

تعیین عوامل مؤثر بر حساسیت خاک به تشکیل اندودۀ سطحی با استفاده از تحلیل آماری چند متغیره

ژیلا اسدی فرد^{۱*}: دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تبریز

عباس احمدی: دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تبریز

علی اصغر جعفرزاده: استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تبریز

علی داد کرمی: دانشیار پژوهشی مرکز تحقیقات کشاورزی استان فارس

سیامک علوی کیا: دانشیار گروه اصلاح و نباتات دانشگاه تبریز

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۷/۸

تاریخچۀ مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۵/۲۵)



چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی عوامل مؤثر بر حساسیت خاک به تشکیل اندودۀ سطحی انجام شد. برای اجرای این تحقیق، هشتاد نمونه خاک (۲۰-۰ سانتی متری) از دشت کوار استان فارس تهیه شد و بعد از برداشت، در هوا خشک و از الک دو میلی متری عبور داده شد. سپس پارامترهای توزیع اندازه ذرات، رطوبت، ماده آلی، هدایت الکتریکی و pH عصارۀ اشباع خاک اندازه گیری شد. همچنین میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها، کربنات کلسیم معادل، ابعاد فرکنالی ذرات خاکدانه به طول یک سانتی متر (مدل‌های ریو-اسپوزیتو، بارتولی و تایلر)، درصد اشباع رطوبتی، سدیم، کلسیم و منیزیم تعیین شد. در ادامه، نمونه‌های دست نخورده با استفاده از استوانه‌های فلزی تهیه شد و پس از اشباع در دستگاه بار افتان قرار گرفت، سپس مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع نمونه‌ها اندازه گیری شد. ارزیابی حساسیت خاک به تشکیل اندودۀ، با شاخص‌های پایداری ساختمان خاک (SI)، حساسیت نسبی به تشکیل اندودۀ سطحی (RSI)، سلبندی (CI)، پایداری مرطوب خاکدانه‌ها (WAS)، مقاومت فروروی (PR)، حساسیت به سلبستن (CSI) و قوام (C₅-C₁₀) انجام شد. از روش‌های آماری چند متغیره (تجزیه خوشه‌ای، تجزیه تابع تشخیص و همبستگی کانونیک) نیز استفاده شد. همچنین بر اساس ماتریس ساختار مشخص شد که شاخص‌های SI, CI و CSI از مهم‌ترین شاخص‌هایی است که به تفکیک این دو گروه از یکدیگر منجر می‌شود. بیشترین همبستگی کانونی در درجه اول به ماده آلی سپس به رس تعلق دارد. دو شاخص پایداری ساختمان خاک (SI) و شاخص سلبندی (CI) نیز از مهم‌ترین شاخص‌هایی است که در مقایسۀ بین شاخص‌ها، بیشترین همبستگی را به خود اختصاص می‌دهد. مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار بر شاخص‌های ارزیابی اندودۀ سطحی - که به تفکیک دو گروه، ارائه تابعی با قابلیت بالا و بیشترین همبستگی کانونی منجر می‌شود - ابتدا ماده آلی سپس رس است. واژگان کلیدی: آنالیز خوشه‌ای، اندودۀ سطحی، پایداری خاکدانه‌ها، حساسیت خاک، همبستگی کانونیک.

* نویسنده مسئول: Zh.Asadifard@gmail.com

۱- مقدمه

برخورد قطرات باران با سطح خاک، یکی از عوامل اصلی تشکیل اندوده فیزیکی است. انرژی جنبشی قطرات باران به تخریب خاکدانه‌های خاک و در نتیجه متراکم شدن، شل شدن، پراکندگی فیزیکی و شیمیایی و آرایش مجدد ذرات منجر می‌شود. در هنگام تشکیل اندوده سطحی، تخلخل خاک سطحی به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد که دلیل این امر، پر شدن منافذ خاک با مواد ریز و مسدود شدن آن است. این مسئله در اثر ضربات قطرات باران و رسوب ذرات رس در سطح رویی خاک، بعد از بارندگی اتفاق می‌افتد و یک اندوده ساختاری در لایه سطحی خاک به وجود می‌آورد. در نهایت، خشک شدن اندوده ناشی از باران، به شکل‌گیری سله ساختاری در سطح خاک می‌انجامد و این امر به کاهش سرعت نفوذ و ایجاد جریان سطحی و فرسایش خاک در زمین‌های شیب‌دار منجر می‌شود. اما اگر سطح زمین افقی و نسبتاً مسطح باشد، غالباً به تجمع آب و ایجاد سله منجر می‌شود که می‌تواند از جوانه‌زنی بذور جلوگیری کند.

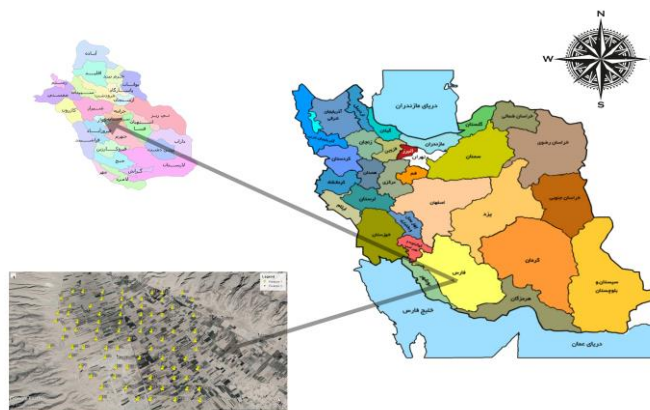
Richards (1953) معتقد است در نتیجه مسدود شدن منافذ و اندوده بستن سطح، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌تواند به شدت کاهش یابد (Bertrand and Kamil, 1962, Chen and Banin, 1975). به طور کلی، اصطلاح «اندوده سطحی خاک» به یک لایه سطحی از خاک با تخلخل و نفوذپذیری کاملاً کاهش‌یافته ناشی از خیس شدن سریع خاک خشک، برخورد قطره باران، رسوب مواد ریز خاک و پراکندگی شیمیایی یا ترکیبی از این فرایندها اشاره دارد (Chartres and Greeves, 1998). اندوده بستن خاک با حالتی مرطوب همراه است؛ در حالی که سله بستن به حالتی خشک اشاره دارد که نتیجه اندوده بستن خاک است. بنابراین، فرایندها و ویژگی‌های اولیه تشکیل «اندوده» و «سله» یکسان است (Valentin and Bresson, 1997). اندوده بستن، نتیجه دو مکانیسم مکمل تخریب فیزیکی خاکدانه‌های خاک سطحی و متراکم شدن خاکدانه‌های تخریب شده توسط برخورد قطرات باران و پراکندگی فیزیکی و شیمیایی رس‌های خاک در حال نفوذ به درون خاک انتقال‌یافته و منافذ نزدیک خاک سطحی توسط آب است و با مسدود کردن منافذ، لایه‌ای با نفوذپذیری کم یا منطقه «شسته شده» را شکل می‌دهد (McIntyre, 1958). نقش مکانیسم دوم یا پراکندگی فیزیکی و شیمیایی رس‌های خاک در تشکیل اندوده، به‌طور گسترده‌ای مطالعه (Shainberg and Levy, 1992) و مشخص شد که در این مکانیسم، تشکیل اندوده به درصد سدیم تبادلی خاک، غلظت الکترولیت‌ها و ترکیب آب مورد استفاده برای آزمایش بستگی دارد (Kazman et al, 1983 & Agassi et al, 1981). برعکس، فرایند مکانیکی که به شکستن خاکدانه‌های خاک می‌انجامد و سطح آن را متراکم می‌کند، چندان واضح نیست و علاوه بر ویژگی باران، به پایداری خاکدانه‌های خاک سطحی نیز بستگی دارد (Moldenhauer and Kemper, 1969).

