

استفاده از داده‌های کمکی و تکنیک‌های ژئوفیزیکی (رادار نفوذی زمین و القای الکترومغناطیس) برای تخمین رس خاک

فریده عباس‌زاده افشار^۱، شمس‌اله ایوبی^۲، حسین خادمی^۲، اعظم جعفری^۳

۱- استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت، ۲- استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان و ۳- استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه باهنر کرمان

چکیده

روش‌های استاندارد و معمول شناخت ویژگی‌های خاک، بر اساس مشاهدات و آنالیز نقطه‌ای خاک هستند، که این روش‌ها بسیار وقت‌گیر و پرهزینه‌اند. به دلیل این محدودیت‌ها، روش‌های جایگزین برای تکمیل تکنیک‌های مرسوم نقشه‌برداری خاک در حال بررسی هستند. برای تولید چنین نقشه‌هایی، ترکیبی از روش‌های نقشه‌برداری رقومی خاک، تکنیک‌های سنجش از دور و سنجش نزدیک خاک بسیار امیدوارکننده هستند. بنابراین این مطالعه، با هدف کاربرد تکنیک‌های ژئوفیزیکی (رادار نفوذی زمین (GPR) و القای الکترومغناطیس (EMI)) و داده‌های کمکی (پارامترهای سرزمین و داده‌های سنجش از دور) در تخمین رس خاک با استفاده از روش CHAID در شش سایت در منطقه بم استان کرمان طراحی گردید. نتایج کلی کاربرد تکنیک‌های ژئوفیزیکی بیان می‌کند که مناطق با رسانایی الکتریکی مختلف و ویژگی‌های ژئوالکتریک متفاوت تأثیر قابل توجهی در بازتاب ژئوالکتریکی دارند. همچنین تکنیک‌های ژئوفیزیک مانند GPR و EMI مناسب علوم خاک هستند و استفاده از این تکنیک‌ها، منجر به نتایج دقیق و قابل اعتماد می‌شود و نسبت به روش‌های سنتی مخرب و وقت‌گیر نیستند.

واژه‌های کلیدی: پارامترهای سرزمین، سنجش از دور، رادار نفوذی زمین، القای الکترومغناطیس، رس

مقدمه

پیشرفت‌های صورت گرفته در فناوری اطلاعات، در راستای استفاده از روش‌های نوین شناسایی خاک گام برداشتند. هدف کلی این روش‌ها، پیش‌بینی ویژگی‌های دقیق خاک است، که امروزه یک پیش‌نیاز اصلی برای حفاظت خاک و همچنین برای مدیریت پایدار استفاده از زمین، آب و محیط زیست است. برای تولید مجموعه اطلاعات خاک، ترکیبی از روش‌های نقشه‌برداری رقومی خاک، تکنیک‌های سنجش از دور^۱ و سنجش نزدیک خاک^۲ امیدوارکننده‌ترین هستند. با این حال، ترکیب عملی و قابل اعتماد از این تکنیک‌ها برای تحقیق در مناطق بزرگ (به عنوان مثال حوضه‌های آبخیز و زمین‌نماها) هنوز احساس کمبود می‌شود (Behrens et al., 2010).

سنسورهای سنجش نزدیک خاک دستگاه‌هایی هستند که می‌تواند اطلاعات کمی و رقومی از ویژگی‌های خاک را فراهم کنند. سنجش نزدیک خاک معمولاً در ارتباط با نقشه‌برداری خاک با وضوح بالا (دقت > ۲۰ متر) برای کاربردهایی مانند کشاورزی دقیق کاربرد دارند، و مزیت دیگر آن، توصیف تغییرات کوتاه برد مکانی ویژگی‌های خاک که اغلب در نقشه‌برداری خاک به دلیل محدودیت نمونه‌برداری و آنالیز مرسوم خاک نادیده گرفته می‌شود (Janis et al., 2010).

