مقایسه شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک سطحی و زیرسطحی زیر کشت آفتابگردان و گندم

ایوب عثمانی، حسین عسگرزاده [1] و فرخ اسدزاده

کارشناسی ارشد، گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه؛ **ayob.osmanii1369@gmail.com**

دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه؛ **asgarzadeh8688@gmail.com**

دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه؛ **farrokhasadzadeh@gmail.com**

دریافت: **99/3/19** و پذیرش: **99/7/15**

چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی شاخص‌های کیفیت فیزیکی (SPQ) خاک‌های سطحی و زیرسطحی مزارع گندم و آفتابگردان دشت ارومیه انجام شد. از تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای تفکیک تأثیر لایه‌های خاک و نوع کشت بر SPQ استفاده شد. نمونه‌برداری‌ها و اندازه‌گیری‌ها در دو لایه (خاک سطحی و زیرسطحی) 30 مزرعه (پانزده مزرعه گندم و پانزده مزرعه آفتابگردان) انجام شد. منحنی‌های نگهداری آب در خاک و مقاومت فروروی خاک در نمونه‌های دست‌نخورده به ترتیب با استفاده از دستگاه‌های جعبه شن و صفحه فشار، و ریز-فروسنج اندازه‌گیری شدند. سپس دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (LLWR)، گنجایش آب انتگرالی (IWC) و شاخص کیفیت فیزیکی خاک دکستر (S) محاسبه شد. تفاوت معنی‌داری ($P<0.05$) بین مقادیر میانگین شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک‌های سطحی و زیرسطحی وجود داشت. مقادیر چگالی ظاهری نسبی (RBD) خاک‌های زیرسطحی بزرگتر از مقادیر آنها در خاک‌های سطحی بود. همچنین مقادیر IWC، LLWR و S خاک‌های زیرسطحی بسیار کوچکتر از مقادیر آنها در خاک‌های سطحی بود که نشان‌دهنده کیفیت فیزیکی ضعیف خاک زیرسطحی در مزارع مورد بررسی است. این یافته می‌تواند به دلیل خاک‌ورزی رایج با ماشین‌های کشاورزی سنگین وزن (به ویژه در شرایط رطوبت زیاد خاک) در دهه‌های گذشته باشد که سبب تشکیل کفه شخم در خاک زیرسطحی شده است. بنابراین پیشنهاد می‌شود اصلاح سامانه های خاک-ورزی و پایش پیوسته اثر کشت و کار بر SPQ در منطقه انجام گیرد. ارزیابی شاخص‌های SPQ مزارع گندم و آفتابگردان، با استفاده از مقایسه میانگین و PCA، نشان داد که مزارع گندم نسبت به مزارع آفتابگردان کیفیت فیزیکی خاک بهتری داشتند. تفاوت سامانه های ریشه های دو گیاه و تردد بیشتر انسان در مزارع آفتابگردان می‌توانند دلایل اصلی کاهش کیفیت فیزیکی خاک در کشت آفتابگردان در مقایسه با کشت گندم باشند.

واژه‌های کلیدی: دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت، گنجایش آب انتگرالی، مقاومت فروروی خاک، شاخص دکستر

[1] نویسنده مسئول، آدرس: ارومیه، دانشگاه ارومیه - دانشکده کشاورزی، گروه علوم خاک

مقدمه

بررسی کیفیت فیزیکی خاک نقشی محوری در مطالعات مربوط به وضعیت کلی بهره وری خاک دارد (دکستر، 2004a). کیفیت فیزیکی خاک کشاورزی نه تنها شرایط فیزیکی خاک مانند استحکام خاک و انتقال و ذخیره‌سازی آب در منطقه ریشه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (رینولدز و همکاران، 2002)، بلکه کیفیت شیمیایی و بیولوژیکی خاک را هم متأثر می‌کند. زمانی که کیفیت فیزیکی خاک مناسب باشد نسبت‌های مناسبی از مقادیر آب، هوا و مواد غذایی محلول در آب؛ برای حداکثر شدن محصول و حداقل شدن تخریب محیط‌زیست ایجاد می‌شود (تاپ و همکاران، 1997). با کاهش کیفیت فیزیکی خاک، تنش‌های فیزیکی مانند ناکافی بودن پخشیدگی اکسیژن به ریشه‌ها، افزایش مقاومت فروروی خاک و کاهش مقدار آب قابل استفاده خاک (داسیلوا و همکاران، 1994) رشد گیاه را کاهش می‌دهند (خلیفه زاده و همکاران، 2020).

استفاده بیش از حد از ماشین‌های کشاورزی سنگین، خاک‌ورزی در رطوبت‌های زیاد، ماده آلی کم، کشت فشرده، تناوب‌های نامناسب و کوتاه‌مدت از عوامل مهمی هستند که منجر به تراکم زیاد خاک و در نتیجه کاهش کیفیت فیزیکی خاک می‌شوند. بریسو و همکاران (2012) نشان دادند که ماشین‌های کشاورزی مورد استفاده کنونی می‌توانند خاک را تا عمق 90 سانتی‌متری متراکم ساخته و در نتیجه کیفیت فیزیکی خاک سطحی و زیرسطحی را به شدت کاهش دهند. هرچند خاک سطحی در خاکورزی سنتی هر سال شخم زده می‌شود اما اثرات منفی فشرده شدن خاک سطحی در زمان داشت و برداشت محصول قبلی، می‌تواند مقدار محصول بعدی را حتی تا 4 سال بعد با کاهش مواجه کند (ارویدسون و هکنسون، 1996). زمانی که تراکم در رطوبت‌های زیاد انجام شود، ماندگاری اثرات منفی تراکم نیز افزایش می‌یابد. اتانا و همکاران (2013) گزارش کردند که پیامدهای تراکم خاک زیرسطحی حداقل تا 14 سال ماندگار بوده و می‌تواند فرایندهای اساسی خاک مانند تهویه، فعالیت‌های میکروبی و هم‌چنین منافذ درشت خاک را شدیداً کاهش دهد. این گزارش‌ها اهمیت توجه به کیفیت فیزیکی خاک سطحی و زیرسطحی را نشان می‌دهد.

شاخص‌های مختلفی برای کمّی‌سازی سطح یا درجه کیفیت فیزیکی خاک ارائه شده است. دکستر (2004a) شاخص S[1] (شیب منحنی مشخصه رطوبتی خاک در نقطه عطف) را به عنوان شاخص کمّی کیفیت فیزیکی خاک پیشنهاد کرد. دکستر (2004a, b, c) شاخص S را با ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند مقدار رس، مواد آلی، چگالی ظاهری و هدایت هیدرولیکی مرتبط ساخت و نشان داد مقادیر بزرگ‌تر S نشان‌دهنده فراوانی منافذ ساختمانی و کیفیت فیزیکی بهتر خاک در ارتباط با رشد ریشه، خاک‌ورزی و جریان آب در خاک می‌باشند. رینولدز و همکاران (2009) بیان کردند که شاخص S می‌تواند برای خاک‌های ساختمان‌دار مناسب باشد اما در خاک‌های بدون ساختمان شاخص پرخطایی می‌باشد. از این رو باید با احتیاط و در کنار سایر شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک استفاده شود. دکستر (2004c) بر اساس آزمایش‌هایی که بر روی خاک‌های مختلف جهان انجام داد، با توجه به مقادیر S،گروه‌بندی زیر را برای کیفیت فیزیکی خاک پیشنهاد کرد: $S \geq 0/050$ خیلی خوب، $0/050 > S \geq 0/035$ خوب، $0/035 > S \geq 0/020$ ضعیف و $S < 0/020$ خیلی ضعیف.

