



تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۳ | شماره ۲ | اردیبهشت ۱۴۰۱ (ص ۲۶۱-۲۴۵)

DOI: <https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2022.333013.669113>

(مقاله علمی - پژوهشی)

## 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)

MAHIN KHOSRAVI<sup>1</sup>, ALI ASGHAR ZOLFAGHARI<sup>1\*</sup>, SEYED HASAN KABOLI<sup>1</sup>, HEIDAR GHAFARI<sup>2</sup>

1. Department of Arid Lands Management, Faculty of Desert Science; Semnan University, Semnan, Iran.

2. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

(Received: Oct. 26, 2021- Revised: Feb. 23, 2022- Accepted: Feb. 26, 2022)

### ABSTRACT

The soil particle size distribution is one of the most important of soil properties that effect on the soil hydraulic properties, including saturated hydraulic conductivity. Therefore, accurate knowledge of spatial distributon of soil particle size in the watershed is very effective on the optimal management of the watershed. In this study, the spatial distribution of sand, silt and clay particles were predicted in the Damghanrood watershed with a spatial resolution of 30 m at the depths of 0-30, 30-60 cm. For this purpose, 110 soil sampling points were determined using conditional Latin hypercube sampling (cLHS) method. Environmental variables were extracted from Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) satellite and digital elevation model (DEM). The random forest (RF) model was used for determined the relationship between soil particles and environmental variables. The results showed that the coefficient of determination ( $R^2$ ) of the RF model at a depth of 0-30 cm for clay, sand and silt particles with a range of 0.6, 0.52 and 0.71, respectively, and at a depth of 30-60 cm, respectively. It was obtained with 0.69, 0.67 and 0.49. In the surface layer, the auxiliary variables extracted from the remote sensing data and in the deep layer, the variables extracted from the most part were related to the soil particle data. The results showed that the coefficient of determination ( $R^2$ ) of the RF model for prediction clay, sand and silt fractions at depth of 0-30 cm was of 0.6, 0.52 and 0.71, respectively, and at a depth of 30-60 cm, for prediction of these fraction the  $R^2$  value was 0.69, 0.67 and 0.49, respectively. In the surface layer, the auxiliary variables extracted from the remote sensing data were more important variables for prediction of particle fraction but in deep layer, the terrain attributes were the most important variables in prediction of particle size fractions. The values of saturated hydraulic conductivity (Ks) estimated using pedotransfer functions varied between 0.08 to 1 m / day. The lowest amount of Ks was observed in lands with rock outcrops and marl soils. The results showed that the spatial distribution of Ks derived from sand and clay data was well overly with the reality of the region. So that the lowest values of Ks were observed in areas with rock outcrops and in marly soils.

**Key word:** Environmental covariates, Random Forest model, Pedotransfer function

\*Corresponding Author's Email: [azolfaghari@semnan.ac.ir](mailto:azolfaghari@semnan.ac.ir)

## کاربرد نقشه برداری رقومی در پهنه بندی ذرات اولیه و برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به منظور مدیریت بهینه حوزه های آبخیز (مطالعه موردی: حوزه آبخیز دامغان رود)

مهین خسروی<sup>۱</sup>، علی اصغر ذوالفقاری<sup>۱\*</sup>، سید حسن کابلی<sup>۱</sup>، حیدر غفاری<sup>۲</sup>

۱. گروه مدیریت مناطق خشک، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

۲. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۸/۴ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۴ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۲/۷)

### چکیده

توزیع اندازه ذرات اولیه خاک یکی از مهم ترین خصوصیات خاک بوده که بر بسیاری از خصوصیات هیدرولیکی خاک از جمله هدایت هیدرولیکی اشباع، مؤثر است؛ لذا دانش دقیق از نحوه پراکنش اندازه ذرات خاک در حوزه آبخیز بر مدیریت بهینه حوزه آبخیز بسیار تأثیرگذار است. در این مطالعه تغییرات مکانی ذرات شن، سیلت و رس خاک در سطح حوزه آبخیز دامغان رود با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر در عمق ۳۰-۶۰ سانتی متری، ۳۰-۶۰ سانتی متری پیش بینی شد. به این منظور ۱۱۰ نقطه نمونه برداری با استفاده از روش مکعب لاتین تعیین شد و نمونه برداری در دو عمق انجام گرفت. متغیرهای محیطی از تصاویر ماهواره لندست و مدل رقومی ارتفاع (DEM) استخراج شدند. جهت ارتباط بین ذرات خاک و متغیرهای محیطی از مدل RF استفاده شد. نتایج نشان داد که ضریب تبیین مدل RF در عمق ۳۰-۶۰ سانتی متری برای ذرات رس، شن و سیلت با دامنه های به ترتیب برابر با ۰/۶۹، ۰/۵۲ و ۰/۷۱ و در عمق ۳۰-۶۰ سانتی متری به ترتیب برابر با ۰/۶۷، ۰/۴۹ و ۰/۴۹ به دست آمد. در لایه سطحی، متغیرهای کمکی مستخرج از داده های سنجش از دور و در لایه عمقی، متغیرهای مستخرج از DEM بیشترین ارتباط را با داده های ذرات خاک داشتند. مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ( $K_s$ ) برآورد شده با استفاده از توابع انتقالی بین ۰/۰۸ تا ۱ متر در روز متغیر بود، که کمترین مقدار  $K_s$  در اراضی با رخنمون های سنگی و خاک های مارنی مشاهده شد. نتایج نشان داد که پراکنش مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ( $K_s$ ) مشتق شده از داده های شن و رس، به خوبی با واقعیت منطقه همخوانی داشت. به طوری که کمترین مقادیر  $K_s$  در مناطق با رخنمون سنگی و در خاک های مارنی مشاهده شد.

**واژه های کلیدی:** متغیرهای محیطی، مدل جنگل تصادفی، توابع انتقالی.

### مقدمه

توزیع اندازه ذرات اولیه خاک یکی از مهم ترین خصوصیات خاک بوده که بر بسیاری از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک از قبیل نفوذ، هدایت هیدرولیکی، ظرفیت تبادل کاتیونی و میزان مواد آلی خاک مؤثر است (Akpa et al., 2014). از طرف دیگر اطلاعات دقیق درباره نحوه پراکنش مکانی ذرات اولیه خاک (ذرات شن، رس و سیلت) برای مطالعات و برنامه ریزی های حوزه های آبخیز، مدیریت منابع طبیعی و محیط زیست، مدل سازی هیدرولوژیکی، کنترل آلودگی خاک و مدیریت منابع آب ضروری است (Hartemink & McBratny, 2008). به همین علت، نیاز به اطلاعات دقیق درباره نحوه پراکنش ذرات اولیه خاک در لایه های سطحی و عمقی برای مدیریت پایدار حوزه های آبخیز مانند تغییر آب و هوا، تخریب خاک، کمبود منابع آب، آلودگی محیط زیست، کاهش تنوع زیستی و کشاورزی و اکوسیستم پایدار

در مقیاس های محلی، ملی و جهانی افزایش یافته است (Sanchez & Vargas, 2012; McBratney et al., 2009; Montanarella et al., 2014; Liu et al., 2019). سعی کردند که با استفاده از روش های نقشه برداری رقومی خاک، توزیع مکانی ذرات اولیه خاک را در لایه های سطحی و عمقی پیش بینی کنند (Arrouays et al., 2014). از جمله مطالعات انجام شده می توان به (Mulder et al., Adhikari et al., 2013)؛ (2016); (2015); (2016) اشاره کرد. (Ramcharan et al., 2018) توزیع مکانی ذرات خاک را در لایه های سطحی و عمقی با وضوح ۱۰۰ متر با استفاده از مدل جنگل تصادفی پیش بینی نمودند. همچنین در مطالعه ای دیگر، (Liu et al., 2020) نقشه های توزیع اندازه ذرات خاک را در لایه های سطحی و عمقی در مقیاس ملی برای کشور چین تهیه نمودند. علاوه بر این، در مقیاس جهانی، (Hengl et al., 2014) شبکه های سطحی و عمقی

از تغییرات اندازه ذرات خاک را با وضوح ۲۵۰ متر با استفاده از مدل جنگل تصادفی تهیه نمودند. از این نقشه‌ها در بسیاری از مطالعات و مدل‌سازی هیدرولوژیکی در حوزه‌های آبخیز کشور به‌عنوان ورودی‌های مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شوند. استفاده از نقشه‌برداری رقومی خاک برای تهیه نقشه ذرات اولیه خاک در ایران نیز در سال‌های اخیر رواج یافته است. از جمله تحقیقات انجام‌شده در ایران می‌توان به مطالعات Taghizadeh *et al.*, (2016); Jamshidi *et al.*, (2018); Amirian Chakan *et al.*, (2016) اشاره نمود. *al.*, (2016) Pahlon Rad and Akbari Moghadam (2018); Amirian Chakan *et al.*, (2019); Zolfaghari *et al.*, (2019) توزیع اندازه ذرات خاک را به‌منظور بررسی خصوصیات مختلف خاک با استفاده از مدل جنگل تصادفی مورد ارزیابی قرار دادند.

اکثر مطالعات انجام‌شده برای پهنه‌بندی ذرات اولیه خاک با استفاده از نقشه‌برداری رقومی در حوزه‌های آبخیز کشور نبوده است و معمولاً انتخاب مناطق مورد مطالعه بر اساس دسترس بودن منطقه و با وجود داده‌های اندازه‌گیری شده در منطقه مورد مطالعه است. از این‌رو نتایج آن قابل استفاده در مدل‌های هیدرولوژیکی نبوده و برای مدیریت حوزه‌های آبخیز مناسب نیست. در حالی که برای پهنه‌بندی اندازه ذرات خاک در حوزه آبخیز لازم است که پیچیدگی حوزه آبخیز مانند رخنمون‌های سنگی، جهت شیب، محل آبراه اصلی و غیره در نظر گرفته شوند؛ لذا نقشه‌های رقومی تهیه‌شده در حوزه آبخیز، اطلاعات دقیق‌تر و مناسب‌تری را برای کاربرد مناسب مدل‌های هیدرولوژیکی و مدیریت بهتر حوزه‌های آبخیز ارائه می‌کنند. از طرف دیگر ورودی بسیاری از مدل‌های هیدرولوژیکی از قبیل مدل SWAT نقشه خاک است. معمولاً نبود داده‌های خاک سبب می‌شود که محققین هیدرولوژی به فکر استفاده از نقشه‌های جهانی خاک به‌عنوان ورودی برای این مدل‌ها باشند، که این عامل سبب کاهش دقت این مدل‌ها شده و یا در بسیاری از مواقع تفسیر نتایج آن‌ها را در سطح زیر حوزه‌ها نادرست می‌کند. در حالی که به نظر می‌رسد روش نقشه‌برداری رقومی خاک جایگزین مناسبی برای کمبود داده‌های خاک در سطح حوزه‌های آبخیز باشد. اطلاع از پراکنش مکانی ذرات اولیه خاک در حوزه‌های آبخیز شاید به‌تنهایی اهمیت کمی داشته باشد، اما پراکنش مکانی اندازه ذرات اولیه خاک می‌تواند در برآورد بسیاری از پارامترهای فیزیکی حوزه آبخیز که اندازه‌گیری مستقیم آن‌ها دشوار و پرهزینه است، مورد استفاده قرار گیرد. یکی از خصوصیات بسیار مهم حوزه‌های آبخیز، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ( $K_s$ ) بوده که این پارامتر یکی از حساس‌ترین پارامترها در برآورد رواناب حوزه‌های آبخیز است. Farhan and

