

برآورد رطوبت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم با استفاده از توابع انتقالی طیفی

چیمین مهدی‌زاده^{۱*}، حسین بیات^۲، مسعود داوری^۳

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

(Chimanmehdizadeh@gmail.com)

۲- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

(h.bayat@basu.ac.ir)

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

(m.davari@uok.ac.ir)

چکیده

ویژگی‌های نگره‌داری آب خاک، نظیر رطوبت ظرفیت زراعی (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) نقش مهمی در مدیریت بهینه منابع آب در کشاورزی دارد. با این حال اندازه‌گیری مستقیم این ویژگی‌ها در نقاط مختلف مزرعه همواره عملی نیست. هدف از این مطالعه برآورد FC و PWP، با استفاده الگوریتم جنگل تصادفی از طریق توابع انتقالی طیفی مرئی-مادون قرمز نزدیک (Vis-NIR) می‌باشد. بدین منظور، ۱۳۰ نمونه خاک از ۵ استان کشور جمع‌آوری و ویژگی‌های خاکی و طیفی آنها اندازه‌گیری شد. ۶ تابع انتقالی در دو گام طراحی و داده‌ها به دو مجموعه آموزش (۹۰ نمونه) و تست (۴۰ نمونه) تقسیم شدند. برای افزایش دقت مدل‌ها علاوه بر روش بدون پیش‌پردازش (NP)، از روش‌های پیش‌پردازش تصحیح پخشیده چندگانه (MSC)، مشتق اول و دوم همراه با فیلتر ساویتزکی-گلای (FD-SG, FD-SG2) و متغیر نرمال استاندارد (SNV) استفاده شد. نتایج نشان داد که در مرحله آموزش (SNV) PTF6 برای FC و (NP) PTF2 برای PWP بهترین عملکرد را داشته و معیار اطلاعات آکایک را به طور قابل توجهی کاهش دادند. هم‌چنین تحلیل مؤلفه‌های اصلی، طول‌موج‌های کلیدی ۱۴۱۴، ۱۹۱۲ و ۲۱۵۰ نانومتر را برای PWP و طول موج ۴۰۹ نانومتر برای FC شناسایی کرد. این پژوهش نشان داد که ترکیب داده‌های طیفی و خاکی با الگوریتم جنگل تصادفی، رویکردی دقیق و مقرون به صرفه برای تخمین FC و PWP فراهم می‌آورد.

کلید واژه: بازتاب طیفی Vis-NIR، توابع انتقالی، جنگل تصادفی، ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم

مقدمه

رطوبت خاک یکی از عوامل کلیدی موثر بر رشد و توسعه گیاهان و نیروی محرکه‌ای اساسی برای پایداری بسیاری از اکوسیستم‌های زمینی و بهره‌وری کشاورزی است. اهمیت این عامل در شرایط کنونی با توجه به چالش‌های جهانی آب و تغییرات اقلیمی افزایش یافته است. تغییرات رطوبت خاک می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر پوشش گیاهی و خواص فیزیکی و شیمیایی خاک داشته باشد (کایسرمن و همکاران، ۲۰۱۷). در این میان دو پارامتر کلیدی هیدرولیکی خاک، یعنی رطوبت ظرفیت زراعی (FC)^۱ و رطوبت پژمردگی دائم (PWP)^۲ به عنوان شاخص‌های اصلی در مطالعه نفوذپذیری، ظرفیت نگره‌داری آب خاک، برنامه ریزی آبیاری و ارزیابی تنش آبی

¹ Field capacity

² Permanent wilting point

گیاهان شناخته می‌شوند، که توسط منحنی نگهداری آب خاک (SWRC)^۳ مشخص می‌شوند (نویدی و همکاران، ۲۰۲۱). با این حال، به دلیل سختی اندازه‌گیری مستقیم این ویژگی‌ها، زمان بر و پرهزینه بودن آنها (کیاو و همکاران، ۲۰۱۹). توسعه روش‌های غیرمستقیم و سریع برای تخمین این پارامترها، به ویژه با بهره‌گیری از توابع انتقالی خاک (PTFs)^۴ و فناوری نوین طیف سنجی در ناحیه مرئی-مادون قرمز نزدیک (Vis-NIR)^۵ به یک ضرورت علمی و عملی تبدیل شده است.

در دهه‌های اخیر، توابع انتقالی و داده‌های طیفی به عنوان جایگزین‌های سریع و غیرمخرب برای تخمین ویژگی‌های رطوبتی خاک با استفاده از الگوریتم‌های مختلف مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. این توابع، توابع برآوردکننده‌ای هستند که با استفاده از داده‌های زودیافت خاک، مانند ماده‌آلی، جرم مخصوص ظاهری و توزیع اندازه ذرات، ویژگی‌های دیر یافت خاک مانند ویژگی‌های هیدرولیکی را برآورد می‌کنند (بیات و همکاران، ۲۰۱۹، راستگو و همکاران، ۲۰۲۰). امسیلی و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که مدل‌های جنگل تصادفی (RF)^۱ در برآورد PWP، FC و ظرفیت آب قابل دسترس عملکرد بهتری نسبت به رگرسیون خطی چندگانه داشتند.