پژوهش‌های زیادی به منظور توسعه سنسورها و تکنیک‌هایی برای سنجش نزدیک خاک در حال انجام است. یکی از تکنیک‌های سنجش نزدیک خاک، تکنیک‌های ژئوفیزیک^۳ است. تکنیک‌های ژئوفیزیک یک روش جایگزین برای روش‌های سنتی نمونه‌برداری خاک هستند. این تکنیک‌ها به نظر می‌رسد مناسب ویژگی‌هایی از خاک هستند که ارتباط نزدیکی با خواص ژئوالکتریکی دارند. روش‌های متداول ژئوفیزیکی مورد استفاده در مطالعات خاکشناسی شامل: القای الکترومغناطیسی و رادار نفوذی زمین هستند (Steelman et al., 2015)

1. Remote sensing

2. Proximal soil sensing

3. Geophysical Techniques

GPR یک روش ژئوفیزیکی است که با استفاده از انرژی الکترومغناطیسی با فرکانس مرکزی بین ۵۰ و ۱۲۰۰ مگاهرتز، زیر سطح را به تصویر می‌کشد. انرژی الکترومغناطیسی از آنتن پخش می‌شود، و به وسیله اختلاف در ضریب دی‌الکتریک (ϵ) و نفوذپذیری مغناطیسی (μ) مواد زیرسطح تغییر می‌کند. یکی از بزرگ‌ترین محاسن استفاده از روش GPR سرعت عمل بالای آن در برداشت اطلاعات است. همزمان با حرکت کاربر اطلاعات جمع‌آوری شده بر روی نمایش‌گر نمایش داده می‌شود.

EMI تکنیکی است که رسانایی الکتریکی ظاهری (ECa) را به وسیله القا و سپس تشخیص جریان الکتریکی در خاک اندازه‌گیری می‌کند. تکنیک EMI مقرون به صرفه است و در حال استفاده گسترده، با توجه به ماهیت غیرمخرب، پاسخ سریع و سهولت ترکیب آن با وسائل نقلیه است (Sarwar Khan, 2012). روش القای الکترومغناطیس، رسانایی الکتریکی (یا مقاومت الکتریکی) خاک را به طور مستقیم در زیر سطح اندازه‌گیری می‌کند.

خاک یک عامل کلیدی در تنظیم و اصلاح چرخه ماده و انرژی در سطح زمین است، در نتیجه به دست آوردن اطلاعات کافی در مورد آن یک پیش شرط لازم برای ارزیابی مدیریت محیط و زمین است. یک طرح نقشه‌برداری ژئوفیزیکی موفق برای ویژگی‌های خاک، نه تنها نیاز به درک مناسبی از روابط بین ویژگی‌های ژئوالکتریکی و ویژگی‌های مختلف خاک دارد، بلکه باید قادر به ارائه اطلاعات دقیق با کمترین هزینه و وقت باشد. دانسته‌های کمی در این مورد وجود دارد؛ در نتیجه، نیاز به کار بیشتر و استفاده از سنسورهای ژئوفیزیک در تشخیص ویژگی‌های خاک وجود دارد. بنابراین این مطالعه، با هدف کاربرد تکنیک‌های ژئوفیزیکی (GPR و EMI) و داده‌های کمکی (پارامترهای سرزمین و سنجش از دور) در تخمین رس خاک با استفاده از مدل CHAID با سه مجموعه ورودی (۱. داده‌های توپوگرافی و سنجش از دور، ۲. داده‌های ژئوفیزیکی (GPR و EMI) و ۳. ترکیب داده‌های کمکی و ژئوفیزیکی) در منطقه بم استان کرمان طراحی گردید.

مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه مورد مطالعه

منطقه بم در جنوب شرقی ایران و در شرق استان کرمان بین عرض‌های جغرافیایی ۲۸ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۲۹ درجه و ۹ دقیقه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۵۸ درجه و ۴ دقیقه تا ۵۸ درجه و ۲۸ دقیقه شرقی قرار گرفته است. میانگین بارندگی سالانه این منطقه ۶۴ میلی‌متر، متوسط درجه حرارت آن ۲۲ درجه سلسیوس است. این منطقه بر اساس سیستم طبقه‌بندی آمریکا (Soil survey, 2010) دارای رژیم رطوبتی اریدیک و رژیم حرارتی هایپرترمیک است.