آب قابل دسترس گیاه (PAW[2]) اولین مفهومی است که در رابطه با میزان آب قابل استفاده (SAW[3]) خاک برای گیاه، در علوم کشاورزی به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفت. PAW که تمامی آب خاک در محدوده گنجایش زراعی (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) را شامل می‌شود، به عنوان ساده‌ترین روش محاسبه SAW، در ارتباط با شاخص S بوده و با افزایش مقدار S، PAW افزایش می‌یابد (عسگرزاده و همکاران، 2010). با وجود سودمندی PAW، این شاخص تنها بر اساس انرژی آب خاک است و کمبود اکسیژن در خاک، توانایی ریشه گیاه برای فروروی در خاک، کاهش هدایت هیدرولیکی با خشک‌شدن خاک و قدرت تبخیرکنندگی جوّ که بر میزان آب قابل استفاده برای گیاه مؤثر است را در نظر نمی‌گیرد. از این رو، داسیلوا و همکاران، (1994) شاخص دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (LLWR[4]) را ارائه دادند. LLWR دامنه‌ای از رطوبت خاک است که رشد گیاه از نظر پتانسیل ماتریک، تهویه و مقاومت مکانیکی خاک با حداقل محدودیت روبرو باشد. این مفهوم سه عامل مؤثر بر رشد گیاه را در یک متغیر جمع می‌کند و از این‌رو می‌تواند به عنوان شاخصی از کیفیت ساختمان خاک برای تولید محصول مورد استفاده قرار گیرد. این شاخص ارتباط قوی با ویژگی‌های ساختمانی خاک دارد (عسگرزاده و همکاران، 2010 و 2011). روش

[1] Dexter's index of soil physical quality

[2] Plant available water

[3] Soil available water

[4] Least limiting water range

گنجایش آب انتگرالی (IWC[1]) که توسط گرونولت و همکاران (2001) به‌عنوان روش نوین تعیین آب قابل‌استفاده خاک برای گیاه پیشنهاد گردید ارتباط قوی با ویژگی‌های ساختمانی خاک و رشد گیاه دارد (عسگرزاده و همکاران، 2010 و خلیفه‌زاده و همکاران، 2020). برای محاسبه IWC توابع وزنی با توجه به دامنه تغییر محدودیت‌ها، به عنوان ضریب، در مقدار آب لایه خاک ضرب شده و سپس انتگرال‌گیری برای تعیین کل آب قابل استفاده انجام می‌گیرد.

چگالی ظاهری (BD[2]) کمّیتی است که معمولاً برای توصیف درجه فشردگی و وضعیت ساختمانی خاک به کار می‌رود. به علت ارتباط این ویژگی با وضعیت تهویه و مقاومت فروروی خاک می‌توان آن را به‌عنوان شاخصی از کیفیت فیزیکی خاک به کاربرد. با این حال به علت وابستگی مقادیر بحرانی و بهینه آن به بافت و مقدار ماده آلی خاک، گاهی اوقات تفسیر مقادیر بدست‌آمده برای BD گمراه‌کننده است (دکستر و همکاران، 2007). برای نمونه، BD برابر $1/4\ Mg\ m^{-3}$ ممکن است برای رشد گیاه در یک خاک ریز بافت محدودکننده باشد اما در یک خاک درشت بافت محدودیتی برای رشد ریشه گیاه ایجاد نکند (دکستر و همکاران، 2007). از این رو از کمّیت دیگری به نام چگالی ظاهری نسبی (RBD[3]) که مستقل از نوع (بافت) خاک بوده و مقادیر آن مستقیماً قابل مقایسه در تمامی خاک‌ها است برای بیان درجه فشردگی خاک استفاده می‌شود. RBD برابر نسبت BD طبیعی به چگالی ظاهری مرجع (BD_{ref}[4]) می‌باشد (هکنسون، 1990). تعیین مقدار RBD سریع‌تر و آسان‌تر از دیگر شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک می‌باشد. این شاخص ارتباطی قوی با شاخص‌هایی مانند LLWR و IWC (عسگرزاده و همکاران، 2010، عسگرزاده و مصدقی، 1392) دارد.

عمل تنفس در ریشه‌ها انرژی لازم برای فرایند-های متابولیکی را فراهم می‌کند. لتی (1967) گزارش داد، رشد گیاهان تا زمانی که شدت پخشیدگی اکسیژن (ODR[5]) اندازه‌گیری‌شده به وسیله تکنیک الکترود پلاتین، بیش‌تر از $0/4\ \mu g\ cm^{-2}\ min^{-1}$ است، کاهش نمی‌یابد اما رشد بیش‌تر گیاهان در مقادیر ODR کم‌تر از $\mu g\ cm^{-2}\ min^{-1}$ 0/2 دچار کاهش شدید می‌شوند. پخشیدگی اکسیژن خیلی حساس به مقدار آب خاک است؛ در حالت اشباع تقریباً برابر صفر بوده و با کاهش میزان آب خاک یا افزایش تخلخل تهویه‌ای یا تخلخل هوایر (AFP[6]) افزایش افزایش می‌یابد (وو و همکاران، 2003). از این رو خاک-هایی که بعد از خروج آب ثقلی، تخلخل هوایر بیشتری داشته باشند شرایط تهویه مناسب‌تری برای ریشه گیاه فراهم می‌کنند. خلیفه‌زاده و همکاران (2020) نتیجه گرفتند که مقادیر AFP کمتر از $0/128\ cm^3\ cm^{-3}$ برای رشد گیاه گندم شدیداً محدودکننده است. هرچند افزایش مقدار AFP خاک شرایط تهویه را برای گیاه بهتر می‌کند اما خروج بیش از حد آب نیز مطلوب گیاه نبوده و با افزایش بیش از حد AFP کمبود آب باعث کاهش رشد گیاه

می‌شود. گنجایش زراعی نسبی (RFC[7]) که نسبت مقدار آب خاک در FC به مقدار رطوبت اشباع خاک (θ_s) می‌باشد (رینولدز و همکاران، 2008)، توانایی خاک برای ذخیره‌سازی آب و هوا را نشان می‌دهد. اولنس و همکاران (1998) اظهار کردند که تعادل بهینه بین مقدار آب و هوای خاک زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار RFC خاک بین 0/6 الی 0/7 باشد. در مقادیر RFC بزرگ‌تر از 0/7 در اثر تهویهٔ ناکافی و در مقادیر RFC کمتر از 0/6 در اثر کمبود آب فعالیت میکروبی و رشد گیاه کاهش می‌یابد.

وجه مشترک تمام شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک ذکرشده مرتبط بودن آن‌ها با توزیع اندازه منافذ خاک است. ازاین‌رو هر عاملی که بتواند توزیع اندازه منافذ خاک را تغییر دهد، بر این شاخص‌ها تأثیرگذار است. عملیات خاک‌ورزی و نوع کشت می‌تواند بر کیفیت فیزیکی خاک‌ها مؤثر باشد. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر عملیات خاکورزی مرسوم و کشت گیاه گندم و آفتابگردان بر لایه‌های خاک سطحی و زیرسطحی بر اساس مجموع شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک است.

مواد و روش‌ها

محل مطالعه، اراضی روستای باشلان بوشلو با عرض جغرافیایی "37.99 ،'25 ،°37 شمالی و طول جغرافیایی "9.02 ،'6 ،°45 شرقی واقع در قسمت مرکزی استان آذربایجان غربی و از توابع شهرستان ارومیه بود. این اراضی در دهه‌های گذشته تحت خاک‌ورزی رایج با ماشین‌های کشاورزی سنگین بودند و کشت غالب گندم و آفتابگردان بوده است.

نمونه های خاک دست خورده از 15 مزرعه (مکان) گندم و 15 مزرعه آفتاب گردان هر کدام از دو لایه سطحی (7-12 cm) و زیر سطحی (30-35 cm) و

[1] Integral water capacity
[2] Bulk density
[3] Relative bulk density
[4] Reference bulk density
[5] Oxygen diffusion rate
[6] Air-filled porosity
[7] Relative field capacity

در مجموع از 60 مکان جمع آوری گردید. نمونه های خاک دست نخورده با استوانه هایی به قطر داخلی 5/32 و ارتفاع 4/50 سانتی متر از همان عمق‌ها به تعداد 10 نمونه از هرلایه (در مجموع 600 نمونه) تهیه شد .