اندوده بستن خاک بیشتر تحت تأثیر شرایط خاص غالب در طی شکل‌گیری آن است و متغیرهای مؤثر بر آن را می‌توان به چهار دسته ویژگی‌های فیزیکی خاک (مانند سرعت نفوذ، قابلیت هدایت، انتقال ذرات، تغییرات در چگالی ظاهری، توزیع اندازه خاکدانه‌ها، سرعت نفوذ باران در خاک، اندازه و پایداری خاکدانه‌ها و خیس شدن ناگهانی آنها)، شرایط شیمیایی سیستم خاک - آب (افزایش درصد سدیم تبادلی، غلظت الکترولیت محلول خاک و افزایش کلرید سدیم)، ویژگی‌های باران (شدت بارندگی، قطر قطرات باران، سرعت بارندگی و انرژی جنبشی) و شرایط اولیه و مرزی

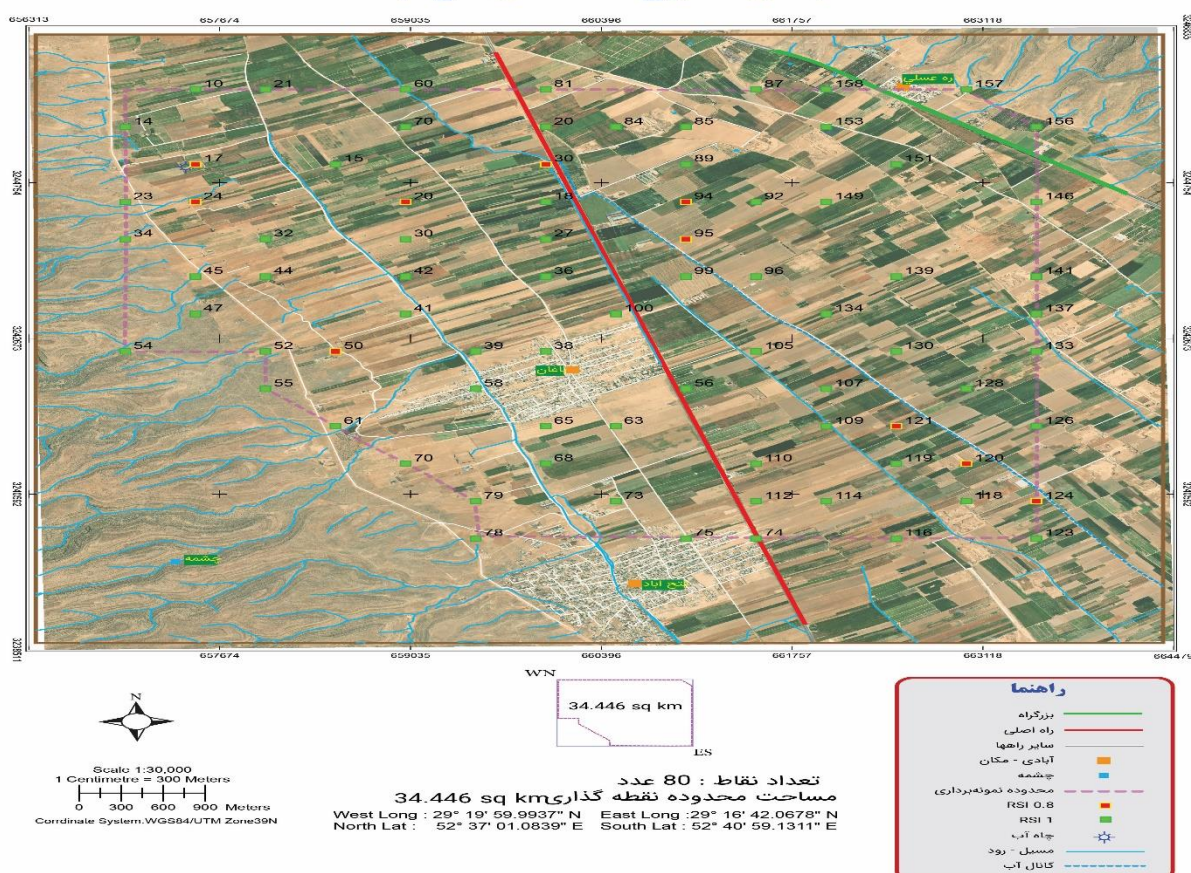
جریان (توزیع مقدار رطوبت اولیه در نیمرخ خاک و ارتباط آن با توزیع بارموتینگ، شیب هیدرولیکی، هدایت هیدرولیک خاک و تحرک ذرات ریز) طبقه‌بندی کرد (Mualem et al, 1990). تشکیل اندوده سطحی در اکثر خاک‌های ایران به علت اقلیم خشک و نیمه‌خشک، داشتن پوشش گیاهی ضعیف و خاکدانه‌های سست، پدیده‌ای رایج است و با توجه به تأثیری که این پدیده در فرایندهای فرسایشی دارد، شناخت کامل آن می‌تواند رویکرد ما را در استفاده از مدل‌های برآورد فرسایش و مدیریت در حفاظت خاک تغییر دهد. دشت کوار به دلیل گوناگونی محصولات زراعی و باغی، در زمره قطب‌های مهم کشاورزی استان فارس است و به همین سبب، توجه به اصول کشاورزی پایدار به‌ویژه تعیین عوامل مؤثر بر حساسیت خاک به شکل‌گیری اندوده، اهمیت به سزایی دارد. هدف از این پژوهش، تعیین عوامل مؤثر بر تشکیل اندوده سطحی، شناسایی مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر خاک در کنترل تشکیل اندوده سطحی و ارائه شاخص مناسب برای تعیین حساسیت خاک به تشکیل این اندوده از روی ویژگی‌های زودیافت خاک است.

۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، قسمتی از دشت کوار واقع در حد فاصل عرض‌های جغرافیایی ۲۹ درجه و ۱۶ دقیقه تا ۲۹ درجه و ۱۹ دقیقه شمالی و ۵۲ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۴۱ دقیقه طول شرقی با مساحت ۲۷/۲۲ کیلومتر مربع (۲۷۲۲ هکتار) است که موقعیت نقاط نمونه‌برداری شده در آن در شکل ۱ نشان داده شده است. این دشت یکی از دشت‌های حاصلخیز استان فارس به وسعت ۳۵۱ کیلومتر مربع و با متوسط ارتفاع ۱۴۸۰ متر از سطح دریاست که در چهل کیلومتری جنوب شرق شیراز واقع شده است (Bayat, 1388). منطقه مورد پژوهش نیز دارای خاکی آبرفتی به رنگ قهوه‌ای تا قهوه‌ای مایل به زرد است و مقدار کمی آهک ثانویه (لکه‌های آهک قابل رؤیت با چشم نامسلح) دارد. بیرون‌زدگی‌های مختلف در منطقه نیز با توجه به نوع سنگ‌ها، سازندهای کژدمی، سروک، گورپی، پابده، جهرم، آسماری، رازک، میشان، بختیاری و رسوبات آبرفتی نو زیستی است (More and Morady, 1384).



بخش طسوج - دهستان فتح آباد



نقشه ۱: موقعیت هشتاد نقطه نمونه برداری شده دشت کوار

۳- مواد و روش

روش و نحوه اجرای تحقیق: این تحقیق در مراحل مختلف اعم از صحرایی و نمونه برداری، مطالعات آزمایشگاهی و تجزیه و تحلیل نتایج اجرا شد:

کارهای صحرائی و نمونه برداری

برای اجرای این پژوهش، ابتدا نقشه کاربری اراضی، زمین شناسی و لیتوگرافی منطقه تهیه و با توجه به نوع کاربری و موقعیت آن، هشتاد نمونه خاک (هرکدام به وزن تقریبی سه کیلوگرم) بر اساس حداکثر تفاوت و اختلاف در ویژگی های شیمیایی و فیزیکی از عمق ۰-۲۰ سانتی متری سطح خاک به صورت تصادفی نظارت شده برداشته شد. سپس نقشه پراکنش نقاط نمونه برداری در محیط نرم افزار ArcGIS تهیه شد.

