت بررسی میزان شوری منطقه استفاده شد. ماهواره سنتینل ۲ به دلیل وجود سه باند متفاوت در محدوده لبه قرمز (حداکثر انعکاس به دلیل وجود پوشش گیاهی سالم و متراکم)، قابلیت تعیین شاخص‌های مختلف شوری خاک را دارد. نتایج شاخص (BI) بین صفر تا  $170 \text{ dS m}^{-1}$  می‌باشد و نتایج حاصل از بررسی این شاخص نشان داد که بیشترین میزان شوری خاک در مناطق خشک شده دریاچه با حداکثر بین  $150$  تا  $165 \text{ dS m}^{-1}$  می‌باشد. مناطقی از منطقه مورد مطالعه که زمین‌های باغ قرار دارد، میزان شوری خاک آن طبق این شاخص بین ۰ تا  $4 \text{ dS/m}$  می‌باشد و کمترین میزان شوری نیز متعلق به این مناطق می‌باشد. در شاخص (II 1) و سه شاخص دیگر (II 1 RE 1, II 1 RE 2, II 1 RE 3) که با استفاده از این شاخص و باندهای لبه قرمز برآورد گردید میزان شوری خاک را بین

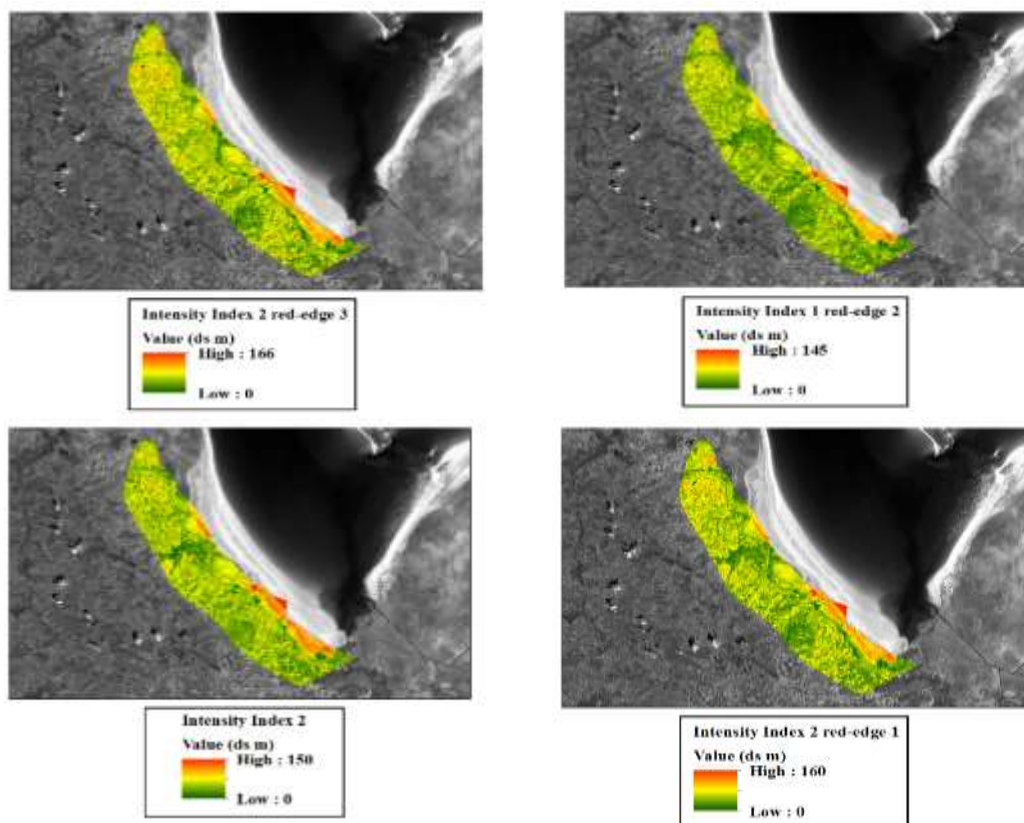


شکل ۹- شاخص‌های شوری خاک تصاویر اپتیکی  
Figure 9. Soil salinity indices Optical images



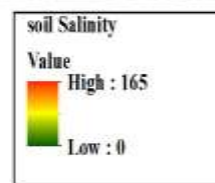
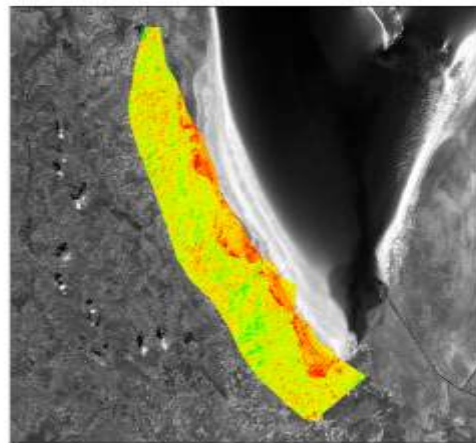
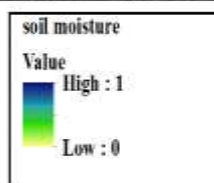
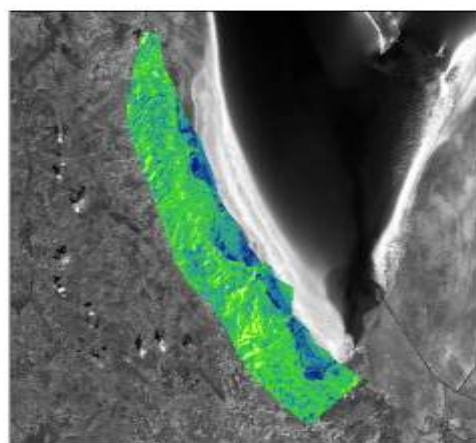