شکل 1- موقعیت نقاط نمونه‌برداری از زمین‌های زراعی واقع در شمال شهرستان ارومیه

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی

بافت خاک به روش هیدرومتر (جی و اور، 2002)، هدایت الکتریکی با هدایت سنج الکتریکی در عصاره گل اشباع (رودس، 1996) و چگالی ظاهری از میانگین بدست‌آمده از تقسیم جرم خشک نمونه‌های دست‌نخورده بر حجم آنها (بلیک و هارتج، 1986) اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری منحنی مشخصه رطوبتی

برای اندازه‌گیری منحنی مشخصه رطوبتی خاک، از 11 مکش ماتریک (h) استفاده شد. مقادیر کم h (5، 10، 20 و 30 hPa) توسط جعبه شن و مقادیر زیاد h (120، 330، 1000، 2000، 8000 و 15000 hPa) توسط دستگاه صفحه فشاری بدست آمد. برای رطوبت اشباع یعنی مکش ماتریک صفر از میانگین تخلخل خاک استفاده گردید. مدل منحنی مشخصه رطوبتی ون‌گنوختن با نرم‌افزار Solver بر داده‌های اندازه‌گیری‌شده نگهداشت آب خاک برازش داده شد. معادله ون‌گنوختن (1980) به‌صورت زیر است:

(1)

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)\left[1+(\alpha h)^n\right]^{\left[\frac{1}{n}-1\right]}$$

در این رابطه، $\theta(h)$، رطوبت حجمی خاک برحسب $cm^3\ cm^{-3}$، h مکش ماتریک خاک برحسب hPa، θ_r و θ_s به ترتیب رطوبت باقیمانده و اشباع خاک برحسب $cm^3\ cm^{-3}$ و α مرتبط با عکس مکش در نقطه ورود هوا برحسب hPa^{-1} و n شاخص توزیع اندازه منافذ خاک می‌باشند.

اندازه‌گیری مقاومت فروروی و برازش منحنی مقاومت فروروی خاک

نمونه‌های خاک دست‌نخورده به مقادیر مختلف رطوبتی رسانده شدند. برای همگن‌سازی رطوبت، این نمونه‌های خاک به مدت 2 هفته درون کیسه‌های نایلونی قرار گرفتند. پس از تعادل رطوبتی نمونه‌ها، مقاومت فروروی (Q) آن‌ها توسط ریزفروسنج تمام اتوماتیک (ساخت شرکت آذر خاک آب ارومیه) اندازه‌گیری شد. زاویه مخروط سوزن ریزفروسنج 30 درجه و قطر قاعده آن 3 mm بود که با سرعت فروروی برابر $5\ mm\ min^{-1}$ در 3 تکرار با آرایش رأس یک مثلث بر نمونه‌ها وارد شد. مقاومت فروری هر نمونه در هر رطوبت، از میانگین هندسی 900 مقدار قرائت شده به دست آمد.

منحنی مشخصه مربوط به مقاومت فروروی در برابر رطوبت خاک (با 5 نقطه) با استفاده از مدل تنظیم‌شده ون‌گنوختن (1980) مدل‌سازی شد (عسگرزاده و همکاران، 2014):

(2)

$$Q = Q_{wet} + \left(Q_{dry} - Q_{wet}\right)\left[1+\left(\alpha_{Q\theta}\theta\right)^{n_{Q\theta}}\right]^{\left[\frac{1}{n_{Q\theta}}-1\right]}$$

در این رابطه، Q مقاومت فروروی خاک برحسب MPa، θ رطوبت حجمی خاک بر حسب $cm^3\ cm^{-3}$، و Q_{wet}، Q_{dry}، $\alpha_{Q\theta}$ و $n_{Q\theta}$ پارامترهای برازش مدل، به ترتیب مرتبط با کم‌ترین و بیش‌ترین مقاومت فروروی پیش‌بینی‌شده خاک بر حسب MPa، و پارامترهای مرتبط

با نقطه عطف و شیب تابع مقاومت فروروی در برابر رطوبت است.

محاسبه شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک

برای محاسبه‌ی شاخص کمی کیفیت فیزیکی خاک، S، از مقادیر پارامترهای مدل ون‌گنوختن برازش داده شده بر داده‌های نگه‌داشت آب خاک و چگالی ظاهری خاک (دکستر، 2004a) به صورت زیر استفاده شد:

(3)

$$S = -n(\frac{\theta_s - \theta_r}{BD})\left[\frac{2n-1}{n-1}\right]^{\left[\frac{1}{n}-2\right]}$$

در این رابطه θ_s و θ_r به ترتیب رطوبت حجمی اشباع و باقی‌مانده خاک بر حسب $cm^3\ cm^{-3}$، n شاخص توزیع اندازه منافذ خاک و BD چگالی ظاهری خاک بر حسب $Mg\ m^{-3}$ می‌باشد. مقادیر S همیشه منفی است، از این رو هنگام استفاده، مقادیر قدر مطلق آن بکار می‌روند.

آب قابل‌دسترس برای گیاه

آب قابل دسترس گیاه (PAW) از تفاضل مقدار آب خاک در ظرفیت زراعی (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) به صورت زیر محاسبه شد:

(4)

$$PAW = FC - PWP$$

در این رابطه FC و PWP به ترتیب مقدار رطوبت خاک در مکش ماتریک 100 و 15000 hPa بر حسب $cm^3\ cm^{-3}$، در نظر گرفته شدند.

دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت

ابتدا حد بالایی (UL) شاخص LLWR که میزان رطوبت در گنجایش زراعی (مکش ماتریک برابر 100 hPa) یا تخلخل تهویه‌ای 10 درصد، هر کدام که کم‌تر باشد، با استفاده از تابع برازش داده شده ون‌گنوختن (رابطه 1) تعیین شد. سپس حد پایینی آن (LL) که میزان رطوبت نقطه پژمردگی دائم (مکش ماتریک برابر 15000 hPa) یا مقاومت فروروی 2 MPa هر کدام که بیش‌تر باشد، به ترتیب با استفاده از توابع برازش داده شده ون‌گنوختن (رابطه 1) و تنظیم‌شده ون‌گنوختن (رابطه 2) تعیین شد. در نهایت مقدار LLWR با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

(5)

$$LLWR = UL - LL$$

در این رابطه UL، LL و LLWR بر حسب $cm^3\ cm^{-3}$ می‌باشند. مقادیر منفی برای LLWR بی‌معنی بوده و در صورت بدست آمدن مقدار منفی مقدار آن صفر درنظر گرفته می‌شود.

گنجایش آب انتگرالی

برای محاسبه گنجایش آب انتگرالی (IWC) از رابطه زیر استفاده شد:

$$IWC = \int_0^{\infty}\left(\prod_{i=1}^{n}\omega_i(h)\right)C(h)dh \qquad (6)$$

در این رابطه IWC بر حسب $cm^3\ cm^{-3}$، $C(h)$ = $|d\theta/dh|$، گنجایش ویژه رطوبتی (مشتق یک تابع منحنی مشخصه رطوبتی خاک) برحسب hPa^{-1} و $\omega_i(h)$ توابع وزنی برای انواع محدودیت‌های فیزیکی از i تا n، h مکش ماتریک بر حسب hPa و Π نشان‌دهنده این است که توابع وزنی ضرب‌پذیرند. توابع وزنی استفاده شده توسط گرونولت و همکاران (2001) شامل هدایت هیدرولیکی زیاد، تخلخل تهویه‌ای، مقاومت مکانیکی زیاد و هدایت هیدرولیکی کم، می‌باشند. این توابع در دامنه صفر تا 1 قرار می‌گیرند. کاظمی و همکاران (2021) نشان دادند که استفاده از توابع وزنی منطبق بر پاسخ گیاه می‌تواند IWC را به شاخصی بهتر برای محاسبه آب قابل استفاده تبدیل کند.

چگالی ظاهری نسبی

مقدار چگالی ظاهری (BD) خاک از میانگین چگالی ظاهری نمونه‌های دست‌نخورده (3 نمونه برای هرخاک) به دست آمد. برای محاسبه BD_{ref} از رابطه جونز (1983) (دکستر، 2004a) به صورت زیر استفاده شد:

(7)

$$BD_{ref} = 1/985 - 0/00857\ \%Clay$$

در این رابطه BD_{ref} برحسب $Mg\ m^{-3}$ و رس اندازه‌گیری شده برای هر خاک برحسب درصد می‌باشند. درنهایت RBD از رابطه زیر محاسبه شد:

(8)

$$RBD = BD/BD_{ref}$$

تخلخل تهویه‌ای یا تخلخل هواپر

مقدار تخلخل تهویه‌ای یا تخلخل هواپر (AFP) از رابطه زیر بدست آمد:

$$AFP = \theta_s - FC \qquad (9)$$

در این رابطه FC، θ_s و AFP برحسب $cm^3\ cm^{-3}$ می‌باشند. مقدار θ_s و FC با استفاده از منحنی رطوبتی برازش داده شده برای هر خاک و به ترتیب برای مکش ماتریک صفر و 100 hPa بدست آمد.

