

کاربرد اطلاعات تشریح خاک‌رخ در برآورد کربن آلی خاک با استفاده از توابع انتقالی خاک

- ❖ محسن باقری بداغ‌آبادی*؛ موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
- ❖ محمد جمشیدی؛ موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
- ❖ زهره مصلح قهفرخی؛ موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

چکیده

کربن آلی خاک یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های خاک بویژه از دیدگاه محیط زیستی می‌باشد. به همین دلیل مدل‌سازی و برآورد آن بسیار مد نظر قرار گرفته است. در مدل‌سازی‌ها، استفاده از توابع انتقالی خاک به عنوان رویکردی برای برآورد ویژگی‌های خاک با استفاده از داده‌های زودیافت از جایگاه مهمی در علوم خاک برخوردار می‌باشد. اما متأسفانه در این راستا به داده‌های ارزشمندی که با کمترین هزینه و زمان در عملیات تشریح خاک‌رخ به دست می‌آیند توجه چندانی نشده است. هدف از پژوهش کنونی تعیین اهمیت اطلاعات تشریح خاک‌رخ در برآورد کربن آلی خاک با استفاده از توابع انتقالی در منطقه‌ی دهگلان استان کردستان می‌باشد. برای این منظور، ۱۲۴ نمونه خاک از ۳۰ خاک‌رخ نمونه‌برداری گردید. ویژگی‌های خاک شامل بافت، پهاش، قابلیت هدایت الکتریکی، گنج و کربنات کلسیم معادل تعیین شدند. فرآیند مدل‌سازی در سه حالت مختلف شامل داده‌های آزمایشگاهی، داده‌های تشریح خاک‌رخ و تلفیق داده‌های آزمایشگاهی و تشریح خاک‌رخ انجام شد. نتایج نشان دادند براساس داده‌های آزمایشگاهی، کربن آلی خاک با دو ویژگی درصد سیلت و کربنات کلسیم معادل خاک با ضریب تبیین حدود ۲۵ درصد ($R^2 = 0/25$) رابطه معنی‌دار دارد. در حالی که از بین داده‌های تشریح خاک‌رخ، دو ویژگی کروما و عمق افق ژنتیکی با ضریب تبیین حدود ۶۵ درصد ($R^2 = 0/65$) قادر به برآورد مقدار کربن آلی خاک هستند. در حالت تلفیق داده‌های آزمایشگاهی و تشریح خاک‌رخ، ضریب تبیین همچنان برابر با ۶۵ درصد به دست آمد. این نتایج گویای آن است که در حضور دو ویژگی عمق افق ژنتیکی و رنگ خاک، داده‌های آزمایشگاهی اثر معنی‌داری در برآورد کربن آلی خاک ندارند. این موضوع بیانگر اهمیت و کارایی قابل توجه داده‌های تشریح خاک‌رخ برای کاربرد در توابع انتقالی خاک نسبت به داده‌های آزمایشگاهی در این منطقه مطالعاتی می‌باشد.

واژگان کلیدی: مدل‌سازی، رگرسیون چندمتغیره، ریخت‌شناسی خاک.

۱. مقدمه

شیمیایی، بیولوژیکی و فیزیکی خاک پی برد. تغییرات در رنگ خاک می‌تواند متأثر از رنگ تیره مواد آلی، رنگ روشن کانی‌هایی مانند کوارتز، کلسیت و کربنات‌ها، رنگ قرمز کانی هماتیت یا رنگ زرد کانی گئوتایت باشد [۲]. مقدار کربن آلی خاک به واسطه‌ی تشکیل ترکیبات آلی معدنی بر رنگ خاک تأثیرگذار است. به‌طور معمول خاک‌های تیره‌تر نسبت به خاک‌های روشن مقدار بیشتری هوموس دارند. همچنین درجه تیره شدن خاک به میزان تجزیه اسیدهای آلی وابسته است [۱۴]. اثرات کربن آلی بر رنگ خاک محدود به خنثی کردن روشنایی کانی‌های سفید رنگ مانند کوارتز و کربنات‌های کلسیم نیست. اجزای آلی، ذرات خاک با رنگ‌های سبز، زرد و قرمز را پوشش می‌دهند و اثرات آن‌ها بر روی رنگ خاک را خنثی می‌کنند [۲۳].

روابط شناخته شده‌ای بین رنگ خاک و ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و کانی‌شناسی خاک‌ها وجود دارد [۲، ۲۲ و ۲۳]. در پژوهش‌های بسیاری با استفاده از روش‌های سنجش از دور و طیف‌سنجی به برآورد کربن آلی پرداخته شده که نشان دهنده کارآمد بودن این روش می‌باشد [۱۰، ۱۵ و ۱۸]. ترکیبات مختلف موجود در خاک بر اساس ویژگی‌های خاص خود در طول موج‌های مشخصی دارای فرکانس می‌باشند و بر این اساس می‌توان از روش‌های طیف‌سنجی برای تخمین آن‌ها استفاده نمود. ویسکارا راسل و همکاران (۲۰۱۶) بیان نمودند که به دلیل اینکه کربن آلی خاک دارای قدرت جذب بالایی در محدوده امواج مرئی و مادون قرمز نزدیک می‌باشد، از این رو مقادیر کربن آلی خاک می‌توانند با دقت بالا و هزینه کم بر اساس تصاویر ماهواره‌ای تخمین زده شوند [۲۱]. کاستا و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از پارامترهای طیفی در محدوده ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر (طول موج‌های مرئی، NIR و SWRI) و روش‌های آماری چندمتغیره ویژگی‌هایی مانند درصد شن، رس، سیلت و کربن آلی خاک را در منطقه‌ای از برزیل با استفاده از ۲۶۰ نمونه تخمین زدند [۷]. نتایج نشان دهنده آن بود که پارامترهای طیفی

کربن آلی خاک یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های خاک است که به شدت بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک تأثیر می‌گذارد و در عین حال از آن‌ها نیز متأثر می‌شود. برآورد مقدار کربن آلی خاک در بسیاری از پژوهش‌ها که به نوعی با خاک مرتبط می‌شوند از جمله حاصلخیزی، آلودگی، فرسایش، تغییر اقلیم و غیره مهم و ضروری است [۱۰]. اندازه‌گیری ماده یا کربن آلی خاک با روش‌های معمول آزمایشگاهی تا حدی پرهزینه و زمان‌بر است. از این رو، آرایه روش‌هایی که بتوانند با هزینه کم و دقت قابل قبول، برآوردی از کربن آلی خاک داشته باشند یک اقدام بسیار ارزشمند می‌باشد. در این راستا پژوهش‌های بسیاری به منظور برآورد کربن یا ماده آلی خاک با رویکردهای گوناگون انجام شده است. هرچند این رویکردها با گذشت زمان و آرایه روش‌های نوین محاسباتی، به‌روزرز و دقیق‌تر شده‌اند اما پایه و اساس کار در همه آن‌ها یکسان بوده است؛ بدین صورت که رابطه مقدار کربن آلی خاک، به عنوان متغیر وابسته، با دیگر ویژگی‌های خاک، به عنوان متغیرهای مستقل، در قالب توابع انتقالی خاک مورد بررسی قرار داده‌اند. شایان ذکر است در توابع انتقالی باید متغیرهای مستقل زودیافت باشند، بدین معنی که نسبت به متغیر وابسته هزینه و زمان کمتری را برای اندازه‌گیری نیاز داشته باشند. لیکن متأسفانه در برخی از پژوهش‌ها به این نکته مهم توجه نشده است و گاه اندازه‌گیری متغیرهای مستقل، بسیار هزینه و زمان بیشتری را نسبت به متغیر وابسته نیاز دارند.

در مطالعات خاکشناسی هدف از تشریح خاک‌رخ، جمع‌آوری و ثبت اطلاعات ریخت‌شناسی برای طبقه‌بندی خاک و تفسیر خصوصیات آن می‌باشد. در این مطالعات، رنگ خاک از خصوصیات پایه در تشریح خاک‌رخ است و این ویژگی همیشه طی مطالعات خاکشناسی یادداشت می‌گردد. تعیین رنگ خاک بیشتر به این دلیل حائز اهمیت است که از طریق آن می‌توان به خواص مهم

نشان داد که درصد رس، شن و کربنات کلسیم معادل با هیو خاک همبستگی منفی دارند اما با کربن آلی دارای همبستگی مثبت است. اگرچه تفاوت در میزان رطوبت خاک، اکسیدهای آهن و سایر ویژگی‌های خاک می‌توانند در ارتباط بین رنگ خاک با مقادیر کربن آلی تأثیرگذار باشند. این پژوهشگران اظهار داشتند که همبستگی مثبت و منفی به ترتیب به معنای میل نمودن رنگ خاک به زردی و قرمزی می‌باشد. از آنجایی که ویژگی‌های طیفی بجز سرشت مواد به رنگ آن‌ها هم مرتبط می‌شود، با توجه به رابطه ویژگی‌های طیفی و کربن آلی، می‌توان انتظار داشت متغیری مانند رنگ خاک هم بتواند به برآورد کربن آلی خاک کمک کند. بنابراین، هدف از پژوهش کنونی برآورد کربن آلی خاک بر اساس برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی زودیافت و داده‌های تشریح خاک‌رخ است که به طور معمول در همه مطالعات خاک‌شناسی موجود می‌باشند [۳].

