

## برآورد عمق خاک با استفاده از متغیرهای محیطی به دست آمده از مدل رقومی ارتفاع و داده‌های سنجش از دور

صلاح‌الدین زاهدی<sup>۱\*</sup>، کاکا شاهی<sup>۱</sup>، محمود حبیب نژاد روشن<sup>۱</sup>، کریم سلیمانی<sup>۱</sup> و کورش دادخواه<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۰۸)

### چکیده

عمق خاک مشخصه مهمی از خاک است که جهت ارائه مشخصات زیرسطحی حوضه آبخیز در مدل‌های هیدرولوژیکی توزیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. عمق خاک نفوذ آب و به تبع آن تولید رواناب، ذخیره رطوبت زیرسطحی، حرکت عمودی و افقی رطوبت، ضخامت قسمت اشباع و عمق ریشه گیاه در خاک را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. هدف از این پژوهش توسعه یک مدل آماری است که بتواند الگوهای مکانی عمق خاک در یک حوضه آبخیز را از متغیرهای توپوگرافی و پوشش زمین که به ترتیب از مدل رقومی ارتفاع (DEM) و تصاویر ماهواره‌ای قابل استخراج هستند پیش‌بینی کند. مدل رقومی زمین با مقیاس مکانی ۱۰ متر با استفاده از نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ تهیه و مورد استفاده قرار گرفت. تصویر ماهواره‌ای ۶ May ۲۰۱۵ سنجنده OLI لندست ۸ تهیه گردید. عمق خاک، انحسای توپوگرافیک، نوع کاربری اراضی و وضعیت پوشش گیاهی پارامترهای عمده‌ای بودند که در مجموع ۴۲۶ نقطه نمونه برداری در ۴ زیر حوضه آبخیز اندازه‌گیری شدند. از تبدیل باکس کوکس به منظور نرمال‌سازی داده‌های عمق خاک اندازه‌گیری شده و تمامی پارامترهای توضیح دهنده عمق خاک استفاده گردید. مدل پیش‌بینی آماری Random Forest با ۳۳۶ نقطه برای کالیبره کردن و ۹۳ نقطه برای آزمون و ۳۱ متغیر توضیحی (۱۸ متغیر به دست آمده از DEM و ۱۳ متغیر به دست آمده از تصویر ماهواره) و با در نظر گرفتن عمق خاک به عنوان خروجی مدل اجرا گردید. خطای پیش‌بینی مجموعه داده‌های اعتبارسنجی با در نظر گرفتن ۹۳ نمونه جهت آزمون مدل با ضریب کارایی نش-ساتکلیف،  $NSE = 0.689$  محاسبه گردید. نتایج نشان دادند که کاربری اراضی، سطح ویژه حوضه آبخیز، شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI)، شاخص جهت شیب (Aspect)، شیب (Slope) و مؤلفه نخست آنالیز تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA1) مهم‌ترین متغیرهای توضیحی در برآورد عمق خاک هستند.

واژه‌های کلیدی: عمق خاک، مدل پیش‌بینی آماری جنگل‌های تصادفی، مدل رقومی ارتفاع، متغیرهای محیطی

۱. گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۲. گروه ریاضی و آمار، دانشکده علوم، دانشگاه کردستان، سنندج

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: zahedi51@gmail.com

## مقدمه

عمق خاک یا رگولیت خاک که به عنوان ضخامت مواد غیر یک پارچه مستقر بر سطح هوازده سنگ بستر تعریف می شود مشخصه مهمی از خاک است که جهت ارائه مشخصات زیرسطحی حوضه آبخیز در مدل های هیدرولوژیکی توزیعی مورد استفاده قرار می گیرد (۲۲). عمق خاک وابسته به موازنه توده خاک بین دو پدیده تشکیل خاک و فرایندهای فرسایش می باشد (۱۴). تیپ و عمق خاک توسط فرایندهای برهم کنش مابین مواد مادری، توپوگرافی، اقلیم، پوشش گیاهی و موجودات زنده در یک دوره زمانی تعیین می شوند (۱۰، ۱۱ و ۳۴). خاک به دلیل نقشی که توپوگرافی و پوشش گیاهی در فرایندهای تشکیل آن بازی می کنند وابسته به توپوگرافی و پوشش زمین است (۱۴، ۲۶، ۲۹). عمق خاک نفوذ آب و به طبع آن تولید رواناب، ذخیره رطوبت زیرسطحی، حرکت عمودی و عرضی رطوبت، ضخامت قسمت اشباع و عمق ریشه گیاه در خاک را تحت تأثیر قرار می دهد (۲۰). هزینه بالای نقشه برداری خاک، تهیه نقشه های با قدرت تفکیک بالا از خاک را محدود می کند. استفاده از روش های نقشه برداری سنتی به منظور تهیه نقشه عمق خاک در عوارض پیچیده مناطق کوهستانی مشکل است. این روش ها نیازمند زمان طولانی، تلاش زیاد و در نتیجه بودجه هنگفت برای اجرا می باشند. در چنین موقعیت هایی مدل سازی با استفاده از متغیرهای محیطی و مدل های مختلف پیش بینی می توانند وسیله ای کارا و مؤثر جهت تخمین و برآورد عمق خاک و تهیه نقشه پراکنش آن باشند. کالیواس و همکاران مشاهده کردند که پارامتر مورفومتریکی فاصله تا رودخانه می تواند به طور قابل قبولی حجم شن و رس خاک را پیش بینی کند (۲۱). فعالیت های بلند مدت انسان از قبیل کشاورزی و جنگل کاری نقش حائز اهمیتی در پراکنش دوباره خاک دارند (۱۲). پوشش گیاهی (۱۳) و الگوی کاربری زمین (۱۵، ۲۲، ۲۴ و ۳۹) از دیگر پارامترهای مهم در برآورد عمق خاک هستند. متغیرهای توپوگرافی می توانند از مدل های رقومی ارتفاع به دست آیند.

قابلیت دسترسی به DEM، کاربرد گسترده آن، و پیشرفت در تکنولوژی کامپیوتر، منجر به بهبود روش های آنالیز DEM شده است (۳۵، ۳۸، ۴۱ و ۴۲). به علاوه، تلاش های فراوانی به منظور استخراج اطلاعات مفید توپوگرافیک از DEM به منظور کاربردهای مختلف در هیدرولوژی، ژئومورفولوژی و اکولوژی صورت گرفته است (۲۶). نقشه های دقیق تر از پارامترهای پیش بینی کننده، بهترین پیش بینی از عمق خاک در هر نقطه را به ما می دهد اما به طور کلی این نقشه ها تغییرات مکانی را به طور واقعی ارائه نخواهند داد (۴۰). اوده و همکاران (۳۰) و هرست و همکاران (۱۹) نتیجه گرفتند که رگرسیون کریجینگ با استفاده از خصوصیات شیب به عنوان متغیرهای پیش بینی کننده، مناسب ترین روش با کمترین میزان خطای پیش بینی برای نقشه برداری عمق خاک است. پنیزیک و بروکا (۳۱) نتایج مشابهی را با این تفاوت که شیب عملکرد بهتری موقع استفاده از کوکریجینگ داشته گزارش کرده اند. نورحسین و همکاران (۲۸) از خصوصیات توپوگرافی و شاخص گیاهی NDVI به منظور فراهم کردن اطلاعات از پراکنش مکانی خواص خاک با استفاده از تکنیک های کلاسترینگ و آماری در سطح ۵۶ کیلومتر مربعی حوضه آبخیز گومارا در اتیوپی استفاده کردند. مدل های رگرسیون خطی چند متغیره اجرا شده در بستر زیر حوضه های آبخیز قادر به توضیح ۶ - ۸۵ درصد تغییرات عمق خاک، بافت، مواد آلی، چگالی حجمی، PH، مجموع نیتروژن، فسفر در دسترس و حجم سنگریزه خاک شدند. کیوریاکوزه و همکاران با استفاده از رگرسیون کریجینگ و کاربرد نوع بهره برداری و پوشش زمین به عنوان پیش بینی کننده، نقشه عمق خاک را تهیه کردند (۲۲). آنها روش های مختلف آماری را در مطالعه خود مقایسه کردند و نشان داده اند که رگرسیون کریجینگ بهترین روش برای پیش بینی عمق خاک و پارامتر کاربری زمین مؤثرترین متغیر توضیح دهنده برای برآورد عمق خاک بوده است. سرکارو همکاران تخمین عمق خاک در یک منطقه وسیع  $330 \text{ Km}^2$  را با استفاده از فاکتورهای زمین - محیط زیستی از طریق یک مدل رگرسیون کریجینگ در منطقه