گنجایش زراعی نسبی

مقدار گنجایش زراعی نسبی (RFC) از رابطه زیر (رینولدز و همکاران، 2008) بدست آمد:

$$RFC = \frac{FC}{\theta_s} \qquad (10)$$

تجزیه و تحلیل آماری

به منظور تجزیه و تحلیل نتایج، ابتدا بانک اطلاعاتی داده‌های به دست آمده در نرم افزار Microsoft Excel تهیه و برای مقایسه‌های آماری و بررسی همبستگی بین شاخص‌ها، نرم‌افزار SPSS 16 مورد استفاده قرار گرفت. همچنین از روش تجزیه به مولفه‌های اصلی برای تعیین نقش شاخص‌های کیفیت خاک در تفکیک نمونه‌ها استفاده شد.

نتایج و بحث

آمار توصیفی

مقادیر حداکثر، حداقل و میانگین درصد رس، سیلت و شن و شاخص کیفیت فیزیکی خاک شامل RBD، RFC، S، AFP، PAW، LLWR و IWC مربوط به خاک‌های سطحی و زیرسطحی کشت گندم و آفتابگردان در جدول 1 نشان داده شده است. خاک‌های سطحی و زیرسطحی مزارع زیر کشت گندم و آفتابگردان اکثراً سنگین بافت بودند به طوری که دامنه تغییرات مقدار رس در خاک‌های منطقه از حداقل 25/95 تا حداکثر 65/28 درصد متغیر بود. بیشترین مقدار S، 0/081 و کمترین آن 0/013 بود که نشان دهنده وجود دامنه وسیعی از کیفیت فیزیکی در خاک‌های مورد مطالعه است. دکستر (2004c) بر اساس مقادیر S، $S \geq 0/050$ را در گروه خاک‌های با کیفیت فیزیکی خیلی خوب و $S < 0/020$ را در گروه خاک‌های با کیفیت فیزیکی خیلی ضعیف طبقه بندی کرد. مقادیر دیگر شاخص‌های فیزیکی خاک نیز موید تغییرات قابل توجه کیفیت خاک‌های مورد مطالعه است. برای نمونه وجود مقادیر IWC برابر صفر نشان‌دهنده‌ی کیفیت فیزیکی بسیار بد و مقدار 0/24 $cm^3\ cm^{-3}$ (به‌عنوان حداکثر مقدار اندازه‌گیری شده) نشان‌دهنده کیفیت فیزیکی بسیار خوب در خاک‌های مورد مطالعه بود. خلیفه‌زاده و همکاران (2020) با بررسی تأثیر مقدار IWC بر رشد گندم نتیجه گرفتند که مقادیر IWC کمتر از 0/104 $cm^3\ cm^{-3}$ برای رشد گیاه گندم شدیداً محدود‌کننده است. در حالیکه با افزایش مقدار IWC خاک به مقادیر بیشتر از 0/136 $cm^3\ cm^{-3}$، محدودیت فیزیکی کمتری برای رشد گیاه گندم وجود دارد.

ماتریس همبستگی ویژگی‌های بافتی و شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک در جدول 2 نشان داده شده است. RBD، IWC و S از شاخص‌هایی بودند که بیشترین همبستگی را با سایر ویژگی‌های بافتی و شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک ایجاد کردند.

جدول 1- آمار توصیفی شاخص‌های کیفیت فیزیکی برای 60 خاک مورد مطالعه#

آماره	خاک	نوع گیاه	رس	سیلت	شن	RBD	RFC	S	AFP	PAW	LLWR	IWC
			(%)			-			$cm^3.cm^{-3}$			
حداکثر	سطحی	آفتابگردان	49/21	46/92	36/09	0/93	0/76	0/081	0/27	0/16	0/12	0/19
		گندم	51/64	51/93	23/90	0/89	0/91	0/065	0/20	0/29	0/25	0/24
	زیرسطحی	آفتابگردان	65/28	45/95	41/19	1/02	0/85	0/036	0/14	0/16	0/12	0/10
		گندم	54/27	58/58	25/95	1/05	0/98	0/053	0/14	0/25	0/21	0/18
حداقل	سطحی	آفتابگردان	31/03	23/84	7/47	0/77	0/52	0/022	0/11	0/07	0/03	0/03
		گندم	26/54	39/90	5/23	0/65	0/66	0/036	0/05	0/19	0/08	0/08
	زیرسطحی	آفتابگردان	25/95	21/28	7/36	0/85	0/70	0/013	0/06	0/06	0/00	0/00
		گندم	26/55	37/41	5/47	0/70	0/75	0/017	0/01	0/11	0/00	0/00
میانگین	سطحی	آفتابگردان	43/10	41/41	15/50	0/85	0/68	0/043	0/16	0/13	0/08	0/09
		گندم	40/03	45/08	14/89	0/79	0/82	0/048	0/10	0/23	0/17	0/16
	زیرسطحی	آفتابگردان	43/91	38/64	17/45	0/94	0/76	0/027	0/11	0/12	0/05	0/03
		گندم	41/81	44/59	13/61	0/93	0/91	0/031	0/04	0/19	0/05	0/04
انحراف معیار	سطحی	آفتابگردان	5/77	6/14	8/93	0/05	0/07	0/016	0/05	0/03	0/03	0/04
		گندم	8/57	3/42	7/06	0/06	0/07	0/008	0/04	0/02	0/05	0/05
	زیرسطحی	آفتابگردان	9/03	7/27	10/22	0/05	0/04	0/007	0/02	0/03	0/03	0/03
		گندم	9/28	4/93	6/61	0/09	0/06	0/010	0/03	0/05	0/07	0/06
چولگی	سطحی	آفتابگردان	-0/86	-2/02	1/36	-0/29	-1/15	0/85	1/40	-1/22	-0/28	0/57
		گندم	-0/34	0/91	-0/04	-1/08	-0/94	0/98	1/19	0/71	-0/14	0/00
	زیرسطحی	آفتابگردان	0/26	-1/07	1/18	-0/17	0/79	-0/51	-0/46	-0/19	0/73	1/30
		گندم	-0/41	1/57	0/59	-1/03	-1/29	0/60	1/79	-0/12	1/36	1/66

کشیدگی	سطحی	آفتابگردان	-0/30	4/23	0/68	-0/66	0/74	0/95	1/17	1/17	-0/31	0/43
		گندم	-1/47	0/09	-1/90	2/08	0/59	0/10	1/91	1/15	-0/76	-1/09
	زیرسطحی	آفتابگردان	1/75	0/64	0/60	-0/08	0/41	-0/24	-0/27	-0/11	1/22	1/82
		گندم	-1/36	4/08	-0/71	1/20	29/4	-0/07	-0/91	4/60	0/94	1/93

#RBD؛ چگالی ظاهری نسبی، RFC؛ رطوبت ظرفیت زراعی نسبی، S؛ شاخص کیفیت فیزیکی خاک، AFP، تخلخل هواپر، PAW؛ آب قابل استفاده گیاه، LLWR، دامنه آب با حداقل محدودیت، IWC، گنجایش آب انتگرالی

جدول 2- ماتریس همبستگی ویژگی‌های بافتی و شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک#

