تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۲، شماره ۶، شهریور ۱۴۰۰ (ص ۱۵۱۴-۱۵۰۱) DOI: 10.22059/ijswr.2021.314247.668811
(علمی – پژوهشی)

Assessment of Surface Sealing Formation and Its Relationship with Soil Quality Indices

AYOUB AVIZHGAN[1], HOSSEIN ASADI[1*], MOHAMMAD-HOSSEIN MOHAMMADI[1], MANOUCHEHR GORJI-ANARI[1]
1. Soil Sciences Department, College of Agricultural and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
(Received: Dec. 6, 2020- Revised: March. 13, 2021- Accepted: May. 5, 2021)

ABSTRACT

Surface sealing is a special phenomenon in most arid and semi-arid regions with severe agricultural and environmental consequences that reduces the porosity of soil surface and infiltration, and increases runoff and soil erosion. The aim of this study was to evaluate formation of surface sealing and its effect on soil quality indices. In this study, 40 soil samples (0-10 cm) were collected from different land uses from eight provinces of Iran. The most important physical and chemical properties of the soil samples were measured. Also, surface sealing index (SI), and saturated hydraulic conductivity (Ks) and air permeability coefficient (Ka) were evaluated before and after rainfall application. The results showed with the exception of four forest soil samples with mean organic carbon of 5.5% and SI>1, all soil samples were prone to seal formation. Also, due to seal formation, both Ks and Ka were reduced in average by 58%, and in terms of soil quality, the scores of these two indicators were reduced by 57% and 66%, respectively. Evaluation of soil quality by integrated and Nemero quality indices showed that the soil quality score is overestimated for most of the soils when SI and its effect on Ks and Ka were not accounted in evaluation. This overestimation was less than 5% for the soil samples with stable aggregates, and more than 20% for the soils with weak aggregates.

Keywords: Integrated Quality Index, Nemero Quality Index, Rainfall Simulation, Air Permeability Coefficient, Saturated Hydraulic Conductivity.

* Corresponding Author’s Email: ho.asadi@ut.acir

ارزیابی تشکیل اندوده سطحی و ارتباط آن با شاخص‌های کیفیت خاک

ایوب آویژگان[۱]، حسین اسدی*[۱]، محمدحسین محمدی[۱]، منوچهر گرجی اناری[۱]

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۹/۱۵- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۲/۲۳- تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۲/۱۵)

چکیده

اندوده سطحی پدیده‌ای ویژه در بیش‌تر مناطق خشک و نیمه‌خشک با پیامدهای شدید کشاورزی و محیطی است که باعث کاهش تخلخل لایه سطحی و نفوذپذیری، و افزایش رواناب و فرسایش خاک می‌شود. این پژوهش با هدف ارزیابی تشکیل اندوده سطحی و اثر آن بر شاخص کیفیت خاک انجام شد. در این تحقیق، ۴۰ نمونه خاک به صورت مرکب و از عمق ۱۰-۰ سانتی‌متر در کاربری‌های مختلف از هشت استان کشور برداشت شد. مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک از جمله شاخص اندوده سطحی، ضریب آبگذری و ضریب هواگذری قبل و بعد از اعمال بارندگی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که به جزء چهار نمونه خاک جنگلی با متوسط کربن آلی حدود ۵/۵ درصد و شاخص اندوده سطحی حدود یک، تمام نمونه خاک‌های مورد مطالعه دارای شاخص اندوده سطحی بیش‌تر از یک و مستعد تشکیل اندوده سطحی بودند. به طور متوسط، در اثر تشکیل اندوده سطحی، ضریب آبگذری و ضریب هواگذری هر دو حدود ۵۸ درصد کاهش یافتند و از لحاظ کیفیت خاک، نمره این دو نشانگر متاثر از اندوده سطحی نیز به ترتیب به طور متوسط حدود ۵۷ و ۶۶ درصد کاهش پیدا کرد. نتایج ارزیابی شاخص‌های کیفیت تجمعی و نمرو نشان داد که ارزیابی کیفیت خاک بدون در نظر گرفتن اندوده سطحی و ضریب آبگذری و ضریب هواگذری متاثر از آن، باعث بیش برآوردی ارزیابی کیفیت خاک در اکثر نمونه‌های خاک مورد مطالعه شد. این بیش برآوردی در خاک‌های با ساختمان نسبتا پایدار، کم‌تر از پنج درصد و در خاک‌های با ساختمان ناپایدار، بیش از ۲۰ درصد بود.

واژه‌های کلیدی: شاخص کیفیت تجمعی، شاخص کیفیت نمرو، شبیه‌ساز باران، ضریب هواگذری، ضریب آبگذری.

مقدمه

اندوده سطحی[۱] یکی از ویژگی‌های بارز اراضی زراعی در مناطق خشک و نیمه خشک محسوب می‌شود که باعث مشکلات زیادی در امر کشاورزی می‌شود. در این فرایند، ذرات خرد شده ناشی از برخورد قطرات باران به درون منافذ خاک نفوذ کرده و باعث انسداد آنها می‌شود و با کاهش تخلخل لایه سطحی خاک، هدر رفت ماده آلی و عناصر غذایی، باعث کاهش نفوذپذیری و افزایش فرسایش خاک می‌شود (Chong-Feng *et al.*, 2013). توسعه اندوده در سطح خاک به ویژگی‌های خاک بستگی دارد، که عمدتا در خاک‌های با محتوای سیلت بالا و مواد آلی کم معمول است (Zambon *et al.*, 2020). خاک‌های با درصد سیلت زیاد، کربن آلی کم و پایداری کم خاکدانه، حساسیت بیش‌تری نسبت به تشکیل اندوده سطحی دارند، حساسیت خاک‌ها به تشکیل اندوده سطحی، وابسته به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بسیاری است که مهم‌ترین آنها شامل بافت خاک، میزان ماده آلی، اکسیدهای آهن و آلومینیوم و درصد سدیم تبادلی خاک می‌باشد (Mermut *et al.*, 1995).

اندوده سطحی در اراضی کشاورزی باعث ایجاد یک لایه متراکم‌تر (معمولا با ضخامت کم‌تر از پنج میلی‌متر) در سطح خاک پس از وقوع بارندگی شدید می‌شود که دلیل آن مسدود شدن منافذ توسط فرایندهای فیزیکی (اثر قطرات باران) یا فرایندهای شیمیایی (پراکنش رس) است (Cherobim *et al.*, 2019). به بیان دیگر، اندوده سطحی، سازماندهی دوباره ذرات خاک به صورت درجا در طی رخداد بارندگی است و معمولاً یک لایه سطحی نازک (ضخامت حدود ۱ میلی‌متر)، فشرده شده و بدون هیچ گونه شکاف و ترکی می‌باشد. اندوده سطحی خاک با وجود یک لایه نازک با جرم مخصوص زیاد و تخلخل کم مشخص می‌شود (Cherobim *et al.*, 2018). در بسیاری از تعاریف، تفاوت مشخصی بین اندوده سطحی و سله فیزیکی[۲] وجود ندارد، و اثرات یکسانی بر روی خاک دارند. Remley and Bradford

* نویسنده مسئول: ho.asadi@ut.ac.ir

۱. Surface sealing

۲. Physical crust

(1989) اندوده سطحی را فاز اولیه یا فاز مرطوب شده در تشکیل سله فیزیکی و سله را فاز خشک شده می‌دانند، اما واقعیت این است که این دو پدیده از نظر فرایند تشکیل و مشخصات کاملا متفاوت هستند. شکستن خاکدانه‌ها یکی از مهم‌ترین عوامل تشکیل اندوده سطحی است، تحقیقات نشان می‌دهد شکسته شدن خاکدانه ممکن است در دو شرایط مختلف رخ دهد (Bissonnais, 1990)، نخست؛ اگر خاکدانه‌ها قبل از بارش باران اشباع باشند، شدت شکستن در نتیجه برخورد بین قطرات باران و خاکدانه‌ها است و فرایند مهم در این بخش شکستن و ترک‌خوردگی کوچک است. دوم؛ اگر خاکدانه‌ها قبل از بارش باران خشک باشند، شدت شکستن خاکدانه‌ها در نتیجه انرژی جنبشی باران است و فرایند مهم شامل تخریب مکانیکی یا فرسایش پاشمانی می‌باشد. تمایل یک خاک برای تشکیل اندوده سطحی بستگی به پایداری خاکدانه‌ها دارد. پایداری خاکدانه‌ها تحت تاثیر برهمکنش ویژگی‌های درونی مختلف خاک و فاکتورهای بیرونی است. از جمله عوامل داخلی می‌توان به مواد آلی خاک، بافت، نوع کانی‌های رس، کاتیون‌ها، اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و آلومینیم، آهک و گچ اشاره کرد. عوامل بیرونی که مورد توجه قرار گرفته‌اند شامل شدت و انرژی بارندگی، طول و درجه شیب، غلظت الکترولیت و نوع کاتیون آب باران و مدیریت خاک می‌باشد (Moncada *et al*., 2014).