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری

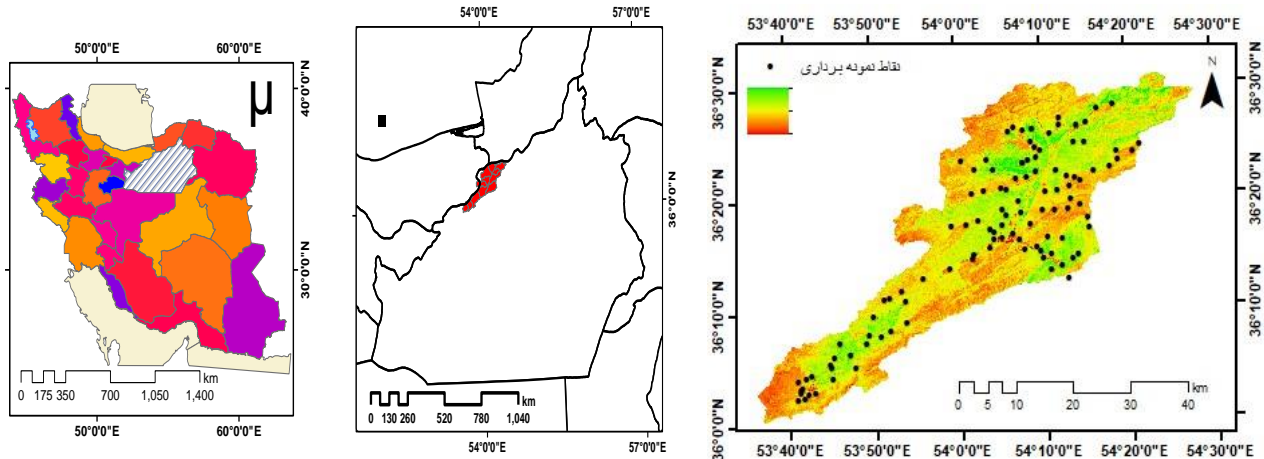
حوزه آبخیز دامغان‌رود در شمال غربی شهرستان دامغان در استان سمنان قرار دارد. حوزه آبخیز مورد مطالعه دارای وسعتی حدود ۱۳۰۰ کیلومتر مربع بوده و در مختصات از "۲۲ °۴۸'۳۶ تا" ۳۶ °۲۱'۳۶ عرض شمالی تا "۵۸ °۲۱'۴۸ تا" ۳۶ °۱۸'۴۹ طول شرقی واقع شده است. بلندترین نقطه حوزه با ارتفاع ۲۸۸۱ متر از سطح دریا در کوه‌های جازنو و پست‌ترین نقطه حوزه با ارتفاع ۱۰۵۰ متر از سطح دریا در محل دشت واقع شده است. متوسط بارندگی حوزه آبخیز حدود ۱۵۰ میلی‌متر و میانگین سالانه دما

از تغییرات اندازه ذرات خاک را با وضوح ۲۵۰ متر با استفاده از مدل جنگل تصادفی تهیه نمودند. از این نقشه‌ها در بسیاری از مطالعات و مدل‌سازی هیدرولوژیکی در حوزه‌های آبخیز کشور به‌عنوان ورودی‌های مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شوند. استفاده از نقشه‌برداری رقومی خاک برای تهیه نقشه ذرات اولیه خاک در ایران نیز در سال‌های اخیر رواج یافته است. از جمله تحقیقات انجام‌شده در ایران می‌توان به مطالعات Taghizadeh *et al.*, (2016); Jamshidi *et al.*, (2018); Amirian Chakan *et al.*, (2016) اشاره نمود. *al.*, (2016) Pahlon Rad and Akbari Moghadam (2018); Amirian Chakan *et al.*, (2019); Zolfaghari *et al.*, (2019) توزیع اندازه ذرات خاک را به‌منظور بررسی خصوصیات مختلف خاک با استفاده از مدل جنگل تصادفی مورد ارزیابی قرار دادند.

اکثر مطالعات انجام‌شده برای پهنه‌بندی ذرات اولیه خاک با استفاده از نقشه‌برداری رقومی در حوزه‌های آبخیز کشور نبوده است و معمولاً انتخاب مناطق مورد مطالعه بر اساس دسترس بودن منطقه و با وجود داده‌های اندازه‌گیری شده در منطقه مورد مطالعه است. از این‌رو نتایج آن قابل استفاده در مدل‌های هیدرولوژیکی نبوده و برای مدیریت حوزه‌های آبخیز مناسب نیست. در حالی که برای پهنه‌بندی اندازه ذرات خاک در حوزه آبخیز لازم است که پیچیدگی حوزه آبخیز مانند رخنمون‌های سنگی، جهت شیب، محل آبراه اصلی و غیره در نظر گرفته شوند؛ لذا نقشه‌های رقومی تهیه‌شده در حوزه آبخیز، اطلاعات دقیق‌تر و مناسب‌تری را برای کاربرد مناسب مدل‌های هیدرولوژیکی و مدیریت بهتر حوزه‌های آبخیز ارائه می‌کنند. از طرف دیگر ورودی بسیاری از مدل‌های هیدرولوژیکی از قبیل مدل SWAT نقشه خاک است. معمولاً نبود داده‌های خاک سبب می‌شود که محققین هیدرولوژی به فکر استفاده از نقشه‌های جهانی خاک به‌عنوان ورودی برای این مدل‌ها باشند، که این عامل سبب کاهش دقت این مدل‌ها شده و یا در بسیاری از مواقع تفسیر نتایج آن‌ها را در سطح زیر حوزه‌ها نادرست می‌کند. در حالی که به نظر می‌رسد روش نقشه‌برداری رقومی خاک جایگزین مناسبی برای کمبود داده‌های خاک در سطح حوزه‌های آبخیز باشد. اطلاع از پراکنش مکانی ذرات اولیه خاک در حوزه‌های آبخیز شاید به‌تنهایی اهمیت کمی داشته باشد، اما پراکنش مکانی اندازه ذرات اولیه خاک می‌تواند در برآورد بسیاری از پارامترهای فیزیکی حوزه آبخیز که اندازه‌گیری مستقیم آن‌ها دشوار و پرهزینه است، مورد استفاده قرار گیرد. یکی از خصوصیات بسیار مهم حوزه‌های آبخیز، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ( $K_s$ ) بوده که این پارامتر یکی از حساس‌ترین پارامترها در برآورد رواناب حوزه‌های آبخیز است. Farhan and

(حدود ۰.۴۱٪) است. از کل سطح مراتع حوزه میزان ۶۶/۵۳ درصد را مراتع ضعیف و فقیر دارای تراکم کم، ۳۱/۴۳ درصد را مراتع متوسط و ۲/۵۴ درصد را مراتع متراکم تشکیل می‌دهد (Rezai Tavabeh, 2015). در شکل (۱) موقعیت حوزه دامغان رود در استان سمنان و ایران نشان داده شده است.

۱۶ درجه سانتی‌گراد است (Javadian, & Nemati, 2018). رسوبات آبرفتی حاصل از فرسایش ارتفاعات آهکی، شیستی، ماسه‌سنگ و مارنی در منطقه سبب تنوع زیاد و پراکنش مکانی پیچیده در اندازه ذرات خاک شده است (Rezai Tavabeh, 2015). از لحاظ کاربری اراضی، بیشترین کاربری حوزه به صورت بوته‌زار



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه در استان سمنان و ایران

سانتی‌متری بر اساس عمق‌های استاندارد در پژوهش‌های نقشه‌برداری رقومی خاک انتخاب شد (Arrouays *et al.*, 2014; Mousavi *et al.*, 2021). درصد ذرات شن، رس و سیلت با استفاده از روش هیدرومتر و روش الک تعیین شدند (Gee and Bauder, 1986)، به‌گونه‌ای که برای تعیین دقیق ذرات شن از روش الک و ذرات رس و سیلت از روش هیدرومتر استفاده شد.

#### متغیرهای محیطی

در این مطالعه، بر اساس مفاهیم روش اسکورپن<sup>۷</sup> (McBratney *et al.*, 2003)، از داده‌های سنجش‌ازدور (RS)، DEM و متغیرهای مستخرج از آن به‌عنوان متغیرهای محیطی در پیش‌بینی ذرات شن، رس و سیلت استفاده شد. داده‌های سنجش‌ازدور با استفاده از سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ به‌دست‌آمدند. از آنجایی که ممکن است اطلاعات یک تصویر که در یک‌زمان مشخص از منطقه تهیه شده است به خصوصیات دینامیک از قبیل بارش روزهای گذشته، رطوبت خاک، دما، پوشش گیاهی و غیره در زمان تصویربرداری بستگی داشته باشد، لذا در برآورد خصوصیات پایدار خاک مانند ذرات اولیه بهتر است که از میانه و یا میانگین تصاویری که در بازه‌های زمانی مشخص و در سال‌های متوالی از منطقه به دست آمده‌اند، برای یافتن رابطه بین خصوصیات خاک

در این مطالعه از روش نمونه‌برداری مکعب لاتین<sup>۱</sup> (Minasny and McBratney, 2006) برای تعیین نقاط نمونه‌برداری استفاده شد. برای اجرا و تعیین نقاط نمونه‌برداری از باندهای و شاخص‌های تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ شامل؛ طیف باندهای مرئی (باند ۲، باند ۳)، مادون قرمز کوتاه<sup>۴</sup> (باند ۶) و شاخص پوشش گیاهی نرمال<sup>۵</sup> (NDVI) و خصوصیات حاصل از مدل رقومی ارتفاع از قبیل نقشه رقومی ارتفاع (DEM)، شیب (Slop) و شاخص همواری دره با درجه تفکیک بالا<sup>۶</sup> (MRVBF)، به‌عنوان متغیرهای ورودی در برنامه مکعب لاتین استفاده گردید (Babaei *et al.*, 2018; Raeesi *et al.*, 2019). با استفاده از روش مذکور تعداد ۱۱۰ نقطه نمونه‌برداری انتخاب و نمونه‌برداری از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر و ۳۰-۶۰ سانتی‌متری انجام شد (شکل ۱). بررسی میدانی منطقه مورد مطالعه نشان داد که عمق خاک در بسیاری از مناطق حوزه آبخیز محدود و بین صفر تا ۳۰ سانتی‌متر متغیر است، همچنین در بسیاری از مناطق تکامل پروفیل خاک اندک و خصوصیات مورفولوژیکی خاک در عمق ۰-۱۵ و ۳۰-۱۵ سانتی‌متری خاک‌ها یکسان بود؛ بنابراین تفاوت معنی‌داری در خصوصیات خاک‌ها در لایه‌های سطحی مشاهده نشد؛ بنابراین باتوجه به بررسی‌های میدانی عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری به‌عنوان عمق سطحی خاک در نظر گرفته شد. همچنین عمق ۳۰-۶۰

5- Normalized Difference Vegetation Index  
6 - Multi Resolution Valley Bottom Flatness  
7-scorpan

1- conditional Latin hypercube  
2- B2  
3- B3  
4- B6

که شامل باند تصاویر (باندهای مرئی (باند ۲، ۳ و ۴)، مادون قرمز نزدیک (باند ۵)، مادون قرمز کوتاه (باند ۶ و ۷)، شاخص‌های مستخرج از تصاویر از قبیل شاخص پوشش گیاهی نرمال شده، شاخص نسبت پوشش گیاهی و متغیرهای مستخرج از DEM از قبیل شیب، ارتفاع، شاخص خیسی با تفکیک مکانی  $30 \times 30$  متر را نشان داده شده است.

و تصاویر استفاده شود؛ لذا در این مطالعه به منظور یافتن ارتباط بهتر بین داده‌های حاصل از دورسنجی ذرات شن و رس و سیلت از میانه تصاویر مربوط به ماه‌های فروردین، اردیبهشت، خرداد و تیرماه پنج سال اخیر به‌عنوان متغیرهای کمکی استفاده شد. پردازش تصاویر و محاسبه شاخص‌ها در پلت فرم گوگل ارث انجین<sup>۱</sup> انجام و میانه تصاویر داندود و مورداستفاده قرار گرفت. جدول (۱) زنجیره متغیرهای محیطی استفاده شده در این مطالعه

جدول ۱- متغیرهای محیطی مورداستفاده برای پیش‌بینی ذرات خاک

متغیرهای محیطی	علامت اختصاری	نوع شاخص
فرمول		
(عرض باند = $0.45 - 0.515$ میکرون)	باند ۲ ماهواره لندست (B2)	مقدار بازتاب دهنده باند ۲ (آبی قابل مشاهده)
(عرض باند = $0.6 - 0.675$ میکرون)	باند ۳ ماهواره لندست (B3)	مقدار بازتاب دهنده باند ۳ (سبز مرئی)
(عرض باند = $0.63 - 0.68$ میکرون)	باند ۴ ماهواره لندست (B4)	مقدار بازتاب دهنده باند ۴ (قرمز مرئی)
(مادون قرمز نزدیک) (عرض باند = $0.845 - 0.885$ میکرون)	باند ۵ ماهواره لندست (B5)	مقدار بازتاب دهنده باند ۵ (مادون قرمز نزدیک)
(طول موج کوتاه مادون قرمز - ۱) (عرض باند = $1.66 - 1.66$ میکرومتر)	باند ۶ ماهواره لندست (B6)	مقدار بازتاب دهنده باند ۶
(طول موج کوتاه مادون قرمز ۲) (عرض باند = $2.1 - 2.3$ $\mu\text{m}$ )	باند ۷ ماهواره لندست (B7)	مقدار بازتاب دهنده باند ۷
شاخص‌های طیفی	شاخص‌های طیفی	شاخص‌های طیفی
(مادون قرمز نزدیک - قرمز) / (مادون قرمز نزدیک + قرمز)	(NDVI)	شاخص پوشش گیاهی نرمال شده <sup>۲</sup>
(مادون قرمز نزدیک / قرمز)	(RVI)	شاخص نسبت پوشش گیاهی <sup>۳</sup>
(کوتاه موج IR-1 / IR-2 موج کوتاه)	(CI)	شاخص خاک رس <sup>۴</sup>
(قرمز) / (سبز)	(CrI)	شاخص کربنات <sup>۵</sup>
(قرمز) + ۲ (مادون قرمز نزدیک) ۲، ۵،	(BI)	شاخص روشنایی <sup>۶</sup>
(مادون قرمز کوتاه IR-1) / (مادون قرمز کوتاه IR-1 + مادون قرمز نزدیک)	(IN)	شاخص شدت <sup>۷</sup>
(IR-2 موج کوتاه IR-1 - موج کوتاه) / (کوتاه موج IR-2 + IR-1 موج کوتاه)	(NDSI)	شاخص شوری نرمال شده <sup>۸</sup>
(قرمز - به مادون قرمز نزدیک) / (قرمز + مادون قرمز نزدیک)	(SI)	شاخص شوری <sup>۹</sup>
(مادون قرمز نزدیک - قرمز) / (مادون قرمز نزدیک + قرمز)	(SAVI)	شاخص گیاهی تعدیل‌کننده اثر خاک
شاخص‌های مستخرج از DEM	شاخص‌های مستخرج از DEM	شاخص‌های مستخرج از DEM
شاخص‌های مستخرج از DEM	(AS)	جنبه (جهت)
شاخص‌های مستخرج از DEM	(CA)	حوزه آبریز
شاخص‌های مستخرج از DEM	(CI)	شاخص همگرایی
شاخص‌های مستخرج از DEM	(DEM)	نقشه رقومی ارتفاع
شاخص‌های مستخرج از DEM	(FA)	جریان تجمعی
شاخص‌های مستخرج از DEM	(S.L F)	طول شیب
شاخص‌های مستخرج از DEM	(MSP)	شیب میانی حوزه
شاخص‌های مستخرج از DEM	(MRVBF)	همواری دره با درجه تفکیک بالا
شاخص‌های مستخرج از DEM	(PLC)	انحنای خطوط توپوگرافی
شاخص‌های مستخرج از DEM	(RSP)	موقعیت نسبی شیب
شاخص‌های مستخرج از DEM	(SL)	شیب
شاخص‌های مستخرج از DEM	(TWi)	خیسی توپوگرافی
شاخص‌های مستخرج از DEM	(VD)	عمق دره
شاخص‌های مستخرج از DEM	(WE)	اثر باد

ذرات شن، رس و سیلت و توزیع مکانی اندازه ذرات خاک باتوجه به متغیرهای محیطی استفاده شد. مدل RF یک الگوریتم ماشین یادگیری ناپارامتری است. این الگوریتم می‌تواند روابط پیچیده

### مدل جنگل تصادفی

در این مطالعه الگوریتم یادگیری جنگل تصادفی<sup>۱۰</sup> (RF) (Breiman, 2001) در مرحله داده‌کاوی و مدل‌سازی و برآورد

6 - Brightness Index (BI)

7 - Intensity Index (IN)

8 - Normalized Difference Salinity iIndex (NDSI)

9 - Gypsum Index (GI)

10-Random Forest

1-Google Earth Engine

2 - Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

3 - Ratio Vegetation Index (RVI)

4 - Clay Index (CI)

5 - Carbonate Index (CrI)

Brungard *et al.* (2018) و متغیرهای محیطی را به خوبی تعیین کند (Brungard *et al.*, 2015; Hengl *et al.*, 2015; Nussbaum *et al.*, 2018). این مدل درختان در چندین طبقه دسته‌بندی می‌شوند و همه دسته‌ها در حداکثر اندازه خود رشد می‌کنند. هر درخت بر اساس زیرمجموعه‌ای تصادفی از داده‌ها آموزش داده می‌شوند. به عبارت دیگر در این مدل از تمام داده‌های موجود برای بررسی دقت مدل استفاده می‌شود. در این مطالعه ابتدا داده‌ها به سه گروه تقسیم شدند سپس در هر بار اجرای مدل یک گروه (حدود ۳۰٪ داده‌ها) به عنوان داده آزمون و دو گروه دیگر داده‌ها (حدود ۷۰٪ داده‌ها) برای آموزش استفاده شد؛ بنابراین، بر اساس روش مذکور تمامی داده‌ها به عنوان داده آزمون مورد ارزیابی قرار گرفتند. در این مطالعه از الگوریتم مدل جنگل تصادفی آموزش دیده با متغیرهای محیطی، برای هر دو عمق ذرات خاک استفاده شد. در نتیجه نقشه‌هایی با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر در محیط R و با استفاده از پکیج caret برای ذرات شن، سیلت و رس در عمق‌های ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متر تهیه شد.

**برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک**

مطالعات انجام شده نشان داده که روش‌های معمول برای تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک مانند روش‌های میدانی و آزمایشگاهی به علت دشواری، زمان‌بر و هزینه بالا در سطح حوزه‌های آبخیز قابل استفاده نمی‌باشند (Gutmann and Small, 2003; Soet and Stricker, 2007). از طرف دیگر روش‌های مختلف در اندازه‌گیری  $K_s$  سبب به دست آمدن نتایج متفاوتی در مقدار  $K_s$  می‌شوند. همچنین تغییرات زیاد  $K_s$  در حوزه آبخیز سبب می‌شود، که استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده  $K_s$  سبب افزایش معنی‌داری در دقت برآورد رواناب نشده و معمولاً در مرحله بهینه شدن مدل‌های مقادیر نهایی  $K_s$ ، با مقادیر اندازه‌گیری تفاوت بسیار زیادی دارند (Picciafuoc *et al.*, 2019)؛ لذا در مدیریت حوزه آبخیز برای پهنه‌بندی  $K_s$  دو رویکرد متفاوت وجود دارد. در رویکرد اول  $K_s$  مستقیماً اندازه‌گیری شده و سپس با استفاده از روش‌های زمین آمار یا نقشه‌برداری رقومی خاک این خصوصیت پهنه‌بندی می‌شود (Ferrer-Julia *et al.*, 2021). در رویکرد دوم در ابتدا نقشه خصوصیات خاک تهیه شده و سپس با استفاده از توابع انتقالی هدایت هیدرولیکی خاک برآورد می‌شود. اکثر مطالعات انجام شده در سطح حوزه آبخیز از رویکرد دوم برای برآورد هدایت هیدرولیکی خاک استفاده می‌کنند. به عنوان مثال Backaer و Trineh *et al.*, (2018)؛ Picciafuoc *et al.*, (2019)

*et al.*, (2018) نشان دادند استفاده از توابع انتقالی نسبت به اندازه‌گیری مستقیم  $K_s$  نتایج بهتری را برای پهنه‌بندی  $K_s$  در حوزه‌های آبخیز ارائه می‌دهد. یکی از پرکاربردترین توابع انتقالی در برآورد  $K_s$  توابع انتقالی ارائه شده توسط Cosby *et al.*, 1984 می‌باشد. با توجه به این که برای توسعه این توابع، از تعداد ۱۴۴۸ نمونه خاک با پراکنش وسیعی از خصوصیات استفاده شده است. بررسی مطالعات گذشته نیز نشان داده است که این توابع بالاترین دقت را در بین توابع انتقالی معادله محور دارند. به طوری که ضریب تبیین برآورد  $K_s$  با استفاده از توابع مذکور بین ۰/۸۳ تا ۰/۸۷ گزارش شده است (Baker *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2019). از طرف دیگر این توابع فقط به مقادیر شن و رس برای برآورد  $K_s$  خاک نیاز دارند که در بسیاری از حوزه‌های آبخیز کشور این اطلاعات در دسترس بوده و یا قابل برآورد توسط نقشه‌برداری رقومی خاک می‌باشند. به همین علت توابع مذکور به وفور در مدل‌های گردش عمومی<sup>۱</sup> (GCM) و مدل‌های زمین<sup>۲</sup> (CLM) برای برآورد  $K_s$  مورد استفاده قرار می‌گیرند (Chen and Dudhia, 2001; Kowalczyk *et al.*, 2003; Dai *et al.*, 2006; Niu *et al.*, 2011; Oleson *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2019). موارد ذکر شده در بالا، در این مطالعه از معادلات ارائه شده توسط Cosby *et al.*, 1984 (روابط ۱ و ۲) برای برآورد  $K_s$  استفاده شد.

$$K_s = 60 \cdot 96 \cdot 10^{0.0153 \cdot \text{sand} \cdot 0.884} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$K_s = 60 \cdot 96 \cdot 10^{0.0126 \cdot \text{sand} - 0.0064 \cdot \text{clay} - 0.6} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در این معادلات sand و clay درصد شن و رس و  $K_s$  هدایت هیدرولیکی اشباع خاک بر حسب متر در روز است.

