



تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۲ | شماره ۱۱ | بهمن ۱۴۰۰ (ص ۲۸۷۴-۲۸۵۹)

<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2021.331962.669094>

(مقاله علمی - پژوهشی)

Prediction of Spatial Variations of Soil Moisture Using Random Forest Method and Environmental Features derived from Satellite Images in Marghab Basin of Khuzestan

PADIDEH JAVADI¹, HOSSEIN ASADI^{*1}, MAJID VAZIFEDOUST²

1. Department of Soil Sciences, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

2. Department of Soil Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.

(Received: Oct. 7, 2021- Revised: Nov. 1, 2021- Accepted: Nov. 8, 2021)

ABSTRACT

Preparation of soil moisture map with high spatial resolution and appropriate quality is important in land management. Due to the lack of meteorological stations in watersheds, especially in mountainous areas, field measurement to study changes in soil moisture is time-consuming, costly and error-prone. To achieve a suitable model for spatial prediction of soil moisture in low rainfall season in Marghab Basin of Khuzestan province, 683 km² area, field sampling was performed in 174 points at four standard depths (0-5, 5-15, 15-30, and 30-60 cm) correspond to the global digital soil mapping project. The spatial distribution of soil moisture was mapped by a machine learning model using two sets of remote sensing data, including surface biophysical features derived from Landsat-8 and Sentinel-2 satellite images, and topographic features derived from the digital elevation model. The most suitable auxiliary variables for predicting soil moisture were selected via the Recursive Feature Elimination (RFE) method. The results of the trend of mean changes in soil moisture from the first to the fourth layer were observed to be 2.2, 3.24, 3.41, and 4.6%, respectively. At the surface depths (0-5 cm), biophysical covariates had more impact on spatial variations of soil moisture, and at the lower depths (5-15, 15-30, and 30-60 cm), topographic attributes showed higher importance. The evaluation of RF model in relation to the type of image used for the production of biophysical features showed that based on the concordance correlation coefficient (CCC), the model performance increased between 1.28 to 3.66 in standard soil depths when using Sentinel-2 images compared to Landsat 8. Generally, the RF model and biophysical features were extracted from the Sentinel-2 satellite along with topographic attributes at the watershed scale are able to provide soil moisture prediction maps with acceptable accuracy.

Keywords: Remote Sensing Indicators, Topographic Factors, Random Forest Model.

* Corresponding Author's Email: ho.asadi@ut.ac.ir

برآورد تغییرات مکانی رطوبت خاک با بهره‌گیری از روش جنگل تصادفی و ویژگی‌های محیطی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای در حوضه مرغاب خوزستان

پدیده جوادی^۱، حسین اسدی^{۱*}، مجید وظیفه دوست^۲

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۷/۱۵ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۸/۱۰ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۸/۱۷)

چکیده

در مدیریت اراضی، تهیه نقشه یکپارچه تغییرات رطوبت خاک با وضوح مکانی بالا و کیفیت مناسب از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به کمبود ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری در حوزه‌های آبخیز، به‌ویژه در مناطق کوهستانی، مطالعات میدانی بررسی تغییرات رطوبت خاک فرآیندی زمان‌بر، پرهزینه و با خطا است. جهت دستیابی به مدلی مناسب برای پیش‌بینی مکانی رطوبت خاک در فصل کم بارش در حوضه مرغاب استان خوزستان با مساحت ۶۸۳ کیلومتر مربع، نمونه برداری میدانی به تعداد ۱۷۴ نقطه در چهار عمق استاندارد با پروژه جهانی نقشه‌برداری رقومی خاک (۵-۰، ۱۵-۵، ۳۰-۱۵ و ۶۰-۳۰ سانتی‌متری) صورت گرفت. نقشه‌های تغییرات مکانی رطوبت خاک با استفاده از اجرای مدل یادگیری ماشین جنگل تصادفی (RF) و دو مجموعه داده‌ی فضاپایه شامل ویژگی‌های بیوفیزیکی سطح حاصل از تصاویر ماهواره لندست-۸ و سنتینل-۲ و ویژگی‌های توپوگرافی مستخرج از مدل رقومی ارتفاع تولید گردید. مناسب‌ترین ویژگی‌های کمکی پیش‌بینی کننده رطوبت خاک با روش حذف ویژگی برگشتی انتخاب گردیدند. نتایج میانگین تغییرات رطوبت خاک از لایه اول تا لایه چهارم به ترتیب ۲/۲، ۳/۲۴، ۳/۴۱ و ۴/۶ درصد مشاهده گردید. در عمق سطحی (۵-۰ سانتی‌متر)، ویژگی‌های بیوفیزیکی ارتباط بیشتری با تغییرات مکانی رطوبت خاک از خود نشان دادند و در اعماق پایین‌تر، ویژگی‌های توپوگرافی اهمیت بالاتری را نشان دادند. بررسی کارایی مدل RF در ارتباط با نوع تصویر مورد استفاده برای تولید ویژگی‌های بیوفیزیکی بیانگر آن است که بر مبنای ضریب تطابق همبستگی مدل، استفاده از تصاویر سنتینل-۲ در تلفیق با فاکتورهای توپوگرافی در عمق‌های استاندارد بین ۱/۲۸ تا ۳/۶۶ درصد از دقت بالاتری نسبت به تصاویر لندست-۸ برخوردار است. به‌طور کلی الگوریتم جنگل تصادفی به همراه ویژگی‌های بیوفیزیکی مستخرج از سنتینل دو و داده‌های توپوگرافی در سطح حوضه آبخیز قادر است نقشه‌های رطوبت خاک را با دقت بالایی فراهم نماید.

واژه‌های کلیدی: شاخص‌های سنجش‌ازدور، فاکتورهای توپوگرافیکی، مدل جنگل تصادفی.

مقدمه

میزان بارندگی، نفوذ و تبخیر و تعرق است که برخی از مهم‌ترین پدیده‌های چرخه هیدرولوژیکی هستند (Tang et al., 2017; Zhang et al., 2019). رطوبت خاک نقش مهمی در فرآیندهای اکوسیستم از جمله چرخه‌های انرژی، آب و کربن ایفا می‌کند (Seneviratne et al., 2010). بنابراین، تعیین مقدار رطوبت خاک برای ارزیابی میزان تبادلات انرژی بین هوا و خاک (Li et al., 2014)، مقدار آلبدو (Luo et al., 2019)، رژیم حرارتی خاک (Lehnert, 2014)، رشد گیاهان (Wagner et al., 2003) و پوشش گیاهی (Brevik et al., 2015; Li et al., 2016) نیز ضروری است. در مناطق کوچک، از مشاهدات میدانی برای تهیه نقشه‌های رطوبت خاک با کیفیت بالا استفاده می‌شود، اما چنین رویکردی

خاک به‌عنوان مخزنی از آب و مواد غذایی، بستر رشد گیاهان بوده و اساساً حاصلخیزی خاک تا حد زیادی به میزان دسترسی گیاه، به آب و مواد غذایی موردنیاز وابسته است (Li et al., 2016). رطوبت خاک به‌عنوان یک ویژگی مهم در درک تغییرات آب و هوایی و مدیریت منابع آب در مقیاس محلی و جهانی عمل می‌کند (Szabó et al., 2019; Khaki & Awange, 2019; Nasta et al., 2018). پیش‌بینی دقیق رطوبت در حوضه آبخیز، در تدوین روش‌های مناسب جهت کنترل خشکسالی، رواناب، میزان آب قابل‌دسترس گیاه، تبخیر و تعرق و مدیریت منابع آب بسیار مفید است. میزان رطوبت در سطح خاک و عمق مؤثر ریشه، متأثر از

اصلی آن‌ها DEM است و عموماً یک‌بار اندازه‌گیری می‌شوند (McBratney *et al.*, 2003) برخلاف شاخص‌های طیفی مستخرج از RS که دارای ماهیتی پویا می‌باشند و در طول زمان تغییر می‌کنند و می‌توانند در یک دوره زمانی خاص جمع‌آوری شوند و اطلاعاتی در خصوص مشخصات خاک منطقه و یا تغییراتی که در بازه زمان رخ داده‌اند را ارائه دهند. از آنجا که داده‌های مبتنی بر RS به‌روز هستند بنابراین، با استفاده از تکنیک‌های مبتنی بر RS در مدل‌سازی رطوبت خاک می‌توان تنوع مکانی و زمانی آن‌ها را ثبت نمود (Fatholomi *et al.* 2020). عمده پژوهش‌های پیشین مبتنی بر متغیرهای محیطی استاتیک جهت پیش‌بینی خواص دینامیک خاک بودند و نیاز به مطالعات جدیدتر بر روی متغیرهای محیطی مبتنی بر سنجش‌ازدور است (Dharumarajan *et al.* 2017; Mahmoudabadi *et al.* 2017). با توجه به کاربرد گسترده مدل‌های یادگیری ماشین در نقشه‌برداری رقومی ویژگی‌های خاک، مطالعات اندکی (Mousavi *et al.* 2021; Taghizadeh *et al.* 2021) با استفاده از تلفیق رویکردهای تابع عمق و یادگیری ماشین به ترتیب در استان‌های اصفهان و قزوین (دشت آبیک) بر روی تغییرات سطحی و عمقی رطوبت خاک صورت پذیرفته است. از طرفی، توزیع خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی منطقه مورد مطالعه به‌عنوان یک منطقه کوهستانی، از نظر مکانی متفاوت است.

عمده مطالعات نقشه‌برداری رقومی که تاکنون جهت پیش‌بینی و مدل‌سازی برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مانند کربن آلی، درصد آهک و درصد رطوبت خاک و ... صورت پذیرفته است به بررسی تغییرات سطحی (۳۰-۰ سانتیمتری) اکتفا نموده‌اند (Mousavi *et al.* 2020; Rahmani *et al.* 2020; Fatholomi *et al.* 2020) که در این پژوهش جهت رفع کمبود اطلاعات در مورد تغییرات زیرسطحی رطوبت خاک و همچنین همسویی با پروژه جهانی تهیه نقشه‌های خاک، به مدل‌سازی تغییرات رطوبت مکانی خاک در چهار عمق استاندارد (۵-، ۱۵-، ۳۰-، ۶۰- و ۳۰ سانتیمتر) اقدام گردید. همچنین در بخش استفاده از شاخص‌های طیفی نیز متفاوت از سایر مطالعات در این تحقیق به مقایسه کار آبی دو منبع طیفی (لندست ۸ و سنتینل ۲) پرداخته شد. با توجه به اینکه رطوبت خاک به‌عنوان یک مشخصه پویا و تأثیرگذار بر روی تراوایی، نگهداشت آب، وضعیت رواناب، میزان تبخیر و تعرق گیاهان (Sinoga *et al.* 2010) نقش مهمی را ایفا می‌نماید؛ بنابراین تحقیق حاضر با اهداف: (۱) استفاده از

برای نقشه‌برداری در مقیاس منطقه‌ای بسیار سخت و پرهزینه است. با توجه به کمبود ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری در حوزه‌های آبخیز، به‌ویژه در مناطق کوهستانی، برآورد آن اغلب با خطا همراه است (Fatholomi *et al.* 2020). در حال حاضر، از روش‌های مختلف سنجش‌ازدور^۱ (RS) برای نقشه‌برداری رطوبت خاک استفاده می‌شود (Zhang *et al.* 2019). در پژوهشی (Nourouzi *et al.* 2009) بین رطوبت سطحی با NDVI^۲ تأخیری به کمک رگرسیون خطی ساده^۳ همبستگی ۰/۴۷ تا ۰/۵۷ در مراتع خراسان رضوی گزارش کردند. در مطالعه دیگری توسط (Keshavarz *et al.* 2014) مشاهده نمودند، پایش تغییرات مکانی رطوبت از طریق تصاویر ماهواره‌ای در اکثر مناطق ایران که پیشینه تاریخی رطوبتی ثبت نشده دارند، می‌تواند جایگزین مناسبی برای نمونه‌برداری مستقیم رطوبت خاک باشد. در مطالعه‌ای با تلفیق متغیرهای محیطی استاتیک و دینامیک جهت رقومی سازی نقشه رطوبت خاک بر روی تصاویر لندست ۸ به این نتیجه رسیدند که متغیر دمای سطح زمین و بعداز آن آلبدو، بیش-ترین تأثیر را در مدل‌سازی نقشه رطوبت خاک دارند (Fatholomi *et al.* 2020).