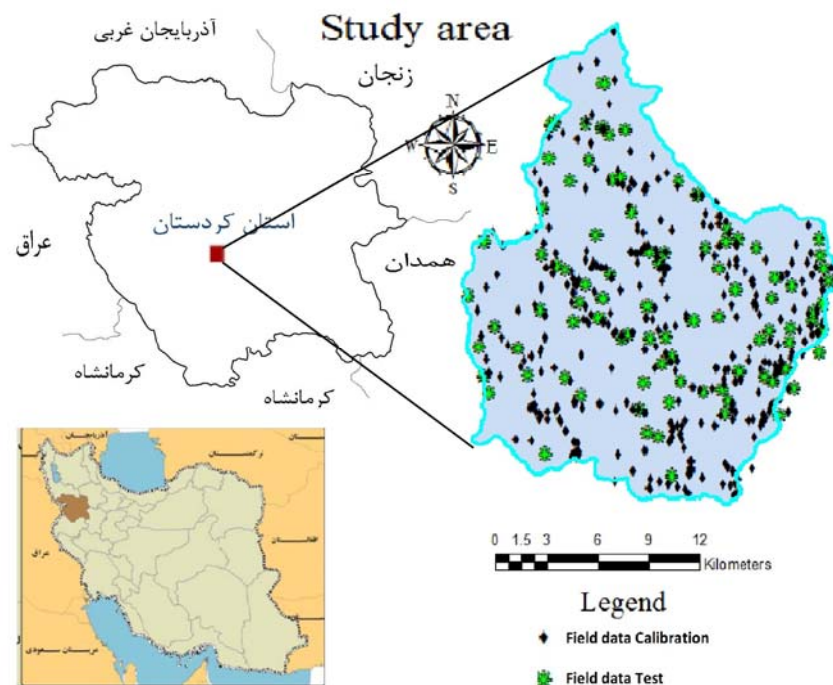
در استان کردستان است. هدف دیگر توسعه یک مدل آماری بود که بتواند الگوهای مکانی عمق خاک در یک حوضه آبخیز را از متغیرهای محیطی و پوشش زمین پیش‌بینی کند. این کار نیازمند استخراج متغیرهای توپوگرافی و پوشش زمین است که قادر به توضیح تغییرات عمق خاک باشند. استفاده از مدل پیش‌بینی آماری جنگل تصادفی در مطالعات خاک در ایران برای اولین بار است که انجام می‌شود.

## مواد و روش‌ها

### معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد بررسی یکی از زیرحوضه‌های حوضه آبخیز رودخانه و سد قشلاق است (شکل ۱). این آبخیز در ۳۰ کیلومتری شمال شهرستان سنندج و در مختصات جغرافیایی ۴۶ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۵۷ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۳۸ دقیقه عرض جغرافیایی واقع شده است (شکل ۱). مرتفع‌ترین نقطه این حوضه آبخیز ۲۸۵۰ متر از سطح دریا بوده و پایین‌ترین نقطه آن دارای ارتفاعی حدود ۱۵۵۰ متر از سطح دریا می‌باشد و طول آبراهه اصلی ۲۷ کیلومتر است. این حوضه از سنگ‌های شیلی، آندزیتی و آهکی تشکیل شده و تمام حوضه بجز حدود ۴٪ که به صورت تپه ماهور است، کوهستانی می‌باشد و نهشته‌های رودخانه‌ای در قالب دشت بندرت بچشم می‌خورد (۶). از لحاظ ژئومورفولوژی تقریباً کلیه مناطق حوضه کوهستانی و درصد بسیار کمی از آن (در خروجی حوضه) تپه و ماهور می‌باشد. به دلیل کوهستانی بودن حوضه و شیب زیاد آبرفت، زمین‌های زراعتی گسترش بسیار کمی دارند. این حوضه دارای پوشش گیاهی مرتعی است و مساحت مراتع آن بیش از ۲۳۰۰۰ هکتار است. درصد پوشش از ۳۵ تا ۶۸ درصد و وضعیت مراتع از ضعیف، خوب و متوسط متغیر است. این حوضه دارای رودخانه دویسه و خاکروزی است که در نزدیکی روستای چهل گزی به هم پیوسته و در نهایت وارد دریاچه سد قشلاق می‌شود. متوسط آب دهی سالانه رودخانه ۱/۹ متر مکعب در

دارجیلینگ هیمالیا انجام دادند. نتایج نشان داد که این مدل با ۷ متغیر پیش‌بینی کننده قادر به توضیح ۶۷٪ تغییرات مکانی عمق خاک با واریانس پیش‌بینی حدود ۲۳٪ و ۴۲٪ متر در سایت مطالعاتی بوده است (۳۳). یانگ و همکاران مطالعه‌ای را در مناطق کارستیک جنوب غرب چین به منظور تعیین بهترین قدرت تفکیک مکانی نقشه‌های رقومی ارتفاع جهت تعیین رابطه مابین پارامتر عمق خاک و خصوصیات عوارض زمین استخراج شده از این نقشه‌ها انجام دادند (۳۲). نتایج نشان داد خصوصیات شیب، شاخص رطوبت و ارتفاع بیشترین همبستگی را با عمق خاک در این مناطق با توضیح حدود ۶۱/۴ درصدی تغییرات نشان داده‌اند. محنت کش و همکاران به منظور کشف رابطه مابین خصوصیت عمق خاک و مشخصه‌های توپوگرافی در یک منطقه تپه ماهوری در غرب ایران مطالعه‌ای را انجام دادند (۲۵). نتیجه رگرسیون خطی چند متغیره مشخص کرد که شیب، شاخص رطوبت، مساحت حوضه آبخیز و شاخص حمل رسوب توانستند حدود ۷۶٪ از تغییرات عمق خاک در سایت انتخاب شده را توضیح دهند. متغیرهای پوشش زمین متعددی را می‌توان از آنالیز تصاویر سنجنش از دور شامل روش‌های PCA، تسلدکاپ و شاخص‌های مختلف پوشش گیاهی از قبیل NDVI به دست آورد. نقشه فرم‌های مختلف پوشش زمین می‌تواند از تصاویر سنجنده‌های مختلف و براساس سایت‌های آموزشی زمینی و استفاده از روش‌های مختلف طبقه‌بندی به دست آید (۸ و ۳۶). تلاش‌های فراوانی به منظور استخراج اطلاعات مفید توپوگرافیک از DEM به منظور کاربردهای مختلف در ایران صورت گرفته است که می‌توان به پژوهش‌های صورت گرفته توسط عفتی و همکاران (۱)، باقری بداغ آبادی و همکاران (۲)، جیرانی و همکاران (۳)، حسین زاده و نداف سنگانی (۴) و عاشورلو و همکاران (۵) اشاره کرد. هدف عمده این مطالعه تعیین ارتباط مابین عمق خاک و متغیرهای محیطی قابل استخراج از DEM و تصاویر ماهواره و اندازه‌گیری میدانی به منظور برآورد عمق خاک در یک حوضه آبخیز کوهستانی نیمه خشک و با مشکل دسترسی



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه و پراکنش سایت های نمونه برداری عمق خاک داده های واسنجی و تست

مرحله اول در اواسط فصل بهار از ۱۵ اردیبهشت لغایت ۵ خرداد سال ۱۳۹۴ و بعد از بارندگی های بهاره موقعی که خاک نسبتاً مرطوب و حفر پروفیل و نیز داخل شدن میله در خاک به آسانی صورت می گرفت، انجام شد. مرحله دوم از اواسط آبان ماه و بعد از بارندگی های پاییزه و مرحله سوم نیز اواخر فروردین ماه سال ۹۵ انجام شد. برای تعیین عمق خاک از روش حفر پروفیل با استفاده از کارگر استفاده شد و در مواردی نیز از میله فلزی مدرج مخصوص که دارای دو متر طول و ۲ سانتی متر قطر بود استفاده گردید، به نحوی که با استفاده از باله های میله و حرکت دورانی میله به داخل خاک رانده می شد تا حدی که به سنگ بستر برخورد نماید (شکل ۲). جهت اطمینان از اندازه گیری، موقع استفاده از میله و اطمینان از برخورد به سنگ بستر در هر نقطه دو تا سه بار اندازه گیری تکرار می شد. بدین نحو که اگر ارقام اندازه گیری در بار اول و دوم متفاوت بود اندازه گیری سوم نیز انجام می شد. برای کمی کردن عدم قطعیت در داده های عمق خاک جمع آوری شده، آزمون دامنه

ثانیه و حجم آب دهی سالیانه ۲۸/۹ میلیون متر مکعب است حداکثر آب دهی ماهانه در اسفند و حداقل در شهریور ماه است. میانگین دمای سالیانه ۹/۸ درجه سانتی گراد و میانگین بارش سالانه حوضه ۴۸۵ میلی متر است (۶).