متغیرهای کمکی

شاخص‌های توپوگرافی از یک مدل رقومی ارتفاع (DEM) با ابعاد ۳۰×۳۰ متر، که از وب سایت مدل رقومی ارتفاع جهانی استر به دست آمد، مشتق شدند. پارامترهای زمین‌نما از قبیل شیب، جهت شیب، شاخص رطوبتی، انحنای طولی، انحنای عرضی، شاخص توپوگرافی مرکب، شاخص قدرت جریان آب و تشعشع خورشیدی در نرم‌افزار SAGA محاسبه و استخراج گردید (جدول ۱). روش استخراج تمام پارامترهای مزبور در روش ارائه شده توسط هنگل و همکاران (۲۰۰۷) تشریح شده است.

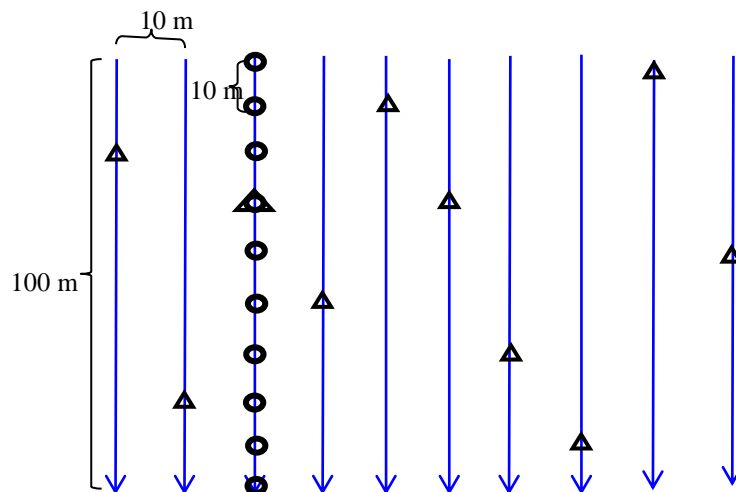
خاک‌های مختلف ویژگی‌های طیفی متفاوت دارند. بر اساس فاکتورهای خاکسازي منطقه، شاخص‌هایی از قبیل شاخص‌های گیاهی، شاخص رس، شاخص کربنات، شاخص گچ و شاخص شوری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده ETM+ محاسبه شد (جدول ۱). شاخص‌های سنجش از دور و پارامترهای سرزمین در نرم‌افزار SAGA به سیستم مرجع جهانی یکسانی (WGS 84 UTM 40) تبدیل شدند.

طرح نمونه‌برداری

نمونه‌برداری توسط دستگاه GPR و EMI در شش سایت در منطقه مورد مطالعه انجام شد. در هر سایت، نمونه‌برداری توسط GPR در طول ۱۰ ترانسکت به طول ۱۰۰ متر با فاصله خطوط حدود ۱۰ متر انجام شد. نمونه‌برداری توسط EMI در امتداد ترانسکت‌های نمونه‌برداری شده توسط GPR در نقاطی به فواصل ۱۰ متر انجام شد. ده نمونه خاک به طور تصادفی در هر سایت از عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری جمع‌آوری شد (شکل ۱). توزیع اندازه ذرات در نمونه‌های خاک هواخشک شده و عبور داده شده از الک ۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شد.

جدول ۱- داده‌های محیطی مورد استفاده به عنوان متغیرهای پیش‌بینی کننده در مدل‌سازی

تشریح	نام	ماهیت فاکتور	مقیاس	داده‌های محیطی
Elevation (m)	EL	توپوگرافی	۳۰ متر	مدل رقومی ارتفاع (DEM)
Slope angle (%)	SL			
Aspect	As			
Profile Curvature	PrCur			
Plan Curvature	PlCur			
Topographic Wetness Index	TWI			
Multi-resolution Valley Bottom Flatness index	MrVBF			
Stream Power Index	SPI			
Catchment Slope	CS			
Catchment Area	CA			
Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	انعکاس نور		تصویر لندست (ETM+)
Ratio Vegetation Index	RVI			
Perpendicular Vegetation Index	PVI			
Clay Index	CI			
Salinity Index	SI			
Gypsum Index	GI			