کارایی بالای مدل‌های یادگیری ماشین به نحو مطلوبی (Suleymanov *et al.* 2021) در پیش‌بینی و نقشه‌برداری ویژگی‌های خاک توسط پژوهشگران گزارش شده است. مدل‌های جنگل تصادفی (Mousavi *et al.* 2020; Rahmani *et al.* 2020)، مدل CB (Parsaie *et al.* 2021; Wang *et al.* 2020)، مدل DTr (Abedi *et al.* 2021)، با دقت مناسب در مدل‌سازی و پیش‌بینی مکانی ویژگی‌های خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای پیش‌بینی خصوصیات خاک در نقشه‌برداری رقومی، از متغیرهای محیطی^۴ (EC) در مکان نمونه‌برداری استفاده می‌شود و به‌کل منطقه تعمیم داده می‌شود (Ma *et al.* 2019b). بسیاری از روش-های یادگیری ماشین (Forkuor *et al.* 2017; Holtgrave *et al.* 2016; Mosleh *et al.* 2016) برای ایجاد روابط بین خواص خاک و متغیرها استفاده می‌شود. متداول‌ترین متغیرهای محیطی، مشتقات مبتنی بر مدل رقومی ارتفاع (DEM)^۵، داده‌های اقلیمی، زمین‌شناسی و خصوصیات خاک (Ma *et al.* 2019b; Mahmoudabadi *et al.* 2017) می‌باشند. نوع متغیرها و انتخاب مدل بر میزان دقت پیش‌بینی ویژگی‌های خاک بسیار مهم هستند (Nishimura, 2017) (Diek *et al.* 2019; Kato and) برخی از متغیرها دارای ماهیت استاتیک هستند، مانند توپوگرافی که منبع

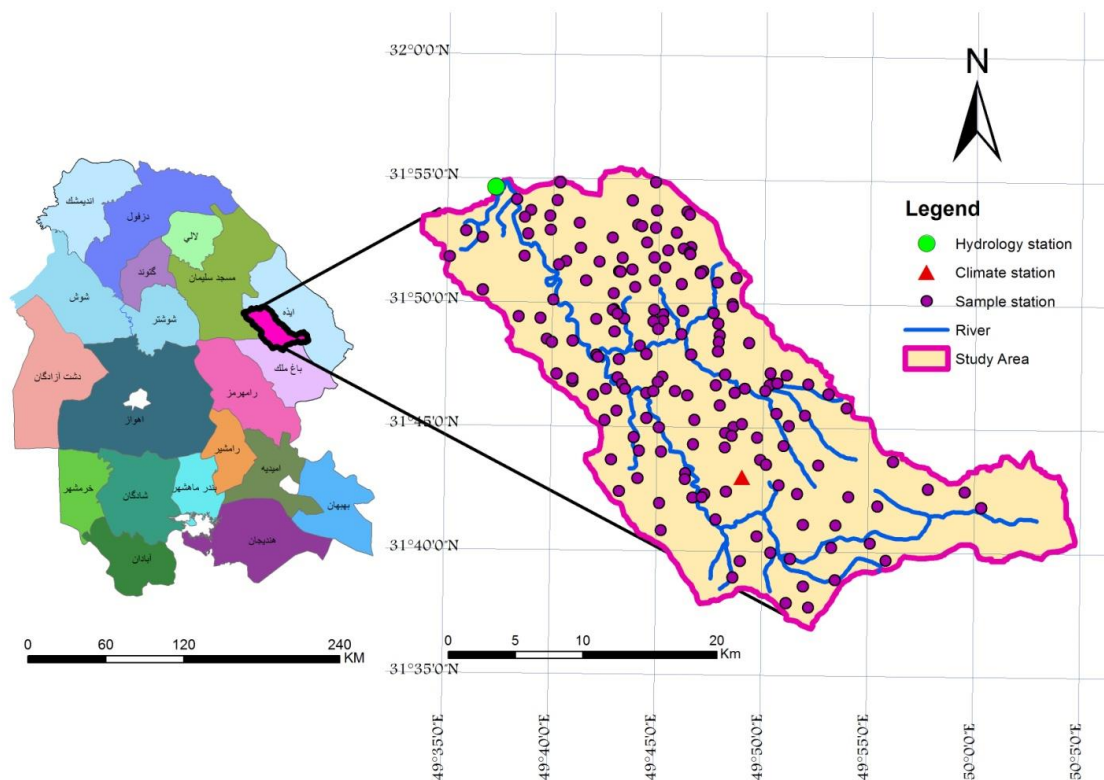
حوضه‌های کارون بزرگ به نام مرغاب است که دارای مساحت ۶۸۹۷۳ هکتار است. شکل ۱ موقعیت محدوده مطالعاتی نسبت به استان، شهرستان ایذه و همچنین محل نقاط نمونه‌برداری در محدوده مطالعاتی را نشان می‌دهد. دارای ایستگاه هیدرومتری جلوگیر- مرغاب بر روی رودخانه مرغاب است که در ارتفاع ۴۸۰ کیلومتری واقع شده و از سال ۱۳۶۹ جزء ایستگاه هیدرومتری فعال منطقه محسوب می‌گردد. در منطقه مورد مطالعه ایستگاه تبخیرسنجی بارانگرد قرار دارد که از سال ۱۳۵۰ تأسیس شده در ارتفاع ۹۰۷ متری از سطح دریا واقع شده است. میانگین مجموع متوسط بارندگی ۳۵ ساله برابر ۶۲۸ میلی‌متر و متوسط دما ۲۱ درجه سلسیوس (Iran Meteorological Organization, 2018) است. بیشینه دما نیز $33/3^{\circ}\text{C}$ در مردادماه و کمینه دما $9/3^{\circ}\text{C}$ در دی‌ماه است. رژیم رطوبتی منطقه یوستیک و رژیم حرارتی این منطقه هایپرترمیک است.

ویژگی‌های محیطی کمکی توپوگرافی (استاتیک) و طیفی (پویا) حاصل از نسبت گیری بانندی داده‌های سنجش‌ازدور (دینامیک) و تلفیق آن‌ها جهت پیش‌بینی تغییرات سطحی و عمقی رطوبت خاک در چهار عمق استاندارد ۵-۰، ۱۵-۵، ۳۰-۱۵ و ۶۰-۳۰ سانتیمتر، (۲) تعیین مهم‌ترین فاکتورهای محیطی پیش‌بینی کننده تغییرات سطحی و عمقی رطوبت خاک و (۳) مقایسه عملکرد تصاویر نوری لندست-۸ و سنتینل-۲، در توزیع مکانی رطوبت خاک در ماه‌های کم بارش در بخشی از اراضی حوضه مرغاب استان خوزستان انجام گردید.

مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه

منطقه مورد مطالعه در جنوب غربی ایران و شرق استان خوزستان، حد واسط عرض جغرافیایی $31^{\circ}37'$ تا $31^{\circ}55'$ شمالی و طول جغرافیایی $49^{\circ}33'$ تا $50^{\circ}5'$ شرقی واقع شده است و یکی از زیر



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی و موقعیت ایستگاه هیدرومتری، هواشناسی و رودخانه‌ها در محدوده مورد مطالعه و در استان خوزستان

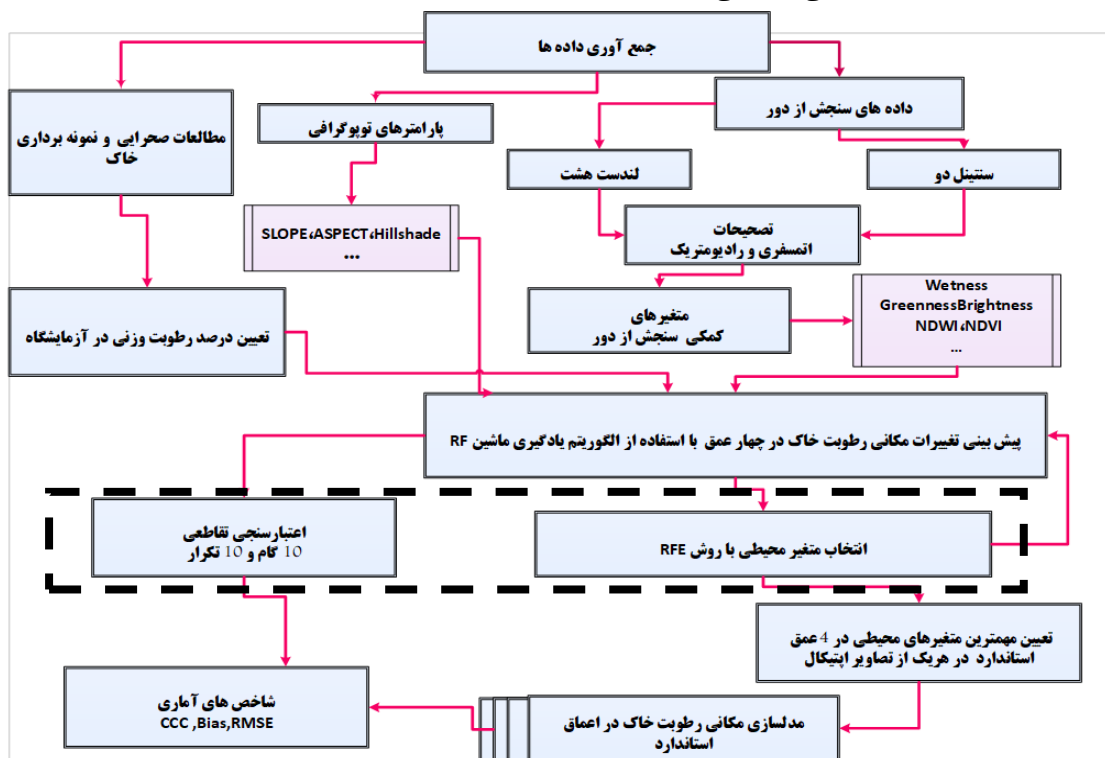
رسی است. کاربری فعلی اراضی شامل مراتع (۴۲ درصد) جنگل- های کم تراکم (۲۵ درصد) و اراضی کشاورزی (آبی و عمدتاً دیم، ۲۵ درصد) و سایر اراضی شامل رخنمون سنگی، رودخانه و مناطق (۸ درصد) است.

واحدهای زمین‌نمای کوه‌ها، تپه‌ها، فلات و تراس‌های فوقانی و دشت‌های دامنه‌ای مهم‌ترین سطوح ژئومورفیک منطقه می‌باشند (Zink et al. 2016; Mousavi et al. 2017). از لحاظ پراکندگی بافت خاک عمدتاً لوم، سیلتی لوم و در بخش‌هایی لوم

روند نمای تحقیق

روند نمای کلی این تحقیق (شکل ۲) شامل، ۱) تهیه داده‌های محیطی از جمله، ویژگی‌های توپوگرافی، شاخص‌های سنجش‌ازدور و نمونه‌برداری میدانی خاک، ۲) اندازه‌گیری مقادیر وزنی رطوبت خاک در آزمایشگاه، ۳) انتخاب مؤثرترین ویژگی‌های محیطی با استفاده از روش حذف ویژگی برگشتی (RFE)، ۴)

مدل‌سازی مکانی تغییرات سطحی و عمقی رطوبت خاک با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، ۵) انتخاب مناسب‌ترین مدل پیش‌بینی کننده مکانی بر اساس شاخص‌های ارزیابی آماری و ۶) تعیین مؤثرترین ویژگی‌های محیطی پیش‌بینی کننده رطوبت خاک در اعماق استاندارد مورد مطالعه بودند.