### جمع آوری داده های میدانی

حوضه آبخیز مورد مطالعه به چهار زیر حوضه تفکیک گردید. عمق خاک، انحنا، توپوگرافیک، نوع کاربری اراضی و وضعیت پوشش گیاهی پارامترهای عمده ای بودند که در مجموع ۴۲۰ نقطه نمونه برداری در زیرحوضه های آبخیز اندازه گیری شدند. نقاط نمونه برداری براساس دامنه تغییرات وضعیت توپوگرافیک و پوشش زمین در زیر حوضه های آبخیز انتخاب شدند. بدین گونه که با تغییر وضعیت توپوگرافی و به تبع آن تغییر نوع پوشش نقاط نمونه برداری انتخاب و براساس مساحت، تعداد این نقاط متغیر بود. مختصات جغرافیائی نقاط نمونه برداری با استفاده از GPS ثبت گردید. عملیات میدانی در سه مرحله،



شکل ۲. نحوه تعیین عمق خاک با استفاده از میله دوار فلزی

پوشش گیاهی و خاک در اردیبهشت سال ۱۳۹۴، به منظور استخراج پارامترهای سنجش از دور از داده ۶ می ۲۰۱۵ لندست ۸ استفاده شد. با توجه به ژئورفرنس بودن تصویر نیازی به تصحیح هندسی نبود و به دلیل استفاده از فقط یک تصویر نیازی به تصحیح رادیومتریکی نیست اما نظر به کوهستانی بودن منطقه حذف اثر توپوگرافی در کلیه باندهای مورد استفاده با استفاده از الگوریتم لامبرت و استفاده از نقشه DEM منطقه صورت گرفت.

#### داده‌های به دست آمده از DEM

مور و همکاران خصوصیات عوارض زمین قابل استخراج از نقشه DEM که قابلیت برآورد عمق خاک در یک حوضه آبخیز را دارند به دو دسته اولیه و ثانویه تقسیم کرده‌اند (۲۶). ویژگی‌های اولیه به صورت مستقیم از دیم محاسبه می‌شوند و مهم‌ترین‌های آن شامل ارتفاع، شیب، جهت، سطح حوضه آبخیز، سطوح متفرقه یا پراکنده، انحناء افقی، انحناء عمودی، انحناء مماسی و پستی و بلندی (عوارض) سایه دار می‌باشند. ویژگی‌های مرکب یا ثانویه شامل ترکیباتی از ویژگی‌های اولیه هستند و شاخص‌هایی هستند که تغییرپذیری مکانی فرایندهای

تغییر پذیری تکرار عمق اندازه‌گیری شده در ۲۰۰ نقطه اندازه‌گیری در سطح ۴ زیر حوضه آبخیز انجام شد. میانگین دامنه تکرار عمق ۷ سانتی‌متر با ۹۵ درصد از ۱۵ سانتی‌متر و ماکزیمم دامنه ۵۰ سانتی‌متر می‌باشد. این اعداد مشخص می‌کند که اگر چه در بیشتر موارد دامنه عمق ۵۰ سانتی‌متر بود، اما برای قسمت عمده نقاط نمونه‌برداری عدم قطعیت کمتر از ۱۵ سانتی‌متر و با یک میانگین عدم قطعیت حدود ۷ سانتی‌متر بوده است. انحناء توپوگرافیک در نقاط نمونه‌برداری با روش مشاهده‌ای تعیین گردید بدین شکل که عدد (۱-) برای سطوح مقعر، عدد (۱) برای سطوح محدب و عدد (۰) برای سطوح بدون انحناء منظور گردید. داده‌های ۳۳۶ نقطه برای کالیبره کردن و ۹۳ نقطه نیز جهت استفاده در آزمون مدل در نظر گرفته شد.

#### داده‌های مورد استفاده

به منظور تهیه نقشه رقومی ارتفاع (DEM) از نقشه‌های با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور استفاده گردید. مدل رقومی ارتفاع حوزه مورد نظر با ریزولوشن مکانی ۱۰ متر با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.3 تولید گردید. با توجه به تاریخ و زمان برداشت داده‌های میدانی مرتبط با اطلاعات

شاخص‌های گیاهی Normalized difference Vegetation Index, Ratio Vegetation Index, Vegetation Index, Index Soil, adjust Vegetation Index و شاخص رطوبت خاک (Moisture Index) با استفاده از معادلات مربوطه تهیه شدند (جدول ۳).

مخصوصی را که در حوضه آبخیز اتفاق می افتند مانند حجم آب خاک، یا فرسایش ورقه‌ای بالقوه، شاخص قدرت جریان (SPI)، شاخص رطوبت (WI) و شاخص حمل رسوب (STI) توصیف می‌کنند (جدول ۱).

### داده‌های به‌دست آمده از تصویر ماهواره‌ای

پس از پیش پردازش و آماده سازی تصویر ماهواره‌ای از قبیل تهیه زیرپنجره، افزایش کنتراست تصویر، تهیه تصاویر کاذب، پارامترهای مرتبط با پوشش زمین که قابلیت کاربرد در مدل عمق خاک را دارند از قبیل شاخص‌های گیاهی مختلف مانند NDVI, RVI, PCA و تسلدکپ تهیه گردید. برخلاف دیگر تبدیل‌ها، تبدیل تسلدکپ باید برای داده‌های هر نوع سنجنده و هر کاربردی به‌طور جداگانه و تجربی تعیین شود. ضرائب این تبدیل را برای سنجنده لندست ۸ تعیین شده است. هر یک از مؤلفه‌های تسلدکپ حاصل جمع تمامی باندهای سنجنده است که به نسبت‌های متفاوتی وزن داده شده‌اند. مؤلفه روشنایی (brightness) حالت جمع تمامی باندهای طیفی است. مؤلفه دوم (greenness) تباین بین مادون قرمز نزدیک (باند ۵) و سه باند مرئی (LS2, LS3, LS4) است و در مؤلفه سوم، (wetness) باندهای مرئی مادون قرمز نزدیک در یک تباین شدید با باندهای جذب آهن یعنی LS6 و LS7 می‌باشد. مؤلفه اول و دوم تسلدکپ مانند مؤلفه‌های اول و دوم تجزیه مؤلفه‌های اصلی در بر گیرنده، ۹۵ درصد از اطلاعات در رابطه با پوشش گیاهی است (جدول ۲). از تمامی باندهای این سنجنده به جز باندهای گرمایی استفاده شد (۱۷). آنالیز PCA (اعمال بر ترکیب باندهای ۳۴۵) به منظور شناسایی اجزاء متعامد باندهای ورودی سنجنده که قادر به توضیح مهم‌ترین واریانس باشند اجرا شد. نخستین اجزاء سه گانه (pca1, pca2, pca3) که قادر به توضیح ۹۹ درصد واریانس ایجاد شده هستند به‌عنوان خصوصیات پوشش زمین منظور شدند. پارامتر مهم پوشش / کاربری زمین از این داده‌ها با استفاده از طبقه‌بندی فازی و روش طبقه‌بندی بیشترین شباهت با احتمال اولیه و داده‌های میدانی تهیه گردید

### تجزیه و تحلیل آماری

#### نرمال‌سازی داده‌ها

از تبدیل باکس کوکس به‌منظور نرمال‌سازی داده‌های عمق خاک اندازه‌گیری شده و تمامی پارامترهای توضیح دهنده عمق خاک استفاده گردید. نتایج این تبدیل نشان داد که داده‌های مورد مطالعه نرمال بوده‌اند.

$$t(x) = \frac{(x^\lambda - 1)}{\lambda} \quad (1)$$

T(x) تبدیل متغیر X با پارامتر تبدیل  $\lambda$  است.  $\lambda$  به‌منظور به حداکثر رساندن شاخص آماری W در آزمون نرمال‌سازی شاپیرو ویلکس به‌کار گرفته شده است. متغیرهای نرمال شده در مدل‌سازی آماری این پژوهش به‌کار گرفته شدند.

#### مدل‌سازی

#### مدل جنگل‌های تصادفی ((جنگل تصادفی) Random (Forest)

جنگل‌های تصادفی مدلی رگرسیونی و طبقه‌بندی آماری است که تعداد زیادی از درخت‌های رگرسیون و طبقه‌بندی را با هم ترکیب می‌کند. این مدل شامل تعداد زیادی از درخت‌های کلاس بندی و رگرسیونی هستند که وظیفه آنها اندازه‌گیری اهمیت متغیرها و نقش آنها در پیش‌بینی مدل است (۷). هر درخت از یک خود راه انداز واحد که از مجموعه داده‌های آموزشی با قابلیت جانشینی به‌دست آمده، ساخته شده است. از نرم‌افزار R جهت اجرای مدل جنگل‌های تصادفی استفاده شد. سه جنبه مهم مدل جنگل‌های تصادفی عبارتند از:

جدول ۱. متغیرهای توضیحی به دست آمده از DEM

ردیف	نام متغیر توضیحی و علامت اختصاری	توضیحات
۱	ارتفاع از سطح دریا (elv.)	ارتفاع از سطح دریای هر نقطه نمونه‌گیری که به سادگی قابل محاسبه و ثبت می‌باشد.
۲	جهت شیب (asp.)	براساس درجه و نسبت به شمال با استفاده محاسبه می‌شود.
۳	شیب (slp.)	شیب توپوگرافی نقاط نمونه‌گیری
۴	سطح مخصوص حوضه آبخیز (sca)	این متغیر از روش $D_{\infty}$ (۳۷) به دست آمده و با استفاده از تقسیم عرصه مشارکت کننده بر اندازه سلول شبکه محاسبه می‌شود.
۵	انحناء مقطع عرضی (p-curvature)	این متغیر در واقع انحناء سطحی در جهت شیب غالب است (۲۶).
۶	انحناء پلان (plncurve)	انحناء سطح عمودی بر جهت شیب غالب است (۲۶) ارقام مثبت این متغیر نشان‌دهنده سطوح محدب، منفی نشان‌دهنده سطوح مقعر و صفر سطوح مسطح را نشان می‌دهد.
۷	انحناء عمومی (gncurve)	دومین متغیر استخراجی از سطح است که با برازش یک معادله چند جمله‌ای چهار طبقه به یک پنجره مشبک با سلول‌های $3 \times 3$ انجام می‌شود (۲۶).
۸	جهت جریان $D_{\infty}$ (ang)	این متغیر جهت پرشیب‌ترین بخش خارجی شیب از سطوح سه گوش مرکز هر سلول شبکه است به‌عنوان زاویه (برحسب رادیان) در جهت عقربه‌های ساعت از شرق محاسبه می‌شود (۳۷).
۹	سطح مشارکتی $D_8$ (ad8)	شمار سلول‌های شبکه که از طریق هر سلول شبکه با استفاده از مدل جهت جریان واحد زهکش می‌شوند.
۱۰	شیب $D_8$ (sd8)	پرشیب‌ترین بخش خارجی شیب از یک سلول شبکه به یکی از هشت سلول شبکه مجاور که تحت عنوان سقوط/ مسافت یعنی تانژانت زاویه تعریف می‌شود.
۱۱	فاصله $D_8$ تا جریان آبراهه (stdist)	فاصله افقی هر سلول شبکه از هر سلول شبکه جریان که در طول حرکت جهات جریان $D_8$ تا موقعی که یک سلول شبکه جریان چنان که تعریف شده است با شبکه رستری جریان مواجه می‌شود.
۱۲	شیب $D_{\infty}$ (slpt)	پرشیب‌ترین بخش خارجی شیب از سطوح سه ضلعی با مرکزیت هر سلول شبکه که تحت عنوان سقوط/ مسافت یعنی تانژانت زاویه شیب تعریف می‌شود. و از ابزار تاوودیم نرم‌افزار arcgis به دست می‌آید.
۱۳	طول طولانی‌ترین بخش فرادست شیب $D_8$ (plen)	طول مسیر جریان از چهار جهت شیب که به داخل هر سلول شبکه در طول جهات جریان $D_8$ زهکش می‌شود.
۱۴	مجموع طول فرادست شیب $D_8$ (tlen)	مجموع طول مسیرهای جریان که در جهات جریان $D_8$ به داخل هر سلول شبکه زهکش می‌شوند.
۱۵	میانگین شیب پائین دست $D_8$ (sd8a)	متوسط شیب بر روی مسیر $100$ متری ترسیم شده بر روی قسمت پائین دست شیب در جهات جریان $D_8$ .
۱۶	شبکه جهت جریان $D_8$ (p)	نشان‌دهنده جهت جریان از هر سلول شبکه به یکی از سلول‌های مجاور و یا سلول‌های قطری همسایه و از ۱ تا ۸ که از شرق در جهت عقربه‌های ساعت کدگذاری می‌شود.
۱۷	شاخص رطوبت معکوس (sar)	شاخصی است که از شیب/ سطح مخصوص حوضه آبخیز محاسبه می‌شود.
۱۸	شاخص رطوبت (wi)	ارتباط سطح حوضه آبخیز را در رابطه با تغییرات شیب (گرادیانت شیب) نشان می‌دهد این شاخص به منظور مشخص نمودن پراکنش مکانی زون‌های اشباع سطحی و حجم آب خاک در حوضه آبخیز مورد استفاده است. این شاخص وسعت تجمع جریان را نشان می‌دهد.

جدول ۲. ضرایب تبدیل باندهای مختلف لندست ۸ جهت مؤلفه‌های مختلف انتقال تسلدکپ

باند ۷	باند ۶	باند ۵	باند ۴	باند ۳	باند ۲	باند ۱	
۰/۱۸۷۲	۰/۵۰۸۰	۰/۵۵۹۹	۰/۴۷۳۳	۰/۲۷۸۶	۰/۳۰۲۹	۰	مؤلفه روشنایی
-۰/۱۶۰۸	۰/۰۷۱۳	۰/۷۲۷۶	-۰/۵۴۲۴	-۰/۲۴۳۰	-۰/۲۹۴۱	۰	مؤلفه سبزی‌نگی
-۰/۴۵۵۹	-۰/۷۱۱۷	۰/۳۴۰۷	۰/۳۲۸۳	۰/۱۹۷۳	۰/۱۵۱۱	۰	مؤلفه رطوبت
-۰/۲۷۷۳	۰/۲۰۱۳	-۰/۰۵۸۰	۰/۴۳۹۶	۰/۰۸۴۹	-۰/۸۲۳۹	۰	مؤلفه ۴ (TCT)
۰/۸۰۸۵	-۰/۴۳۴۹	۰/۱۸۵۵	۰/۱۰۵۶	۰/۰۵۵۷	-۰/۳۲۹۴	۰	مؤلفه ۵ (TCT)
۰/۰۲۵۲	-۰/۰۲۵۹	۰/۰۵۷۵	۰/۴۱۱۹	-۰/۹۰۲۳	۰/۱۰۷۹	۰	مؤلفه ۶ (TCT)

جدول ۳. متغیرهای توضیحی به‌دست آمده از تصویر لندست ۸

ردیف	نام متغیر توضیحی و علامت اختصاری	توضیحات
۱	نقشه پوشش زمین (lcm)	که با استفاده از داده برداری صحرایی و تصویر ماهواره تهیه گردید
۲	مؤلفه اول آنالیز PCA (pc1)	از اعمال بر ترکیب باندهای ۳۴۵ تهیه شدند
۳	مؤلفه دوم آنالیز PCA (pc2)	''''''
۴	مؤلفه سوم آنالیز PCA (pc3)	''''''''
۵	مؤلفه اول آنالیز تسلدکپ (tc1)	مؤلفه اول که همان شاخص روشنایی یا Brightness می‌باشد
۶	مؤلفه دوم آنالیز تسلدکپ (tc2)	مؤلفه دوم که همان شاخص سبزی‌نگی یا Greenness می‌باشد
۷	مؤلفه سوم آنالیز تسلدکپ (tc3)	مؤلفه سوم که همان شاخص رطوبت یا Wetness می‌باشد
۸	شاخص گیاهی NDVI	$\frac{NIR - RED}{NIR + RED}$ با استفاده از معادله ساخته شد
۹	شاخص گیاهی VI	$SWIR - NIR$
۱۰	شاخص گیاهی تاج پوشش گیاهی CC	$100 \cdot \left( 1 - \frac{SWIR - SWIR_{min}}{SWIR_{max} + SWIR_{min}} \right)$
۱۱	شاخص گیاهی SAVI	$\frac{(NIR - RED)(1 + L)}{NIR + RED + L}$
۱۲	شاخص (soil moisture index) SMI	$SMI+ = \frac{T_{s_{max}} - T_s}{T_{s_{max}} - T_{s_{min}}}$
۱۳	نقشه کاربری اراضی (lus)	که با استفاده از طبقه‌بندی تصویر و نمونه‌برداری میدانی تهیه گردید

تا ساخت درخت‌ها n بار اجرا می‌شوند. هر درخت برای هر نقطه اطلاعاتی جدید، پیش‌بینی را انجام می‌دهد و پیش‌بینی کننده جنگل تصادفی با استفاده از میانگین گیری از n درخت تشکیل می‌شود.

انتخاب متغیر و پیچیدگی مدل جنگل تصادفی برای برآورد

عمق خاک

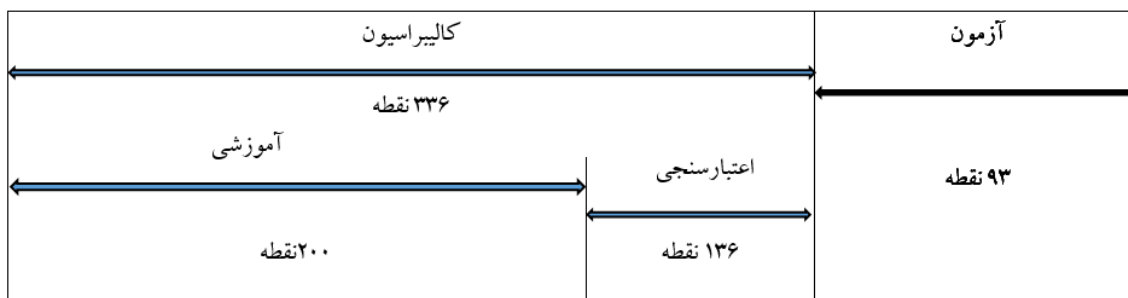
انتخاب متغیرهای توضیحی به‌منظور تهیه یک مدل پیش‌بینی

(۱) دسته داده‌های آموزش شامل نقاط S (نقاط نمونه قابل جایگزینی هستند که برای ساختن درخت رگرسیون استفاده می‌شوند).

(۲) در میان متغیرهای توضیحی (K)، m ها به‌صورت تصادفی نمونه‌برداری شده و بهترین انشعاب (split) از بین آنها انتخاب می‌شود.