فناوری‌های طیف سنجی در محدوده Vis-NIR به دلیل حساسیت بالا به تغییرات فیزیکی و شیمیایی خاک، روشی سریع، ساده و کم هزینه برای تخمین خواص خاک مانند رطوبت محسوب می‌شوند (داوری و همکاران، ۲۰۲۱، آلو و همکاران، ۲۰۲۰). ترکیب داده‌های طیفی با مدل‌های یادگیری ماشین مانند جنگل تصادفی می‌تواند دقت پیش بینی پارامترهای رطوبتی را بهبود بخشد. اما بیشتر مدل‌های توسعه یافته تنها در مناطق یا بافت‌های خاص اعتبارسنجی شده‌اند و در شرایط خاکی و اقلیمی متنوع، دقت و قابلیت تعمیم کافی ندارند (کوپر و همکاران، ۲۰۲۱). از آنجا که پژوهش‌های گذشته کارایی طیف سنجی مرئی-مادون قرمز نزدیک در پیش بینی ویژگی‌های پایه خاک را اثبات کرده‌اند (داوری و همکاران، ۲۰۲۱، استنبرگ، ۲۰۱۰، ژانگ و همکاران، ۲۰۲۰)، با این حال پژوهش‌های اندکی (بنیچ و همکاران، ۲۰۲۳، دیاو و همکاران، ۲۰۲۱ و بابائیان و همکاران، ۲۰۱۵) در خصوص استفاده از داده‌های طیفی VIS-NIR در برآورد پارامترهای FC و PWP انجام شده است. بنابراین هدف از پژوهش حاضر توسعه و اعتبار سنجی یک مدل ترکیبی مبتنی بر داده‌های خاکی و طیفی در ناحیه VIS-NIR و الگوریتم جنگل تصادفی برای تخمین پارامترهای FC و PWP در خاک‌های مختلف بود.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، به منظور تعیین پارامترهای FC و PWP، ۱۳۰ نمونه خاک دست خورده و دست نخورده از عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری سطح خاک با استفاده از سیلندرهای استیل از ۵ استان، (همدان، کرمانشاه، آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و مازندران) برداشت شد. نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه، هوا خشک شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند، تا برای انجام آزمایش‌های فیزیکی، شیمیایی، ویژگی‌های هیدرولیکی و انجام کارهای طیف سنجی آماده شوند. بافت خاک به روش هیدرومتر اندازه‌گیری شد (گی و ار، ۲۰۰۲). برای اندازه‌گیری جرم مخصوص ظاهری خاک از نمونه‌های خاک دست خورده و به روش استوانه‌های نمونه‌برداری، استفاده شد (بلاک و هارتگه، ۱۹۸۶). برای تعیین FC و PWP، رطوبت نمونه‌های دست‌نخورده خاک به ترتیب در مکش‌های ۳۳ و ۱۵۰۰ کیلو پاسکال با دستگاه صفحات فشاری اندازه‌گیری شد.

³ Soil water retention curve

⁴ Soil pedotransfer function

⁵ Visible -near-infrared spectroscopy

بازتاب طیفی نمونه‌ها با بهره‌گیری از دستگاه اسپکترومتر زمینی (FieldSpec®3, ASD, FR, USA) در دامنه Vis-NIR (۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر) اندازه‌گیری شد. نمونه‌های خاک هوا خشک، و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند، ۱۰۰ گرم از هر نمونه در پتری دیش قرار داده شد و منحنی‌های طیفی آنها اندازه‌گیری شد (ویسکارا روسل، ۲۰۰۸). به منظور افزایش دقت، هر نمونه ۵ بار در موقعیت‌های مختلف قرائت شد. داده‌های طیفی پس از ثبت توسط نرم افزار View Spec Pro 6.0.15، میانگین‌گیری و سپس این منحنی‌ها به شکل کتابخانه‌های طیفی در قالب فایل متنی ذخیره شدند و جهت اعمال روش‌های مختلف پیش پردازش تصحیح پخشیده چندگانه (MSC)^۷، مشتق اول به همراه فیلتر ساویتزگی و گلای (FD-SG1)^۸، مشتق دوم به همراه فیلتر ساویتزگی و گلای (FD-SG2)^۹ و متغیر نرمال استاندارد (SNV)^{۱۰}، به نرم افزار Parles v3.1 منتقل شدند (ویسکارا روسل، ۲۰۰۸). بخش ابتدایی و انتهایی طیف‌ها (محدوده بین ۴۰۰-۳۵۰ و ۲۵۰۰-۲۴۵۱) به دلیل نویز زیاد حذف شده و در مدلسازی نیز مورد استفاده قرار نگرفت (چتر نوری و همکاران، ۲۰۲۳).