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. منطقه پژوهش و نمونه‌برداری

محدوده مورد مطالعه، منطقه سورال با وسعت حدود ۱۰۰۰ هکتار در شهرستان دهگلان استان کردستان می‌باشد. نقشه خاک این منطقه با روش ژئوپدولوژی در سطح مقیاس نیمه‌تفصیلی دقیق، تهیه گردید. برای این منظور در مطالعات میدانی تعداد ۳۰ خاک‌رخ حفر و تشریح [۱۷] و از همه افق‌ها و لایه‌های خاک نمونه‌برداری گردید که در کل شامل ۱۲۴ نمونه خاک بود. سپس آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی مرسوم شامل بافت خاک، واکنش خاک (pH)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC)، گچ و آهک (TNV) برای نمونه‌های خاک طبق اصول استاندارد (مجمع خاکشناسان، ۲۰۱۴b) انجام پذیرفت. با استناد به نتایج مطالعات میدانی و آزمایشگاهی، رده‌بندی خاک‌رخ‌ها بر مبنای سامانه‌ی رده‌بندی آمریکایی [۱۹] تعیین گردید.

روشی سریع و کم‌هزینه به‌منظور تخمین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی می‌باشند. قائمی و همکاران (۲۰۱۱) نشان دادند استفاده از سنجش از دور در مناطقی که مقدار کربن آلی کم است، نتایج قابل قبولی به دست نمی‌دهد اما تابع انتقالی به دست آمده براساس درصد رس و اسیدپتت خاک دارای ضریب تبیین برابر ۰/۷۵ به دست آمد که دقت قابل قبولی می‌باشد [۱۲].

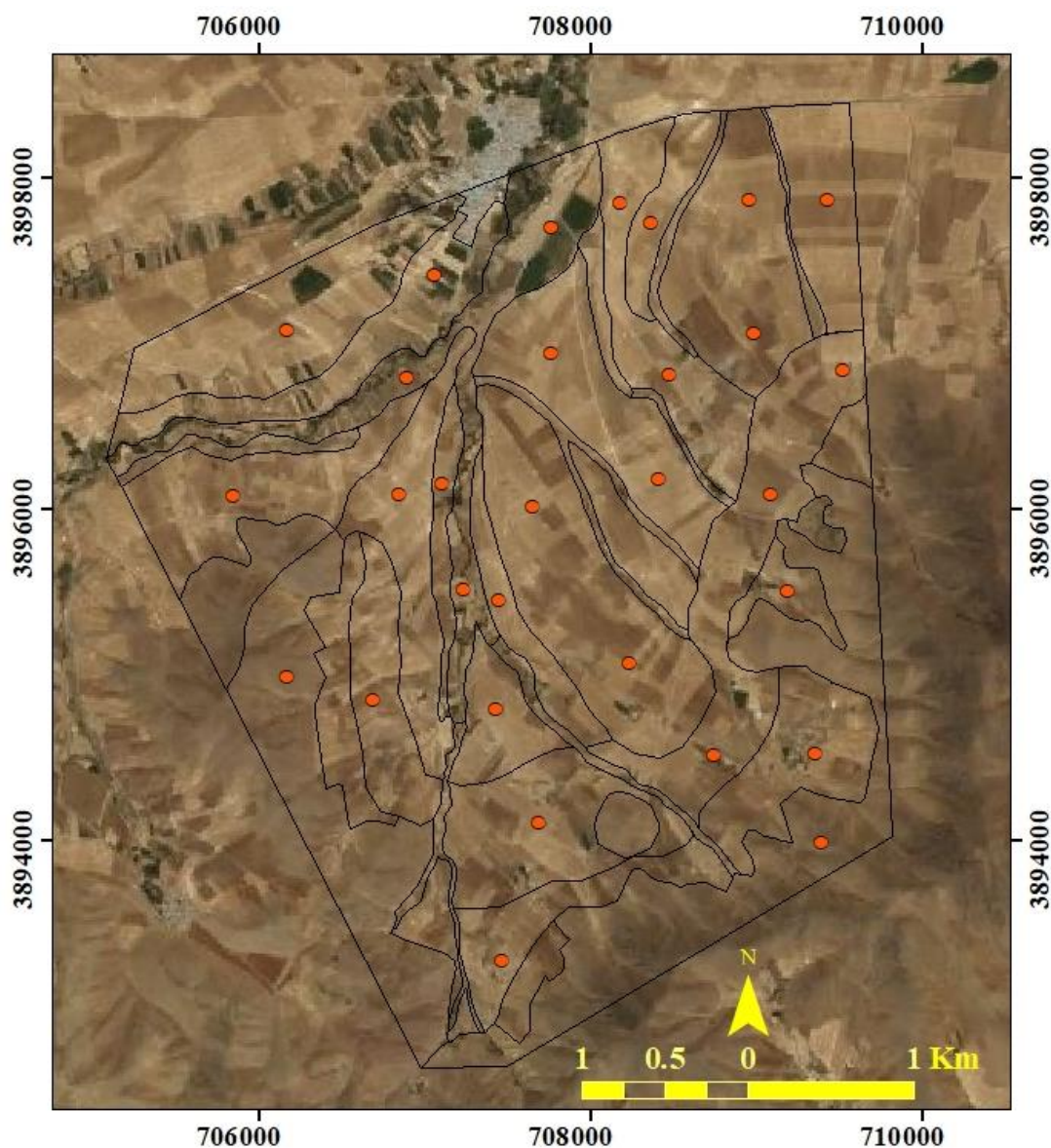
بر اساس بررسی منابع صورت گرفته آنچه در این میان کمتر مد نظر قرار گرفته است استفاده از داده‌هایی می‌باشد که به طور مرسوم با صرف کمترین هزینه و زمان در تشریح خاک‌رخ برداشت می‌شوند. انتظار می‌رود که بتوان ویژگی‌هایی از خاک که اندازه‌گیری آن پرهزینه و زمان‌بر است را بر مبنای ویژگی‌های زودیافت و قابل مشاهده مانند رنگ خاک تعیین نمود. آسان‌ترین و سریع‌ترین راه اندازه‌گیری رنگ خاک استفاده از سیستم رنگ مانسل است که رنگ خاک را بر اساس سه معیار هیو، ولیو و کروما نشان می‌دهد (دفترچه رنگ خاک مانسل ۱) [۱۶]. در این سیستم، هیو رنگ غالب، ولیو درجه‌ی روشنی یا تیرگی رنگ و کروما خلوص درجه رنگ را نشان می‌دهد [۲۰]. فرانزمیر (۱۹۸۸) با مطالعه‌ی خاک‌های هند همبستگی منفی و معنی‌دار (۰/۶۹-) مقادیر کربن آلی خاک با مقادیر ولیو رنگ خاک را گزارش نمود [۱۱]. انتخاب سیستم تعریف رنگ نیز بر میزان رابطه کربن آلی با رنگ خاک تأثیر گذار است. برای مثال، وادی‌آنتی‌تسکی و ساویچو (۲۰۱۷) بیان نمودند که در سیستم رنگ مانسل، ضریب همبستگی بین میزان کربن آلی و مقدار ولیو برابر با ۰/۵۹ بوده است در صورتی که این مقدار در سیستم رنگ CIE-lab برابر با ۰/۷۴ می‌باشد [۲۳]. تاکنون روش‌های آماری متنوعی بکار گرفته شده‌اند تا رابطه بین رنگ خاک و مقدار کربن آلی خاک را گزارش نمایند [۱۴ و ۲۳]. آسنسیو و همکاران (۲۰۱۳) تأثیر چهار متغیر درصد رس، شن، کربنات کلسیم معادل و کربن آلی را بر هیو خاک مورد بررسی قرار دادند. نتایج

در این پژوهش از روش رگرسیون چندمتغیره برای برآورد مقدار کربن آلی خاک استفاده شد. روش انتخاب داده‌ها برای ورود به فرآیند مدل‌سازی به صورت تصادفی هدفمند و با ۱۲ تکرار انجام گرفت. تلاش گردید تا در همه مدل‌سازی‌ها از همه افق‌ها یا لایه‌های خاک هم برای واسنجی و هم برای آزمون داده‌های خاک داده وجود داشته باشد به گونه‌ای که ۸۰ درصد داده‌ها برای واسنجی و ۲۰ درصد برای آزمون استفاده شوند.