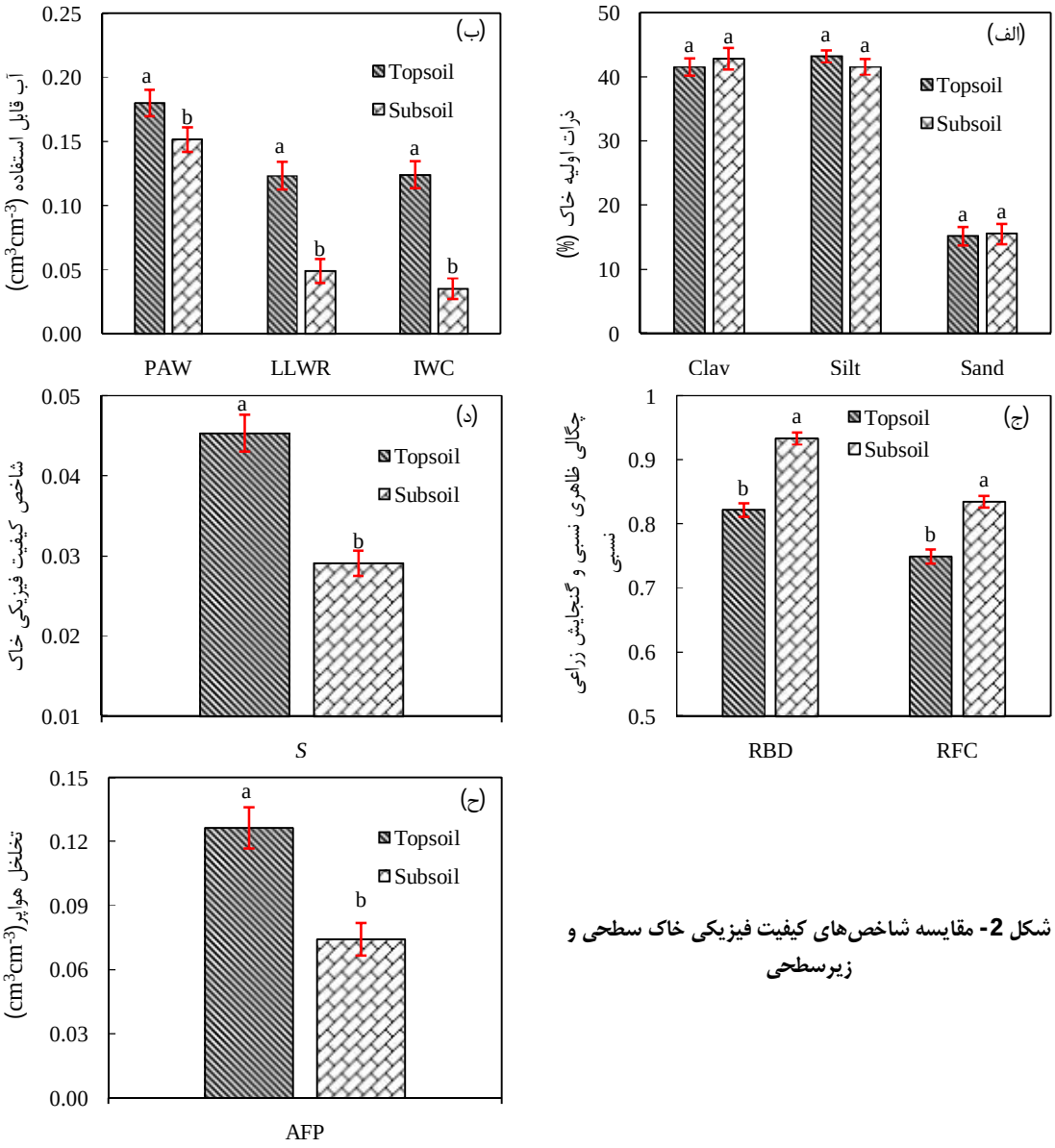
	RBD	RFC	S	AFP	PAW	LLWR	IWC	Clay	Silt	Sand
RBD	1									
RFC	0/325*	1								
S	-0/725**	-0/436**	1							
AFP	-0/425**	-0/978**	0/566**	1						
PAW	-0/481**	0/421**	0/460**	-0/288*	1					
LLWR	-0/845**	-0/126	0/615**	0/224	0/635**	1				
IWC	-0/869**	-0/335**	0/755**	0/456**	0/522**	0/933**	1			
Clay	0/467**	-0/016	-0/180	0/038	-0/308*	-0/358*	-0/261*	1		
Silt	-0/537**	0/165	0/257*	-0/058	0/438**	0/397**	0/369**	-0/365**	1	
Sand	-0/068	-0/106	-0/011	0/005	-0/016	0/063	-0/012	-0/727**	-0/374**	1

#RBD؛ چگالی ظاهری نسبی، RFC؛ رطوبت ظرفیت زراعی نسبی، S؛ شاخص کیفیت فیزیکی خاک، AFP، تخلخل هواپر، PAW؛ آب قابل استفاده گیاه، LLWR، دامنه آب با حداقل محدودیت، IWC، گنجایش آب انتگرالی

**؛ همبستگی معنی‌دار با سطح اطمینان 99 درصد، *؛ همبستگی معنی دار با سطح اطمینان 95 درصد

مقایسه خاک‌های سطحی و زیرسطحی

مقایسه میانگین مقادیر رس، سیلت و شن و شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک‌های سطحی و زیرسطحی بدون درنظر گرفتن نوع کشت در شکل 2 نشان داده شده است. تفاوت معنی‌داری (سطح اطمینان 95%) بین مقادیر شن و رس خاک‌های مزارع گندم و آفتابگردان وجود نداشت (شکل الف 2). با وجود عدم اختلاف معنی‌دار ویژگی‌های بافتی خاک، تمامی شاخص‌های ساختمانی خاک‌های سطحی تفاوت معنی‌داری با شاخص‌های متناظر در خاک‌های زیرسطحی داشتند (شکل 2). علت اصلی این تفاوت زیاد شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک‌های سطحی و زیرسطحی، خاکورزی سنتی هر ساله خاک‌های سطحی است. ورود ماشین‌های کشاورزی سنگین برای عملیات خاک‌ورزی در حین مرحله کاشت و تا حدودی مرحله داشت، اغلب با سست شدن لایه‌ی سطحی خاک و فشرده‌شدن بیشتر خاک‌های زیرسطحی همراه است. با افزایش وزن ماشین‌های کشاورزی فشردگی خاک‌های زیرسطحی بیشتر نمود پیدا می‌کند (جونز و همکاران، 2003). ماشین‌های کشاورزی مورد استفاده کنونی می‌توانند خاک را تا عمق 90 سانتی‌متری متراکم ساخته و در نتیجه کیفیت فیزیکی خاک را به شدت کاهش دهند (بریسو و همکاران، 2012). هرچند میانگین تمامی شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک‌های زیرسطحی متفاوت از خاک‌های سطحی بود اما مقدار تفاوت‌ها در بعضی از شاخص‌ها خیلی بیشتر بود. برای نمونه، میانگین مقدار شاخص IWC در خاک‌های سطحی ($0/124\ cm^3\ cm^{-3}$)، 3/35 برابر خاک‌های زیرسطحی ($0/035\ cm^3\ cm^{-3}$) بود. مقدار LLWR نیز تغییرات قابل توجهی نشان داده و نسبت میانگین LLWR در خاک‌های سطحی به خاک‌های زیرسطحی برابر با 2/51 بود (شکل ج 2).