قبل از توسعه PTFs، داده‌ها مورد پیش پردازش قرار گرفتند که شامل حذف داده‌های پرت، بررسی نرمال بودن با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف، تبدیل داده‌های غیرنرمال به نرمال و استانداردسازی (میانگین صفر و واریانس ۱) بود. همبستگی بین متغیرهای ورودی و خروجی با نرم افزار spss16 بررسی شد. به منظور کاهش ابعاد داده‌های طیفی و شناسایی مهم‌ترین ویژگی‌ها، تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA)^{۱۱} اعمال شد (جولیف و کادیم، ۲۰۱۶). سپس از مولفه‌های اصلی که بالاترین درصد توجیه واریانس را داشتند به عنوان تخمین‌گر برای تخمین FC و PWP از طریق توابع مختلف استفاده شد.

برای توسعه PTFs، ۶ PTF به منظور پیش بینی پارامترهای FC و PWP ایجاد شد. داده‌ها به دو گروه آموزش (۹۰ نمونه) و تست (۱۰ نمونه) تقسیم گردیدند و مدل‌سازی با الگوریتم جنگل تصادفی در نرم افزار STATISTICA انجام و اعتبارسنجی شد. PTFs در دو مرحله ایجاد شدند: در مرحله اول، برای ایجاد PTF1، که به‌عنوان مدل پایه در نظر گرفته شد، سن، رس و BD^{۱۲} به عنوان متغیرهای ورودی استفاده شدند. در مرحله دوم، برای ایجاد PTF2 تا PTF6، مولفه‌های اصلی انتخاب شده داده‌های طیفی در روش بدون پیش‌پردازش و روش‌های پیش پردازش طیفی MSC، FD-SG1، FD-SG2 و SNV بودند، به عنوان ورودی‌های جدید به متغیرهای ورودی PTF1 افزوده شدند. از میان این روش‌ها هر تابعی که منجر به کاهش معیار اطلاعات آکایک (AIC)^{۱۳}، نسبت به روش بدون پیش پردازش (PTF2) شد، با مدل پایه مقایسه گردید. در نهایت، برای ارزیابی دقت و اعتبار مدل‌های توسعه یافته از آماره‌های معیار اطلاعات آکایک (AIC)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)^{۱۴}، ضریب تعیین (R²)^{۱۵} و میانگین خطا (ME)^{۱۶} استفاده شد.

نتایج و بحث

برآورد FC با استفاده از داده‌های طیفی

⁷ Multiplicative signal correction

⁸ First derivative with savitzi gavlay filter

⁹ The second derivative with a savitz-golay filter

¹⁰ Standard normal variate

¹¹ Principal component analysis

¹² Bulk density

¹³ Akaike's Information Criterion

¹⁴ Root mean square error

¹⁵ Coefficient of determination

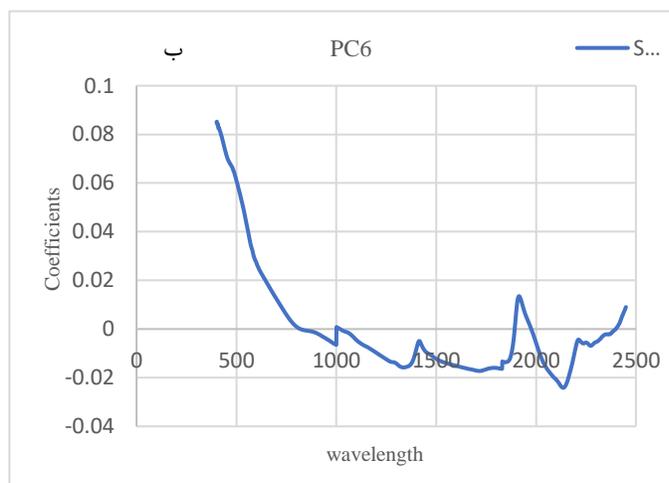
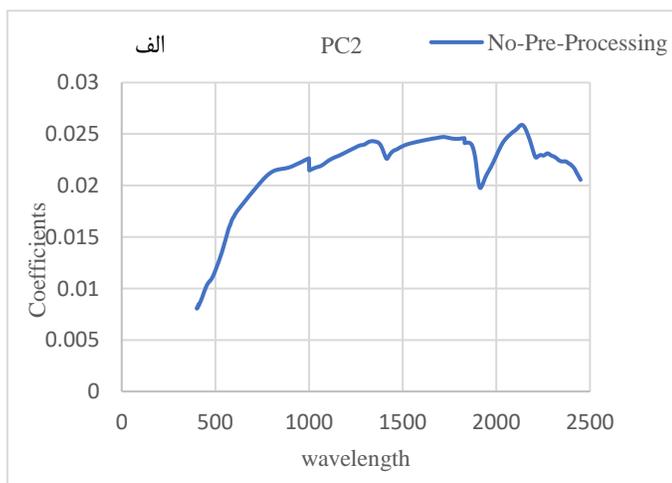
¹⁶ Mean error