شکل ۱۰- شاخص های شوری خاک تصاویر اپتیکی  
Figure 10. Soil salinity indices Optical images



شکل ۱۱- شاخص های شوری خاک تصاویر اپتیکی  
Figure 11. Soil salinity indices Optical images

طبق این نتایج بیشترین میزان شوری مربوط به همان مناطق خشک شده دریاچه است. بیشتر منطقه مورد مطالعه شوری خاک بین ۰ تا ۲۵ dS/m می‌باشد. در بعضی مناطق با پوشش گیاهی نسبتاً تنک و پوشش گیاهی یونجه، شوری خاک بین ۵ تا ۱۲ dS/m است. رطوبت محاسبه شده با تصاویر رادار بین ۰ تا ۱ می‌باشد. طبق این نتایج حداکثر رطوبت در مناطقی قرار دارد که مناطق خشک شده دریاچه می‌باشد.

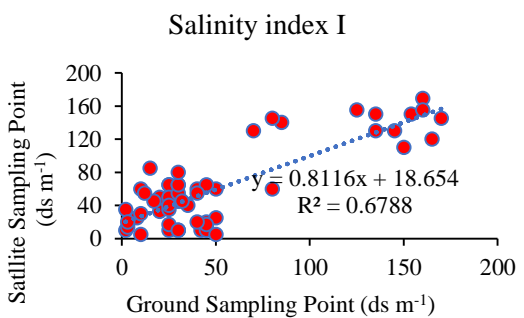
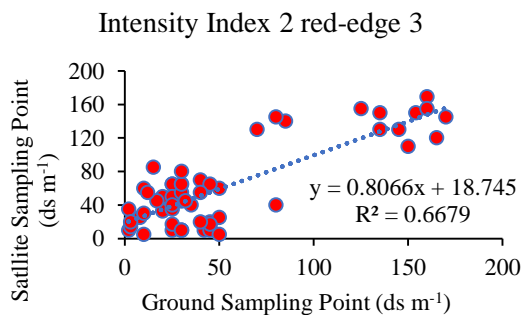
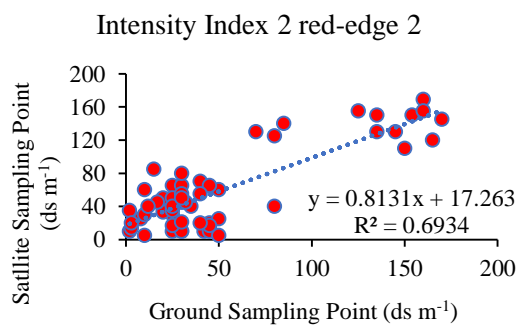
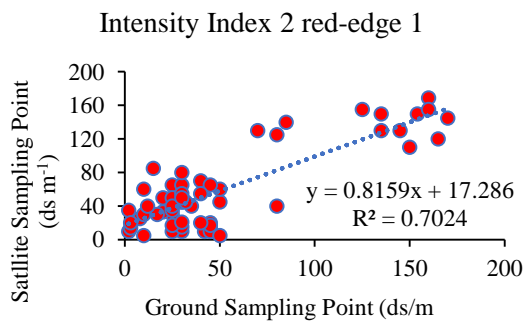
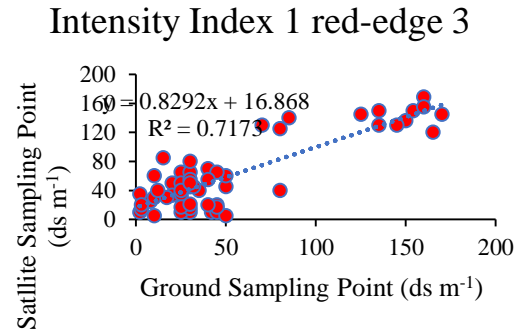
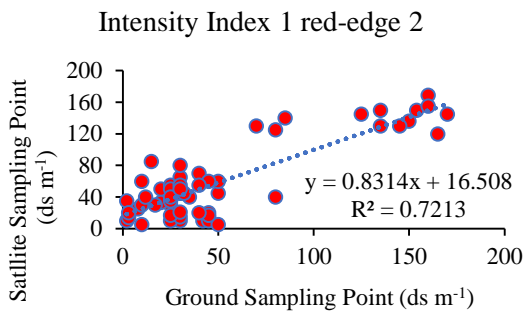
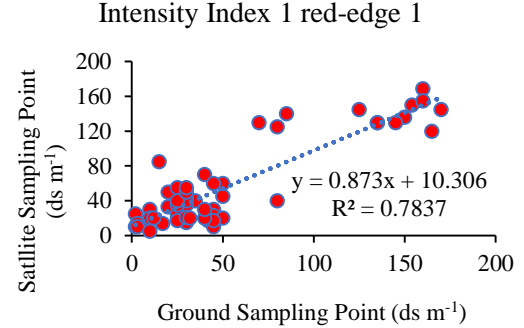
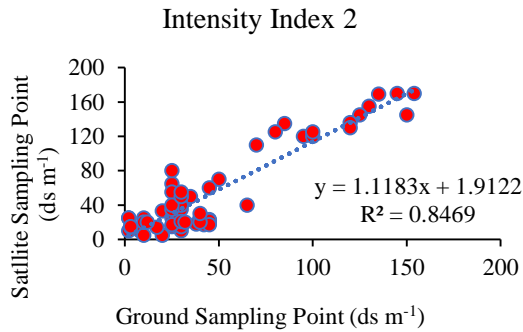
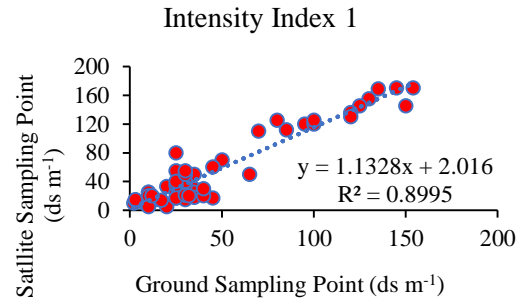
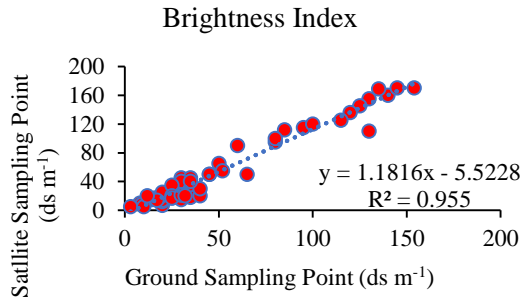


