



## Estimation of saturated hydraulic conductivity of the soil surface layer by combining transfer functions and remote sensing (Case Study: South of Ahwaz Lands)

Mansour Sorkheh Nejad<sup>1</sup> | Mohammad Albaji<sup>2</sup> | Abd Ali Naseri<sup>3</sup> | Saeed Boroomand Nasab<sup>4</sup>

1. Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: [m.sorkheh1@gmail.com](mailto:m.sorkheh1@gmail.com)
2. Corresponding Author, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: [m.albaji@scu.ac.ir](mailto:m.albaji@scu.ac.ir)
3. Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: [abdalinaseri@scu.ac.ir](mailto:abdalinaseri@scu.ac.ir)
4. Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: [boroomandnasab@scu.ac.ir](mailto:boroomandnasab@scu.ac.ir)

---

### Article Info

### ABSTRACT

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** Jan. 17, 2023

**Revised:** Feb. 19, 2023

**Accepted:** March. 4, 2023

**Published online:** March. 21, 2023

**Keywords:**

Sentinel-2,  
Soil properties,  
Soil texture,  
Vegetation index.

Hydraulic conductivity is one of the most important physical properties of soil, and knowing it plays a vital role in investigating the transport of solutes and pollutants in porous environments such as soil. This study aims to obtain saturated hydraulic conductivity pedotransfer functions (PTFs) using soil properties and satellite images. In this regard, the hydraulic conductivity of soil saturation was performed using the Inversed augerhole method in a part of the southwestern lands of Khuzestan province at 50 points. Then, at these points, surface samples of the soil were taken and soil properties such as soil texture, electrical conductivity, soil organic carbon, and saturated moisture were determined in the laboratory. In the next step, the indices of Sentinel-2 satellite images were calculated in three categories of soil, vegetation, and moisture indices and 11 PTFs, (PTF<sub>1</sub>-PTF<sub>11</sub>) for saturated hydraulic conductivity were obtained in four stages by combining soil properties and these indices. Finally, the spatial distribution of saturated soil hydraulic conductivity was obtained using the random forest model. The results of the modeling of PTFs of saturated hydraulic conductivity showed that among the 11 models with which PTFs of hydraulic conductivity were performed, the combination of three vegetation indices with soil-found early properties was the most effective for estimating the saturated hydraulic conductivity (PTF<sub>7</sub>). The values of R<sup>2</sup>, RMSE and MAE for this case were equal to 0.83, 0.40 and 0.166 respectively. Finally, the spatial distribution of saturated hydraulic conductivity using the Random Forest model showed that this model performs the spatial distribution of saturated soil hydraulic conductivity of soil well. Based on the obtained results, it can be found that the combination of soil properties with the indices obtained from the Sentinel-2 satellite images, creates PTFs of saturated hydraulic conductivity of the soil with very high accuracy.

---

Cite this article: Sorkheh Nejad, M. Albaji, M. Naseri, A. A., & Boroomand Nasab, S. (2023). Estimation of saturated hydraulic conductivity of the soil surface layer by combining transfer functions and remote sensing (Case Study: South of Ahwaz Lands). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (1), 105-122.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.353929.669430>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.353929.669430>

---

## تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع لایه سطحی خاک به روش تلفیق توابع انتقالی و سنجش از دور (مطالعه موردی: اراضی جنوب اهواز)

منصور سرخه‌نژاد<sup>۱</sup> | محمد الباجی<sup>۲</sup> | عبدعلی ناصری<sup>۳</sup> | سعید برومند نسب<sup>۴</sup>

۱. گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، رایانامه: [m.sorkheh1@gmail.com](mailto:m.sorkheh1@gmail.com)

۲. نویسنده مسئول، گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، رایانامه: [m.albaji@scu.ac.ir](mailto:m.albaji@scu.ac.ir)

۳. گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، رایانامه: [abdalinaseri@scu.ac.ir](mailto:abdalinaseri@scu.ac.ir)

۴. گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، رایانامه: [broomandnasaeed@scu.ac.ir](mailto:broomandnasaeed@scu.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدایت هیدرولیکی خاک یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی خاک می‌باشد که شناخت آن، نقش مهمی در بررسی انتقال املاح و آلاینده‌ها در خاک دارد. بنابراین، هدف از این پژوهش به دست آوردن توابع انتقالی هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از ترکیب ویژگی‌های زود یافت خاک و تصاویر ماهواره‌ای بود. بنابراین، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از روش چاهک معکوس در بخشی از اراضی جنوب غربی استان خوزستان در ۵۰ نقطه انجام شد. سپس، در این نقاط، نمونه‌های سطحی از خاک برداشت شد و ویژگی‌های زود یافت خاک مانند بافت خاک، هدایت الکتریکی، کربن آلی خاک و رطوبت اشباع خاک اندازه‌گیری شد. در مرحله بعد، شاخص‌های بازتابی خاک، پوشش گیاهی و رطوبتی خاک با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل ۲ - تهیه شدند و یازده تابع انتقالی (PTF1-PTF11) برای هدایت هیدرولیکی اشباع طی چهار مرحله با ترکیب ویژگی‌های زود یافت خاک و این شاخص‌ها به دست آمد. در نهایت، با استفاده از مدل جنگل تصادفی پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به دست آمد. نتایج مدل‌سازی توابع انتقالی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک نشان داد که از بین یازده مدلی که توابع انتقالی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از آن‌ها تهیه شده بود، ترکیب شاخص‌های پوشش گیاهی با ویژگی‌های زود یافت خاک بیشترین کارایی را برای تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع داشت (PTF7). مقادیر $R^2$ ، RMSE و MAE برای این حالت به ترتیب برابر با ۰/۸۳، ۰/۴۰ و ۰/۱۶ بود. همچنین، پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از مدل جنگل تصادفی نشان داد که این مدل توزیع مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک را با دقت بالایی پیش‌بینی می‌کند. بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان گفت که ترکیب ویژگی‌های زود یافت خاک با شاخص‌های به دست آمده از تصاویر ماهواره سنتینل ۲، باعث ایجاد توابع انتقالی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با دقت بسیار بالا می‌شود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۳۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۳	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱/۱	
واژه‌های کلیدی: بافت خاک، سنتینل-۲، شاخص پوشش گیاهی، ویژگی‌های زود یافت خاک	

استناد: سرخه‌نژاد، منصور؛ الباجی، محمد؛ ناصری، عبدعلی؛ برومندنسب، سعید. (۱۴۰۲). تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع لایه سطحی خاک به روش تلفیق توابع انتقالی و سنجش از دور (مطالعه موردی: اراضی جنوب اهواز). *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۴ (۱)، ۱۰۵-۱۲۲.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.353929.669430>



ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.353929.669430>

## مقدمه

یکی از عمده‌ترین چالش‌های پیش‌روی انسان تأمین غذا و تضمین امنیت غذایی جمعیت رو به افزایش در قرن بیست و یکم می‌باشد (De amorim et al., 2019). بنابراین، مدیریت پایدار منابع آب به ویژه در مناطق گرم و خشک که محدودیت منابع آب در این مناطق بیشتر است، بسیار ضروری است (خسروی و همکاران، ۱۴۰۱). مدیریت بهینه و استفاده بهتر از منابع آب و خاک در مزرعه و چگونگی دسترسی آب موجود در خاک برای گیاهان در ارزیابی هرچه بهتر روابط آب و خاک، نیاز به مطالعه، شناخت و اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی خاک دارد (Zhang et al., 2023).

هدایت هیدرولیکی<sup>۱</sup> یکی از خصوصیات هیدرودینامیک خاک است که نقش تعیین کننده‌ای در حرکت و انتقال آب و املاح در خاک دارد. همچنین، در پروژه‌های زهکشی، اطلاع از مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک<sup>۲</sup> بسیار ضروری است (Montzka et al., 2017). بافت خاک به عنوان عنصری سهل الوصول که می‌تواند با هدایت هیدرولیکی خاک همبستگی داشته باشد، به منظور تخمین هدایت هیدرولیکی به کار برده می‌شود. لازمه استفاده از این روش، بررسی و تعیین همبستگی بافت خاک و مقادیر هدایت هیدرولیکی با استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری شده زمینی است (خسروی و همکاران، ۱۴۰۱). به طور کلی، در گذشته برای مدل‌سازی هدایت هیدرولیکی خاک از ویژگی‌های در دسترس خاک و توابع انتقالی استفاده می‌شد (Bouma, 1989). از این توابع علاوه بر هدایت هیدرولیکی خاک، جهت تخمین بسیاری از ویژگی‌های خاک مانند کربن آلی خاک، رطوبت خاک و جرم مخصوص ظاهری خاک نیز استفاده می‌شد. اما تخمین‌های حاصل از توابع انتقالی همیشه دقت قابل قبولی و بالایی را برای تخمین ارائه نمی‌داد (Al masmoudi et al., 2021).

در کشاورزی مدرن، تمایل به استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بسیار مورد توجه است. زیرا بسیاری از ماهواره‌ها طیف وسیعی از ویژگی‌های خاک را با بزرگنمایی بسیار خوب نشان می‌دهند. در این راستا، ترکیب داده‌های زمینی با داده‌های ماهواره‌ای به وسیله مدل‌های موجود می‌توانند تخمین‌های مناسبی از ویژگی‌های خاک مناطق خشک و نیمه خشک ارائه دهد (Zhu et al., 2019). بنابراین، امروزه با بهره‌گیری از داده‌های حاصل از ماهواره‌ها می‌توان دقت تخمین ویژگی‌های خاک را تا حد زیادی افزایش داد (Kashif gill et al., 2007). به عنوان مثال در بسیاری از تحقیقات برای توسعه توابع انتقالی از ترکیب شاخص‌های استخراجی از داده‌های ماهواره سنتینل-۲ و ویژگی‌های خاک استفاده می‌شود که منجر به افزایش دقت تخمین می‌شود (Sedaghat et al., 2022). بابائیان و همکاران (۱۳۹۴) سناریوهای مختلف وضوح طیفی در آزمایشگاه را در برآورد ویژگی‌های هیدرولیک خاک مورد سنجش قرار دادند. در این تحقیق قابلیت استفاده از توابع انتقالی طیفی (STFS) در قالب چهار سناریو شامل داده‌های طیفی در مقیاس آزمایشگاهی (سناریوی ۱)، داده‌های طیفی در مقیاس سنجنده سنتینل-۲ (سناریوی ۲)، داده‌های طیفی در مقیاس سنجنده ابرطیفی EN MAP (سناریوی ۳) و مقایسه آن‌ها با نتایج کاربرد توابع روزتا<sup>۳</sup> و HYPRES (سناریوی ۴) در مقیاس‌های نقطه‌ای و واحد نقشه خاک به منظور برآورد پارامترهای مدل وان گنوختن - معلم را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که بهترین نتایج برای برآورد پارامترهای مدل وان گنوختن - معلم سناریوی ۱ و ۲ می‌باشد. همچنین، استفاده از سه سناریوی طیفی، منجر به بالاترین دقت در پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع خاک در مقایسه با سناریوی چهارم می‌شود. همچنین، نتایج آنها نشان داد با استفاده از اطلاعات طیفی خاک در گستره مرئی و مادون قرمز نزدیک و میانی می‌توان توابعی تحت عنوان توابع انتقالی طیفی نقطه‌ای و پارامتریک ارائه کرد که به کمک آن‌ها می‌توان ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را برآورد کرد.

نکته حائز اهمیت این است که نظارت مستمر بر مقدار هدایت هیدرولیکی خاک در مناطق خشک و نیمه خشک که اقلیم شکننده‌ای دارند، بسیار حائز اهمیت است. مطالعات انجام شده نشان داده است که استفاده از داده‌های ماهواره‌های سنتینل-۲ برای مطالعه ویژگی‌های خاک بسیار مفید و بسیاری از محققین استفاده از این داده‌ها را برای تخمین هدایت هیدرولیکی خاک پیشنهاد کرده‌اند (Honarbakhsh et al., 2022). با توجه به پیشرفت‌های حاصل در دنیای ماهواره‌ها و علم سنجش از دور، تخمین هیدرولیکی خاک به کمک رفتار طیفی روش نوینی است که اخیراً به طور گسترده مد نظر قرار گرفته است. این فن آوری، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در زمینه خاک و توسعه توابع انتقالی در اختیار بگذارد (Zhang and Schaap., 2019; Honarbakhsh et al., 2022). با توجه به توانایی بالای فن آوری سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در کار با داده‌های مکانی و قابلیت بالای این روش‌ها در بخش کشاورزی، کاربرد این فن آوری در

1. Soil Hydraulic Conductivity (K)

2. Soil Saturated Hydraulic Conductivity (Ks)

3. Sentinel-2

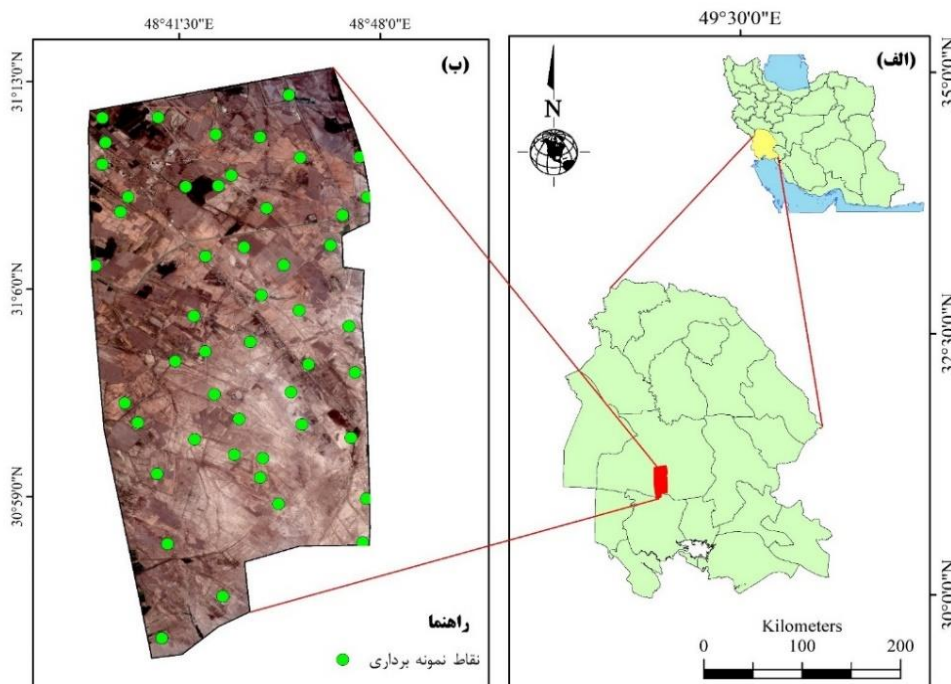
4. Rosetta

تخمین خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک می‌تواند بسیار مفید و به صرفه باشد. اما قبل از استفاده از این فن‌آوری در سطح وسیع، توسعه مدل‌ها و روش‌های مناسب در هر بخش و ارزیابی و صحت‌سنجی نتایج حاصل از آنها امری اجتناب‌ناپذیر است. اما سوالی که منجر به طرح این پژوهش شد این بود که آیا ترکیب داده‌های ماهواره سنتینل-۲ با ویژگی‌های زود یافت خاک اراضی جنوب استان خوزستان می‌تواند دقت پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی خاک را با استفاده از توابع انتقالی افزایش دهد یا خیر؟ در این راستا، تحقیق حاضر به منظور ارزیابی دقت تخمین هدایت هیدرولیکی اشیاع خاک با استفاده از تلفیق ویژگی‌های زود یافت خاک (مانند بافت خاک) و داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۲ در بخشی از اراضی جنوب استان خوزستان انجام شد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

این پژوهش، در بخشی از جنوب غربی استان خوزستان (اراضی جنوب شهرستان اهواز) در بین طول شرقی  $48^{\circ}41'15''$  تا  $48^{\circ}48'00''$  و عرض شمالی  $30^{\circ}58'30''$  تا  $31^{\circ}30'00''$  در جنوب غربی ایران و به وسعت حدود ۴۰ هزار هکتار انجام شد (شکل ۱- الف). بر مبنای مدل رقومی ارتفاعی و نقشه توپوگرافی منطقه، کمترین ارتفاع منطقه مورد مطالعه صفر و بیشترین ارتفاع ۲۵ متر از سطح دریا می‌باشد. شیب منطقه، بین ۲ تا ۸ درصد متغیر می‌باشد. همچنین، طبق آمار دوره ده ساله (۱۳۹۹-۱۳۸۹) اداره کل هواشناسی استان خوزستان، درجه حرارت متوسط سالیانه در منطقه مورد مطالعه،  $25/43$  درجه سانتی‌گراد، متوسط دمای حداکثر سالیانه منطقه  $36/07$  و متوسط دمای حداقل آن  $13/75$  درجه سانتی‌گراد می‌باشد. بر اساس آمار ده ساله (۱۳۹۹-۱۳۸۹) اداره هواشناسی، حداکثر متوسط بارندگی ماه‌های سال به آذر ماه با متوسط بارش  $40/97$  میلی‌متر و حداقل متوسط بارندگی به خرداد و تیر ماه با متوسط بارندگی صفر میلی‌متر تعلق دارد؛ همچنین متوسط بارندگی سالیانه این منطقه،  $150/25$  میلی‌متر در سال می‌باشد.



شکل ۱. نمایی اجمالی از منطقه مورد مطالعه در ایران (الف) و نقاط نمونه‌برداری (ب)

### اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشیاع، نمونه‌برداری و انجام آنالیزهای فیزیکی شیمیایی

برای انجام این پژوهش، ابتدا هدایت هیدرولیکی اشیاع در عمق ۳۰-۵۰ سانتی‌متری خاک با استفاده از روش چاهک معکوس در ۵۰ نقطه اندازه‌گیری شد (شکل ۱- ب). همچنین در این نقاط، نمونه‌های خاک برای انجام آنالیزهای آزمایشگاهی برداشت و به آزمایشگاه منتقل شد. سپس، نمونه‌های خاک هوا خشک شده و برای همگن‌سازی ذرات خاک از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. در نهایت ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی شامل اسیدیته و هدایت الکتریکی با استفاده از روش گل اشیاع، توزیع اندازه ذرات (شن، سیلت و رس) با استفاده از روش

هیدرومتری، جرم ویژه ظاهری خاک با استفاده از روش سیلندر و مقدار کربن آلی خاک با استفاده از روش والکلی - بلاک اندازه گیری شدند (USDA, 1999).

### گام‌های ساخت توابع انتقالی برای هدایت هیدرولیکی اشباع

برای ساخت توابع انتقالی، در ابتدا آزمون فرض نرمالیتت برای اطمینان از نرمال بودن داده‌ها انجام شد. در مرحله بعد در صورت نرمال نبودن داده‌ها از روش‌های نرمال‌سازی برای نرمال کردن داده‌ها استفاده شد (صداقت، ۱۳۹۲). سپس، برای بررسی فرض صحت رگرسیون خطی، همراستایی بین متغیرهای مستقل بررسی شد. در این حالت اگر بین متغیرهای مستقل رابطه قوی مشاهده شود، همراستایی چندگانه به وجود می‌آید که سبب نامعتبر شدن نتایج رگرسیون می‌شود. برای اطلاع از همراستایی از عامل تورم واریانس<sup>۱</sup> (VIF) استفاده شد. متغیرهایی که نسبت  $VIF < 10$  داشته باشند، دشواری همراستایی را نخواهند داشت. بنابراین، در این تحقیق متغیرهایی که همبستگی قوی با هم داشتند، در ایجاد توابع انتقالی به کار برده نشدند. شاخص تورم واریانس با استفاده از رابطه (۱) قابل محاسبه است.

$$VIF = \frac{1}{1 - R^2} \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه  $R^2$  ضریب تبیین بین متغیرها می‌باشد.

سپس از مدل‌های رگرسیونی برای برآورد توابع انتقالی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از نرم‌افزارهای MINITAB و SPSS استفاده شد. در گذشته از ویژگی‌های خاک برای تخمین هدایت هیدرولیکی استفاده می‌شد. مشکلی که در این روش وجود داشت این بود که اندازه‌گیری بسیاری از ویژگی‌های خاک و تعداد نمونه‌های زیاد، مشکل است. بنابراین در این تحقیق از ترکیب شاخص‌های متنوع سنجش از دور و ویژگی‌های خاک برای برآورد توابع هیدرولیکی خاک استفاده شد. زیرا داده‌های سنجش از دور هم دقت مدل را بالا می‌برند و هم نیاز به مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی را کاهش می‌دهند؛ در نتیجه در وقت و هزینه‌ها بسیار صرفه‌جویی می‌شود (Sedaghat et al., 2022).

### به دست آوردن شاخص‌های تصاویر ماهواره‌ای و توسعه توابع انتقالی خاک

برای انجام این تحقیق از تصاویر ماهواره سنتینل-۲ استفاده شد. برای این منظور، تصاویر ماهواره سنتینل-۲ در فصل خشک سال (در شهریور ماه سال ۱۳۹۹) و در آسمان صاف تهیه و پیش‌پردازش‌های این تصاویر در نرم افزار ENVI انجام شد. بعد از تعریف طول موج‌ها بر حسب میکرومتر در این نرم افزار، تصاویر در محدوده باندهای مرئی (RGB)، مادون قرمز (NIR)، لبه قرمز (MIR) و مادون قرمز کوتاه (SWIR) تفکیک شدند (Khosravi Aqdam et al., 2021). بعد از انجام پیش‌پردازش‌ها و تعریف طول موج‌های باندهای ۲۰ متری سنتینل-۲، شاخص‌های تصاویر ماهواره‌ای در سه دسته بازتابشی خاک، پوشش گیاهی و بازتابشی رطوبت به دست آمد که فرمول و تعاریف آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است (Sedaghat et al., 2022). در مرحله بعد، همبستگی شاخص‌های محاسبه شده و ویژگی‌های زود یافت خاک با هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به دست آمد. در نهایت، بعد از به دست آوردن شاخص تورم واریانس، مدل‌سازی توابع انتقالی با ترکیب ویژگی‌های خاک و شاخص‌های تصاویر ماهواره سنتینل-۲ انجام شد. در این مرحله جهت مدل‌سازی داده‌ها به دو دسته آموزش<sup>۲</sup> و صحت‌سنجی<sup>۳</sup> با نسبت ۷۵ به ۲۵ درصد تفکیک شد. قابل ذکر است که داده‌ها به صورت تصادفی در نرم‌افزار SAS JMP PRO انجام شد.

### شاخص‌های صحت‌سنجی

بعد از مدل‌سازی توابع انتقالی با استفاده از پارامترهای یاد شده، مقادیر دقت مدل‌ها با استفاده از شاخص  $R^2$ <sup>۴</sup> و صحت این مدل‌ها با استفاده از  $RMSE$ <sup>۵</sup> و  $MAE$ <sup>۶</sup> بر طبق روابط ۲ تا ۴ سنجیده شدند.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Obs - Pred)^2}{\sum_{i=1}^n (Obs - \overline{Obs})^2} \quad \text{رابطه ۲}$$

1. Variance Inflation Factor (VIF)
2. Train
3. Test
4. Coefficient of determination
5. Root-mean-square error
6. Mean absolute error

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Obs - Pred)^2}{n}} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^n |Obs - Pred|}{n} \quad \text{رابطه ۴}$$

در این روابط، Obs مقدار اندازه‌گیری شد، Pred مقادیر پیش‌بینی شده، Obs مقادیر میانگین اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از روش چاهک معکوس می‌باشد (Malon et al., 2017).

جدول ۱. شاخص‌های محاسبه شده با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و ویژگی‌های خاک

نام شاخص	نماد	فرمول محاسبه
<b>شاخص‌های انعکاسی خاک</b>		
Visible and Shortwave infrared Drought Index	VSDI	VSDI= 1-(Mir +Red-2Blue)
Brightness Index	BI	BI=SQRT(((Red×Red))/(Green×Green))/2)
Colour Index	CI	CI= (Red-Green)/(Red+Green)
Global Environmental Monitoring Index	GEMI	$GEMI = \eta \times \frac{(1 - 0.25\eta) - (Red - 125)}{1 - Red}$ $\eta = 2 \times \frac{(NIR - Red \times Red) + 1.5 \times NIR + 0.5 \times Red}{NIR + Red + 0.5}$
<b>شاخص‌های انعکاسی گیاه</b>		
Difference Vegetation Index	DVI	DVI= Nir-Red
Ratio Vegetation Index	RVI	RVI= Nir/Red
Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	NDVI= (Nir - Red)/(Nir + Red)
<b>شاخص‌های انعکاسی رطوبت</b>		
Moisture Strees Index	MSI	MSI= MIR/NIR
Water Ratio Index	WRI	WRI=(Green+RED)/(NIR+MIR)
Normalized Difference Water Index	NDWI	NDWI=(Green-NIR)/(Green +NIR)
Surface Water Capacity Index	SWCI	SWCI= (MIR-SWIR)/(MLR+SWIR)
Normalized Difference Moisture Index	NDMI	NDMI=(NIR-MIR)/(NIR+MIR)
<b>شاخص‌های محاسبه شده با ویژگی‌های زود یافت خاک</b>		
Clay content	C*	C*= SQRT(10×(65.5- Clay))
Silt content	SI*	SI*= SQRT(10×(60- Silt))
Sand content (sa)	SA*	SA*= Log(Sand+0.9)
Bulk density	BD*	BD*=SQRT(Ln(BD))

(Reference: Sedaghat et al., 2022)

### پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از روش یادگیری ماشین

بعد از به دست آوردن بهترین روش برای تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع، پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از روش یادگیری ماشین جنگل تصادفی<sup>۱</sup> انجام شد. این روش از بین روش‌های یادگیری ماشین یکی از بهترین روش‌ها پهنه‌بندی ویژگی‌های خاک می‌باشد (Wadox et al., 2019). به دلیل اینکه روش جنگل تصادفی بر مبنای معادلات رگرسیونی است، از این روش برای پهنه‌بندی استفاده شد. در این مرحله، بعد از تشخیص بهترین تابع برای تخمین هدایت هیدرولیکی خاک، نقشه رستری تمامی این پارامترها بعد از همسان‌سازی سطر و ستون‌ها، پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از بسته Random Forest در نرم‌افزار R-Studio انجام شد (Biau et al., 2016). قابل ذکر است که برای انجام این روش، داده‌ها به دو دسته آموزش (۷۵ درصد داده‌ها) و صحت‌سنجی (۲۵ درصد داده‌ها) تقسیم شدند. برای صحت‌سنجی این روش، از پارامترهای معادلات ۲ تا ۴ استفاده شد.

## نتایج و بحث

### ویژگی‌های آماری داده‌های خاک

جدول ۲ خلاصه آماری ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. طبق نتایج، تغییرات قابل توجهی از ذرات معدنی خاک در دامنه ۱۲-۴۴، ۳۵-۶۶ و ۷-۴۷ درصد برای ذرات رس، سیلت و شن (به ترتیب) اتفاق افتاده است که سبب ایجاد پنج کلاس بافتی شامل Silty Clay Loam، Silty Clay، Clay Loam و Loam شده است. چنین تنوعی از کلاس‌های بافتی می‌تواند تفاوت قابل توجهی در ویژگی‌های خاک و ارتباط آن با رشد گیاه در این منطقه به وجود آورد (Vinh-freitas et al., 2017).

همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود از بین ذرات معدنی خاک، بیشترین ضریب تغییرات مربوط به شن می‌باشد. ضریب تغییرات بالا برای این ذره معدنی احتمالاً به دلیل آبیاری غرقابی و فرسایش از روش آبیاری اراضی منطقه باشد. زیرا این نوع آبیاری باعث نقل و انتقال رس از قسمت‌های مختلف مزرعه و برجای ماندن ذرات معدنی شن می‌شود (Olsson et al., 2019; Roy et al., 2022). مقدار میانگین رطوبت اشباع ۴۳/۵۵ درصد می‌باشد که بیانگر مقدار رطوبت اشباع تقریباً متوسط می‌باشد. میانگین جرم مخصوص ظاهری  $1/262 \text{ (g.cm}^{-3}\text{)}$  به دست آمد. این مقدار از جرم مخصوص ظاهری برای خاک‌های منطقه مورد مطالعه در گروه‌های رضایت بخش<sup>۱</sup> و کمی فشرده قرار دارند (Hazelton and murphy, 2016). کربن آلی خاک، یکی از شاخص‌های مهم برای ارزیابی تمامی ویژگی‌های خاک می‌باشد که به طور جهانی مورد توجه قرار دارد (Herrick and wander, 2018). در این پژوهش میانگین آن ۰/۵۲ درصد بود. جت و همکاران (Jat et al., 2018)، مقادیر کمتر از یک درصد را در کلاس کم و مقادیر بیشتر از ۳ درصد را در کلاس ماده آلی زیاد طبقه‌بندی کردند. بنابراین، با توجه به میانگین کربن آلی خاک، اراضی این منطقه از لحاظ کربن آلی در کلاس کم قرار دارند.

جدول ۲. آماره‌های توصیفی ویژگی‌های خاک اندازه‌گیری شده

Statistic	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	SP (%)	EC ( $\mu\text{S/cm}$ )	BD ( $\text{g/cm}^3$ )	OC (%)
N	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
Minimum	۱۲/۰۰	۳۵/۰۰	۷/۰۰	۳۰/۲۱	۸/۲۷	۰/۴۱۰	۰/۲۴
Maximum	۴۴/۰۰	۶۶/۰۰	۴۷/۰۰	۵۹/۰۹	۳۷۰/۱۰	۱/۴۱۰	۰/۸۶
1 <sup>st</sup> quartile	۲۲/۰۰	۴۵/۰۰	۱۴/۰۰	۳۷/۹۴	۶۱/۲۰	۱/۲۵۰	۰/۳۵
Median	۳۱/۰۰	۵۰/۰۰	۲۰/۰۰	۴۴/۴۳	۱۱۴/۲۰	۱/۲۷۰	۰/۵۲
3 <sup>rd</sup> quartile	۳۳/۰۰	۵۵/۰۰	۲۸/۰۰	۴۹/۳۱	۱۵۶/۵۰	۱/۳۰۰	۰/۶۲
Mean	۲۸/۲۷	۵۰/۱۴	۲۲/۰۴	۴۳/۵۵	۱۱۶/۵۰	۱/۲۶۲	۰/۵۲
SD (N-1)	۷/۸۰	۷/۰۲	۱۰/۳۹	۷/۶۹	۸۱/۸۰	۰/۱۳۱	۰/۱۷
CV (%)	۲۶/۶۰	۱۴/۰۱	۴۷/۱۶	۱۷/۳۵	۷۰/۲۲	۱۰/۳۸	۳۳/۳۵

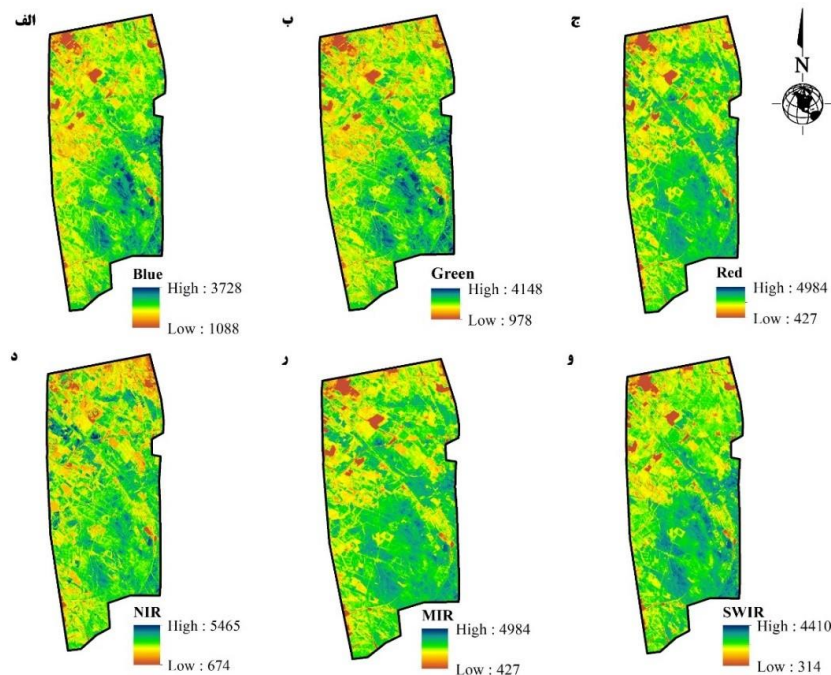
SD= Standard Deviation

CV= Coefficient Of Variation

### پردازش تصاویر ماهواره‌ای

#### بررسی خصوصیات آماری باندهای ماهواره سنتینل ۲

در این تحقیق از تصاویر (باندهای) ماهواره سنتینل ۲ در محدوده مرئی، مادون قرمز، مادون قرمز میانی و مادون قرمز کوتاه استفاده شد (Sedaghat et al., 2022; Borm et al., 2021). شکل ۲ پهنه‌بندی این تصاویر را در محدوده‌های یاد شده نشان می‌دهد. بر طبق شکل ۲ مشاهده می‌شود که بازتابش طیفی باند آبی در محدوده ۱۰۸۸-۳۷۲۸ نانومتر، سبز در محدوده ۹۷۸-۴۱۴۸ نانومتر، آبی در محدوده ۴۲۷-۴۹۸۴ نانومتر، مادون قرمز در محدوده ۶۷۴-۵۴۶۵ نانومتر، مادون قرمز میانی در محدوده ۴۲۷-۴۹۸۴ نانومتر و مادون قرمز کوتاه در محدوده ۳۱۴-۴۴۱۰ نانومتر قرار دارد.



شکل ۲. پراکنش مکانی باندهای آبی (الف)، سبز (ب)، قرمز (ج)، مادون قرمز (د)، مادون قرمز میانی (ر) و مادون قرمز کوتاه (و)

### به دست آوردن شاخص‌ها و نرمال‌سازی آن‌ها

همانطور که در بخش مواد و روش‌ها اشاره شد، بعد از محاسبه شاخص‌های طیفی با استفاده از فرمول‌های یاد شده، تمامی شاخص‌های محاسبه شده در صورت نرمال نبودن داده‌های آن‌ها، برای به دست آوردن روابط دقیق‌تر، با استفاده از روش‌های آماری مرسوم نرمال شدند. تا از ایجاد خطاهای ناخواسته در مراحل مدل‌سازی توابع انتقالی جلوگیری شود (Miran et al., 2021; Sedaghat et al., 2022) که در ادامه، روش نرمال‌سازی هر یک از داده به تکفیک بیان شد.

### شاخص‌های بازتابی خاک

در این تحقیق از چهار شاخص بازتابی خاک برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشیاع استفاده گردید. این شاخص‌ها از مهم‌ترین شاخص‌های مؤثر بر تخمین هدایت هیدرولیک خاک می‌باشند. زیرا میزان رطوبت خاک به شدت بر روی بازتابش طیفی این شاخص‌ها تأثیرگذار است (Brom et al., 2021). جدول ۳ آماره‌های توصیفی شاخص‌های بازتابش طیفی خاک را نشان می‌دهد. همچنین، تست نرمالیت به برای شاخص‌های بازتابی خاک با استفاده از آزمون کلموگراف - اسمیرنوف بررسی شد. بررسی نرمالیت به این شاخص‌ها با استفاده از این آزمون، نشان داد که در بین این شاخص‌ها، فقط شاخص VSDI نرمال و دیگر شاخص‌های مورد مطالعه بازتابی خاک، نرمال نمی‌باشد. بنابراین، با استفاده از روش‌های نرمال‌سازی تمامی این داده‌ها نرمال شدند تا بعد از نرمال‌سازی وارد مدل‌های توابع انتقالی شوند (Sedaghat et al., 2022).

جدول ۳. آماره‌های توصیفی شاخص‌های بازتابی خاک

Variable	Minimum	Maximum	Mean	SD (N-1)	CV (%)
VSDI	۰/۶۹	۰/۹۰۳	۰/۷۸۲	۰/۰۴۷	۶/۰۳
BI	۰/۶۸۱	۰/۸۵۰	۰/۷۷۶	۰/۰۴۳	۵/۵۳
GMI	۰/۰۴۴	۰/۹۶۰	۰/۴۵۵	۰/۲۹۹	۶۵/۶۴
CI	۰/۰۱۱	۰/۰۸۴	۰/۰۵۴	۰/۰۱۶	۳۰/۲۱

### شاخص‌های پوشش گیاهی

همانطور که بیان شد در این تحقیق از سه شاخص پوشش گیاهی DVI، RVI و NDVI استفاده شد. مقادیر ماکزیمم، مینیمم، میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات برای این شاخص‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. همچنین، آزمون فرض نرمالیت به استفاده از روش



کلموگروف-اسمیرنوف نشان داد که از بین داده‌های شاخص‌های پوشش گیاهی، فقط داده‌های مربوط به شاخص DVI نرمال هستند، ولی دو شاخص RVI و NDVI نرمال نمی‌باشند. بنابراین، این دو شاخص قبل از مدل‌سازی با استفاده از تبدیلات نرمال‌سازی، نرمال شدند.

جدول ۴. آماره‌های توصیفی شاخص‌های پوشش گیاهی

Variable	Minimum	Maximum	Mean	SD (N-1)	CV (%)
DVI	۰/۱۹۲	۰/۳۵۰	۰/۲۶۹	۰/۰۴۵	۱۶/۸۷
RVI	۰/۳۸۶	۰/۵۹۸	۰/۴۶۲	۰/۰۴۸	۱۰/۴۲
NDVI	۰/۲۹۰	۰/۴۳۹	۰/۳۷۳	۰/۰۳۸	۱۰/۲۵

#### شاخص‌های رطوبت خاک

شاخص‌های رطوبتی استخراجی از تصاویر ماهواره‌ای در این تحقیق شامل MSI، WIR، NDWI، SWSI و NDMI بودند. مقادیر ماکزیمم، مینیمم، میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات برای این شاخص‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. آزمون فرض نرمالیت به استفاده از روش کلموگروف-اسمیرنوف نشان داد که از بین داده‌های شاخص‌های رطوبتی، داده‌های مربوط به شاخص MSI و شاخص SWSI نرمال هستند ولی دیگر شاخص‌ها نرمال نمی‌باشند. بنابراین، قبل از مدل‌سازی توابع انتقالی، این شاخص‌ها نرمال شدند (جدول ۵).

جدول ۵. آماره‌های توصیفی شاخص‌های رطوبت خاک

Variable	Minimum	Maximum	Mean	SD (N-1)	CV (%)
MSI	۰/۴۲۰	۰/۵۵۰	۰/۴۷۷	۰/۰۲۹	۶/۱۸
WIR	۰/۲۰۴	۰/۳۹۲	۰/۳۰۱	۰/۰۳۰	۹/۹۷
NDWI	۰/۲۸۴	۰/۳۸۶	۰/۳۲۶	۰/۰۲۲	۶/۸۴
SWCI	۰/۰۱۰	۰/۰۷۳	۰/۰۳۹	۰/۰۱۷	۴۲/۵۴
NDMI	۰/۳۰۳	۰/۴۵۰	۰/۳۵۹	۰/۰۳۴	۹/۳۸

#### همبستگی بین شاخص‌های ماهواره‌ای و ویژگی‌های زود یافت خاک با هدایت هیدرولیکی اشباع

همبستگی بین هدایت هیدرولیکی اشباع با شاخص‌های بازتابی خاک نشان داد که شاخص‌های GMI و CI همبستگی معناداری با هدایت هیدرولیکی اشباع ندارد، ولی با شاخص‌های VSDI و BI همبستگی معنادار در سطح ۵ درصد دارند (جدول ۶). همبستگی بین هدایت هیدرولیکی اشباع با پوشش گیاهی نشان داد که هدایت هیدرولیکی اشباع با تمامی شاخص‌های مورد مطالعه همبستگی معنادار در سطح ۵ درصد دارد (جدول ۶). همبستگی پیرسون بین هدایت هیدرولیکی اشباع و شاخص‌های رطوبتی خاک نشان داد که ارتباط معناداری بین هدایت هیدرولیکی اشباع با WIR برقرار نیست ولی با دیگر شاخص‌ها ارتباط معنی‌داری برقرار است (جدول ۶). همبستگی پیرسون بین هدایت هیدرولیکی اشباع و شاخص‌های ویژگی‌های خاک نشان داد که ارتباط معناداری هدایت هیدرولیکی اشباع با تمامی ویژگی‌های خاک اندازه‌گیری شده به جز سیلت برقرار است (جدول ۶). قابل ذکر است همبستگی در سطح ۵ درصد به دست آمد.

#### به دست آوردن شاخص تورم واریانس

قبل مدل‌سازی توابع انتقالی هدایت هیدرولیکی خاک، جهت جلوگیری از ایجاد خطاهای ناخواسته شاخص تورم واریانس به دست آمد (جدول ۷). نتایج حاصل از این شاخص تورم واریانس نشان داد که مقدار تورم واریانس برای شاخص‌های BI، C، SAND، SA/SI، C\* و SA\* بیشتر از ۱۰ بود. بنابراین از این شاخص‌ها برای مدل‌سازی و تخمین توابع هیدرولیکی اشباع استفاده نشد و از دیگر شاخص‌های با مقادیر تورم واریانس کمتر از ۱۰ درصد برای ایجاد توابع انتقالی استفاده شد (جدول ۷).

جدول ۶. همبستگی پیرسون بین هدایت هیدرولیکی اشباع با شاخص‌های حاصل از تصاویر ماهواره سنتینل-۲ و ویژگی‌های زود یافت خاک

Variables	شاخص‌های بازتابش طیفی خاک				
	Ks	VSDI	BI	GMI	CI
KS	۱				
VSDI	-۰/۵۲۹ *	۱			
BI	۰/۵۱۷ *	-۰/۸۷۸ *	۱		
GMI	۰/۲۳۷ <sup>ns</sup>	-۰/۲۱۵ <sup>ns</sup>	۰/۱۶۱ <sup>ns</sup>	۱	
CI	-۰/۰۰۴ <sup>ns</sup>	-۰/۴۵۵ *	۰/۴۲۹ *	۰/۱۲۸ <sup>ns</sup>	۱

شاخص‌های پوشش گیاهی

Variables	Ks	DVI	RVI	NDVI
KS	۱			
DVI	۰/۴۶۲ *	۱		
RVI	۰/۷۳۴ *	-۰/۵۲۲ *	۱	
NDVI	۰/۶۳۶ *	-۰/۲۰۰ ns	۰/۲۶۵ ns	۱

شاخص‌های بازتابی رطوبت خاک

Variables	Ks	MSI	WIR	NDWI	SWCI	NDMI
KS	۱					
MSI	۰/۵۱۷ *	۱				
WIR	ns-۰/۱۲۰-	-۰/۲۸۱ *	۱			
NDWI	۰/۶۶۹ *	-۰/۳۵۱ *	ns-۰/۱۲۹	۱		
SWCI	۰/۵۵۶ *	-۰/۳۳۲ *	ns-۰/۱۳۹	-۰/۲۹۷ *	۱	
NDMI	۰/۵۵۹ *	ns-۰/۱۶۷	ns-۰/۰۱۵	۰/۶۱۷ *	-۰/۴۸۱ *	۱

ویژگی‌های زود یافت خاک

Variables	Ks	C	BD	SI	SA	SP	EC	OC
KS	۱							
C	-۰/۵۸۲ *	۱						
BD	۰/۳۶۹ *	-۰/۳۶۴ *	۱					
SI	-۰/۱۲۲ ns	-۰/۰۶۱ ns	-۰/۱۵۳ ns	۱				
SA	۰/۵۱۲ *	-۰/۷۸۱ *	۰/۱۲۲ ns	-۰/۶۳۹ *	۱			
SP	-۰/۳۸۶ *	۰/۶۶۰ *	۰/۳۲۲ *	-۰/۰۱۲ ns	۰/۵۰۲ *	۱		
EC	۰/۳۰۴ *	-۰/۳۵۶ *	۰/۳۲۰ *	-۰/۳۶۵ *	۰/۴۷۳ *	-۰/۲۹۴ ns	۱	
OC	۰/۴۶۹ *	-۰/۰۴۳ ns	-۰/۵۲۳ *	۰/۰۷۳ ns	-۰/۰۳۸ ns	-۰/۰۳۳ ns	۰/۲۷۶ *	۱

\* Significant correlation at 0.01 level, ns: Non significant

جدول ۷. آنالیز تورم واریانس شاخص‌های همبسته با هدایت هیدرولیکی اشباع

Variables	Std. Error	Beta	T	Sig.	Tolerance	VIF
VSDI	۳/۹۰۷	۰/۰۳۵-	-۰/۱۵۹-	-۰/۸۰۵	۰/۰۹	۹/۰۸
BI	۴/۸۰۶	۰/۰۰۸-	-۰/۰۳۴-	-۰/۹۷۳	-۰/۰۷۲	۱۳/۸۶
DVI	۲/۱۳	۰/۰۴۵	۰/۳۸۶	-۰/۷۰۲	-۰/۳۲۷	۳/۰۶
RVI	۳/۱۹۹	۰/۲۹۱	۰/۵۸۴	-۰/۱۲۴	-۰/۱۲۹	۷/۷۶
NDVI	۳/۰۴۲	۰/۲۱	۱/۵۱۵	-۰/۱۴۱	-۰/۲۲۷	۴/۴۱
MSI	۵/۱۰۲	۰/۲۰۴	۱/۱۳۶	-۰/۲۶۵	-۰/۱۳۵	۷/۳۹
NDWI	۴/۴۷۹	۰/۲۵۳	۲/۱۲	-۰/۰۴۳	-۰/۳۰۷	۳/۲۶
SWCI	۵/۲۱۳	۰/۰۷۸	۰/۷۵۵	-۰/۴۵۶	-۰/۴۰۶	۲/۴۶
NDMI	۴/۳۰۵	۰/۰۴۳	۰/۲۴۷	-۰/۸۰۷	-۰/۱۴۶	۶/۸۷
C	۰/۱۸۳	۰/۱۴۲	۰/۰۸۳	-۰/۹۳۴	-۰/۰۰۱	۶۶۸/۸۵
SAND	-۰/۰۷	-۰/۰۲۷	-۰/۰۳۱	-۰/۹۷۶	-۰/۰۰۶	۱۷۲/۶۶
SP	۰/۰۱۱	۰/۰۱۶	۰/۱۶۲	-۰/۸۷۲	۰/۴۵	۲/۲۲
EC	۰/۰۰۱	۰/۱۲۱-	۱/۱۹۳-	-۰/۲۴۳	-۰/۴۲۱	۲/۳۸
OC	۰/۵۷۲	۰/۰۳۸	۰/۳۲	-۰/۷۵۲	-۰/۳۱۲	۳/۲۱
SI/SA	۰/۳۶۱	۰/۰۳۷-	-۰/۰۵۴-	-۰/۹۵۷	-۰/۰۰۹	۱۱۰/۰۴
BD	۰/۶۱۳	۰/۰۱۹-	-۰/۱۹۳-	-۰/۸۴۸	-۰/۴۷۶	۲/۱۰۲
C*	-۰/۷۳	۰/۳۱۳	۰/۱۷۸	-۰/۸۶	-۰/۰۰۱	۷۰۸/۵۵
SA*	۶/۶۴۱	۰/۰۱۹	۰/۰۱۲	-۰/۹۹	-۰/۰۰۲	۵۴۳/۱۴
BD*	۴/۶۱۳	۰/۰۹۹	۰/۵۴۹	-۰/۵۸۷	-۰/۱۳۵	۷/۴۰

توسعه توابع انتقالی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با ترکیب شاخص‌های حاصل از تصاویر ماهواره سنتینل - ۲ و ویژگی‌های زود یافت خاک

در این تحقیق، برای توسعه مدل‌های توابع هدایت هیدرولیکی اشباع خاک از داده‌های خاک و داده‌های مربوط به شاخص‌های بازتابش خاک، پوشش گیاهی و رطوبت خاک استفاده شد (Sedaghat et al., 2022; Honarbakhsh et al., 2022). برای مدل‌سازی توابع از

ترکیب ویژگی‌های خاک و داده‌های شاخص‌های استخراج شده از ماهواره سنتینل-۲ استفاده شد. این مدل‌سازی‌ها در سه مرحله انجام شد که به شرح زیر می‌باشد.

### مرحله اول: استفاده از ویژگی‌های خاک

در مرحله اول ایجاد توابع انتقالی، فقط از ویژگی‌های خاک برای تهیه توابع انتقالی استفاده شد. در این مرحله از سه تابع زیر برای تهیه توابع انتقالی استفاده شد (معادله ۵ تا ۷).

$$PTF_1 = a + BD^* + OC + c \quad \text{رابطه ۵}$$

$$PTF_2 = a + BD^* + OC + SP + c \quad \text{رابطه ۶}$$

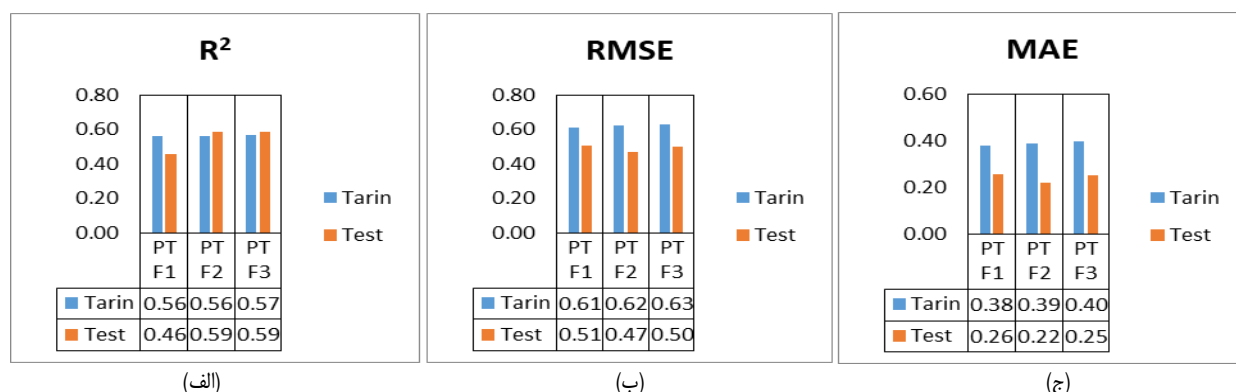
$$PTF_3 = a + BD^* + OC + SP + EC + c \quad \text{رابطه ۷}$$

مدل‌های رگرسیونی خطی معادلات توابع انتقالی هدایت هیدرولیکی اشباع (برای داده‌های آموزش) به شرح معادلات ۸ تا ۱۰ می‌باشد. همانطور که اشاره شد این توابع با استفاده از ویژگی‌های خاک استخراج شدند. مقادیر  $R^2$ ، RMSE و MAE توابع انتقالی هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از مدل‌های رگرسیونی در شکل ۳ مشخص است. همان گونه که مشاهده می‌شود مقادیر  $R^2$  برای  $PTF_3$  برای داده‌های آموزش و صحت‌سنجی (شکل ۳-الف) بیشتر از دیگر توابع است (شکل ۳ ب و ج).

$$KS = 16.36BD^* + 1.97OC - 4.57 \quad \text{رابطه ۸}$$

$$KS = 16.22BD^* + 1.97OC - 1.04E-03SP - 4.45 \quad \text{رابطه ۹}$$

$$KS = 16.02BD^* + 1.92OC + 5.16E-04SP + 5.48E-04EC - 4.46 \quad \text{رابطه ۱۰}$$



شکل ۳. شاخص‌های  $R^2$ ، RMSE و MAE برای  $PTF_1$  تا  $PTF_3$

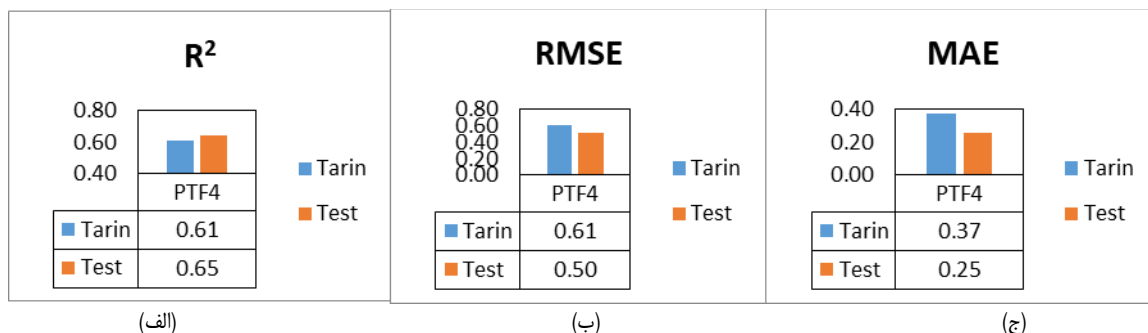
### مرحله دوم: استفاده از ویژگی‌های خاک و شاخص بازتابش طیفی خاک

در این مرحله با استفاده از ویژگی‌ها و شاخص‌های بازتابی خاک، توابع انتقالی برای هدایت هیدرولیکی اشباع خاک تهیه شد. همانطور که بیان شد از بین شاخص‌های بازتابی خاک فقط شاخص VSDI با هدایت هیدرولیکی اشباع خاک همبسته بود. در این حالت با استفاده از شاخص VSDI و ویژگی‌های زود یافت خاک طبق رابطه ۱۱ مدل‌سازی انجام شد.

$$PTF_4 = a + BD^* + OC + SP + EC + VSDI + c \quad \text{رابطه ۱۱}$$

نتایج حاصل از مدل‌سازی هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از ویژگی‌های زود یافت خاک و شاخص بازتابش طیفی خاک نشان داد که تابع انتقالی به صورت معادله ۱۲ تشکیل خواهد شد. مقادیر دقت و خطای توابع انتقالی هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از مدل‌های رگرسیونی در شکل ۴ نشان داده شده است. مقادیر  $R^2$  برای  $PTF_4$  برای داده‌های آموزش و صحت‌سنجی (شکل ۴-الف) به ترتیب برابر با ۰/۶۱ و ۰/۶۵، مقادیر RSME برای داده‌های آموزش و صحت‌سنجی (شکل ۴-ب) برابر با ۰/۶۱ و ۰/۵۰ و مقادیر شاخص MAE برای داده‌های آموزش و صحت‌سنجی (شکل ۴-ج) برابر با ۰/۳۷ و ۰/۲۵ می‌باشد.

$$KS = 5.94BD^* + 2.04OC - 2.89E-02SP - 4.45E-04EC - 4.13VSDI + 4.93 \quad \text{رابطه ۱۲}$$


 شکل ۴. شاخص‌های R<sup>2</sup>، RMSE و MAE برای PTF4

### مرحله سوم: استفاده از ویژگی‌های خاک و شاخص‌های پوشش گیاهی

در این مرحله با استفاده از ویژگی‌های زود یافت خاک و شاخص‌های پوشش گیاهی، توابع انتقالی خاک برای هدایت هیدرولیکی اشباع تهیه شد. در این حالت با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی و ویژگی‌های خاک بر طبق معادلات ۱۳ تا ۱۵ مدل‌سازی انجام شد.

$$PTF_5 = a + BD^* + OC + SP + EC + RVI + c \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$PTF_6 = a + BD^* + OC + SP + EC + RVI + NDVI + c \quad \text{رابطه ۱۴}$$

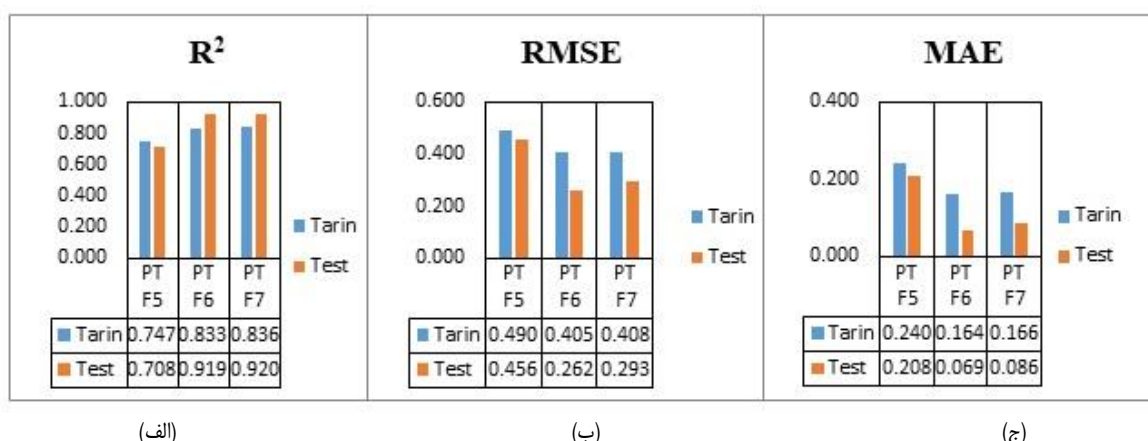
$$PTF_7 = a + BD^* + OC + SP + EC + RVI + NDVI + DVI + c \quad \text{رابطه ۱۵}$$

مدل‌های رگرسیونی خطی معادلات توابع انتقالی هدایت هیدرولیکی اشباع (برای داده‌های آموزش) به شرح معادلات ۱۶ تا ۱۸ می‌باشد. همانطور که اشاره شد این توابع با استفاده از ویژگی‌های زود یافت خاک و شاخص‌های پوشش گیاهی استخراج شدند. مقادیر دقت و خطای توابع انتقالی هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از مدل‌های رگرسیونی در شکل ۵ مشخص است مقادیر R<sup>2</sup> برای PTF<sub>7</sub> برای داده‌های آموزش (شکل ۵-الف) و صحت‌سنجی بیشتر از دیگر توابع است (شکل ۵ ب و ج).

$$KS = 1.65BD^* + 1.64OC - 2.98E-02SP + 9.19E-04*EC + 5.72RVI + 1.27 \quad \text{رابطه ۱۶}$$

$$KS = 8.58BD^* - 0.45OC + 1.97E-03SP - 9.021E-04EC + 10.92RVI + 8.72NDVI - 7.76 \quad \text{رابطه ۱۷}$$

$$KS = 8.14BD^* - 0.56OC + 2.11E-03SP - 6.39E-04*EC + 10.54RVI + 8.48NDVI - 1.49DVI - 6.86 \quad \text{رابطه ۱۸}$$


 شکل ۵. شاخص‌های R<sup>2</sup>، RMSE و MAE برای PTF<sub>5</sub> تا PTF<sub>7</sub>

### مرحله چهارم: استفاده از ویژگی‌های خاک و شاخص بازتابش رطوبتی

در این مرحله با استفاده از ویژگی‌های خاک و شاخص‌های رطوبتی، توابع انتقالی خاک برای هدایت هیدرولیکی اشباع تهیه شد. در این حالت با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی و ویژگی‌های زود یافت خاک طبق معادلات ۱۹ تا ۲۲ مدل‌سازی انجام شد.

$$PTF_8 = a + BD^* + OC + SP + EC + NDWI + c \quad \text{رابطه ۱۹}$$

رابطه ۲۰)  $PTF_9 = a + BD^* + OC + SP + EC + NDWI + MSI + c$

رابطه ۲۱)  $PTF_{10} = a + BD^* + OC + SP + EC + NDWI + MSI + NDMI + c$

رابطه ۲۲)  $PTF_{11} = a + BD^* + OC + SP + EC + NDWI + MSI + NDMI + SWSI + c$

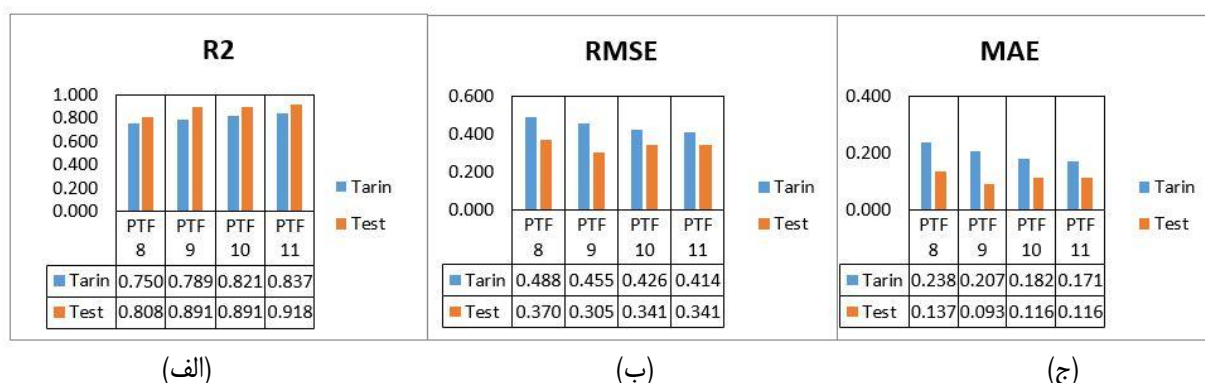
مدل‌های رگرسیونی خطی معادلات توابع انتقالی هدایت هیدرولیکی اشباع (برای داده‌های آموزش) به شرح معادلات ۲۳ تا ۲۶ می‌باشد. همانطور که اشاره شد این توابع با استفاده از ویژگی‌های خاک و شاخص‌های پوشش گیاهی استخراج شدند. مقادیر  $R^2$ ، RMSE و MAE توابع انتقالی هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از مدل‌های رگرسیونی در شکل آورده شده است. همانطور که از شکل (۶) مشخص است مقادیر  $R^2$  برای  $PTF_{11}$  برای داده‌های آموزش (شکل ۶- الف) و RMSE و MAE کمتر از دیگر توابع است (شکل ۶- ب و ج).

رابطه ۲۳)  $KS = 11.76BD^* + 1.23*OC - 5.59E-03SP - 7.92E-04EC + 19.41NDWI - 7.94$

رابطه ۲۴)  $KS = 8.48BD^* + 0.61OC - 9.48E-04EC - 7.69E-03SP + 17.52NDWI + 8.26MSI - 9.22$

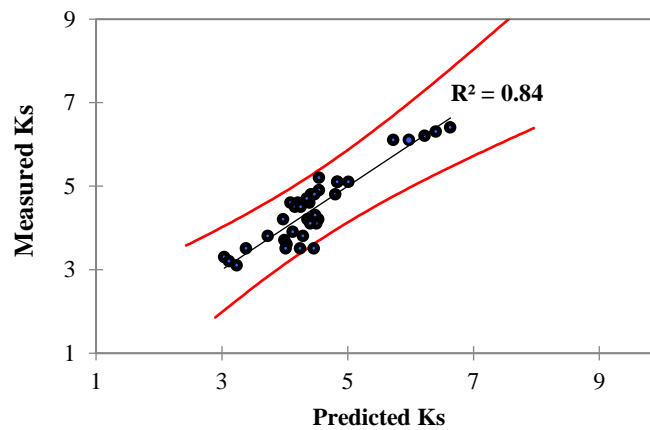
رابطه ۲۵)  $KS = 5.17BD^* + 8.63E-03OC - 1.12E-02SP - 8.63E-04EC + 12.13NDWI + 11.31MSI + 6.73NDMI - 9.26$

رابطه ۲۶)  $KS = 5.47BD^* - 0.02OC - 7.30E-03SP - 9.33E-04EC + 4.42NDMI + 9.92MSI + 13.31NDWI + 9.30SWSI - 8.81$



شکل ۶. شاخص‌های  $R^2$ ، RMSE و MAE برای  $PTF_8$  تا  $PTF_{11}$

با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که بهترین توابع انتقالی که از مراحل توسعه مدل‌های توابع انتقالی برای هدایت هیدرولیکی اشباع به دست آمد، توابعی هستند که از ترکیب ویژگی‌های زود یافت خاک با شاخص‌های پوشش گیاهی ماهواره سنتینل-۲ به دست می‌آیند. زیرا بیشترین مقادیر  $R^2$  و کمترین مقدار RMSE و MAE را داشتند. همانطور که بیان شد توسعه مدل‌های توابع انتقالی برای تخمین هدایت هیدرولیکی در حالت اشباع طی چهار مرحله مدل‌سازی شد تا بهترین توابع برای تخمین هدایت هیدرولیکی به دست آید. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که ترکیب شاخص‌های پوشش گیاهی با ویژگی‌های زود یافت خاک بهترین توابع انتقالی را برای تخمین هدایت هیدرولیکی در حالت اشباع (شکل ۷) ارائه می‌دهد (Ließ et al., 2012). اثرات پوشش گیاهی علاوه بر تأثیر بر خصوصیات فیزیکی خاک می‌تواند ناشی از توزیع ریشه گیاهان و خصوصیات مرفولوژیکی آن مانند زیست توده ریشه و توزیع ریشه در خاک مرتبط باشد (Rosse et al., 2000). زیرا ریشه گیاهان از طریق نیروهای مکانیکی بر بافت خاک اثر گذاشته و باعث افزایش هدایت هیدرولیکی خاک خواهد شد (Bodner et al., 2008). ارتباط هدایت هیدرولیکی با پوشش گیاهی نیز می‌تواند ناشی از خصوصیات شیمیایی خاک مانند کربن آلی خاک و مواد ارگانیک باشد. مواد ارگانیک با اثر بر روی پارامترهای فیزیکی خاک مانند تخلخل، بافت و نفوذ آب به خاک می‌تواند بر روی هدایت هیدرولیکی چه در حالت اشباع و چه در حالت غیر اشباع اثر گذار باشد (Hao et al., 2019). که در این تحقیق نیز این ارتباط باعث همبستگی هدایت هیدرولیکی اشباع با شاخص‌های پوشش گیاهی بیشتر از شاخص‌های دیگر به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ بود (Sedaghat et al., 2022) و تخمین حاصل از ترکیب شاخص‌های پوشش گیاهی با پارامترهای زود یافت خاک بهتر از دیگر شاخص‌های استخراجی از ماهواره سنتینل-۲، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک را با دقت بیشتری تخمین زد.



شکل ۷. پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از ترکیب ویژگی‌های زود یافت خاک و شاخص‌های پوشش گیاهی ماهواره سنتینل-۲

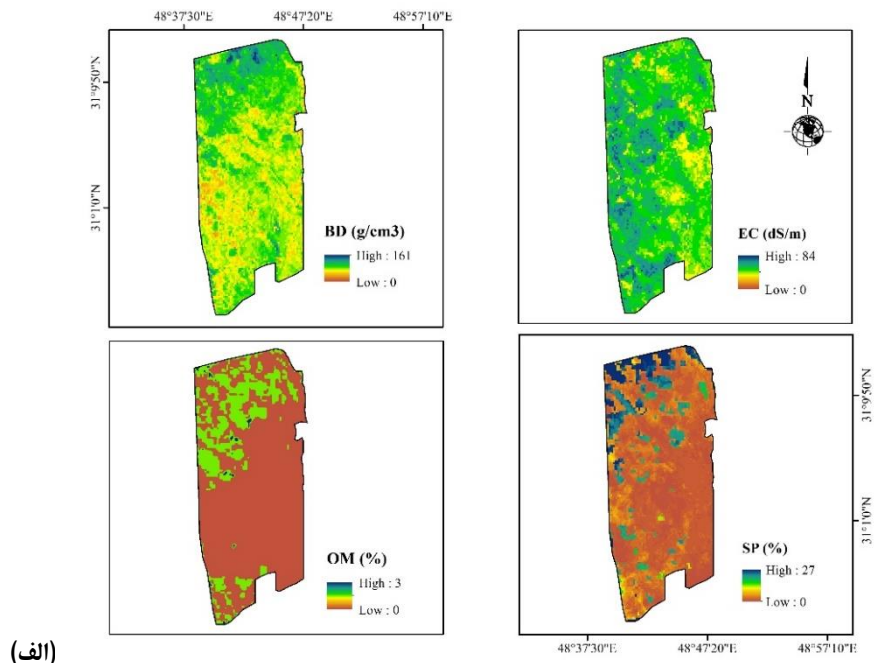
مقدار اثر گذاری پوشش گیاهی بر روی هدایت هیدرولیکی در خاک سطحی نسبت به خاک عمقی بیشتر است زیرا میزان ماده آلی خاک در افق‌های سطحی نسبت به افق‌های زیر سطحی خاک بیشتر می‌باشد. به علاوه، میزان آهک در افق‌های زیر سطحی نسبت به افق‌های سطحی بیشتر است (Khosravi Aqdam et al., 2022). بنابراین، آهک با رسوب در منافذ خاک باعث کاهش لوله‌های موئین خاک شده و میزان هدایت هیدرولیکی را کاهش خواهد داد (Khodaverdiloo et al., 2011). با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق می‌توان دریافت که شاخص‌های پوشش گیاهی به همراه ویژگی‌های زود یافت خاک بهتر از دیگر شاخص‌ها مانند رطوبت خاک و شاخص بازتابی خاک هدایت هیدرولیکی اشباع خاک را پیش‌بینی می‌کند.

#### پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی اشباع

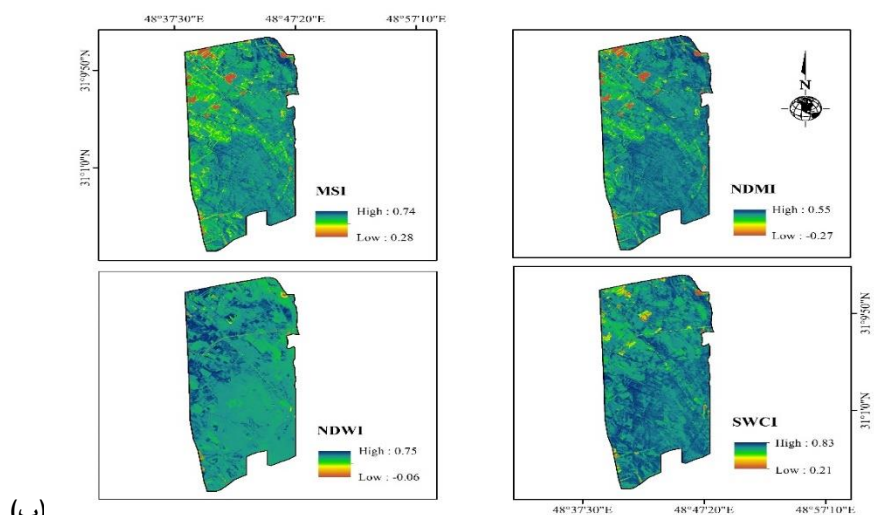
هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از  $PTF_{11}$  بهتر از دیگر  $PTF$  ها تخمین زده شد. در این تابع انتقالی، جرم مخصوص ظاهری، ماده آلی، رطوبت اشباع و هدایت الکتریکی خاک به عنوان ویژگی‌های خاک (شکل ۸-الف) و شاخص‌های  $NDWI$ ،  $MSI$ ،  $NDMI$  و  $SWCI$  به عنوان بهترین شاخص‌ها برای تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع به کار برده شدند (شکل ۸-ب). بر این اساس، با استفاده از مدل جنگل تصادفی پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی اشباع انجام شد (شکل ۸-ج). طبق توزیع مکانی به دست آمده مشاهده می‌شود که قسمت‌های شرق و جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه بیشترین مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع و قسمت‌های شمال و شمال غرب کمترین مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع را دارا می‌باشند. این نتایج با توزیع مکانی پارامترهای محیطی و خاکی مورد استفاده همخوانی و مطابقت دارد. شکل ۹، اثر کلی هر یک از پارامترهای موثر بر تخمین مدل جنگل تصادفی را برای پهنه‌بندی توزیع مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع نشان می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل از این شکل مشخص می‌شود که اثر کلی شاخص  $NDWI$  و کربن آلی خاک (به ترتیب ۶۵ و ۶۰) بیشترین مقدار و اثر هدایت الکتریکی خاک کمترین مقدار در تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع به دست آمد.

#### نتیجه‌گیری

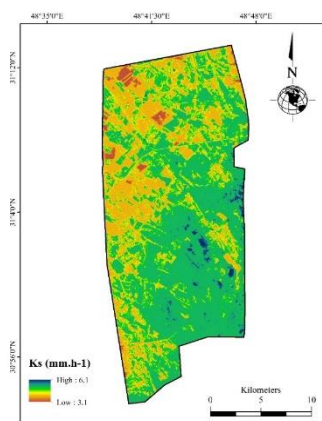
با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان بیان کرد که مدل‌سازی توابع انتقالی هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از شاخص‌های استخراجی از تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند تخمین‌های مناسبی برای پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ارائه دهد. همچنین، براساس نتایج، در تمامی مدل‌هایی که برای پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع به دست آمد، شاخص‌های استخراجی شامل بازتابش طیفی خاک، پوشش گیاهی و رطوبت خاک، میزان تخمین توابع انتقالی هدایت هیدرولیکی اشباع را بهبود می‌بخشند. با وجود اینکه تخمین توابع انتقالی با استفاده از شاخص‌های استخراجی از بازتابش طیف الکترومغناطیس ماهواره سنتینل-۲ بهبود یافت اما نکته قابل توجه این است که نقش ویژگی‌های زود یافت خاک در تخمین هدایت هیدرولیکی خاک غیر قابل انکار است و این پارامترها به عنوان جز جدا نشدنی و مؤثر بر هدایت هیدرولیکی اشباع می‌باشد.