مطالعات آزمایشگاهی

نمونه های تصادفی از عمق ۰-۲۰ سانتی متری پروفیل های خاک برداشت شد و به آزمایشگاه انتقال یافت، سپس هوا خشک و از الک دو میلی متری عبور داده شد. بافت خاک به روش هیدرومتر (Gee and Or, 2002)، کربنات کلسیم معادل به روش حرارت دهی و تیتراسیون برگشتی با اسید کلریدریک (Nelson, 1982)، مقدار ماده آلی به روش سوزاندن تر (Nelson and summer, 1982) و هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) به روش بار افتان تعیین شد. هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع (EC_e) و پ هاش گل اشباع (pHe) به ترتیب با استفاده از دستگاه پ هاش متر و دستگاه هدایت سنج مدل Ecomet اندازه گیری شد. همچنین پس از عصاره گیری از گل اشباع نمونه ها، سدیم عصاره ها با دستگاه فلیم فتومتر و کلسیم و منیزیم با دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه گیری شد. میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه ها (MWD) و (GMD) با روش الک تر (Nimmo and Perkins, 2002) تعیین شد. برای تعیین جرم ذرات خاکدانه نیز ابتدا توزیع اندازه ذرات خاک در دامنه های ۱-۲، ۰/۵-۱، ۰/۲۵-۰/۵، ۰/۱-۰/۲۵، ۰/۰۵-۰/۱، ۰/۰۲-۰/۰۵، ۰/۰۱-۰/۰۲ و کوچک تر از ۰/۰۰۲ میلی متر تعیین شد. سپس جرم ذرات خاکدانه ها از روی توزیع اندازه ذرات با استفاده از مدل Bartoli و همکاران (1991) محاسبه شد. همچنین برخی از شاخص های مرتبط با حساسیت خاک به تشکیل اندوده، برای خاک های مورد مطالعه اندازه گیری شد که در ادامه به تفصیل بدان پرداخته خواهد شد:

شاخص سله بندی (CI):^۱ سله سطحی خاک از طریق کاهش نفوذ، جلوگیری از جوانه زنی بذر، کاهش هوا دهی ریشه و میزان آب قابل دسترس، خاک های کشاورزی را به شدت تحت تأثیر قرار می دهد. آگاهی درباره ویژگی های هیدرودینامیک سله خاک سطحی، برای برآورد و کاهش اثرات منفی آن مهم است. FAO (1979) نحوه محاسبه شاخص سله بندی را بر اساس ترکیبات بافت خاک و محتوای مواد آلی به صورت رابطه زیر پیشنهاد داد:

$$CI = \frac{(1.5 \times sf) + (0.75 \times Sc)}{Clay + (10 \times SOM)} \quad \text{رابطه ۱}$$

¹ Crusting Index

در این رابطه، Sf درصد سیلت ریز ($5-20\mu m$)، Sc درصد سیلت درشت ($20-50\mu m$)، Clay رس و SOM درصد مواد آلی خاک است که شاخص CI، با محتوای رس و مواد آلی نسبت معکوس و با محتوای سیلت ریز و درشت رابطه مستقیم دارد.

شاخص پایداری خاک (SI)^۱: مقدار این شاخص با استفاده از رابطه ۲ قابل محاسبه است (Reynolds et al, 2009). در این رابطه، SOC کربن آلی خاک و ۱/۷۲۴، ضریبی است که کربن آلی را به مواد آلی خاک تبدیل می‌کند.

$$\text{رابطه ۲} \quad SI = \left(\frac{SOC \times 1.724}{\text{Clay} + \text{Silt}} \right) \times 100$$

شاخص حساسیت به سله بستن (CSI)^۲: درجه حساسیت خاک به سله بستن یا شاخص حساسیت به سله بستن (CSI)، از نسبت مجموع شن ریز و سیلت - که در تشکیل سله خاک سهم عمده‌ای دارند - به مجموع رس، شن متوسط و درشت بازمی‌گردد که بر اساس رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$\text{رابطه ۳} \quad CSI = \left(\frac{\% fS + \% \text{Silt}}{\% \text{Clay} + \% cS + \% mS} \right)$$

که در آن، fS درصد شن ریز ($2/0-20/0$ میلی‌متر)، Silt درصد سیلت ($2/0-2/0$ میلی‌متر)، Clay درصد رس (کوچک‌تر از $2/0$ میلی‌متر)، cS درصد شن درشت ($2-5/0$ میلی‌متر) و mS درصد شن متوسط ($2/0-5/0$ میلی‌متر) است. در مطالعه Manyevere و همکاران (2015)، شاخص جدیدی برای خاک‌های با مقدار شن ریز زیاد به‌ویژه خاک‌های به وجود آمده از سنگ‌های دگرگونی پیشنهاد شد که شاخص فوق برخلاف شاخص FAO (1980)، تأثیر مقدار شن ریز را بر اندوده و سله بستن سطح در نظر می‌گیرد. برخلاف شاخص سله بستن FAO (1980) که مقادیر سیلت را به سیلت ریز و درشت تفکیک می‌کند و در محاسبات مورد استفاده قرار می‌دهد، مقدار کل سیلت را در محاسبات قابل توجه قرار می‌دهد.

شاخص پایداری (C₅-C₁₀)^۳ توسط آزمایش آتربرگ و کاسه گرانده، از تفاوت درصد رطوبت پنج و ده ضربه بر اساس معادله ۴ محاسبه شد و شاخص پایای کمتر از ۲/۵ درصد، خاک ناپایدار و شاخص پایداری بیش از ۲/۵ درصد خاک، پایدار در نظر گرفته شد (De-Ploey, 1981):

$$\text{رابطه ۴} \quad C_5 - C_{10} = W_5 - W_{10}$$

در این معادله، C₅-C₁₀ شاخص پایداری (%،)، W₅ درصد رطوبت خاک در پنج ضربه و W₁₀ درصد رطوبت خاک در ده ضربه است. مقدار این شاخص برای خاک‌های مقاوم، به تشکیل اندوده سطحی بزرگ‌تر از ۳ و برای خاک‌های حساس کوچک‌تر از ۲/۵ است.

¹ Soil Stability Index

² Crusting Susceptibility Index

³ Consistency Index

شاخص نسبی تشکیل اندوده (RSI)^۱: بر اساس نظر Lujan (2003)، این شاخص بیانگر تغییرات هدایت هیدرولیکی اشباع اندوده تشکیل شده توسط برخورد قطرات باران در یک لایه از خاکدانه‌ها به ضخامت تقریبی ۱/۵ سانتی‌متر و قطر دو تا چهار میلی‌متر است که در طی شصت دقیقه باران شبیه‌سازی شده با شدت حدود نود میلی‌متر در ساعت به وجود آمده‌است. در این روش هر چه مقدار شاخص RSI بزرگ‌تر باشد، خاک نسبت به تشکیل اندوده سطحی حساسیت بیشتری دارد؛ به طوری که اگر مقدار آن کوچک‌تر از پنج باشد، مستعد تشکیل اندوده سطحی است.

شاخص پایداری خاکدانه‌ها در آب (WAS)^۲: در این شاخص، پایداری خاکدانه‌ها در حالت مرطوب با به کار بردن خاکدانه‌های ۱-۲ میلی‌متری و قرار دادن خاکدانه‌های خیس درون دستگاه غربال خیس به روش Kemper and Rosenau (1986) محاسبه می‌شود. دستگاه، عمل غربال کردن خاکدانه‌ها را با بالا و پایین بردن غربال محتوی خاکدانه‌ها در آب داخل محفظه انجام می‌دهد. فاصله یا طول حرکت (بالا و پایین رفتن) غربال در آب، به اندازه ۱/۳ سانتی‌متر و دفعات بالا و پایین رفتن غربال به میزان ۳۵ بار در دقیقه و به مدت ۳ دقیقه صورت می‌گیرد.

$$WAS = \frac{W_1 - W_s}{W_d - W_s} \times 100 \quad \text{رابطه ۵}$$

در این معادله، W_1 جرم خاکدانه‌های باقیمانده بر روی الک ۰/۲۵ میلی‌متر، W_s جرم شن و W جرم کل خاکدانه‌های الک شده است. شاخص پایداری ساختمان (WAS) - که بیانگر وزن خاکدانه‌های باقیمانده بر روی الک ۰/۲۵ میلی‌متر نسبت به وزن کل خاکدانه‌هایی با قطر ۱-۲ میلی‌متر است - شاخصی بسیار حساس برای بررسی اثر عملیات مدیریتی بر پایداری ساختمان خاک است (Kemper and Rosenau, 1986).