شکل ۱۲- شاخص‌های شوری و رطوبت خاک تصاویر رادار

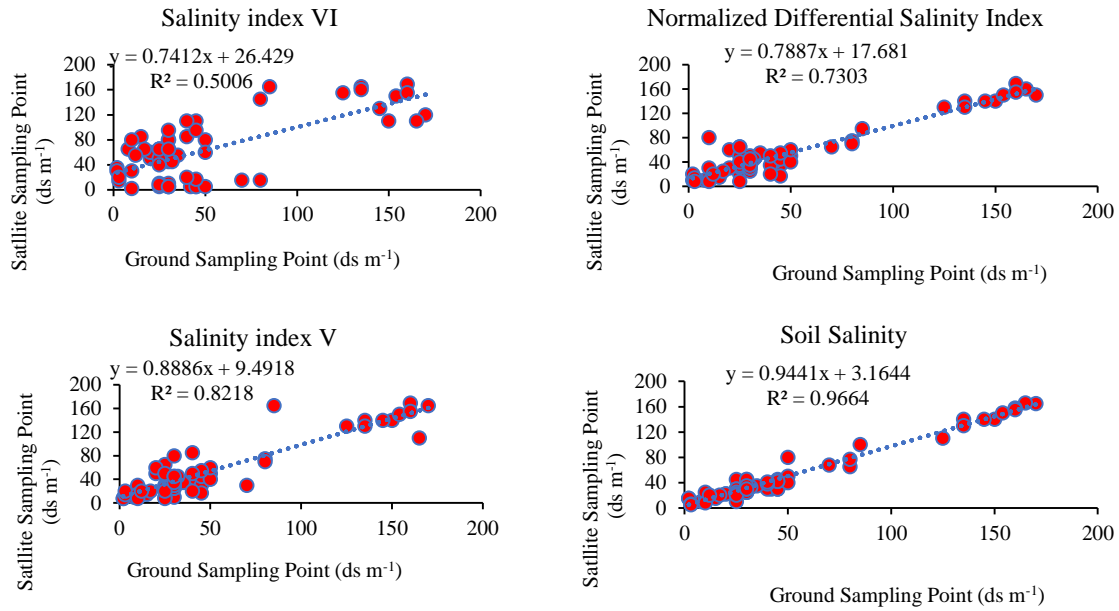
Figure 12. Salinity and soil moisture indices of radar images

همبستگی مربوط به شاخص SI با ۰/۹۶ می‌باشد. همبستگی شاخص BI تقریباً نزدیک به شاخص SI با ۰/۹۵ است. همبستگی بیشتر شاخص‌های شوری این تحقیق بین ۰/۶۰ تا ۰/۷۰ قرار دارد. میانگین همبستگی کل شاخص‌های شوری خاک ۰/۶۷ است. پایین آمدن میزان دقت شاخص‌ها به دلیل وجود شاخص‌های شوری خاک ۱ تا ۳ با استفاده از سه باند لبه‌ی قرمز می‌باشد.

نتایج ارزیابی شاخص‌های شوری خاک (تصاویر اپتیک) برای بررسی دقت شاخص‌های مختلف شوری خاک در این تحقیق از نمونه‌های زمینی برداشت شده استفاده شد. در شکل ۱۳ که ضریب همبستگی شاخص‌های مختلف شوری خاک با توجه به نمونه‌های زمینی بین ۰/۳۶ تا ۰/۹۶ می‌باشد. کمترین میزان همبستگی شاخص‌ها مربوط به شاخص SI RE 3 با ۰/۳۶ و بیشترین میزان