شکل ۱- طرح نمونه‌برداری با دستگاه‌های ژئوفیزیکی، ترانسکت‌های نمونه‌برداری شده توسط دستگاه GPR (خطوط آبی) نقاط نمونه‌برداری شده توسط دستگاه EMI (دایره توخالی) نمونه‌های خاک (مثلث توخالی)

روش مجذور مربعات اثر متقابل خودکار (CHAID)

الگوریتم CHAID، توسط کاس (۱۹۸۰) توسعه داده شد، که به‌طور خودکار مهم‌ترین متغیرها را بر اساس آزمون مجذور کای^۱ (X²) برای اندازه‌گیری ارتباط بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل تعیین می‌کند. CHAID همچنین می‌تواند به عنوان یک روش اکتشافی برای طبقه‌بندی اطلاعات استفاده شود.

در درخت تصمیم CHAID، از گروه‌های همگن تولید شده توسط درخت، که توسط یک مقدار به‌دست آمده از مجذور کای، با کلاس C و K برای هر گره درخت استفاده می‌شود:

$$X^2 = \sum_{c=1}^c \sum_{k=1}^k \frac{(n_{ck} - \hat{n}_{ck})^2}{\hat{n}_{ck}} \approx X^2 (C-1)(K-1) \quad (1)$$

^۱. Chi-Square

که در آن nck فراوانی مشاهده شده برای سلول ck و $\check{n}ck$ فراوانی قابل انتظار تحت فرض صفر است. در روش CHAID، پارامتر اسپیلون برای حداکثر تکرار و همگرایی به ترتیب 0.001 و 100 تنظیم شد. برای توسعه مدل CHAID از نرم افزار SPSS 16 استفاده شد

معیارهای ارزیابی مدل CHAID

برای بررسی دقت مدل CHAID برای تخمین مقدار رس از پارامترهای میانگین خطا^۱ (ME)، میانگین ریشه مربعات خطا^۲ (RMSE) و درصد خطای مطلق^۳ (AEP) استفاده شد.

$$MEE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P(xi) - M(xi)] \quad (2)$$

$$RMEE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P(xi) - M(xi)]^2} \quad (3)$$

$$AEP = \frac{\sum_{i=1}^n |P(xi) - M(xi)|}{\sum_{i=1}^n M(xi)} \times 100 \quad (4)$$

که در آن $P(xi)$ نشان دهنده مقدار پیش بینی شده، $M(xi)$ مقدار اندازه گیری شده و n تعداد کل مشاهدات است. هر چه ME و RMSE به صفر نزدیک باشد، تکنیک با دقت قابل قبولی عمل کرده است.

نتایج و بحث

آمار توصیفی مقدار رس خاک و داده های ژئوفیزیکی بررسی شد. نتایج نشان داد که متغیر رس از توزیع نرمال تبعیت می کند. همچنین مقدار رس دارای ضریب تغییرات ۴۵ درصد بود. این موضوع نشان دهنده تنوع مقدار رس خاک در اثر تغییرات زیاد ویژگی های خاک سطحی در شش سایت مورد مطالعه است که احتمالاً مربوط به فرآیندهای توزیع مجدد خاک از جمله فرسایش آبی و بادی در منطقه مورد مطالعه است.

برای تعیین روابط بین مقدار رس و داده های ورودی (داده های ژئوفیزیکی و داده های کمکی)، تجزیه همبستگی انجام شد. نتایج نشان داد که رابطه منفی معنی داری بین مقدار رس خاک و داده های GPR و روابط مثبت معنی داری با داده های EMI وجود دارد که در توافق با نتایج به دست آمده توسط دنبندتو و همکاران (۲۰۱۲) بود. اگر چه ضریب همبستگی به دست آمده در این مطالعه نسبت به مطالعات دیگر بالا نبود، اما به خوبی رابطه بین مقدار رس و داده های GPR/EMI را نشان می دهد.