شاخص مخروطی (CI)^۳: مقاومت در برابر نفوذ خاک توسط یک نفوذسنج مخروطی اندازه‌گیری می‌شود که شاخص مخروطی خاک نام دارد. Bédard و همکاران (1997) و Tessier و همکاران (1997) بیان داشتند که شاخص مخروطی، شاخصی مهم برای تعیین تراکم خاک است. داده‌های به دست آمده از نفوذسنج توسط فرمول ۶ در محیط نرم‌افزار اکسل محاسبه شده‌است.

$$PR = \frac{100x}{0.7952(40-x)^2} \quad \text{رابطه ۶}$$

در معادله فوق، x مقدار فروروی ثبت شده بر روی دستگاه فروسنج بر حسب میلی‌متر و PR مقدار فشار مورد نیاز محاسبه شده بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است.

تحلیل آماری نتایج

¹ Relative Sealing Index

² Water Aggregates Stability

³ Cone Index

برای بررسی چگونگی توزیع داده‌ها و دستیابی به خلاصه آماری هر ویژگی قبل از اجرای تجزیه و تحلیل آماری، توصیف آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Minitab18 بررسی شد. در پیش‌پردازش داده‌ها، آماره توصیفی متغیرها از قبیل میانگین، حداکثر، حداقل و واریانس هر یک از ویژگی‌ها، دیاگرام پراکنش داده‌ها و توزیع آنها با استفاده از نرم‌افزار مذکور به دست آمد، سپس جدول اطلاعات توصیفی به کمک نرم‌افزار Excel تهیه شد. برای تعیین ویژگی‌های مؤثر بر حساسیت خاک به آلوده سطحی، ابتدا همبستگی خطی بین متغیرها توسط نرم‌افزار SPSS-21 مشخص و با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون (r)، رابطه همبستگی بین شاخص‌های آلوده بستن با ویژگی‌های زود یافت خاک تعیین شد. پس از پیش‌پردازش داده‌ها، برای درک بهتر اینکه کدام یک از شاخص‌ها تفاوت بهتری در بین نمونه‌ها ایجاد می‌کند و برای گروه‌بندی نمونه‌های مورد مطالعه براساس حساسیت به تشکیل آلوده سطحی، از تجزیه خوشه‌ای استفاده شد. در این روش، ابتدا هر یک از متغیرهای مورد مطالعه به توزیع نرمال (Z استاندارد کردن به روش آماری) تبدیل و پس از آن، در تجزیه خوشه‌ای برای تعیین فاصله بین متغیرها از مربع فاصله اقلیدوسی و روش واردز استفاده شد و تجزیه کلاستر نیز بر اساس داده‌های اصلی برای تمامی پارامترها صورت گرفت که نتایج آنها به صورت دندروگرام نشان داده شد. در این تحقیق با توجه به کثرت ویژگی‌های مورد مطالعه، وقوع پدیده چند هم‌خطی دور از انتظار بود؛ بنابراین، برای بررسی نهایی از پارامترهای Tolerance (میزان تحمل) و VIF (عامل تورم واریانس) در تجزیه استفاده و در نهایت، همبستگی کانونیک با نرم‌افزار Statistica 12 تعیین شد.

۴- یافته‌ها

برخی از آماره‌های مربوط به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه، در جدول ۱ ارائه شده است. در این خاک‌ها، دامنه تغییرات pH از قلیایی ضعیف ($7/4$) تا قلیایی متوسط ($8/5$) متغیر است و میانگین $7/8$ دارد که این امر را می‌توان به بالا بودن کربنات کلسیم معادل نسبت داد؛ زیرا با توجه به آهکی بودن سازندهای این منطقه، به احتمال زیاد کربنات کلسیم معادل با میانگین $48/2\%$ به افزایش pH و خاصیت بافری خاک منجر شده است (Goldberg and Forster, 1990). ۳۵ نمونه از خاک‌های مورد مطالعه، جزو خاک‌های غیر شور و کمی شور ($E_{ce} \leq 4 \text{ dS/m}$)، ۳۲ نمونه با شوری متوسط ($4-8 \text{ dS/m}$) و ۱۳ نمونه ($8-16 \text{ dS/m}$) با شوری زیاد است و میانگین شوری این خاک‌ها برابر با $7/8$ دسی زیمنس بر متر می‌باشد. بیشترین هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع خاک‌های مورد مطالعه نیز $8/5$ است که از منطقه مورد مطالعه جمع‌آوری شده است. نمونه‌ها با هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع، مربوط به نقاطی در بستر دشت با کاربری کشاورزی است که احتمالاً از مصرف کود و بالا رفتن مواد آلی سرچشمه گرفته و در نتیجه هدایت الکتریکی آن افزایش یافته است. اکثر این یافته‌ها با نتایج Chaneton and Lavado (1996) مطابقت دارد؛ در حالی که کمترین مقدار آن ($1/3 \text{ dS/m}$) متعلق به بخش‌های جنوبی منطقه مورد مطالعه است که از سازندهای آهکی (آسماری- جهرم) تأثیر می‌پذیرد (Bayat et al, 1388).

جدول ۱: دامنه تغییرات برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه ($n=80$)

پارامترها متغیرها	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	واریانس	چولگی	ضریب تغییرپذیری	واحد
سیلت	۳۴/۵	۶۲/۸	۵۲/۹	۶/۱	۳۷/۸	-۱/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۲
رس	۱۱/۱	۴۴/۶	۲۸/۹	۷/۳	۵۳/۶	-۰/۱۸	۰/۱	۰/۰۱
کربنات کلسیم	۴۰/۲	۴۹/۸	۴۸/۲	۲/۲	۵/۲	-۲/۰۳		%
pHe عصاره گل اشباع	۷/۴	۸/۵	۷/۸	۰/۲۱	۰/۰۴	۰/۵۲		
هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع (ECe)	۱/۳	۸/۷	۴/۶	۲/۳	۵/۷	۰/۲۲	۰/۳	Dsm ⁻¹
ماده آلی	۰/۶۸	۳/۱	۱/۸	۰/۶۷	۰/۴۴	۰/۱۲	۰/۲	%
MWD	۰/۲۱	۰/۶۹	۰/۳۶	۰/۰۸	۰/۰۰۷	۰/۹۲	۰/۱	mm
GMD	۰/۰۷۲	۰/۳۲	۰/۱۴	۰/۰۴	۰/۰۰۲	۱/۱۷	۰/۲	mm
سدیم	۰/۶۵	۲۰/۳	۵/۰۸	۴/۲	۱۷/۹	۱/۶	۰/۴	meq/l
منیزیم	۰/۲۳	۱۳/۶	۵/۵	۳/۹	۱۵/۲	۰/۵۱	۰/۴	meq/l
کلسیم	۰/۷۲	۱۵/۷	۴/۰۷	۲/۹	۸/۸	۱/۱۷	۰/۴	meq/l
AR	۰/۰۰۰	۴/۲	۰/۹۰	۰/۹۳	۰/۸۶	۱/۲۷	۰/۶	-
DnR	۲/۳	۳/۸	۲/۷	۰/۳۴	۰/۱۱	۱/۳۱	۰/۰۶	-
DmT	۲/۳	۲/۸	۲/۵	۰/۱۳	۰/۰۱	۰/۱۲	۰/۰۳	-
KmB	۲۸/۳	۱۰۳/۹	۶۲/۵	۲۱/۳	۴۵۷/۲	۰/۳۱	۰/۲	-
DmB	۱/۰۰۰	۰/۹۲	۰/۳۲	۰/۲	۰/۰۴	۰/۵۲	۰/۴	-