شکل ۲- روند نمای اصلی پژوهش

مطالعات میدانی

انتخاب زمان نمونه‌برداری متأثر از شرایط اقلیمی منطقه است، با توجه به اینکه هدف این پژوهش بررسی مدل مکانی رطوبت خاک در ماه‌های خشک فصل رشد در اراضی کوهستانی بوده است، لذا از لحاظ آماری خردادماه بیش‌ترین دما (۲۹ درجه سانتی‌گراد) و کم‌ترین بارندگی (۰/۸ میلی‌متر) نسبت به ۹ ماه پیشین منطقه ثبت شده، انتخاب گردید. از این‌رو بازدید میدانی و نمونه‌برداری خاک از تاریخ ۱۶ خردادماه ۱۴۰۰ به مدت چهار روز انجام شد. انتخاب نقاط نمونه‌برداری به روش نمونه‌گیری طبقه‌بندی تصادفی^۱ با وزن دهی صورت پذیرفت. به این ترتیب که بر اساس همپوشانی کاربری اراضی، جهت و درصد شیب و نیز واحدهای سری خاک منطقه، لایه واحدهای همگن رطوبت خاک تهیه گردید. تعداد نقاط نمونه‌برداری بر اساس مساحت کلی لایه‌های واحدهای همگن تعیین شد. بر این اساس مناطقی که مساحت بیش‌تری از مشخصات و ویژگی‌های مذکور را داشتند به تعداد

بیشتری جهت نمونه‌برداری معرفی و انتخاب شدند و به‌عنوان نمونه با توجه به این‌که اراضی مرتعی بیش‌ترین وسعت حوضه را در برمی‌گیرند، بنابراین حداکثر تعداد نقاط نمونه‌برداری نیز در این کاربری قرار گرفت. در نهایت بر اساس تلاقی نقشه‌ها و تحلیل کارشناسی، ۱۷۴ نقطه در سطح حوضه (شکل ۱) جهت تهیه نمونه خاک در چهار عمق ۵، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متری (بر اساس استاندارد پروژه جهانی نقشه‌برداری رقومی خاک) تعیین شد. نمونه‌برداری با استوانه‌های فلزی به قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر در سه تکرار صورت گرفت. در مجموع تعداد ۶۷۴ نمونه جهت اندازه‌گیری میزان رطوبت به روش وزنی حرارتی، به آزمایشگاه منتقل گردید. ذکر این نکته ضروری است با توجه به اینکه منطقه دارای پستی‌وبلندی زیاد با تنوع شیب بالا است، به دلیل محدودیت عمق خاک، تعداد ۲۲ نمونه خاک در عمق ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متری به علت برخورد به لایه محدودکننده برداشت نشد.

استخراج ویژگی‌های توپوگرافی

در ابتدا مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با وضوح مکانی ۱۲/۵ متر از ماهواره آلوِس (<https://vertex.daac.asf.alaska.edu>) اخذ شد. در ادامه برخی از مهم‌ترین مشتقات اولیه و ثانویه مدل رقومی ارتفاع به‌عنوان نماینده فاکتور خاکساز توپوگرافی شامل شیب، جهت شیب میانی^۱، مساحت حوضه اصلاح‌شده^۲، ارتفاع استاندارد شده^۳، گرادیانت^۴، عمق دره، شاخص خیزی ساگا، ارتفاعات شیب‌دار^۵، حوضه آبخیز، موقعیت میانی شیب، شاخص همواری دره با درجه تفکیک بالا^۶، ارتفاعات استاندارد^۷، تابش پخشیده، شاخص زبری عوارض زمین، شبکه آبراهه، ارتفاعات نرمال شده^۸، ضریب طول در درجه شیب، شاخص موقعیت توپوگرافی شاخص جهت باد، شاخص تحذب و تجزیه و تحلیل سایه‌اندازی تپه‌ها^۹ استخراج گردید.

استخراج ویژگی‌های بیوفیزیکی

شاخص‌های بیوفیزیکی از تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ (<https://earthexplorer.usgs.gov>) و سنتینل-۲ (<https://scihub.copernicus.eu>) استخراج گردیدند که مشخصات تصاویر مورد استفاده در جدول (۱) ارائه شده است. انتخاب تصاویر ماهواره‌ای متأثر از نزدیک‌ترین فاصله زمانی (ماهواره سنتینل دو، ۱۶ خرداد و ماهواره لندست هشت، ۱۹

خرداد ۱۴۰۰) با تاریخ نمونه‌برداری (اختلاف کمتر از سه روز) است که در این تاریخ هیچ‌گونه رخداد جوی از جمله بارش که عامل عمده تغییرات رطوبت است و موجب ایجاد تغییرات ناگهانی در نتایج شاخص‌های طیفی می‌گردد، اتفاق نیفتاده است. تصحیحات رادیومتریک در لندست ۸ در باندهای حرارتی و انعکاسی بر اساس (Mishra et al., 2014)، و تصحیحات اتمسفری با استفاده از الگوریتم (Berk et al., 2014; Cooley et al., 2002) و نرم‌افزار SNAP^{۱۱} برای تصویر ماهواره سنتینل دو با استفاده از Sen2Cor (Segarra et al., 2020; Verrelst et al., 2015) انجام گردید.

برخی از مهم‌ترین شاخص‌های سنجش‌ازدور تهیه شده شامل شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده، شاخص، شاخص سبزیگی^{۱۲}، شاخص خیزی^{۱۳} و شاخص درخشندگی^{۱۴} حاصل از تبدیل تسلدکپ و شاخص گیاهی تعدیل‌کننده اثر خاک است. پس از همسان‌سازی متغیرهای کمکی، کلیه ویژگی‌های محیطی با استفاده از تابع باز نمونه‌گیری در نرم‌افزار Arc GIS.10.4 به‌وضوح مکانی ۳۰ متر تبدیل و هم مقیاس شدند. در جدول (۲) برخی از مهم‌ترین معادلات متغیرهای کمکی و در شکل (۳) نقشه تعدادی از شاخص‌های طیفی ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده

ماهواره	سنجنده	قدرت تفکیک (m)	نام محصول	باند مورد استفاده	تاریخ	دوره بازگشت (روز)
لندست-۸	OLI	۳۰	بازتابش در سطح زمین ^{۱۵}	۱-۷	2021-06-09	۱۶
سنتینل-۲	MSI	۱۰	بازتابش در سطح زمین ^{۱۶}	۲-۸	2021-06-06	۵

جدول ۲- بخشی از مهم‌ترین معادلات متغیرهای کمکی خاک-محیطی مورد استفاده برای مدل‌سازی مکانی

منبع	فرمول	نماد	متغیر کمکی محیطی
Mijani et al.2019	0.3029Blue +0.2786Green+0.4733Red+0.5599NIR+0.508SWIR1+0.1872SWIR2	Brightness	شاخص روشنایی
Mijani et al.,2019	-0.2941Blue-0.243Green-0.542Red+0.7276NIR+0.0713SWIR1-0.1608SWIR2	Greenness	شاخص سبزیگی
Ullah et al.2012	0.1511Blue+0.1973Green+0.3283Red+0.3407NIR-0.7117SWIR1-0.4559SWIR2	Wetness	شاخص رطوبت
Ke et al.2015	(NIR-Red) / (NIR+Red)	NDVI	شاخص تفاضلی پوشش گیاهی نرمال شده
Gao,1996	(Green-NIR) / (Green+NIR)	NDWI	شاخص آب تفاضلی نرمال شده
Huete,1988	$[(NIR - Red) / (NIR + Red)] * (1 + S^*)$	SAVI	شاخص پوشش گیاهی تعدیل‌یافته خاک

S^* : عموماً برابر مقدار ۰/۵ برای تعدیل اثر خاک پس‌زمینه

۱۰. Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercube

۱۱ <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-2>

۱۲. Greenness index

۱۳. Wetness index

۱۴. Brightness index

15 .T1_SR

16 .S2_SR

1 . Mid slope

2 . Modified catchment area

3 . Standardized height

4 . Gradient

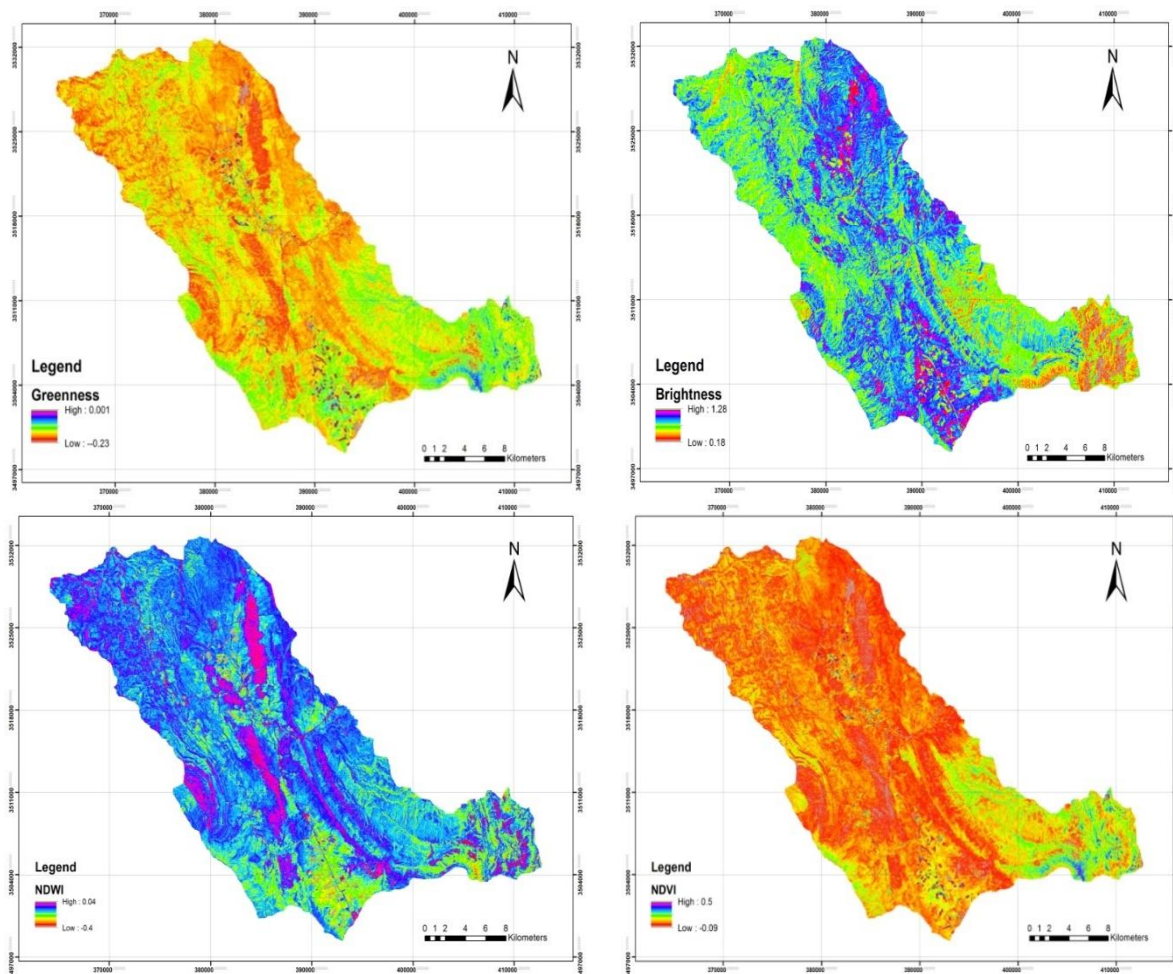
5 . Slope height

6 . Multi resolution index of valley bottom flatness

7 . Standard height

8 . Normalized height

9 . Analytical hillshading



شکل ۳- نمونه‌ای از مهم‌ترین شاخص‌های بیوفیزیکی مستخرج از لندست ۸ شامل Greenness، Brightness، NDWI و NDVI

مدل‌سازی مکانی

مدل جنگل تصادفی^۱ (RF) یک روش یادگیری نظارت‌شده است که از درخت‌های چندگانه در طبقه‌بندی استفاده می‌کند (Breiman et al. 2004). الگوریتم جنگل تصادفی با جایگزینی و تغییر مداوم عوامل مؤثر و مرتبط باهدف، منجر به ایجاد تعداد زیادی درخت تصمیم‌گیری شده سپس تمام درختان به‌منظور پیش‌بینی باهم ترکیب می‌گردند (Vorpahl et al. 2012). در این روش اهمیت متغیرها^۲ نیز تعیین می‌شود. مقادیر درست متغیرها با مقداری که به‌طور تصادفی برای هر درخت تولید شده است جایگزین می‌شود و اثر این تغییر را روی طبقه‌بندی اندازه‌گیری می‌کند، اگر این جایگزینی اثری روی خطای اندازه‌گیری نداشته باشد اهمیت آن متغیر کم است و اگر مقدار خطای اندازه‌گیری افزایش یابد آن متغیر مهم است. رویکرد مدل‌سازی در این پژوهش بر اساس دو سناریو که سناریو اول مدل‌سازی

مبتنی بر مدل RF، ویژگی‌های توپوگرافی و مشتقات ماهواره لندست ۸ و سناریو دوم شامل مدل RF، ویژگی‌های توپوگرافی و مشتقات ماهواره سنتینل-۲ صورت پذیرفت. در این تحقیق باهدف انتخاب بیش‌ترین میزان اهمیت^۳ داده از میان ویژگی‌های محیطی برای پیش‌بینی رطوبت خاک، از روش حذف ویژگی برگشتی^۴ (RFE) با بسته "caret" استفاده گردید (Kuhn et al. 2017) درنهایت انتخاب مهم‌ترین دسته داده متغیرهای کمکی بر اساس روش ۱۰fold ارزیابی متقاطع با ۱۰ تکرار و با در نظر گرفتن حداقل مقدار میانگین ریشه مربعات خطا برای هر یک از عمق‌های استاندارد صورت پذیرفت. همچنین در الگوریتم RF جهت دست یافتن به مناسب‌ترین مدل مکانی بهینه‌ترین مقادیر دو متغیر تنظیمی تعداد درخت (ntree) و تعداد داده‌های ورودی در مدل جنگل تصادفی (mtry) در هر عمق مطالعاتی مدنظر قرار گرفتند.

۱ Random forest

۲ Variable importance

۳ The most important

۴ Recursive feature elimination

شده می‌باشند. هرچه مقدار ضریب تطابق همبستگی و تبیین بیش‌تر و به یک نزدیک‌تر، و مقدار اریبی و خطای جذر میانگین مربعات به صفر نزدیک‌تر باشد، دقت و صحت مدل بالاتر است. در صورتی که مقادیر R^2 در مدل‌سازی رقومی نقشه‌های خاک (DSM^۱) در بین دامنه‌های، کمتر از ۰/۴۱/۴، ۰/۶ تا ۰/۶۱ تا ۰/۸ و یا بیش‌تر از ۰/۸۱ قرار گیرد، به ترتیب بیانگر ضعیف، متوسط، خوب و عالی بودن مدل‌سازی است (Rossel and McBratney 2008).

نتایج و بحث

توصیف آماری مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری شده نتایج توصیف آماری داده‌های رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در اعماق استاندارد مورد مطالعه در جدول (۳) ارائه شده است. میانگین درصد رطوبت خاک از ۲/۲۲ در لایه اول تا ۴/۶۰ در لایه چهارم متغیر است. درصد بسیار پایین رطوبت در کل منطقه بر اساس اطلاعات هواشناسی منطقه به دلیل دمای بالا در اواسط خردادماه و مقدار کم بارندگی در ماه‌های قبل است.

صحت سنجی و اعتبار سنجی مدل

از ۸۰٪ کل داده‌ها برای مدل‌سازی و صحت‌سنجی و از ۲۰٪ باقیمانده برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. شاخص‌های آماری مورد استفاده به شرح زیر می‌باشند.

$$RMSE = \sqrt{1/n \sum_{i=1}^n (Y_i - P_i)^2} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$CCC = \frac{2n\partial Y_i \partial P_i}{\partial P_i^2 + \partial Y_i^2 + (P+Y)^2} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$Bias = \frac{Y_i - P_i}{N} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن، RMSE: خطای جذر میانگین مربعات، CCC: ضریب تطابق همبستگی، Bias: اریبی، R^2 : ضریب تبیین، P_i و Y_i : مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده رطوبت خاک، P و Y : میانگین مقادیر اندازه‌گیری و مقادیر پیش‌بینی شده، n : تعداد مشاهدات و $\partial P_i, \partial Y_i$: واریانس مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی

جدول ۳- خلاصه آماری درصد رطوبت وزنی اندازه‌گیری شده در چهار عمق استاندارد در حوضه مرغاب

عمق (سانتی‌متری)	میانگین	بیشینه	کمینه	انحراف معیار	ضریب تغییرات (%)
۰-۵	۲/۲۲	۷/۷۸	۰/۴۰	۱/۴۸	۶۷
۵-۱۵	۳/۲۴	۱۳/۰۰	۰/۶۵	۱/۸۰	۵۶
۱۵-۳۰	۳/۴۱	۱۲/۵۰	۰/۴۰	۲/۱۷	۶۴
۳۰-۶۰	۴/۶۰	۲۵/۶۵	۰/۴۹	۰/۲۹	۶

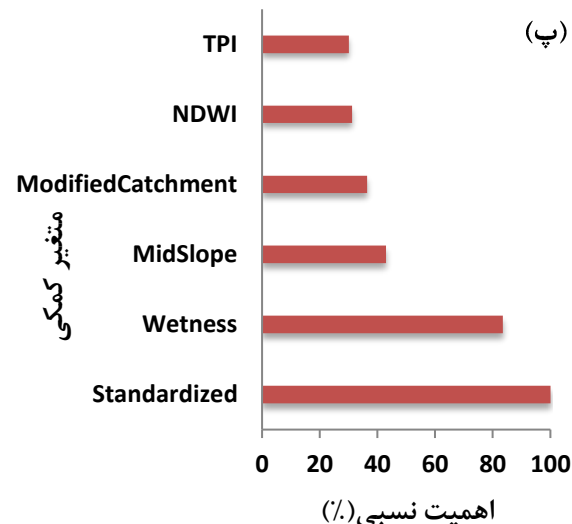
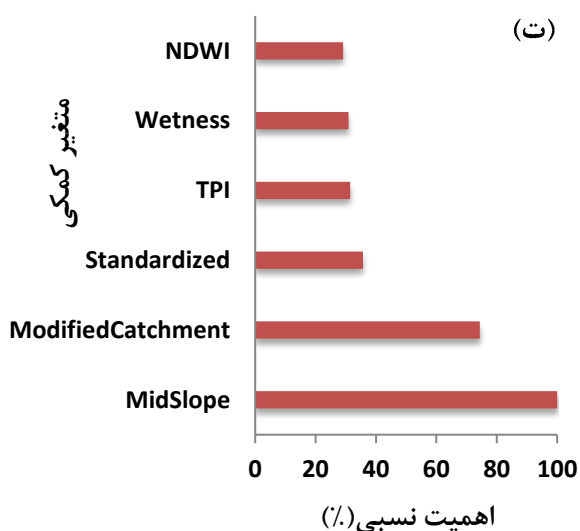
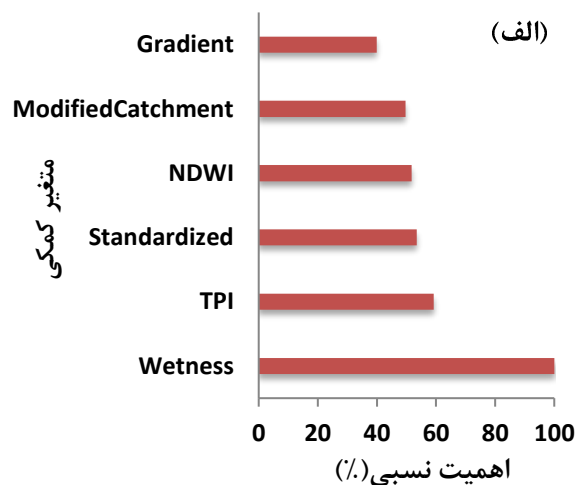
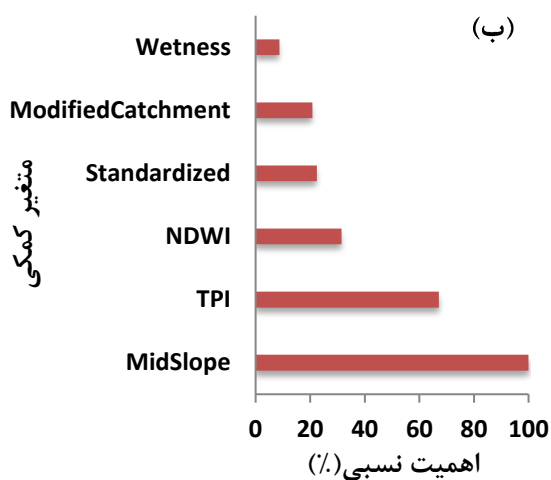
در شکل (۴) ویژگی‌های ایستای توپوگرافی مشتق از DEM و ویژگی‌های پویای بیوفیزیکی مشتق از تصاویر لندست، برای پیش‌بینی رطوبت خاک در چهار عمق استاندارد مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (۵) نیز ویژگی‌های ایستای توپوگرافی مشتق از DEM و ویژگی‌های پویای بیوفیزیکی مشتق از تصاویر سنتینل-۲، برای پیش‌بینی رطوبت خاک در چهار عمق مورد بررسی قرار گرفته است. در هر عمق، شش متغیر با بیش‌ترین اهمیت در پیش‌بینی رطوبت خاک با روش حذف برگشتی - جنگل تصادفی تعیین گردیده است. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود بر اساس نتایج سناریو اول، ویژگی‌های محیطی Gradient, Mid Slope, Modified Catchment, NDWI, Standard, TPI مورد استفاده قرار گرفتند. از میان این ویژگی‌های کمکی دو شاخص NDWI و Wetness حاصل از نسبت گیری باندی و سایر ویژگی‌های مستخرج از مدل رقومی ارتفاع و نماینده فاکتور پستی‌وبلندی (r) در مدل scorporan می‌باشند. نتایج اهمیت

طبق طبقه‌بندی ارائه شده توسط ویلدینگ (Wilding, 1985)، تغییرات رطوبت خاک تا عمق ۳۰ سانتی‌متری در کلاس تغییرپذیری حداکثر و در عمق ۳۰-۶۰ سانتی‌متری در کلاس پایین، طبقه‌بندی می‌گردد. با توجه به قرار گرفتن منطقه در شرایط با اقلیم کم بارندگی، رطوبت به مقدار کمی در خاک ذخیره شده و عمدتاً به صورت تبخیر و تعرق از دسترس گیاه خارج می‌گردد، پوشش گیاهی کم تراکم هم نتوانسته است همان مقدار کم رطوبت خاک را نگهداری نماید بدیهی است با افزایش از سطح به لایه‌های عمقی خاک نوسان رطوبت به دلیل کاهش اثر دمای هوا و تأثیر مستقیم رطوبت کاهش پیدا می‌کند ولی در افق‌های سطحی به علت تأثیر ارتفاع بر دما، تبخیر و تعرق، بارندگی و پوشش گیاهی، درصد تغییرات رطوبت افزایش می‌یابد (Kattel et al. 2013).

ویژگی‌های محیطی منتخب و اهمیت آن‌ها

نسبی^۱ ویژگی‌های محیطی را در لایه سطحی ۰-۵ سانتی‌متری نشان داد که از میان این شاخص‌ها، Wetness بیش‌ترین میزان اهمیت را دارا است و پس‌از آن، فاکتورهای TPI و Standardized در درجات اهمیت بعدی در پیش‌بینی رطوبت خاک قرار دارند. برخلاف لایه اول، در سه لایه استاندارد دیگر (۵-۱۵، ۱۵-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متر)، به ترتیب ویژگی‌های توپوگرافی Midslope و Standardize بیش‌ترین اهمیت را نشان دادند. مطابق شکل (الف)، تأثیرگذارترین ویژگی در افق سطحی، شاخص خیسی ۴الف، ولی با افزایش عمق، نقش ویژگی‌های محیطی توپوگرافی در برآورد رطوبت خاک اهمیت بیش‌تری داشتند. در همین راستا

در نقشه‌برداری رقومی خاک در اراضی خشک و نیمه‌خشک دشت قزوین بیان کردند که ویژگی‌های محیطی حاصل از داده‌های سنجش‌ازدور، اهمیت بیش‌تری را نسبت به سایر متغیرهای محیطی مورداستفاده در لایه سطحی (۰-۵ سانتی‌متر) به خود اختصاص دادند. در مطالعه دیگری برای مدل‌سازی ویژگی‌های خاک، Taghizadeh-Mehrjardi et al. (2014) در دشت اردکان به این نتیجه رسیدند که ویژگی‌های حاصل از سنجش‌ازدور در سطح خاک دارای اهمیت بیش‌تری نسبت به سایر ویژگی‌های خاکساری (ژئومورفولوژی، توپوگرافی) می‌باشند.



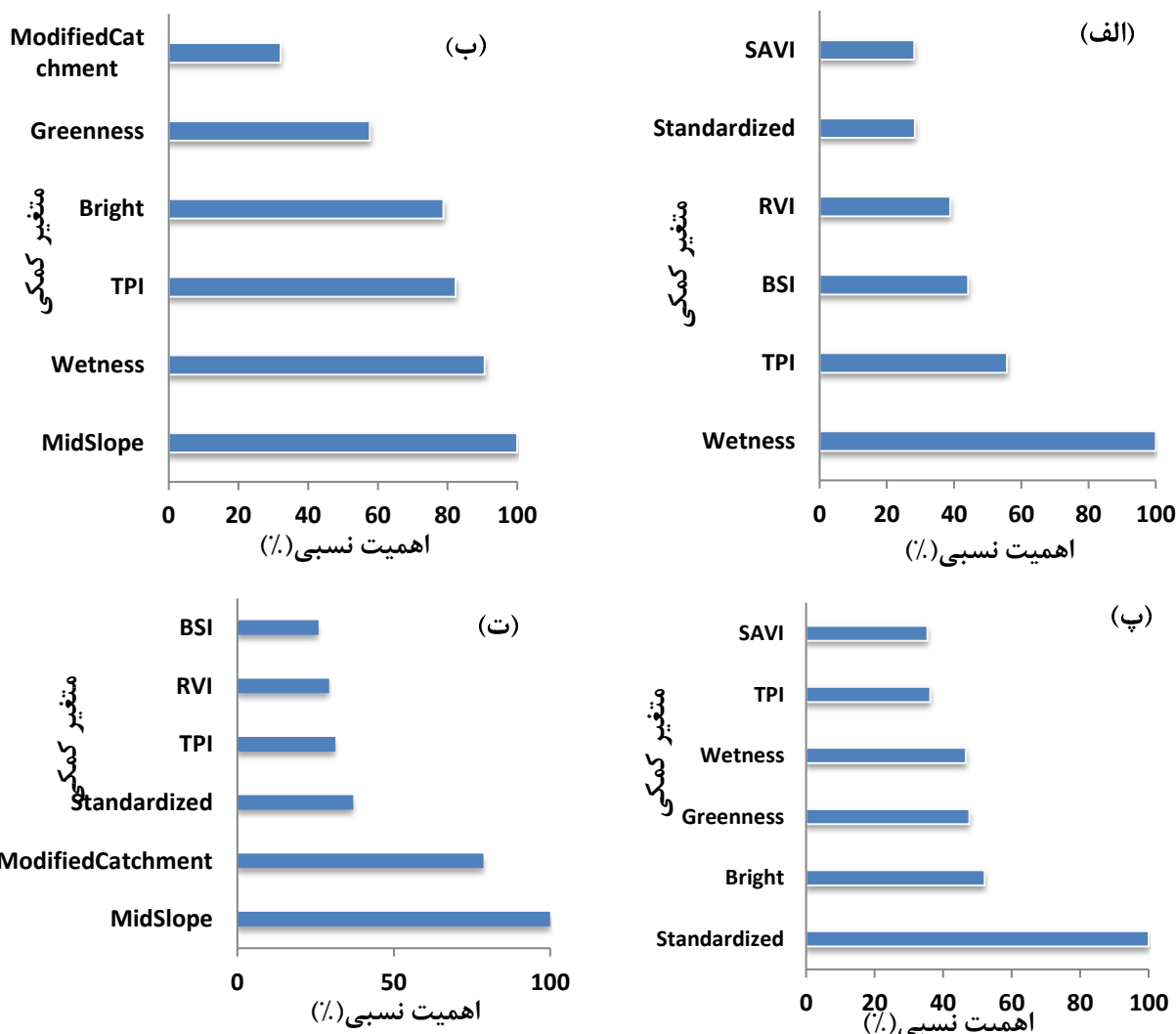
شکل ۴- اهمیت نسبی (درصد) هر یک از ویژگی‌های محیطی پیش‌بینی کننده رطوبت خاک مشتق شده از نقشه رقومی ارتفاع و تصاویر لندست-۸ در هر یک از اعماق استاندارد خاک به ترتیب، (الف) ۰-۵ سانتی‌متر، (ب) ۵-۱۵ سانتی‌متر (ب)، (۱۵-۳۰ سانتی‌متر (پ) و (۳۰-۶۰ سانتی‌متر (ت)

های محیطی نقش مهم‌تری در پیش‌بینی رطوبت خاک ایفا می‌کنند. در مطالعه دیگری (Mousavi et al. 2020) در بررسی نتایج میزان کربنات کلسیم در افق‌های زیرین، به تأثیر بیش‌تر

نتایج حاصل از مطالعات بیانگر آن است که برخلاف عمق سطحی (۰-۵) سانتی‌متر، در لایه‌های زیرسطحی، سایر ویژگی‌-

خاک، فاکتور بسیار مهمی است (Khan, 2005). در عمق ۳۰-۱۵ سانتی‌متر، ویژگی‌های Standardized Wetness و Midslope به ترتیب بیش‌ترین تأثیر را در برآورد رطوبت در عمق زیرسطحی دارند و در لایه استاندارد چهارم، ویژگی‌های Modified Standard Catchment و Midslope مهم‌ترین پیش‌بینی‌کننده‌های محیطی و تعیین‌کننده روند تغییرات مکانی رطوبت خاک در اعماق زیرسطحی بودند (شکل ۴-ب تا ت). سایر محققین نیز هم‌راستا با نتایج این تحقیق، تأثیر بیش‌تر فاکتورهای توپوگرافی را در پیش‌بینی تغییرات زیرسطحی رطوبت خاک گزارش نمودند (Fabre et al. 2015; Khellouk et al. 2020).

فاکتورهای توپوگرافی در اعماق زیرسطحی نسبت به سنجش‌ازدور اشاره کردند شکل (۴-ب). در عمق ۱۵-۵ سانتی‌متر، ویژگی‌های Mid slope, TPI, NDWI به‌ترتیب بیش‌ترین تأثیر را در برآورد رطوبت در عمق زیرسطحی دارند. نتایج این مطالعه مانند مطالعات (Sahu, 2014) نشان می‌دهد که شاخص تفاضلی نرمال شده آب (NDWI) همبستگی مثبت و معنی‌دار بالایی (همبستگی ۰/۶۶) نسبت به سایر مشتقات سنجش‌ازدور با رطوبت خاک دارد. از سوی دیگر، به دلیل همبستگی بالای رطوبت خاک با ویژگی‌هایی از قبیل میزان تبخیر و تعرق، تاج پوشش و تنش رطوبتی گیاه GU (2008)، شاخص تفاضلی نرمال شده آب جهت برآورد رطوبت



شکل ۵- اهمیت نسبی هر یک از ویژگی‌های محیطی پیش‌بینی‌کننده رطوبت خاک مشتق شده از نقشه رقومی ارتفاع و تصاویر سنتینل ۲ در هر یک از اعماق استاندارد خاک به ترتیب عمق ۵-۰ سانتی‌متر (الف)، عمق ۱۵-۵ سانتی‌متر (ب)، عمق ۳۰-۱۵ سانتی‌متر (پ) و عمق ۶۰-۳۰ سانتی‌متر (ت)

همان‌طور که در شکل (۵) نیز مشاهده می‌شود، بر اساس نتایج سناریوی دوم مدل‌سازی رطوبت خاک، ویژگی‌های محیطی SAVI, Brightness, Greenness, BSI, Wetness و Modified catchment انتخاب گردیدند. از میان این ویژگی‌های کمکی شاخص‌های RVI, SAVI, Brightness, Greenness, BSI و Wetness حاصل

همان‌طور که در شکل (۵) نیز مشاهده می‌شود، بر اساس نتایج سناریوی دوم مدل‌سازی رطوبت خاک، ویژگی‌های محیطی SAVI, Standardized, RVI, BSI, TPI, Wetness, MidSlope, SAVI, Standardized, RVI, BSI, TPI, Wetness

در مناطق کوهستانی و شیب‌دار و به دلیل تأثیر پیچیده خواص بیوفیزیکی و توپوگرافی بر سطح بسیار چالش برانگیز است (Fatholomi et al. 2020).

نتایج ارزیابی مدل سازی رطوبت خاک

در جدول (۴) نتایج اعتبارسنجی پیش‌بینی رطوبت خاک در چهار عمق مورد بررسی با بهره‌گیری از متغیرهای ایستا و پویای مشتق از تصاویر لندست-۸ و سنتینل-۲ آمده است. همان‌طور که دیده می‌شود، در سناریوی اول، مقدار ضریب تطابق همبستگی بین ۰/۷۵ تا ۰/۸۲ و مقادیر میانگین مربعات خطا از ۰/۷۳ تا ۱/۴۵ درصد از لایه ۵- تا ۰-۶۰-۳۰ است. همچنین میزان اریبی از ۰ تا ۰/۱۳ درصد نوسان دارند. در سناریوی دوم، مقدار ضریب تطابق همبستگی در پیش‌بینی مکانی رطوبت خاک، به ترتیب در اعماق ۵-، ۱۵-۵، ۳۰-۱۵ و ۶۰-۳۰ به ترتیب ۰/۷۷، ۰/۸۵، ۰/۷۹ و ۰/۸۲ و مقدار میانگین مربعات خطابه ترتیب ۰/۶۵، ۱/۰۹، ۱/۲۴ و ۱/۲۹ می‌باشند. در هر دو سناریو، بالاترین مقدار آماره CCC در لایه استاندارد ۱۵-۵ سانتی‌متر و کم‌ترین مقدار آن در هر دو سناریو در لایه ۵-۰ سانتی‌متر مشاهده گردید.

از نسبت گیری باندى Standard, Gradient, midslope, Modify, catchment و TPI به‌عنوان شاخص‌های توپوگرافی می‌باشند. نتایج ارزیابی اهمیت نسبی ویژگی‌های محیطی در لایه سطحی ۵-۰ سانتی‌متری نشان داد که از میان این شاخص‌ها، Wetness بیش‌ترین میزان اهمیت را دارا است و پس از آن فاکتورهای TPI و BSI در درجات اهمیت بعدی در پیش‌بینی رطوبت خاک قرار دارند. برخلاف لایه اول در سه لایه استاندارد دیگر (۱۵-۵، ۳۰-۱۵ و ۶۰-۳۰ سانتی‌متر)، به ترتیب ویژگی‌های توپوگرافی Standardize, Midslope بیش‌ترین اهمیت را نشان دادند. مطابق شکل (۵-الف) تأثیرگذارترین ویژگی در افق سطحی شاخص خیزی است، ولی با افزایش عمق روند اهمیت نسبی ویژگی‌های محیطی از سطح به عمق مشابه سناریوی اول مشاهده گردید. نتایج حاصل از تغییرات مکانی ویژگی‌های محیطی و نیز تغییرات زیاد توپوگرافی در حوضه، بیانگر دامنه تغییرات زیاد رطوبت خاک در منطقه (Katuwal et al. 2018) است. شکل‌های (۴) و (۵) بیانگر آن است که ویژگی‌های محیطی حاصل از توپوگرافی، اهمیت بیش‌تری در توجیه تغییرات مکانی رطوبت خاک در اعماق پایین‌تر به خود اختصاص دادند. با این حال، تهیه نقشه‌های رطوبت

جدول ۴- نتایج اعتبارسنجی پیش‌بینی مکانی رطوبت خاک با استفاده از مدل یادگیری ماشین در حوضه مرغاب

R ²	RMSE	Bias	CCC	عمق (cm)	منبع داده‌های محیطی
۰/۸۲	۰/۷۳	۰/۱۰	۰/۷۵	۵-۰	
۰/۸۴	۰/۷۸	۰/۱۱	۰/۸۲	۱۵-۵	سناریو یک
۰/۸۷	۱/۴۱	۰/۱۳	۰/۷۸	۳۰-۱۵	DEM + لندست-۸
۰/۸۷	۱/۴۵	۰/۰۰	۰/۸۰	۶۰-۳۰	
۰/۸۷	۰/۶۵	۰/۰۰	۰/۷۷	۵-۰	
۰/۹۰	۱/۰۹	-۲۰	۰/۸۵	۱۵-۵	سناریو دو
۰/۹۰	۱/۲۴	۰/۰۷	۰/۷۹	۳۰-۱۵	DEM + سنتینل-۲
۰/۹۱	۱/۲۹	۰/۳۹	۰/۸۲	۶۰-۳۰	

CCC: ضریب تطابق همبستگی، Bias: اریبی، RMSE: خطای جذر میانگین مربعات، R²: ضریب تبیین

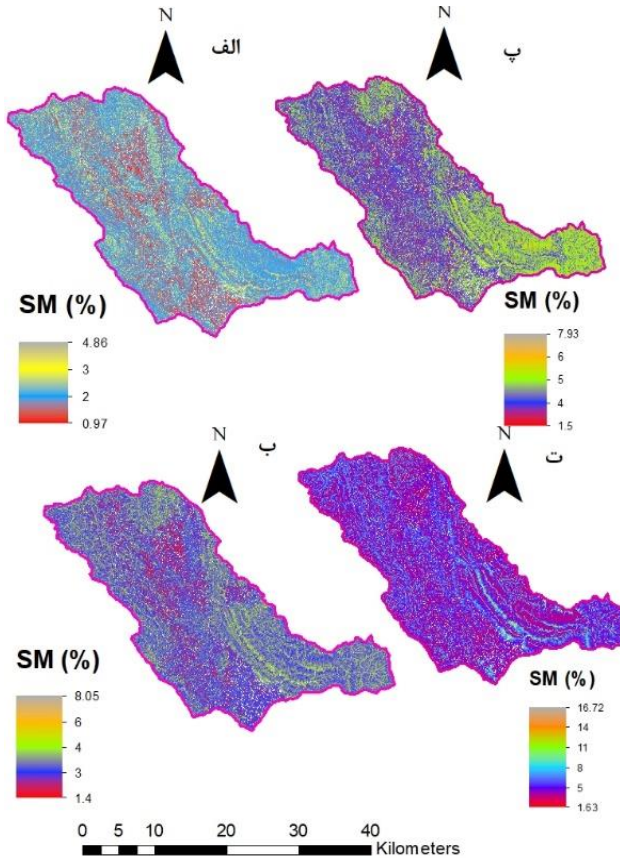
برخوردار بوده است که با توجه به قدرت تفکیک مکانی بالاتر آن قابل توجه است. بر مبنای ضریب تبیین، در سناریوی دو (استفاده از تصاویر سنتینل ۲) دقت مدلسازی از عمق سطحی به زیرسطحی به ترتیب ۶/۱۰، ۷/۱۴، ۳/۴۵ و ۴/۶۰ درصد افزایش یافته است.

تغییرپذیری مکانی رطوبت خاک در حوضه مرغاب

نقشه پیش‌بینی رطوبت خاک سناریو اول در شکل (۶) نشان می‌دهد که در لایه اول (۵-۰ سانتی‌متر)، میزان درصد رطوبت بین ۰/۹۷ تا ۴/۸۶، با افزایش عمق در لایه استاندارد دوم، بین ۱/۵۳ تا ۷/۹۳، در لایه سوم استاندارد بین ۱/۴۴ تا ۸/۰۵ و در لایه

میزان ضریب تبیین در سناریو شماره ۱ به ترتیب عمق، بین ۰/۸۲ تا ۰/۸۷ و در سناریو شماره دو ۰/۸۷ تا ۰/۹۱ متغیر است. بر مبنای (Rossel and McBratney, 2008)، نتایج بیانگر این است که با استفاده از مدل جنگل تصادفی می‌توان شبیه‌سازی رطوبت خاک را با صحت بالایی برآورد نمود. بررسی‌ها نشان می‌دهد علی‌رغم اینکه تفاوت زیادی در بین دو تصویر ماهواره‌ای سنتینل و لندست برای استخراج متغیرهای محیطی پویا در صحت پیش‌بینی رطوبت در این پژوهش دیده نشده است، ولی با اختلاف کمی، نتایج مدل سازی مکانی رطوبت خاک با شاخص‌های مستخرج از سنتینل دو در تمامی اعماق خاک، از دقت بالاتری

حفاظت خاک کمتر از مناطق با پوشش جنگلی و متراکم که عمدتاً منبع رطوبتی آن‌ها برف است کمتر مشاهده می‌گردد.



شکل ۶- نقشه پیش‌بینی مکانی رطوبت خاک به ترتیب: عمق ۵-۰ سانتی-متر، عمق ۱۵-۵ سانتی‌متر عمق ۳۰-۱۵ سانتی‌متر، عمق ۶۰-۳۰ سانتی‌متر (سناریو اول)

در این میان مدل جنگل تصادفی توانایی مدل‌سازی رطوبت خاک در یک منطقه کوهستانی با شرایط سطح ناهمگن را دارا است. همچنین مدل به دلیل توانایی بالای آن در نظر گرفتن ارتباطات پیچیده و روابط غیرخطی بین خصوصیات بیوفیزیکی سطح و توپوگرافی کارایی بالایی در مدل‌سازی مکانی رطوبت خاک دارا است (Fatholomi et al. 2020). این عدم یکنواخت ویژگی‌های متعدد در منطقه مورد مطالعه که مهم‌ترین آن‌ها تنوع بالای توپوگرافی و شیب، کاربری اراضی و اختلاف ارتفاع است، به توزیع مکانی ویژگی رطوبت در منطقه مورد مطالعه کمک کرده است (Forkuor et al. 2017, Sayão et al. 2018). در حوضه مورد مطالعه تنوع زیاد توپوگرافی در منطقه، تأثیر خواص توپوگرافی را بیش‌تر از ویژگی‌های بیوفیزیکی بر رطوبت خاک می‌داند. همچنین نتایج مطالعات (Firozjaei et al. 2020) نشان داده است که در نظر گرفتن هم‌زمان ویژگی‌های بیوفیزیکی و توپوگرافی سطحی در مدل جنگل تصادفی باعث افزایش دقت مدل‌سازی رطوبت خاک می‌شود.

چهارم استاندارد بین ۱/۶۳ تا ۱۶/۷۲ تغییر می‌کند. همان‌طور که مشخص است، با افزایش عمق میزان رطوبت خاک افزایش و به‌این‌ترتیب، در اعماق ۶۰-۳۰ سانتی‌متری بیش‌ترین میزان رطوبت خاک مشاهده گردید. در ادامه نقشه پیش‌بینی مکانی رطوبت خاک بر اساس مدل RF در سناریو شماره دو نیز تهیه شده است. درصد رطوبت پیش‌بینی‌شده در لایه اول ۰/۹۱ تا ۴/۹۲، در لایه دوم بین ۱/۴۱ تا ۶/۰۹، لایه سوم ۱/۲۵ تا ۷/۵۷ و در لایه آخرین ۱/۷۰ تا ۱۷/۹۳ است. بر اساس نقشه پهنه‌بندی تهیه‌شده در حوضه مرغاب در زمان داده‌برداری میدانی، رطوبت خاک در مناطق بخش‌های شمالی، جنوب شرقی به سمت شرق، بیش‌تر از سایر مناطق است که این پدیده در نقشه‌های حاصل از هر دو سناریوی مدل‌سازی به‌خوبی قابل مشاهده است. همچنین نتایج بیانگر آن است که میزان رطوبت در امتداد عمق در حال افزایش است. در مورد علت این مشاهدات چنین به نظر می‌رسد که یکی از این عوامل، تغییرات ارتفاع و توپوگرافی در این بخش‌ها (بخش‌های شمالی، جنوب شرقی به سمت شرق) که منجر به دریافت مقادیر مختلف منابع تأمین‌کننده رطوبت خاک (بارش و برف) نسبت به سایر مناطق هموار است. لذا در خردادماه که فصل نمونه‌برداری این تحقیق بوده است با توجه به اینکه از نظر اقلیمی میزان بارش‌های جوی کاهش پیدا کرده در نتیجه به‌طور مشخص در دشت‌ها و مناطق کم ارتفاع (دامنه‌های شیب روبه جنوب و شرق) از ذخیره رطوبتی کمتری برخوردار هستند (شکل ۶ و ۷). در همین راستا سایر محققین محتوای بالای رطوبت خاک را مربوط به اثر فاکتورهای توپوگرافی و تغییرات دما و نوع کاربری اراضی و پوشش گیاهی مرتبط دانستند (Fatholomi et al. 2021). در این مناطق عمدتاً از لحاظ کاربری اراضی جنگل بوده و با توجه به نوع پوشش گیاهی و سایه انداختن جنگل‌های بلوط و همچنین ارتفاع بالای منطقه رطوبت بیشتری در منطقه مورد مطالعه متمرکز است. همچنین در بالادست حوضه از نظر مکانی که در بخش شرقی منطقه مطالعاتی قرار دارد به دلیل حضور رخنمون‌های سنگی، عمق کم خاک، پوشش گیاهی ضعیف، عمده جریان‌های ورودی به‌صورت رواناب از این بخش خارج شده و از تجمع جریان‌های رواناب در بخش پایین دست آن به دلیل وجود شرایط مناسب از قبیل نفوذپذیری، عمق بیشتر خاک و ارتفاع کمتر شرایط برای نفوذ آب به خاک فراهم و منجر به افزایش میزان رطوبت در این مناطق گردیده است. بخش‌های مرکزی و جنوبی محدوده حوضه، اغلب دارای کاربری زراعی دیم می‌باشد که در این مناطق محتوای رطوبتی خاک ضمن مصرف برای گیاهان به دلیل کاهش ارتفاع، افزایش دما و مستقر بودن پوشش یک‌ساله و نیز بعضاً به علت عدم رعایت روش‌های مدیریتی

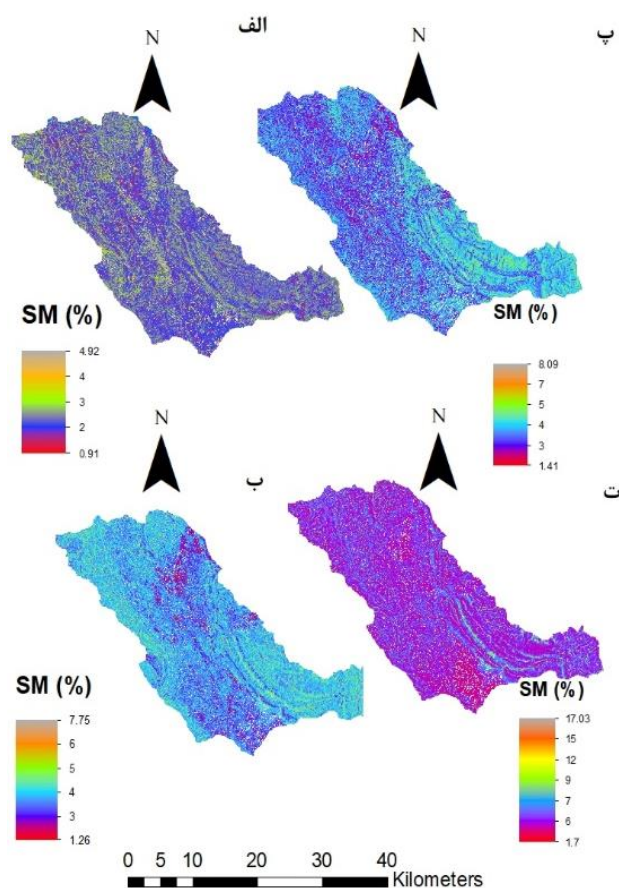
همچنین مقایسه مدل‌سازی در هر دو سناریو بیانگر آن است که میزان درصد ضریب تطابق همبستگی (CCC) تصاویر سنتینل-۲ در تلفیق با فاکتورهای توپوگرافی در مدل‌سازی مکانی رطوبت خاک در مقایسه با تصاویر اپتیکال لندست ۸ در هر عمق استاندارد از دقت بالاتری بین ۱/۲۸ تا ۳/۶۶ درصد برخوردار می‌باشند؛ بنابراین ترکیبی از ویژگی‌های طیفی و مکانی به‌ویژه در تصاویر سنتینل ۲، باعث افزایش دقت مدل‌سازی مکانی رطوبت خاک می‌شود. به دلیل کارایی بالای داده‌های RS در فرآیند مدل‌سازی، استفاده از این داده‌ها برای برآورد رطوبت خاک بسیار مفید است. همچنین نتایج پراکنش مکانی رطوبت خاک نشان داد که محتوای رطوبت خاک در شمال و جنوب شرق منطقه مورد مطالعه بیش‌تر و در بخش‌های غربی، مرکز و جنوب کمتر می‌باشند که این پدیده با مشاهدات میدانی نیز همخوانی دارد.

رطوبت خاک با بسیاری از پارامترهای فیزیکی مانند ظرفیت مزرعه‌ای^۱، نقطه پژمردگی دائم^۲، آب قابل‌دسترس، پتانسیل آب در خاک، و پتانسیل ماتریک دارای روابط متقابلی می‌باشند. از این‌رو در دسترس بودن نقشه‌های رطوبت می‌تواند کمک شایانی جهت مدیریت منابع آب و حوضه‌های آبخیز داشته باشد. ماهیت رقومی بودن این نقشه‌ها، منجر به کاهش هزینه و زمان، عدم نیاز به تفسیر تصاویر ماهواره‌ای و به‌هنگام بودن اطلاعات در هر زمان ممکن می‌باشند. توصیه می‌شود که در مطالعات آینده از سایر الگوریتم‌های یادگیری ماشین با تصاویر اپتیکال و ماکروویو برای مدل‌سازی رطوبت خاک در افق‌های سطحی و زیرین استفاده شود. مقایسه تصاویر مختلف ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی و زمانی متفاوت و نیز تلفیق آن‌ها باهم می‌تواند به‌عنوان منبع اطلاعاتی برای مدل‌ها در مطالعات آینده لحاظ شود. در پایان از دیدگاه کاربردی توصیه می‌گردد، با توجه به اینکه الگوریتم‌های ماشین یادگیرنده به همراه متغیرهای محیطی، قادر می‌باشند تا نقشه پیش‌بینی مکانی رطوبت را در کل منطقه مورد مطالعه پیش‌بینی نمایند، از روش مدل‌سازی مورد استفاده در این تحقیق برای تهیه نقشه جامع و یکپارچه تغییرات رطوبت خاک در دوره‌های زمانی و مکانی مختلف در سایر مناطق مشابه در ایران استفاده گردد. نقشه‌های رطوبت خاک تهیه‌شده در مقیاس این مطالعه، می‌توانند راهنمای مناسبی برای مدیران، کارشناسان خاک و آب و بهره‌برداران اراضی جهت برنامه‌ریزی باشند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCE

Abedi, F., AmirianChakan, A., Faraji, M.,



شکل ۷- نقشه پیش‌بینی مکانی رطوبت خاک به ترتیب: عمق ۵-۰ سانتی-متر، عمق ۱۵-۵ سانتی‌متر عمق ۳۰-۱۵ سانتی‌متر، عمق ۶۰-۳۰ سانتی‌متر (سناریو دوم)

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی تغییرات مکانی رطوبت خاک در چهار عمق استاندارد با پروژه جهانی نقشه خاک در بخشی از اراضی حوضه مرغاب پرداخته شد. به این منظور از دودسته داده، متغیر کمکی شامل تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و سنتینل ۲ در تلفیق با ویژگی‌های توپوگرافی استفاده شد. همچنین در ۱۷۴ نقطه از سطح حوضه، رطوبت خاک در چهار عمق مورد نظر اندازه‌گیری شد. بر اساس روش حذف ویژگی برگشتی در نهایت شش ویژگی محیطی در هر عمق استاندارد انتخاب گردید. نتایج نشان داد که در عمق سطحی ۵-۰ سانتی‌متر، شاخص‌های سنجش‌ازدور در هر دو منبع تصاویر ماهواره‌ای، بیش‌ترین تأثیر را در پیش‌بینی مکانی رطوبت خاک داشتند. همچنین، مشخص گردید که داده‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور، امکان برآورد تغییرات مکانی و در زمان‌های مختلف گذر ماهواره به‌ویژه در سطح فراهم می‌کنند.

TaghizadehMehrdardi, R., Kerry, R., Razmjoue,



- D., & Scholten, T. (2021). Salt dome related soil salinity in southern Iran: Prediction and mapping with averaging machine learning models. *Land Degradation & Development*, 32(3), 1540-1554.
- Berk, A., Conforti, P., Kennett, R., Perkins, T., Hawes, F., & Van Den Bosch, J. (2014, June). MODTRAN® a major upgrade of the MODTRAN® radiative transfer code. In 2014 6th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS) (pp. 1-4). IEEE.
- Breiman, L., & Cutler, A. (2004). Random Forests, URL: [http://www. Stat. Berkeley. Edu/users/breiman. RandomForests/cc_papers. Htm](http://www.Stat.Berkeley.Edu/users/breiman.RandomForests/cc_papers.Htm).
- Brevik, E. C., Cerdà, A., Mataix-Solera, J., Pereg, L., Quinton, J. N., Six, J., & Van Oost, K. (2015). The interdisciplinary nature of SOIL. *Soil*, 1(1), 117-129.
- Cooley, T., Anderson, G. P., Felde, G. W., Hoke, M. L., Ratkowski, A. J., Chetwynd, J. H., & Lewis, P. (2002, June). FLAASH, a MODTRAN4-based atmospheric correction algorithm, its application and validation. In IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Vol. 3, pp. 1414-1418). IEEE.
- Dharumarajan, S., Hegde, R., & Singh, S. K. (2017). Spatial prediction of major soil properties using Random Forest techniques-A case study in semi-arid tropics of South India. *Geoderma Regional*, 10, 154-162.
- Diek, S., Chabrillat, S., Nocita, M., Schaepman, M. E., & de Jong, R. (2019). Minimizing soil moisture variations in multi-temporal airborne imaging spectrometer data for digital soil mapping. *Geoderma*, 337, 607-621.
- Fabre, S., Briottet, X., & Lesaignoux, A. (2015). Estimation of soil moisture content from the spectral reflectance of bare soils in the 0.4–2.5 μm domain. *Sensors*, 15(2), 3262-3281.
- Fathololoumi, S., Vaezi, A. R., Alavipanah, S. K., Ghorbani, A., & Biswas, A. (2020). Comparison of spectral and spatial-based approaches for mapping the local variation of soil moisture in a semi-arid mountainous area. *Science of the Total Environment*, 724, 138319.
- Fathololoumi, S., Vaezi, A. R., Alavipanah, S. K., Ghorbani, A., Saurette, D., & Biswas, A. (2021). Effect of multi-temporal satellite images on soil moisture prediction using a digital soil mapping approach. *Geoderma*, 385, 114901.
- Firozjaei, M. K., Alavipanah, S. K., Liu, H., Sedighi, A., Mijani, N., Kiavarz, M., & Weng, Q. (2019). A PCA-OLS model for assessing the impact of surface biophysical parameters on land surface temperature variations. *Remote Sensing*, 11(18), 2094.
- Firozjaei, M. K., Fathololoumi, S., Alavipanah, S. K., Kiavarz, M., Vaezi, A. R., & Biswas, A. (2020). A new approach for modeling near surface temperature lapse rate based on normalized land surface temperature data. *Remote Sensing of Environment*, 242, 111746.
- Firozjaei, M. K., Fathololoumi, S., Alavipanah, S. K., Kiavarz, M., Vaezi, A., Biswas, A., & Ghorbani, A. (2019). Modeling the impact of surface characteristics on the near surface temperature lapse rate. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 395-399.
- Forkuor, G., Hounkpatin, O. K., Welp, G., & Thiel, M. (2017). High resolution mapping of soil properties using remote sensing variables in south-western Burkina Faso: a comparison of machine learning and multiple linear regression models. *PLoS one*, 12(1), e0170478.
- Gao, B. C. (1996). NDWI, A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment*, 58(3), 257-266.
- GU, Y., Hunt, E., Wardlow, B., Basara, J. B., Brown, J. F., & Verdin, J. P. (2008). Evaluation of MODIS NDVI and NDWI for vegetation drought monitoring using Oklahoma Mesonet soil moisture data. *Geophysical Research Letters*, 35(22).
- Holtgrave, A. K., Förster, M., Greifeneder, F., Notarnicola, C., & Kleinschmit, B. (2018). Estimation of soil moisture in vegetation-covered floodplains with Sentinel-1 SAR data using support vector regression. *PFG-Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 86(2), 85-101.
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*, 25(3), 295-309.
- Iran Meteorological Organization. (2018). Climate Information, Khuzestan synoptic station: Khuzestan, Iran.
- Kato, C., & Nishimura, T. (2017). Predicting soil moisture condition in arbitrary agricultural lands using the digital soil map and soil physical properties database. *Paddy and water environment*, 15(1), 159-169.
- Katuwal, S., Knadel, M., Moldrup, P., Norgaard, T., Greve, M. H., & de Jonge, L. W. (2018). Visible-Near-infrared spectroscopy can predict mass transport of dissolved chemicals through intact soil. *Scientific reports*, 8(1), 1-9.
- Ke, Y., Im, J., Lee, J., Gong, H., & Ryu, Y. (2015). Characteristics of Landsat 8 OLI-derived NDVI by comparison with multiple satellite sensors and in-situ observations. *Remote Sensing of Environment*, 164, 298-313.
- Keshavarz, M. R., Vazifedoust, M., & Alizadeh, A. (2014). Drought monitoring using a Soil Wetness Deficit Index (SWDI) derived from MODIS satellite data. *Agricultural Water Management*, 132, 37-45.
- Khaki, M., & Awange, J. (2019). The application of multi-mission satellite data assimilation for studying water storage changes over South America. *Science of the Total Environment*, 647, 1557-1572.