اندوده سطحی منجر به کاهش زبری سطحی خاک، تخلخل لایه سطحی، پایداری خاکدانه‌ها، نفوذپذیری، ضررسانی به جوانه‌زنی بذر و عملکرد گیاهان، کاهش مقدار آب قابل دسترس در منطقه رشد ریشه و عدم تبادل هوا بین خاک و اتمسفر (Mualem & Assouline, 1996) و بنابراین منجر به افزایش رواناب، فرسایش، هدر رفت مواد آلی و عناصر غذایی از خاک می‌شود (Maïga-Yaleu *et al*., 2013). اندوده سطحی به دلیل ایجاد یک پوشش روی سطح خاک باعث کاهش تبخیر می‌شود که یک ویژگی مطلوب درمناطق خشک است (Chamizo *et al*., 2012). هدایت هیدرولیکی در سطح خاک و ظرفیت نفوذ دو عامل تعیین کننده‌ی میزان رواناب ناشی از بارندگی هستند که به شدت تحت تاثیر اندوده سطحی قرار دارند (Cherobim *et al*., 2019).

کیفیت خاک عبارت از "توانایی خاک برای ایفای نقش/کارکردهای خود" است (Karlen *et al*., 1997). به دلیل این که کیفیت خاک به طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست، با استفاده از نشانگرهایی[۱] که همزمان بر یک یا چند کارکرد تاثیرگذار هستند، برآورد می‌شود. نشانگرهای کیفیت خاک ویژگی‌های قابل اندازه‌گیری خاک هستند که ظرفیت خاک برای تولید محصول یا کارکرد زیست‌محیطی را تحت تاثیر قرار می‌دهند و به تغییر کاربری اراضی، مدیریت یا عملیات حفاظتی حساس می‌باشند (Brejda *et al*., 2000). به بیان دیگر، ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک که می‌توانند روی کارکرد خاک تاثیرگذار باشند و به تغییرات محیطی حساس هستند، معمولا به عنوان نشانگرهای کیفیت خاک انتخاب می‌شوند (Nosrati, 2013; Takoutsing *et al*., 2016). شاخص کیفیت خاک یک خصوصیت قابل اندازه‌گیری خاک است که بر ظرفیت خاک در عمل کردن به منظور یک هدف خاص تاثیر می‌گذارد (Karlen *et al*., 1990). بسیاری از مطالعات ارتباط بین کیفیت خاک و خصوصیات منفرد خاک را مشخص کرده‌اند (Andrews *et al*., 2004; Reynolds *et al*., 2009). ویژگی‌های سطح خاک از مهم‌ترین عوامل کنترل کننده ورود آب و هوا به خاک هستند. در اغلب مناطق خشک و نیمه‌خشک سطح خاک در اثر ضربه قطرات باران مستعد تشکیل اندوده سطحی می‌باشد. با توجه به اثر اندوده سطحی بر ضریب آبگذری و ضریب هواگذری، ارزیابی کیفیت خاک نیز حائز اهمیت است. اما در کم‌تر تحقیقاتی به بررسی توام ارزیابی تشکیل اندوده سطحی و ارتباط آن با کیفیت خاک پرداخته شده است. بنابراین، هدف از این پژوهش، ارزیابی تشکیل اندوده سطحی و اثر آن بر کیفیت خاک به عنوان یکی از مهم‌ترین نشانگرهای متاثر از بارندگی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و آنالیز نمونه‌های خاک

در این تحقیق تعداد ۴۰ نمونه خاک از مناطق اقلیمی متفاوت (خشک، نیمه‌خشک و بسیار مرطوب) و در کاربری‌های مختلف (جنگل، مرتع و زراعی) از هشت استان کشور (مازندران، زنجان، قزوین، البرز، قم، مرکزی، لرستان و خوزستان) به گونه‌ای انتخاب شد که دارای توزیع متفاوت رس و ماده آلی و در نتیجه پایداری خاکدانه گوناگون باشند. نمونه‌برداری از هر منطقه به صورت مرکب و از عمق ۱۰-۰ سانتی‌متر انجام گرفت. پس از انتقال به آزمایشگاه، بخشی از نمونه خاک‌های هوا خشک شده جهت اندازه‌گیری پارامترهای معمول از الک دو میلی‌متری و بخشی از آنها جهت آزمایش شبیه‌ساز باران از الک چهار میلی‌متری، عبور داده شد. سپس برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مانند

۱ Indicators

توزیع اندازه ذرات اولیه خاک[۱] (Gee & Or, 2002)، توزیع اندازه خاکدانه (خاکدانه‌های کوچک‌تر از چهار میلی‌متر) و درصد پایداری خاکدانه‌های درشت به روش الک تر (Nimmo & Perkins, 2002)، جرم مخصوص ظاهری به روش استوانه و کلوخه (Grossman & Reinsch, 2002)، شاخص سله[۲] (FAO, 1980) با معادله ۱، قابلیت هدایت الکتریکی (Rhoades, 1996) و pH (Thomas, 1996) در عصاره اشباع، درصد کربن آلی خاک (Walkley & Black, 1934)، کربنات کلسیم معادل (Loeppert & Suarez, 1996) نسبت جذب سدیم (Richards, 1954) و شاخص پایداری ساختمان خاک[۳] (Reynolds *et al.*, 2009) با استفاده از معادله ۲ تعیین شد.

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

$$SSI = \frac{1.724\times OC}{Clay+Silt} \times 100 \quad \text{(رابطه ۲)}$$

CI: شاخص سله، سیلت ریز (٪)، سیلت درشت (٪)، Clay: مقدار رس (٪)، ماده آلی خاک (٪)، SSI: شاخص پایداری خاک (٪)، OC: مقدار کربن آلی خاک (٪)و Silt: مقدار سیلت (٪) می‌باشد. $SSI \leq 5\%$: نشان‌دهنده تخریب ساختمان خاک؛ $5\% < SSI \leq 7\%$: خطر زیاد تخریب ساختمان خاک؛ $7\% < SSI \leq 9\%$: خطر کم تخریب ساختمان خاک و $SSI > 9\%$: دارای مقدار کافی کربن آلی برای حفظ ساختمان خاک است.

آزمایش شبیه سازی باران، اندوده سطحی و ضریب هواگذری خاک

مطالعه فرآیندهای فرسایش و اندوده سطحی تحت باران‌های طبیعی طی زمان‌های مختلف به هنگام بارندگی کاری دشوار است. از این رو با استفاده از دستگاه‌های شبیه‌ساز باران می‌توان با صرفه‌جویی در زمان نسبت به بررسی دقیق فرآیندهای مربوطه اقدام نمود. به منظور قرار دادن نمونه‌های خاک در معرض بارندگی و محاسبه شاخص اندوده سطحی[۴] از سیلندرهای فلزی با ارتفاع و قطر پنج سانتی‌متر استفاده شد. شاخص اندوده سطحی با استفاده از فرمول زیر و با اندازه‌گیری ضریب آبگذری خاک به روش بار ثابت (Klute & Dirksen, 1986) در دو حالت، برآورد شد:

$$SI = \frac{K_{sb}}{K_{sa}} \quad \text{(رابطه ۳)}$$

که در آن؛ Ksb: ضریب آبگذری قبل از اعمال بارندگی (قبل از تشکیل اندوده سطحی) و Ksa: ضریب آبگذری بعد از اعمال بارندگی (بعد از تشکیل اندوده سطحی) است (Roth *et al.*, 1992).

برای شبیه‌سازی باران از یک صفحه با نازل‌های قطره‌ساز به طول ۸۰cm، عرض ۶۰cm و ارتفاع ۲۷۰cm استفاده شد (شکل ۱). برای آزمایش اندوده سطحی، شدت بارندگی حدود ۷۰ میلی‌متر در ساعت تنظیم شد، سیلندرهای فلزی حاوی خاک به مدت ۱۵ دقیقه تحت بارندگی قرار گرفت.

شکل ۱- شبیه‌ساز باران مورد استفاده

اندازه‌گیری ضریب آبگذری و ضرب هواگذری

ابتدا به منظور کنترل جریان ترجیحی، جدار داخلی سیلندرهای فلزی با یک لایه نازک گریس پوشانده شد. سپس خاک عبور داده شده از الک چهار میلی‌متری به دلیل امکان بررسی دقیق میزان تخریب خاکدانه‌ها (Assouline & Ben-Hur, 2006) بدون فشردگی (به دلیل آسیب نرساندن به خاکدانه‌های سطحی) داخل سیلندرها ریخته شد. نمونه‌های آماده شده به مدت ۴۸ ساعت با محلول کلسیم‌کلراید ۰/۰۱ مولار به آرامی از زیر اشباع شد. به منظور جلوگیری از تبخیر، سطح خاک در طول شب با استفاده از نایلون پوشیده شد. پس از اطمینان از اشباع شدن کامل نمونه‌های خاک، ضریب آبگذری به روش بار ثابت Klute and Dirksen, (1986) اندازه‌گیری شد. سپس اجازه داده شد تا آب ثقلی نمونه‌ها خارج شود. آزمایش شبیه‌ساز باران پس از قطع زه‌آب، انجام شد. بعد از اعمال بارندگی، دوباره ضریب آبگذری به روش بار ثابت اندازه‌گیری شد. این آزمایش با سه تکرار انجام شد.

ضریب هواگذری خاک در نمونه‌های دارای و فاقد اندوده سطحی درون سیلندرهای فلزی، در مکش ۸۰ سانتی‌متر اندازه-گیری شد. به این منظور، سیلندرهای فلزی دارای اندوده سطحی و فاقد اندوده سطحی در جعبه‌شنی در مکش ۸۰ سانتی‌متر برای رسیدن به تعادل به مدت سه روز قرار گرفتند. ضریب هواگذری

---

۱ Particle size distribution (PSD)

۲ Crusting index (CI)

۳ Structural stability index

۴ Sealing index (SI)

با روش (Mohammadi & Vanclooster, 2019) و با سه تکرار اندازه‌گیری شد. در این روش، پس از برقرار شدن جریان هوا و خارج شدن آب از ظرف ماریوت و ثابت شدن بار آبی، با یک بشر حجم آب خروجی در مدت زمان مشخص جمع‌آوری شده و تعیین گردید که در این صورت حجم آب خروجی معادل حجم هوای عبوری از سیلندر خاک خواهد بود. در نهایت ضریب هواگذری با استفاده از روابط زیر برآورد شد (Mohammadi & Vanclooster, 2019):

(رابطه ۴)
$$Q = \frac{V}{A.t} = q.A = \frac{K}{\eta} \times \frac{\Delta H}{L} \qquad K_s = K_a$$

(رابطه ۵)
$$\frac{K}{\eta} = \frac{V.L}{t.\Delta H.A}$$

(رابطه ۶)
$$\eta = (1717 + 4.8\,T) \times 10^{-8}$$

(رابطه ۷)
$$K_a = \frac{K}{\eta} \times \eta$$

در این معادلات، Q:دبی بر حسب مترمکعب بر ثانیه (m^3/s)، V: حجم آب خروجی بر حسب متر مکعب (m^3)، A: سطح سیلندر خاک بر حسب متر مربع (m^2)، K: نفوذپذیری ذاتی خاک برحسب مترمربع (m^2) t: زمان (s)، q: شدت جریان بر حسب متر بر ثانیه (m/s)، ΔH: بار آبی برحسب پاسکال (Pas)، L: طول سیلندر خاک بر حسب متر (m)، $\frac{K_a}{\eta}$: برحسب مترمربع بر پاسکال در ثانیه $(\frac{m^2}{pas.s})$، η: گرانروی آب در دمای ۲۰ درجه سلسیوس بر حسب پاسکال در ثانیه $(pas.s)$ و K_a: ضریب هواگذری بر حسب میکرومتر مربع(μm^2) است.

استانداردسازی و نمره‌دهی نشانگرهای کیفیت خاک

برای نمره‌دهی و استانداردسازی داده‌های اندازه‌گیری شده هر یک از نشانگرهای کیفیت خاک از توابع نمره‌دهی استاندارد[۱] استفاده شد (Askari & Holden, 2015). براساس این روش، نشانگرهای کیفیت خاک به سه دسته؛ بیش‌تر- بهتر، کم‌تر- بهتر و تابع سطح بهینه تقسیم می‌شوند. تابع نمره‌دهی نشانگرهای مختلف کیفیت خاک به روش غیرخطی به صورت معادله ۶ می‌باشد:

(رابطه ۸)
$$S_{NL} = \frac{a}{1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^b}$$

در این معادله، S_{NL} نمره غیرخطی نشانگر موردنظر می‌باشد که بین صفر تا یک متغیر است، x: مقدار متغیر اندازه‌گیری شده، a: حداکثر نمره متغیر اندازه‌گیری شده که برابر یک است، x_0: میانگین متغیر اندازه‌گیری شده و b: شیب معادله که برای نشانگرهای هرچه بیش‌تر-بهتر برابر ۲/۵- و برای نشانگرهای هرچه کم‌تر-بهتر برابر ۲/۵ می‌باشد (Sinha *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2011).

نشانگرهای درصد رس، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، درصد پایداری خاکدانه‌های درشت، درصد شاخص پایداری ساختمان خاک، ضریب آبگذری، ضریب هواگذری، درصد کربن آلی از نوع بیش‌تر- بهتر می‌باشند و نشانگرهای درصد سیلت، جرم مخصوص ظاهری، شاخص سله، شاخص اندوده سطحی ، قابلیت هدایت الکتریکی، نسبت جذب سدیم، درصد کربنات کلسیم معادل از نوع کم‌تر-بهتر می‌باشند.

تابع سطح بهینه برای نشانگرهایی از خاک استفاده می‌شود که افزایش یا کاهش مقدار آن تا حد معینی موجب بهبود کیفیت خاک می‌شود و افزایش یا کاهش آنها بیش از حد بهینه، موجب کاهش کیفیت خاک می‌شود. مانند pH خاک (محدوده بهینه ۷/۵- ۶ در نظر گرفته شد) و درصد شن (عدد ۳۶ به عنوان حد بهینه در نظر گرفته شد)، برای نمره‌دهی چنین نشانگرهایی از ترکیب دو شیب ۲/۵ و ۲/۵- تابع فوق استفاده می‌شود (Bastida *et al.*, 2006).

شاخص‌های کیفیت خاک

به دلیل اینکه تفسیر تعداد زیاد نشانگرها و نتیجه‌گیری از آن‌ها بسیار مشکل است. توصیه شده است که نشانگرها در یک شاخص تلفیق شوند. مهم‌ترین این شاخص‌ها، شاخص کیفیت تجمعی[۲] و شاخص کیفیت نمرو[۳] هستند. در مدل شاخص کیفیت تجمعی، بعد از تعیین نمره و وزن هر نشانگر، شاخص کیفیت خاک با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (Doran & Parkin, 1994):

(رابطه ۹)
$$IQI = \sum_{i=1}^{n} W_i N_i$$

در این رابطه، W_i وزن تعلق یافته به هر نشانگر، N_i مقدار نمره مربوط به هر نشانگر و n تعداد نشانگرهای خاک می‌باشد. در مدل شاخص کیفیت نمرو که اساس آن استفاده از مقادیر میانگین و حداقل نشانگرها است، بر خلاف مدل شاخص کیفیت تجمعی وزن نشانگرهای خاک استفاده نمی‌شود (Qi *et al.*, 2009):

(رابطه ۱۰)
$$NQI = \sqrt{\frac{P_{ave}^2 + P_{min}^2}{2}} \times \frac{n-1}{n}$$

در این معادله، P_{ave} میانگین نمره تعلق یافته به نشانگرهای انتخاب شده در هر نمونه خاک، P_{min} حداقل نمره موجود در بین نشانگرهای انتخاب شده برای هر نمونه و n تعداد ویژگی‌های موردنظر است. هر دو شاخص فوق برای ارزیابی اثر اندوده سطحی

۱ Standard scoring functions
۲ Integrated quality index (IQI)
۳ Nemero quality index (NQI)

بر کیفیت خاک در دو حالت قبل از تشکیل اندوده سطحی با در نظر گرفتن ضریب آبگذری و ضریب هواگذری قبل از اعمال بارندگی و بعد از تشکیل اندوده سطحی و با لحاظ کردن ضریب آبگذری و ضریب هواگذری بعد از اعمال بارندگی بر اساس دسته کل داده‌ها[1] مورد مقایسه قرار گرفتند. برای رسم نمودارها از Excel 2016 استفاده شد، همچنین وزن هر یک از نشانگرها از طریق تقسیم واریانس مشترک (سهم) آن نشانگر بر واریانس مشترک کل نشانگرهای مورد مطالعه محاسبه شد و در نهایت مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون t در سطح ۵ درصد با استفاده از نرم افزار SPSS Version 22 انجام شد.

نتایج و بحث

نشانگرهای نمونه‌های خاک مورد مطالعه

خلاصه آماری نشانگرهای اندازه‌گیری شده کیفیت خاک در جدول (۱) آمده است. از میان ۱۸ نشانگر اندازه‌گیری شده، قابلیت هدایت الکتریکی با ۱۶۲/۱ درصد، دارای بیش‌ترین ضریب تغییرات و پس از آن ضریب آبگذری بعد از اعمال بارندگی با ۱۲۸/۸ درصد و کربن آلی با ۱۰۷ درصد قرار داشتند. pH خاک با ۳/۶ درصد، دارای کم‌ترین ضریب تغییرات بود. با توجه به زیاد بودن ضریب تغییرات بیش‌تر نشانگرهای مورد مطالعه می‌توان نتیجه گرفت که نمونه خاک‌های مورد مطالعه از تنوع خوبی برخوردار هستند. همچنین با توجه به کم بودن ضریب تغییرات pH خاک با میانگین ۸/۳ و نیز میانگین کربنات کلسیم معادل ۱۷/۴ درصد می‌توان گفت که نمونه خاک‌های مورد مطالعه عمدتا آهکی هستند. با توجه به میانگین نشانگر درصد کربن آلی ۱/۴ درصد، رس ۲۲/۶ درصد، سیلت ۴۰ درصد و در نتیجه نشانگر شاخص پایداری ساختمان خاک ۳/۸ درصد، می‌توان گفت نمونه خاک‌های مورد مطالعه دارای ساختمان ضعیف و در نتیجه خطر تخریب ساختمان زیاد هستند. ضریب آبگذری و ضریب هواگذری بعد از اعمال بارندگی به طور متوسط به ترتیب حدود ۵۵ درصد و حدود ۶۴ درصد کاهش پیدا کردند، اما ضریب تغییرات آنها به طور چشمگیری افزایش یافت. این موضوع نیز از یک سو بیانگر ساختمان ضعیف اغلب نمونه‌های خاک و از سوی دیگر، وجود تنوع پایداری ساختمان خاک در مقابل ضربه قطرات باران است.

جدول ۱- توصیف آماری نشانگرهای اندازه‌گیری شده کیفیت خاک در نمونه‌های خاک مورد بررسی

نشانگر	واحد	کمینه	بیشینه	میانگین	ضریب تغییرات (درصد)
شاخص اندوده سطحی	-	۰/۷۳	۷/۵۳	۳/۳۷	۵۵/۵
شاخص پایداری ساختمان خاک	٪	۰/۷۳	۱۶/۲۱	۳/۸۴	۹۵/۱
میانگین وزنی قطر خاکدانه	mm	۰/۲۲	۱/۸۶	۰/۷۵	۶۰
جرم مخصوص ظاهری	gr/cm^3	۱/۱۰	۱/۹۶	۱/۴۵	۱۱/۷
شاخص سله	-	۰/۲۳	۱/۳۶	۰/۶۵	۴۱/۵
پایداری خاکدانه‌های درشت	٪	۱۱/۴۰	۸۹/۸۰	۶۱/۷۰	۳۶/۱
ضریب آبگذری قبل از اعمال بارندگی	cm/h	۰/۹۶	۳۲/۹۰	۱۵/۱۰	۶۴
ضریب آبگذری بعد از اعمال بارندگی	cm/h	۰/۴۶	۳۰	۶/۷۱	۱۲۸/۸
ضریب هواگذری قبل از اعمال بارندگی	μm^2	۵/۲۵	۳۶۰/۷۸	۷۴/۷۵	۱۰/۴
ضریب هواگذری بعد از اعمال بارندگی	μm^2	۰/۹۰	۱۹۵/۸۰	۲۷/۰۶	۱۴/۱
شن	٪	۱۷/۶	۸۷/۵۰	۳۷/۳۰	۴۳/۲
سیلت	٪	۷/۴۰	۵۳/۹	۴۰	۲۶/۵
رس	٪	۵/۱۰	۳۶/۲	۲۲/۶۰	۳۵/۳
کربن آلی	٪	۰/۱۹	۷/۴۱	۱/۳۹	۱۰۷
نسبت جذب سدیم	-	۰/۷۰	۷/۷۱	۲/۴۱	۶۹/۶
قابلیت هدایت الکتریکی	$dS\ m^{-1}$	۰/۷۰	۲۱/۵	۲/۰۶	۱۶۲/۱
کربنات کلسیم معادل	٪	۱	۴۳/۴	۱۷/۴۰	۶۳/۳
پ‌هاش خاک	-	۷/۴۵	۸/۷۷	۸/۳۲	۳/۶

شاخص اندوده سطحی

ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص اندوده سطحی با دیگر متغیرها در جدول (۲) ارائه شده است. همان طور که دیده می‌شود، شاخص اندوده سطحی با بیش‌تر متغیرهای مورد مطالعه دارای همبستگی منفی است، اما از میان این متغیرها فقط با متغیرهای میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، ضریب آبگذری بعد از اعمال بارندگی و ضریب هواگذری بعد از اعمال بارندگی دارای همبستگی منفی و معنی‌دار است. همچنین نتایج حاصل از ارزیابی شاخص اندوده سطحی نمونه خاک‌های مورد مطالعه که بر اساس درصد کربن آلی خاک مرتب شده‌اند، در جدول (۳) آمده

۱ Total data set

است. نتایج نشان داد که به جزخاک‌های جنگلی (نمونه‌های با درصد کربن آلی ۲/۹۳، ۴/۹۰، ۶/۶۳ و ۷/۴۱) به دلیل متوسط کربن آلی حدود ۵/۵ درصد، رس ۲۶/۶ درصد و سیلت ۵۱/۹ درصد و در نتیجه شاخص پایداری ساختمان خاک ۱۲ درصد که دارای شاخص اندوده سطحی حدود یک و کم‌تر از یک هستند. سایر نمونه‌های خاک مورد مطالعه عمدتا به دلیل کربن آلی کم‌تر از یک درصد، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها حدود ۰/۶۷ میلی‌متر و شاخص پایداری ساختمان کم‌تر از سه درصد، دارای شاخص اندوده سطحی بیش‌تر از یک و در نتیجه مستعد تشکیل اندوده سطحی هستند. نمونه خاک‌های با درصد کربن آلی ۰/۴۳، ۰/۵۸، ۰/۷۳، ۰/۹۲، ۱/۵۶، ۱/۶۰، ۱/۸۰ و ۲/۲۹ با شاخص اندوده سطحی بیش‌تر از پنج که حساس‌ترین خاک‌ها به تشکیل اندوده سطحی بودند به طور متوسط دارای کربن آلی یک درصد، رس ۲۸/۹ و سیلت ۴۴ درصد و در نتیجه شاخص پایداری ساختمان کم‌تر از سه درصد بودند (جدول ۳). Valentin & Bresson (1997) نیز مقدار شاخص اندوده سطحی را ۱/۰۳ برای خاک‌های لوم رسی تا ۱۰/۸۶ برای خاک‌های لوم سیلتی گزارش کردند. بنابراین می‌توان گفت که درصد کربن آلی زیاد مهم‌ترین فاکتور در جلوگیری از تشکیل اندوده سطحی است و خاک‌های جنگلی با درصد کربن آلی ۲/۹۳، ۴/۹۰، ۶/۶۳ و ۷/۴۱ با درصد سیلت زیاد لزوما مستعد تشکیل اندوده سطحی نیستند.

جدول ۲- ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص اندوده سطحی با دیگر نشانگرهای مورد مطالعه

متغیر	شاخص اندوده سطحی
شاخص پایداری ساختمان خاک	-۰/۳۰
میانگین وزنی قطر خاکدانه	-۰/۴۰*
جرم مخصوص ظاهری	-۰/۰۲
شاخص سله	-۰/۰۵
پایداری خاکدانه‌های درشت	-۰/۱۳
ضریب آبگذری قبل از اعمال بارندگی	۰/۱۶
ضریب آبگذری بعد از اعمال بارندگی	-۰/۴۷**
ضریب هواگذری قبل از اعمال بارندگی	-۰/۱۰
ضریب هواگذری بعد از اعمال بارندگی	-۰/۴۰*
شن	-۰/۰۰۲
سیلت	-۰/۱۱
رس	۰/۱۱
کربن آلی	-۰/۳۰
نسبت جذب سدیم	-۰/۲۶
قابلیت هدایت الکتریکی	-۰/۱۲
کربنات کلسیم معادل	۰/۲۷
پهاش خاک	۰/۰۲

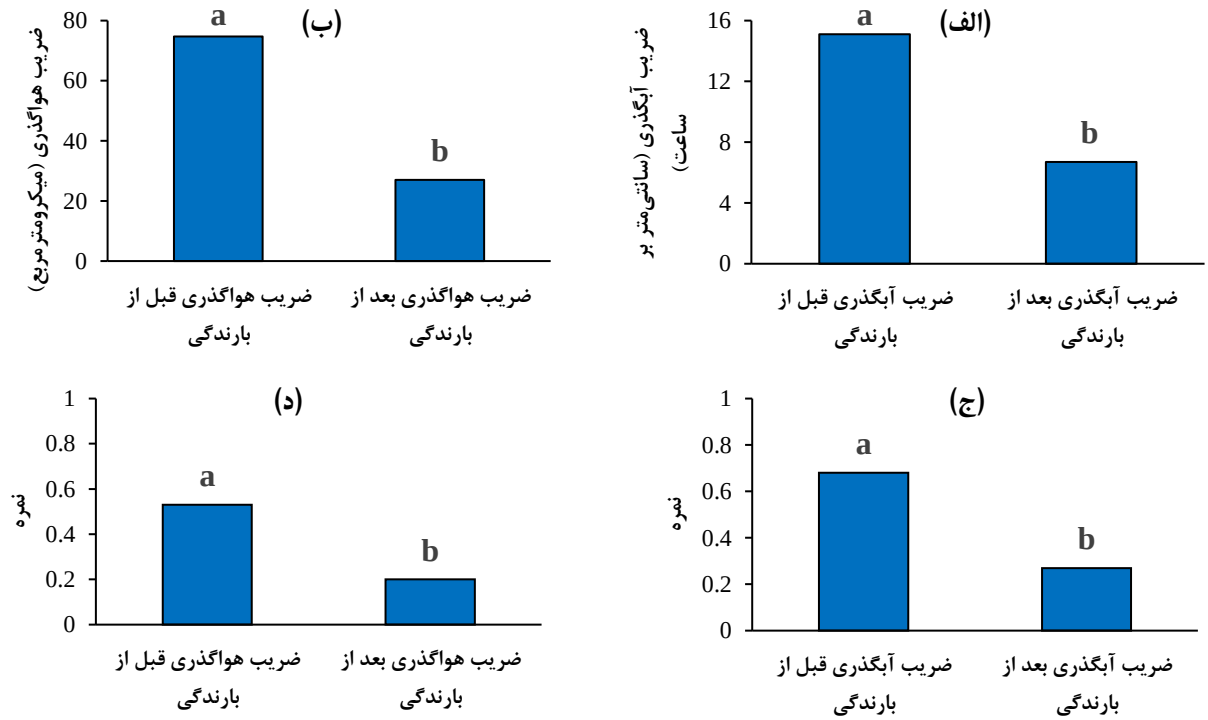
*و**: به ترتیب معنی‌داری در سطح ۵ و ۱ درصد

اثر اندوده سطحی بر ضریب آبگذری و ضریب هواگذری

نتایج حاصل از مقایسه شاخص اندوده سطحی با میزان کاهش ضریب آبگذری و ضریب هواگذری در اثر تشکیل اندوده سطحی بعد از اعمال بارندگی در جدول (۳) آمده است. نمونه خاک‌های جنگلی با درصد کربن آلی ۲/۹۳، ۶/۶۳ و ۷/۴۱ با شاخص اندوده سطحی کمتر از یک، دارای کم‌ترین میزان (تقریبا بدون تغییر) کاهش ضریب آبگذری و ضریب هواگذری بعد از اعمال بارندگی هستند که بیانگر عدم تشکیل اندوده سطحی در این نمونه‌ها است. در مقابل، نمونه خاک‌های با درصد کربن آلی ۰/۴۳، ۰/۵۸، ۰/۷۳، ۰/۹۲، ۱/۵۶، ۱/۶۰، ۱/۸۰ و ۲/۲۹ با شاخص اندوده سطحی بیش‌تر از پنج که حساس‌ترین خاک‌ها به تشکیل اندوده سطحی بودند، دارای بیش‌ترین میزان کاهش ضریب آبگذری و ضریب هواگذری هستند. در این خاک‌ها، بعد از تشکیل اندوده سطحی ضریب آبگذری و ضریب هواگذری به طور متوسط به ترتیب حدود ۸۴ و ۷۲ درصد کاهش پیدا کرد و در مجموع ضریب آبگذری و ضریب هواگذری هر دو ۵۸ درصد کاهش یافتند (حالت الف و ب شکل ۲). از لحاظ کیفیت خاک، کیفیت این دو نشانگر به عنوان مهم‌ترین نشانگرهای متاثر از اندوده سطحی نیز به ترتیب به طور متوسط حدود ۵۷ و ۶۶ درصد کاهش یافتند (حالت ج و د شکل ۲).

جدول ۳- تاثیر اندوده سطحی بر ضریب آبگذری و ضریب هواگذری

درصد کربن آلی	شاخص اندوده سطحی	درصد کاهش ضریب آبگذری	درصد کاهش ضریب هواگذری	درصد کربن آلی	شاخص اندوده سطحی	درصد کاهش ضریب آبگذری	درصد کاهش ضریب هواگذری
۰/۱۹	۴/۲۲	۷۶/۳	۷۷/۱	۰/۸۷	۲/۶۹	۶۲/۹	۸۹/۴
۰/۲۴	۲/۹۵	۶۶/۱	۷۵/۹	۰/۹۲	۶/۲۶	۸۴	۷۹/۹
۰/۲۴	۴/۳۵	۷۷	۸۳/۳	۰/۹۲	۴/۸۵	۷۹/۴	۷۶/۹
۰/۳۴	۱/۶۶	۳۹/۸	۲۰/۸	۰/۹۷	۲/۷۳	۶۳/۵	۸۷/۹
۰/۴۳	۳/۱۱	۶۷/۹	۵/۴	۱/۰۲	۱/۹۶	۴۹	۷۸/۹
۰/۴۳	۵/۴۱	۸۱/۵	۴۲/۴	۱/۴۱	۲/۰۸	۵۲/۱	۶۳/۶
۰/۴۳	۲/۴۵	۵۹/۲	۸۱/۴	۱/۴۶	۲/۴۹	۵۹/۹	۶۰/۳
۰/۵۳	۳/۲۶	۶۹/۴	۸۰	۱/۵۱	۴/۹۹	۸۰	۹۲/۹
۰/۵۳	۳/۰۱	۶۶/۸	۵۷	۱/۵۶	۵/۱۳	۸۰/۵	۸۸/۳
۰/۵۳	۲/۱۹	۵۴/۴	۸۲/۶	۱/۵۶	۳/۳۷	۷۰/۴	۵۶/۱
۰/۵۸	۳/۱۶	۶۸/۴	۶۹	۱/۶۰	۵/۹۴	۸۳/۲	۶۵/۸
۰/۵۸	۲/۷۲	۶۳/۳	۵۴/۳	۱/۸۰	۷/۱۰	۸۵/۹	۷۰/۱
۰/۵۸	۷/۱۶	۸۶	۹۱/۷	۲/۰۹	۱/۱۳	۱۱/۸	۳۱/۴
۰/۶۳	۱/۸۲	۴۵/۲	۴۲/۵	۲/۰۹	۲/۲۷	۵۵/۹	۸۳/۶
۰/۶۸	۱/۰۳	۳/۲	۱۳/۵	۲/۲۹	۷/۵۳	۸۶/۷	۸۷/۲
۰/۷۳	۶/۵۳	۸۴/۷	۴۷/۸	۲/۴۸	۳/۵۳	۷۱/۷	۲۷
۰/۷۳	۱/۴۸	۳۲/۶	۵۷	۲/۹۳	۰/۹۲	۲/۷	۲/۸
۰/۷۳	۲/۰۳	۵۰/۸	۷۲/۸	۴/۹۰	۱/۲۵	۲۰/۳	۲۱/۷
۰/۸۲	۳/۹۴	۷۴/۶	۸۷/۵	۶/۶۳	۰/۷۳	۰/۴	۰/۲
۰/۸۷	۴/۵۷	۷۸/۱	۱۶/۷	۷/۴۱	۰/۸۵	۳/۱	۰



شکل ۲- اثر اندوده سطحی بر الف) مقدار نشانگر ضریب آبگذری، ب) مقدار نشانگر ضریب هواگذری، ج) نمره نشانگر ضریب آبگذری و د) نمره نشانگر ضریب هواگذری هواگذری (میانگین‌هایی که با حروف متفاوت نشان داده شده‌اند براساس آزمون t در سطح احتمال ۵ درصد دارای اختلاف معنی‌دار هستند)

ارتباط تشکیل اندوده سطحی با شاخص‌های کیفیت خاک

الف) شاخص کیفیت تجمعی

همان طور که قبلا اشاره شد شاخص کیفیت تجمعی از مجموع حاصلضرب نمره هر نشانگر در وزن آن نشانگر محاسبه می‌شود (معادله ۹). سهم و وزن نشانگرهای مورد مطالعه در دو حالت قبل و بعد از تشکیل اندوده سطحی در جدول (۴) ارائه شده است.

نتایج حاصل از ارزیابی کیفیت خاک با استفاده از شاخص کیفیت تجمعی که بر اساس درصد کربن آلی مرتب شده‌اند، در شکل (۲) آمده است. نتایج نشان داد به جزء خاک‌های مناطق جنگلی با درصد کربن آلی ۲/۶۳، ۳/۹۰، ۶/۴۳، ۷/۴۱ و بعضی از خاک‌های مرتعی از جمله نمونه خاک‌های با درصد کربن آلی ۰/۸۲، ۱/۵۱ و ۲/۰۹، تمام خاک‌های مورد مطالعه (اراضی زراعی و بعضی از اراضی مرتعی) به دلیل شاخص اندوده سطحی بیش‌تر از یک (جدول ۳) عمدتا دارای کیفیت ضعیف (شاخص کیفیت خاک کم‌تر از ۰/۵) هستند (شکل ۳)، همچنین ارزیابی کیفیت خاک بدون در نظر گرفتن رخداد بارندگی و در نتیجه بدون نشانگرهای متاثر از تشکیل اندوده سطحی از جمله ضریب آبگذری و ضریب هواگذری، باعث بیش برآوردی ارزیابی کیفیت خاک (ستون‌های آبی رنگ) نسبت به ارزیابی آن بعد از تشکیل اندوده سطحی و با اعمال ضریب آبگذری و ضریب هواگذری بعد از اعمال بارندگی (ستون‌های قرمز رنگ) در اکثر نمونه‌های خاک مورد بررسی شد (شکل ۳) و در مجموع باعث کاهش معنی‌دار کیفیت در سطح پنج درصد گردید (شکل ۴). همچنین در ۷۵ درصد از نمونه خاک‌های مورد مطالعه، تشکیل اندوده سطحی باعث کاهش بیش از ۱۰ درصدی شاخص کیفیت خاک می‌شود، اما خاک‌های با درصد کربن آلی ۰/۵۸، ۰/۹۲، ۱/۵۶، ۱/۶۰ و ۱/۸۰ به دلیل شاخص پایداری ساختمان حدود سه درصد با بیش از ۲۰ درصد کاهش، بیش‌ترین کاهش شاخص کیفیت خاک و خاک‌های با درصد کربن آلی ۰/۳۴، ۰/۶۳، ۰/۶۸، ۰/۷۳، ۲/۶۳، ۳/۹۰، ۶/۴۳ و ۷/۴۱ به دلیل به دلیل شاخص پایداری ساختمان هفت درصد با کم‌تر از پنج درصد تغییر، کمترین کاهش نمره کیفیت خاک را در اثر تشکیل اندوده سطحی داشتند (شکل ۵)، بنابراین می‌توان گفت هرچه احتمال تشکیل اندوده سطحی بیش‌تر باشد، کیفیت خاک ضعیف‌تر و در نتیجه بیش‌برآوردی و ارزیابی نادرست کیفیت خاک (بدون لحاظ اثر بارندگی) نیز بیش‌تر است.

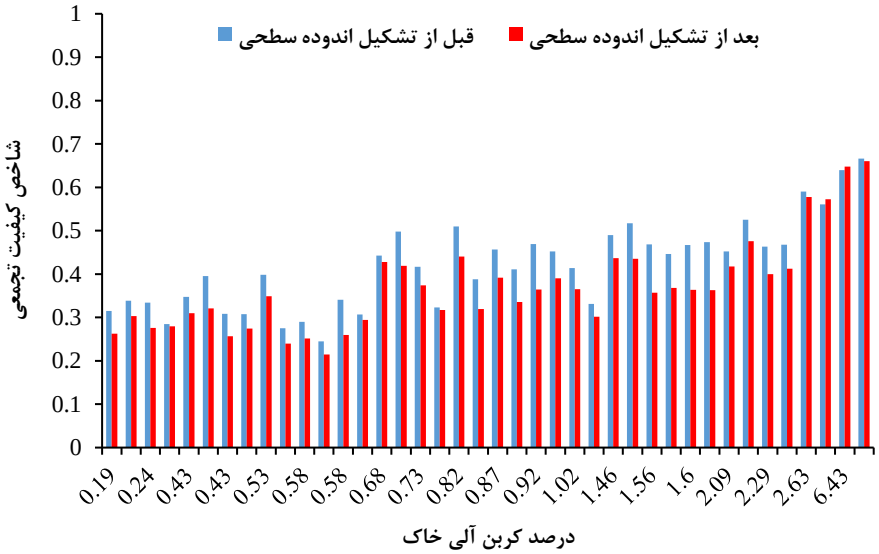
جدول ۴- سهم و وزن نشانگرهای مورد مطالعه قبل و بعد از اعمال بارندگی

نشانگر	قبل از تشکیل اندوده سطحی		بعد از تشکیل اندوده سطحی	
	سهم	وزن	سهم	وزن
شاخص پایداری ساختمان خاک	۰/۹۱۲	۰/۰۷۶	۰/۸۷۱	۰/۰۷۶
میانگین وزنی قطر خاکدانه	۰/۸۶۳	۰/۰۶۶	۰/۸۴۸	۰/۰۷۴
جرم مخصوص ظاهری	۰/۶۱۲	۰/۰۵۱	۰/۵۸۰	۰/۰۵۱
شاخص سله	۰/۸۳۷	۰/۰۶۹	۰/۷۵۴	۰/۰۶۶
پایداری خاکدانه‌های درشت	۰/۷۹۸	۰/۰۶۶	۰/۷۹۴	۰/۰۶۹
ضریب آبگذری قبل از اعمال بارندگی	۰./۷۶۶	۰/۰۶۳	-	-
ضریب آبگذری بعد از اعمال بارندگی	-	-	۰/۸۶۳	۰/۰۷۵
ضریب هواگذری قبل از اعمال بارندگی	۰/۵۳۵	۰/۰۴۴	-	-
ضریب هواگذری بعد از اعمال بارندگی	-	-	۰/۷۲۸	۰/۰۶۳
شن	۰/۹۹۲	۰/۰۸۲	۰/۹۹۰	۰/۰۸۶
سیلت	۰/۹۰۱	۰/۰۷۵	۰/۸۲۹	۰/۰۷۲
رس	۰/۸۸۵	۰/۰۷۳	۰/۷۶۴	۰/۰۶۷
کربن آلی	۰/۸۶۸	۰/۰۷۲	۰/۸۴۳	۰/۰۷۴
نسبت جذب سدیم	۰/۷۱۸	۰/۰۵۹	۰/۴۱۷	۰/۰۳۶
قابلیت هدایت الکتریکی	۰/۸۲۰	۰/۰۶۸	۰/۷۸۴	۰/۰۶۸
کربنات کلسیم معادل	۰/۷۱۳	۰/۰۵۹	۰/۶۷۲	۰/۰۵۹
پ‌هاش خاک	۰/۸۵۴	۰/۰۷۱	۰/۷۲۹	۰/۰۶۴

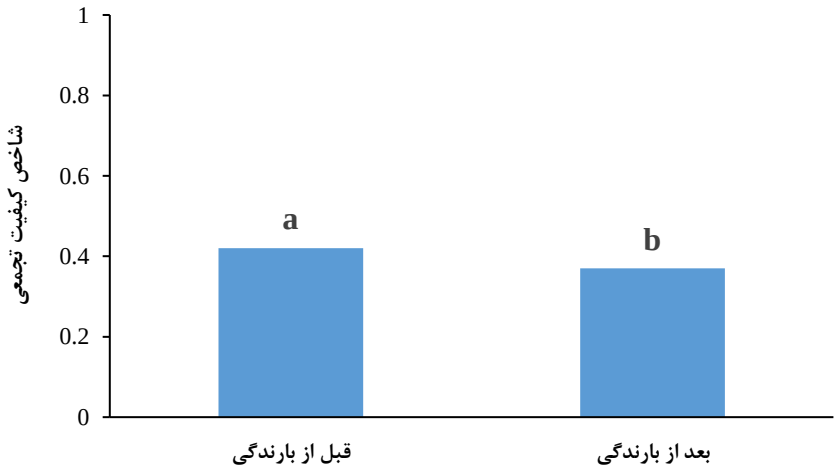
ب) شاخص کیفیت نمرو

نتایج حاصل از مقایسه شاخص کیفیت نمرو قبل از تشکیل اندوده سطحی با در نظر گرفتن ضریب آبگذری و ضریب هواگذری قبل از بارندگی (ستون‌های آبی رنگ) با بعد از تشکیل آن با اعمال ضریب آبگذری و ضریب هواگذری بعد از بارندگی (ستون‌های قرمز رنگ) که بر اساس درصد کربن آلی مرتب شده‌اند، در شکل (۶) آمده است. نتایج نشان داد که تمام خاک‌های مورد مطالعه بر خلاف شاخص کیفیت تجمعی (شکل ۳) دارای کیفیت ضعیف (شاخص کیفیت خاک کم‌تر از ۰/۵) هستند، اما بر اساس این شاخص، همانند شاخص کیفیت تجمعی خاک‌های جنگلی با درصد کربن آلی ۲/۶۳، ۳/۹۰، ۶/۴۳، ۷/۴۱ به دلیل حساسیت بسیار کم نسبت به تشکیل اندوده سطحی (جدول ۳) دارای کیفیت بیش‌تر هستند و ارزیابی کیفیت خاک بدون در نظر گرفتن اندوده سطحی و نشانگرهای ضریب آبگذری و ضریب هواگذری متاثر از آن باعث بیش برآوردی کیفیت خاک در اکثر نمونه‌های مورد مطالعه گردید (شکل ۶) و در مجموع همانند شاخص کیفیت

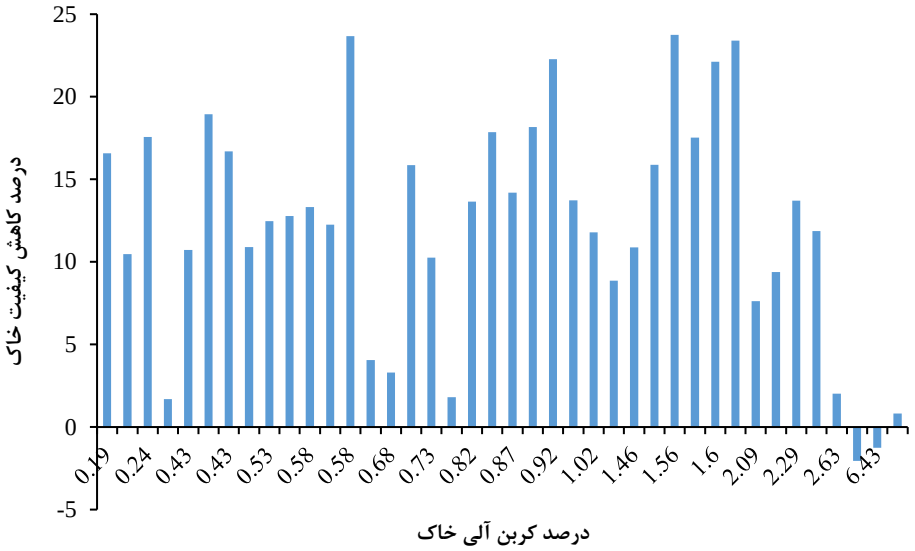
تجمعی، اندوده سطحی باعث کاهش معنی‌دار کیفیت خاک در سطح پنج درصد گردید (شکل ۷). تا حدودی همانند شاخص کیفیت تجمعی، شاخص کیفیت نمرو خاک‌های شماره ۰/۵۸، ۰/۹۲ و ۱/۵۶ به دلیل پایداری ساختمان ضعیف، بیش از ۲۰ درصد کاهش یافت و شاخص کیفیت نمرو خاک‌های شماره با درصد کربن آلی ۰/۳۴، ۰/۶۳، ۰/۶۸، ۰/۷۳، ۲/۶۳، ۳/۹۰، ۶/۴۳ و ۷/۴۱ همانند شاخص کیفیت تجمعی (شکل ۵) با کم‌تر از پنج درصد تغییر، کم‌ترین کاهش کیفیت خاک را در اثر تشکیل اندوده سطحی را داشتند (شکل ۸).



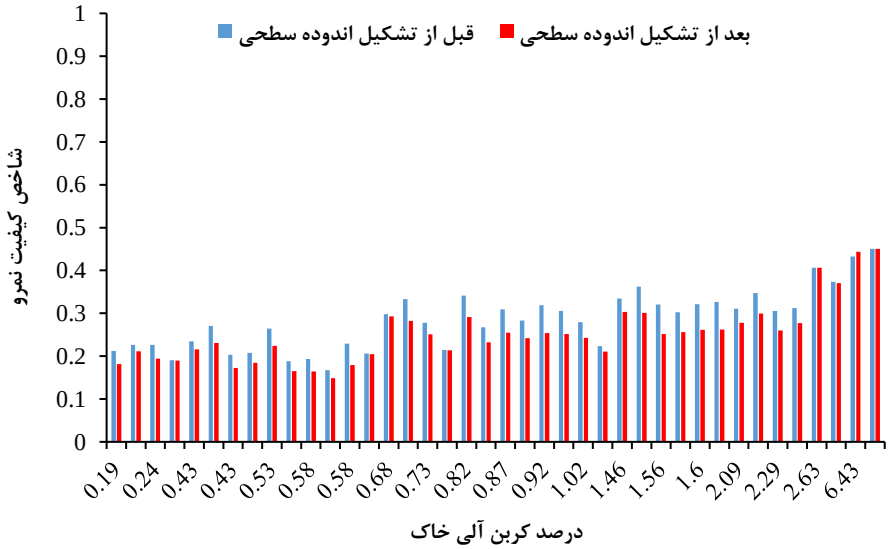
شکل ۳- شاخص کیفیت تجمعی قبل و بعد از تشکیل اندوده سطحی



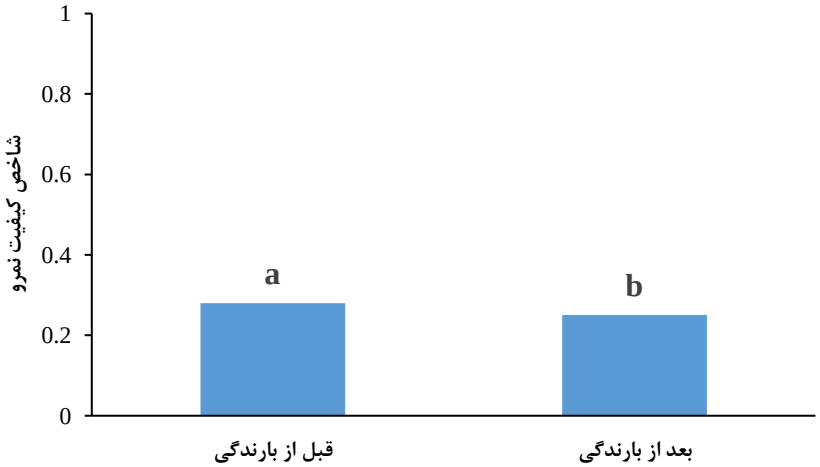
شکل ۴- اثر اندوده سطحی بر کیفیت خاک (میانگین‌هایی که با حروف متفاوت نشان داده شده‌اند براساس آزمون t در سطح احتمال ۵ درصد دارای اختلاف معنی‌دار هستند)



شکل ۵- درصد کاهش شاخص کیفیت خاک تجمعی در اثر تشکیل اندوده سطحی



شکل ۶- شاخص کیفیت نمرو قبل و بعد از تشکیل اندوده سطحی



شکل ۷- اثر اندوده سطحی بر کیفیت خاک (میانگین‌هایی که با حروف متفاوت نشان داده شده‌اند براساس آزمون t در سطح احتمال ۵ درصد دارای اختلاف معنی‌دار هستند)

شکل ۸- درصد کاهش شاخص کیفیت نمرو خاک در اثر تشکیل اندوده سطحی

نتیجه‌گیری

یکی از روش‌های ارزیابی مدیریت خاک، ارزیابی کیفیت خاک است برای ارزیابی کیفیت خاک باید ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک به عنوان نشانگرهای کیفیت خاک، به درستی اندازه‌گیری و نمره‌دهی شوند. هم اکنون در بسیاری از مطالعات ارزیابی کیفیت خاک فقط نشانگرهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی معمول خاک که در اثر عملیات مدیریتی تغییر می‌کنند، اندازه‌گیری و نمره‌دهی می‌شوند. نتایج مطالعه خاک‌های مناطق اقلیمی متفاوت و در کاربری‌های مختلف نشان داد که شاخص اندوده سطحی به عنوان یکی از نشانگرهای متاثر از بارندگی و در نتیجه نشانگرهای متاثر از آن از جمله ضریب آبگذری و ضریب هواگذری در خاک‌ها و کاربری‌های مختلف، متغیر است که این میزان تغییر شاخص اندوده سطحی در خاک‌های جنگلی حداقل و در خاک‌های با شاخص پایداری ساختمان سه درصد حداکثر است و ضریب آبگذری و ضریب هواگذری نسبت به قبل از تشکیل اندوده سطحی کاهش معنی داری پیدا کردند، همچنین نمره این دو نشانگر به ترتیب به طور متوسط حدود ۵۷ و ۶۶ درصد کاهش یافتند. در این مطالعه بر خلاف مطالعات قبلی سعی شد اثر نشانگرهای متاثر از بارندگی و در نتیجه تشکیل اندوده سطحی از جمله ضریب آبگذری و ضریب هواگذری نسبت به مقدار این دو نشانگر قبل از اعمال بارندگی بر شاخص‌های کیفیت خاک بررسی شود. نتایج نشان داد که عدم در نظر گرفتن نشانگرهای ضریب آبگذری و ضریب هواگذری متاثر از تشکیل اندوده سطحی منجر به بیش برآوردی و ارزیابی نادرست کیفیت خاک در هر دو شاخص کیفیت تجمعی و نمرو گردید که این بیش برآوردی در خاک‌های با شاخص پایداری ساختمان هفت درصد کم‌تر از پنج درصد و در خاک‌های با شاخص پایداری ساختمان سه درصد بیش از ۲۰ درصد بود. بنابراین هرچه احتمال تشکیل اندوده سطحی بیش‌تر باشد، کیفیت خاک ضعیف‌تر و خطای ارزیابی آن نیز بیش‌تر است. بنابراین می‌توان گفت که نشانگرهای کیفیت خاک فقط توسط فعالیت‌های انسان تحت تاثیر قرار نمی‌گیرند، بلکه توسط فرآیندهایی که در اثر بارندگی تشکیل می‌شوند از جمله اندوده سطحی و در نتیجه نشانگرهای متاثر از این فرآیند از جمله ضریب آبگذری و ضریب هواگذری نیز تحت تاثیر قرار خواهند گرفت. بنابراین اندازه‌گیری و نمره‌دهی اندوده سطحی به یکی از نشانگرهای متاثر از بارندگی برای ارزیابی کیفیت خاک ضروری است. هرچند که این نتایج نیاز به مطالعات جامع‌تر و دقیق‌تر دارد.

"هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Cambardella, C. A. (2004). The soil management assessment framework. *Soil Science Society of America Journal, 68*(6), 1945-1962 .

Askari, M. S., & Holden, N. M. (2015). Quantitative soil quality indexing of temperate arable management systems. *Soil and Tillage Research, 150*, 57-67 .

Assouline, S., & Ben-Hur, M. (2006). Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing. *Catena, 66*(3), 211-220 .

Bastida, F., Moreno, J. L., Hernandez, T., & García, C. (2006). Microbiological degradation index of soils in a semiarid climate. *Soil Biology and Biochemistry, 38*(12), 3463-3473 .

Bissonnais, Y. l. (1990). Experimental study and modelling of soil surface crusting processes. *Catena, Supplement*(17), 13-28 .

Brejda, J. J., Moorman, T. B., Karlen, D. L., & Dao, T. H. (2000). Identification of regional soil quality factors and indicators I. Central and Southern High Plains. *Soil Science Society of America Journal, 64*(6), 2115-2124.

Chamizo, S., Cantón, Y., Lázaro, R., Solé-Benet, A., & Domingo, F. (2012). Crust composition and disturbance drive infiltration through biological soil crusts in semiarid ecosystems. *Ecosystems, 15*(1), 148-161 .

Cherobim, V. F., Favaretto, N., Barth, G., & Huang, C. H. (2018). Soil surface sealing by liquid dairy manure affects saturated hydraulic conductivity of Brazilian Oxisols. *Agricultural Water Management, 203*, 193-196 .

Cherobim, V. F., Favaretto, N., Rumbelsperger, A. M. B., & Huang, C.H. (2019). Soil surface sealing by liquid dairy manure as analysed by X-ray computed tomography. *Agricultural Water Management, 213*, 742-748 .

Chong-Feng, B., Gale, W., Qiang-Guo, C., & Shu-Fang, W. (2013). Process and mechanism for the development of physical crusts in three typical Chinese soils. *Pedosphere, 23*(3), 321-332 .

Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. In J.W. Doran, D.C. Coleman, D.F. Bezdicek, B.A. Stewart (eds.), *Defining soil quality for a sustainable environment* (pp. 1-21). SSSA Spatial Publication.

Gee, G. W., & Or, D. (2002). 2.4 Particle-size analysis. In J. H. Dane, G. C. Topp (eds.) *Methods of soil analysis: Part 4 physical methods, 5*, 255-293 .

Grossman, R., & Reinsch, T. (2002). 2.1 Bulk density and linear extensibility. In J. H. Dane, G. C. Topp (eds.) *Methods of soil analysis*: Part 4 *physical methods*, 5, 201-228. SSSA Book Series.

Guo, L., Sun, Z., Ouyang, Z., Han, D., & Li, F. (2017). A comparison of soil quality evaluation methods for Fluvisol along the lower Yellow River. *Catena, 152*, 135-143 .

Karlen, D., Erbach, D., Kaspar, T., Colvin ,T., Berry, E., & Timmons, D. (1990). Soil tilth: A review of past perceptions and future needs. *Soil Science Society of America Journal, 54*(1), 153-161 .

Karlen, D., Mausbach, M., Doran, J., Cline, R., Harris, R., & Schuman, G. (1997). Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). *Soil Science Society of America Journal, 61*(1), 4-10 .

Klute, A., & Dirksen, C. (1986). Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. *Methods of soil analysis: part 1—physical and mineralogical methods*(methodsofsoilan1), 687-734 .

Loeppert, R. H., & Suarez, D. L. (1996). Carbonate and gypsum. In D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston, M. E. Sumner (eds.) *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods, 5*, 437-474 . SSSA Book Series.

Maïga-Yaleu, S., Guiguemde, I., Yacouba, H., Karambiri, H., Ribolzi ,O., Bary, A., . . . Chaplot, V. (2013). Soil crusting impact on soil organic carbon losses by water erosion. *Catena, 107*, 26-34 .

Mermut, A., Luk, S., Römkens, M., & Poesen, J. (1995). Micromorphological and mineralogical components of surface sealing in loess soils from different geographic regions. *Geoderma, 66*(1-2), 71-84 .

Mohammadi, M. H., & Vanclooster, M. (2019). A simple device for field and laboratory measurements of soil air permeability. *Soil Science Society of America Journal, 83*(1), 58-63 .

Moncada, M. P., Gabriels, D., Lobo, D., De Beuf, K., Figueroa, R., & Cornelis, W. M. (2014). A comparison of methods to assess susceptibility to soil sealing. *Geoderma, 226*, 397-404 .

Mualem, Y., & Assouline, S. (1996). Soil sealing, infiltration and runoff. In A.S. Issar, S.D. Resnick (eds.) *Runoff, infiltration and subsurface flow of water in arid and semi-arid regions.* (pp. 131-181): Water Science and Technology Library, vol 21. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-2929-1_4

Nimmo, J. R., & Perkins, K. S. (2002). 2.6 Aggregate stability and size distribution. In J. H. Dane, G. C. Topp (eds.) *Methods of soil analysis: Part 4 physical methods, 5*, 317-328. SSSA Book Series.

Nosrati, K. (2013). Assessing soil quality indicator under different land use and soil erosion using multivariate statistical techniques. *Environmental Monitoring and Assessment, 185*(4), 2895-2907 .

Qi, Y., Darilek, J. L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W & ,. Gu, Z. (2009). Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma, 149*(3-4), 325-334 .

Reynolds, W., Drury, C., Tan, C., Fox, C., & Yang, X. (2009). Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma, 152*(3-4), 252-263 .

Rhoades, J. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods, 5*, 417-435 .

Richards, L. (1954). *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. Handbook, 60* .

Roth, C., Sumner, M., & Stewart, B. (1992). Soil sealing and crusting in tropical South America. *Soil Crusting. Lewis Publishers, Boca Raton*, 267-300 .

Sinha, S., Masto, R., Ram, L., Selvi, V., Srivastava, N ,. Tripathi, R., & George, J. (2009). Rhizosphere soil microbial index of tree species in a coal mining ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry, 41*(9), 1824-1832 .

Takoutsing, B., Weber, J., Aynekulu, E., Martín, J. A. R., Shepherd, K., Sila, A., . . . Diby, L. (2016). Assessment of soil health indicators for sustainable production of maize in smallholder farming systems in the highlands of Cameroon. *Geoderma, 276*, 64-73

Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. In D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston, M. E. Sumner (eds.) *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods, 5*, 475-490.

SSSA Book Series.

Valentin, C., & Bresson, L. (1997). Soil crusting. Methods for assessment of soil degradation, 89-107

Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science, 37*(1), 29-38.

Zambon, N., Johannsen, L. L., Strauss, P., Dostal, T., Zumr, D., Cochrane, T. A., & Klik, A. (2020). Splash erosion affected by initial soil moisture and surface conditions under simulated rainfall. *Catena, 196*, 104827.

Zhang, C., Xue, S., Liu, G.-B., & Song, Z.-L. (2011). A comparison of soil qualities of different revegetation types in the Loess Plateau, China. *Plant and Soil, 347*(1-2), 163-178.