(۳) هر درخت تا زمانی که اندازه گره نهایی به حداقل مشخص شده می‌رسد، رشد می‌کند. مراحل سه گانه بالا به دنبال هم





شکل ۳. تقسیم بندی نقاط نمونه برداری

پیش بینی مجموعه داده های اعتبارسنجی با در نظر گرفتن مجموعه داده های آزمون مدل برای ارزیابی واریانس ناشی از پیچیدگی و انحراف ناشی از تعداد زیاد متغیرهای توضیحی محاسبه گردید (۱۸). نتایج این تجزیه و تحلیل باعث گردید انتخاب متغیرهای توضیحی و درجه پیچیدگی مدل انتخاب شود.

#### آزمون مدل

زمانی که متغیرهای توضیحی و مدل با پیچیدگی مناسب انتخاب شدند مدل با استفاده از تمامی داده های اعتبارسنجی به عنوان ورودی و به منظور برآورد عمق خاک در تمامی حوضه آبخیز با استفاده از تمامی متغیرها اجرا شد. در ادامه داده های آزمون مدل با مقادیر مدل عمق خاک در محل های آزمون مدل با استفاده از ضریب کارایی نش ساتکلیف (۲۷) مقایسه گردید.

$$NSE = 1 - \frac{\sum (SD_p - SD_o)^2}{\sum (SD_o - SD_m)^2} \quad (2)$$

که  $SD_o$ ،  $SD_p$  و  $SD_m$  به ترتیب مقادیر عمق خاک اندازه گیری شده (مشاهده شده)، برآورد شده توسط مدل و میانگین مقادیر اندازه گیری شده (مشاهده شده) هستند.  $NSE$  خطای مربع میانگین تولید شده توسط یک مدل را با واریانس داده های مشاهده ای مقایسه می کند.

#### انتخاب متغیرها و پیچیدگی مدل

شکل (۴) متغیرهای توضیحی با درجه اهمیت بیشتر و یا

اهمیت زیادی دارد چرا که بسیاری از متغیرها به یکدیگر وابسته هستند و بسیاری نیز در کمیت های مشابه مغایر هستند لذا در نهایت این همبستگی بر خطای مدل مورد نظر اثرگذار خواهد بود. مدل جنگل تصادفی اندازه اهمیت هر متغیر توضیحی در رابطه با همبستگی مابین متغیرهای توضیحی مورد استفاده به منظور تعیین مدل هایی با پیچیدگی های متفاوت را تعیین می کند. سنجش اهمیت مدل جنگل تصادفی به ترتیب زیر تعیین می شود (۲۳).

برای هر درخت، خطای مربع میانگین محاسبه و ثبت می شود سپس عملیات مشابه پس از پس و پیش کردن هر متغیر توضیحی انجام می شود. تفاوت مابین دو درجه صحت بر روی تمام درخت ها میانگین گیری شده و سپس با استفاده از خطای استاندارد نرمال می گردد. به منظور ارزیابی پیچیدگی مناسب مدل، به صورت تصادفی داده های نقاط نمونه گیری که برای کالیبره کردن مدل مد نظر بود در دو دسته آموزشی و اعتبارسنجی بر اساس شکل (۳) تقسیم بندی شد. یک سری داده به تعداد ۹۳ نقطه که از پراکنش بیشتری نیز در سطح حوضه آبخیز برخوردار بودند به منظور آزمون مدل و ارزیابی نهایی از فرایند کنار گذاشته شد.

#### بحث و نتایج

مدل جنگل تصادفی با استفاده از داده های آموزشی به تعداد ۳۳۶ نقطه برازش گردید خطای برآورد برای هر دو دسته داده های آموزشی و اعتبارسنجی محاسبه گردید. خطای

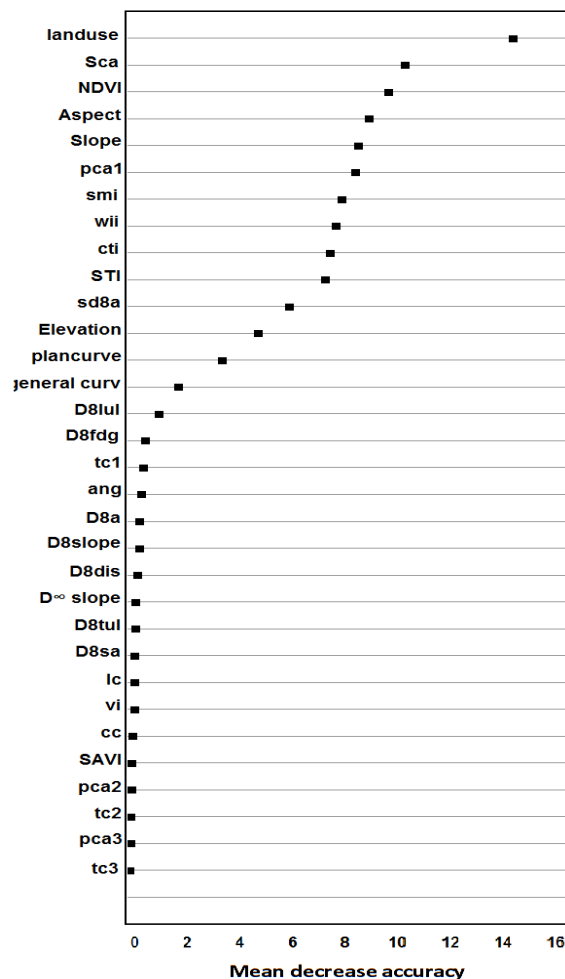
داده‌های آموزشی و اعتبارسنجی به‌دست آمد.

### ارزیابی مدل

براساس ۶ متغیر توضیحی فیلترکننده که ذکر گردید مدل جنگل تصادفی با استفاده از مجموعه داده‌های برداشت شده از عمق خاک به تعداد کلی ۳۳۶ نقطه اجرا گردید. شکل (۵) پراکندگی پلات‌های برآورد شده را در مقابل پلات‌های اندازه‌گیری شده برای داده‌های کالیبره کردن مدل نشان می‌دهد. در این شکل شیب خط مرکزی ۱:۱ است (عمق خاک برآورد شده = مشاهده شده است). دو خط چین واگرا در بالا و پایین خط مرکزی نشان‌دهنده عمق خاک برآورد شده با انحراف از معیار به‌علاوه منهای ۲ (+) در سطح اعتماد ۹۵ درصد است. خطوط فوق‌الذکر نتیجه تبدیل برگشتی آزمون باکس - کاکس است. شکل (۶) پلات‌های پراکنده مشابهی را برای داده‌های آزمون مدل که در توسعه مدل مورد استفاده قرار نگرفته‌اند نشان می‌دهد. مدل جنگل تصادفی عمق خاک را با استفاده از مجموعه داده‌های عمق خاک مشاهده شده جهت اعتبارسنجی با ضریب  $NSE = 0/83$  و برای داده‌های آزمون مدل با ضریب  $NSE = 0/689$  پیش‌بینی کرد (شکل ۶).

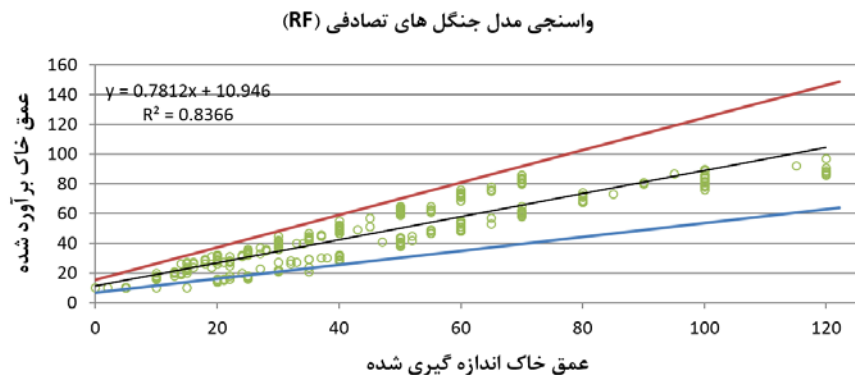
مقایسه نقشه عمق خاک موجود از حوضه با نقشه تولید شده با مدل جنگل تصادفی

نقشه عمق خاک قبلی مربوط به منطقه مورد مطالعه بررسی شد که براساس آن کل حوضه آبخیز از نظر عمق خاک به چند کلاس تقسیم شده است. چنین وضعیتی کاربرد این نقشه را به‌ویژه در مدل‌های هیدرولوژی توزیعی محدود می‌کند. لذا عملاً مقایسه دو نقشه از لحاظ دقت، صحت و کارایی امکان‌پذیر نمی‌باشد. این نقشه، سطح حوضه آبخیز را از لحاظ عمق خاک به واحدهایی با مرزهای مشخص با تغییر ناگهانی تقسیم می‌کند و تغییرات مکانی عمق خاک با توپوگرافی در این نقشه بیان نشده است (شکل ۷). مدل آماری جنگل تصادفی نقشه عمق خاک را با تغییرات مکانی در مقیاس