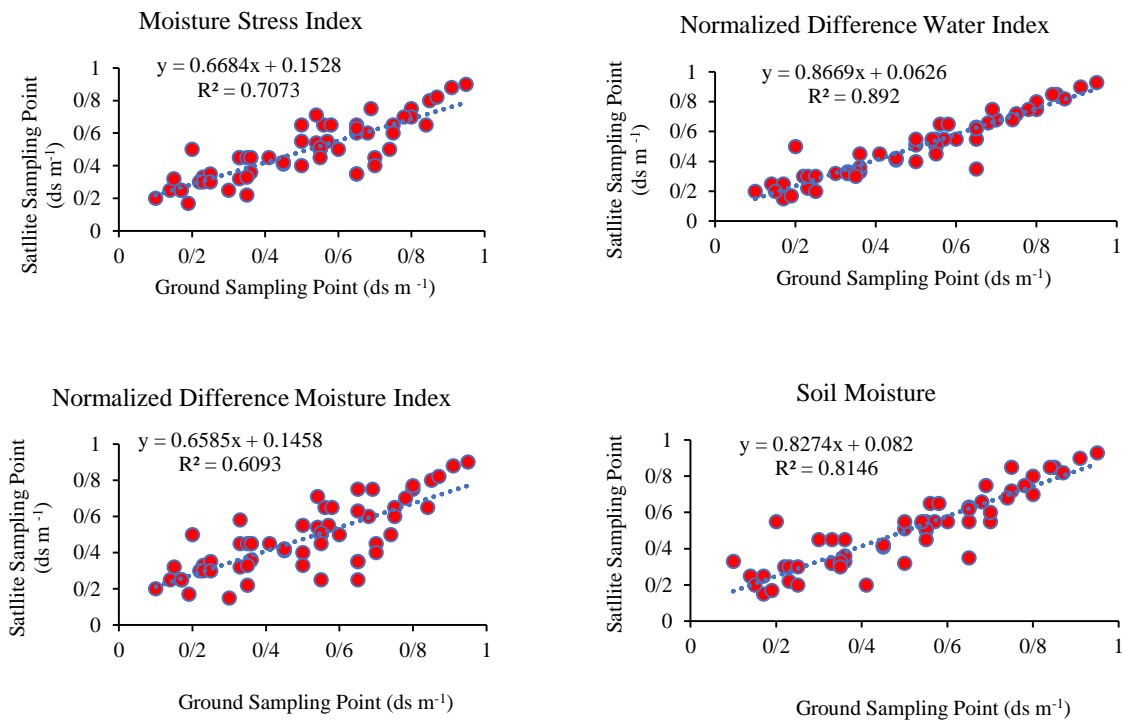


شکل ۱۳- میزان همبستگی شاخص‌های شوری تصاویر اپتیکی

Figure 13. Correlation of salinity indices of optical images

شده در شکل ۱۴ میزان همبستگی شاخص‌های رطوبتی این پژوهش بین ۰/۸۹ تا ۰/۶۰ قرار دارد. کمترین میزان همبستگی مربوط به شاخص NDMI با ۰/۶۰ و بیشترین میزان همبستگی مربوط به شاخص NDWI با ۰/۸۹ می‌باشد.

نتایج ارزیابی شاخص‌های رطوبت خاک (تصاویر اپتیکی) در این پژوهش چهار شاخص رطوبتی با استفاده از سنتینل ۲ استفاده شده است. برای ارزیابی دقت این شاخص‌ها رابطه رگرسیونی بین نقاط زمینی و نقاط محاسبه داخل تصویر انجام شد. بر اساس نتایج حاصل



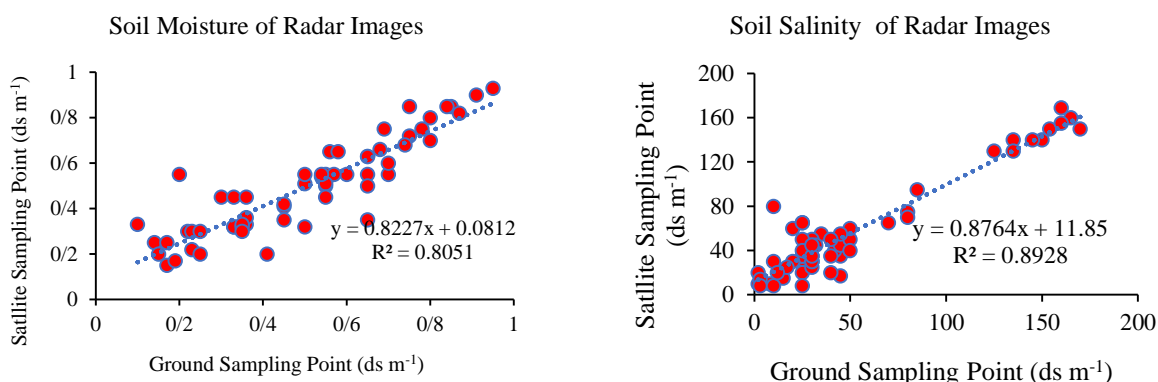
شکل ۱۴- میزان همبستگی شاخص‌های رطوبت خاک تصاویر اپتیکی

Figure 14. The degree of correlation between soil moisture indices and optical images

۱۵ با استفاده از تصاویر رادار به ترتیب بین ۰/۸۹ و ۰/۸۰ قرار دارد. میان دقت کلی شاخص‌های شوری و رطوبت خاک با استفاده از تصاویر اپتیکی نسبت به تصاویر راداری نسبتاً بالاتر می‌باشد.