پارامتر FC با استفاده از داده‌های طیفی و ویژگی‌های خاک با استفاده از PTF1-6 برآورد شد. نتایج نشان داد که با مقایسه بین PTF های مرحله دوم (PTF2-PTF6)، در مرحله آموزش، PTF6 (SNV) دارای AIC منفی‌تر نسبت به مدل پایه و توابع دیگر بود (جدول ۱). ولی هیچ کدام از توابع ایجاد شده در مرحله تست بر اساس معیار اطلاعات آکایک در برآورد پارامتر FC بهبود معنی‌داری نسبت به PTF1 ایجاد نکردند (جدول ۱). همچنین نتایج تحلیل PCA نشان داد که اولین مولفه اصلی داده‌های طیفی پردازش شده با روش متغیر نرمال استاندارد (PCSNV) در محدوده طول موج ۴۰۹ نانومتر دارای ارتباط با متغیرهای خروجی بودند (شکل ۱-ب).

جدول ۱- نتایج تخمین FC از طریق RF با استفاده از متغیرهای ورودی مختلف

CM	Test				CM	Train				FC
	AIC	R ²	RMSE	ME		AIC	R ²	RMSE	ME	
	-۲۲۱	۰/۳۴۵	۰/۰۶۱۷	-۰/۰۰۹		-۵۱۳/۱	۰/۴۷۹	۰/۰۵۷۹	-۰/۰۰۰۵	PTF1
۱	-۲۲۱/۱	۰/۳۵۱	۰/۰۶۲۰	-۰/۰۰۵	۱	-۵۳۶/۵	۰/۵۴۷	۰/۰۵۰۲۷	-۰/۰۰۰۱	PTF2 (NP)
۱	-۲۲۳/۱	۰/۳۸۴	۰/۰۶۰۲	-۰/۰۰۲	۱	-۵۳۹/۶*	۰/۵۶۲	۰/۰۴۹۴	-۰/۰۰۰۸	PTF3 (MSC)
۱	-۲۲۰/۵	۰/۳۲۸	۰/۰۶۲۲	-۰/۰۰۲	۱	-۵۳۸/۹*	۰/۵۵۰	۰/۰۴۹۵	-۰/۰۰۰۶	PTF4 (FD-SG1)
۱	-۲۲۰/۲	۰/۳۷۲	۰/۰۶۲۳	-۰/۰۰۴	۱	-۵۳۹/۴*	۰/۵۴۳	۰/۰۴۹۴	-۰/۰۰۰۱	PTF5 (FD-SG2)
۱	-۲۲۰/۶	۰/۳۸۰	۰/۰۶۲۰	-۰/۰۰۴	۱	-۵۴۰/۱*†	۰/۵۴۹	۰/۰۴۹۲	-۰/۰۰۰۸	PTF6 (SNV)

* نشان دهنده تفاوت معنی‌دار بین هر تابع با تابع مقایسه شونده آن می‌باشد. † نشان دهنده تفاوت معنی‌دار بین هر کدام از توابع ۳ تا ۶ (روش‌های پیش پردازش) با تابع ۲ (روش بدون پیش پردازش) می‌باشد. FC: رطوبت ظرفیت مزرعه، ME: میانگین خطا، RMSE: مجذور میانگین مربعات خطا، R²: ضریب تعیین، AIC: معیار اطلاعات آکایک، CM: مدل مقایسه شونده، PTF2 (NP): داده‌های بدون پیش پردازش، PTF3 (MSC): تصحیح پراکندگی چندگانه، PTF4 (FD-SG1): مشتق اول به همراه فیلتر ساویتزکی و گلائی، PTF5 (FD-SG2): مشتق دوم به همراه فیلتر ساویتزکی و گلائی، PTF6 (SNV): متغیر نرمال استاندارد و RF: جنگل تصادفی.



شکل ۱- ضرایب مولفه‌های اصلی در مقابل طول موج برای PC2: اولین مولفه اصلی داده‌های طیفی پردازش شده با روش بدون پیش پردازش (PCNP) و PC6: اولین مولفه اصلی داده‌های طیفی پردازش شده با روش (PCSNV) SNV.

PTF6 در این تابع از اولین مؤلفه اصلی داده‌های طیفی پردازش شده با روش متغیر نرمال استاندارد (PCSNV) به همراه تخمین‌گرهای PTF1 در برآورد پارامتر FC بهره‌گیری شد. استفاده از SNV با به کار بردن تبدیلات خطی بر روی هر طیف، سبب حذف خطاهای چندگانه ناشی از پراکنش و نیز اندازه ذرات خاک و ناهمواری‌های سطحی می‌شود (استوری و هلمایی، ۲۰۱۹)، که این امر موجب بهبود کیفیت سیگنال طیفی و افزایش دقت استخراج اطلاعات مرتبط با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک می‌شود. دوتو و همکاران (۲۰۱۸) جهت تخمین میزان ماده آلی در ۵۹۲ نمونه خاک بهترین عملکرد را در روش پیش پردازش SNV گزارش نمودند.