شکل ۱ موقعیت این منطقه و مکان خاک‌رخ‌های نمونه‌برداری شده را نشان می‌دهد. رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک در این منطقه به ترتیب زیریک و ترمیک می‌باشند.

۲.۲. محاسبات آماری

با توجه به اینکه هدف از این پژوهش ارایه توابع انتقالی خاک برای برآورد کربن آلی می‌باشد، و ارایه هرچه ساده‌تر این توابع، کارآیی و کاربرد آن‌ها را بیشتر می‌کند،



شکل ۱. موقعیت مکانی موقعیت خاک‌رخ‌ها در منطقه مطالعاتی

۳. نتایج

۱.۳. رده‌بندی خاک‌ها

خاک‌های این منطقه در دو گروه بزرگ شامل Calcixerepts و Haploxerepts قرار دارند. هاپلوزرپت‌ها دارای دو زیرگروه فلونوتیک و تیپیک و گروه بزرگ کلسی‌زرپت‌ها تنها دارای یک زیرگروه تیپیک هستند.

۲.۳. توصیف آماری ویژگی‌های خاک

جدول ۱ برخی اطلاعات آماری نمونه‌های خاک را نشان می‌دهد. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود بیشتر ویژگی‌های مورد بررسی در نمونه‌های خاک دارای دامنه متنوع و گسترده‌ای هستند. برای نمونه شن، سیلت و رس به ترتیب از ۹ تا ۷۹، ۱۳ تا ۶۲ و ۸ تا ۶۲ درصد متغیر می‌باشند. این موضوع بویژه برای مدل‌سازی و تعیین توابع انتقالی خاک اهمیت دارد. چرا که اگر متغیرها دارای دامنه تغییرات کوچکی باشند نمی‌توان روابط قابل اعتمادی را به دست آورد.

با توجه به مقادیر چولگی و افراستگی در دید اول به نظر می‌رسد که برخی از داده‌ها نرمال نیستند. چنین نتایجی برای نمونه‌ها از آنجا ناشی می‌شود که مقادیر جدول ۱ بدون در نظر گرفتن موقعیت نمونه و برای همه نمونه‌ها محاسبه شده‌اند. این در حالی است که موقعیت نمونه به لحاظ عمقی و یا سطحی بودن در نوع توزیع آماری ویژگی‌ها بسیار مهم است. برای مثال، نمی‌توان توزیع ویژگی‌ای مانند کربن آلی را برای لایه سطحی خاک و لایه عمقی با هم مد نظر قرار داد چون این موضوع سبب اریب شدن و یا چندنمایی شدن توزیع خواهد شد. شکل ۲ توزیع فراوانی مقدار کربن آلی خاک را بدون در نظر گرفتن موقعیت نمونه نشان می‌دهد.

براین اساس ۱۲ بار فرآیند مدل‌سازی انجام شد تا خطای ناشی از انتخاب تصادفی داده‌ها و یا اریب شدن نتایج کمینه گردد. یکبار نیز تمام داده‌ها بدون در نظر گرفتن واسنجی و آزمون وارد فرآیند مدل‌سازی شدند. همبستگی بین متغیرها، آزمون نرمال بودن داده‌ها، بررسی هم‌خطی یا هم‌راستایی بین متغیرهای مستقل و فرض استقلال خطاها به ترتیب با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون، آزمون کولموگروف-اسمرینوف، عامل تورم واریانس (VIF^1) و آزمون دوربین-واتسون انجام شد. ارزیابی و اعتبارسنجی توابع انتقالی به دست آمده نیز با بکارگیری آماره‌های گوناگون از جمله ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE^2$)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE^3) میانگین خطا (ME^4) و تعیین رابطه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده کربن آلی در قالب نمودارهای پراکندگی ۱:۱ مشخص گردید. فرآیند مدل‌سازی بر اساس سه حالت به دست آمد که عبارت‌اند از ۱- براساس داده‌های آزمایشگاهی، ۲- بر اساس داده‌های تشریح خاک‌رخ و ۳- بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و تشریح خاک‌رخ. لازم به ذکر است که تمامی محاسبات آماری با استفاده از نرم افزارهای اس پی اس اس (نسخه ۲۴) و اکسل (نسخه ۲۰۱۳) انجام شدند. شایان ذکر است هرچه ویژگی‌های خاک که تحت تاثیر ماده آلی قرار می‌گیرند بهتر شناخته و درک شوند می‌توان انتظار مدل‌های معتبرتری را داشت. لیکن چون هدف این پژوهش برآورد کربن آلی براساس داده‌هایی است که به طور معمول در گزارش‌های خاک وجود دارد، سطح انتظار برای اعتبار مدل به دست آمده باید در سطح داده‌های مورد استفاده باشد.

¹ Variance Inflation Factor

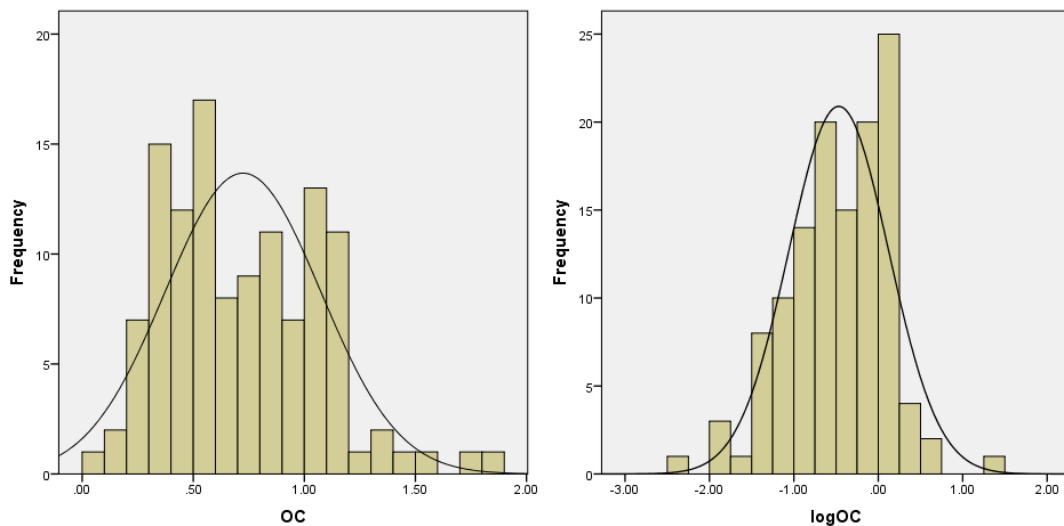
² Root-mean-square error

³ Mean absolute error

⁴ Mean error

جدول ۱. ویژگی‌های آماری نمونه‌های خاک‌ها

ویژگی خاک	واحد	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	چولگی	کشی‌دگی
شن	%	۹	۷۹	۲۵/۸	۱۳/۵	۱/۵	۲/۹
سیلت	%	۱۳	۶۲	۳۱/۵	۷/۷	-۰/۰۲	۱/۵
رس	%	۸	۶۲	۴۲/۷	۱۰/۱	-۱/۰۲	۱/۴
وزن مخصوص ظاهری	g cm ⁻³	۱/۲۵	۱/۹	۱/۶	۰/۱۵	-۰/۰۳	-۰/۸۱
پهناش	-	۷/۱۷	۸/۷	۷/۸	۰/۳	۰/۹۵	۱/۰۴
قابلیت هدایت الکتریکی	dSm ⁻¹	۰	۲/۱۲	۰/۴۸	۰/۲۴	۳/۹	۲۲/۸
TNV	%	۰	۸۵/۹	۲۷	۱۹/۸	۰/۶۷	۰
کربن آلی	%	۰/۰۹	۱/۸	۰/۷۲	۰/۳۵	۰/۵۳	-۰/۰۹
ضخامت افق	cm	۱۲	۶۵	۲۷/۷	۱۰/۶	۰/۸۶	۰/۶۹