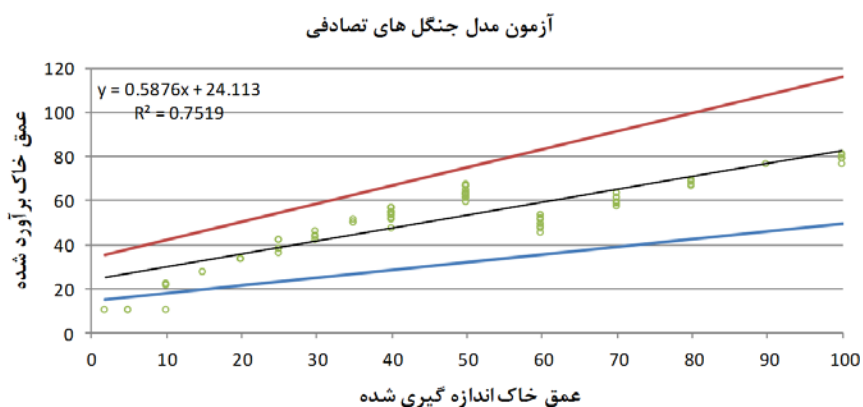


شکل ۴. میانگین اهمیت شاخص جایگشتی متغیرهای توضیحی به‌دست آمده از ۵۰ بار اجرای مدل جنگل تصادفی

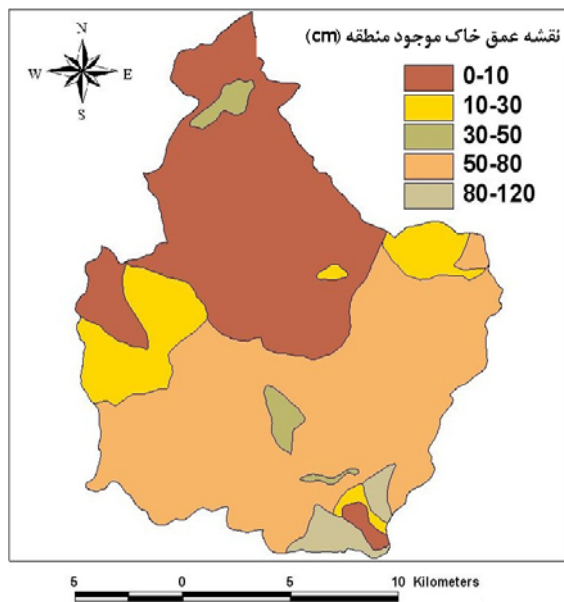
مساوی ۰/۰۱ را نشان می‌دهد که براساس میانگین درجه اهمیت از ۵۰ بار اجرای مدل با تمامی ۳۳۶ نقطه کالیبره کردن و ۳۱ متغیر توضیحی مورد استفاده تنظیم شده‌اند. بر این اساس به ترتیب ۶ متغیر کاربری اراضی (Landuse)، سطح مخصوص حوضه آبخیز (Catchment Surface Area)، NDVI، جهت شیب (Aspect)، شیب (Slope) و PCA1 بیشترین نقش را در برآورد عمق خاک داشته‌اند. کمترین خطای اعتبارسنجی زمانی به‌دست آمد که از ۱۳ فیلتر همبستگی برای متغیرهای ورودی به مدل استفاده شد. در ادامه ۶ متغیر فیلترکننده همبستگی ما بین متغیرها به‌عنوان سطح بهینه از پیچیدگی مدل برای مجموعه



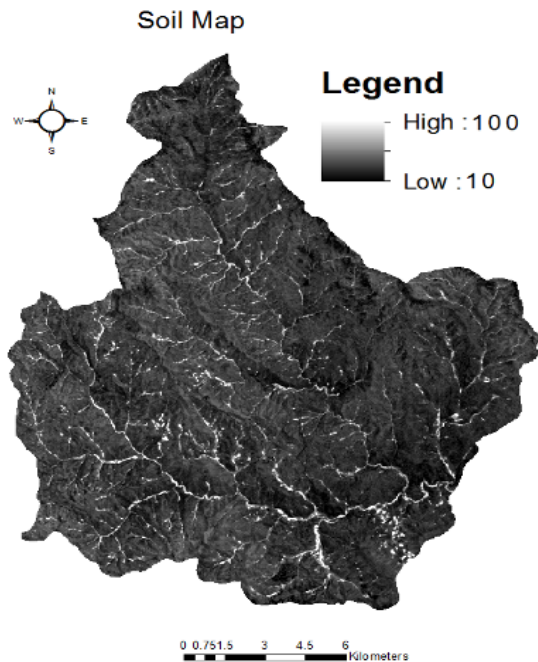
شکل ۵. پراکندگی پلات‌های برآورد شده در مقابل پلات‌های اندازه‌گیری شده برای داده‌های کالیبره کردن مدل



شکل ۶. پراکندگی پلات‌های برآورد شده در مقابل پلات‌های اندازه‌گیری شده برای داده‌های آزمون مدل



شکل ۷. نقشه عمق خاک موجود از منطقه مورد مطالعه



شکل ۸. نقشه عمق خاک برآورد شده با استفاده از مدل جنگل تصادفی

میکرو اقلیم‌ها و در نتیجه قابلیت دسترسی به آب توسط گیاهان وجود دارد نمود بیشتری دارد.

### نتیجه گیری

پژوهش صورت گرفته در این رساله پراکنش و الگوی مکانی عمق خاک را در حوضه آبخیز مورد مطالعه مشخص ساخت. جهت توسعه مدل‌هایی که الگوی مکانی عمق خاک را پیش‌بینی کنند شناسایی متغیرهایی که توانایی توضیح این پارامتر را داشته باشند ضروری است. متغیرهای توپوگرافی و پوشش زمین که قابلیت استخراج از تجزیه و تحلیل نقشه DEM و داده‌های ماهواره‌ای را دارند، با توجه به نقشی که متغیرهای مختلف این دو پارامتر در تشکیل خاک دارند توانایی بالقوه توضیح تغییرات عمق خاک را دارند. استخراج این متغیرها نیازمند تجزیه و تحلیل بهینه با استفاده از روش‌های نوین از نقشه DEM و تصاویر مناسب ماهواره‌ای می‌باشد. در این پژوهش مدل آماری جنگل تصادفی به منظور پیش‌بینی عمق

شبکه ای ۱۰ متری که تغییرات مکانی عمق خاک را با تغییرات توپوگرافی نشان می‌دهد فراهم می‌کند (شکل ۸). عمق خاک ارائه شده در این نقشه به صورت پیوسته با تغییرات حوزه تغییر می‌کند. به این صورت که خاک‌های کم عمق بر روی یال‌ها، شیب‌های جنوبی و برون زدگی‌ها واقع شده و خاک‌های عمیق در دره‌ها و بر روی شیب‌های شمالی واقع شده‌اند. اما نقشه عمق خاک سنتی به شکلی است که سطح حوزه آبخیز را به پلی‌گون‌های همگنی تقسیم کرده است. وقتی این پلی‌گون‌ها به فرمت رستر تبدیل می‌شوند، تمامی سلول‌های شبکه که در یک پلی‌گون قرار می‌گیرند عمق خاک یکسانی دارند.

لذا تغییرات مکانی عمق خاک با توپوگرافی در این نقشه‌ها به درستی نشان داده نشده‌اند. این عمومی‌سازی عمق خاک در نقشه‌های عمق خاک سنتی منجر به برآورد بیشتر یا کمتر از میزان واقعی عمق خاک در پلی‌گون‌ها می‌شود. این قضیه به‌ویژه در اقلیم‌های مناطق نیمه‌خشک، که تغییرات چشمگیری در

کاهش عمق خاک شده‌اند و فقط در مدت چند سال به‌دلیل کاهش تولید محصول دیم، بحال خود رها شده و در کلاس اراضی لخت و بدون پوشش قرار می‌گیرند. بنابراین اثرات مداخله انسانی از طریق تغییر کاربری بر پارامتر عمق خاک باعث می‌شود که اراضی دیمزار رها شده که بیشتر بر روی شیب‌های بیشتر از ۵۰ درصد واقع شده‌اند کمترین مقدار عمق خاک را پس از برونزدها و تیغه‌های سنگی در حوضه آبخیز داشته باشند که با نتایج کار سایر پژوهشگران در بررسی منابع مطابقت دارد (۲۲، ۳۲ و ۳۳)