در PCSNV بیشترین ضریب با مقادیر بازتاب طیفی در محدوده مرئی در طول موج ۴۰۹ نانومتر بود (شکل ۱-ب). رطوبت FC با محتوای رس، ماده آلی و تخلخل کل همبستگی مثبت دارد ($r=0.383^{**}; 0.196^{*}; 0.285^{**}$). بازتاب در محدوده طول موج مرئی، تحت تاثیر پارامترهایی از خاک مانند ساختمان خاک، بافت، رطوبت و ماده آلی خاک قرار می‌گیرد (پادرین و همکاران، ۲۰۱۹)، از طرفی هم دقت برآورد رطوبت خاک هم تحت تاثیر رس، ماده آلی، تخلخل خاک و توزیع آنها قرار دارد (مایینی و همکاران، ۲۰۲۱). بنابراین اثر مشخصه‌های جذبی در طول موج ۴۰۹ نانومتر برای تخمین FC را می‌توان به کانی‌های رسی و میزان ماده آلی نسبت داد. چرا که مواد آلی و رس به علت دارا بودن سطح ویژه بالا، قدرت جذب و نگه‌داشت زیاد و گنجایش تبادل کاتیونی زیاد موجب افزایش رطوبت در همه مکش‌ها می‌شوند (مایینی و همکاران، ۲۰۲۱). این ممکن است به دلیل ریزمنافذ زیاد در بافت رسی و عامل اتصال دهندگی ماده آلی با بهبود ساختمان خاک باشد که حتی پس از تخلیه آب گرانشی آزاد پس از اشباع، می‌تواند آب بیشتری را در خود نگه دارد (روت و ارولموژیلان، ۲۰۱۹). در همین راستا استنبرگ و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند مشخصه‌های جذبی در ناحیه مرئی را می‌توان به کانی‌های رسی از جمله گنویت نسبت داد. کانی گنویت در طول موج‌های ۴۲۰، ۴۶۰ و ۴۸۰ نانومتر دارای بازتاب طیفی در محدوده مرئی است. نوکیتا و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که ویژگی‌های جذبی در طول موج‌های ۴۱۰ و ۵۱۰ نانومتر همبستگی خوبی با میزان ماده آلی دارد. از این رو، استفاده از داده‌های طیفی به عنوان ورودی در مدل‌های پیش‌بینی ظرفیت زراعی، با بهبود تخمین رطوبت خاک و دیگر ویژگی‌های مرتبط، موجب کاهش خطا و بهبود معیارهای آماری مانند AIC می‌شود.

برآورد PWP با استفاده از داده‌های طیفی

پارامتر PWP با استفاده از داده‌های طیفی و ویژگی‌های خاک از طریق PTF1-6 برآورد شد. با مقایسه بین PTF‌های مرحله دوم (PTF2-PTF6)، در مرحله آموزش (NP) PTF2 دارای AIC منفی‌تر نسبت به مدل پایه و توابع دیگر بودند (جدول 2). ولی هیچ کدام از توابع ایجاد شده در مرحله تست بر اساس معیار اطلاعات آکایک در برآورد پارامتر PWP بهبود معنی‌داری نسبت به PTF1 ایجاد نکردند (جدول ۲)، از طرفی نتایج تحلیل PCA نشان داد که اولین مؤلفه اصلی داده‌های طیفی پردازش شده با روش بدون پیش پردازش (PCNP) در محدوده طول موج‌های ۱۴۱۴، ۱۹۱۲ و ۲۱۵۰ نانومتر، دارای ارتباط با متغیرهای خروجی بودند (شکل ۱-الف).

جدول 2- نتایج تخمین PWP از طریق RF با استفاده از متغیرهای ورودی مختلف

CM	Test				CM	Train				PWP
	AIC	R ²	RMSE	ME		AIC	R ²	RMSE	ME	
	-۲۶۴/۲	۰/۵۵۹	۰/۰۳۵۸	-۰/۰۰۲		-۵۸۰/۲	۰/۵۶۸	۰/۰۳۹۳	-۰/۰۰۰۳	PTF1
۱	-۲۵۰/۸	۰/۴۷۵	۰/۰۴۲۹	-۰/۰۰۲	۱	-۶۱۲/۳*	۰/۶۵۳	۰/۰۳۲۹	-۰/۰۰۰۳	PTF2 (NP)
۱	-۲۵۲/۱	۰/۴۹۳	۰/۰۴۲۴	-۰/۰۰۴	۱	-۶۰۶/۹	۰/۶۳۶	۰/۰۳۳۹	-۰/۰۰۱	PTF3 (MSC)
۱	-۲۵۴/۵	۰/۴۹۸	۰/۰۴۱۳	-۰/۰۰۴	۱	-۶۰۵/۱	۰/۶۳۸	۰/۰۳۴۳	-۰/۰۰۰۵	PTF4 (FD-SG1)
۱	-۲۵۱/۶	۰/۴۹۲	۰/۰۴۲۶	-۰/۰۰۳	۱	-۶۰۶/۳	۰/۶۳۰	۰/۰۳۴۱	-۰/۰۰۰۴	PTF5 (FD-SG2)
۱	-۲۵۲/۴	۰/۵۰۴	۰/۰۴۲۱	-۰/۰۰۴	۱	-۶۰۹/۵*	۰/۶۵۲	۰/۰۳۳۵	-۰/۰۰۰۹	PTF6 (SNV)

