



19<sup>th</sup> Iranian Soil Science Congress  
2-4 December, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران  
۱۴۰۴ آذر ۱۳ تا ۱۱



۳۲۰۳۱-۰۴۲۵۰

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



## برآورد عمق خاک با استفاده از روش نقشه برداری رقومی در حوضه آبخیز بدر، استان

### کردستان

مسلم زرینی بهادر<sup>\*۱</sup>

۱- کارشناس تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان تهران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. \* [moslem.zarini@ymail.com](mailto:moslem.zarini@ymail.com)

### چکیده

عمق خاک به ضخامت لایه های خاک از سطح زمین تا بستر سنگی یا لایه های غیر قابل نفوذ گفته می شود. عمق و نوع خاک توسط فرایندهای برهم کنش مابین عوامل خاک ساز مواد مادری، توپوگرافی، اقلیم، پوشش گیاهی و موجودات زنده در بستر زمان تعیین می شود. مطالعه حاضر با هدف نقشه برداری رقومی عمق خاک با استفاده از متغیرهای کمکی محیطی و مدل های پیش بینی کننده و معرفی بهترین مدل ها در حوضه آبخیز بدر استان کردستان انجام گرفت. برای دستیابی به این هدف محل ۱۲۵ خاکرخ مطالعاتی بر اساس تکنیک ابر مکعب لاتین تعیین گردید. متغیرهای کمکی شامل مشتقات مدل رقومی ارتفاع، شاخص های سنجش از دور مستخرج از ماهواره لندست ۸ و نقشه ژئومورفولوژی بودند که با انجام مدلسازی، نقشه های رقومی عمق خاک تهیه و ارزیابی مدل ها صورت گرفت. در میان مدل های استفاده شده برای پیش بینی عمق خاک، مدل رگرسیون خطی چندگانه (MLR) با ضریب تعیین ۰/۷۶۴ و ریشه دوم متوسط مربعات خطا ۳۱/۰۳۶ از بیشترین دقت برای پیش بینی برخوردار بوده است.

واژگان کلیدی: عمق خاک، جنگل تصادفی، متغیرهای کمکی، عوامل خاک ساز

## مقدمه

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 تاثیر قرار می دهد (زاهدی و همکاران، ۱۳۹۶). 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 (زاهدی و همکاران، ۱۳۹۶). فعالیت های بلند مدت انسان از قبیل کشاورزی و جنگل کاری نقش حائز اهمیتی در پراکنش دوباره خاک دارند (Chartin et al., 2011). پوشش گیاهی از و الگوی کاربری زمین از دیگر پارامترهای مهم در برآورد عمق خاک هستند (Tesfa et al., 2009). محنت کش و همکاران به منظور کشف رابطه مابین خصوصیت عمق خاک و مشخصه های توپوگرافی در یک منطقه تپه ماهوری در غرب ایران مطالعه ای را انجام دادند (Mehnatkesh et al., 2013) نتیجه رگرسیون خطی چند متغیره مشخص کرد که شیب، شاخص رطوبت، مساحت حوضه آبخیز و شاخص حمل رسوب توانستند حدود 76٪ از تغییرات عمق خاک در سایت انتخاب شده را توضیح دهند.

## مواد و روش ها

در پژوهش حاضر، از سه منبع برای تهیه داده های کمی بهره گرفته شد: تصاویر ماهواره ای، مدل رقومی ارتفاع و نقشه ژئومورفولوژی. مراحل اجرای این پژوهش، طبق شکل ۱ انجام گرفت.

اراضی مورد مطالعه با وسعتی حدود ۶۷۰۰ هکتار در جنوب شهرستان قروه و بین مختصات جغرافیائی ۴۷ درجه و ۴۳ دقیقه و ۴۷ درجه و ۴۹ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۲ دقیقه و ۳۵ درجه و ۸ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. مطابق با آمار طولانی مدت هواشناسی، متوسط درجه حرارت سالیانه هوا ۱۲/۰۷ درجه سلسیوس و میانگین بارندگی سالیانه ۳۴۵/۸ میلی متر است. الگوی بارش، مدیترانه ای بوده و بخش اعظم بارندگی در فصول سرد سال اتفاق می افتد. بر اساس اقلیم نمای آمبروزه، اقلیم این ناحیه نیمه خشک و سرد است. در منطقه مورد مطالعه با توجه به اطلاعات هواشناسی و داده های رطوبتی و حرارتی، رژیم رطوبتی خاک زریک (Xeric) و رژیم حرارتی آن مزیک (Mesic) تعیین شده است. اصلی ترین رخداد کوهزایی در این منطقه مربوط به کوهزایی کیمرین میانی است که سبب دگرگونی سنگ های رسوبی - آتشفشانی (تریاس - ژوراسیک) گردیده و حاصل آن تشکیل مرم، آمفیبولیت، شیست و فیلیت است. از لحاظ ژئومورفولوژی، حوزه آبخیز مورد مطالعه شامل کوه و اراضی پای کوهی (پیدموننت) است. مهمترین محصولات زراعی منطقه شامل این موارد است؛ گندم دیم و آبی، جو دیم و آبی، نخود، لوبیا، یونجه و شبدر.

## جمع آوری داده های متغیرهای کمی، پردازش و فرآیند انتخاب مهم ترین آن ها

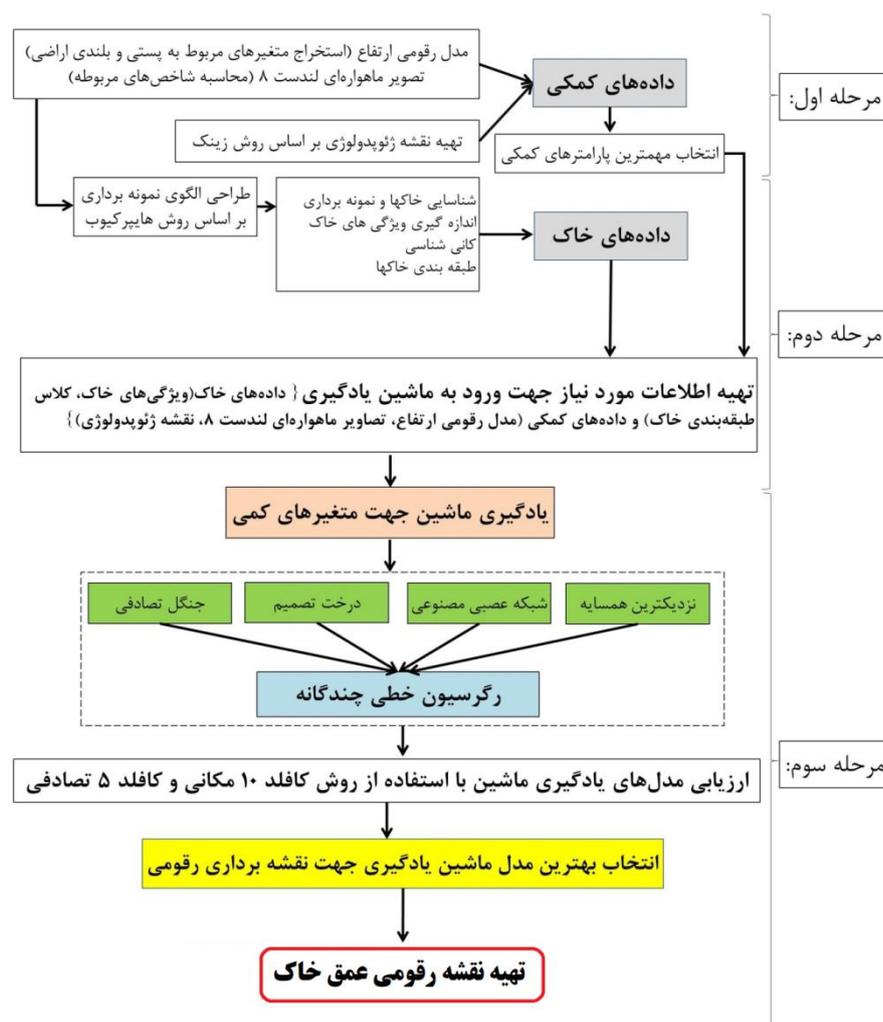
در پژوهش حاضر، از سه منبع برای تهیه داده های کمی بهره گرفته شد: تصاویر ماهواره ای، مدل رقومی ارتفاع و نقشه ژئومورفولوژی. مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر مبنای کار قرار گرفت. در این مرحله، با استفاده از این مدل و زیربرنامه های تعریف شده استاندارد موجود در نرم افزار Arc-GIS10 و ساگا ۱ مشتقات مختلف مرتبه های اول و دوم مدل تهیه شد. شاخص های سنجش از دور نیز با استفاده از داده های باندهای ۱ تا ۶ ماهواره ای لندست ۸ (سال ۲۰۱۳) محاسبه شدند.

تفکیک واحدهای ژئومرفیک موجود در منطقه مطالعاتی با توجه به تفاوت رنگ، الگوی آبراهه ای، شیب، شکل شیب و ارتفاع که در تصاویر سه بعدی گوگل ارث قابل مشاهده هستند، بر اساس نقشه زمین شناسی و سامانه سلسله مراتبی زینک (۱۹۸۹) انجام شد. این سامانه از بالاترین تا پایین ترین سطح طبقه بندی شامل زمین نما (Landscape)، پستی و بلندی (Relief) و یا قالب (Molding)، سنگ و مواد مادری (Lithology) و شکل زمین (Landform) است. به منظور نشان دادن رابطه بین زمین

<sup>1</sup> System for Automated Geoscientific Analyses, SAGA

ریخت (Geoform) و خاک، خاک (های) مربوط به هر شکل زمین نیز معرفی گردید. در پایان، نقشه ژئومرفولوژی در سامانه اطلاعات جغرافیائی رقومی گردید.

برای انتخاب پارامترهای موثر در مدل‌سازی، از روش انتخاب ویژگی به ترتیب اهمیت استفاده شد. به این معنی که تمام اطلاعات کمکی پس از استخراج از نرم‌افزار ساگا، وارد نرم‌افزار وکا (Weka) شد و با استفاده از الگوریتم انتخاب ویژگی‌ها، اطلاعات کمکی مهم و مؤثر در پیش‌بینی ویژگی‌ها و کلاس‌های طبقه‌بندی خاک و رده‌بندی کیفی تناسب اراضی به ترتیب اهمیت، انتخاب و در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. این الگوریتم، ارزش یک زیرمجموعه از ویژگی‌ها، با در نظر گرفتن توانایی پیش‌بینی فردی هر یک از آن‌ها و همچنین میزان فراوانی بین آن‌ها را ارزیابی می‌کند. در این الگوریتم، زیرمجموعه فوق‌الذکر که با ویژگی‌ها و کلاس‌های مورد پیش‌بینی همبستگی بالایی دارند، درحالی‌که همبستگی درونی آن‌ها کم است، ترجیح داده می‌شوند.



شکل ۱- مراحل انجام تحقیق

### جمع‌آوری داده‌های خاک

در نقشه‌برداری رقومی خاک، شبکه نمونه‌برداری (مکان‌های نمونه‌برداری) خاک برای ایجاد روابط کمی بین خاک و متغیرهای محیطی تأثیر بنیادین دارد. با توجه به اهمیت این موضوع، در تحقیق حاضر، برای افزایش کارایی مدل‌های نقشه‌برداری

رقومی، نسبت به استفاده از روش نمونه برداری ابرمکعب لاتین (۲۹) اقدام شد. این تکنیک، یک روش نمونه برداری مونت-کارلوی محدود شده و یک طرح تصادفی طبقه بندی شده است که به کمک توزیع چند متغیره، نمونه برداری قابل قبولی را باعث می شود. بر اساس تکنیک ابر مکعب لاتین، محل ۱۲۵ خاکرخ در منطقه مطالعاتی انتخاب شد. در این تحقیق از نرم افزار R نسخه ۳،۵،۳ برای مشخص کردن نقاط حفر خاکرخها استفاده و داده های استفاده شده برای وارد کردن به نرم افزار مشتمل بر مدل رقومی ارتفاع، داده های سنجش از دور و نقشه ژئومورفولوژی بودند. موقعیت تمامی خاک رخوا توسط سیستم موقعیت یاب جهانی (GPS) ثبت شد.

مطالعات خاکشناسی برای تهیه نقشه های رقومی ویژگی های آن انجام شد و فاصله خاکرخها از یکدیگر بر اساس روش ابر مکعب لاتین تعیین شد. خاکرخها بر اساس راهنمای تشریح و نمونه برداری خاکها در صحرا (۴۴) تشریح و از تمامی افق های آنها نمونه برداری انجام گرفت. سطوح مختلف ژئومورفولوژی نیز برای هر پروفیل یادداشت برداری شد.

#### مدل های یادگیری ماشین، بکار رفته در این تحقیق

در این پژوهش، جهت برآورد داده های عمق خاک از مدل های شبکه عصبی مصنوعی، نزدیک ترین همسایه، تحلیل درخت تصمیم و جنگل تصادفی استفاده گردید. علاوه بر این، از مدل رگرسیون خطی چندگانه جهت ترکیب مدل های مذکور نیز بهره گرفته شد

#### نتایج و بحث

نتایج ارزیابی صحت پیش بینی عمق خاک های مورد مطالعه، با استفاده از روش اعتبارسنجی کافلد ۱۰ مکانی، در جدول ۱ ارائه شده است. این پیش بینی توسط مدل های نزدیک ترین همسایه K (KNN)، تحلیل درخت تصمیم (DTA)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، جنگل تصادفی (R.F.) و رگرسیون خطی چندگانه (MLR) صورت گرفته است. در میان مدل های استفاده شده برای پیش بینی عمق خاک، مدل رگرسیون خطی چندگانه با ضریب تعیین ۰/۷۶۴ و ریشه دوم متوسط مربعات خطا ۳۱/۰۳۶ از بیشترین دقت برای پیش بینی برخوردار بوده است.

در جدول ۱، دقت پیش بینی عمق خاک، از بالا به طرف پائین افزایش می یابد. کمترین دقت پیش بینی به مدل نزدیک ترین همسایه K (KNN)، اختصاص یافته است. این در حالی است که با استفاده از روش اعتبارسنجی کافلد ۵ تصادفی (جدول ۲)، از بین مدل های شبکه عصبی مصنوعی، تحلیل درخت تصمیم، رگرسیون چند متغیره خطی و نزدیک ترین همسایه K، مدل نزدیک ترین همسایه K با ضریب تعیین ۰/۹۸۹۳ و ریشه دوم متوسط مربعات خطا ۵/۹۰۵ از بیشترین دقت برای پیش بینی برخوردار بوده است.

جدول ۱- نتایج ارزیابی صحت پیش بینی عمق خاک، با استفاده از روش اعتبارسنجی کافلد ۱۰ مکانی. میانگین داده های واقعی عمق خاک در منطقه

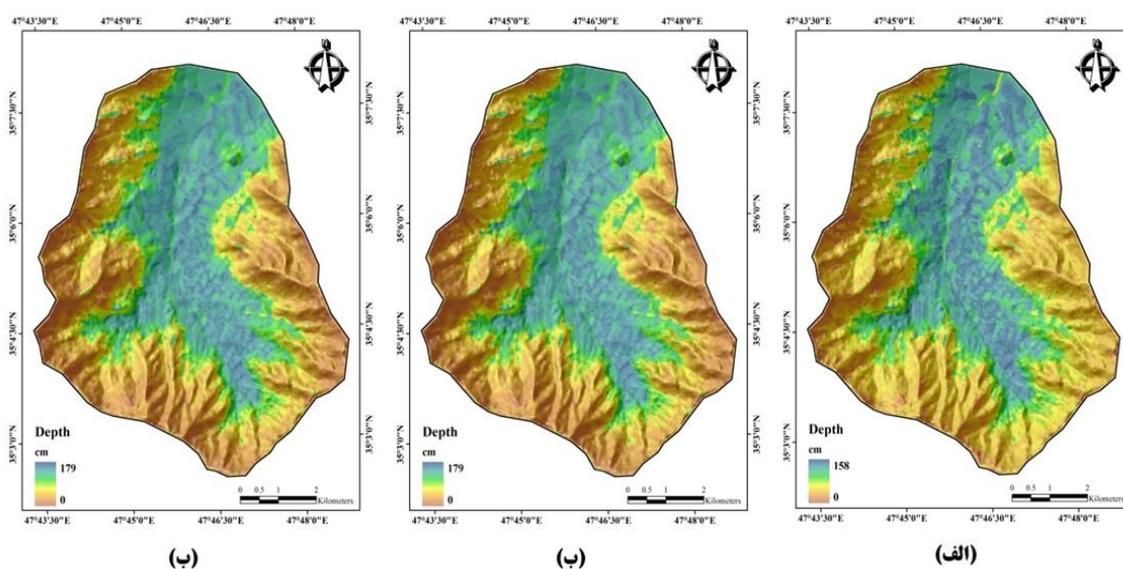
مورد مطالعه برابر با ۸۰ سانتی متر است.

مدل	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>
KNN	۴۹/۳۲۱	۴۱/۸۲۳	۰/۳۶۱
DTA	۳۱/۵۰۹	۲۵/۵۵۷	۰/۷۰۷
ANN	۳۱/۳۴۶	۲۴/۱۰۹	۰/۷۱۷
RF	۳۱/۲۶۱	۲۴/۰۴۴	۰/۷۲۱
MLR	۳۱/۰۳۶	۲۲/۷۴۹	۰/۷۶۴

جدول ۲- نتایج ارزیابی صحت پیش بینی عمق خاک، با استفاده از روش اعتبارسنجی کافلد ۵ تصادفی.

مدل	RMSE	$^N$ RMSE=RMSE/Mean real	$r^C$	$R^2$	ME
ANN	۱۰/۱۶۰	۰/۱۲۷۰	۰/۹۸۱۹	۰/۹۶۵۷	-۰/۱۱۵۲
DTA	۲۱/۰۳	۰/۲۶۳۰	۰/۹۲۶۱	۰/۸۶۲	۰
MLR	۲۸/۲۵	۰/۳۵۳۳	۰/۹۱۱۴	۰/۸۳۷	۰
KNN	۵/۹۰۵	۰/۰۷۳۸	۰/۹۹۴۶	۰/۹۸۹۳	۰/۴۴

از کوه به طرف اراضی پای کوهی، عمق خاک افزایش نشان می‌دهد (شکل ۲). اراضی پای کوهی اغلب از آبرفت تشکیل شده‌اند. در شکل ۲، نقشه ب، پیش‌بینی مقدار میانگین، نقشه الف، پیش‌بینی با دامنه پراکندگی ۵ درصد کمتر از میانگین و نقشه ج، پیش‌بینی با دامنه پراکندگی ۵ درصد بیشتر از میانگین را نشان می‌دهند.



شکل ۲- نقشه‌ی پیش‌بینی عمق خاک با استفاده از مدل رگرسیون خطی چندگانه. نقشه ب، پیش‌بینی مقدار میانگین، نقشه الف، پیش‌بینی با دامنه پراکندگی ۵ درصد کمتر از میانگین و نقشه ج، پیش‌بینی با دامنه پراکندگی ۵ درصد بیشتر از میانگین را نشان می‌دهند.

متغیرهای کمکی مهم در پیش‌بینی عمق خاک به ترتیب اهمیت عبارت‌اند از: مقدار شیب، موقعیت نسبی شیب، شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده و شاخص گیاهی تعدیل‌کننده اثر خاک. روی زمین‌های شیب‌دار، آب کمتر می‌تواند در خاک نفوذ کند و بیشتر به صورت روان آب روی سطح زمین جاری می‌شود. در نتیجه، تخریب شیمیایی سنگ مادر و خاک کمتر صورت می‌گیرد و عمق خاک کمتر می‌گردد. به همان دلایلی که برای اثر شیب بر عمق خاک گفته شد، در پشته شیب که شیب زمین از پای شیب بیشتر است، معمولاً انتظار می‌رود که عمق خاک از عمق خاک‌های پای شیب کمتر باشد. در این ارتباط استثناهایی ممکن است وجود داشته باشد. به عنوان مثال، ذاکر حقیقی و گیوی (۱۳۹۵) گزارش نمودند که در منطقه نیمه‌خشک غرب اصفهان، خاک‌های پشته شیب شمالی به طور متوسط، از خاک‌های پای این شیب به خاطر مفر بودن شیب در پشته و وجود رخنمون سنگی در پای شیب، عمیق‌تر می‌باشند. تراکم بیشتر پوشش گیاهی باعث تخریب شیمیایی بیشتر سنگ مادر و خاک و در نتیجه عمیق‌تر شدن خاک می‌گردد. با توجه به این‌که با افزایش پوشش گیاهی، شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده و شاخص گیاهی تعدیل‌کننده اثر خاک نیز افزایش می‌یابند، می‌توان گفت که این شاخص‌ها رابطه مستقیم با افزایش عمق خاک دارند. ذاکر حقیقی و گیوی (۱۳۹۵) به این نتیجه رسیدند که خاک‌های شیب‌های شمالی در منطقه نیمه‌خشک غرب اصفهان، به خاطر درجه حرارت کمتر، رطوبت بیشتر و تراکم بیشتر پوشش گیاهی، به طور متوسط از خاک‌های شیب‌های جنوبی عمیق‌تر می‌باشند.

فهرست منابع

- زاهدی صلاح الدین، شاهدی کاکا، حبیب نژادروشن محمود، سلیمانی کریم، دادخواه کورش. برآورد عمق خاک با استفاده از متغیرهای محیطی به دست آمده از مدل رقومی ارتفاع و داده‌های سنجش از دور. علوم آب و خاک. ۱۳۹۶؛ ۲۱ (۴): ۱۱۱-۱۲۷.
- ذاکر حقیقی، س.، و گیوی، ج. (۱۳۹۵). بررسی اثر مشخصات شیب بر تشکیل خاک روی سنگ گرانیت در منطقه نیمه خشک غرب اصفهان. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، جلد ششم، شماره چهارم، صفحات ۱ تا ۲۰.
- 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.
- 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.
- 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.
- Zinck, J. A. (1989). Physiography and soils. Lecture notes for soil students. *Soil Science Division. Soil survey courses subject matter: K6 ITC, Enschede, The Netherlands.*

### Soil depth estimation using digital mapping technique in Badr watershed, Kurdistan province

Moslem zarinbahador

Agricultural and Natural Resources Research and Training Center of Tehran Province, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Iran

#### Abstract

Soil depth is the thickness of soil layers from the ground surface to bedrock or impermeable layers. Soil depth and type are determined by the interaction processes between soil-forming factors, parent materials, topography, climate, vegetation, and living organisms over time. The present study aimed to digitally map soil depth using environmental auxiliary variables and predictive models and introduce the best models in the Badr watershed of Kurdistan province. To achieve this goal, the location of ۱۲۵ study maps was determined based on the Latin supercube technique. The auxiliary variables included derivatives of the digital elevation model, remote sensing indices extracted from the Landsat <sup>۸</sup> satellite, and a geomorphological map, which were used to prepare digital soil depth maps and evaluate the models. Among the models used to predict soil depth, the multiple linear regression (MLR) model had the highest prediction accuracy with a coefficient of determination of ۰,۷۶۴ and a root mean square error of ۳۱,۰۳۶.

**Keywords:** Soil depth, random forest, covariates, soil-forming factors