ماده آلی خاک‌های مورد مطالعه نیز از ۰/۶ تا ۳/۱ درصد متغیر است و میانگین آن ۱/۸ درصد می‌باشد. بیشترین مقدار ماده آلی خاک‌های مورد مطالعه، به کاربری زمین بایر (حاشیه کوه سبزپوشان) واقع در بخش‌های غربی حوضه اختصاص دارد؛ خاک‌هایی که زهکشی ضعیفی دارند و از نظر مواد آلی غنی هستند؛ زیرا میزان تجزیه مواد آلی در آنها به علت برقراری شرایط بی‌هوازی کاهش یافته است (Bohn et al, 1985). از ضریب تغییرات به عنوان ضریبی برای نمایش تغییرات کلی استفاده می‌شود. اکثر متغیرهای اندازه‌گیری شده نیز دارای ضریب تغییرات کمتر از پانزده درصد (تغییر کم) است و شاخص چولگی، میزان تقارن یک توزیع را اندازه‌گیری می‌کند و دامنه تغییرات آن در محدوده ۳- تا ۳+ می‌باشد. داده‌های آنالیز چولگی متغیرهای مورد مطالعه در محدوده ذکر شده قرار دارد و دارای تقارن است. انحراف معیار یا عددی که میزان متفاوت بودن اعضای یک گروه را از میانگین گروه نشان می‌دهد، کمترین و بیشترین مقدار این آماره به MWD (۰/۰۸) و جرم ذرات خاکدانه مدل بارتولی (۲۱/۳) مربوط است. هر چه انحراف استاندارد بالاتر باشد، دقت کمتر و هر چه انحراف استاندارد کمتر باشد، دقت اندازه‌گیری بیشتر خواهد شد. کلاس بافتی خاک‌های مورد مطالعه نیز

تنوع زیادی دارد؛ عمده خاک‌ها در شش کلاس بافتی لوم، لوم رسی، لوم رس سیلتی، لوم رس شنی، رس و رس سیلتی قرار دارد و برای مدل‌سازی نمونه‌های انتخابی مناسب است.

با توجه به جدول ۲، بین متغیر مستقل رس و متغیرهای وابسته (شاخص‌ها) سله‌بندی فائو و حساسیت به سله بستن، همبستگی معکوس و شدید در سطح احتمال ۰/۰۱ معنی‌دار است و در فرمول شاخص CI، خطر تشکیل اندوده سطحی به مقدار سیلت خاک وابسته می‌باشد. ذرات سیلت و شن در خاک به دلیل قابلیت چسبندگی پایین و انتقال‌پذیری بالا در مقایسه با میزان درصد رس خاک، به کاهش پایداری ساختمان خاک منجر می‌شود (Levy et al, 2002). همچنین با توجه به موقعیت رس در فرمول حساسیت خاک به سله بستن، به نظر می‌رسد با افزایش رس به دلیل اثر سیمانی‌کنندگی آن که به افزایش پایداری خاکدانه‌ها منجر می‌شود (Ben-Hour et al, 1989)، مقدار عددی هر دو شاخص و در نتیجه حساسیت خاک به تشکیل اندوده کاهش می‌یابد. افزایش مقدار رس در خاک، نیروهای شل شدن در طی خیس شدن خاک را افزایش می‌دهد و می‌تواند دو تأثیر متضاد بر تشکیل اندوده، افزایش پایداری خاکدانه و کاهش تشکیل آن، افزایش شل شدن خاکدانه در هنگام خیس شدن و در نتیجه یک افزایش در حساسیت خاک به اندوده بستن داشته باشد. همچنین بین ماده آلی و شاخص پایداری ساختمان خاک، همبستگی مستقیم و بسیار قوی (۹۰٪) در سطح احتمال ۰/۰۱ وجود دارد. شاخص SI، ماده آلی خاک را مهم‌ترین عامل برای حفظ ساختمان خاک در نظر می‌گیرد و احتمالاً با افزایش این ماده آلی، ذرات اولیه در خاکدانه‌ها به صورت فیزیکی و شیمیایی به هم متصل می‌شود و این به نوبه خود، پایداری آنها را افزایش می‌دهد و به محدود شدن شکستگی آنها در طی فرایند خیس شدن می‌انجامد. Emerson (1977) در تحقیق خود نیز همبستگی معکوس و شدید ماده آلی (۷۲٪) را با شاخص سله‌بندی و معنی‌دار شدن در سطح احتمال ۰/۰۱ مشاهده می‌کند. این دو نمایه، هم راستاست اما در دو جهت مخالف قرار دارد و تفاوت واقعی و معنی‌دار ناشی از شانس و تصادف بین نمایه‌های فوق را نشان می‌دهد؛ بنابراین، دو شاخص از یکدیگر متفاوت است. در فرمول شاخص CI، خطر تشکیل اندوده سطحی به مقدار سیلت خاک وابسته است و با در نظر گرفتن مقدار بالای سیلت در خاک منطقه مورد مطالعه و با توجه به موقعیت ماده آلی در فرمول شاخص سله‌بندی، احتمالاً با افزایش ماده آلی مقدار شاخص سله‌بندی کاهش می‌یابد و در نتیجه با توجه به اینکه مقادیر کمتر از ۰/۲، نشانه عدم تشکیل اندوده و سله است. منطقه مورد مطالعه از نظر شاخص‌های پایداری ساختمان و درصد تخریب خاکدانه نیز در محدوده خطر قرار دارد. پس می‌توان آن را به درصد بالای سیلت در منطقه - که کاربری اراضی محصولات، زراعی است - مربوط دانست. بر اساس نمایه پایدار C5-C10، ۸۲ درصد نمونه‌ها ناپایدار است و زمانی که خاکدانه‌های سطحی، مقدار سیلت زیاد و مواد آلی کم دارند می‌توان از این شاخص‌های ارزیابی برای تعیین حساسیت خاک نسبت به تشکیل اندوده سطحی استفاده کرد (Moncada et al, 2014).

جدول ۲: نتایج همبستگی خطی بین شاخص‌ها و برخی از پارامترهای مورد مطالعه در خاک‌های منطقه

شاخص متغیر	WAS	RSI	PR	CI	SI	C5-C10	CSI
Silt	-	-	-	۰/۲۳۷*	-	-	۰/۵**
Clay	۰/۳**	-	-	-۰/۵**	-	-	-۰/۵**
OM	-	-	-	-۰/۷**	۰/۹**	-	-
MWD	-	-	-	-	۰/۲*	۰/۲*	-
GMD	-	-	-	-	-	۰/۲*	-

از آماره دوربین واتسون برای سنجش فقدان همبستگی درونی مشاهدات استفاده می‌شود و این مقدار بین صفر تا چهار در نوسان است و هر اندازه به مقدار دو نزدیک‌تر باشد، مناسب‌تر است. در این آزمون، مقدار آماره پارامترهای مورد بررسی در محدوده قابل اطمینان و به مقدار دو نزدیک است که از فقدان همبستگی درونی مشاهدات حکایت دارد (جدول ۲). بنابراین، استفاده از آزمون دوربین واتسون، مؤثر و نتایج تحلیل‌ها قابل اعتماد است.

۲- تجزیه خوشه‌ای

برای تجزیه و تحلیل اطلاعات خاک و گروه‌بندی متغیرهای مشابه در یک کلاس، از روش تجزیه خوشه‌ای استفاده شد. تحلیل خوشه‌ای بر مبنای ضریب فاصله اقلیدسی و روش خوشه‌بندی واریانس حداقل یا روش واردز^۱، با استفاده از هفت شاخص برای هشتاد نمونه خاک انجام و افراد به دو گروه مجزا (۲۲ و ۵۸ نمونه) تقسیم شد. سپس این دو گروه به عنوان متغیرهای گروه‌بندی، برای تجزیه تابع تشخیص در نظر گرفته شد که نتیجه آن به ایجاد یک تابع تشخیص (جدول ۳) با کاسکوور ۷۳/۱ و معنی‌دار شدن در سطح احتمال ۰/۰۰۱ منجر شد و نشان داد که این تابع به طور کامل، دارای قدرت (قابلیت) ایجاد تفکیک بین دو گروه حاصل از تجزیه کلاستر است. مقدار کم آماره لامبدا (۰/۳)، تفاوت بیشتر میانگین متغیرهای کمی در گروه‌ها و مناسب‌تر بودن تابع برآوردی را در تفکیک گروه‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۳: خلاصه توابع تشخیص کانونی

Wilks' Lambda				
تابع	Wilks' Lambda	Chi-square	df	Sig
۱	۰/۳۳	۷۳/۱	۲۱	۰/۰۰۰

بر اساس نتایج حاصل شده، ماده آلی مهم‌ترین متغیر اولیه است که به تفکیک این دو گروه از یکدیگر منجر می‌شود و در سطح احتمال ۰/۰۰۱ معنی‌دار است (جدول ۴).

¹ Wards

جدول ۴: آزمون‌های برابری میانگین‌های گروه

Parameter	Wilks' Lambda	F	df ₁	df ₂	sig
ماده آلی	۰/۶۲۹	۴۶/۰۵۸	۱	۷۸	۰/۰۰۰

با توجه به اینکه در جدول ۵، آزمون باکس فرض صفر را آزمایش می‌کند، به این دلیل که مقدار $F(۱/۳)$ در سطح احتمال ۰/۰۰۱ معنی‌دار شده‌است، فرض صفر رد می‌شود و این بدان معنی است که ماتریس‌های کوواریانس مشاهده شده بین گروه‌های مختلف با هم برابر نیست.

جدول ۵: آزمون‌های برابری ماتریس‌های کوواریانس باکس

Box's M	F	df ₁	df ₂	sig
۵۵۵/۹۰	۱/۳۹	۱	۷۸	۰/۰۰۰

تابع کانونی، صد درصد از کمیت‌های مستقل را با همبستگی کانونی ۸۱٪ تبیین و تحت پیش‌بینی خود قرار می‌دهد (جدول ۶) که تابع خطی حاصل شده از آنالیز تشخیصی است. همچنین درصد واریانس، نسبت توانایی تمایز متغیرها در تابع بالاست که توانایی صد درصد مدل را در تشخیص متغیرها نشان می‌دهد.

جدول ۶: خلاصه توابع تشخیص کانونی

Eigenvalues				
تابع	Eigenvalue	% of Variance	Cumulative %	Canonical Correlation
۱	۱/۹۵۴	۱۰۰	۱۰۰	۰/۸۱۳

مطابق جدول ضرائب، تابع تشخیص کانونی استاندارد شده ماده آلی در مقایسه با سایر متغیرها، اهمیت بیشتری در تابع تشخیص دارد.

$$F1 = -0.89 \text{ Silt} + 0.406 \text{ Clay} - 0.15 \text{ CaCo}_3 + 0.22 \text{ pH} - 0.076 \text{ EC} + 0.96 \text{ OM} - 0.16 \text{ MWD} + 0.3 \text{ GMD} +$$

$$0.6 \text{ Na} - 0.16 \text{ Mg} + 0.08 \text{ Ca} - 0.29 \text{ SAR} + 0.31 \text{ } \theta_m + 0.42 \text{ BD} + 0.43 \text{ SP} - 0.58 \text{ Moist} + 0.42 \text{ AR} +$$

$$+ 1.3 \text{ DnR} - 0.1 \text{ DmT} - 0.7 \text{ K}_{mB} - 0.7 \text{ D}_{mB}$$

طبق جدول ۷، آزمون‌های برابری میانگین‌های گروهی مهم‌ترین متغیر در میان متغیرهای اولیه ماده آلی است که به تفکیک این دو گروه از یکدیگر منجر می‌شود و با مقدار آماره ویلکز لامبدا ۰/۶۲، بیشترین تأثیرگذاری را در تابع تشخیص دارد و بین دو گروه در سطح احتمال ۰/۰۰۱ معنی‌دار است.

جدول ۷: آزمون‌های برابری میانگین‌های گروهی

Parameter	Wilks' Lambda	F	df ₁	df ₂	sig
ماده آلی	۰/۶۲۹	۴۶/۰۵۸	۱	۷۸	۰/۰۰۰

بر اساس ماتریس ساختار (جدول ۸) مشخص شد که شاخص‌های SI با ضریب ۰/۵۸- و CI با ضریب ۰/۸۵، از مهم‌ترین شاخص‌هایی است که به تفکیک این دو گروه از یکدیگر منجر می‌شود. در واقع، این نشان می‌دهد که عامل اصلی متمایزکننده نمونه‌ها از بابت تشکیل اندوده سطحی، دو شاخص ذکر شده است.

جدول ۸: ماتریس ساختار شاخص‌های مورد مطالعه در آنالیز تابع تشخیص

CI	SI	CSI	WAS	C5-C10	RSI	PR
۰/۸۵	-۰/۵۸	۰/۳۹	۰/۰۹	-۰/۰۸	-۰/۰۶	۰/۰۴

میانگین هر سه شاخص، اختلاف بین دو گروه را در سطح احتمال ۰/۰۰۱ معنی‌دار کرده و این بدین معنا است که به احتمال ۹۹ درصد، تفاوت بین دو گروه تصادفی نیست و بین گروه‌ها رابطه‌ای واقعی و درست وجود دارد. همچنین یافته‌های به دست آمده از دو گروه برای تصمیم‌گیری قابل استناد است. بر اساس جدول ۹، میانگین ماده آلی در خوشه دو و شاخص SI بیشترین و در دو شاخص CI و CSI در خوشه یک، بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. این مطلب نشان می‌دهد که ماده آلی، مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر تعیین حساسیت خاک به تشکیل اندوده سطحی و پایداری ساختمان خاک است.

جدول ۹: میانگین ماده آلی در شاخص‌هایی با همبستگی بالا و در دو خوشه

Cluster	Mean OM	Mean SI	Mean CI	Mean CSI
۱	۱/۲۱	۱/۴۸	۱/۹۸	۱/۷۹
۲	۲/۱۲	۲/۶۲	۱/۳۷	۱/۴۵

ماده آلی می‌تواند با شاخص‌های بالا رابطه مهمی داشته باشد که برای درک بهتر این رابطه، تجزیه همبستگی کانونیک انجام می‌شود. چون مشخص نیست آماره ویلکز لامبدا چه سهمی از تغییرات بین گروهی را توسط تابع تشخیص تبیین کرده است؛ پس هر چه مقدار این آماره کمتر باشد، به درجه بالای تشخیص میان گروه‌ها اشاره دارد. آماره ویلکز لامبدا شاخص سله‌بندی فائو با مقدار ۰/۴۱ به این مطلب اشاره دارد.

۳- تجزیه همبستگی کانونیک

تحلیل همبستگی کانونی انجام شده، تابعی کانونیک با همبستگی ۰/۹۹ و کاسکور ۶۲۶/۲۰ ارائه می‌دهد (جدول ۱۰). تحلیل همبستگی کانونی با شاخص‌ها و متغیرها نشان داد که هفت شاخص صد درصد و ۲۱ متغیر ۴۱/۵ درصد از همبستگی بین شاخص‌ها و متغیرها را تبیین می‌کند. در جدول لفت‌ست که همبستگی کانونی بین شاخص‌ها را نشان می‌دهد، در متغیر کانونی ۱ (روت ۱) شاخص SI با مقدار ۹۸٪ و در متغیر کانونی ۲ (روت ۲)، شاخص CI با مقدار ۸۱٪- مهم‌ترین شاخص‌هایی است که بیشترین همبستگی بین شاخص‌ها را برقرار می‌کند. در جدول رایت‌ست که همبستگی کانونی بین متغیرها را نشان می‌دهد، در متغیر کانونی یک ماده آلی با مقدار ۸۸٪ و در متغیر کانونی دو، رس با مقدار ۸۲٪- مهم‌ترین متغیرهایی است که بیشترین همبستگی بین متغیرها را برقرار می‌کند.

جدول ۱۰: نتایج آزمون همبستگی کانونیک

Canonical R	R-square	dF	P
۰/۹۹	۶۲۶/۲	۱۴۷	۰/۰۰۰

بر اساس ویژگی‌های آماری، تحلیل خوشه‌ای، تابع تشخیص و همبستگی کانونیک به نظر می‌رسد که مهم‌ترین عوامل مؤثر بر حساسیت خاک به تشکیل اندوده سطحی به ترتیب اهمیت، پارامترهای ماده آلی سپس رس است. تأثیرگذاری و همبستگی مثبت و منفی دو پارامتر بالا بر مقدار عددی شاخص‌های پایداری خاکدانه و سلبندی، بیانگر نقش آنها در کاهش اندوده بستن در خاک است. ماده آلی و شاخص پایداری ساختمان خاک با مقدار همبستگی بسیار بالا، معنی‌دار است و با توجه به اینکه ماده آلی، عاملی مهم برای پایداری ساختمان خاک محسوب می‌شود، بیانگر توجیه بهتر این شاخص در اثر ویژگی‌های خاک در تعیین حساسیت آن نسبت به تشکیل اندوده سطحی است و هر دو هم جهت و هم راستا می‌باشد. Balochi و همکاران (2001) نشان دادند که روش حداقل واریانس واردز (Wards)، گروه‌بندی بهتری انجام داده است که نتایج آنها با این پژوهش در یک راستاست که بیان می‌کند مهم‌ترین متغیر در میان متغیرهای اولیه، ماده آلی و در مقایسه نمایه‌ها، شاخص‌های SI و CI از مهم‌ترین شاخص‌هایی است که به تفکیک این دو گروه از یکدیگر منجر می‌شود و بین ماده آلی و هر دو شاخص رابطه قوی وجود دارد و از گروه‌بندی مطلوب این روش‌ها در نشان دادن شباهت‌ها و تفاوت‌های بین متغیرها و شاخص‌های مورد مطالعه حکایت می‌کند. ماده آلی ویژگی مهمی است که بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک تأثیر می‌گذارد.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر هفت شاخص در ارزیابی حساسیت خاک نسبت به تشکیل اندوده سطحی بررسی می‌شود. نتایج آنالیز خوشه‌ای، تجزیه تابع تشخیص و همبستگی کانونیک نشان داد که مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار بر شاخص‌های ارزیابی اندوده سطحی در مقایسه با برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مؤثر در تفکیک دو گروه، ارائه تابعی با قابلیت بالا و بیشترین همبستگی کانونی است. بر اساس نتایج حاصل شده، ابتدا ماده آلی سپس رس مهم‌ترین پارامترهایی است که بیشترین همبستگی را بین متغیرها برقرار می‌کند. با توجه به آزمون باکس، فرض صفر رد می‌شود و به این معنی است که ماتریس‌های کوواریانس مشاهده شده بین گروه‌های مختلف با هم برابر نیست. تابع خطی که از آنالیز تشخیصی به دست آمده، صد درصد از کمیت‌های مستقل را با همبستگی کانونی بالا تبیین و تحت پیش‌بینی خود قرار می‌دهد و مطابق جدول ضرائب، تابع تشخیص کانونی استاندارد شده ماده آلی در مقایسه با سایر متغیرها اهمیت بیشتری در تابع تشخیص دارد. درصد واریانس بیانگر توانایی صد درصد مدل در تشخیص متغیرها است و بر اساس ماتریس ساختار مشخص شد که شاخص‌های سلبندی و پایداری خاکدانه از مهم‌ترین شاخص‌هایی است که به تفکیک این دو گروه از یکدیگر منجر می‌شود. در واقع، این نشان می‌دهد که عامل اصلی متمایز کننده نمونه‌ها از بابت تشکیل

اندوده سطحی، دو شاخص مذکور است و میانگین دو شاخص بالا اختلاف بین دو گروه را در سطح احتمال ۰/۰۰۱ معنی دار کرده است. ماده آلی و شاخص پایداری ساختمان خاک با مقدار همبستگی بسیار بالا معنی دار می شود که بیانگر توجیه بهتر این شاخص در اثر ویژگی های خاک در تعیین حساسیت آن نسبت به تشکیل اندوده سطحی است و هر دو هم جهت و هم راستا می باشد. نتایج نشان داد که بین شاخص پایداری خاکدانه و شاخص سله بندی، همبستگی خطی بالا و منفی وجود دارد و این دو شاخص در دو جهت متفاوت اما هم راستا قرار دارند.

فهرست منابع

1. Ahmadi, A.; Neishabory, M. R.; & H. Asadi, 2010. Correlation of the fractal dimension of particle size distribution with some physical properties of soil, *Journal of Water and Soil Science*, 4, 73-81.
2. Agassi, M.; Shainberg, I.; & J. Morin, 1981. Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on infiltration rate and crust formation, *Soil Science Society of America proceedings Journal*, 45, 848-851.
3. Balochi, L. O.; Caballero, J. V.; & R. R. Smith, 2001. Characterization and agronomic variability of 125 ecotypes of *Bromus valdivianus* phil, collected from Valdivia province, *Agron survey*, 29 (1), 64-77.
4. Bartoli, F.; Philipppy, R.; Doirisse, M.; Niquet, S.; & M. Dubuit, 1991. Structure and self-similarity in silty and sandy soils: the fractal approach, *J. Soil Science Society of America proceedings Journal*, 42, 167-185.
5. Bayat, M., 1381. Geology of Kovar Plain, Agricultural Jihad of Kovar region.
6. Bayat, M.; Nagafpor, B.; & B. Etemadi, 2011. Investigating factors affecting the increase in the amount of salts in the underground waters of the Kovar plain, The first national underground water conference.
7. Bédard, Y.; Tessier, S.; Laguë, C.; Chen, Y.; & L. Chi, 1997. Soil compaction by manure spreaders equipped with standard and oversized tires and multiple axles, *Transactions of the ASAE*, 40, 37-43.
8. Ben-Hur, M.; Plaut, A.; Shainberg, I.; Meiri, A.; & M. Agassi, 1989. Cotton canopy and drying effects on runoff during irrigation with moving sprinkler systems, *Agron*, 81, 752-757.
9. Bertrand, A. R., & S. Kamil., (1962). Effect of rainfall intensity on soil structure and migration of colloidal materials in soils. *Soil science society of America proceedings Journal*. 26, 297-300.
10. Bohn, H. L.; McNeal, B. L.; & G. A. O'Coner, 1985. Soil Chemistry. New York: Wiley.
- Chaneton, E. J., Lavado, R. S. 1996. Soil nutrients and salinity after long-term grazing exclusion in a flooding pampa grassland, *Journal of rang management*, 49, 182-187.
11. Chartres, C. J., & G. W. Greeves., (1998). The impact of soil seals and crusts on soilwater balance and runoff and their relationship with land management. *Towards Sustainable Land Use.*, 31, 539-548.
12. Chen, Y., & A. Banin., (1975). Scanning electron microscope (SEM) observations of soil structure changes induced by sodium calcium exchange in relation to hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America proceedings Journal*. 120, 428-436.
13. Dahiya, I. S.; Richter, J.; & R. S. Malik, 1984. Soil spatial variability: A review. *International, Journal of Tropical Agricultural*, 11(1), 1-102.
14. De-Ploey, J., 1981. Some laboratory techniques for investigating land erosion and sediment transport measurment, *International Association of Hydrological Sciences*, 133, 423-442.

15. Ding, Q., & W. Ding., (2007). Comparing stress wavelets with fragment fractals for soil structure quantification. *Soil and Tillage Research*. 93, 316-323.
16. Emerson, W. W., 1977. Physical properties and structure. In: Russell J.S. and E.L., Eds., Soil factors in crop production in a semi-arid environment. University of Queensland Press-Brisbane. pp. 778-804.
17. FAO, 1979. Soil Survey Investigation for Irrigation. Rome. FAO, pp188.
18. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos, Rome: FAO.
19. Gee, G. W., & D. Or., (2002). Particle-size analysis. In: Warren AD (ed.) Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. *Soil Science Society of America proceedings Journal*. Inc. pp.255-295.
20. Goldberg, S., & H. S. Forster., (1990). Flocculation of reference clays and arid-zone soil clays. *Soil Science Society of America proceedings Journal*. 54, 714-718.
21. Kamil, S., & A. R. Bertrand., (1962). Effect of rainfall energy on the permeability of soils. *Soil science society of America proceedings*. 36, 293-297.
22. Kazman, Z.; Shainberg, I.; & M. Gal, 1983. Effect of low levels of exchangeable Na and applied phosphogypsum on the infiltration rate of various soils. *Soil Science Society of America proceedings Journal*. 35, 184-192.
23. Kemper, W. D., & R. C. Rosenau., (1986). Aggregate stability and size distribution. In. Klute A (Eds.). Methods of Soil Analysis. Part Y. Physical and Mineralogical Methods. 2nd, de. *Agronomy*. 9, 425-44.
24. Levy, G. J., & A. I. Mamedov., (2002). High-Energy-Moisture-Characteristic aggregate stability as a predictor for seal formation. *Soil Science Society of America proceedings Journal*. 66, 1603-1609.
25. Lujan, L. d., 2003. Soil physical properties affecting soil erosion in Tropical soils. Facultad de Agronomía, Instituto de Edafología, Universidad Central de Venezuela, Maracay, Venezuela, 232-243.
26. Manyevere, A.; Bangira, C.; Gotosa, J.; Munjonji, L.; & E. Chikwari, 2015. Characteristics and management options of crusting soils in a smallholder farming area of the Zambezi metamorphic belt in northern Zimbabwe, *South African Journal of plant and soil*, 32(3), 157-164.
27. McIntyre, D. S., 1958. Permeability measurement of soil crusts formed by raindrop impact, *Soil Science Society of America proceedings Journal*, 85, 185-189.
28. Moldenhauer, W. C., & W. D. Kemper., (1969). Interdependence of water drop energy and clod size on infiltration and clod stability. *Soil Science Society of America proceedings Journal*. 33, 297-301.
29. Moncada, M. P.; Gabriels, D.; Lobo, D.; Beuf, K.; Figueroa, R.; & W. M. Cornelis, 2014. A comparison of methods to assess susceptibility to soil sealing, *Geoderma*, 26, 397-404.
30. More, F., & S. Moradi., (2005). Investigating geochemistry and mineralogy of brickmaking and brick production soil, Kuvar and mrodasht plain, Fars province. Proceedings of the 9th Conference of Geological Society of Iran, Tehran university education teacher. pP, 465-469.
31. Mualem, Y.; Assouline, S.; & H. Rohdenburg, 1990. Rainfall induced soil seal. B. Application of a new model to saturated soils. *Catena*. 17, 205-218.
32. Nelson, R. E., 1982. Carbonate and gypsum. Methods of Soil Analysis, part 2. *American Society of Agronomy*, Madison, 9. pp. 181-197.

33. Nelson, D. W., & L. E. Sommer., (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: A.L Page et al. (ed), Methods of soil analysis. Part 2 Chemical Methods, Madison, 9. pp. 539-579.
34. Nimmo, J. R., & K. S. Perkins., (2002). Aggregate stability and size distribution, In: Dane, J.H., and Topp, G.C. (eds). Methods of Soil Analysis, Part 4- Physical Methods: Madison, Wisconsin, *Soil Science Society of America*. pp.317-328.
35. Reynolds, W. D.; Drury, C. F.; Tan, C. S.; Fox, C. A.; & X. M. Yang, 2009. Use of indicators and pore Volume function characteristics to quantify soil physical quality, *Geoderma*, 152(3), 252-263.
36. Richards, L. A., 1953. Modulus of rupture as an Index of crusting of soils, *Soil Science Society of America proceedings Journal*, 17, 321-323.
37. Shainberg, I., & G. J. Levy., (1992). Physiochemical-Chemical effects of salts upon infiltration and water movement in soils. In: Wagenet, R.J. et al (ed.). *Soil Science Society of America proceedings Journal*, Boca Raton, FL. pp. 37-93.
38. Tessier, S.; Lachance, B.; Laguë, C.; Chen, Y.; Chi, L.; & D. Bachand, 1997. Soil compaction reduction with a modified one-way disk, *Soil & Tillage Research*, 42, 63-77.
39. Trangmar, B. B.; Yost, R. S.; & G. Uehara, 1986. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties, *Advances in agronomy*, 38, 45-94.
40. Valentin, C., & L. M. Bresson., (1997). Soil crusting. In: Lal, R., Blum, W.H., Valentine, C., Stewart, B.A. (Eds.), Methods for Assessment of Soil Degradation, *Soil Science Society of America proceedings*, Florida USA, pp. 89-107.

Determining the Effective Factors on Soil Susceptibility to Surface Sealing Using Multivariate Statistical Analysis

Zhila Asadi Fard¹: PhD student, Department of Soil Science and Engineering, University of Tabriz, Iran

Abbas Ahmadi: Associate Professor, Soil Science and Engineering Department, University of Tabriz, Iran

Ali Asghar Jafarzadeh: Professor, Department of Soil Science and Engineering, University of Tabriz, Iran

Alidad Karami: Research Associate Professor, Agricultural Research Center of Fars Province, Iran

Siamak Alavikia: Associate Professor, Department of Plant Breeding, University of Tabriz, Iran

Article History (Received: 2022/8/25

Accepted: 2023/10/8)



Extended abstract

1-Introduction

Soil surface sealing is mostly influenced by the specific prevailing conditions during its formation, and the variables affecting soil surface sealing are the physical characteristics of the soil, the chemical conditions of the soil-water system, the characteristics of rain, and the initial and boundary conditions of the flow (Muallem et al, 1990). It is a common phenomenon in most soils of Iran due to arid and semi-arid climate, weak vegetation and loose soil aggregates. In Kowar plain, as an important Agricultural pole of Fars province, it is very important to determine the factors affecting the formation of surface sealing, to identify the most important characteristics of the soil in controlling the surface sealing formation, and to provide a suitable index to determine the sensitivity of the soil to this formation based on the characteristics of soil erosion, which are very important issues and have been addressed in this research study.

2-Methodology

To carry out this research, 80 samples (0-20 cm) were selected from Kowar plain with a variety of physical and chemical characteristics, and after sampling, the samples were air dried and passed through a 2 mm sieve. Then, the parameters of particle size distribution, humidity, organic matter, electrical conductivity and pH of saturated soil extract were measured. In addition, the average weight and geometric mean diameter of soil aggregates, calcium carbonate equivalent, fractal dimensions of one-centimeter soil particles (Bartoli, et al, 1991), percentage of moisture saturation, sodium, calcium and magnesium were determined. The saturated hydraulic conductivity of the samples were measured and the evaluation of soil sensitivity to the surface sealing with seven different indices of SI, RSI, CI, WAS, PR (Permeability Resistance), CSI, C5-C10 had been performed. Also multivariate statistical methods (cluster analysis, discriminant analysis and canonical correlation) were used for conducting the required analyses.

3-Result

After conducting the multivariate statistical method investigations, the results of cluster analysis led to the creation of a discriminant function with a chi-score of 12.73 reaching

¹ zh.asadifard@gmail.com

significance at the probability level of 0.001. This function completely showed the power (ability) to create separation between the two cluster analysis result groups. The organic matter was the most important primary variable that separated these two groups from each other and was significant at the probability level of 0.001. Based on the structure matrix, it was determined that CI, SI and CSI indexes with coefficients of 0.85, 0.58 and 0.30, respectively, are among the most important indices in the separation of these two groups. The performed canonical correlation provided a canonical function with a correlation of 0.99 and a chi score of 626.2. The highest canonical correlation belongs to primarily organic matter and then to clay. Two indices of Soil Stability Index (SI) and Crusting index (CI) were the most important indices having the highest correlation level among the indices. The most important variables influencing the evaluation indices of the sealing surface in the two group's separation were organic matter and clay, which provided a function with high capability and the highest canonical correlation, respectively.

4-Discussion & Conclusions

The highest coefficient of variation is related to the mass of soil particles with a length of one centimeter (Bartoli model) and the highest canonical correlation in the first degree belongs to the organic matter and clay, it also shows the most important variables, with the highest correlation between these two variables with the mentioned indicators (CI,SI). In addition, two indices of SI and CI were the most important indices having the highest correlation among the indices. The results of cluster analysis, the discriminant function analysis and canonical correlation showed that the most important variables affecting the sealing surface evaluation indices in separating two groups and providing a function with high capability and the highest canonical correlation are organic matter and clay, respectively. Also based on the structure matrix, the crusting index and aggregate stability are the most important indices that separate the two groups. In fact, the main samples differentiating factors in terms of the sealing surface are the above named indices. Organic matter and soil stability indexes have become significant with a very high correlation and showing a better justification of this indicator (SI) with the characteristics of the soil in determining the sensitivity of the soil to the seal structural formation layer.

Key words: Aggregate stability, canonical correlation, cluster analysis, soil sensitivity, surface sealing.