* نشان دهنده تفاوت معنی دار بین هر تابع با تابع مقایسه شونده آن می باشد. † نشان دهنده تفاوت معنی دار بین هر کدام از توابع ۳ تا ۶ (روش‌های پیش پردازش) با تابع ۲ (روش بدون پیش پردازش) می باشد. PWP: رطوبت پژمردگی دائم، ME: میانگین خطا، RMSE: مجذور میانگین مربعات خطا، R^2 : ضریب تعیین، AIC: معیار اطلاعات آکاییک، CM: مدل مقایسه شونده، PTF2 (NP): داده‌های بدون پیش پردازش، PTF3 (MSC): تصحیح پراکندگی چندگانه، PTF4 (FD-SG1): مشتق اول به همراه فیلتر ساویتزکی و گلائی، PTF5 (FD-SG2): مشتق دوم به همراه فیلتر ساویتزکی گلائی، PTF6 (SNV): متغیر نرمال استاندارد و RF: جنگل تصادفی.

PTF2: در این تابع از اولین مولفه اصلی داده‌های طیفی بدون پیش پردازش (PCNP) به همراه تخمین‌گرهای PTF1 در برآورد پارامتر PWP بهره‌گیری شد. با توجه به اینکه داده‌های طیفی دارای نویزهای پراکندگی نور، اثرات سطح نمونه و تغییرات غیرخطی هستند. معمولاً پیش پردازش‌هایی مانند MSC، SG1، SG2 و SNV برای کاهش این اثرات و بهبود کیفیت داده‌ها به کار می‌روند. با این حال در برخی موارد پیش پردازش‌های شدید می‌توانند سیگنال‌های اصلی مرتبط با ویژگی‌های خاک را کاهش دهند به ویژه وقتی داده‌های طیفی به طور طبیعی دارای سیگنال قوی بوده و نسبت سیگنال به نویز بالا باشند. بنابراین حذف پیش پردازش ممکن است منجر به حفظ بهتر اطلاعات اصلی و بهبود عملکرد مدل شود. احتمالاً به همین دلیل روش بدون پیش پردازش نسبت به روش‌های دیگر موجب بهبود تخمین پارامتر PWP شده است.

بزرگترین ضرایب PC اول در روش بدون پیش پردازش بازتاب طیفی در ناحیه مادون قرمز نزدیک در طول موج ۲۱۵۰ نانومتر و با دو مشخصه جذب در طول موج‌های ۱۴۱۴ و ۱۹۱۸ نانومتر بود (شکل ۱-الف). محدوده‌های طیفی طول موج ۲۴۵۰-۲۱۵۰ نانومتر را می‌توان به گروه‌های عاملی OH شبکه رسی نسبت داد (ویسکارا روسل و همکاران، ۲۰۰۶)، که در این پژوهش با طول موج ۲۱۵۰ نانومتر مطابقت دارد. محدوده‌های فعال طیفی در طول موج‌های ۱۴۱۴ و ۱۹۱۲ نانومتر دارای مشخصه‌های جذبی آب و رس می‌باشند (استبرگ و همکاران، ۲۰۱۰). مشخصه‌های جذبی برای تخمین رطوبت PWP را می‌توان به ارتعاشات ترکیبی آب محدود شده در شبکه‌های بین لایه‌ای رس و ترکیبی از کشش O-H و خمش H-O-H مولکول‌های آب به دام افتاده در شبکه کریستالی نسبت داد (داوری و همکاران، ۲۰۲۱). با توجه به اینکه رطوبت پژمردگی دائم با شن همبستگی منفی (-0.582^{**}) و با رس همبستگی مثبت (0.579^{**}) دارد. این امر نقش برجسته ذرات رس در افزایش ظرفیت نگهداری آب خاک در مکش‌های بالاتر که ناشی از بافت خاک و جذب سطحی می‌باشد را تایید می‌کند (لیو و همکاران، ۲۰۱۹). علاوه بر این، ماده آلی و رس بر بازتاب طیفی در ناحیه مادون قرمز و اکسیدهای آهن بر بازتاب در ناحیه مرئی تاثیرگذار می‌باشند (بابائیان و همکاران، ۲۰۱۵)، بنابراین ذرات رس به دلیل سطح ویژه بالا و تعداد زیاد منافذ ریز قدرت نگهداشت آب خاک در مکش‌های بالا را افزایش داده و موجب افزایش رطوبت در نقطه پژمردگی دائم شده است. این یافته با نتایج مصدقی و محبوبی (۲۰۱۱) هم راستا است که بیان کردند رس‌ها به واسطه سطح ویژه قابل توجه و مواد آلی به دلیل دارا بودن گروه‌های عاملی، ظرفیت نگهداشت آب خاک را در مکش‌های بالا افزایش داده و منجر به افزایش رطوبت نقطه پژمردگی دائم در خاک رسی می‌شوند. بنابراین داده‌های طیفی به واسطه حساسیت بالا نسبت به ترکیب کانی شناسی و ویژگی‌های جذب آب در رس، می‌توانند به طور موثری برای تخمین PWP مورد استفاده قرار گیرند و بازتاب دهنده تغییرات ظرفیت نگهداری آب خاک در این نقطه بحرانی باشند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، کارایی داده‌های طیفی مرئی-مادون قرمز نزدیک در کنار اطلاعات خاک شناسی و بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تخمین FC و PWP مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که این رویکرد، علاوه بر کاهش چشمگیر هزینه‌ها و زمان مورد نیاز نسبت به روش‌های آزمایشگاهی مرسوم، امکان ارزیابی سریع و قابل تعمیم این ویژگی‌های هیدرولیکی را در مقیاس‌های وسیع فراهم می‌آورد. بررسی مدل‌های توسعه یافته حاکی از آن بود که استفاده از روش‌های پیش پردازش طیفی مانند SNV،

نقش موثری در بهبود دقت پیش بینی و کاهش خطاهای مدل ایفا می‌کند. هم چنین، تحلیل اهمیت طول موج‌ها منجر به شناسایی بازه‌های طیفی موثر در تخمین FC و PWP گردید که این یافته می‌تواند مبنایی برای طراحی و بهبود سنسورهای تخصصی در آینده باشد. از منظر کاربردی، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که رویکرد طیف سنجی همراه با مدل‌های یادگیری ماشین، پتانسیل بالایی برای پیش و مدیریت بهینه منابع آب و خاک در سامانه‌های کشاورزی پیشرفته دارد. توسعه این فناوری می‌تواند گامی موثر در جهت ارتقای دقت و سرعت تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و حرکت به سوی کشاورزی هوشمند و پایدار باشد.

فهرست منابع

- Allo, M., Todoroff, P., Jameux, M., Stern, M., Paulin, L., & Albrecht, A. (2020). Prediction of tropical volcanic soil organic carbon stocks by visible-near-and mid-infrared spectroscopy. *Catena*, 189, 104452.
- Amsili, J. P., van Es, H. M., & Schindelbeck, R. R. (2024). Pedotransfer functions for field capacity, permanent wilting point, and available water capacity based on random forest models for routine soil health analysis. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 55(13), 1967-1984.
- Babaeian E., Homaei M., Vereecken H., Montzka C., Norouzi, A.A., and van Genuchten M.T. 2015b. A comparative study of multiple approaches for predicting the soil–water retention curve: hyperspectral information vs. basic soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 79: 1043–1058.
- Bayat, H., Mazaheri, B., & Mohanty, B. P. (2019). Estimating soil water characteristic curve using landscape features and soil thermal properties. *Soil and Tillage Research*, 189, 1-14. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2018.12.018>
- Beniaich, A., Otten, W., Shin, H. C., Cooper, H. V., Rickson, J., Soulaïmani, A., & El Gharous, M. (2023). Evaluation of pedotransfer functions to estimate some of soil hydraulic characteristics in North Africa: A case study from Morocco. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1090688.
- Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Particle Density. In *Methods of Soil Analysis* (pp. 377-382). <https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c14>
- Chatrenour, M., Landi, A., Bahrami, H., & Mirzaei, S. (2023). Dust source clay content and salinity estimation using VNIR spectrometry. *Arid Land Research and Management*, 37(3), 369-388. <https://doi.org/10.1080/15324982.2023.2170837>
- Cooper, E., Blyth, E., Cooper, H., Ellis, R., Pinnington, E., & Dadson, S. J. (2020). Using data assimilation to optimize pedotransfer functions using large-scale in-situ soil moisture observations. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2020, 1-20.
- Davari, M., Karimi, S. A., Bahrami, H. A., Taher Hossaini, S. M., & Fahmideh, S. (2021). Simultaneous prediction of several soil properties related to engineering uses based on laboratory Vis-NIR reflectance spectroscopy. *Catena*, 197, 104987. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104987>
- Dotto, A. C., Dalmolin, R. S. D., ten Caten, A., & Grunwald, S. (2018). A systematic study on the application of scatter-corrective and spectral-derivative preprocessing for multivariate prediction of soil organic carbon by Vis-NIR spectra. *Geoderma*, 314, 262-274.
- Gee, G. W., & Or, D. (2002). 2.4 Particle-size analysis. *Methods of soil analysis: Part 4 physical methods*, 5, 255-293.
- Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: a review and recent developments. *Philosophical transactions of the royal society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065), 20150202.
- Kaisermann, A., de Vries, F. T., Griffiths, R. I., & Bardgett, R. D. (2017). Legacy effects of drought on plant–soil feedbacks and plant–plant interactions. *New Phytologist*, 215(4), 1413-1424.
- Liu, W., Luo, X., Huang, F., & Fu, M. (2019). Prediction of soil water retention curve using Bayesian updating from limited measurement data. *Applied Mathematical Modelling*, 76, 380-395.
- Mosaddeghi, M. R., & Mahboubi, A. A. (2011). Point pedotransfer functions for prediction of water retention of selected soil series in a semi-arid region of western Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 57(4), 327-342.
- Myeni, L., Mdlambuzi, T., Paterson, D. G., De Nysschen, G., & Moeletsi, M. E. (2021). Development and evaluation of pedotransfer functions to estimate soil moisture content at field capacity and permanent wilting point for South African soils. *Water*, 13(19), 2639
- Navidi, M. N., Seyedmohammadi, J., & Seyed Jalali, S. A. (2022). Predicting soil water content using support vector machines improved by meta-heuristic algorithms and remotely sensed data. *Geomechanics and Geoengineering*, 17(3), 712-726