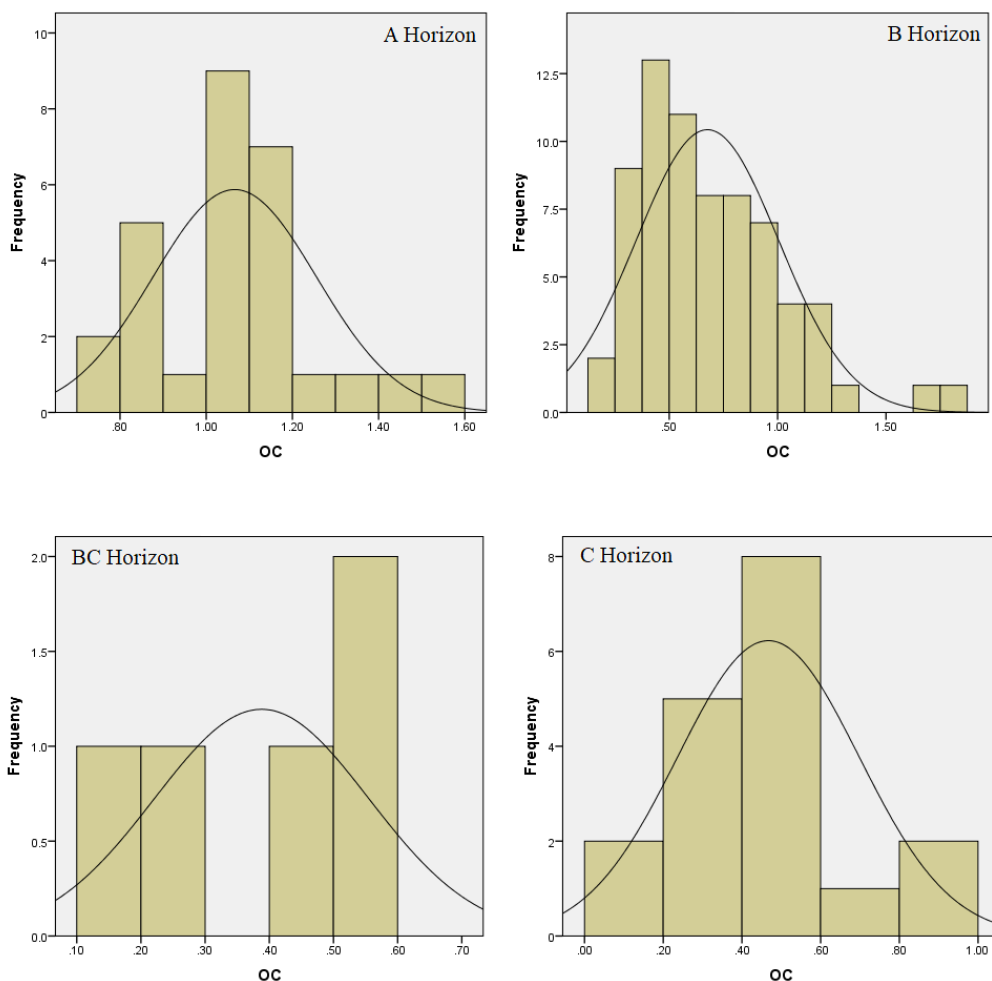
شکل ۲. توزیع داده‌های مشاهده شده (چپ) و داده‌های با تبدیل لگاریتمی (راست) برای کربن آلی. منحنی نشان داده شده، منحنی توزیع نرمال را نشان می‌دهد.

جدول ۲. آزمون کولموگراف اسمیرنف برای ویژگی کربن آلی

ویژگی خاک	آماره	سطح معنی‌داری	توزیع
کربن آلی	۰/۱۰۹	۰/۰۰۱	غیرنرمال
تبدیل لگاریتمی کربن آلی	۰/۰۸	۰/۰۵	نرمال
افق A	۰/۱۱۴	۰/۲۰	نرمال
افق B	۰/۱۰۷	۰/۰۵	نرمال
افق BC	۰/۳۲۹	۰/۰۸	نرمال
افق C	۰/۱۴۶	۰/۲۰	نرمال

گرفتن همزمان همه نمونه‌های خاک به نظر می‌رسد برخی داده‌ها دارای توزیع نرمال نیستند، اما در واقع، ویژگی‌های خاک در لایه‌های ژنتیکی خاک دارای داده‌هایی با توزیع نرمال هستند. برای نمونه شکل ۳ توزیع مقادیر کربن آلی خاک را در افق‌های A، B، BC و C نشان می‌دهد که در کنار نتایج آزمون کولوموگراف اسمیرنف (جدول ۲) تاییدکننده توزیع نرمال ویژگی کربن آلی خاک در محدوده مورد مطالعه است (سطح معنی‌داری بیش از ۰/۰۵ بیانگر نرمال بودن توزیع می‌باشد). دیگر ویژگی‌های مورد مطالعه نیز براساس کولوموگراف اسمیرنف دارای توزیع نرمال بودند.

همانطور که دیده می‌شود نمودار مربوطه دارای دو نما یا قله شده است و از حالت توزیع نرمال فاصله گرفته است و بر اساس آزمون کولوموگراف اسمیرنف (جدول ۲) نیز این توزیع نرمال نیست. البته با تبدیل داده‌ها و استفاده از لگاریتم داده‌ها این توزیع به توزیع نرمال نزدیک می‌گردد (شکل ۲) و از نظر آماری نیز بر اساس آزمون کولوموگراف اسمیرنف توزیع نرمال خواهد بود. لیکن از آنجا که هر تبدیل داده و برگشت به داده اصلی سبب بروز برخی خطاها در داده‌های اصلی می‌شود، بویژه وقتی تبدیل غیرخطی بکار گرفته شود [۵]، بهتر است در مدل‌سازی‌ها از داده‌های اصلی استفاده گردد، مگر اینکه چاره‌ای بجز تبدیل داده‌ها نباشد. در این پژوهش، هرچند با در نظر



شکل ۳. توزیع فراوانی کربن آلی مشاهده شده برای افق‌های A، B، BC و C. منحنی نشان داده شده، منحنی توزیع نرمال را نشان می‌دهد. نتایج آزمون کولوموگراف اسمیرنف برای توزیع نرمال در جدول ۲.

با یکدیگر (بویژه برای مقادیر بیش از ۰/۸) باید به آماره‌های ضریب تورم واریانس و ضریب همخطی بودن متغیرها توجه ویژه داشت. لازم به یادآوری است که عامل تورم واریانس (VIF)، شدت همخطی چندگانه را در تحلیل رگرسیون معمولی نشان می‌دهد. این شاخص بیان می‌دارد چه مقدار از تغییرات مربوط به ضرایب برآورد شده بابت همخطی افزایش یافته است. هرچه مقدار این عامل از عدد ۲ بیشتر باشد، میزان هم خطی نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه مدل رگرسیون برای انجام برآورد، نامناسبتر خواهد بود؛ به طوری که برای مقادیر بیش از ۵ (در برخی منابع بیش از ۱۰) می‌توان نتیجه گرفت آن متغیر مستقل نسبت به بقیه متغیرهای مستقل نقش چندانی در مدل رگرسیونی ندارد و باید از مدل حذف گردد.

جدول ۳ مقدار ضریب همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. بر اساس این نتایج، ویژگی‌های درصد شن، درصد رس و درصد کربنات کلسیم معادل با درصد کربن آلی دارای همبستگی معنی‌دار در سطح ۰/۰۰۱ درصد، و دو ویژگی سیلت و جرم مخصوص ظاهری در سطح حدود ۰/۰۰۳ دارای همبستگی معنی‌دار می‌باشند. از طرف دیگر براساس ضریب همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده می‌توان دید که ویژگی‌های درصد شن، درصد رس، درصد کربنات کلسیم معادل، درصد سیلت و جرم مخصوص ظاهری نیز با هم دیگر دارای همبستگی معنی‌دار هستند. بنابراین می‌توان انتظار داشت تابع انتقالی مربوط به کربن آلی خاک با این متغیرها رابطه نشان دهد. در چنین مواردی به دلیل همبستگی متغیرها

جدول ۳. همبستگی پیرسون بین برخی ویژگی‌های نمونه‌های خاک‌ها

کربن آلی	TNV	قابلیت هدایت الکتریکی	پهش	وزن مخصوص ظاهری	رس	سیلت	شن		
-۰/۲۹۹**	۰/۲۱۶*	-۰/۱۱۴	۰/۰۲۸	-۰/۲۶۶**	-۰/۸۲۷**	-۰/۶۶۹**	۱	P.C	شن
۰/۰۰۱	۰/۰۱۷	۰/۲۱۲	۰/۶۸	۰/۰۱۵	.	.		Sig.	
۰/۲۰۸*	۰/۱۰۴	-۰/۰۰۹	-۰/۰۲۶	۰/۰۸۴	۰/۱۳۵	۱	-۰/۶۶۹**	P.C	سیلت
۰/۰۲۳	۰/۲۵۵	۰/۹۲۶	۰/۷۷۳	۰/۴۴۹	۰/۱۴۱		.	Sig.	
۰/۲۴**	-۰/۳۶۷**	۰/۱۵۹	-۰/۰۳	۰/۲۹۴**	۱	۰/۱۳۵	-۰/۸۲۷**	P.C	رس
۰/۰۰۸	.	۰/۰۸۲	۰/۷۴	۰/۰۰۷		۰/۱۴۱	.	Sig.	
۰/۲۳۹*	-۰/۱۴	۰/۰۷۱	-۰/۱۴۲	۱	۰/۲۹۴**	۰/۰۸۴	-۰/۲۶۶*	P.C	جرم مخصوص ظاهری
۰/۰۳	۰/۲۰۷	۰/۵۲۳	۰/۱۹۹		۰/۰۰۷	۰/۴۴۹	۰/۰۱۵	Sig.	
-۰/۰۳۴	۰/۱۶۷	-۰/۳۳۸**	۱	-۰/۱۴۲	-۰/۰۳	-۰/۰۲۶	۰/۰۳۸	P.C	پهش
۰/۷۱۵	۰/۰۶۷	.		۰/۱۹۹	۰/۷۴	۰/۷۷۳	۰/۶۸	Sig.	
۰/۰۱	-۰/۱۳۶	۱	-۰/۳۳۸**	۰/۰۷۱	۰/۱۵۹	-۰/۰۰۹	-۰/۱۱۴	P.C	قابلیت هدایت الکتریکی
۰/۹۱۸	۰/۱۳۷		.	۰/۵۲۳	۰/۰۸۲	۰/۹۲۶	۰/۲۱۲	Sig.	
-۰/۳۹۱**		-۰/۱۳۶	۰/۱۶۷	-۰/۱۴	-۰/۳۶۷**	۰/۱۰۴	۰/۲۱۶*	P.C	TNV
.	۱	۰/۱۳۷	۰/۰۶۷	۰/۲۰۷	.	۰/۲۵۵	۰/۰۱۷	Sig.	
۱	-۰/۳۹۱**	۰/۰۱	-۰/۰۳۴	۰/۲۳۹*	۰/۲۴**	۰/۲۰۸*	-۰/۲۹۹**	P.C	کربن آلی
	.	۰/۹۱۸	۰/۷۱۵	۰/۰۳	۰/۰۰۸	۰/۰۲۳	۰/۰۰۱	Sig.	

** و * به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌دار در سطح ۰/۰۱ و ۰/۰۵، P.C = ضریب پیرسون و Sig. = سطح معنی‌داری

۳.۳. مدل‌سازی کربن آلی خاک

همان طور که بیان شد مدل‌سازی کربن آلی خاک در سه حالت انجام گرفت که عبارت هستند از ۱- داده‌های آزمایشگاهی، ۲- داده‌های تشریح خاکرخ و ۳- داده‌های آزمایشگاهی و تشریح خاکرخ. در هر یک از حالت‌ها، برای همه ۱۲ تکرار انجام شده، نتایج تقریباً همانند بودند (نتایج برای حالت ۲ نشان داده خواهند شد). این موضوع نشان می‌دهد که خطای تصادفی برای ورود داده‌ها به فرآیند مدل‌سازی بسیار کم و یا ناچیز می‌باشد و به عبارت دیگر مدل به دست آمده چندان تحت تأثیر مکان نمونه‌ها و داده‌های ورودی قرار نمی‌گیرد. بنابراین برای به دست آوردن مدل پایانی همه داده‌ها وارد فرآیند واسنجی شدند.

۴.۳. مدل‌سازی کربن آلی خاک براساس

داده‌های آزمایشگاهی

تحلیل رگرسیون چند متغیره خطی گام به گام نشان داد که دو ویژگی درصد سیلت و درصد آهک خاک با مقدار کربن آلی دارای رابطه معنی‌دار هستند. بر این اساس تابع انتقالی خاک با رابطه (۱) به دست آمد که دارای ضریب تبیین $R^2 = 0.25$ می‌باشد.

$$\%OC = 0.011 \text{ Slit} - 0.008 \text{ TNV} + 0.574 \quad (R^2 = 0.25) \quad (1)$$

نتایج تجزیه واریانس مربوط به رگرسیون خطی چند متغیره در جدول ۴ ارائه شده است که بیانگر معنی‌دار بودن رابطه رگرسیونی است.

جدول ۴. تجزیه واریانس رگرسیون خطی چند متغیره بین کربن آلی با سیلت و آهک

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	سطح معنی‌داری
مدل	۳/۳۶۵	۲	۱/۶۸۳	۱۹/۳۴۷	۰/۰۰۰
خطا	۱۰/۱۷۶	۱۱۷	۰/۰۸۷		
کل	۱۳/۵۴۱	۱۱۹			

چون در تحلیل رگرسیون در این پژوهش از روش رگرسیون گام به گام استفاده شد، چنانچه بین متغیرها همخطی وجود داشته باشد آن متغیر حذف خواهد شد و بنابراین در روش رگرسیون گام به گام ضریب تورم واریانس عدد بزرگی نخواهد بود. جدول ۵ آماره‌های همخطی را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار VIF مربوط به متغیر شن می‌باشد. آماره تحمل بیانگر درصدی از واریانس هر متغیر مستقل است که توسط دیگر متغیرهای مستقل تبیین نمی‌شود. بر اساس جدول ۵ دیده می‌شود واریانس همه متغیرها تا حد بسیار زیادی توسط دیگر متغیرهای مستقل تبیین نمی‌شود و تنها برای متغیر شن است که ۵۲/۶٪ از واریانس آن توسط دیگر متغیرهای مستقل قابل تبیین است (۴/۴۷ درصد از واریانس توسط دیگر متغیرهای مستقل تبیین نمی‌شود)، به همین دلیل

است که VIF اندکی بزرگتر از سایر متغیرها می‌باشد. چنانچه آماره تحمل از ۰/۴ کمتر شود ممکن است در فرآیند مدل‌سازی رگرسیونی مشکل پیش آید لیکن برای مقادیر کمتر از ۰/۱ مشکل جدی وجود خواهد داشت. آماره دوربین-واتسون نیز برابر ۱/۵۲ بود که بیانگر این است که بین باقیمانده‌ها همبستگی وجود ندارد و به بیان دیگر باقیمانده‌ها از هم مستقل می‌باشند. شایان ذکر است آماره دوربین-واتسون بین ۰ تا ۴ می‌باشد. اگر بین باقیمانده‌ها همبستگی وجود نداشته باشد، مقدار این آماره باید به ۲ نزدیک باشد. اگر به صفر نزدیک باشد نشان دهنده همبستگی مثبت و اگر به ۴ نزدیک باشد نشان دهنده همبستگی منفی می‌باشد. در مجموع اگر این آماره بین ۱/۵ تا ۲/۵ باشد جای نگرانی نیست و بیانگر این است که بین باقیمانده‌ها همبستگی وجود ندارد. در

تحمل، خودهمبستگی باقیمانده‌ها و توزیع آن‌ها نشان‌دهنده معتبر بودن مدل به دست آمده (رابطه ۱) است؛ اما چون ضریب تبیین عدد کوچکی می‌باشد ($R^2 = 0/25$) نمی‌توان این مدل را برای برآورد کربن آلی خاک مدل مناسبی به حساب آورد.

صورت وجود خودهمبستگی در باقیمانده‌ها نمی‌توان از روش رگرسیون خطی استفاده کرد و باید یا از روش‌های دیگر استفاده کرد و یا داده‌ها را تبدیل نمود تا خودهمبستگی در باقیمانده‌ها از بین برود. روی هم رفته، هرچند آماره‌های تجزیه واریانس، عامل تورم واریانس،

جدول ۵. آماره‌های همخطی و ضرایب تأثیر متغیرها در برآورد کربن آلی خاک

آماره‌های همخطی		سطح معنی‌داری	آماره t	ضریب	متغیر
VIF	تحمل				
۱/۰۱۲	۰/۹۸۸	۰	-۵/۰۸۵	-۰/۰۰۸	TNV
۱/۰۱۲	۰/۹۸۸	۰/۰۰۳	۳/۰۷۳	۰/۰۱۱	سیلت
-	-	۰	۴/۵۳۹	۰/۵۷۴	ضریب ثابت رگرسیون
۲/۱۰۸	۰/۴۷۴	۰/۴۶۶	-۰/۷۳۱	-۰/۰۸۷	شن
۱/۱۹۴	۰/۸۳۸	۰/۴۶۶	۰/۷۳۱	۰/۰۶۵	رس
۱/۰۳	۰/۹۷۱	۰/۶۱۶	۰/۵۰۳	۰/۰۴۲	پهش
۱/۰۱۸	۰/۹۸۲	۰/۶۱	-۰/۵۱۱	۰/۰۴۲	قابلیت هدایت الکتریکی

تکرار پنجم بوقوع می‌پیوست و براساس آن تصمیم‌گیری شده بود (تکرارهای دیگر انجام نگردیده بودند)، به نظر می‌رسید که مدل‌سازی برای برآورد کربن آلی اعتبار خوبی ندارد، چون برخلاف ضریب تبیین بالا برای واسنجی، اعتبار مدل در مرحله آزمون بسیار ضعیف می‌باشد.

پس از اینکه مشخص گردید انجام مدل‌سازی رگرسیونی هم در مرحله واسنجی و هم آزمون از دقت قابل قبولی برخوردار است، بنابراین برای به دست آوردن مدل پایانی همه داده‌ها وارد فرآیند واسنجی شدند. نتایج تجزیه واریانس مربوط به رگرسیون خطی چند متغیره در جدول ۷ ارائه شده است که بیانگر معنی‌دار بودن رابطه رگرسیونی است. بر این اساس تابع انتقالی خاک با رابطه $R^2 = 0/65$ به دست آمد که دارای ضریب تبیین $R^2 = 0/65$ می‌باشد.

$$\%OC = 0.001 C - 0.008 D + 1.101 \quad (R^2 = 0.65) \quad (2)$$

که در آن C و D به ترتیب کروما و عمق میانی افق ژنتیکی (cm) می‌باشند.

۵.۳. مدل‌سازی کربن آلی خاک براساس

داده‌های تشریح خاک‌رخ

تجزیه و تحلیل رگرسیون خطی چندمتغیره همانند مراحل بالا با در نظر گرفتن داده‌های تشریح خاک‌رخ شامل عمق افق ژنتیکی و رنگ خاک نیز انجام شد. نتایج تحلیل رگرسیون چند متغیره با در نظر گرفتن ۸۰ درصد داده‌ها برای واسنجی (۱۰۰ داده) و ۲۰ درصد برای آزمون یا اعتبارسنجی (۲۴ داده) در ۱۲ تکرار در جدول ۶ ارائه گردیده است. همانطور که دیده می‌شود نتایج تقریباً همانند هستند و تنها برای تکرار پنجم مقدار ضریب تبیین افزایش چشم‌گیر داشته ($R^2 = 0/77$) که در این حالت مقدار ضریب تبیین برای داده‌های آزمون به ۰/۲۳ کاهش یافته است و این موضوع نشان می‌دهد داده‌هایی که برای واسنجی انتخاب شده‌اند برحسب تصادف رابطه خوبی با کربن آلی داشته‌اند ولی در عوض داده‌های آزمون خطای زیادی را نشان داده‌اند. این موضوع اهمیت انجام تکرار در فرآیند مدل‌سازی را به خوبی نشان می‌دهد؛ چرا که اگر تنها یک بار مدل‌سازی انجام شده بود و بر حسب تصادف،

جدول ۶. نتایج تکرارهای مدل‌سازی با در نظر گرفتن ۸۰ درصد داده‌ها برای واسنجی و ۲۰ درصد برای آزمون یا اعتبارسنجی

مدل	ضریب تبیین (R^2)		خطای استاندارد		آماره‌ها	
	آزمون	واسنجی	برآورد	خطای استاندارد	F	سطح معنی‌داری
۱	۰/۷۱	۰/۶۱	۰/۲۴	۳	۳۲/۷۴	۰/۰۰۰
۲	۰/۵۵	۰/۵۹	۰/۲۵	۳	۳۲/۲	۰/۰۰۰
۳	۰/۵۲	۰/۶۷	۰/۲۲	۳	۴۳/۷۲	۰/۰۰۰
۴	۰/۷۶	۰/۶۳	۰/۲۴	۳	۴۰/۴۸	۰/۰۰۰
۵	۰/۲۳	۰/۷۷	۰/۱۸	۳	۷۳/۵۸	۰/۰۰۰
۶	۰/۶۶	۰/۶۴	۰/۲۲	۳	۴۰/۷	۰/۰۰۰
۷	۰/۷۷	۰/۶۲	۰/۲۴	۳	۳۸/۰۲	۰/۰۰۰
۸	۰/۷۱	۰/۶۳	۰/۲۴	۳	۴۰/۳۸	۰/۰۰۰
۹	۰/۷۴	۰/۶۳	۰/۲۴	۳	۴۰/۶۷	۰/۰۰۰
۱۰	۰/۶۲	۰/۶۴	۰/۲۳	۳	۴۱/۰۱	۰/۰۰۰
۱۱	۰/۴۴	۰/۶۱	۰/۲۵	۳	۳۶/۵۵	۰/۰۰۰
۱۲	۰/۵۹	۰/۶۶	۰/۲۱	۳	۴۲/۷۴	۰/۰۰۰
کل داده‌ها	-	۰/۶۵	۰/۲۳	۳	۵۲/۲۷	۰/۰۰۰

df1 = درجه آزادی صورت، df2 = درجه آزادی مخرج و F = آماره

جدول ۷. تجزیه واریانس رگرسیون خطی چند متغیره بین کربن آلی با عمق افق ژنتیکی و رنگ خاک

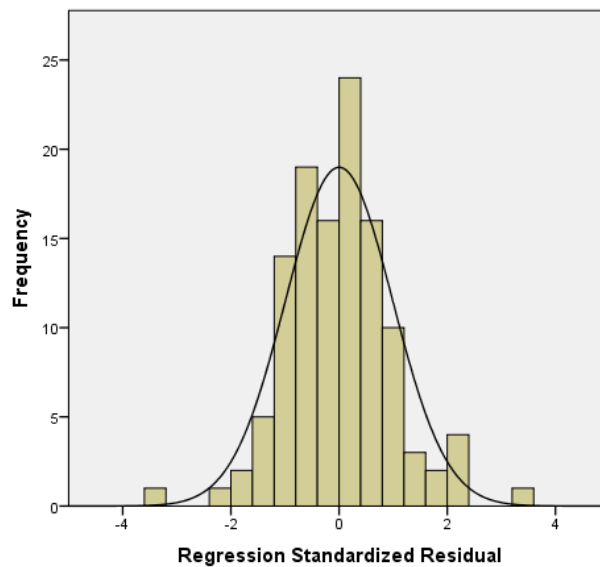
منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	سطح معنی‌داری
مدل	۸/۱۵	۳	۲/۷۱۷	۵۲/۲۷	۰/۰۰۰
خطا	۵/۹۲۵	۱۱۴	۰/۰۵۲		
کل	۱۴/۰۷۶	۱۱۷			

به بیان دیگر خطاها از هم مستقل می‌باشند. شکل ۴ توزیع خطاها را نشان می‌دهد که با توجه به آن و همچنین براساس آزمون کولوموگراف اسمیرنوف، خطاها دارای توزیع نرمال بودند.

آماره‌های همخطی یعنی ضریب تورم واریانس و تحمل در جدول ۸ ارایه شده است. همانطور که دیده می‌شود بین این متغیرها هیچ رابطه هم خطی وجود ندارد. همچنین آماره دوربین-واتسون نیز برابر ۱/۶۲ بود که بیانگر این است که بین خطاها همبستگی وجود ندارد و

جدول ۸. آماره‌های همخطی برای ویژگی‌های رنگ خاک و عمق لایه ژنتیکی

ویژگی خاک	تحمل	VIF
ولیو	۰/۹۸۶	۱/۰۱۵
کروما	۰/۹۹۲	۱/۰۰۸
میانگین عمق	۰/۹۷۹	۱/۰۲۲



شکل ۴. توزیع خطاهای حاصل از تابع انتقالی خاک برای برآورد کربن آلی خاک براساس ویژگی‌های تشریح خاک رخ

آلی را گزارش کردند. هرچند برای برخی ویژگی‌ها رابطه علی و معلولی اثبات شده‌ای وجود دارد (برای نمونه بین جرم مخصوص ظاهری و کربن آلی) اما برای برخی دیگر (مثلاً اجزاء بافت و کربن آلی) نیاز به مطالعات بیشتری مانند بررسی کانی‌شناسی، امکان پیوند بین ذرات معدنی (رس و یا سیلت) و ماده آلی و غیره می‌باشد (که البته هدف این پژوهش نبوده است).

۲.۴. مدل‌سازی کربن آلی خاک براساس

داده‌های آزمایشگاهی

همانطور که در رابطه (۱) نشان داده شد، ضریب تبیین $R^2 = 0/25$ می‌باشد. این بدان معنی است که در این منطقه ۲۵ درصد تغییرات کربن آلی توسط دو ویژگی سیلت و آهک تبیین می‌شوند. در پژوهش قائمی و همکاران (۲۰۱۱) مقدار کربن آلی براساس درصد رس و اسیدیته و با ضریب تبیین $0/75$ به دست آمد [۱۲]. عباسیان و همکاران (۲۰۱۲) مقدار کربن آلی را براساس جرم مخصوص ظاهری و رطوبت ظرفیت زراعی و با ضریب تبیین $0/83$ به دست آوردند [۱]. لیکن اندازه‌گیری

۳.۶. مدل‌سازی کربن آلی خاک براساس

داده‌های آزمایشگاهی و تشریح خاک رخ

در این مرحله همه متغیرهایی که در دو حالت بالا معنی‌دار شده بودند یعنی سیلت، آهک، عمق لایه ژنتیکی و کروما، وارد مدل‌سازی گردیدند و تجزیه و تحلیل رگرسیون خطی چند متغیره با ورود همه این متغیرها انجام شد که تفاوت معنی‌داری دیده نشد.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

۱.۴. توصیف آماری ویژگی‌های خاک

براساس نتایج ضریب همبستگی پیرسون (جدول ۳) از بین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده، ویژگی‌های درصد شن، درصد رس و درصد کربنات کلسیم معادل با درصد کربن آلی دارای همبستگی معنی‌دار در سطح $0/001$ درصد، و دو ویژگی سیلت و جرم مخصوص ظاهری در سطح حدود $0/003$ دارای همبستگی معنی‌دار می‌باشند. در همین راستا پژوهش‌های زیادی از جمله [۴، ۶، ۸، ۱۲ و ۱۳] همبستگی معنی‌دار بین اجزاء بافت خاک و کربن

توجه داده‌های تشریح خاک‌رخ نسبت به داده‌های آزمایشگاهی در این منطقه مطالعاتی می‌باشد.

با توجه به اینکه برخی از پژوهش‌ها نشان داده‌اند روابط رگرسیون غیرخطی سبب افزایش ضریب تبیین می‌شوند و برآوردهای به دست آمده از رگرسیون غیرخطی دقیقتر از رگرسیون خطی می‌باشند [۲ و ۸] در این پژوهش نیز از مدل‌های رگرسیونی غیرخطی به منظور بررسی امکان برآوردهای بهتر، استفاده گردید. نتایج نشان داد رویکرد رگرسیون غیرخطی افزایش قابل توجهی در مقدار ضریب تبیین به دست نمی‌دهد و ضریب تبیین برای حالت‌های اول و دوم به ترتیب از ۰/۲۵ و ۰/۶۵ به ۰/۲۷ و ۰/۶۷ افزایش یافت که این مقدار به هیچ وجه قابل توجه و معنی‌دار نیست. این یافته برخلاف پژوهش‌های دادگر و همکاران (۲۰۱۴) و باقری و همکاران (۲۰۲۱) می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که نوع توابع انتقالی خاک (خطی یا غیرخطی بودن) همانند ضرایب و متغیرهای ورودی به این توابع، دارای اعتبار منطقه‌ای هستند و همواره توابع غیرخطی برآوردهای بهتری را نسبت به توابع خطی به دست نمی‌دهند.

به منظور بررسی نتایج حاصل از دو تابع انتقالی به دست آمده، رابطه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده کربن آلی در شکل ۵ در قالب نمودارهای پراکندگی ۱:۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل، برتری تابع انتقالی به دست آمده از ویژگی‌های تشریح خاک‌رخ بر توابع انتقالی به دست آمده از ویژگی‌های آزمایشگاهی به طور آشکار، روشن است.

آماره‌های اعتبارسنجی نیز بیانگر برتری مدل به دست آمده از داده‌های تشریح خاک‌رخ می‌باشند. همانطور که در جدول ۹ می‌توان دید با وجودی که میانگین برآورد کربن آلی برای هر دو حالت (یعنی ۱- داده‌های آزمایشگاهی و ۲- داده‌های تشریح خاک‌رخ) با میانگین واقعی کربن آلی در منطقه مورد مطالعه برابر هستند و دارای مقدار حدود ۰/۷۲ می‌باشند و میانگین خطا برای هر دو مدل برابر صفر است، اما میانگین قدر مطلق

رطوبت ظرفیت زراعی از اندازه‌گیری خود کربن آلی نیاز به صرف زمان و هزینه بیشتری دارد و این موضوع مخالف چیزی است که از توابع انتقالی خاک انتظار می‌رود. باقری بداغ‌آبادی و همکاران (۲۰۲۱) نیز برای کربن آلی با درصد سیلت و شوری رابطه معنی‌دار با ضریب تبیین ۰/۴۳ ارائه دادند [۲]. این موضوع نشان می‌دهد متغیرها و اعتبار توابع انتقالی به دست آمده تا حد زیادی به صورت منطقه‌ای می‌باشند.

۳.۴. مدل‌سازی کربن آلی خاک براساس

داده‌های تشریح خاک‌رخ

با استفاده از داده‌های تشریح خاک‌رخ همانطور که در رابطه (۲) نشان داده شد ضریب تبیین به ۰/۶۵ افزایش یافت. باقری بداغ‌آبادی و همکاران (۲۰۲۱) نیز نشان دادند براساس عمق افق ژنتیکی و رنگ خاک، تابع انتقالی خاک برای کربن آلی معنی‌دار و دارای ضریب تبیین ۰/۶۳ $R^2 =$ می‌باشد که در مقایسه با تابع انتقالی حاصل از داده‌های آزمایشگاهی که دارای $R^2 = ۰/۴۳$ بود $R^2 = ۰/۲$ افزایش داشته است. شایان ذکر است همانطور که پیش از این بیان شد بسیاری از توابع انتقالی دارای اعتبار محلی می‌باشند. برای نمونه اگر در منطقه‌ای مشکل بالا بودن سفره آب زیرزمینی و احیا شدن و تغییر رنگ خاک وجود داشته باشد ممکن است رنگ خاک نتواند در برآورد کربن آلی خاک مفید واقع گردد.

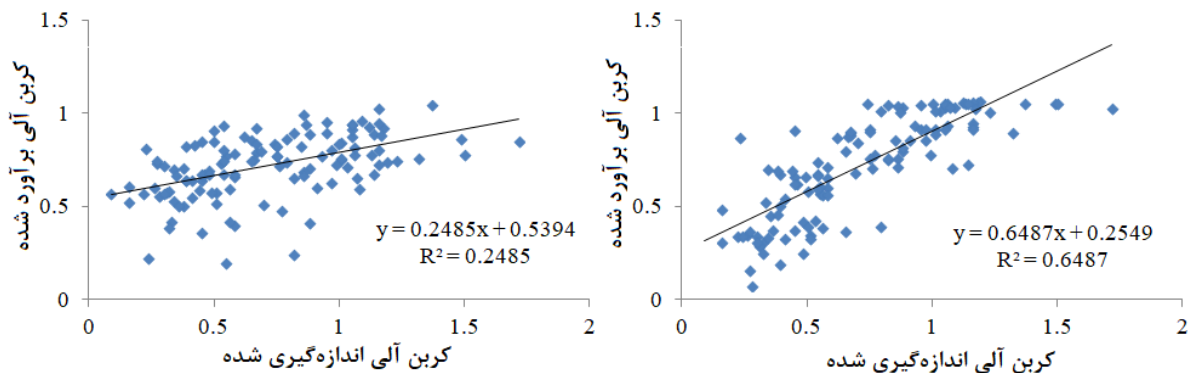
۴.۴. مدل‌سازی کربن آلی خاک براساس

داده‌های آزمایشگاهی و تشریح خاک‌رخ

ضریب تبیین با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و تشریح خاک‌رخ همان $R^2 = ۰/۶۵$ گردید که نسبت به حالت دوم تغییر نکرد و به بیان دیگر ورود سیلت و آهک منجر به افزایش ضریب تبیین نگردید که نشان می‌دهد در حضور دو ویژگی عمق ژنتیکی و رنگ خاک، داده‌های آزمایشگاهی اثر معنی‌داری در برآورد کربن آلی خاک ندارند. این موضوع بیانگر اهمیت و کارایی قابل

ضریب تبیین آن بسیار کمتر از حالت ۲ است.

خطا و ریشه میانگین مربعات خطا برای حالت ۱ بیشتر و



شکل ۵. ارتباط بین کربن آلی اندازه‌گیری شده با کربن آلی برآورد شده در نمودار ۱:۱ برای مدل خطی با داده‌های تشریح خاک‌رخ (راست) و مدل خطی با داده‌های آزمایشگاهی (چپ)

و ارزانتر از داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده‌اند، در برآورد کربن آلی خاک بسیار کارآمدتر بوده‌اند. این موضوع اهمیت توجه بیشتر به داده‌های تشریح خاک‌رخ در فرآیند مدل‌سازی و به دست آوردن توابع انتقالی خاک را به خوبی نمایان می‌سازد.

همچنین در مقایسه با خط $y=x$ یا همان خط ۱:۱، حالت دوم دارای ضریب x بزرگتر (۰/۶۵ در برابر ۰/۲۵) و مقدار ثابت کوچکتر (۰/۲۵ در برابر ۰/۵۴) است و به دیگر سخن به خط $y=x$ نزدیکتر می‌باشد. این نتایج همراستا با شکل ۵ نشان می‌دهند داده‌های عملیات میدانی که بسیار سریع

جدول ۹. آماره‌های اعتبارسنجی برای دو حالت مدل‌سازی

حالت	متغیرهای ورودی	میانگین	R^2	ME	MAE	RMSE	مقایسه با خط $y=x$
۱- داده‌های آزمایشگاهی	سیلت و آهک	۰/۷۲	۰/۲۵	۰/۰۰	۰/۲۳	۰/۰۹	$Y = 0.25x + 0.54$
۲- داده‌های تشریح خاک‌رخ	عمق لایه ژنتیکی و کروما	۰/۷۲	۰/۶۵	۰/۰۰	۰/۱۴	۰/۰۴	$Y = 0.65x + 0.25$

انتقالی به واقعیت نزدیکتر باشد، کارایی این توابع بهتر و استقبال و کاربرد آن بیشتر خواهد بود. این پژوهش نشان داد داده‌هایی که در عملیات میدانی و بویژه عملیات تشریح خاک‌رخ به دست می‌آیند تا حد زیادی می‌توانند به صورت کاربردی مورد استفاده قرار گیرند و در کاهش زمان و هزینه‌ها سودمند باشند. نتایج این پژوهش نشان داد که با بکارگیری داده‌های تشریح خاک‌رخ با کمترین هزینه و زمان، می‌توان با رویکرد توابع انتقالی خاک، برآورد قابل قبولی از مقدار کربن آلی خاک داشت. با توجه

۵.۴. نتیجه‌گیری

در پایان، براساس نتایج و بحث بیان شده در بالا می‌توان گفت زمان و هزینه دو ویژگی بسیار مهم می‌باشند که پروژه‌ها را تحت تأثیر خود قرار می‌دهند. در این راستا، بکارگیری توابع انتقالی خاک می‌تواند ابزار مناسبی برای برآورد ویژگی‌هایی باشند که زمان بر و یا پرهزینه می‌باشند. هرچه داده‌هایی که به عنوان ورودی در این توابع مورد استفاده قرار می‌گیرند ساده‌تر و کم هزینه‌تر باشند و زودتر بدست بیایند و برآوردهای تابع

تشکر و قدردانی

این پژوهش منتج از پروژه "مطالعات نیمه تفصیلی خاک‌شناسی در چهار شهرستان سنندج، دهگلان، قروه و بیجار" می‌باشد که بدین وسیله از سازمان جهاد کشاورزی استان کردستان، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان و موسسه تحقیقات خاک و آب که در انجام این پروژه نهایت همکاری را داشته‌اند کمال سپاسگزاری به عمل می‌آید.

به اینکه بسیاری از توابع انتقالی خاک دارای اعتبار منطقه‌ای هستند، پیشنهاد می‌شود در اقلیم‌های مختلف پژوهش‌های مشابهی انجام گردد تا بتوان به طور ملی برای چنین ویژگی‌هایی توابع انتقالی مربوطه را به دست آورد. همچنین با انجام پژوهش‌های بیشتر، روابط علی و معلولی بین ویژگی‌هایی مانند رنگ و بافت خاک با مواد آلی مورد بررسی قرار گیرد تا بتوان مدل‌سازی بهتری از این روابط به دست آورد.

References

- [1] Abbasian, A., Delavar, M.A., Golchin, A. and Beheshti Al-Agha, A. (2012). Comparison of Accuracy of Regression Transfer Functions and Artificial Neural Network in Estimating Organic Carbon of Histosol Soils in Shahrekord, National Soil Conference, Sustainable Agriculture, Malayer.
- [2] Aitkenhead, M., Coull, M., Towers, W., Hudson, G. and Black, H.I.J. (2013). Prediction of soil characteristics and colour using data from the National Soils Inventory of Scotland. *Geoderma*. 200–201: 99–107.
- [3] Asensio, S., A. Mateu, H. Moreno-Ramon, J.A. Balasch, and X. Lio. (2013). Statistical relationships between soil colour and soil attributes in semiarid areas. *Biosystems Engineering*. 116: 120-129.
- [4] Bagheri Bodaghabadi M., Mosleh Z. Ebrahimi F. (2021). The Importance of Soil Profile Information in Determining Relationships Between Different Soil Properties, Case Study: Estimation of Soil Organic Carbon. 17th Iranian Soil Science Congress, Karaj, Iran.
- [5] Bagheri Bodaghabadi, M. (2018). Is it necessarily a normally distributed data for kriging? A case study: soil salinity map of Ghahab area, central Iran. *Desert*. 23-2: 284-293.
- [6] Bezabih, B., Aticho, A., Mossisa, T. and Dume, B. (2016). The effect of land management practices on soil physical and chemical properties in Gojeb Sub-river Basin of Dedo District, Southwest Ethiopia. *Journal of Soil Science and Environmental Management*. 7:154-165.
- [7] Costa, J.J.F., Giasson, E., da Silva, E.B., Coblinski, J.A. and Tiecher, T. (2020). Use of color parameters in the grouping of soil samples produces more accurate predictions of soil texture and soil organic carbon. *Computers and Electronics in Agriculture*. 177: 105710.
- [8] Dadgar, M., Mahmoudi, S., Mahdian, M., Masih Abadi, M., Sokooti Oskouie, R. (2014). Estimating soil organic carbon using pedotransfer functions in Damavand Rangelands. , 21(3), 409-415. doi: 10.22092/ijrdr.2014.12114
- [9] Devore, J.L. (2011). *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences* (8th ed.). Boston, MA: Cengage Learning. pp. 508–510. ISBN 978-0-538-73352-6.
- [10] Fahmideh, S., Davari, M., Mosaddeghi, M., Sharifi, Z. (2020). Performance evaluation of reflectance spectroscopy for estimation of soil organic carbon content in Zrebar lake watershed, Kurdistan province. *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(6), 59-78. doi: 10.22069/jwsc.2019.16387.3171
- [11] Franzmeier, D.P. (1988). Relation of organic carbon content to texture of Indiana soils. *Soil and Atmospheric Sciences*. 98: 1-10.

- [12] Ghaemi, M., Astaraei, A., Sanaeinejad, S. (2011). Assessment of Spatial Variations and Estimating Soil Organic Carbon by Using Pedotransfer Functions and Feasibility Study of SOC by Remote Sensing in Arid and Semi Arid Area (A Case Study in Neyshaboor Area, Iran). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 9(2), 294-300. doi: 10.22067/gsc.v9i2.11007
- [13] Kasel, S., Singh, S., Sanders, G. J. and Bennett, L. T. (2011). Species-specific effects of native trees on soil organic carbon in biodiverse plantings across north-central Victoria. *Geoderma*. 161: 95–106.
- [14] Lindbo, D.L., Rabenhorst, M.C. and Rhoton, F.E. (1998). Soil color, organic carbon, and hydromorphy relationships in sandy epipedons, Quantifying Soil Hydromorphol. *SSSA Spec. Publ.* 54. 96e105.
- [15] Matinfar, H., Mahmodzadeh, H. and Fariabi, A. (2018). Estimation Soil Organic Matter (SOM) Content Using Visible and Near Infrared Spectral data, PLSR and PCR Statistical Models. *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 10(2), 15-32.
- [16] Munsell Soil Color Charts. (2000). Munsell Soil Color Charts (revised). Munsell Color.
- [17] Schoeneberger, P.J, Wysocki, D.A, Benham, E.C, and Soil Survey Staff. (2012). Field book for describing and sampling soils, Version 3.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE. 300p.
- [18] Shangshi, L., Haihua, Sh., Songchao, C., Xia, Z., Asim, B., Xiaolin, J., Zhou, Sh., and Jingyun, F. (2019). Estimating forest soil organic carbon content using vis-NIR spectroscopy: Implications for large-scale soil carbon spectroscopic assessment. *Geoderma*. 348: 37-44.
- [19] Soil Survey Staff. (2014a). Keys to Soil Taxonomy. 12th. ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- [20] Soil Survey Staff. (2014b). Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 42, Version 5.0. R. Burt and Soil Survey Staff (ed.). U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- [21] Viscarra Rossel, R.A., Behrens, T., Ben-Dor, E., Brown, D.J., Demattê, J.A.M., Shepherd, K.D., Shi, Z., Stenberg, B., Stevens, A., Adamchuk, V., Aichi, H., Barthès, B.G., Bartholomeus, H.M., Bayer, A.D., Bernoux, M., Böttcher, K., Brodský, L., Du, C.W., Chappell, A., Fouad, Y., Genot, V., Gomez, C., Grunwald, S., Gubler, A., Guerrero, C., Hedley, C.B., Knadel, M., Morrás, H.J.M., Nocita, M., Ramirez-Lopez, L., Roudier, P., Campos, E.M.R., Sanborn, P., Sellitto, V.M., Sudduth, K.A., Rawlins, B.G., Walter, C., Winowiecki, L.A., Hong, S.Y. and Ji, W. (2016). A global spectral library to characterize the world's soil. *Earth-Science Reviews*. 155: 198–230.
- [22] Viscarra Rossel, R.A., Cattle, S.R., Ortega, A. and Fouad, Y. (2009). In situ measurements of soil colour, mineral composition and clay content by vis-NIR spectroscopy. *Geoderma*. 150: 253–266.
- [23] Vodyanitskii, Y.N. and Savichev, A.T. (2017). The influence of organic matter on soil color using the regression equations of optical parameters in the system CIE- Lab. *Annals of Agrarian Science*. 15: 380–385