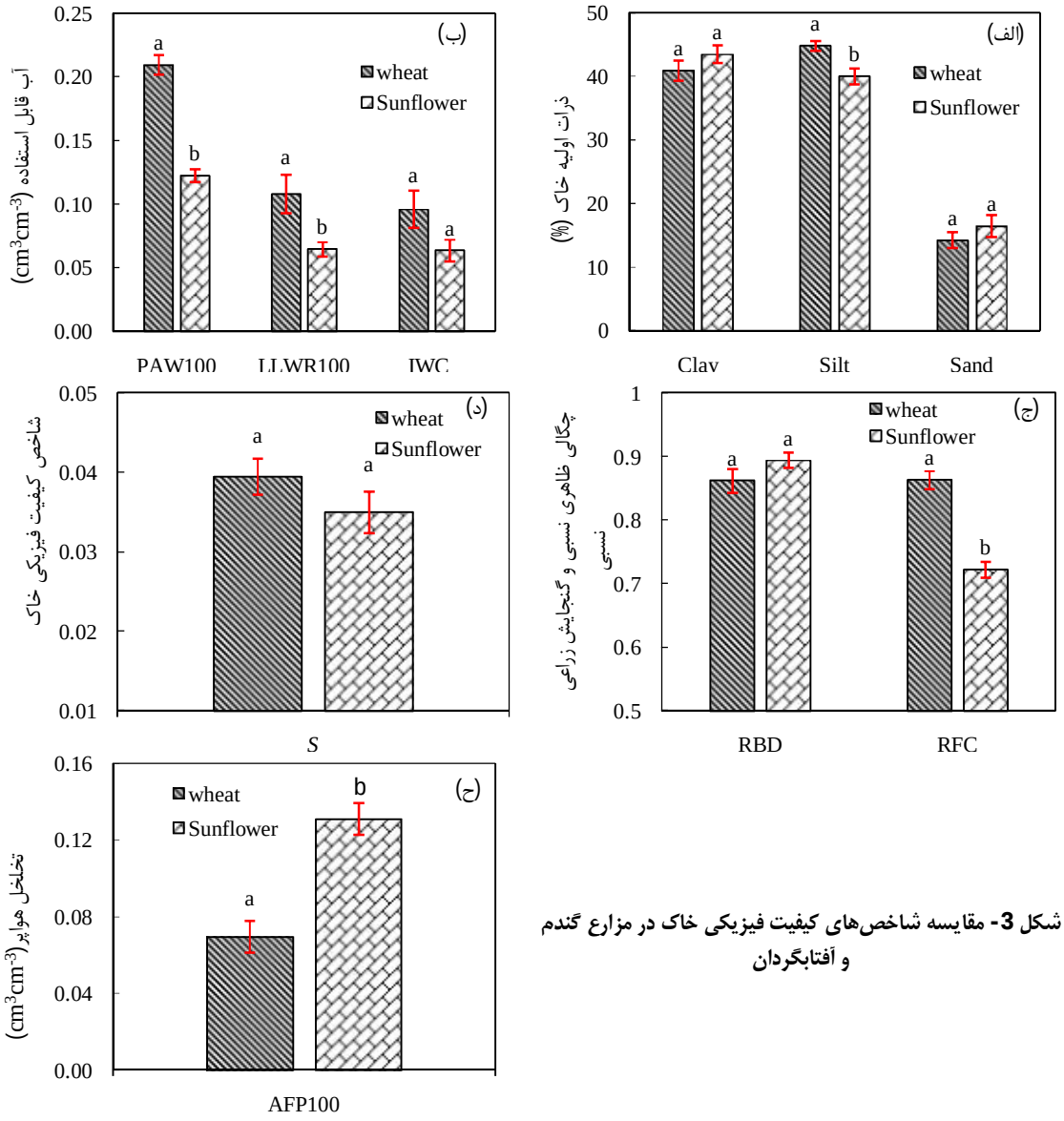


شکل 2- مقایسه شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک سطحی و زیرسطحی

مقایسه مزارع گندم و آفتابگردان

مقایسه میانگین مقادیر رس، سیلت و شن و شاخص کیفیت فیزیکی خاک‌های مزارع گندم و آفتابگردان در شکل 3 نشان داده شده است. در مجموع با توجه به یکنواختی دشت مورد مطالعه و نزدیکی مزارع گندم و آفتابگردان، مقدار ذرات اولیه خاک تفاوت چندانی با یکدیگر نداشتند. هرچند از میان شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک، میانگین RBD، IWC و S مزارع گندم و آفتابگردان تفاوت معنی‌داری در سطح اطمینان 95% نداشتند با این حال میانگین RFC، PAW، LLWR خاک-های مزارع گندم به طور معنی‌داری بیشتر از مقادیر متناظر آن‌ها در خاک‌های آفتابگردان بود که نشان دهنده‌ی تأثیر مطلوب کشت گندم در مقایسه با آفتابگردان بر کیفیت فیزیکی خاک باشد. میانگین مقدار LLWR مزارع گندم ($0/104\ cm^3\ cm^{-3}$) 69% بیشتر از میانگین مقدار LLWR مزارع آفتابگردان ($0/064\ cm^3\ cm^{-3}$) بود (شکل 3ج). البته بایستی توجه داشت که تغییر خیلی زیاد شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک در مدت زمان کوتاه کشت یک محصول را نیز نباید انتظار داشت. این امر در مقایسه شکل‌های 2 و 3 نیز به وضوح دریافت می‌شود به طوری که خاک‌های سطحی و زیرسطحی که در طول سالیان متمادی تحت خاک‌ورزی سنتی قرار گرفته‌اند تقریباً از نظر کلیه شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک با یکدیگر

اختلاف معنی‌داری نشان می‌دهند در حالی که وقتی مبنای مقایسه نوع کشت قرار می‌گیرد (شکل 3) اختلاف شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک به دلیل تغییرات سالانه نوع کشت کمتر می‌شود.



شکل 3- مقایسه شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک در مزارع گندم و آفتابگردان

تجزیه به مولفه‌های اصلی و گروه‌بندی خاک‌ها

برای بررسی جامع‌تر تغییرات شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک در خاک‌های سطحی و زیرسطحی زیر کشت گندم و آفتابگردان از روش تجزیه به مولفه‌های اصلی استفاده شد. داده‌های مربوط به شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک شامل RBD، RFC، *S*، AFP، PAW، LLWR و IWC در تمامی خاک‌ها با استفاده از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که دو مولفه‌ی اصلی اول و دوم (PC1 و PC2) دارای مقادیر ویژه بیش از یک بوده و مجموعاً 89/4 درصد (به ترتیب 58/54 و 30/82 درصد برای مولفه‌ی اصلی اول و دوم) از تغییرات موجود در نمونه‌ها را تبیین می‌نمایند. به منظور درک دقیق‌تر اهمیت هریک از شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک، وزن‌های ایجاد شده در روش تجزیه به مولفه‌های اصلی به روش واریماکس (چروبین و همکاران، 2016)، دوران یافته و برای هر شاخص در جدول 3 ارائه شده است. از بین شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک، IWC و LLWR در مولفه‌ی اول و

AFP و RFC در مولفه‌ی دوم دارای بیشترین وزن بودند که نشان دهنده‌ی اهمیت این شاخص‌ها در تفکیک نمونه-های خاک از نظر کیفیت فیزیکی می‌باشد. اهمیت این شاخص‌ها و به ویژه دو شاخص IWC و LLWR در تفکیک نمونه‌های خاک سطحی و زیرسطحی و تا حدودی تفکیک مزارع تحت کشت گندم و آفتابگردان موید نتایج ارائه شده در شکل‌ها 2ب و 3ب است.

جدول 3- ماتریس وزن‌های دوران یافته به روش واریماکس برای شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک[#]

شاخص	مولفه اصلی اول (PC1)	مولفه اصلی دوم (PC2)
RBD	-0/894	0/239
RFC	-0/115	0/982
S	0/785	-0/378
AFP	0/251	-0/957
PAW	0/754	0/546
LLWR	0/942	-0/006
IWC	0/934	-0/239
مقادیر ویژه	4/098	2/158
درصد واریانس	58/543	30/826
درصد واریانس تجمعی	58/543	89/369

[#]RBD؛ چگالی ظاهری نسبی، RFC؛ رطوبت ظرفیت زراعی نسبی، S؛ شاخص کیفیت فیزیکی خاک، AFP، تخلخل هواپر، PAW؛ آب قابل استفاده گیاه، LLWR، دامنه آب با حداقل محدودیت، IWC، گنجایش آب انتگرالی

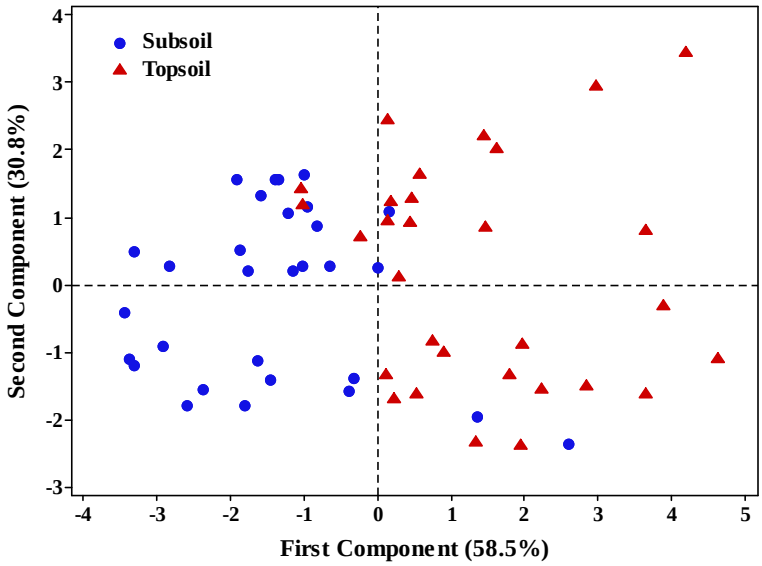
[*] سنجه آزمون کایسر-میر-اولکین (KMO) برای کفایت نمونه در تجزیه به مولفه‌های اصلی برابر با 0/634 بود.