- Nocita, M., Stevens, A., Toth, G., Panagos, P., van Wesemael, B., & Montanarella, L. (2014). Prediction of soil organic carbon content by diffuse reflectance spectroscopy using a local partial least square regression approach. *Soil Biology and Biochemistry*, 68, 337-347.
- Padarian, J., Minasny, B., & McBratney, A. B. (2019). Using deep learning to predict soil properties from regional spectral data. *Geoderma Regional*, 16, e00198. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00198>
- Qiao, J., Zhu, Y., Jia, X., Huang, L., & Shao, M. A. (2019). Pedotransfer functions for estimating the field capacity and permanent wilting point in the critical zone of the Loess Plateau, China. *Journal of soils and sediments*, 19, 140-147.
- Rastgou, M., Bayat, H., Mansoorizadeh, M., & Gregory, A. S. (2020). Estimating the soil water retention curve: Comparison of multiple nonlinear regression approach and random forest data mining technique. *Computers and Electronics in Agriculture*, 174, 105502. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105502>
- Rout, P. P., & Arulmozhiselvan, K. (2019). Effect of soil texture on drying pattern of soil moisture after saturation. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(03), 697-704.
- Stenberg, B. (2010). Effects of soil sample pretreatments and standardised rewetting as interacted with sand classes on Vis-NIR predictions of clay and soil organic carbon. *Geoderma*, 158(1), 15-22. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.04.008>
- Stenberg, B., Viscarra Rossel, R. A., Mouazen, A. M., & Wetterlind, J. (2010). Chapter Five - Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science. In D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 107, pp. 163-215). Academic Press. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)07005-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)07005-7)
- Storey, E. E., & Helmy, A. S. (2019). Optimized preprocessing and machine learning for quantitative Raman spectroscopy in biology. *Journal of Raman Spectroscopy*, 50(7), 958-968. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jrs.5608>
- Van Genuchten, M.T., (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils". *Soil Science Society of America Journal* 44(5), 892-898.
- Viscarra Rossel, R. A. (2008). ParLeS: Software for chemometric analysis of spectroscopic data. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 90(1), 72-83. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2007.06.006>
- Zhang Z., Ding J., Wang J., and Ge X. 2020. Prediction of soil organic matter in northwestern China using fractional-order derivative spectroscopy and modified normalized difference indices. *Catena*, 185, 104257

Estimation of field capacity and permanent wilting point parameters using soil and spectral pedotransfer functions

Ch.Madizadeh^{1*}, H. Bayat², M. Davari³

1- Ph. D. Student of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

[\(Chimanmehdizadeh@gmail.com\)](mailto:Chimanmehdizadeh@gmail.com)

2- Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

[\(h.bayat@basu.ac.ir\)](mailto:h.bayat@basu.ac.ir)

3- Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

[\(m.davari@uok.ac.ir\)](mailto:m.davari@uok.ac.ir)

Abstract

Soil water retention characteristics, such as field capacity (FC) and permanent wilting point (PWP), plays a crucial role in the optimal management of water resources in agriculture. However, direct measurement of these properties at various locations within a field is not always practical. The objective of this study is to estimate FC and PWP using the random forest (RF) algorithm through visible-near infrared (Vis-NIR) spectral pedotransfer functions. For this purpose, 130 soil samples were collected from five provinces of Iran, and their physical and spectral properties were measured. Six pedotransfer functions were designed in two steps, and the data were divided into training (90 samples)

and test (40 samples) sets. To enhance model accuracy, no-preprocessing (NP) method and preprocessing methods such as Multiplicative Scatter Correction (MSC), first and second derivatives with Savitzky-Golay filter (FD-SG, FD-SG2), and Standard Normal Variate (SNV) were employed. The results showed that, in the training phase, PTF6 (SNV) for FC and PTF2 (NP) for PWP performed best and significantly reduced the Akaike Information Criterion. Furthermore, principal component analysis identified key wavelengths of 1414, 1912, and 2150 nm for PWP and 409 nm for FC. This research demonstrated that combining spectral and soil data with the Random Forest algorithm provides an accurate and cost-effective approach for estimating hydraulic parameters.

Keywords: field capacity, pedotransfer functions, permanent wilting point, random forest, Vis-NIR spectral reflectance