(الف)

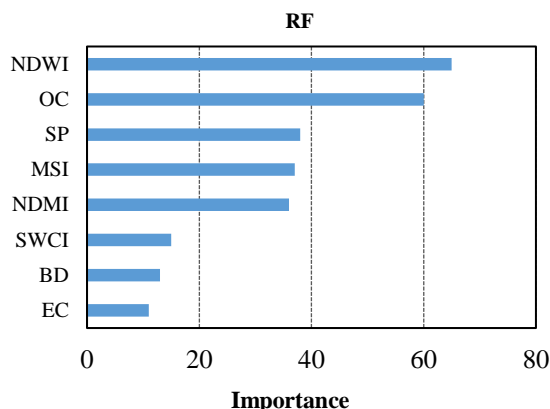


(ب)



(ج)

شکل ۸. پارامترهای خاکی موثر بر تخمین موثر در تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع (الف)، پارامترهای سنجش از دور موثر در تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع (ب) و مدل جنگل تصادفی برای توزیع مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع (ج)



شکل ۹. اثر کلی هر یک از پارامترهای جنگل تصادفی هدایت هیدرولیکی اشباع

## سیاس‌گذاری

این مقاله از رساله دوره دکترای تخصصی در دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست دانشگاه شهید چمران اهواز استخراج شده است. بدین وسیله از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (GN: SCU. WI98.280) تشکر و قدردانی می‌گردد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## منابع

بابائیان، ا؛ همایی، م؛ نوروزی، ع، ا (۱۳۹۴). بررسی سناریوهای مختلف وضوح طیفی در برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۴۶ (۳)، ۵۴۴-۵۲۹.

خسروی، م؛ ذولفقاری، ع؛ کابلی، س؛ ح؛ غفاری، ح (۱۴۰۱). کاربرد نقشه‌برداری رقومی در پهنه‌بندی ذرات اولیه و برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به‌منظور مدیریت بهینه حوزه‌های آبخیز (مطالعه موردی: حوزه آبخیز دامغان‌رود). *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۲)، ۲۴۵-۲۶۱.

## REFERENCES

- Babaian, a., Homai, m., & Nowrozi, a. a. (2014). Examining different scenarios of spectral resolution in estimating soil hydraulic properties. *Iran water and soil research*, 46(3), pp. 529-544 (In Persian).
- Biau, G., & Scornet, E. (2016). A random forest guided tour. *Test*, 25, 197-227.
- Brom, J., Duffková, R., Haberle, J., Zajíček, A., Nedbal, V., Bernasová, T., & Křováková, K. (2021). Identification of Infiltration Features and Hydraulic Properties of Soils Based on Crop Water Stress Derived from Remotely Sensed Data. *Remote Sensing*, 13(20), 4127.
- De amorim, b., Baldassarre, d., Bevacqua, g., Sierra, p., & Loon, v. (2019). Twenty-three unsolved problems in hydrology (uph)—a community perspective. *Hydrological sciences journal*, 64(10), 1141-1158.
- Elmqvist, T., Andersson, E., Frantzeskaki, N., McPhearson, T., Olsson, P., Gaffney, O., . . . Folke, C. (2019). Sustainability and resilience for transformation in the urban century. *Nature sustainability*, 2(4), 267-273.
- Hao, M., Zhang, J., Meng, M., Chen, H. Y., Guo, X., Liu, S., & Ye, L. (2019). Impacts of changes in vegetation on saturated hydraulic conductivity of soil in subtropical forests. *Scientific reports*, 9(1), 8372.
- Hazelton, P., & Murphy, B. (2016). Interpreting soil test results: *What do all the numbers mean?* CSIRO publishing.
- Herrick, J. E., & Wander, M. M. (2018). Relationships between soil organic carbon and soil quality in cropped and rangeland soils: the importance of distribution, composition, and soil biological activity. In *Soil processes and the carbon cycle* (pp. 405-425). CRC Press.
- Honarbaksh, A., Tahmoures, M., Afzali, S. F., Khajezadeh, M., & Ali, M. S. (2022). Remote sensing and relief data to predict soil saturated hydraulic conductivity in a calcareous watershed, Iran. *CATENA*, 212, 106046.
- Jansen, W., & Kleukers, R. (2001). Project rosse sprinkhaan: monitoringverslag 2000.
- Khodaverdilo, H., Homae, M., van Genuchten, M. T., & Dashtaki, S. G. (2011). Deriving and validating pedotransfer functions for some calcareous soils. *Journal of Hydrology*, 399(1-2), 93-99.
- Khosravi Aqdam, K., Miran, N., Mohammadi Khajelou, Y., Khosravi Aqdam, M., Asadzadeh, F., & Mosleh,



- Z. (2021). Predicting the spatial distribution of soil mineral particles using OLI sensor in northwest of Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(6), 377.
- Khosravi, N., Zolfaghari, A., Kabol, H., & Ghafar, H. (2022). Application of Digital Soil Mapping in Soil Particle Size Zonation and Estimation of Saturated Soil Hydraulic Conductivity for Optimal Management of Watersheds (Case Study: Damghanrood Watershed). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(2), 245-261. (In Persian).
- Ließ, M., Glaser, B., & Huwe, B. (2012). Uncertainty in the spatial prediction of soil texture: comparison of regression tree and Random Forest models. *Geoderma*, 170, 70-79.
- Lohan, S. K., Jat, H., Yadav, A. K., Sidhu, H., Jat, M., Choudhary, M., . . . Sharma, P. (2018). Burning issues of paddy residue management in north-west states of India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 693-706.
- Malone, B. P., Minasny, B., & McBratney, A. B. (2017). Using R for digital soil mapping (Vol. 35). *Springer*.
- Miran, N., Rasouli Sadaghiani, M. H., Feiziasl, V., Sepehr, E., Rahmati, M., & Mirzaee, S. (2021). Predicting soil nutrient contents using Landsat OLI satellite images in rain-fed agricultural lands, northwest of Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(9), 607.
- Peer, S., & Bodner, G. (2008). High-resolution sonography of the peripheral nervous system. *Springer*.
- Roy, D., Datta, A., Jat, H., Choudhary, M., Sharma, P. C., Singh, P. K., & Jat, M. L. (2022). Impact of long term conservation agriculture on soil quality under cereal based systems of North West India. *Geoderma*, 405, 115391.
- Sedaghat, A., Shahrestani, M. S., Noroozi, A. A., Nosratabad, A. F., & Bayat, H. (2022). Developing pedotransfer functions using Sentinel-2 satellite spectral indices and Machine learning for estimating the surface soil moisture. *Journal of Hydrology*, 606, 127423.
- USDA, N. (1999). United States department of agriculture. Natural Resources Conservation Service. Plants Database. <http://plants.usda.gov> (accessed in 2000).
- Vinhal-Freitas, I. C., Corrêa, G. F., Wendling, B., Bobul'ská, L., & Ferreira, A. S. (2017). Soil textural class plays a major role in evaluating the effects of land use on soil quality indicators. *Ecological indicators*, 74, 182-190.
- Wadoux, A., Malone, B., Minasny, B., Fajardo, M., & McBratney, A. B. (2021). Soil Spectral Inference with R. *Springer*.
- Zhang, L., & Wang, J. (2023). Prediction of the soil saturated hydraulic conductivity in a mining area based on CT scanning technology. *Journal of Cleaner Production*, 383, 135364.
- Zhang, Y., & Schaap, M. G. (2019). Estimation of saturated hydraulic conductivity with pedotransfer functions: A review. *Journal of Hydrology*, 575, 1011-1030.



## Estimation of saturated hydraulic conductivity of the soil surface layer by combining transfer functions and remote sensing (Case Study: South of Ahwaz Lands)

### EXTENDED ABSTRACT

#### Introduction:

In order to absorb water, the plant needs a suitable environment. During the irrigation, the environment becomes saturated. After depletion of gravity water from the plant root zone, unsaturated state in the soil occurred. Based on this, the study and measurement of soil hydraulic conductivity and penetration are the essential parameters of the soil and water resources management. Hydraulic conductivity is one of the most important physical properties of the soil, which plays a vital role in solute and pollutant transport in the porous environments such as soil. This study aims to obtain pedotransfer functions (PTFs) for saturated and unsaturated hydraulic conductivity using soil properties and satellite images.

#### Materials and Methods:

In this regard, soil sampling was performed in some parts of the southwest of Khuzestan province at 50 points. After that, soil samples were passed through a 2 mm sieve for homogenizing, and soil properties such as soil texture, electrical conductivity, soil organic carbon, and saturated moisture were determined in the laboratory. Then, saturated hydraulic conductivity was determined at the same sampling points in the field. Then after, indicators of Sentinel-2 satellite images were obtained. For this purpose, visible, infrared, mid-infrared, and short-infrared satellite images were prepared with a spatial resolution of 20 m<sup>2</sup>, and the indices of Sentinel-2 satellite images were calculated in three categories of soil, vegetation, and moisture. Finally, 11 PTFs, (PTF<sub>1</sub>-PTF<sub>11</sub>) for saturated hydraulic conductivity were obtained in four stages by combining soil properties and the aforementioned indices.

#### Results and Discussion:

The results of the PTFs models for saturated hydraulic conductivity showed that among the 11 models, the combination of three vegetation indices with easily measured soil properties was the most effective PTF model for estimating the saturated hydraulic conductivity (with  $R^2 = 0.57$ , RMSE = 0.63 and MAE = 0.40). While the PTF<sub>7</sub> model obtained by combination of the vegetation cover index and soil properties had  $R^2 = 0.83$ , RMSE = 0.4 and MAE = 0.166. Finally, the spatial distribution of saturated hydraulic conductivity using the Random Forest model showed a better performance, as compared to the others.

#### Conclusion:

Based on the obtained results, it was found that PTFs obtained from soil properties alone cannot estimate the soil hydraulic conductivity with appropriate accuracy. Therefore, it is suggested in addition of soil properties, satellite images indices are used for modeling PTFs, in order to improve estimation of saturated hydraulic conductivity in the soil.

**Keywords:** *Sentinel-2, Soil properties, Soil texture, Vegetation index.*