### نتایج ارزیابی شاخص‌های رطوبت و شوری خاک (تصاویر رادار)

شوری و رطوبت خاک نیز با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱ بدست آمده است. نتایج دقت شوری و رطوبت خاک در شکل



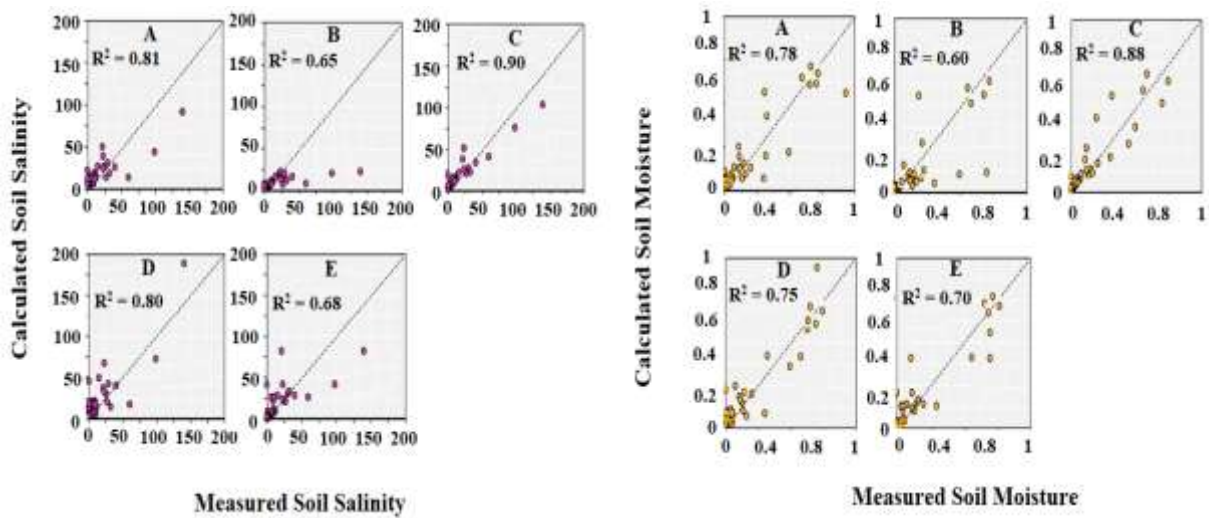
شکل ۱۵- میزان همبستگی شاخص‌های شوری و رطوبت خاک تصاویر رادار

Figure 15. Correlation between salinity and soil moisture indices of radar images

چهار مدل (RBF-NN, GP, RF) قابل قبول بوده‌اند. در نمونه‌های آموزشی بالاترین دقت مدل RF با  $R^2=0.90$  و  $RMSE=2$  و بعد از آن مدل GP با  $R^2=0.81$  بوده و در مقایسه با این مدل‌ها، مدل SVR از آموزش کمتری برخوردار بوده است. در نتایج مدل سازی عددی مربوط به عملکرد پنج الگوریتم در شکل ۱۴ و ۱۵ و جدول ۶ برای رطوبت خاک نشان داده شده است. طبق نتایج بالاترین دقت مربوط به اعتبارسنجی الگوریتم GP با  $R^2=0.88$  و کمترین دقت مربوط به الگوریتم RF با  $R^2=0.56$  بوده است. با توجه به نتایج اعتبارسنجی، مدل GP بالاترین عملکرد پیش‌بینی را داشت. که میزان  $R^2=0.82$  و  $RMSE=2$  در زمینه شوری و در مورد رطوبت خاک الگوریتم CP دارای  $RMSE=1.1$  و  $R^2=0.88$  بوده و همچنین بعد از آن مدل RBF-NN با  $R^2=0.67$  قرار دارد. در میان این ۵ مدل کمترین اعتبارسنجی مربوط به مدل RF بوده است.

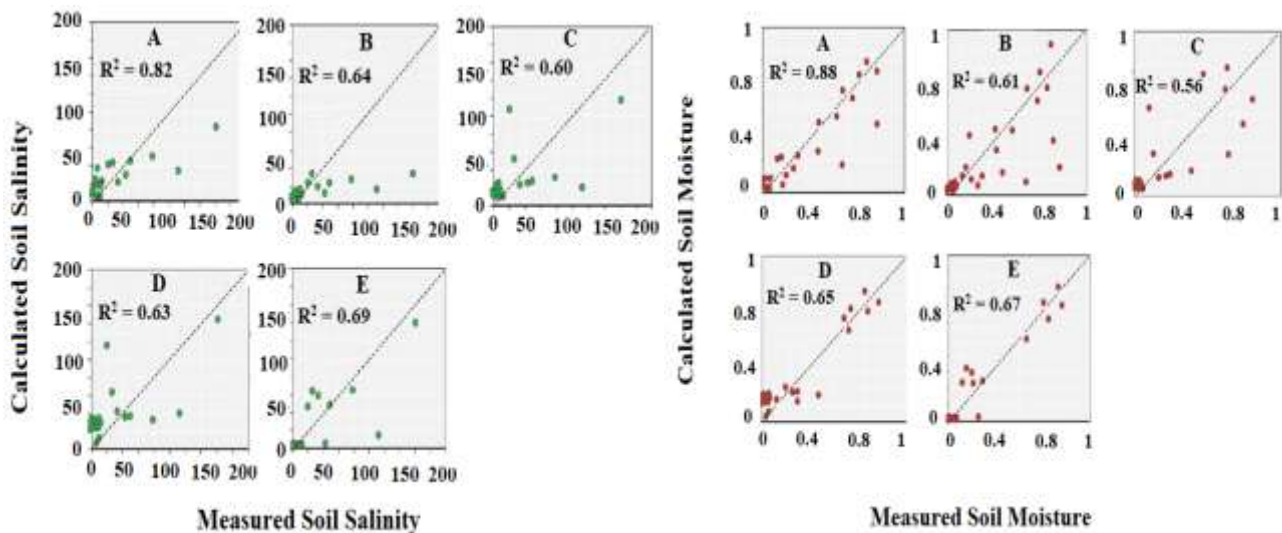
### نتایج مدل سازی عددی

تحلیل عددی شاخه‌ای از ریاضیات است که با استفاده از تقریب عددی مسائل مداوم را حل می‌کند. این شامل طراحی روش‌هایی است که راه‌حل‌های عددی تقریبی اما دقیق ارائه می‌دهد، که در مواردی که محاسبه راه حل دقیق غیرممکن یا بسیار گران است بسیار مفید است. تجزیه و تحلیل عددی همچنین شامل توصیف همگرایی، دقت، ثبات و پیچیدگی محاسباتی این روش‌ها است. برای مدل‌سازی عددی ابتدا از ۵۰ تا نمونه ۲۰ تا به صورت اتفاقی انتخاب و ۳۰ نمونه نیز پنهان شدند. این نمونه‌های پنهان و نقاط اصلی وارد نرم‌افزار متلب شده و با استفاده از ۵ الگوریتم مختلف به مدل‌سازی پرداخته شد. در این روش هر چه تعداد نقاط پنهان افزایش پیدا می‌کرد دقت مدل‌ها نیز بیشتر می‌شد. آموزش نهایی و نتایج اعتبارسنجی از پنج مدل شوری خاک در جدول ۵ و شکل ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده است. در نمونه‌های آموزش تنها



شکل ۱۶- ضریب همبستگی اندازه گیری داده‌های زمینی و شوری و رطوبت خاک داده‌های تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از مجموعه آموزش (الف: فرایندهای گاوسی، ب: رگرسیون بردار پشتیبان، پ: جنگل‌های تصادفی، ت: شبکه‌های عصبی چند لایه، ث: شبکه‌های عصبی تابع پایه شعاعی)

Figure 16. Correlation coefficient of measurement of terrestrial and salinity data and soil moisture of satellite imagery data using training set (A: Gaussian processes, B: support vector regression, C: random forests, D: Multilayer Neural Networks, E: Radial Basic Function Neural Networks)



شکل ۱۷- ضریب همبستگی شوری و رطوبت خاک تصاویر ماهواره‌ای و داده زمینی استفاده از اعتبارسنجی زمینی (الف: فرایندهای گاوسی، ب: رگرسیون بردار پشتیبان، پ: جنگل‌های تصادفی، ت: شبکه‌های عصبی چند لایه، ث: شبکه‌های عصبی تابع پایه شعاعی)

Figure 17. Correlation coefficient of salinity and soil moisture of satellite images and ground data using ground validation (A: Gaussian processes, B: support vector regression, C: random forests, D: Multilayer Neural Networks, E: Radial Basic Function Neural Networks)

جدول ۵- عملکرد پنج مدل شوری خاک با استفاده از مجموعه آموزش و اعتبارسنجی

Table 5. Performance of five soil salinity models using training and validation sets

Modeling Name	Educational Collection		Validation	
	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE
Multilayer Perceptron Neural Networks (MLP-NN)	0.80	2.3	0.63	2.5
Radial Basis Function Neural Networks (RBF-NN)	0.68	1.9	0.69	1.2
Gaussian Processes (GP)	0.81	1.3	0.82	2
Support Vector Regression (SVR)	0.65	1.7	0.64	2.1
Random Forests (RF)	0.90	2	0.60	1.9

جدول ۶- عملکرد پنج مدل رطوبت خاک با استفاده از مجموعه آموزش و اعتبارسنجی

Table 6. Performance of five soil moisture models using training and validation sets

Modeling Name	Educational Collection		Validation	
	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE
Multilayer Perceptron Neural Networks (MLP-NN)	0.75	2.5	0.65	2.1
Radial Basis Function Neural Networks (RBF-NN)	0.70	1.8	0.67	1.7
Gaussian Processes (GP)	0.78	1.5	0.88	1.1
Support Vector Regression (SVR)	0.60	1.2	0.61	2.7
Random Forests (RF)	0.88	2	0.56	2.3

### نتیجه گیری کلی

خاک یکی از منابع طبیعی و شاید مهمترین زیربنای تمدن هر کشور است و در واقع مسایر پیشرفت با سیر قهقرایی هر جامعه را اصول چگونگی بهره برداری از خاک تعیین می کند و ارزش خاک هنگامی معلوم می شود که مانند آزادی به مخاطره افتد. خاک به عنوان بستر حیات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نشان دهنده توان تولید اراضی است. شور شدن خاک و کمبود رطوبت هنوز یک مشکل جدی در سراسر جهان است که محیط طبیعی را تحت تأثیر قرار می دهد، باعث از بین رفتن بهره‌وری کشاورزی و ایمنی مواد غذایی می شود. بنابراین، تهیه نقشه شوری و رطوبت خاک حائز اهمیت و اطلاعات مفیدی از سطح شوری خاک را در اختیار شما قرار می دهد که ممکن است برای برنامه ریزی و مدیریت کاربری اراضی مفید باشد.

این پژوهش با استفاده از تصاویر سنتینل ۱ و ۲ شوری و رطوبت خاک در منطقه‌ی غرب دریاچه‌ی ارومیه مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در این تحقیق از مدل سازی عددی و تصویری شوری و رطوبت خاک با استفاده از پنج الگوریتم پیشرفته استفاده شد. در این تحقیق در زمینه برآورد رطوبت خاک با استفاده از تصاویر اپتیکی از چهار شاخص رطوبتی مختلف استفاده شد تا بهترین نتیجه ممکن حاصل گردد. نتایج شاخص‌های رطوبتی نشان داد

که بالاترین دقت را شاخص NDWI دارد که دقت نتایج آن  $R^2=0.89$  و  $RMSE=0.9$  می باشد. بیشترین میزان رطوبت در انواع شاخص‌های رطوبتی در منطقه‌ی خشک شده دریاچه ارومیه می باشد. نتایج شاخص‌های شوری خاک نشان داد که منطقه‌ی که بالاترین درصد پوشش گیاهی را دارد کمترین میزان شوری خاک را نیز در نتایج مختلف شاخص‌ها دارا می باشد. طبق نتایج شاخص‌های مختلف و مقایسه آن با داده‌های زمینی شاخص Salinity index دارای بالاترین دقت یعنی  $0.96$  می باشد. نتایج برآورد رطوبت و شوری خاک با استفاده از تصاویر رادار به ترتیب دارای دقت  $0.80$  و  $0.89$  می باشد. نتایج مدل سازی نشان داد که الگوریتم GP دارای بالاترین میزان صحت سنجی می باشد. در مقایسه این تحقیق با نتایج تحقیقات گذشته می توان به کار ویت هوا و همکاران (۲۰۱۹)، شوری خاک رو با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱ و هوش مصنوعی مورد ارزیابی قرار داده، و به این نتیجه رسیدند که تصاویر رادار دقت بالای در ارزیابی شوری خاک دارد. همچنین تقدوسی و همکاران (۲۰۱۸)، با استفاده از تصاویر رادار شوری خاک را بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که تصاویر رادار در قطبش VV و VH دقت بالای در برآورد شوری خاک دارد.

## References

- Bishop C. M. 2006. Pattern Recognition and Machine Learning. springer.4(4):738.
- Beaudoin A., Gwyn Q.H.J. and T. Le Toan. 1990. Sar observation and modelling of the c-band backscatter variability due to multi-scale geometry and soil moisture. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28: 886-894.
- Dobson M. C., Ulaby F. T., Hallikainen M. T. and El-Rayes M. A. 1985. Microwave dielectric behavior of wet soil-part ii: dielectric mixing models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1: 35-46.
- Engman E. T., and Chauhan N. 1995. Status of microwave soil moisture measurements with remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 51(1):189-198.
- Fernandez-Buces. N. C. Siebe. S. Cram. and Palacio J. 2006. Mapping soil salinity using a combined spectralresponse index for bare soil and vegetation: A case study in the former lake texcoco, mexico. *Journal of Arid Environments*, 65: 644-667.
- Filippini F. 2019. Sentinel-1 grd preprocessing workflow. in multidisciplinary digital publishing institute proceedings. 18(1):11.
- Gong, H., Shao, Y., Brisco, B., Hu, Q., & Tian, W. 2013. Modeling the dielectric behavior of saline soil at microwave frequencies. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 39(1), 17-26.
- Helmut L., Tavakoli H., Ansair R., Askar H and Rastegari J. 2013. Crop and forage production using saline waters. daya publishing house, india.
- Hoa, P. V., Giang, N. V., Binh, N. A., Hai, L. V. H., Pham, T. D., Hasanlou, M., & Tien Bui, D. (2019). Soil salinity mapping using SAR sentinel-1 data and advanced machine learning algorithms: A case study at Ben Tre Province of the Mekong River Delta (Vietnam). *Remote Sensing*, 11(2), 128.
- He Y.-L., Geng Z.-Q., Zhu Q.-X. 2015. Data driven soft sensor development for complex chemical processes using extreme learning machine. *Chemical Engineering Research and Design*. 102, 1-11.
- Hallikainen M.T., Ulaby F.T., Dobson F.T. et al. 1985. Microwave dielectric behavior of wet soil. Part I: Empirical models and experimental observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 23: 25-34.
- Demattê, J. A., Campos, R. C., Alves, M. C., Fiorio, P. R., & Nanni, M. R. 2004. Visible-NIR reflectance: a new approach on soil evaluation. *Geoderma*, 121(1-2), 95-112.
- Jackson T. J., Le Vine D. M., Swift C. T., Schumugge T. J. and Schiebe F. R. 1995. Large area mapping of soil moisture using the ESTAR passive microwave radiometer in Washita'92. *Remote sensing of Environment*, 54(1), 27-37.
- Shirani H. 2000. *Journal of Soil Physics*, Valiasr University, Rafsanjan. (In Persian)
- Kafi M. Borzoi, A.; Salehi, M.; Kamandi A., Masoumi A; Nabati, J. 2009, *Physiology of environmental stresses in plants*. Publications University of Mashhad.
- 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. *Agriculture Water Manager*, 77 (1-3): 96-109.
- Lasne Y., Paillou P., Freeman A. and et al. 2008. Effect of salinity on the dielectric properties of geological materials: Implication for soil moisture detection by means of radar remote sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(6): 1674-1688.
- Lee J. S., and Pottier E. 2009. Polarimetric radar imaging: from basics to applications. CRC press.
- Materka A., and Strzelecki M. 1998. Texture analysis methods-a review. Technical university of lodz, institute of electronics, COST B11 report, Brussels, 9-11.
- Modiri M. 1996, Principles and foundations of remote mining, Geographical Organization.
- Nurmemet I., Ghulam A., Tiyp T., Elkadiri R., Ding J. L., Maimaitiyiming M., Sun Q. 2015. Monitoring soil salinization in Keriya River Basin, Northwestern China using passive reflective and active microwave remote sensing data. *Remote Sensing*, 7(7): 8803-8829.
- Price J. C. 1980. The potential of remotely sensed thermal infrared data to infer surface soil moisture and evaporation. *Water Resources Research*, 16(4), 787-795.
- Rhoades, J. D., Chanduvi, F., & Lesch, S. M. 1999. Soil salinity assessment: Methods and interpretation of electrical conductivity measurements (No. 57). Food & Agriculture Org.