#### ارزیابی عملکرد مدل RF

برای ارزیابی عملکرد مدل RF برای هر بخش از ذرات خاک (شن، سیلت و رس) در هر دو عمق (۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متر) از آماره‌های ضریب تبیین<sup>۳</sup> ( $R^2$ ) و ریشه دوم میانگین مربعات خطا<sup>۴</sup> (RMSE)، میانگین خطای مطلق<sup>۵</sup> (MAE) و میانگین خطا<sup>۶</sup> (ME) استفاده گردید که روابط ریاضی آن‌ها به شکل زیر است:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)(P_i - \bar{P}_i)]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$\quad (\text{رابطه ۴})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$$

$$\quad (\text{رابطه ۵})$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i|$$

3 -Coefficient of determination

4 - Root Mean Square Error (RMSE)

5 -Mean Absolute Error (MAE)

6- Mean Error (ME)

1-general circulation models

2 Community Land Model



Amirian Chakan *et al.*, در جریان مواد را تحت تأثیر قرار می‌دهند. (2016); Taghizadeh *et al.*, (2014); Greve *et al.*, (2012) Mehrjerdi نتایج مشابهی را گزارش نمودند.

در لایه عمقی خاک همبستگی کمی بین باندها و شاخص‌های حاصل از تصاویر با ذرات اولیه خاک به دست آمد. بیشتر متغیرهای مؤثر در این لایه، شاخص‌های مستخرج از DEM بودند که این می‌تواند به دلیل تغییرپذیری کم متغیرهای مستخرج از DEM در لایه عمقی خاک و تغییرپذیری بالای باندها و شاخص‌های تصاویر در این لایه باشد. در واقع، در لایه عمقی خاک عوامل مرتبط با نقشه رقومی ارتفاع و موقعیت توپوگرافی منطقه تقریباً پایدار بوده و کمتر تحت تأثیر عوامل محیطی قرار دارند. از این رو همبستگی بالایی را با ذرات خاک در لایه عمقی نشان دادند.

مهم‌ترین متغیرهای محیطی در لایه عمقی، باند ۳ و ۵، DEM و متوسط شیب نقاط بودند. بیشترین همبستگی بین ذرات مربوط به ذرات سیلت با باندهای ۳ و ۵ تصاویر لندست بود. ذرات شن با باندهای ۳ و ۵ ارتباط منفی نشان داد. ذرات رس خاک با هیچ‌کدام از شاخص‌ها و باندها ارتباط معنی‌داری را نشان ندادند. مؤثرترین متغیر در تعیین رس خاک در لایه عمقی DEM بود. (جدول ۳). در مطالعه‌ای Liu *et al.*, (2020) گزارش دادند باند ۵، مهم‌ترین متغیر محیطی و ضخامت خاک دومین متغیر محیطی مهم در تعیین توزیع اندازه ذرات خاک در لایه عمقی است.

در این لایه DEM در درجه اول و شاخص‌های شیب میانی حوزه<sup>۳</sup> (MSP)، موقعیت نسبی شیب حوزه<sup>۴</sup> (RSP)، جهت شیب و انحنای طرح<sup>۵</sup> (PLC) در درجه دوم اهمیت قرار گرفتند. باتوجه به نتایج می‌توان استنباط نمود که قدرت تفکیک مدل رقومی ارتفاع، موقعیت جغرافیایی، مواد مادری و زمین‌نما تأثیر زیادی روی تفکیک‌پذیری ذرات خاک در لایه عمقی خاک داشته است. Amirian Chakan *et al.*, (2018) در تعیین بافت خاک در لایه‌های سطحی و عمقی خاک نتایج مشابهی را به دست آوردند. نتایج این مطالعه نشان داد که در لایه سطحی اهمیت باندها و شاخص‌های تصاویر در تفکیک ذرات خاک بیشتر بوده است. در حالی که در لایه عمقی خصوصیات توپوگرافی حوزه آبخیز و مواد مادری نقش تعیین‌کننده‌ای در تفکیک ذرات خاک داشته است.

### بررسی همبستگی بین ذرات خاک و متغیرهای کمکی

به‌منظور شناسایی روابط بین ذرات خاک با متغیرهای کمکی از ضریب همبستگی استفاده شد. نتایج نشان داد در لایه سطحی مؤثرترین متغیرهای در برآورد ذرات خاک، باند ۲، شاخص روشنایی<sup>۱</sup> (BI) و MRVBF و شاخص مساحت حوزه آبریز<sup>۲</sup> (CA) بود. ارتباط معنی‌داری بین ذرات شن و رس با باند ۲، ۳ و ۴ تصاویر لندست به دست آمد، این ارتباط برای باند ۲ با ذرات شن مثبت بود. در حالی که ذرات رس همبستگی منفی با این باند داشتند. همچنین باندهای ۳ و ۴ با ذرات شن ارتباط معکوس و با ذرات رس ارتباط مستقیمی را نشان دادند که این می‌تواند به دلیل وجود ظرفیت رطوبتی بالاتر ذرات رس نسبت به ذرات شن و بازتابش طیفی کمتر ذرات رس در برخی از باندها نسبت به ذرات شن باشد؛ که باعث ایجاد رابطه معکوس تعدادی از باندها با ذرات رس و رابطه مستقیم تعدادی از باندها با ذرات شن شده است. نتایج مشابهی در بررسی توزیع اندازه ذرات خاک توسط Zolfaghari *et al.*, (2019) به دست آمد. ذرات سیلت خاک ارتباط معکوسی را با باند ۲ ماهواره لندست نشان دادند. ارتباط معنی‌دار بین باندها و ذرات خاک می‌تواند مؤید تأثیر بالای باندها در تفکیک ذرات خاک باشد (Amirian Chakan *et al.*, 2016). در لایه سطحی ذرات رس بیشترین همبستگی را با شاخص روشنایی BI و اختلاف شوری طبیعی NDSI داشتند که می‌تواند با ظرفیت رطوبتی بالای ذرات رس مرتبط باشد. Ziaee *et al.*, (2014) گزارش دادند که کلئیدهای رسی موجود در خاک‌های رسی به سبب ظرفیت رطوبت بالای که دارند در محدوده شاخص روشنایی (محدوده طیفی قرمز و مادون قرمز نزدیک) افت شدید انعکاس دارند که این می‌تواند باعث همبستگی این شاخص‌ها با ذرات رس شده باشد. Zolfaghari *et al.*, (2019) نتایج مشابهی از وجود همبستگی بین ذرات رس و شاخص BI گزارش نمودند. از شاخص‌های وابسته به DEM، شاخص همواری دره با درجه تفکیک بالا (MRVBF) در درجه اول و شاخص CA در درجه دوم، بر روی پیش‌بینی توزیع اندازه ذرات خاک تأثیر داشته‌اند. ارتباط بین ذرات خاک با شاخص‌های مستخرج از DEM می‌تواند مؤید این مطلب باشد که در این منطقه، زمین‌نما (پستی و بلندی) از فاکتورهای مؤثر در توزیع اندازه ذرات خاک بوده است. این فاکتور با تأثیر بروی تابش خورشیدی، درجه حرارت و رطوبت،



جدول ۳- همبستگی بین باندها و شاخص‌های تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های مستخرج از DEM

متغیرهای کمکی	لایه سطحی خاک			لایه عمقی خاک		
	رس	سیلت	شن	رس	سیلت	شن
باند ۲ ماهواره لندست (B2)	۰/۴۳*	-۰/۳۲*	-۰/۴۳*	-۰/۱۶	۰/۲۶*	-۰/۰۳۵
باند ۳ ماهواره لندست (B3)	-۰/۱۵*	۰/۰۸۹	۰/۱۶*	-۰/۱۹*	۰/۲۷*	-۰/۰۰۷۲
باند ۴ ماهواره لندست (B4)	-۰/۱۶*	۰/۰۸۸	۰/۱۸*	-۰/۱۶	۰/۲۶*	-۰/۰۴۷
باند ۵ ماهواره لندست (B5)	۰/۱	۰/۰۱۷	۰/۱۴	۰/۱۹*	۰/۲۸*	-۰/۰۰۹
باند ۶ ماهواره لندست (B6)	-۰/۰۷۴	۰/۰۰۹	۰/۱۱	-۰/۱۵	۰/۲۴*	-۰/۰۲۵
باند ۷ ماهواره لندست (B7)	-۰/۰۷۴	۰/۰۱۲	۰/۱۱	-۰/۱۴	۰/۲۵*	-۰/۰۵۰۳
شاخص پوشش گیاهی عادی شده (VSSI)	-۰/۰۶۷	۰/۰۰۶	۰/۱۲	۰/۱۷	-۰/۲۷*	۰/۰۳۰۶
شاخص پوشش گیاهی (NDVI)	۰/۱۱	-۰/۱۲۸	-۰/۰۶۸	-۰/۰۴۳	-۰/۰۳۶۳	۰/۱۰۵
شاخص خاک رس (CI)	۰/۰۶۷	۰/۰۰۶	-۰/۱۲	-۰/۱۶	۰/۱۹	۰/۰۴۳
شاخص کربنات (CH)	-۰/۰۸۶	۰/۰۱۴	۰/۱۲	۰/۱۶	-۰/۱۹۵	-۰/۰۴۰۴
شاخص روشنایی (BI)	-۰/۱۲	۰/۰۴۵	۰/۱۶*	-۰/۱۸	۰/۲۷*	-۰/۰۲۴
شاخص شدت (IN)	-۰/۰۳۸	۰/۰۲۳	۰/۰۲۹	-۰/۱۷	۰/۲۷*	-۰/۰۳۲
شوری اختلاف طبیعی (NDSI)	۰/۱۱	۰/۱۲	-۰/۱۳*	۰/۰۴۳	۰/۰۳۶۳	-۰/۱۰۵
شاخص شوری (SI <sub>4</sub> )	-۰/۰۶۷	۰/۰۰۶	-۰/۱۲	-۰/۱۴	۰/۲۵*	-۰/۰۵۵
شاخص گیاهی تعدیل‌کننده اثر خاک (SAVI)	۰/۰۷۴	-۰/۰۰۱	-۰/۱۱	-۰/۰۴۳	-۰/۰۳۶۳	۰/۱۰۵
(AS)	۰/۱۰۷	۰/۰۵۶	۰/۱۲۳	۰/۰۹۸	۰/۰۳۸۳	-۰/۱۹*
(CA)	۰/۱۶*	-۰/۰۷	-۰/۲۱۸*	۰/۱۲	-۰/۰۳۶۵	-۰/۱۶
(DEM)	-۰/۱۱۴	۰/۰۳۲	۰/۱۵۶	-۰/۲۱	-۰/۰۴۹۵	۰/۳۸*
(FA)	-۰/۱۲۹	-۰/۰۱۰۳	۰/۲۵*	-۰/۱۲	-۰/۰۵۷۸	-۰/۱۴
(S.L.F)	-۰/۰۴۹	۰/۱۴	۰/۰۶۹	-۰/۰۴۶	-۰/۰۶۸۹	۰/۱۶
(MSP)	-۰/۰۱۶۷	-۰/۰۱۵۱	۰/۰۵۳	۰/۲۷*	-۰/۱۲	-۰/۲۶*
(MRVBF)	۰/۲۵*	-۰/۱۵	-۰/۳۰*	۰/۰۳۹	۰/۰۸۲۱	-۰/۱۶۳
(PLC)	۰/۲۵۸	۰/۰۳۴	-۰/۰۶۱	-۰/۲۲*	۰/۱۴	۰/۱۷*
(RSP)	۰/۰۱۴۲	-۰/۰۲۴	-۰/۰۴۶	-۰/۱۷*	۰/۰۵۱	۰/۲
(SL)	۰/۰۴۰۱	۰/۰۱۲	۰/۱۴	-۰/۰۷۲	-۰/۰۳۱	۰/۱۶۲
(TWi)	-۰/۰۹۷	-۰/۰۴۰	۰/۰۱۶	۰/۰۳۹	۰/۰۵۴	-۰/۱۴
(VD)	۰/۰۱۶۶	۰/۱۰۴	-۰/۰۲۹	۰/۰۴۳	-۰/۰۵۷	۰/۱۵
(WE)	-۰/۰۴۳	-۰/۰۰۶	-۰/۰۷۶	۰/۰۸۶	-۰/۰۳۸	-۰/۱۲

## توزیع مکانی اندازه ذرات خاک

نتایج الگوی توزیع مکانی ذرات خاک در لایه‌های سطحی و عمقی با استفاده از مدل RF به صورت شش نقشه برای هر یک از ذرات خاک تهیه گردید. در شکل (۳) الگوی توزیع مکانی مقادیر ذرات رس، سیلت و شن در لایه سطحی و عمقی خاک نشان داده شده است. پیش‌بینی الگوی توزیع مکانی ذرات رس، شن و سیلت در لایه‌های سطحی و عمقی خاک نشان داد که الگوهای توزیع مکانی ذرات شن و سیلت در لایه‌های سطحی و عمقی خاک مشابه بودند، اما الگوی توزیع مکانی ذرات رس ناهمگن بود. به‌طور کلی در لایه سطحی، بیشترین مقدار ذرات رس در شمال و شمال شرقی منطقه مشاهده شد که منطبق بر اراضی رسی و مارنی در منطقه مورد مطالعه هستند و کمترین مقدار ذرات رس در نواحی مرکزی و غربی که بر مناطق کوهستانی و مراتع فقیر منطبق بودند، مشاهده گردید (شکل‌های ۳ و ۴). مقادیر ذرات سیلت در کل حوزه به صورت پراکنده پیش‌بینی شد که می‌تواند به دلیل

رسوبات لسی باشد که به طور گسترده در سطح حوزه آبخیز توزیع شده‌اند. الگوی توزیع مکانی ذرات شن در منطقه مورد مطالعه مخالف الگوی توزیع مکانی ذرات رس بود به عبارت دیگر مقادیر زیاد ذرات شن با مقدار کم ذرات رس مطابقت داشت و برعکس، بیشترین مقدار ذرات شن در بخش شمال، مرکز، غرب و جنوب حوزه مشاهده شد. مقادیر شن با توجه به کوهستانی بودن مناطق شمالی و سطوح فرسایش یافته و برون‌زدگی‌های سنگی و اراضی کلوت موجود در مناطق غربی قابل انتظار بود. از مرکز حوزه به سمت جنوب در طول مسیر آبراهه مقادیر شن بیشتری نسبت به مناطق اطراف مشاهده شد. کمترین مقدار ذرات شن بر اراضی مناطق شرقی با کاربری جنگل و مراتع متراکم منطبق بود. این مناطق دارای مقادیر بالای از ذرات سیلت و رس بودند.

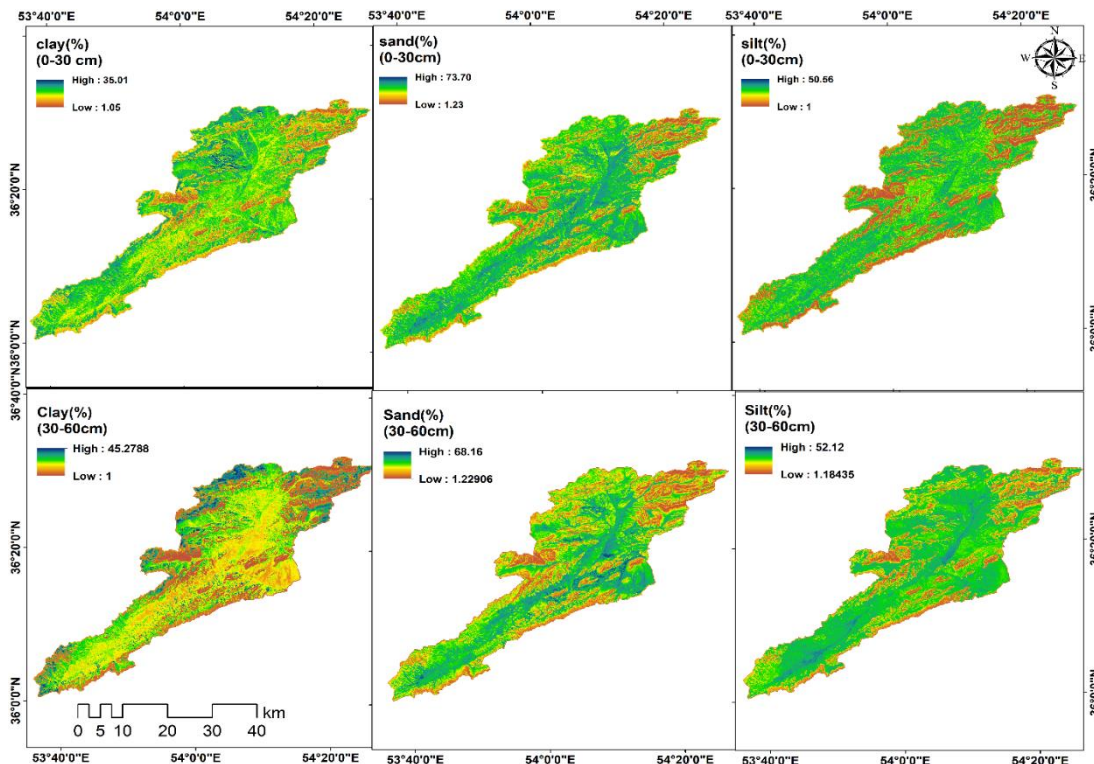
در لایه عمقی خاک، بیشترین مقدار ذرات رس در مناطق شمالی، برخی از مناطق مرکزی و جنوبی حوزه پیش‌بینی شد که بر اراضی با سازندهای مارنی و رسی منطبق بودند. از طرف دیگر

۰/۴۶ (Ramcharan *et al.*, 2018)، در فرانسه بین ۰/۴۴ تا ۰/۱۹ (Liu *et al.*, 2016) در چین بین ۰/۵۰ تا ۰/۴۳ (Mulder *et al.*, 2020) و در ایران بین ۰/۷۲ تا ۰/۴۰ (Amirian Chakan *et al.*, 2018) بود. تفاوت مقادیر  $R^2$  احتمالاً می‌تواند ناشی از اندازه منطقه مورد مطالعه باشد. در بسیاری از مطالعات، منطقه مورد مطالعه کل کشور و یا مناطق بزرگی است. این نتایج نشان می‌دهد که مدل RF به خوبی توانسته ذرات رس، شن و سیلت خاک را در لایه‌های سطحی و عمقی خاک پیش‌بینی کند. مقادیر بالای  $R^2$  به دست آمده در این مطالعه نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل در پیش‌بینی توزیع اندازه ذرات خاک در لایه‌های سطحی و عمقی خاک بود که این می‌تواند ناشی از تعداد و پراکندگی مناسب نمونه‌های برداشته شده در سطح حوزه آبخیز باشد. از طرف دیگر نتایج نشان داد که مدل برای ذرات رس و شن در عمق ۳۰-۶۰ سانتی‌متری عملکرد بهتری نسبت به عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری با مقادیر  $R^2$  بزرگ‌تر داشته است. در حالی که عملکرد مدل برای سیلت خاک در لایه سطحی بهتر از لایه عمقی بوده است. افزایش دقت پیش‌بینی با افزایش عمق برای ذرات رس ممکن است ناشی از وجود سازندهای رسی در منطقه مطالعاتی باشد که سبب کاهش تغییرپذیری و افزایش مقادیر رس خاک به سمت لایه عمقی شده است. افزایش دقت مدل برای پیش‌بینی شن در لایه عمقی خاک نسبت به لایه سطحی خاک را می‌توان به تغییرات کمتر مقادیر شن در لایه عمقی نسبت به لایه سطحی خاک مرتبط دانست. همچنین همبستگی مناسب بین متغیرهای مستخرج از DEM و ذرات شن در لایه عمقی خاک سبب شد، که دقت برآورد ذرات شن در لایه عمقی خاک افزایش یابد. کاهش دقت مدل با افزایش عمق برای ذرات سیلت را می‌توان به کاهش ارتباط بین متغیرهای محیطی و ذرات سیلت خاک مرتبط دانست به طوری که بسیاری از متغیرهای محیطی قادر به توصیف پراکنش سیلت در لایه عمقی خاک نمی‌باشند. مطالعات برخی محققان نیز نشان داده است که با افزایش عمق خاک، دقت مدل در پیش‌بینی برخی از خصوصیات خاک کاهش پیدا می‌کند که می‌تواند به این دلیل باشد که لایه عمقی نسبت به لایه سطحی خاک کمتر تحت تأثیر عوامل محیطی خاک‌ساز قرار دارد. از این رو تکامل کمتری داشته است (Minasny *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2013; Kempen *et al.*, 2014; Rossel *et al.*, 2015) به طور کلی، مقادیر ME برای هر سه بخش از ذرات خاک بسیار نزدیک به صفر برآورد شد که نشان‌دهنده نوسان کم مدل در برآورد توزیع اندازه ذرات خاک نسبت به مقادیر مشاهداتی در دو لایه سطحی و عمقی خاک است.

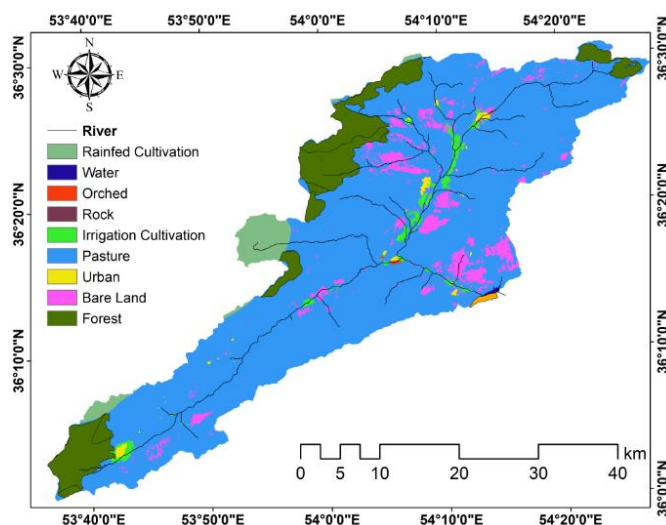
مقادیر حداکثر شن با نواحی کوهستانی و سطوح فرسایش یافته منطبق و در نزدیک آبراهه اصلی حوزه آبخیز منطبق بودند (شکل‌های ۳ و ۴). باتوجه به شرایط توپوگرافی حوزه این انتظار وجود داشت که در برخی از مناطق شرقی و شمالی منطقه که بیشتر بر مناطق کوهستانی و برون‌زدگی‌های سنگی و اراضی فرسایش یافته منطبق است، تکامل خاک کمتر، ذرات خاک درشت‌تر و مقادیر بالای شن مشاهده شود و در مناطق مسطح جنوبی که عمدتاً منطبق بر زمین‌های کشاورزی و اراضی مرتعی با سازندهای ماری است، ذرات خاک ریزتر و مقادیر بالای رس وجود داشته باشد. (Ungaro *et al.*, 2008) و (Amirian Chakan *et al.*, 2016) نشان دادند که بین اندازه ذرات خاک و واحد زمین‌نما ارتباط زیادی وجود دارد. هرچه مقدار فاصله از کوهستان‌های اطراف کمتر باشد، مقدار شن بیشتر و با افزایش فاصله از کوهستان‌ها به دلیل انتقال بیشتر ذرات ریزتر، مقدار رس بیشتر می‌شود. مقایسه نقشه‌های اندازه ذرات خاک در لایه‌های سطحی و عمقی نشان داد که در مرکز و در شمال شرق منطقه مورد مطالعه مقادیر ذرات رس با افزایش عمق کاهش یافته که علت این نتایج وجود سازندهای ماری در قسمت‌های ذکر شده در حوزه آبخیز باشد. همچنین در همین مناطق مقادیر ذرات شن خاک در لایه‌های عمقی خاک به نسبت لایه سطحی افزایش می‌یابد. در هر دو عمق مورد مطالعه بالاترین مقدار سیلت در نواحی مرکزی و در اطراف آبراهه اصلی مشاهده شد که وجود سیلت زیاد در این مناطق را می‌تواند با سازندهای لسی منطقه مربوط دانست. (Amirian Chakan *et al.*, 2018) پراکنش ذرات خاک در اعماق مختلف را ناشی از وجود تفاوت در خصوصیات خاک (زمین‌شناسی و توپوگرافی) در منطقه مطالعاتی دانست.