- Khan, N. M., Rastoskuev, V. V., Sato, Y., & Shiozawa, S. (2005). Assessment of hydrosaline land degradation by using a simple approach of remote sensing indicators. *Agricultural Water Management*, 77(1-3), 96-109.
- Khellouk, R., Barakat, A., Boudhar, A., Hadria, R., Lionboui, H., El Jazouli, A., & Benabdelouahab, T. (2020). Spatiotemporal monitoring of surface soil moisture using optical remote sensing data: a case study in a semi-arid area. *Journal of Spatial Science*, 65(3), 481-499.
- Kuhn, M., & Quinlan, R. (2017). Rule-And Instance-Based Regression Modeling. *Comprehensive R Archiv, Net*. 1-14.
- Lehnert, M. (2014). Factors affecting soil temperature as limits of spatial interpretation and simulation of soil temperature. *Acta Universitatis Palackianae Olomucensis-Geographica*, 45(1), 5-21.
- Li, H. D., Guan, D. X., Yuan, F. H., Ren, Y., Wang, A. Z., Jin, C. J., & Wu, J. B. (2014). Diurnal and seasonal variations of energy balance over Horqin meadow. *Ying yong sheng tai xue bao= The journal of applied ecology*, 25(1), 69-76.
- Li, H., Wang, A., Yuan, F., Guan, D., Jin, C., Wu, J., & Zhao, T. (2016). Evapotranspiration dynamics over a temperate meadow ecosystem in eastern Inner Mongolia, China. *Environmental Earth Sciences*, 75(11), 1-11.
- Luo, W., Xu, X., Liu, W., Liu, M., Li, Z., Peng, T., & Zhang, R. (2019). UAV based soil moisture remote sensing in a karst mountainous catchment. *Catena*, 174, 478-489.
- Ma, H., Zeng, J., Chen, N., Zhang, X., Cosh, M. H., & Wang, W. (2019). Satellite surface soil moisture from SMAP, SMOS, AMSR2 and ESA CCI: A comprehensive assessment using global ground-based observations. *Remote Sensing of Environment*, 231, 111215.
- Ma, Y., Minasny, B., Malone, B. P., & Mcbratney, A. B. (2019). Pedology and digital soil mapping (DSM). *European Journal of Soil Science*, 70(2), 216-235.
- Mahmoudabadi, E., Karimi, A., Haghnia, G. H., & Sepehr, A. (2017). Digital soil mapping using remote sensing indices, terrain attributes, and vegetation features in the rangelands of northeastern Iran. *Environmental monitoring and assessment*, 189(10), 1-20.
- McBratney, A. B., Santos, M. M., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1-2), 3-52.
- Mijani, N., Alavipanah, S. K., Hamzeh, S., Firozjaei, M. K., & Arsanjani, J. J. (2019). Modeling thermal comfort in different condition of mind using satellite images: An Ordered Weighted Averaging approach and a case study. *Ecological Indicators*, 104, 1-12.
- Mishra, N., Haque, M. O., Leigh, L., Aaron, D., Helder, D., & Markham, B. (2014). Radiometric cross calibration of Landsat 8 operational land imager (OLI) and Landsat 7 enhanced thematic mapper plus (ETM+). *Remote sensing*, 6(12), 12619-12638.
- Mosleh, Z., Salehi, M. H., Jafari, A., Borujeni, I. E., & Mehnatkesh, A. (2016). The effectiveness of digital soil mapping to predict soil properties over low-relief areas. *Environmental monitoring and assessment*, 188(3), 195.
- Mousavi, S. R., Sarmadian, F., & Rahmani, A. (2020). Modeling and Prediction of Soil Classes Using Boosting Regression Tree and Random Forests Machine Learning Algorithms in Some Part of Qazvin Plain. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(10), 2525-2538. (In Farsi).
- Mousavi, S., Sarmadian, F., Alijani, Z., & Taati, A. (2017). Land suitability evaluation for irrigating wheat by geopedological approach and geographic information system:
- Mousavi, S., Sarmadian, F., Omid, M., & Bogaert, P. (2021). Digital modeling of three-dimensional soil salinity variation using machine learning algorithms in arid and semi-arid land of Qazvin plain. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, (), Doi: 10.22059/ijswr.2021.323030.668957
- Mousavi, S., Sarmadian, F., Omid, M., & Bogaert, P. (2021). The Vertical Modeling of Soil Calcium Carbonate Equivalent Variation by Machine Learning Algorithms in Qazvin Plain. *Water and Soil*, Doi: 10.22067/jsw.2021.71748.1076
- Nasta, P., Penna, D., Brocca, L., Zuecco, G., & Romano, N. (2018). Downscaling near-surface soil moisture from field to plot scale: A comparative analysis under different environmental conditions. *Journal of Hydrology*, 557, 97-108.
- Nourouzi, A. E., Behbahani, S., Rahimi, K. A., & Aghighi, H. (2009). Surface Soil Moisture Model with NDVI (case study: Rangeland of Khorasan Razavi Province).
- Parsaie, F., Firouzi, A. F., Mousavi, S. R., Rahmani, A., Sedri, M. H., & Homae, M. (2021). Large-scale digital mapping of topsoil total nitrogen using machine learning models and associated uncertainty map. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(4), 1-15.
- Rahmani, A., Sarmadian, F., Mousavi, S. R., & Khamoshi, S. E. (2020). Application of Geomorphometric attributes in digital soil mapping by using of machine learning and fuzzy logic approaches. *Journal of Range and Watershed Management*, 73(1), 105-124.
- Rossel, R. V., & McBratney, A. B. (2008). Diffuse reflectance spectroscopy as a tool for digital soil mapping. In *Digital soil mapping with limited data* (pp. 165-172). Springer, Dordrecht.
- Sahu, A. S. (2014). Identification and mapping of the water-logged areas in Purba Medinipur part of Keleghai river basin, India: RS and GIS methods. *International Journal of Advanced Geosciences*, 2(2), 59-65.
- Sayão, V. M., Demattê, J. A., Bedin, L. G., Nanni, M. R., & Rizzo, R. (2018). Satellite land surface temperature and reflectance related with soil attributes. *Geoderma*, 325, 125-140
- Segarra, J., Buchailot, M. L., Araus, J. L., & Kefauver,



- S. C. (2020). Remote sensing for precision agriculture: Sentinel-2 improved features and applications. *Agronomy*, 10(5), 641.
- Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I., & Teuling, A. J. (2010). Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, 99(3-4), 125-161.
- Sinoga, J. R., Diaz, A. R., Bueno, E. F., & Murillo, J. M. (2010). The role of soil surface conditions in regulating runoff and erosion processes on a metamorphic hillslope (Southern Spain): Soil surface conditions, runoff and erosion in Southern Spain. *Catena*, 80(2), 131-139.
- Soil Survey Manual, (2018). Soil Science Division Staff. United States Department of Agriculture Handbook No. 18.
- Suleymanov, A., Abakumov, E., Suleymanov, R., Gabbasova, I., & Komissarov, M. (2021). The Soil Nutrient Digital Mapping for Precision Agriculture Cases in the Trans-Ural Steppe Zone of Russia Using Topographic Attributes. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(4), 243.
- Szabó, B., Szatmári, G., Takács, K., Laborczi, A., Makó, A., Rajkai, K., & Pásztor, L. (2019). Mapping soil hydraulic properties using random-forest-based pedotransfer functions and geostatistics. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(6), 2615-2635
- Taghizadeh-Mehrjardi, R., Minasny, B., Sarmadian, F., & Malone, B. P., (2014). Digital mapping of soil salinity in Ardakan region, central Iran. *Geoderma*, 213, 15-28.
- Taghizadeh-Mehrjardi, R., Schmidt, K., Toomanian, N., Heung, B., Behrens, T., Mosavi, A & Scholten, T. (2021). Improving the spatial prediction of soil salinity in arid regions using wavelet transformation and support vector regression models. *Geoderma*, 383, 114793.
- Tang, X., Xia, M., Pérez-Cruzado, C., Guan, F., & Fan, S. (2017). Spatial distribution of soil organic carbon stock in Moso bamboo forests in subtropical China. *Scientific Reports*, 7(1), 1-13.
- Ullah, S., Schlerf, M., Skidmore, A. K., & Hecker, C. (2012). Identifying plant species using mid-wave infrared (2.5–6 μm) and thermal infrared (8–14 μm) emissivity spectra. *Remote Sensing of Environment*, 118, 95-102.
- Verrelst, J., Rivera, J. P., Veroustraete, F., Muñoz-Marí, J., Clevers, J. G., Camps-Valls, G., & Moreno, J. (2015). Experimental Sentinel-2 LAI estimation using parametric, non-parametric and physical retrieval methods—A comparison. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 108, 260-272.
- Vorpahl, P., Elsenbeer, H., Märker, M., & Schröder, B. (2012). How can statistical models help to determine driving factors of landslides *Ecological Modelling*, 239, 27-39?
- Wagner, W., Scipal, K., Pathe, C., Gerten, D., Lucht, W., & Rudolf, B., (2003) Evaluation of the agreement between the first global remotely sensed soil moisture data with model and precipitation data. *J Geophys Res.* <https://doi.org/10.1029/2003JD003663>
- Wang, J., Ding, J., Yu, D., Teng, D., He, B., Chen, X., & Su, F. (2020). Machine learning-based detection of soil salinity in an arid desert region, Northwest China: A comparison between Landsat-8 OLI and Sentinel-2 MSI. *Science of the Total Environment*, 707, 136092.
- Wilding, L. P. (1985). Spatial variability: its documentation, accommodation and implication to soil surveys. In *Soil spatial variability*, Las Vegas NV, 30 November-1 December 1984 (pp. 166-194).
- Zhang, R., Kim, S., & Sharma, A. (2019). A comprehensive validation of the SMAP Enhanced Level-3 Soil Moisture product using ground measurements over varied climates and landscapes. *Remote sensing of environment*, 223, 82-94.
- Zinck, J. A., Metternicht, G., Bocco, G., & Del Valle, H. F. (2016). *Geopedology an Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies*. Berlin: Springer.