- Rodriguez-Fernandez N. J., Aires F., Richaume P., Kerr Y. H., Prigent C., Kolassa J. Drusch M. 2015. Soil moisture retrieval using neural networks: Application to SMOS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(11), 5991-6007.
- Sharifiya M.; Afzali A. A. 2012. Monitoring and analysis of soil salinity increasing trend in Damghan alluvial fan using satellite and survey data. *Scientific-Research Ministry of Science*, 3(14): 73-86.
- Sadeghi, A. M., Hancock, G. D., Waite, W. P., Scott, H. D., & Rand, J. A. 1984. Microwave measurements of moisture distributions in the upper soil profile. *Water Resources Research*, 20(7): 927-934.
- Alizadeh A. 2007. Soil Physics. Imam Reza University.
- Saha, S. K. 2011. Microwave remote sensing in soil quality assessment. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci*, 38(8), W20.
- SHAO Y., HU Q., GUO H. et al. 2003 Effect of dielectric properties of moist salinized soils on backscattering coefficients extracted from RADARSAT image. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 14(8): 1879-1888.
- TOPP G.C., DAVIS J.L., ANNAN A.P., Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines, *Water Resources Research*, 16: 547-582, 1980.
- Vijayarekha K. 2014. Feature Extraction. Thanjavur: School of Electrical and Electronics Engineering. SASTRA University.
- Wold S., Martens H., Wold H. 1983. The Multivariate Calibration Problem in Chemistry Solved by the PLS Method. *Matrix Pencils*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 286-293.
- Wuthrich M. 1994. March. ERS-1 SAR compared to thermal infrared to estimate surface soil moisture. In *Proceedings of the 21<sup>st</sup> Conference on Agricultural and Forest Meteorology*, American Meteorological Society, San Diego. pp: 197-200.
- Yan G. U. O., Zhou S. H. I., Zhou L. Q., Xi, J. I. N., Tian Y. F. and Teng H. F. 2013. Integrating remote sensing and proximal sensors for the detection of soil moisture and salinity variability in coastal areas. *Journal of Integrative Agriculture*, 12(4):723-731.
- Wold S., Martens H., Wold H. 1983. The Multivariate Calibration Problem in Chemistry Solved by the PLS Method. *Matrix Pencils*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 286-293.
- Zhan Z., Qin Q., Ghulan A., Wang D. 2007. NIR-red spectral space based new method for soil moisture monitoring. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 50(2), 283-289.
- ZRIBI M., DECHAMBRE M., A new empirical model to retrieve soil moisture and roughness from radar data, *Remote Sensing of Environment*, 84: 42-52, 2003.

## Modeling and Mapping of Soil Salinity and Moisture Using Spectral and Radar Remote Sensing

Salah Shahmoradi<sup>1\*</sup>, Hamid Reza Ghaffarian Malmiri<sup>2</sup>, Mohammad Sharifi Pichoon<sup>3</sup>

(Received: December 2020 Accepted: June 2021)

### Abstract

Soil salinity is caused by natural or human processes and is a major environmental hazard. There is also a lack of soil moisture which has a negative impact on agricultural activities in mountainous areas where most of the climate is semi-humid. The main purpose of this study is to map soil salinity and moisture located in the western part of Lake Urmia in Iran using Sentinel 1 and 2 satellites along with five neural network algorithms to model soil salinity and moisture. Learning models are multilayer neural networks (MLP-NN), radial basis radiation performance (RBF-NN), Gaussian processes (GP), support vector regression (SVR), and random forests (RF). First, different salinity and soil moisture indices were obtained using different algorithms, then using 60 soil samples at a depth of 5 to 15 cm during a field survey on 06/18/1398 along with the image time. Sentinel 1 and 2 were harvested, precision was performed. In the soil salinity indices used in optical images, the salinity index with an accuracy of 0.96 was the best indicator for estimating soil salinity according to comparison with terrestrial data. The NDWI index also had the highest accuracy for estimating moisture in optical images with an accuracy of  $R^2=0.89$ . The accuracy of estimating soil moisture and salinity in radar images was  $R^2=0.80$  and  $R^2=0.89$ , respectively. The performance of five algorithms for modeling was also evaluated and compared using mean square error (RMSE) and correlation coefficient ( $R^2$ ). The results showed that the GP model had the highest predictive performance (RMSE = 2 and  $R^2 = 0.82$ ) and was better than other machine learning models.

**Keywords:** Optical images, Urmia Lake, Sentinel, Soil moisture and salinity indices, Artificial neural network

Shahmoradi S., Ghaffarian Malmiri H., Sharifi Pichun M. 2022. Modeling and mapping of soil salinity and moisture using spectral and radar remote sensing. *Applied Soil Research*, 10(3): 43-65.

1. Graduate of Remote Sensing and Geographic Information System-Remote Sensing Department of Geography, Faculty of Humanities and Social Sciences, Yazd University, Iran

2. Assistant Professor, Department of Geography, Faculty of Humanities and Social Sciences, Yazd University, Iran

3. Assistant Professor, Department of Geography, Faculty of Humanities and Social Sciences, Yazd University, Iran

\* Corresponding Author Email: [salah.shahmoradi@gmail.com](mailto:salah.shahmoradi@gmail.com)