به منظور بررسی و مقایسه‌ی نمونه‌های خاک، توزیع آن‌ها نسبت به دو مولفه‌ی اول و دوم ترسیم شده (شکل‌های 4 و 5) و در دو حالت گروه‌بندی شد. در حالت اول (شکل 4) نمونه‌های خاک صرف‌نظر از نوع کشت براساس خاک سطحی و زیرسطحی بودن تفکیک شدند و در حالت دوم (شکل 5) نمونه‌ها صرف‌نظر از سطحی و زیرسطحی بودن، براساس نوع کشت تفکیک شدند.

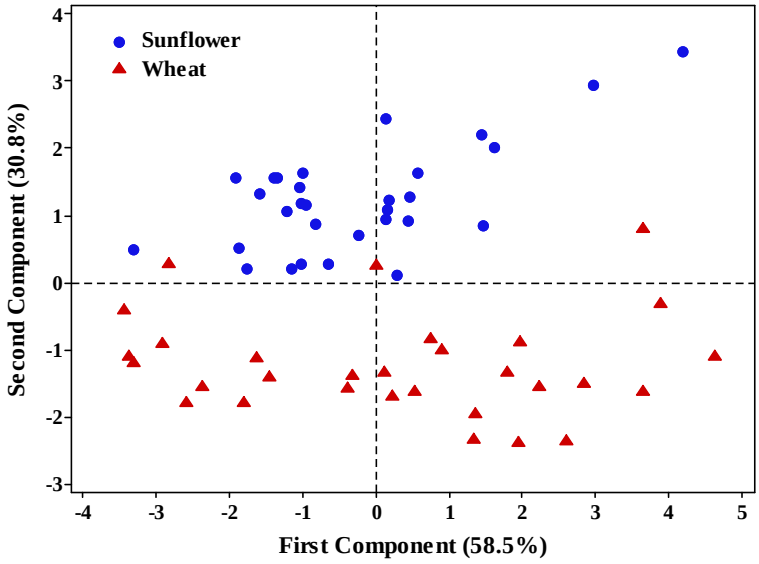
شکل 4 نشان می‌دهد که بر اساس مجموع شاخص‌های کیفیت فیزیکی، خاک‌های سطحی و زیرسطحی به‌روشنی قابل‌تفکیک از یکدیگر هستند و به‌عبارت‌دیگر دارای کیفیت فیزیکی متفاوتی بوده و در دو گروه مجزا از یکدیگر قرار دارند. این امر نتایج مقایسه میانگین شاخص‌های فیزیکی در خاک‌های سطحی و زیرسطحی (شکل 2) را نیز تائید می‌کند. از آنجایی که پیامدهای منفی تراکم خاک زیرسطحی حداقل تا 14 سال ماندگار بوده و می‌تواند فرایندهای اساسی خاک را تحت تاثیر قرار دهد (اتانا و همکاران، 2013)، ارائه روش‌هایی برای تشخیص میزان آسیب‌دیدگی خاک‌های زیرسطحی (زینک و همکاران، 2011) و مکانیسم‌های بهبود شرایط فیزیکی آنها ضروری است. این نتایج آسیب‌پذیری خاک زیرسطحی در اثر فرآیندهای مستمر خاک‌ورزی سنتی را به وضوح نشان داده و تأکید می‌نماید که در طول سال‌ها کشت و کار مداوم، خاک‌های زیرسطحی در منطقه از نظر کیفیت فیزیکی خاک دچار تخریب شده‌اند.

در مقایسه بین مزارع گندم و افتابگردان نیز، تفکیک این مزارع در دو گروه جداگانه با در نظر گرفتن اثر مجموع شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک قابل مشاهده است (شکل 5). این امر نشان دهنده تأثیر نوع کشت بر کیفیت فیزیکی خاک است. مقایسه شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک به تفکیک در مزارع گندم و آفتابگردان مؤید برتری کیفیت فیزیکی مزارع گندم در مقایسه با مزارع آفتابگردان است. تردد بیشتر ماشین‌آلات کشاورزی در طول فرآیند کاشت، داشت و برداشت آفتابگردان در مقایسه با گندم می‌تواند یکی از دلایل این امر باشد. در رابطه با گیاه گندم تردد ماشین آلات محدود به مرحله کاشت و برداشت است در حالی که در کشت گیاه آفتابگردان علاوه بر مراحل فوق در مرحله داشت نیز ماشین آلات کشاورزی برای اهداف مختلف از جمله وجین علف‌های هرز، نهرکنی بین ردیف‌های کشت و سمپاشی و کودپاشی محصول وارد مزرعه شده و در نتیجه می‌توانند سبب ایجاد فشردگی و در نتیجه تخریب کیفیت فیزیکی خاک شوند. تاثیر روش‌های سنتی خاک‌ورزی، نظیر آنچه در منطقه انجام می‌شود، بر تخریب کیفیت

فیزیکی خاک و کاهش عملکرد محصول در مزارع آفتابگردان توسط پژوهشگران دیگر نیز مورد تأکید قرار گرفته است (کاساب و جوشکون، 2006؛ لنگرودی 2015). از سوی دیگر سیستم افشان ریشه گندم و کشت متراکم آن می‌تواند با گسترش ریشه‌ها در ماتریس خاک سبب بهبود فرایند خاکدانه‌سازی و در نتیجه افزایش کیفیت فیزیکی خاک نسبت به کشت افتابگردان با تراکم ریشه کمتر شود.



شکل 4- توزیع نمونه‌های خاک سطحی و زیرسطحی حول دو مولفه اصلی اول



شکل 5- توزیع نمونه‌های خاک مزارع گندم و آفتابگردان حول دو مولفه اصلی اول

نتیجه‌گیری

از روش تجزیه به مولفه‌های اصلی و مقایسه میانگین RBD، RFC، S، AFP، PAW، LLWR و IWC، به عنوان شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک، برای مقایسه و ارزیابی خاک‌های سطحی و زیرسطحی مزارع گندم و آفتابگردان دشت ارومیه استفاده شد. از بین شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک، IWC و LLWR در مولفه‌ی اول و AFP و RFC در مولفه‌ی دوم دارای بیشترین وزن بودند که نشان دهنده‌ی اهمیت این شاخص‌ها در تفکیک نمونه-های خاک می‌باشد. به دلیل خاک‌ورزی سنتی با ماشین-های کشاورزی سنگین وزن (به ویژه در شرایط رطوبت زیاد خاک) در دهه‌های گذشته، خاک‌های زیرسطحی کیفیت فیزیکی بسیار پایینی داشتند. از آنجایی که پیامدهای منفی تراکم خاک زیرسطحی ماندگاری زیادی دارد، ارائه روش‌هایی برای تشخیص میزان آسیب‌دیدگی و مکانیسم‌های بهبود شرایط فیزیکی آنها ضروری است. ارزیابی شاخص‌های SPQ مزارع گندم و آفتابگردان، با استفاده از مقایسه میانگین و PCA، نشان داد که مزارع گندم نسبت به مزارع آفتابگردان کیفیت فیزیکی خاک بهتری داشتند. تردد بیشتر ماشین‌آلات کشاورزی در طول فرآیند کاشت، داشت و برداشت در مزارع آفتابگردان در مقایسه با گندم می‌تواند یکی از دلایل این امر باشد. نوع سیستم گسترده‌تر ریشه گندم و کشت متراکم آن می‌تواند با گسترش ریشه‌ها در ماتریس خاک سبب بهبود فرایند خاکدانه‌سازی و در نتیجه افزایش کیفیت فیزیکی خاک شود. بنابراین پیشنهاد می‌شود سیستم‌های خاک‌ورزی در منطقه اصلاح شده و اثر کشت و کار بر SPQ تحت پایش پیوسته قرار گیرد.