مقدار رس خاک نشان داد که به طور قابل توجهی همبستگی مثبت با شاخص های سنجش از دور همبستگی منفی با داده توپوگرافی دارد. همبستگی مثبت بین CI (شاخص رس) و مقدار رس توسط محققان دیگر هم گزارش شده است. همچنین، رابطه مثبت بین NDVI و مقدار رس، تأثیر مثبت مقدار رس برای افزایش پوشش گیاهی بیشتر در برخی از بخش های منطقه مورد مطالعه را با افزایش آب و مواد مغذی قابل دسترس، را تأیید کرد.

نتایج استفاده از روش CHAID برای تشخیص مهم ترین عوامل مؤثر بر تنوع مقدار رس خاک در منطقه مورد مطالعه در شکل ۲ ارائه شده است. متغیرهای CI ، SPI ، $MrVBF$ ، TWI و CI به عنوان ترکیب مؤثر از داده های کمکی بر تنوع مقدار رس معرفی شدند. شاخص $MrVBF$ برای تشخیص پایین دره و شیب تپه استفاده می شود، که این پستی و بلندی و مسطح بودن در حرکت جریان آب اثرگذار است. پارامتر TWI برای توصیف اثرات توپوگرافی بر محل و اندازه مناطق اشباع شده و مشخص کردن تنوع مکانی دقیق تر ویژگی های خاک به دلیل هیدرولوژی استفاده می شود. همچنین شاخص SPI قدرت فرسایشی جریان آب را بیان می کند و یکی از فاکتورهای تغییرپذیری مقدار رس در منطقه مورد مطالعه است. مقدار R^2 برای پیش بینی مقدار رس با

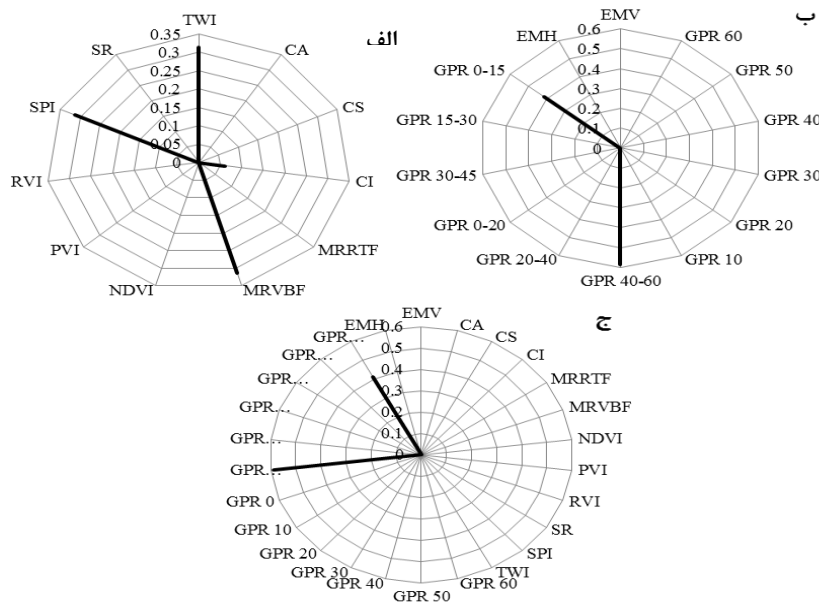
1. Mean error

2. Root mean squared error

3. Absolute error percentage

استفاده از مدل CHAID ساخته شده با داده های ورودی پارامترهای سرزمین و سنجش از دور ۷۹ درصد محاسبه گردید (جدول ۲).

از بین داده های ورودی ژئوفیزیکی، $GPR(0-15)$ ($\text{ضریب تأثیر} = 0/413$) و $GPR(40-60)$ ($\text{ضریب تأثیر} = 0/587$) مهم ترین متغیرها برای پیش بینی مقدار رس بودند. مدل CHAID پیشنهادی با استفاده از داده های ژئوفیزیکی تنها ۵۷ درصد تغییرات رس توجیه کرد (جدول ۲). کانی های رسی با توجه به ویژگی های الکتریکی خاصی که در ساختار فیزیکوشیمیایی آنها وجود دارد و با توجه به وجود بار منفی در سطح خود و تبادل کاتیونی، می توانند باعث ایجاد ویژگی های الکتریکی خاص در خاک های مختلف شوند. دنبندتو و همکاران (۲۰۱۲) مزایای قابل توجهی در استفاده از داده های ژئوفیزیکی برای توصیف مقدار رس در خاک گزارش کردند.



شکل ۲- فاکتورهای مؤثر بر پیش بینی مقدار رس با استفاده از مدل CHAID، الف) مقدار رس و داده های توپوگرافی و سنجش از دور، ب) مقدار رس و داده های ژئوفیزیکی، ج) مقدار رس و داده های ترکیبی

استفاده از ترکیب داده های ژئوفیزیکی و کمکی به عنوان ورودی مدل CHAID نشان داد که داده های GPR دارای بیشترین اثر در تنوع رس خاک دارند. این نتایج روابط آماری بین مقدار رس در لایه های سطحی و داده های GPR را تأیید می کند. با این حال، داده EMI یا متغیرهای کمکی اثر قابل توجهی در پیش بینی مقدار رس نداشتند. جدول ۲ نشان می دهد که مقدار R^2 برای پیش بینی مقدار رس با استفاده از مدل CHAID ساخته شده با استفاده از داده های ترکیبی به ۸۲ درصد اندازه گیری شد. نتایج مدل CHAID با مجموعه داده ترکیبی نشان داد که داده های ژئوفیزیکی مهم ترین متغیرهای برای برآورد مقدار رس خاک در منطقه مورد مطالعه می باشند.

جدول ۲- معیارهای ارزیابی عملکرد مدل CHAID در پیش بینی مقدار رس خاک

معیارهای ارزیابی عملکرد				داده های ورودی	متغیر هدف
R^2	AEP	RSME	ME		
۷۹	۱۹/۱۰	۳/۴۳	۰/۶۵	داده های توپوگرافی و سنجش از دور	رس
۵۷	۲۸/۸۶	۴/۶۶	۰/۲۷	داده های ژئوفیزیکی (GPR و EMI)	
۸۲	۱۹/۹۳	۳/۴۱	۰/۶۷	ترکیب داده های کمکی و ژئوفیزیکی	

مقایسه مجموعه داده های ورودی نشان می دهد که روش CHAID هنگامی که ترکیب داده های کمکی و ژئوفیزیکی به عنوان داده های ورودی هستند پیش بینی های دقیق تری از مقدار رس را فراهم می کند (جدول ۲). معیارهای ارزیابی عملکرد آماری

مدل CHAID با داده‌های ورودی مختلف مؤید این مطلب است. بنابراین، هنگامی که هدف مطالعه رابطه بین ویژگی‌های قابل دسترس و مقدار رس است، الگوریتم CHAID مطلوب عمل کرد. توث و همکاران (۲۰۱۲) از برخی توابع انتقالی بر اساس مدل CHAID و اطلاعات خاک در دسترس به‌عنوان متغیرهای ورودی استفاده کردند. آن‌ها بیان کردند که روش‌های طبقه‌بندی درختی (مانند، رگرسیون درختی و CHAID) در مدل‌سازی روابط پیچیده بین ویژگی‌های خاک مناسب هستند.

اکنون چالش‌های علمی برای به‌دست آوردن یک مدل با وضوح و دقت بالا برای ویژگی‌های خاک نظیر رس خاک با استفاده از داده‌های ژئوفیزیکی به‌عنوان متغیرهای کمکی وجود دارد. با این حال، پژوهش‌های بیشتری ضروری است که بدانیم چگونه می‌توان مقدار رس و تنوع آن را از داده‌های ژئوفیزیکی (مانند GPR و EMI) پیش‌بینی کرد، زیرا عواملی از قبیل نوع سنسور، شرایط محیطی و ویژگی‌های خاک ممکن است بر نتایج تأثیرگذار باشد.

این نتایج ممکن است محققان دیگر را در استفاده از داده‌های ژئوفیزیکی به‌عنوان متغیر کمکی و الگوریتم CHAID برای بهبود برآورد مقدار رس خاک تشویق کنند. با این حال، تحقیقات بیشتری در این زمینه، به ویژه برای خاک‌ها و شیوه‌های مدیریتی مختلف مورد نیاز است. در نهایت، ما بر این باوریم که روش معرفی‌شده یک ابزار جدید برای تخمین کمی رس خاک به‌عنوان یک مدل جایگزین برای مدل‌های خطی معمولی موجود (به‌ویژه با استفاده از داده‌های ژئوفیزیکی به‌عنوان ورودی به مدل) برای پیش‌بینی مدلی با حداقل خطا و بالاترین بهره‌وری خواهد شد.

منابع

- Behrens T., Zhu A.X., Schmidt K. and Scholten T. 2010. Multi-scale digital terrain analysis and feature selection for digital soil mapping. *Geoderma*, 155: 175–185.
- De Benedetto D., Castrignano A., Sollitto D., Modugno F., Buttafuoco G. and Papa G. .. 2012. Integrating geophysical and geostatistical techniques to map the spatial variation of clay. *Geoderma*, 171-172: 53–63.
- Hengl T., Toomanian N., Reuter H.I. and Malakouti M.J. 2007. Methods to interpolate soil categorical variables from profile observations: lessons from Iran. *Geoderma*, 140: 417–427.
- Janis L.B., Howell D.W., Moore A.C., Hartemink A.E. and Kienast-Brown S. 2010. *Digital Soil Mapping Bridging Research, Environmental Application, and Operation*. Springer, New York.
- Kass, G. V. 1980. An exploratory technique for investigating large quantities of categorical data. *Application Statistic*, 29 (2): 119–127.
- Sarwar Khan, F. 2012. Mapping soil properties and water table depths using electromagnetic induction methods. *MSC Thesis*. Agriculture College, Dalhousie University Halifax.
- Soil Survey Staff. 2010. *Keys to Soil Taxonomy*, 11th, NRCS, USDA.
- Stelman C.M., Kennedy C.S. and Parker B.L. 2015. Geophysical conceptualization of a fractured sedimentary bedrock riverbed using ground-penetrating radar and induced electrical conductivity. *Journal of Hydrology*, 521: 433–446.
- Tóth B., Makó A., Guadagnini A. and Tóth G. 2012. Water Retention of Salt-Affected Soils: Quantitative Estimation Using Soil Survey Information. *Arid Land Research Management*, 26: 103-121.

Using of auxiliary data and geophysical techniques (ground penetration radar and electromagnetic induction) to estimate soil clay

F. Abbaszadeh Afshar¹, Sh. Ayoubi², H. Khademi², A. Jafari³

1- Assistant Professor, Department of Soil Science, Collage of Agriculture, Jiroft University, 2- Professor, Department of Soil Science, Collage of Agriculture, Isfahan University of Technology and 3- Assistant Professor, Department of Soil Science, Collage of Agriculture, Bahonar University of Kerman

Abstract

Standard soil survey procedures are extremely time consuming and costly. Because of these limitations, other methods for sampling and mapping are being considered. To generate soil data, a combination of digital soil mapping approaches and remote and proximal soil sensing techniques is most promising. However, a feasible and reliable combination of these technologies for the investigation of large areas (e.g. catchments and landscapes) and the assessment of soil degradation threats is still missing. This study was conducted to estimate soil clay content in two depths using geophysical techniques (Ground Penetration Radar and Electromagnetic Induction) and ancillary variables (remote sensing and topographic data) in an arid region of the southeastern Iran. The results showed that the geophysical data were the most important variables influencing the estimation of clay content. The CHAID technique showed a greater potential in predicting soil clay content from geophysical and ancillary data. Overall, the results may encourage researchers in using georeferenced GPR and EMI data as ancillary variables and CHAID algorithm to improve the estimation of soil clay content.

Keywords: Topographic attributes, Remote sensing, Ground penetrating radar, Electromagnetic induction, Clay