با در نظر گرفتن فیزیک پایه بودن متغیرهای مورد استفاده به‌عنوان پیش‌بینی‌کننده عمق خاک، انتخاب پارامتر سطح مخصوص حوضه آبخیز و انحناء نقشه با بررسی منابع صورت گرفته همخوانی دارند که بیان می‌کنند خاک‌های عمیق در مناطق گودی و مقعر قرار گرفته‌اند (۱۴، ۲۰ و ۳۲). NDVI، PCA1 و TC1 نیز از متغیرهای مهم در برآورد عمق خاک هستند. این متغیرها نقش پوشش گیاهی زمین در مدل پیش‌بینی را کمی می‌کنند و دال بر اهمیت و نقش متغیرهای پوشش گیاهی به‌دست آمده از تصویر ماهواره در برآورد پارامتر عمق خاک هستند. کاریرو و همکاران تأکید کرده‌اند که ارتباط مناسبی مابین عمق خاک و متغیرهای شیب، شاخص رطوبت و بارندگی سالانه در حوضه مطالعاتی آنها تشخیص داده شده است (۹). آنها نشان دادند که این رابطه و همبستگی را با اضافه کردن خصوصیات پوشش گیاهی حوضه آبخیز می‌توان ارتقاء بخشید. محنت کش و همکاران در مطالعه خود در غرب ایران نشان دادند که متغیرهای شیب، شاخص رطوبت، سطح مخصوص حوضه آبخیز و شاخص حمل رسوب که در مدل به‌کار گرفته شدند قادر به توضیح ۷۶٪ تغییرات در عمق خاک در حوضه مورد مطالعه بوده‌اند (۲۵). گسler و همکاران تأکید کرده‌اند که با استفاده از مدل‌هایی که فقط از متغیر شاخص توپوگرافی ترکیبی (CTI) استفاده کرده‌اند توانسته‌اند بیش از ۸۴٪ تغییرات در عمق خاک را توضیح دهد (۱۶). کیوریاکوسه و همکاران نتیجه گرفتند که ترکیب خصوصیات توپوگرافی و

خاک در سطح یک حوضه آبخیز با استفاده از متغیرهای توپوگرافی و خصوصیات مختلف پوشش زمین به‌کار گرفته شد. در نهایت با توجه به سطح پیچیدگی مدل، متغیرهای استفاده شده جهت برآورد شامل ۱۰ متغیر توپوگرافی: (۱) سطح مخصوص حوضه آبخیز (sca) (۲) جهت شیب (asp) (۳) شیب (slp) (۴) شاخص معکوس رطوبت (wii) (۵) شاخص شاخص توپوگرافی ترکیبی (cti) (۶) شاخص شاخص حمل رسوب (sti) (۷) متوسط شیب بر روی مسیر ۱۰۰ متری ترسیم شده بر روی قسمت پائین دست شیب در جهات جریان D8 (D8sa) (۸) ارتفاع (elv) (۹) انحناء پلان (plancurv) (۱۰) انحناء عمومی (general curv) می‌باشند. پنج متغیر از تصویر ماهواره‌ای استخراج گردیدند که شامل: (۱) نقشه کاربری اراضی (lum) (۲) شاخص پوشش گیاهی (NDVI) (۳) جزء اول آنالیز تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (pca1) (۴) شاخص رطوبت خاک (smi) (۵) جزء اول آنالیز تسلدکپ (tc1) بودند. بنابراین وزن اهمیت متغیرهای توپوگرافی در این مطالعه به‌منظور برآورد عمق خاک به‌طور کلی بسیار بیشتر از خصوصیات پوشش زمین به‌دست آمده از تصویر ماهواره‌ای است. اهمیت سه متغیر مهم در برآورد عمق خاک شامل کاربری زمین، میانگین شیب D8 و شیب اثرات مداخلات انسان و مدیریت را آشکار می‌کند و همبستگی منفی با عمق خاک دارند. به‌دلیل مجاورت مراتع کلاس ۳ با روستاها و مناطق مسکونی به‌دلیل فاکتورهای منفی از قبیل جمع‌آوری علوفه، چرای دام، آتش سوزی و تغییر کاربری به دیمزار، تخریب شده‌اند. بنابراین عمق خاک این مناطق در مقایسه با مراتع کلاس ۲ که در فاصله بیشتری از این مناطق قرار دارند بسیار کمتر است. مراتع کلاس ۱ در فاصله بسیار دورتری از مناطق مسکونی قرار دارند و به‌دلیل موقعیت توپوگرافی دسترسی به آنها مشکل است لذا عمق خاک در این کلاس بسیار بیشتر است. عمق خاک در مناطق حفاظت شده و قرق نیز قابل توجه است. بخش عمده‌ای از مراتع کلاس ۲ به دیمزار تبدیل شده‌اند اما به‌دلیل شیب زیاد و شخم در جهت شیب و در نتیجه افزایش میزان فرسایش خاک، این مناطق دچار

به توسعه بیشتر پروفیل خاک و در نتیجه منجر به وجود خاک‌های عمیق‌تر در این شیب‌ها می‌شود. همچنین شرایط تشکیل خاک در مناطق مقعر و گودی‌ها به دلیل تفاوت در میکرواقليم که منجر به توسعه متفاوت پروفیل خاک در این مناطق می‌شود کاملاً متفاوت از مناطق محدب و برآمدگی‌ها می‌باشد در نتیجه انتظار می‌رود عمق‌های خاک در مناطق مقعر و محدب متفاوت باشند. این تفاوت‌ها در نقشه‌های سنتی عمق خاک نادیده گرفته شده است اما در نقشه عمق خاک مدل جنگل تصادفی تفاوت‌ها به صورت واقعی ارائه شده است. از آنجایی که نقشه خاک موجود از حوضه از دقت، صحت و قابلیت لازم برای کاربردهای هیدرولوژی برخوردار نمی‌باشد و با توجه به کاربردهای ویژه مدل جنگل تصادفی در حوضه آبخیز که قابلیت تعمیم به حوضه‌های مختلف از لحاظ وسعت و سایر پارامترها را خواهد داشت، این مدل پیشرفت مهمی در خصوص تهیه نقشه عمق خاک می‌باشد. استفاده از سایر مدل‌های پیش‌بینی آماری و نیز استفاده از نقشه‌های رقومی ارتفاع با روش ساخت متفاوت قدرت تفکیک مکانی مختلف می‌تواند موضوع‌های پژوهشی آینده در این زمینه باشند.

بعضی متغیرهای محیطی کمکی از قبیل برونزدهای سنگی و کاربری های مختلف زمین دقت برآورد عمق خاک را در سطح حوضه آبخیز بهبود بخشیده است (۲۲). مدل جنگل تصادفی در این مطالعه قادر به توضیح ۶۹ درصد تغییرپذیری عمق خاک بود. با نگاهی به شکل (۶) می‌توان دریافت که مدل عمق خاک را در خاک‌های با بیش از ۶۰ سانتی‌متر که عموماً در دره‌ها، تورفتگی‌ها و دشت‌های سیلابی واقع شده‌اند کمتر از میزان واقعی تخمین زده است. این نقطه ضعف ممکن است به دلیل گسسته بودن پیش‌بینی کننده‌های درختی رگرسیون در مدل جنگل تصادفی باشد در نتیجه کاربرد این مدل را در مناطق دشتی که دارای عمق خاک زیاد هستند محدود می‌سازد. لذا این مدل مناسب حوضه‌های آبخیز دارای عمق خاک محدود می‌باشد. همچنین عمق‌های پیش‌بینی شده برای خاک سطحی به مقادیر مشاهده شده در قسمت‌های بالا دست حوضه آبخیز (قله‌ها، شیب‌های دامنه و پای شیب‌ها) نزدیک بود. حوضه آبخیز مورد مطالعه کوهستانی پرشیب است به نحوی که شیب‌های جهت شمالی بسیار مرطوب‌تر از شیب‌های جنوبی هستند. قابلیت دسترسی بیشتر به آب توسط گیاهان در شیب‌های شمالی منجر

## منابع مورد استفاده

۱. عفتی، م. ۱۳۸۷. استخراج شبکه زهکشی از DEM و تاثیر خط‌های آن بر عوارض هیدرولوژیکی. پانزدهمین همایش ملی ژئوماتیک. سازمان نقشه برداری کشور. ۲۵ و ۲۶ اردیبهشت ۱۳۸۷.
۲. باقری بداغ آبادی، م.، ح. صالحی، ج. محمدی، ن. تومانیان و ع. اسفندیارپور بروجنی. ۱۳۹۰. کارایی مدل رقومی ارتفاع و مشتقات آن در نقشه برداری خاک با استفاده از مدل استنباطی خاک-سرزمین (SoLIM)، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۵(۵): ۱۱۱۸-۱۱۰۶.
۳. جیرانی، ف.، س. مرید و ع. مریدی. ۱۳۹۰. اثر دقت مکانی نقشه رقومی ارتفاع در واسنجی و برآورد رواناب و رسوب با استفاده از مدل SWAT-CUP، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک ۱۸(۴): ۱۰۱-۸۱.
۴. حسین زاده، س. ر و م. نداف سنگانی. ۱۳۹۲. ارزیابی دقت مدل های رقومی ارتفاع (DEMs) حاصل از نقشه های توپوگرافی و مقایسه تطبیقی آن با DEM های ماهواره ای (مطالعه موردی: DEM های توپوگرافی و ASTER منطقه آبه در خراسان رضوی)، پژوهش های جغرافیای طبیعی ۴۵(۱): ۷۱-۸۶.
۵. عاشورلو، د.، ع. ا. متکان، آ. کاظمی، ا. حسینی، م. آزادبخت، م. حاجب و ع. غلامپور. ۱۳۸۷. تعیین اندازه پیکسل جهت محاسبه خصوصیات فیزیوگرافی حوضه آبریز برای نقشه های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ ایران، فصلنامه زمین شناسی ایران ۲(۸): ۴۷-۵۴.

۶. مدیریت آبخیزداری. ۱۳۷۵. *مطالعات جامع آبخیزداری حوزه آبخیز سد قشلاق (پارسل A)*، سازمان جهاد کشاورزی استان کردستان، سنندج.

7. Breiman, L. 2001. Random forests, *Machine Learning* 45: 5-32.
8. Carmelo, R. F., M. Giuseppe and P. Maurizio. 2012. Land Cover classification and change-detection analysis using multi-temporal remote sensed imagery and landscape metrics. *Euro. J. of Remote Sensing* 45: 1-18.
9. Carriero, D., N. Romano and M. Fiorntion. 2005. A simplified approach for determining hydrological behavior and depth of soils at basin scale. *J. of Agric. Eng.* 2: 1-10.
10. Catani, F., S. Segoni and G. Falorni. 2010. An empirical geomorphology-based approach to the spatial prediction of soil thickness at catchment scale. *Water Resour. Res.* 46(5): 1-15.
11. Certini, G. and R. Scalenghe. 2006. Soils: basic concepts and future challenges, PP: 180-330. Cambridge University Press, Cambridge.
12. Chartin, C., H. Bourennane, S. Salvador, F. Hirschberger and J. J. Macaire. 2011. Classification and mapping of anthropogenic landforms on cultivated hillslopes using DEMs and soil thickness data, Example from the SW Parisian Basin, France. *Geomorphology* 135: 8-20.
13. D'Odorico, P. 2000. A possible bistable evolution of soil thickness. *J. of Geophy. Res.* 105 (B11): 25927-25935.
14. Dietrich, W. E., R. Reiss, M. L. Hsu and D. R. Montgomery. 1995. A process-based model for colluvium soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. *Hydro. Proce.* 9: 383-400.
15. Follain, S., B. Minasny., A. B. McBratney and C. Walter. 2006. Simulation of soil thickness evolution in a complex agricultural landscape at fine spatial and temporal scales. *Geoderma* 133: 71-86.
16. Gessler, P. E., I. D. Moore, N. J. McKenzie and P. J. Ryan. 1995. Soil-landscape modeling and spatial prediction of soil attributes. *Int. J. of Geogra. Inf. Sci.* 9(4): 421-432.
17. Hasan Ali Baig, M., L. Zhang, T. Shuai and T. Qingxi. 2014. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat8 at-satellite reflectance. *Remote Sensing Letters* 5(5): 423-431.
18. Hastie, T., R. Tibshirani and J. Friedman. 2009. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. PP: 512-764. Springer, New York.
19. Herbst, M. and B. Diekkrüger. 2006. Numerical experiments on the sensitivity of runoff generation to the spatial variation of soil hydraulic properties. *J. of Hydro.* 326: 43-58.
20. Hoover, M. D. and C. R. Hursh. 1943. Influence of topography and soil depth on runoff from forest land. *Transitional American Geophysics Union* 24: 693-698.
21. Kalivas, D. P., D. P. Triantakostas and V. J. Kollias. 2002. Spatial prediction of two soil properties using topographic Information. *Global Nest.* 4: 41-49.
22. Kuriakose, S. L., S. Devkota and D. G. Rossiter. 2009. Prediction of soil depth using environmental variables in an anthropogenic landscape, a case study in the Western Ghats of Kerala, India. *Catena* 79: 27-38.
23. Liaw, A. and M. Wiener. 2002. Classification and regression by random forest. *R News* 2: 18-22.
24. McKenzie, N and P. Ryan. 1999. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma.* 89(1-2): 67-94.
25. Mehnatkesh, A., S. Ayoubi, A. Jalalian and S. kanwar. 2013. Relationships between soil depth and terrain attributes in a semi-arid hilly region in Western Iran. *J. of Mount. Sci.* 10: 163-172.
26. Moore, I. D., P. E. Gessler., G. A. Nielsen and G. A. Peterson. 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Sci. Soci. of Amer. J.* 57(2): 443-452.
27. Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. *J. of Hydro.* 10: 282-290.
28. Nurhussen, M. S., B. Yitaferu., K. Kibret and F. Ziadat. 2013. Soil-Landscape modeling and remote sensing to provide spatial representation of soil attributes for an ethiopian watershed, *Appl. and Environ. Soil Sci.* 1: 1-11.
29. Odeh, I. O. A., A. B. McBratney and D. J. Chittleborough. 1994. Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model. *Geoderma* 63: 197-214.
30. Odeh, I. O. A., A. B. McBratney and D. J. Chittleborough. 1995. Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: heterotopic Cokriging and regression-kriging. *Geoderma* 67(3-4): 215-226.
31. Penížek, V. and L. Borůvka. 2006. Soil depth prediction supported by primary terrain attributes: a comparison of methods. *Plant Soil Environ.* 52(9): 424-430.
32. Qiyong, Y., Z. Fawang, J. Zhongcheng, L. Wenjun, Z. Jianbing, Z. Faming and L. Hui. 2014. Relationship between soil depth and terrain attributes in karst region in Southwest China. *J. of Soils Sedim.* 14:1568-1576.
33. Sarkar, S., K. R. Archana and R. M. Tapas. 2014. Soil depth estimation through soil and scape modelling using regression kriging in a Himalayan terrain. *Int. J. of Geogr. Inf. Sci.* 27(12): 2436-2454.
34. Schaetzl, R. J. and S. Anderson. 2005. *Soils Genesis and Geomorphology*, PP: 515-832. Cambridge University Press, Cambridge.

35. Seibert, J. and B. L. McGlynn. 2007. A new triangular multiple flow direction algorithm for computing upslope areas from gridded digital elevation models. *Water Resou. Res.* 43: 1-8.
36. Swapan, K. D. and R. K. Nathr. 2012. Land use/cover classification, An introduction review and comparison. *Glob. J. of rese in eng. Civil and Struc. Eng.* 12(1): 5-16.
37. Tarboton, D. G. 1997. A new method for the determination of flow directions and contributing areas in grid digital elevation models. *Water Reso. Res.* 33: 309-319.
38. Thompson, J. A., J. C. Bell and C. A. butler. 2001. Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modelling. *Geoderma* 100: 67-89.
39. Tesfa, T. K. D. G. Tarboton. D. G. Chandler and J. P. McNamara. 2009. Modeling soil depth from topographic and land cover attributes. *Water Reso. Res.* 45(10): 1-16.
40. Webster, R. and M. A. Oliver. 2007. *Geostatistics for Environmental Scientists*, PP: 187-333. John Wiley and Sons, Chi Chester.
41. Wechsler, S. P. 2007. Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review. *Hydro. Earth Sys. Sci.* 11: 1481-1500.
42. Wu, S., L. Jonathan., G. H. Huang. 2008. A study on DEM- derived primary topographic attributes for hydrologic applications: sensitivity to elevation data resolution. *Appl. Geomorph.* 28: 210-223.



## Soil Depth Estimation using Environmental Variables Derived from Remote Sensing data and DEM (Case Study: Chehelgazi Watershed of Sanandaj, Iran)

S. Zahedi<sup>1\*</sup>, K. Shahedi<sup>1</sup>, M. Habibnejad Roshan<sup>1</sup>, K. Soleymani<sup>1</sup> and K. Dadkhah<sup>2</sup>

(Received: May 31-2016 ; Accepted: Feb. 26-2017)

### Abstract

Soil depth is a major soil characteristic commonly used in distributed hydrological modeling in order to present watershed subsurface attributes. It strongly affects water infiltration and accordingly runoff generation, subsurface moisture storage, vertical and lateral moisture movement, saturation thickness and plant root depth in the soil. The objective of this study is to develop a statistical model that predicts the spatial pattern of soil depth over the watershed from topographic and land cover variables derived from DEM and satellite image, respectively. A 10 m resolution DEM was prepared using 1:25000 topographic maps. Landsat8 imagery, OLI sensor (May 06, 2015) was used to derive different land cover attributes. Soil depth, topographic curvature, land use and vegetation characteristics were surveyed at 426 profiles within the four sub-watersheds. Box Cox transformations were used to normalize the measured soil depth and each explanatory variable. Random Forest prediction model was used to predict soil depth using the explanatory variables. The model was run using 336 data points in the calibration dataset with all 31 explanatory variables (18 variables from DEM and 13 variables from remote sensing image), and soil depth as the response of the model. Prediction errors were computed for validation data set. Testing dataset was done with the model soil depth values at testing locations (93 points). The Nash-Sutcliffe Efficiency coefficient (NSE) for testing data set was 0.689. The results showed that land use, *Specific Catchment Area (SCA)*, *NDVI*, *Aspect*, *Slope* and *PCAI* are the most important explanatory variables in predicting soil depth.

**Keywords:** DEM, Prediction statistical model, random forest, Soil depth.

1. Dept. of Watershed Management, Faculty of Natural Resour., Sari Univ. of Agric. Sci. and Natural Resour., Sari, Iran.

2. Dept. of Statistics, Faculty of Sci., Univ. of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

\*: Corresponding Author, Email: zahedi51@gmail.com