#### بررسی عملکرد مدل RF

مقادیر  $R^2$  و RMSE مدل جنگل تصادفی RF برای پیش‌بینی توزیع اندازه ذرات خاک در لایه سطحی به ترتیب برای ذرات رس، شن و سیلت (۶/۵۷، ۱۲/۶۸ و ۶/۸۸) و (۰/۶، ۰/۵۲ و ۰/۷۱) و در لایه عمقی به ترتیب (۷/۳۴، ۱۱/۶۲ و ۹/۴۲) و (۰/۶۷، ۰/۶۹ و ۰/۴۹) به دست آمد (جدول ۴)؛ که باتوجه به مطالعات انجام شده در مناطق مختلف دنیا و در ایران مقادیر قابل قبولی است. به عنوان مثال، مقادیر  $R^2$  به دست آمده در مطالعات نقشه‌برداری رقومی لایه‌های سطحی و عمقی خاک در استرالیا مقادیر  $R^2$  بین ۰/۵۳ تا ۰/۳۹ (Rossel *et al.*, 2015)، در دانمارک بین ۰/۵۵ تا ۰/۲۶ (Adhikari *et al.*, 2013)، در ایالات متحده بین ۰/۵۷ تا



شکل ۳- الگوی توزیع مکانی ذرات رس، سیلت و شن در لایه سطحی و عمقی خاک



شکل ۴- نقشه پوشش اراضی حوزه مطالعاتی

جدول ۴- شاخص‌های صحت‌سنجی برای لایه‌های سطحی و عمقی خاک

عمق خاک (cm)	ذرات خاک	مدل	RMSE	R <sup>2</sup>	ME	MAE
۰-۳۰	شن	RF	۱۲/۶۸	۰/۵۲	-۱/۰۸	۹/۲۱
	سیلت	RF	۶/۸۸	۰/۷۱	۰/۷	۵/۴۱
	رس	RF	۶/۵۷	۰/۶۰	۰/۴	۴/۷۴
۳۰-۶۰	شن	RF	۱۱/۶۲	۰/۶۷	۰/۰۸۹	۹/۰۲
	سیلت	RF	۹/۴۲	۰/۴۹	۰/۱۳-	۶/۳۶
	رس	RF	۷/۳۴	۰/۶۹	۰/۲-	۵/۰۳

کل دنیا مورد سنجش قرار گرفته‌اند، استفاده شوند (Yu et al., 2018; Ju et al., 2018; Baker et al., 2018; Zhang et al., 2021; Fu et al., 2019)؛ لذا در این مطالعه متوسط وزنی  $K_s$  خاک بر اساس توابع انتقالی فوق، برآورد و پراکنش مکانی هداست هیدرولیکی اشباع خاک تعیین شد.

خصوصیات آماری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک برآورد شده در منطقه مورد مطالعه در جدول (۵) نشان داده شده است. میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک بر اساس توابع انتقالی اول (PTF1) و دوم (PTF2)، به ترتیب برابر با ۰/۳۶ و ۰/۳۴ متر در روز برآورد شد. حداقل و حداکثر مقادیر  $K_s$  بر اساس PTF1 بین ۰/۰۷۹ تا ۱/۰۵ متر در روز و بر اساس PTF2 بین ۰/۰۸۳ تا ۰/۹۳ متر در روز متغیر بود. مقادیر ضریب تغییرات  $K_s$  در هر دو تابع انتقالی حدود ۰/۴۵ متر در روز به دست آمد که نشان دهنده کارایی نسبتاً یکسان هر دو تابع انتقالی مورد استفاده است.

جدول ۵- مقادیر آماری متوسط هدایت هیدرولیکی اشباع خاک تحت توابع انتقالی (Cosby et al., 1984)

حداقل	حداکثر	ضریب تغییرات	انحراف معیار	میانگین (متر بر روز)	خصوصیت خاک	توابع انتقالی
۰/۰۷۹	۱/۰۵۴	۰/۴۵	۰/۱۶۴	۰/۳۶	$K_s$	PTF1
۰/۰۸۳	۰/۹۳	۰/۴۰	۰/۱۳۸	۰/۳۴	$K_s$	PTF2

باشد. درحالی که در این مناطق در مسیر آبراهه اصلی و مناطق منطبق بر اراضی کشاورزی مقادیر بالایی از  $K_s$  خاک قابل مشاهده بود که می‌تواند به دلیل افزایش مقادیر ذرات شن و سیلت و بهبود ساختمان خاک در این مناطق باشد. در کل نتایج نشان داد که مقادیر  $K_s$  تحت تأثیر توزیع اندازه ذرات خاک و مقادیر ذرات خاک بوده و با افزایش دقت تعیین خصوصیات خاک (تعیین نقشه رقومی خصوصیات خاک)، دقت برآورد  $K_s$  بهبود یافت. (Gülser and Candemir, 2008; Zhao et al., 2010; Zhang et al., 2019; Godoy et al., 2019; Becker et al., 2018) گزارش دادند که اندازه ذرات خاک و اندازه منافذ ذرات خاک در تعیین  $K_s$  نقش تعیین کننده‌ای دارند. در حوزه‌های آبخیز روش‌های مدیریتی نقش تعیین کننده‌ای بر خصوصیات فیزیکی خاک (توزیع اندازه ذرات و منافذ خاک) و به تبع آن مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع دارد (Centeno et al., 2020; Azadmard et al., 2018)؛ بنابراین، اطلاعات در مورد توزیع مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌تواند در انتخاب مناسب‌ترین روش‌های مدیریتی در حوزه‌های آبخیز به منظور اصلاح و افزایش بهره‌وری از منابع آب در کشاورزی و به حداقل رساندن استفاده از مواد شیمیایی، کاهش آلودگی و کاهش رواناب حوزه مفید باشد (Villagra-Mendoza and Horn, 2018; Bognovic et al., 2014).

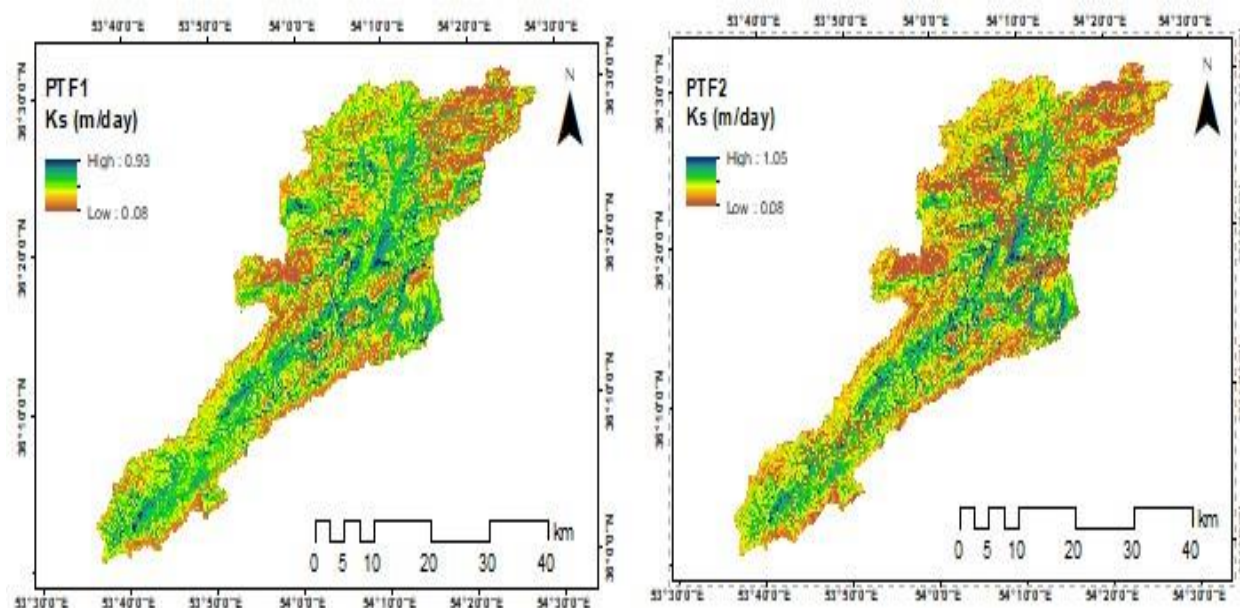
## برآورد و توزیع مکانی $K_s$ با استفاده از توابع انتقالی در منطقه مورد مطالعه

یکی از اهداف اصلی نقشه برداری رقومی خاک، استفاده از این نقشه‌ها به عنوان ورودی‌های مدل‌های هیدرولوژیک بخصوص در حوزه‌های آبخیز فاقد اطلاعات خاک است. به طوری که در کشور به علت نبود اطلاعات خاک، بیشتر محققین از نقشه‌های جهانی خاک به عنوان ورودی‌های مدل‌های هیدرولوژیک استفاده می‌کنند درحالی که باتوجه به مقیاس این نقشه‌ها و نبود داده‌های کافی خاک از کشور ما در برآورد این نقشه‌ها، نقشه‌های جهانی خاک فاقد دقت کافی به عنوان ورودی‌های مدل‌های هیدرولوژیک می‌باشند. از طرف دیگر بسیاری از محققین اخیراً پیشنهاد کرده‌اند که برای برآورد خصوصیات هیدرولیکی خاک از قبیل  $K_s$  بهتر است از توابع انتقالی که در مقیاس جهانی و با داده‌هایی از

در شکل (۵) الگوی توزیع مکانی مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک تحت تابع اول و تحت تابع دوم نشان داده شده است. پیش‌بینی الگوی توزیع مکانی  $K_s$  نشان داد مقادیر  $K_s$  در شمال و شرق منطقه پایین و در غرب و مرکز حوزه به سمت جنوب منطقه بالا برآورد شده است. مقادیر حداقل  $K_s$  در شرق حوزه می‌تواند احتمالاً به دلیل وجود سازندهای رسی و مارنی منطقه باشد که باعث افزایش مقادیر رس خاک و به تبع آن کاهش  $K_s$  شده است. همچنین، در شمال حوزه مطالعاتی به علت وجود کوهستان‌های مرتفع و صخره‌ای نفوذپذیری کاهش یافته، مقادیر  $K_s$  کم برآورد شده است. این نقشه به خوبی مناطق صخره‌ای حوزه آبخیز را هم مشخص می‌کند. مقادیر  $K_s$  در نواحی آبراهه به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش داشت که می‌تواند مربوط به افزایش مقادیر ذرات شن و سیلت در مسیر منتهی به آبراهه اصلی باشد. مقادیر بالای  $K_s$  با مقدار کم ذرات رس و مقدار زیاد ذرات شن در نواحی مرکزی و غربی که عمدتاً بر سطوح فرسایش یافته، اراضی کلوت (یاردانگ) و اراضی با رسوبات لسی (مقادیر بالای سیلت) منطبق هستند، مشاهده شد؛ اما الگوی توزیع مکانی  $K_s$  خاک در مناطق جنوبی حوزه منحصربه‌فرد بود. در این مناطق  $K_s$  خاک در سطح وسیعی از منطقه مقادیر حداقل را نشان داد که می‌تواند به دلیل بالا بودن مقدار ذرات رس در اراضی رسی و مارنی حوزه

از یکپارچگی اکولوژیکی حوزه‌های آبخیز نسبت به ترمیم عملکردهای زیست‌محیطی حوزه‌های آبخیزداری نسبتاً کم‌هزینه‌تر و در اولویت خواهد بود؛ بنابراین به‌منظور مدیریت پایدار حوزه‌های آبخیز باید به‌دقت تأثیرات تغییر کاربری اراضی بر مقادیر  $K_s$  و تولید رواناب در نظر گرفته شود.

حوزه‌های آبخیز با مشخص کردن مقادیر حداکثر و حداقل  $K_s$  امکان مشخص کردن مناطق با حداکثر میزان تولید رواناب را فراهم می‌کند؛ بنابراین، با در اولویت قرار دادن این مناطق به لحاظ مدیریتی (به‌منظور کاهش تولید رواناب) امکان به‌حداقل‌رساندن تأثیرات منفی رواناب بر کیفیت آب، تولید سیلاب و فرسایش حوزه فراهم می‌شود (Qiu *et al.*, 2014). از طرف دیگر حفاظت



شکل ۵- الگوی توزیع مکانی متوسط هدایت هیدرولیکی اشباع خاک تحت تابع اول و تحت تابع دوم

## نتیجه‌گیری

نبود این اطلاعات در مدل‌سازی هیدرولوژیکی منجر به کمبود اطلاعات مکانی آن‌ها می‌شود. همچنین از نقشه‌های توزیع اندازه ذرات خاک و پارامترهای هیدرولوژیکی برای مدل‌سازی فرآیندهای اکولوژیکی ایجاد برنامه‌ریزی علمی و عملی به‌منظور آبیاری متناسب کشاورزی با شرایط محلی و مدیریت صحیح منابع آب می‌توان استفاده نمود. از طرف دیگر این نقشه‌ها می‌تواند به‌عنوان ورودی‌های لازم در برآورد فرسایش‌پذیری خاک از طریق مدل‌های تجربی استفاده شوند. فرسایش خاک یک مشکل اساسی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران است. نقشه ذرات خاک با قدرت تفکیک مکانی بالا، اطلاعات کلیدی و ارزشمندی از مقدار فرسایش‌پذیری خاک ارائه خواهند کرد که این نتایج برای ارزیابی میزان و خطر فرسایش خاک ضروری می‌باشند. در صورت در اختیار بودن این اطلاعات، امکان مدیریت صحیح منابع (مراعات و جنگل‌ها) در سطح حوزه‌های آبخیز فراهم می‌شود. از طرف دیگر اطلاعات مکانی ذرات خاک برای ارزیابی خطرات زیست‌محیطی ناشی از شسته شدن آلاینده‌ها و توسعه راه‌حلی برای اصلاح آلودگی خاک را فراهم می‌کنند. در کل این نقشه‌ها کلید اساسی و پایه‌ای در مدیریت حوزه‌های آبخیز است. تعیین عدم قطعیت

این مطالعه نشان داد که روش نقشه‌برداری رقومی خاک با دقت قابل‌قبولی، برآورد اندازه ذرات اولیه حوزه آبخیز را فراهم می‌کند؛ بنابراین، نقشه‌برداری رقومی خاک یک گزینه امیدوارکننده برای نمایش توزیع مکانی خصوصیات زودپافت و دیرپافت خاک در سطوح وسیع و در حوزه‌های آبخیز است. نتایج این مطالعه نشان داد که نقشه‌های تهیه‌شده از ذرات اولیه خاک (شن، رس و سیلت) در ابعاد سطحی و عمقی با قدرت تفکیک مکانی بالا دارای کاربردهای بالقوه بسیاری از جمله در مطالعات منابع طبیعی و محیط‌زیست، مدل‌سازی هیدرولوژیکی، مدیریت منابع آب و کنترل آلودگی خاک است. برای مثال می‌توان از این نقشه‌ها برای تخمین پارامترهای مهم هیدرولوژیکی خاک از جمله ظرفیت آب موجود خاک، پرمردگی دائمی و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک استفاده کرد. این نتایج می‌تواند در برآورد نقشه شماره منحنی که یکی از روش‌های اصلی برآورد رواناب است، مورد استفاده قرار گیرند. از طرف دیگر اندازه‌گیری این خصوصیات که دارای تغییرپذیری نمائی بالایی هستند در سطح حوزه کار سخت و زمان‌بر و پرهزینه و در بسیاری از مواقع غیر قابل انجام است؛ لذا



منابع طبیعی و آبخیزداری استان سمنان با شماره قرارداد ۴۸۳۰ تامین شده است. بدین وسیله نویسندگان مقاله از حمایت مالی اداره کل مذکور کمال تشکر را دارند.

این نقشه‌ها می‌تواند برای بهبود کیفیت نقشه از طریق بهبود نقاط نمونه‌برداری خاک مفید واقع شود؛ زیرا مناطق با عدم اطمینان زیاد معمولاً نیاز به جمع‌آوری نمونه‌های جدید دارند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## سپاس‌گزاری

بخشی از هزینه این تحقیق از طرح پژوهشی مشترک با اداره کل

## REFERENCES

- Adhikari, K., Kheir, R.B., Greve, M.B., Bocher, P.K., Malone, B.P., Minasny, B., McBratney, A.B. and Greve, M.H., (2013). High-resolution 3-D mapping of soil texture in Denmark. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 77, 860–876.
- Adamchuk, V. and Viscarra Rossel, R. (2011). Precision agriculture: proximal soil sensing Arrouays, D., Lagacherie, P., Hartemink, A.E., (2017). Digital soil mapping across the globe. *Geoderma Regional* 9, 1–4.
- Amirian Chakan, A, Z. Taghizadeh Mehrjerdi, R. Sarmadian, F and Heidari, A. )2016(. Preparation of three-dimensional maps of the final particle size distribution of soil (soil texture) using depth equations and artificial neural networks. *Iranian Soil and Water Research*, 84(1), 113-123.
- Amirian-Chakan, A., Minasny, B., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Akbarifazli, R., Darvishpasand, Z. and Khordehbin, S. (2019). Some practical aspects of predicting texture data in digital soil mapping. *Soil and Tillage Research*, 194, 104289.
- Akpa, S. I. C., Odeh, I. O. A. and Bishop, T. F. A. (2014). Digital mapping of soil particle-size fractions for Nigeria. *Soil Science Society of America Journal*, 78, 1953-1966.
- Akumu, C. E., Johnson, J. A., Etheridge, D., Uhlig, P., Woods, M., Pitt, D. G. and McMurray, S. (2015). GIS-fuzzy logic based approach in modeling soil texture: Using parts of the Clay Belt and Hornepayne region in Ontario Canada as a case study. *Geoderma*, 239-240, 13-24.
- Arrouays, D., Grundy, M. G., Hartemink, A. E., Hempel, J. W., Heuvelink, G. B., Hong, S. Y., ... & Zhang, G. L. (2014). GlobalSoilMap: Toward a fine-resolution global grid of soil properties. *Advances in agronomy*, 125, 93-134.
- Azadmard, B., Mosaddeghi, M. R., Ayoubi, S., Chavoshi, E. and Raof, M. (2018). Spatial variability of near-saturated soil hydraulic properties in Moghan plain, North-Western Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(16), 1-1.
- Babaei, F., Zolfaghari, A. A., Yazdani, M. R., & Sadeghipour, A. (2018). Spatial analysis of infiltration in agricultural lands in arid areas of Iran. *Catena*, 170, 25-35.
- Becker, R., Gebremichael, M., & Märker, M. (2018). Impact of soil surface and subsurface properties on soil saturated hydraulic conductivity in the semi-arid Walnut Gulch Experimental Watershed, Arizona, USA. *Geoderma*, 322, 112-120
- Bogunovic, I., Mesic, M., Zgorelec, Z., Jurisic, A. and Bilandzija, D. (2014). Spatial variation of soil nutrients on sandy-loam soil. *Soil and tillage research*, 144, 174-183
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Mach. Learning* 45 (1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
- Brungard, C.W., Boettinger, J.L., Duniway, M.C., Wills, S.A. and Edwards, Jr.T.C., (2015). Machine learning for predicting soil classes in three semi-arid landscapes. *Geoderma* 239–240, 68–83.
- Centeno, L. N., Hu, W., Timm, L. C., She, D., da Silva Ferreira, A., Barros, W. S., ... and Caldeira, T. L. (2020). Dominant control of macroporosity on saturated soil hydraulic conductivity at multiple scales and locations revealed by wavelet analyses. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20, 1686-1702
- Chen, F., Dudhia, J., (2001). Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn state-NCAR MM5 modeling system. Part I: model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Review*.
- Cosby, B. J., Hornberger, G. M., Clapp, R. B., and Ginn, T. (1984). A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water resources research*, 20(6), 682-690.
- dos Santos, R. C. V., Vargas, M. M., Timm, L. C., Beskow, S., Siqueira, T. M., Mello, C. R., ... & Reichardt, K. (2021). Examining the implications of spatial variability of saturated soil hydraulic conductivity on direct surface runoff hydrographs. *CATENA*, 207, 105693
- Dai, Y., Zeng, X., Dickinson, R.E., Baker, I., Bonan, G.B., Bosilovich, M.G., Denning, A.S. Dirmeyer, P.A., Houser, P.R., Niu, G., Oleson, K.W., Schlosser, C.A., Yang, Z.L., (2003). The common land model. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 84, 1013–1024.
- Diaz-Uriarte, R., de Andres, S.A. (2006). Gene selection and classification of microarray data using random forest. *BMC Bioinf.* 7. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-7-3>.
- Farhan, A. A., and Abed, B. S. (2021). Estimation of Surface Runoff to Bahr AL-Najaf. *Journal of Engineering*, 27(9), 51-63.
- Fu, T., Gao, H., Liang, H., & Liu, J. (2021). Controlling factors of soil saturated hydraulic conductivity in

- Taihang Mountain Region, northern China. *Geoderma Regional*, 26, e00417.
- Gee, G.W., and Bauder, J.W. (1986). Particle size analysis. P 404-407 In: Klute, A. (Ed). *Methods of Soil Analysis*. Part 1. 2nd edition. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA Madison WI.
- Godoy, V. A., Zuquette, L. V. and Gómez-Hernández, J. J. (2019). Spatial variability of hydraulic conductivity and solute transport parameters and their spatial correlations to soil properties. *Geoderma*, 339, 59-69
- Godoy, V. A., Zuquette, L. V. and Gómez-Hernández, J. J. (2019). Spatial variability of hydraulic conductivity and solute transport parameters and their spatial correlations to soil properties. *Geoderma*, 339, 59-69.
- Gülser, C. and Candemir, F. (2008). Prediction of saturated hydraulic conductivity using some moisture constants and soil physical properties. *Proceeding Balwois*.
- Greve, M. H., Kheir, R. B., Greve, M. B. and Bocher, P. K. (2012a). Quantifying the ability of environmental parameters to predict soil texture fractions using regression-tree model with GIS and LIDAR data: The case study of Denmark. *Ecological Indicators*, 18, 1-10.
- Greve, M. H., Kheir, R. B., Greve, M. B. and Bøcher, P. K. (2012b). Using digital elevation models as an environmental predictor for soil clay contents. *Soil Science Society of America Journal*, 76, 2116-2127.
- Grimm, R., Behrens, T., Marker, M. and Elsenbeer, H. (2008). Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island-digital soil mapping using random forests analysis. *Geoderma*, 146, 102-113.
- Gutmann, E.D. and Small, E.E. (2007). A comparison of land surface model soil hydraulic properties estimated by inverse modeling and pedotransfer functions. *Water Resources Research*, 43, W05418.  
<http://dx.doi.org/10.1029/2006WR005135>.
- Hartemink, A. E. and McBratney, A. B. (2008). A soil science renaissance. *Geoderma*, 148, 123-129.
- Hengl, T., de Jesus, J.M., MacMillan, R.A., Batjes, N.H., Heuvelink, G.B.M., Ribeiro, E., Samuel-Rosa, A., Kempen, B., Leenaars, J.G.B., Walsh, M.G. and Gonzalez, M.R. (2014). SoilGrids1km—global soil information based on automated mapping. *PLoS ONE* 9(8), e105992.
- Hengl, T., Heuvelink, G.B., Kempen, B., Leenaars, J.G., Walsh, M.G., Shepherd, K.D., Sila, A., MacMillan, R.A., de Jesus, J.M., Tamene, L. and Tondoh, J.E. (2015). Mapping soil properties of Africa at 250 m resolution: random forests significantly improve current predictions. *PLoS ONE* 10, e0125814.
- Honarbaksh, A., Tahmoures, M., Afzali, S. F., Khajehzadeh, M., & Ali, M. S. (2022). Remote sensing and relief data to predict soil saturated hydraulic conductivity in a calcareous watershed, Iran. *catena*, 212, 106046
- Javadian, R., & Nemati. (2018). Investigation of thermal comfort in architectural adaptation to climatic conditions in Semnan. *Application of Remote Sensing and GIS in Planning*, 9 (1), 74-90.
- Ju, L., Zhang, J., Meng, L., Wu, L., Zeng, L., 2018. An adaptive Gaussian process-based iterative ensemble smoother for data assimilation. *Advances in Water Resources*, 115, 125-13.
- Kempen, B., Heuvelink, G.B.M., Brus, D. and Walvoort, D. (2014). Towards globalsoilmap.net products for the Netherlands. In: Arrouays, D., McKenzie, N., Hempel, J., de Forges, A.R., McBratney, A.B. (Eds.), *GlobalSoilMap—Basis of the Global Spatial Soil Information System*. CRC Press, pp. 85-90.
- Kowalczyk, E.A., Wang, Y.P., Law, R.M., Davies, H.L., McGregor, J.L., Abramowitz, G., (2006). The CSIRO Atmosphere Biosphere Land Exchange (CABLE) model for use in climate models and as an offline model. *CSIRO Marine. Atmospheric Research*, 13, 42.
- Li, H.Y., Shi, Z., Webster, R. and Triantafyllis, J. (2013). Mapping the three-dimensional variation of soil salinity in a rice-paddy soil. *Geoderma* 195-196, 31-41.
- Liu, F., Zhang, G. L., Song, X., Li, D., Zhao, Y., Yang, J and Yang, F. (2020). High-resolution and three-dimensional mapping of soil texture of China. *Geoderma*, 361, 114061.
- Liaw, A. and Wiener, M., (2002). Classification and regression by randomforest. *R News* 2 (3), 18-22.
- McBratney, A.B., Mendonca-Santos, L. and Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3-52.
- Minasny, B., McBratney, A.B., Mendonca-Santos, M.L., Odeh, I.O.A. and Guyon, B. (2006). Prediction and digital mapping of soil carbon storage in the Lower Namoi Valley. *Soil research*. 44, 233-244.
- Montanarella, L. and Vargas, R. (2012). Global governance of soil resources as a necessary condition for sustainable development. *Curr. Opin. Env Sust.* 4 (5), 559-564.
- More, S. B., Deka, P. C., Patil, A. P., & Naganna, S. R. (2022). Machine learning-based modeling of saturated hydraulic conductivity in soils of tropical semi-arid zone of India. *Sādhanā*, 47(1), 1-15
- 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 lands of Qazvin Plain. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(7), 1915-1929.
- Mulder, V.L., Lacoste, M., de Forges, A.R. and Arrouays, D. (2016). Globalsoilmap France: high-resolution spatial modelling the soils of France up to two-meter depth. *Science of the Total Environment*, 573, 1352-1369.
- Niu, G.Y., Yang, Z.L., Mitchell, K.E., Chen, F., Ek, M.B., Barlage, M., Kumar, A., Manning, K., Niyogi, D., Rosero, E., Tewari, M., Xia, Y.,



- (2011). The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116, 1–19.
- Nussbaum, M., Spiess, K., Baltensweiler, A., Grob, U., Keller, A., Greiner, L., Schaeppman, M.E. and Papritz, A. (2018). Evaluation of digital soil mapping approaches with large sets of environmental covariates. *Soil*, 4 (1), 1–22.
- Oleson, K., Lawrence, D.M., Bonan, G.B., Drewniak, B., Huang, M., Koven, C.D., Levis, S., Li, F., Riley, W.J., Subin, Z.M., Swenson, S., Thornton, P.E., Bozbiyik, A., Fisher, R., Heald, C.L., Kluzek, E., Lamarque, J-F., Lawrence, P.J., Leung, L.R., Lipscomb, W., Muszala, S.P., Ricciuto, D.M., Sacks, W.J., Sun, Y., Tang, J., Yang, Z.-L., (2013). Technical description of version 4.5 of the Community Land Model (CLM), NCAR Technical Note NCAR/TN-503+STR (422 pp).
- Piccifluoco, T., Morbidelli, R., Flammini, A., Saltalippi, C., Corradini, C., Strauss, P., & Blöschl, G. (2019). A Pedotransfer Function for Field-Scale Saturated Hydraulic Conductivity of a Small Watershed. *Vadose Zone Journal*, 18(1), 1-15.
- Pahlavan-Rad, M. R. and Akbarimoghaddam, A. (2018). Spatial variability of soil texture fractions and pH in a flood plain (case study from eastern Iran). *Catena*, 160, 275-281.
- Phillips, J.D. (2016). Identifying sources of soil landscape complexity with spatialadjacency graphs. *Geoderma* 267, 58–64.
- Qiu, Z., Hall, C., Drewes, D., Messinger, G., Prato, T., Hale, K., & VanAbs, D. (2014). Hydrologically sensitive areas, land use controls, and protection of healthy watersheds. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(7), 1–10.
- Raeesi, M., Zolfaghari, A. A., Yazdani, M. R., Gorji, M., & Sabetizade, M. (2019). Prediction of soil organic matter using an inexpensive colour sensor in arid and semiarid areas of Iran. *Soil Research*, 57(3), 276-286.
- Ramcharan, A., Hengl, T., Nauman, T., Brungard, C., Waltman, S., Wills, S. and Thompson, J. (2018). Soil property and class maps of the conterminous United States at 100-meter spatial resolution. *Soil Science Society of America Journal*, 82, 186–201.
- Rezaei Tavabh, K. (2015). Limnological study and determination of biological value of Damghanrood river in Semnan province. The first annual conference of Iranian agricultural research, Kharazmi Higher Institute of Science and Technology, Shiraz.
- Rossel, R. V., Chen, C., Grundy, M. J., Searle, R., Clifford, D., and Campbell, P. H. (2015). The Australian three-dimensional soil grid: Australia's contribution to the GlobalSoilMap project. *Soil Research*, 53(8), 845-864.
- Sanchez, P.A., Ahamed, S., Carre, F., Hartemink, A.E., Hempel, J., Huising, J., Lagacherie, P., McBratney, A.B., McKenzie, N.J., Mendonca-Santos, M.d.L., Minasny Budiman, Montanarella, L., Okoth, P., Palm, C.A., Sachs, J.D., Shepherd, K.D., Vagen, T., Vanlauwe, B., Walsh, M.G., Winowiecki, L.A. and Zhang, G.L. (2009). Digital soil map of the world. *Science* 325, 680–681.
- Soet, M. and Stricker, J.N.M. (2003). Functional behaviour of pedotransfer functions in soil water flow simulation. *Hydrological Processes*, 17, 1659–1670.
- Stockmann, U., Adams, M.A., Crawford, J.W., Field, D.J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., Minasny, B., McBratney, A.B., de Courcelles, V.D.R., Singh, K., Wheeler, I., Abbott, L., Angers, D.A., Baldock, J., Bird, M., Brookes, P.C., Chenu, C., Jastrow, J.D., Lal, R., Lehmann, J., O'Donnellk, A.G., Parton, W.J., Whitehead, D. and Zimmermann, M. (2013). The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agric. Agriculture, Ecosystems & Environment*, 164, 80–99.
- Taghizadeh-Mehrjardi, R., Minasny, B., Sarmadian, F. and Malone, B. (2014). Digital mapping of soil salinity in Ardakan region, central Iran. *Geoderma*, 213, 15–28.
- Taghizadeh-Mehrjardi, R., Nabiollahi, K. and Kerry, R. (2016). Digital mapping of soil organic carbon at multiple depths using different data mining techniques in Baneh region, Iran. *Geoderma*, 266, 98–110.
- Ungaro F., Ragazzi F., Cappellin R., and Giandon P. (2008). Arsenic concentration in the soils of the Brenta Plain (Northern Italy): Mapping the probability of exceeding contamination thresholds. *J. Geo. Explo*, 96: 117-131.
- Villagra-Mendoza, K. and Horn, R. (2018). Effect of biochar on the unsaturated hydraulic conductivity of two amended soils. *International Agrophysics*, 32(3).
- Yu, D., Yang, J., Shi, L., Zhang, Q., Huang, K., Fang, Y., Zha, Y., 2018. On the uncertainty of initial condition and initialization approaches in variably saturated flow modeling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 1–42. <https://doi.org/10.5194/hess-2018-557>
- Zhao, Y., Peth, S., Horn, R., Krümmelbein, J., Ketzler, B., Gao, Y., ... and Peng, X. (2010). Modeling grazing effects on coupled water and heat fluxes in Inner Mongolia grassland. *Soil and Tillage Research*, 109(2), 75-86.
- Zeraatpisheh, M., Jafari, A., Bodaghabadi, M. B., Ayoubi, S., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Toomanian, N., ... and Xu, M. (2020). Conventional and digital soil mapping in Iran: Past, present, and future. *Catena*, 188, 104424
- Zhang, Y., Schaap, M. G., and Wei, Z. (2019). Hierarchical multimodel ensemble estimates of soil water retention with global coverage. arXiv preprint arXiv:1906.03182.
- Zhang, X., Wendroth, O., Matocha, C., Zhu, J. and Reyes, J. (2020). Assessing field-scale variability



- of soil hydraulic at and near saturation. *Catena*, 187, 104335.
- Ziaee, D & Khwaja al-Din, S,J. 2014. Preparation of texture map and percentage of surface soil saturation moisture with the help of remote sensing (Case study in Isfahan). *Iranian Range and Desert Research*, 20 (4), 795-808.
- Zolfaghari, A. A., Yazdani, M. R., Khosravi. M. and Mahmoudi S. M. (2010). Comparison of different data mining methods for digital mapping of primary soil particles in Semnan plain lands. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(2), 375-385.