فهرست منابع:

1. عسگرزاده، ح. و مصدقی، م.ر. 1392. پیشنهاد و ارزیابی یک روش آزمایشگاهی برای تعیین سریع کمیت‌های مختلف آب قابل استفاده خاک برای گیاه. تحقیقات کاربردی خاک. جلد .1 شماره 1: 73-56.
2. Arvidsson, J., and I. Håkansson. 1996. Do effects of soil compaction persist after ploughing? Results from 21 long-term field experiments in Sweden. Soil and Tillage Research, 39, 175–197.
3. Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R., Mahboubi, A.A., Nosrati, A., and A.R. Dexter. 2010. Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. Plant and Soil, 335 (1-2), 229–244.
4. Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R., Mahboubi, A.A., Nosrati, A., and A.R. Dexter. 2011. Integral energy of conventional available water, least limiting water range and integral water capacity for better characterization of water availability and soil physical quality. Geoderma, 166, 34–42.
5. Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R., and A.M. Nikbakht. 2014. SAWCal: a userfriendly program for calculating soil available water quantities and physical quality indices. Comput Electron Agric 109:86–93.
6. Berisso, F.E., Schjønning, P., Keller, T., Lamandé, M., Etana, A., de Jonge, L.W., Iversen, B.V., Arvidsson, J., and J. Forkman. 2012. Persistent effects of subsoil compaction on pore size distribution and gas transport in a loamy soil. Soil and Tillage Research, 122, 42–51.
7. Blake, G.R., and K.H. Hartge. 1986. Bulk density. In: Klute, A (Ed.), Methods of Soil Analysis: Part l – Physical and Mineralogical Methods, second ed. ASA/SSSA, Monograph 9, Madison, WI, pp. 374–380.
8. Cherubin, M.R., Karlen, D.L., Cerri, C.E., Franco, A.L., Tormena, C.A., Davies, C.A., and C.C. Cerri. 2016. Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. PloS one, 11(3): 0150860.
9. Dexter, A.R. 2004a. Soil physical quality; Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. Geoderma, 120, 201–214.
10. Dexter, A.R. 2004b. Soil physical quality; Part II. Friability, tillage, tilth and hard-setting.

Geoderma, 120, 215–225.
11. Dexter, A.R. 2004c. Soil physical quality; Part III: Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. Geoderma, 120, 227–239
12. Dexter, A.R., Czyż, E.A., and O.P. Gaţe. 2007. A method for prediction of soil penetration resistance. Soil Tillage Research. 93, 412–419.
13. Da Silva, A.P., Kay, B.D., and E. Perfect. 1994. Characterization of the least limiting water range of soils. Soil Sci. Soc. Am. J.,58(6), 1775-1781.
14. Etana, A., Larsbo, M., Keller, T., Arvidsson, J., Schjønning, P., Forkman, J., and N. Jarvis. 2013. Persistent subsoil compaction and its effects on preferential flow patterns in a loamy till soil. Geoderma, 192, 430–436.
15. Gee, G.W., and D. Or. 2002. Particle-size analysis. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.): Methods of Soil Analysis. Part 4. SSSA Book Series No. 5. SSSA, Madison, WI. pp. 255–293.
16. Groenevelt, P., Grant, C., and S. Semetsa. 2001. A new procedure to determine soil water availability. Soil Research, 39(3), 577-598.
17. Håkansson, I. 1990. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. Soil and Tillage Research, 16, 105–120.
18. Jones, C.A. 1983. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. Soil Sci. Soc. Am. J., 47, 1208– 1211.
19. Jones, R.J.A., Spoor, G., and A.J. Thomasson. 2003. Vulnurability of subsoils in Europe to compaction; a preliminary analysis. Soil and Tillage Research, 73, 131–143.
20. Kasap, A., and M. Coskun. 2006. Sunflower Yields and Energy Consumption as Affected by Tillage Systems. Asian Journal of Plant Sciences, 5(1), 37-40.
21. Kazemi, Z., Neyshabouri, M.R., Haghi, D.Z., Asgarzadeh, H., Milani, A.O., Irani, M., and A.D. Mohammadi Nasab. 2021. Revisiting integral water capacity on the basis of stomatal conductance at various soil and root length densities in sunflower plant. Agricultural Water Management, 243, 106451.
22. Khalifezadeh Koureh, H., Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R., and H. Khodaverdiloo. 2020. Critical values of soil physical quality indicators based on vegetative growth characteristics of spring wheat (Triticum aestivum L.). Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 20, 493–506.
23. Langeroodi, A.R.S. 2015. Sunflower and soil response to seven years of tillage, residue management and nitrogen fertilizer. Turkish Journal of Field Crops. 20(2), 194-202.
24. Letey, J., Stolzy, L.H., and W.D. Kemper. 1967. Soil aeration. In: Hagan, R.M., Haise, H.R., Edminster, T.W. (Eds.). Irrigation of Agricultural Lands. Agron. Monog 11. ASA, Madison, W, pp. 941– 949.
25. Olness, A., Clapp, C., Liu, R., and A.J. Palazzo. 1998. Biosolids and their effects on soil properties. Handbook of Soil Conditioners. Marcel Dekker, New York, NY, 141-165.
26. Reynolds, W.D., Bowman, B.T., Drury, C.F., Tan, C.S., and X. Lu. 2002. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. Geoderma, 110, 131–146.
27. Reynolds, W.D., Drury, C.F., Tan, C.S., Fox, C.A., and X.M. Yang. 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. Geoderma. 152: 252–263.
28. Reynolds, W.D, Drury, C.F., Yang, X.M. and C.S. Tan. 2008. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. Geoderma, 146, 466–474.25.
29. Rhoades, J.D. 1996. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solid. In: Sparks et al. (Eds.). Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods. ASA/SSSA Madison, Wisconsin, USA. pp: 417–436.

30. Topp, G.C., Reynolds, W.D., Cook, F.J., Kirby, J.M., and M.R. Carter. 1997. Physical attributes of soil quality. In: Gregorich, E.G., and M.R. Carter. (Eds.), Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. Developments in Soil Science, vol. 25. Elsevier, New York, NY. pp. 21–58.
31. van Genuchten, M.Th. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 892–898.
32. Zink, A., Fleige, H., and R. Horn. 2011. Verification of harmful subsoil compaction in loess soils. Soil and Tillage Research, 114, 127–134.

Comparison of Physical Quality Indices of Topsoil and Subsoil under Wheat and Sunflower Cultivation

A. Osmani, H. Asgarzadeh[1], and F. Asadzadeh
MSc., Department of Soil Science, Urmia University; E-mail: ayob.osmanii1369@gmail.com
Associate Professor, Department of Soil Science, Urmia University;
E-mail: asgarzadeh8688@gmail.com
Associate Professor, Department of Soil Science, Urmia University;
E-mail: farrokhasadzadeh@gmail.com
Received: June, 2020 and Accepted: October, 2020

Abstract

This study was conducted to evaluate the soil physical quality (SPQ) indices of topsoil and subsoil of wheat and sunflower fields in Urmia plain. Principal component analysis (PCA) was used to distinguish the effect of soil layer and cultivation type on SPQ. Soil samplings and measurements were done in two layers (topsoil and subsoil) of 30 agricultural fields (15 wheat fields and 15 sunflower fields). Soil water retention and penetration resistance curves of undisturbed samples were determined using sand box and pressure plate, and micro-penetrometer, respectively. Then, least limiting water range (LLWR), integral water capacity (IWC), and Dexter's index of soil physical quality (*S*-value) were calculated. There were significant differences ($P<0.05$) in the mean values of physical quality indices between the topsoil and subsoil. The relative bulk density (RBD) values of subsoil were bigger than topsoil. Also, the IWC, LLWR, and *S* values of subsoil were much smaller than those of topsoil, indicating poor physical quality of subsoil layer in the studied fields. This might be related to conventional tillage with heavy machinery, especially under high soil moisture conditions in last decades, which induced some compaction effects in the subsoil. These findings recommend improving of tillage systems and continuous monitoring of cultivation effects on SPQ in the studied area. Evaluating the SPQ indices of wheat and sunflower fields, using the means comparison and PCA, showed that wheat fields had better soil physical quality compared to sunflower fields. The difference of root systems and more human trafficking in the sunflower fields could be the main reasons of lower soil physical quality in sunflower cultivation compared to wheat cultivation.

Keywords: Least limiting water range, Integral water capacity, Soil penetration resistance, Dexter's index

[1]. Corresponding author: Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran