Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

The effect of number and type of soil physical and hydraulic properties on representing the soil physical quality (case study: Shabestar Plain)

Roya Toluee[1]✉, Davoud Zarehaghi[2], Naser Davatgar[3], Mohammad Reza Neyshabouri[4], Ahmad Bybordi[5]

1. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran. E-mail: roya.toluee@gmail.com
2. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran. E-mail: davoodzarehagi@yahoo.com
3. Soil and Water Research Institute, Agriculture Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: n_davatgar@yahoo.com
4. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran. E-mail: neyshmr@hotmail.com
5. Eastern Azerbaijan Agricultural and Natural Resources research Center, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tabriz, Iran. E-mail: ahmad.bybordi@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: June. 19, 2023

Revised: July. 20, 2023

Accepted: July. 22, 2023

Published online: Sep. 23, 2023

Keywords:
Kirchhoff Potential,
Minimum Data Set,
Principal Component Analysis,
Sensitivity Coefficient.

ABSTRACT

Making management decisions for the quantitative and qualitative improvement of product production effectively begins with selecting the correct and appropriate set of physical and hydraulic characteristics in the form of a soil physical quality index. In order to investigate the physical quality of Shabaster Plain which were under wheat cultivation and to determine the role of the number and type of properties on the quality of the soils, 94 soils from these lands until the year 2022, were selected. To determine the soil physical quality index (SPQI), the minimum data set (MDS) was used by principal component analysis (PCA). 13 physical, chemical, and hydraulic properties (clay, silt, bulk density, aggregate size distribution, electrical conductivity, sodium adsorption ratio, pH, organic carbon, hydraulic conductivity (K_s), conventional plant available water (CPAW), integral energy (EI), dexter index (S_dex), Kirchhoff potential (M_h0)) were consciously entered into four stages in the principal component analysis so that the output is not only the minimum data set but also the best data set. EC appeared as one of the main components in all arrays. The first array was eliminated from the minimum data set. Comparing the mean soil physical quality index between the arrays with Duncan's test showed a significant difference at the 99% probability level ($p<0.01$) between the fourth array and the second and third arrays. The high sensitivity coefficient of the fourth array (9.78) with the second and third arrays (5.43) showed that the correct addition of the Kirchhoff potential to the data set, led to different results in terms of classifying soil physical quality. As a result, the quality of the soils decreased from 72% of very suitable and suitable soils and 28% of the soils with severe and very severe restrictions in the second and third arrays to 41% of very suitable and suitable soils and 59% of soils with restrictions in the fourth array. This data demonstrates using easily measured properties, to simplify the soil quality assessment system, does not always produce accurate results.

Cite this article Toluee, R., Zarehaghi, D., Davatgar, N., Neyshabouri, M. R., & Bybordi, A. (2023). Effect of number and type of soil physical and hydraulic properties on representing the soil physical quality (case study: Shabestar Plain)., *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (7), 981-1003. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.361033.669516

© The Author(s). Publisher: University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.361033.669516

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۴، شماره ۷ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

نقش تعداد و نوع ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک در بازنمایی کیفیت فیزیکی خاک (مطالعه موردی: دشت شبستر)

رویا طلوعی[1]✉، داوود زارع‌حقی[2]، ناصر دواتگر[3]، محمدرضا نیشابوری[4]، احمد بایبوردی[5]

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: roya.toluee@gmail.com
۲. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: davoodzarehagi@yahoo.com
۳. موسسه تحقیقات خاک و آب کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج ، ایران. رایانامه: n_davatgar@yahoo.com
۴. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: neyshmr@hotmail.com
۵. مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز، ایران. ahmad.bybordi@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۳/۲۹
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۴/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۴/۳۱
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۷/۱

واژه‌های کلیدی:
پتانسیل کرشهف،
تجزیه به مولفه‌های اصلی،
حداقل مجموعه داده،
ضریب حساسیت.

چکیده

انتخاب مجموعه صحیح و مناسب از ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی در قالب شاخص کیفیت فیزیکی خاک، گامی موثر در اخذ تصمیمات مدیریتی جهت ارتقاء کمی و کیفی تولید محصول است. ازاین‌رو این پژوهش با هدف بررسی کیفیت فیزیکی اراضی کشاورزی دشت شبستر و تعیین نقش تعداد و نوع ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی بر کیفیت خاک به منظور درجه‌بندی صحیح اراضی و اِعمال مدیریت مناسب بر آن‌ها انجام شد. برای این هدف ۹۴ نمونه خاک سطحی از اراضی زیر کشت گندم در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ در دشت شبستر انتخاب شده و مورد تجزیه قرار گرفت. برای تعیین شاخص کیفیت فیزیکی خاک (SPQI) از حداقل مجموعه داده (MDS) به روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد. تعداد ۱۳ ویژگی فیزیکی، شیمیایی و هیدرولیکی (مقدار رس و سیلت، جرم مخصوص ظاهری، توزیع اندازه خاکدانه‌ها، شوری، نسبت جذب سدیم، اسیدیته خاک، کربن آلی، هدایت هیدرولیکی اشباع، آب قابل‌استفاده برای گیاه، شاخص دکستر، انرژی انتگرالی و پتانسیل کرشهف) طی ۴ مرحله در تجزیه به مؤلفه‌های اصلی وارد شد تا خروجی، افزون بر حداقل بودن مجموعه داده، مناسب‌ترین مجموعه باشد. هدایت الکتریکی در تمام آرایه‌ها به‌عنوان مؤلفه اصلی ظاهر شد و این نشان از اهمیت این ویژگی در منطقه مورد پژوهش بود. آرایه اول به دلیل سادگی بیش‌ازحدِ حداقل مجموعه داده، حذف شد. مقایسه میانگین شاخص کیفیت فیزیکی خاک بین آرایه‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن نشان داد اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۹۹ درصد ($p<0/01$)، بین آرایه چهارم با آرایه دوم و سوم وجود داشت. ضریب حساسیت بالای آرایه چهارم (۹/۷۸) نسبت به آرایه دوم و سوم (هر دو ۵/۴۳) نشان داد اضافه شدن پتانسل کرشهف به مجموعه داده‌ها، منجر به درجه‌بندی متفاوت کیفیت فیزیکی خاک شد. طوری‌که کیفیت خاک‌ها از ۷۲ درصد خاک‌های بسیار مناسب و مناسب، و ۲۸ درصد خاک‌های با محدودیت شدید و بسیار شدید در آرایه دوم و سوم به ۴۱ درصد خاک‌های بسیار مناسب و مناسب، و ۵۹ درصد خاک های با محدودیت شدید و بسیار شدید در آرایه چهارم تبدیل شد. این مطلب نشان‌دهنده آن است که ساده‌سازی نظام ارزیابی کیفیت خاک با استفاده از ویژگی‌های آسان اندازه‌گیری‌شونده لزوماً به نتایج صحیح منتهی نمی‌شود.

استناد: طلوعی، رویا؛ زارع‌حقی، داوود؛ دواتگر، ناصر؛ نیشابوری، محمدرضا؛ و بایبوردی، احمد (۱۴۰۲). نقش تعداد و نوع ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک در بازنمایی کیفیت فیزیکی خاک (مطالعه موردی: دشت شبستر)، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۴ (۷)، ۹۸۱-۹۱۰۰۳.
https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.361033.669516

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.361033.669516

مقدمه

در کشورهای در حال توسعه به دلیل آسیب‌پذیری خاک‌های کشاورزی و مسائل زیست محیطی ناشی از آن‌ها، ارزیابی کیفیت خاک لازم و ضروری است (Wander et al., 2002). کیفیت فیزیکی خاک (SPQ)[۱] به‌عنوان یکی از جنبه‌های محوری کیفیت خاک بوده که نه تنها شرایط فیزیکی مانند استحکام خاک و ویژگی‌های انتقال و ذخیره‌سازی آب در منطقه ریشه گیاه را تحت‌تاثیر قرار می‌دهد (Reynold et al., 2002)، بلکه بر شرایط شیمیایی و بیولوژیکی خاک نیز اثرگذار بوده و ازاین‌رو نقش اصلی در مطالعات کیفیت خاک دارد (Dexter, 2004).

ارزیابی کیفیت خاک و به تبع آن کیفیت فیزیکی خاک، بر کاربرد همه ویژگی‌ها و برهمکنش‌های ذاتی و پویای خاک (مدیریت پذیر و وابسته به توزیع منافذ خاک) تاکید دارد. ویژگی‌های ذاتی، عوامل تشکیل‌دهنده خاک بوده و تعیین‌کننده قابلیت خاک‌ها با کارکردهای مختلف هستند. تاثیر ویژگی‌های مدیریتی خاک عمدتاً بر بخش‌های سطحی خاک بوده و تأثیر کاربری زمین یا عوامل مدیریتی را بر شرایط یک خاک توصیف می‌کنند (Karlen et al., 2003). (Imaz et al., 2010) معتقدند در ارزیابی کیفیت خاک باید کل ویژگی‌های خاک (TDS)[۲] مدنظر قرار گیرند. در این حالت نیاز به انجام تعداد زیادی آزمایش جهت تعیین دقیق ارتباط خاک با گیاه است. استفاده از حداقل مجموعه داده (MDS)[۳]، این اندازه‌گیری‌ها را کاهش داده و با تعداد کمتری از ویژگی‌ها می‌تواند کیفیت فیزیکی خاک را ارزیابی کند (Rezaei et al., 2006). انتخاب مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی کیفیت خاک و تجمیع آن‌ها در قالب یک شاخص می‌تواند به اخذ تصمیمات صحیح مدیریتی منابع و اراضی کمک شایانی کند (زنگی‌آبادی و همکاران، ۱۴۰۰).

در پژوهش‌های مختلفی، مقدار رس و سیلت، جرم مخصوص ظاهری، ماه آلی و توزیع اندازه خاکدانه‌ها به عنوان ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک مطرح شده‌اند (Noellemeyer et al., 2006; Shukla et al., 2006). منحنی مشخصه رطوبتی خاک نیز نقش اصلی در تعیین کیفیت فیزیکی خاک دارد (Cullotta et al., 2016) و به طور گسترده‌ایی برای مطالعات کیفیت فیزیکی خاک استفاده می‌شود (Magalhães et al., 2018)، زیرا مقدار مکش و حجم آب به ساختمان خاک و به دنبال آن توزیع منافذ خاک وابسته است، و زهکشی و خروج آب در هر مکشی در اندازه خاصی از منافذ انجام می‌گیرد (da Paixão et al., 2009). معیارهای و ملاک‌های متفاوتی مانند تخلخل، آب قابل‌استفاده برای گیاه (CPAW)[۴]، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (LLWR)[۵]، گنجایش آب انتگرالی (IWC)[۶]، شاخص دکستر (S_{dex})[۷] و انرژی انتگرالی (EI)[۸] را با استفاده از منحنی مشخصه رطوبتی خاک برای تعیین کیفیت فیزیکی خاک می‌توان به دست آورد.

معیار دیگری که بر اساس الگوریتم توسعه‌یافته توسط (Van Dam & Feddes, 2000) یک روش عددی برای حل معادله ریچاردز ارائه‌شده است تا به‌صورت مستقیم خصوصیات خاک و گیاه را در محاسبه فراهمی آب دخیل نماید، پتانسیل کرشهف است. در این روش هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک مهم‌ترین عامل در قابلیت خاک برای فراهم‌سازی آب برای گیاه در نظر گرفته شده و بر اساس آن پتانسیل کرشهف (M_{h0})[۹]، به‌عنوان تابعی از خصوصیات هیدرولیکی خاک و شاخصی از فراهمی آب برای گیاه تعریف می‌گردد (Van Lier et al., 2006). پتانسیل کرشهف بر این فرض استوار است که فراهمی آب تابع مستقیمی از توان انتقال آب از نواحی مختلف خاک به سمت ریشه است و اثر هم‌زمان مکش متناظر با رطوبت خاک و هدایت هیدرولیکی را در مفهوم خود جای داده است.

پیشینه پژوهش

روش‌های زیادی برای ارزیابی کیفیت خاک توسعه داده شده است که شاخص‌های کیفیت خاک (SQI)[۱۰] به دلیل قابلیت استفاده آسان، انعطاف‌پذیری و کمی بودن متداول‌ترین روش است (Andrews et al., 2002).

(Shukla et al., 2006)، عنوان کردند ویژگی‌هایی مثل کربن آلی خاک، جرم مخصوص ظاهری، خاکدانه‌های پایدار در آب و نفوذ

---

۱. Soil physical quality (SPQ)
۲. Total Data Set
۳. Minimum Data Set
۴. Conventional plant available water
۵. Least limiting water range
۶. Integral water capacity
۷. Dexter index
۸. Integral energy
۹. Kirchhoff potential
۱۰. Soil quality index (SQI)

تجمعی با توجه به عملیات مدیریتی تغییر می‌کنند و باید به عنوان شاخص‌های پویای کیفیت خاک لحاظ شوند.

(Asgarzadeh et al., 2010)، در بررسی روابط بین شاخص دکستر و سه روش اندازه‌گیری مقدار رطوبت در دسترس خاک (آب قابل‌استفاده برای گیاه، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت و گنجایش انتگرالی آب) نشان داد تعیین و انتخاب حد بالا و پایین در برآورد دامنه رطوبتی باحداقل محدودیت و گنجایش انتگرالی آب بسیار مهم بوده و این تفاوت‌ها می‌تواند با یکدیگر اختلاف معنی‌دار داشته باشند. از سوی دیگر رابطه معنی‌داری بین مقادیر رطوبت در دسترس خاک و شاخص دکستر وجود داشت که نشان از مناسب بودن این شاخص کیفیت فیزیکی برای توضیح تغییرپذیری مقدار رطوبت در دسترس خاک است.

(Şeker et al., 2017)، در مطالعه‌ای به منظور ارزیابی شاخص‌های کیفیت خاک در اراضی زیر کشت گندم و چغندرقند در قسمتی از مناطق مهم کشاورزی ترکیه، از ویژگی‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک به منظور توسعه شاخص کیفیت خاک استفاده کردند. پایداری خاکدانه، آب قابل استفاده برای گیاه، مقاومت نفوذ سطحی و عمقی، ماده آلی، کربن فعال، نیتروژن معدنی، pH، سلامت ریشه، فسفر قابل جذب، پتاسیم، منیزیم و عناصر میکرو، ویژگی‌های مورد بررسی بودند. اراضی زیر کشت گندم و چغندر به ترتیب دارای کیفیت متوسط و کم بود. ایشان عنوان کردند که مقادیر پایین کیفیت به خصوص در بعد فیزیکی و بیولوژیکی نیازمند بهبود ویژگی‌های خاک از طریق بهبود ساختمان خاک، می‌باشد.

(Magalhães et al., 2018)، از منحنی مشخصه رطوبتی خاک و شاخص دکستر به عنوان شاخص‌های فیزیکی کیفیت خاک در پنج نوع مدیریت متفاوت جنگلی استفاده نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدیریت متفاوت خاک می‌تواند مقدار آب قابل‌استفاده برای گیاه را از طریق تغییر رطوبت ظرفیت مزرعه و پژمردگی دائم تغییر داده و در نتیجه شکل منحنی رطوبتی و نیز شاخص دکستر تغییر خواهد نمود.

عثمانی و همکاران (۱۳۹۹)، پژوهشی را با هدف ارزیابی شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک‌های سطحی و زیرسطحی مزارع گندم و آفتابگردان دشت ارومیه انجام دادند. از تجزیه به مولفه‌های اصلی برای تفکیک تاثیر لایه‌های خاک و نوع کشت بر شاخص‌ها استفاده شد. شاخص‌های کیفیت فیزیکی شامل شاخص دکستر، آب قابل‌استفاده برای گیاه، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت، گنجایش آب انتگرالی، چگالی ظاهری نسبی، تخلخل تهویه‌ای و گنجایش زراعی نسبی بود. مقادیر بالای چگالی ظاهری نسبی و مقادیر پایین شاخص دکستر، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت و گنجایش آب انتگرالی در سطوح زیرین نسبت سطوح بالا، نشان‌دهنده کیفیت فیزیکی ضعیف خاک زیرسطحی در مزارع مورد بررسی بود.

زنگی‌آبادی و همکاران (۱۴۰۰)، برای تعیین شاخص کیفیت فیزیکی خاک‌های با بافت متوسط و سبک در استان خراسان رضوی، از بین ۳۵ ویژگی فیزیکی با استفاده از تجزیه به مولفه‌های اصلی، مهم‌ترین ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک را استخراج کردند. نتایج نشان داد تنها شش ویژگی فیزیکی خاک شامل میانگین قطر منافذ، آب قابل‌استفاده برای گیاه (ظرفیت مزرعه در مکش ۱۰۰ سانتی‌متر)، تخلخل کل، انرژی انتگرالیِ دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت، شاخص پایداری خاکدانه و آب قابل‌استفاده برای گیاه (ظرفیت مزرعه در مکش ۳۳۰ سانتی‌متر)، حدود ۹۰ درصد تفاوت خاک‌های مورد مطالعه را توجیه کردند. مقایسه روش‌های مختلف محاسبه شاخص کیفیت فیزیکی خاک نشان داد که بیشترین ضریب حساسیت مربوط به روش انتخاب ویژگی‌ها با استفاده از تجزیه به مولفه‌های اصلی و وزن‌دهی آن‌ها با استفاده از روش امتیازدهی در محدوده صفر و یک بود.

در سال‌های اخیر، برای تعیین شاخص کیفیت فیزیکی خاک، استفاده از ویژگی‌های زود یافت یا آسان اندازه‌گیری‌شونده تا ویژگی‌های دیریافت که اندازه‌گیری آن‌ها نیاز به‌صرف هزینه و زمان دارد، بدون توجه به نوع ویژگی‌های ورودی و هزینه و زمان اندازه‌گیری‌ها، به‌طور فزاینده‌ای گسترش‌یافته است. درحالی‌که در تعیین شاخص کیفیت فیزیکی خاک، از یک‌سو انتخاب ویژگی‌های ضروری و برتر در قالب یک شاخص (به‌ویژه ویژگی‌های مرتبط با توزیع اندازه منافذ خاک) و از سوی دیگر مسئله هزینه و زمان اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی باعث می‌شود در انتخاب ویژگی‌ها احتیاط شود. ازاین‌رو این پرسش پیش می‌آید که با چه تعداد، تنوع (ویژگی‌های آسان اندازه‌گیری شونده و دیریافت) و ترکیب ویژگی‌ها و با در نظر گرفتن مسئله هزینه و زمان، می‌توان بیشترین اطلاعات و بهترین شکل کیفیت خاک را بازتاب نمود. از طرفی اضافه کردن ویژگی‌های هزینه‌بر و زمان‌بر زمانی قابل توجیه است که نتایج مناسب و متفاوتی از کیفیت خاک ارائه شود. طبیعتا این موضوع باعث تفاوت درجه‌بندی از نظر کیفیت فیزیکی خاک هم خواهد شد. در این راستا، ویژگی‌های خاک در چهار آرایه مختلف (از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی زودیافت تا ویژگی‌های هیدرولیکی دیریافت) به صورت گام‌به‌گام وارد تجزیه به مولفه‌های اصلی شد تا بهترین ترکیب ویژگی‌ها برای تعیین کیفیت فیزیکی خاک در گندم‌زارهای شهرستان شبستر و در مقیاس ناحیه‌ای انتخاب شود. از

طرفی، تا کنون در پژوهش‌های متعددی، از شاخص‌های مختلف فراهمی آب در ارتباط با منحنی مشخصه رطوبتی خاک مانند آب قابل‌استفاده برای گیاه، انرژی انتگرالی، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت و گنجایش آب انتگرالی برای تعیین شاخص کیفیت فیزیکی خاک استفاده شده است؛ ولی در هیچ پژوهشی از شاخصی که اثر هم‌زمان مکش متناظر با رطوبت خاک و هدایت هیدرولیکی را در مفهوم خود گنجانده باشد، استفاده نشده است. بدین منظور در این پژوهش از شاخص پتانسیل کرشهف به عنوان یکی از ویژگی‌های ورودی در تجزیه به مولفه‌های اصلی، برای بررسی تاثیر آن بر کیفیت فیزیکی خاک استفاده شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش

محدوده مورد پژوهش، دشت شبستر از دشت‌های شهرستان شبستر، در حاشیه شمال شرقی دریاچه ارومیه واقع در استان آذربایجان شرقی می‌باشد. مختصات جغرافیایی محدوده مورد پژوهش ′۰۵ °۴۶ تا ′۲۶ °۴۶ طول شرقی و ′۰۵ °۳۸ تا ′۲۳ °۳۸ عرض شمالی است. مساحت شهرستان ۲۵۹۱/۲ کیلومترمربع بوده که ۱۰۴۵ کیلومتر مربع آن را اراضی زراعی تشکیل می‌دهند. متوسط بارندگی سالانه منطقه با توجه به آمار ۱۰ سال گذشته ایستگاه هواشناسی شبستر، حدود ۳۵۰ میلی‌متر گزارش شده و طبق تقسیم‌بندی اقلیم‌نمای آمبرژه، اقلیم منطقه معتدل نیمه مرطوب و متوسط ارتفاع منطقه از سطح آزاد دریاها در حدود ۱۳۲۰ متر است.

نمونه‌برداری خاک

در این پژوهش، ۹۴ نمونه خاک از اراضی زیر کشت گندم واقع در شرق شهرستان شبستر در شهریور ۱۴۰۱ انتخاب شد. در هر مکان نمونه‌برداری‌ها به‌صورت دست‌خورده و دست‌نخورده در سه تکرار از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری (عمق مؤثر ریشه گیاه گندم) تهیه شد.

اندازه‌گیری آزمایشگاهی

نمونه خاک‌های دست‌خورده ابتدا هوا خشک شده و پس از کوبیدن، از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. سپس ویژگی‌های فراوانی نسبی اندازه ذرات به روش هیدرومتری (Gee et al., 2002)، جرم مخصوص حقیقی به روش پیکنومتر (Flint & Flint, 2002)، کربن آلی به روش اکسایش تر (Nelson & Sommers, 1983)، هدایت الکتریکی خاک در عصاره گل اشباع، واکنش خاک در گل اشباع و نسبت جذب سدیم با استفاده از سدیم، کلسیم و منیزیم محلول در عصاره گل اشباع (Page et al., 1982) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری پایداری خاکدانه به روش الک تر، نمونه‌ها بعد از هوا خشک شدن از الک ۸ میلی‌متری عبور داده شدند (Nimmo & Perkins, 2002).

نمونه خاک‌های دست‌نخورده توسط استوانه‌های فلزی با میانگین ارتفاع ۵/۱ و قطر ۵ سانتی‌متر برداشت شد. با استفاده از نمونه‌های دست‌نخورده، جرم مخصوص ظاهری به روش استوانه (Jeffries, 1941) و هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار افتان (Reynold et al., 2002) اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری منحنی مشخصه رطوبتی خاک در مقادیر مکش ۰، ۱، ۵، ۱۰ کیلو پاسکال توسط جعبه شن، مکش ۳۳ و ۱۰۰ کیلو پاسکال توسط دستگاه صفحه فشاری روی نمونه‌های دست‌نخورده و در مقادیر مکش ۳۰۰، ۵۰۰ و ۱۵۰۰ کیلو پاسکال توسط دستگاه صفحه فشاری روی نمونه‌های دست‌خورده (Dane, 2002) انجام شد. انجام مطالعات تجربی در شهریور سال ۱۴۰۱ به اتمام رسید.

برآورد پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی خاک و هدایت هیدرولیکی خاک

در این پژوهش با برازش مدل ون‌گنوختن (Van Genuchten, 1980) بر داده‌های منحنی مشخصه رطوبتی خاک توسط نرم‌افزار RETC (Van Genuchten et al., 1991)، پارامترهای مدل با استفاده از رابطه ۱ تعیین شد:

$$Se = \frac{\theta_{(h)} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{(1 + (\alpha h)^n)^m}$$ رابطه ۱)

که در آن Se اشباع موثر، $\theta_{(h)}$ ، θ_r و θ_s به ترتیب رطوبت حجمی خاک متناظر با مکش h، رطوبت حجمی باقی‌مانده و اشباع خاک ($cm^3.cm^{-3}$)، h مکش ماتریک خاک (cm)، α مرتبط با عکس مکش در نقطه ورود هوا ($1.cm^{-1}$)، n و m شاخص توزیع اندازه منافذ خاک و بدون بعد هستند. در این تحقیق $m = 1 - \frac{1}{n}$ در نظر گرفته شده است.

منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع بر اساس مدل ون‌گنوختن-معلم (Van Genuchten, 1980) و با استفاده از نرم‌افزار RETC (Van Genuchten et al., 1991)، طبق رابطه ۲ تعیین شد:

$$K_{(h)} = K_s \times Se^{\lambda} \times \left[1 - \left(1 - Se^{1/m}\right)^m\right]^2$$ رابطه ۲)

که در آن $K_{(\theta)}$ و K_s به ترتیب هدایت هیدرولیکی غیراشباع و اشباع خاک متناظر با مکش h ($cm.day^{-1}$) و λ پارامتر تجربی برابر ۰/۵ بود. سایر پارامترها، در رابطه ۱ تعریف شده‌اند.

محاسبه آب قابل‌استفاده برای گیاه

آب قابل‌استفاده برای گیاه، CPAW، معیاری از مقدار فراهمی آب برای گیاه، از تفاضل مقدار آب خاک در محدوده ظرفیت مزرعه، FC، و نقطه پژمردگی دائم، PWP، از رابطه ۳ تعیین شد (Peters, 1965):

$$CPAW = FC - PWP$$ رابطه ۳)

در این رابطه، FC و PWP، به ترتیب رطوبت حجمی خاک در مکش ۱۰ و ۱۵۰۰ کیلو پاسکال ($cm^3.cm^{-3}$) در نظر گرفته شد.

محاسبه شاخص دکستر

شاخص دکستر، S_{dex}، به عنوان شیب منحنی رطوبتی خاک در نقطه عطف، از مقادیر پارامترهای مدل ون‌گنوختن برازش داده‌شده بر داده‌های اندازه‌گیری‌شده منحنی مشخصه رطوبتی خاک در رابطه ۴، محاسبه شد (Dexter, 2004):

$$S_{dex} = -n \times (\theta_s - \theta_r) \times \left[\frac{2n-1}{n-1}\right]^{\frac{1}{n}-2}$$ رابطه ۴)

که در آن θ_r و θ_s به ترتیب رطوبت جرمی باقی‌مانده و اشباع خاک ($cm^3.cm^{-3}$) هستند. سایر پارامترها، در رابطه ۱ تعریف شده‌اند.

محاسبه انرژی انتگرالی

مقدار انرژی انتگرالی، EI، مقدار انرژی موردنیاز برای جذب واحد حجم آب در محدوده آب قابل‌استفاده برای گیاه، با استفاده از رابطه ۵ تعیین شد (Minasny & McBratney, 2003):

$$EI\left[\theta_i, \theta_f\right] = \frac{1}{\theta_i - \theta_f}\int_{\theta_f}^{\theta_i} h_{(\theta)} d\theta$$ رابطه ۵)

که در آن EI، انرژی انتگرالی ($J.kg^{-1}$)، θ_i و θ_f به ترتیب رطوبت حجمی خاک در مکش ۱۰ و ۱۵۰۰ کیلو پاسکال ($cm^3.cm^{-3}$) و $h_{(\theta)}$ مکش ماتریک نظیر هر رطوبت مشخص (kPa) است. حل معادلات انتگرالی انرژی انتگرالی در نرم‌افزار Excel 2013 انجام شد.

محاسبه پتانسیل کرشهف

مقدار پتانسیل کرشهف، M_{h0}، با استفاده از رابطه ۶ تعیین شد (Van Lier et al., 2006):

$$M_{h0} = \int_{h_0}^{h} K_{(h)} dh$$ رابطه ۶)

که در آن M_{h0}، پتانسیل کرشهف ($cm^2.day^{-1}$) و $K_{(h)}$ تابع هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک ($cm.day^{-1}$) است. h و h_0 به ترتیب مکش خاک در صفر و ۱۵۰۰ کیلو پاسکال است. حل معادلات انتگرالی پتانسیل کرشهف در نرم‌افزار Excel 2013 انجام شد.

تعیین شاخص کیفیت خاک

تعیین شاخص کیفیت خاک در سه مرحله مشخص شد: ۱) انتخاب ویژگی‌ها، ۲) نمره‌دهی (تبدیل ویژگی‌های کمی خاک به رتبه‌بندی کیفی) و ۳) تلفیق رتبه‌های کیفی به یک شاخص کیفیت خاک (Andrews et al., 2002).

انتخاب ویژگی‌ها

در انتخاب ویژگی‌های مرتبط با کیفیت دو رویکرد کلی را می‌توان دنبال نمود: برخی از پژوهشگران شاخص کیفیت خاک را بر اساس کل ویژگی‌های خاک (TDS) تعیین می‌کنند (Doran & Parkin, 1994). دومین رویکرد مبتنی بر توصیف شرایط و مسئله تصمیم با حداقل تعداد ویژگی‌ها (MDS) است. استفاده از حداقل مجموعه داده در انتخاب ویژگی‌های مؤثر در کیفیت خاک، از نظر هزینه و زمان کارآمدتر است (Govaerts et al., 2006; Qi et al., 2009).

در این پژوهش از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)[۱] برای تعیین ویژگی‌های مؤثر و حداقل مجموعه داده، استفاده شد (Andrews et al., 2002).

انواع آرایه‌های ویژگی‌های خاک برای استفاده در تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

ویژگی‌ها به‌صورت گام‌به‌گام و نظارت‌شده در چهار آرایه مختلف وارد تجزیه به مؤلفه‌های اصلی شدند تا خروجی، علاوه بر حداقل مجموعه داده، مناسب‌ترین مجموعه داده نیز باشد. آرایه اول شامل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آسان اندازه‌گیری‌شونده، آرایه دوم شامل آرایه اول به همراه ویژگی‌های هیدرولیکی خاک (هدایت هیدرولیکی اشباع و آب قابل‌استفاده برای گیاه)، آرایه سوم شامل آرایه دوم به همراه ویژگی‌های مشتق شده منحنی مشخصه رطوبتی (شاخص دکستر و انرژی انتگرالی) و آرایه چهارم شامل آرایه سوم به همراه ویژگی مشتق شده از منحنی هدایت هیدرولیکی خاک (پتانسیل کرشهف) بود. برای اندازه‌گیری ویژگی‌های هر آرایه نسبت به آرایه قبل نیاز به صرف زمان و هزینه بیشتری بود. آن‌چه واضح است اهمیت منحنی‌های مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی در تعیین کیفیت فیزیکی خاک به دلیل وابستگی هر دو منحنی به توزیع اندازه منافذ خاک است. تعداد و ترکیب ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و هیدرولیکی وارد شده در تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای چهار آرایه در جدول ۱ نشان داده شد.

جدول ۱- حضور ویژگی‌های مؤثر بر شاخص کیفیت خاک در چهار آرایه برای انتخاب حداقل مجموعه داده

	C	Si	ρ_b	MWD	EC	SAR	pH	OC	K_s	CPAW	S_{dex}	EI	M_{h0}
آرایه اول	*	*	*	*	*	*	*	*					
آرایه دوم	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*			
آرایه سوم	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
آرایه چهارم	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

C و Si: به ترتیب درصد اندازه ذرات رس و سیلت؛ ρ_b: جرم مخصوص ظاهری (gr/cm^3)؛ MWD: توزیع اندازه خاکدانه‌ها به روش الک تر (mm)؛ EC: هدایت الکتریکی (dS/m)؛ SAR: نسبت جذب سدیم $(meq/l)^{0.5}$؛ pH: اسیدیته خاک؛ OC: درصد کربن آلی؛ K_s: هدایت هیدرولیکی اشباع (m/day)؛ CPAW: درصد آب قابل‌استفاده برای گیاه؛ S_{dex}: شاخص دکستر (-)؛ EI: انرژی انتگرالی (J/Kg)؛ M_{h0}: پتانسیل کرشهف (cm^2/day).

برای انتخاب حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک به روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، مؤلفه‌های اصلی (PC)[۲] و ارزش ویژه (EV)[۳] آن‌ها استفاده شد. ارزش ویژه، میزان واریانس تبیین شده به‌وسیله هر عامل را بیان می‌کند و یکی از ضوابط پرکاربرد در تعیین تعداد مؤلفه‌هاست. مؤلفه‌های اصلی با ارزش ویژه کمتر از یک، ازنظر آماری معنی‌دار نبوده و باید از تحلیل حذف شود. در مؤلفه‌هایی با ارزش ویژه بالاتر از یک، ویژگی با بالاترین بار عاملی در هر مؤلفه به‌عنوان حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک (ویژگی اصلی) انتخاب شد. اگر بار عاملی کمتر از ۰/۳ باشد، رابطه ضعیف در نظر گرفته می‌شود. بار عاملی بین ۰/۳ تا ۰/۶ قابل‌قبول و بزرگ‌تر از ۰/۶ مطلوب است (Kline, 2005). برای احتیاط بیشتر در این پژوهش از بار عاملی ۰/۶ استفاده شد. بعد از انتخاب ویژگی اصلی در هر مؤلفه، دیگر ویژگی‌هایی که در محدوده ۱۰ درصد حد مطلق ویژگی با بیشترین بار عاملی قرار داشتند نیز انتخاب شدند (Andrews et al., 2002; Masto et al., 2007).

در مؤلفه‌هایی که بیش از یک ویژگی باقی ماند، از ضریب همبستگی خطی بین این ویژگی‌ها برای تشخیص حذف یا عدم حذف ویژگی‌های بعدی از ویژگی اصلی استفاده شد. در مواردی که ضریب همبستگی خطی بین ویژگی اصلی با ویژگی‌های بعدی بیشتر از ۰/۶ باشد، ویژگی اصلی در حداقل مجموعه داده می‌ماند و ویژگی دیگر حذف می‌شود. ولی اگر ضریب همبستگی خطی بین ویژگی اصلی با ویژگی بعدی کمتر از ۰/۶ باشد، هر دو ویژگی در حداقل مجموعه داده در نظر گرفته می‌شوند.

لازم به ذکر است پیش از انجام تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، به‌منظور ارزیابی شایستگی داده‌ها از ضریب KMO[۴] (Kaiser, 1974) و برای بررسی رابطه قوی بین ویژگی‌ها از آزمون کرویت بارتلت (Bartlett, 1954) استفاده شد. محدوده ضریب KMO از ۰ تا ۱ است،

---

۱. Principal component analysis
۲. Principal component
۳. Eigen value
۴. Kaiser-Meyer-Olkin

و درصورتی‌که بیشتر از ۰/۶ باشد، داده‌ها برای تحلیل عاملی مناسب خواهند بود (Jolliffe, 2002). آزمون کرویت بارتلت در صورت معنی‌داری بیش از ۹۵ درصد (P<۰/۰۵) برای تحلیل عاملی مناسب است (Pallant, 2020).

نمره‌دهی (تبدیل ویژگی‌های کمی خاک به رتبه‌بندی کیفی)

ویژگی‌های انتخاب‌شده دارای واحدهای متفاوتی بودند. برای استانداردسازی (بدون بعد کردن) ویژگی‌های انتخاب‌شده برای هر نمونه خاک نمره‌دهی شده و در دامنه بدون بعد صفر (کمترین مطلوبیت برای کیفیت خاک) تا یک (بیشترین مطلوبیت برای کیفیت خاک) تبدیل شدند (Qi et al., 2009). در این پژوهش، نمره‌دهی ویژگی‌ها، توسط تابع نمره‌دهی غیرخطی ارائه‌شده در رابطه ۷ انجام شد (Masto et al., 2007):

$$Y = \frac{1}{1 + e^{-b(x-A)}}$$ رابطه ۷)

که در آن Y مقادیر ویژگی‌ها پس از تبدیل غیرخطی داده‌ها، x مقدار عددی هر ویژگی، A مقدار پایه‌ی ویژگی خاک[۱] که نمره آن ۰/۵ یا تقریباً نزدیک میانه‌ی مقدار حد بالا و پایین و b شیب خط است. با استفاده از این رابطه سه تابع نمره‌دهی: ۱) بیشتر بهتر، ۲) کمتر بهتر و ۳) بهینه بهتر تعریف و مشخص شد. حالت "بیشتر بهتر" را منحنی نمره‌دهی با شیب مثبت، حالت "کمتر بهتر" را منحنی نمره‌دهی با شیب منفی و حالت حد بهینه را ترکیبی از هر دو تعریف نموده‌اند. حدود بحرانی ویژگی‌های مورد پژوهش با استفاده از حدهای پیشنهادی ارائه‌شده در جدول ۲ مشخص شد. در مطالعات انجام‌یافته تاکنون حدود بحرانی برای انرژی انتگرالی و پتانسیل کرشهف ارائه نشده است. بدین منظور حدود بالا و پایین این ویژگی‌ها با توجه به شرایط منطقه و نظرات کارشناسی محققان موسسه تحقیقات خاک و آب کشور به دست آمد.

جدول ۲- نوع و پارامترهای تابع نمره‌دهی غیرخطی و حدود بحرانی استفاده‌شده در تابع

ویژگی	واحد	نوع تابع	حد پایین	حد بالا	β	α	مرجع
ρ_b	g/cm^3	کمتر بهتر	۱/۳۰	۱/۶۰	۳۵/۳۰	۱/۴۵	(Institute, 1998)
EC	dS/m	کمتر بهتر	۲/۰۰	۴/۰۰	۳/۶۷	۳/۰۰	(Lal, 1994)
OC	٪	بیشتر بهتر	۰/۵	۱/۸	۸/۱۵	۱/۱۵	(Lal, 1994)
CPAW	٪	بیشتر بهتر	۵/۰	۱۵/۰	۱/۰۶	۱۰/۰	(Topp et al., 1997)
S_{dex}	-	بیشتر بهتر	۰/۰۲۰	۰/۰۳۵	۴۵۰	۰/۲۷۵	(Dexter, 2004)
EI	J/Kg	کمتر بهتر	۱۶۳	۱۷۷	۰/۷۶	۱۷۰	Author´s Opinion
M_{h0}	cm^2/day	بیشتر بهتر	۸۲	۱۰۱	۰/۵۷	۹۲	Author´s Opinion

تلفیق رتبه‌های کیفی به یک شاخص کیفیت خاک

بعد از نمره‌دهی ویژگی‌های انتخاب‌شده، شاخص کیفیت تجمعی وزن‌دهی شده (IQI_w) از رابطه ۸ تعیین شد (Qi et al., 2009):

$$IQI_w = \frac{\sum_{i=1}^{n} W_i N_i}{\sum_{i=1}^{n} W_i}$$ رابطه ۸)

که در آن W_i وزن تعلق یافته به هر ویژگی، N_i نمره تعلق یافته به هر ویژگی و n تعداد ویژگی‌های موردنظر بود. برای به دست آوردن W_i از سه روش استفاده شد:

در روش اول نسبت مقدار واریانس هر مؤلفه (حاصل از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی) به حداکثر کل واریانس همه مؤلفه‌های انتخاب‌شده برای حداقل مجموعه داده، به‌عنوان وزن هر ویژگی تعیین شد (Andrews et al., 2002). در روش دوم نسبت مقدار ضریب تغییرات هر ویژگی به مجموع مقادیر ضریب تغییرات کل ویژگی‌ها در هر مجموعه حداقل داده، به‌عنوان وزن هر ویژگی تعیین شد (Ortega & Santibanez, 2007). در روش سوم نسبت مقدار سهم اشتراک‌پذیری هر ویژگی (حاصل از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی) به مجموع مقادیر سهم اشتراک‌پذیری کل ویژگی‌ها در هر مجموعه حداقل داده، به‌عنوان وزن هر ویژگی تعیین شد (Guo et al., 2017).

برای مقایسه آرایه‌های مختلف ویژگی‌ها، در محاسبه شاخص کیفیت فیزیکی خاک از ضریب حساسیت استفاده شد (Masto et al., 2008):

---

۱. Baseline

$$Sensitivity = \frac{IQI_{max}}{IQI_{min}}$$ رابطه ۹)

در این رابطه، ضریب حساسیت، نسبت بزرگ‌ترین شاخص کیفیت خاک در هر روش به کوچک‌ترین شاخص کیفیت خاک در همان روش بود. بر این اساس، روش‌های با مقادیر ضریب حساسیت بزرگ‌تر، مناسب‌تر بوده و اختلاف بین خاک‌های مختلف را بهتر نشان می‌دهد (Masto et al., 2008).

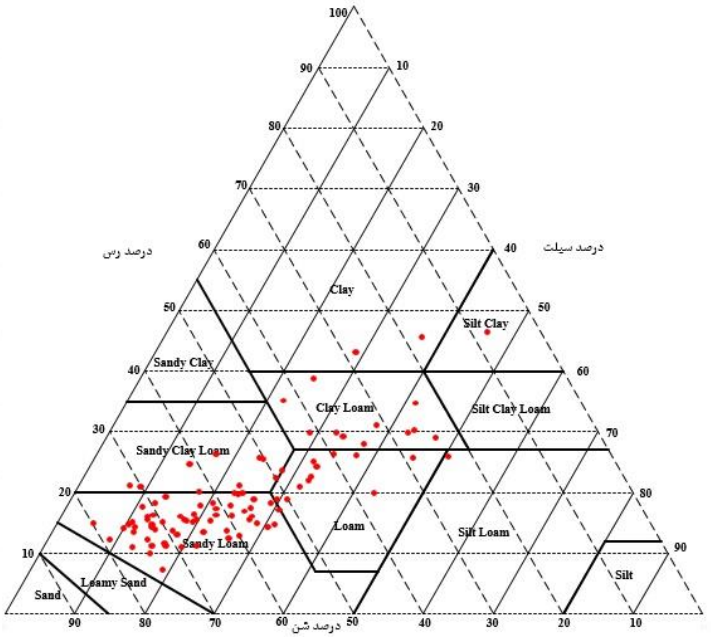
خاک‌های مختلف بر اساس مقدار شاخص کیفیت خاک در چهار کلاس: کلاس یک با کیفیت بسیار مناسب (بیشتر از ۰/۷۸)، کلاس دو با کیفیت مناسب (۰/۷۸–۰/۶۸)، کلاس سه با محدودیت شدید (۰/۶۸–۰/۵۸) و مقادیر کمتر از ۰/۵۸ در کلاس چهار با محدودیت بسیار شدید قرار گرفتند (Qi et al., 2009).

تجزیه و تحلیل آماری

برای تعیین آماره‌های توصیفی ویژگی‌های خاک‌های مورد پژوهش شامل میانگین، میانه، انحراف معیار، چولگی، کشیدگی و ضریب تغییرات، همبستگی خطی پیرسون (r) بین ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و هیدرولیکی خاک، انتخاب حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک، سهم اشتراک‌پذیری و واریانس مؤلفه‌ها به روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و مقایسه میانگین‌ها از نرم‌افزار SPSS 26 استفاده شد.

نتایج و بحث

پراکنش توزیع اندازه ذرات نمونه خاک‌های مورد پژوهش در مثلث بافت خاک نشان داد که بیشتر خاک‌ها دارای کلاس بافت سبک تا متوسط بودند (شکل ۱). این خاک‌ها در شش کلاس بافتی لوم شنی (۶۱ درصد)، لومی (۱۶ درصد)، لوم رسی (۱۲ درصد)، لوم رسی شنی (۸ درصد) و خاک‌های سنگین رسی و رس سیلتی (۳ درصد) قرار داشتند.



شکل ۱- پراکنش توزیع اندازه ذرات نمونه خاک‌های مورد پژوهش در مثلث بافت خاک

آماره‌های توصیفی ویژگی‌های خاک در جدول ۳ نشان داده شد. دامنه تغییرات رس، سیلت و شن خاک به ترتیب، ۷ تا ۴۶ درصد با میانگین ۱۹/۹ درصد رس، ۸ تا ۵۱ درصد با میانگین ۲۵/۲ درصد سیلت و ۶ تا ۷۸ درصد با میانگین ۵۵ درصد شن بود که نشان‌دهنده‌ی تغییرات زیاد در مقادیر رس، سیلت و شن بود. حدود تغییرات میانگین هندسی قطر ذرات نشان داد که طبق سیستم طبقه‌بندی وزارت کشاورزی آمریکا (USDA)[1]، قطر ذرات در بازه سیلت تا شن متوسط است. حدود تغییرات میانگین قطر خاکدانه‌ها بین ۰/۲ تا ۱ میلی‌متر با میانگین ۰/۵۲ میلی‌متر بود. مقادیر میانگین قطر خاکدانه‌ها نشان داد که خاک‌ها از پایداری متوسطی برخوردارند. لازم به ذکر است در اندازه‌گیری توزیع اندازه خاکدانه به روش الک تر، سهم خاکدانه‌های با قطر ۰/۵– ۰ میلی‌متر ۸۵ درصد و سهم خاکدانه‌های با قطر ۸–۰/۵

[1]. United states department of agriculture

میلی‌متر ۱۵ درصد بود که این نتایج با مقدار میانگین قطر خاکدانه‌ها نیز هم‌خوانی داشت. بر پایه ضریب تغییرات، جرم مخصوص حقیقی از غیریکنواختی کمی در منطقه برخوردار بود. دامنه وسیعی از مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع بین ۰/۰۱۵ تا ۱/۱۵۱ متر در روز با بیشترین ضریب تغییرات (۸۹ درصد) در بین ویژگی‌ها مشاهده شد.

باوجود دامنه زیاد هدایت الکتریکی در خاک‌های مورد پژوهش، مقادیر میانگین و میانه این ویژگی به ترتیب ۲/۶۵ و ۱/۷۷ دسی زیمنس بر متر نشان داد بر پایه طبقه‌بندی کمیته اصطلاحات جامعه خاک‌شناسان ایالات متحده[۱]، ۶۳ درصد خاک‌ها در گروه خاک‌های طبیعی و بدون محدودیت (هدایت الکتریکی کمتر از ۲ دسی زیمنس بر متر، نسبت جذب سدیم کمتر از $(meq/l)^{0.5}$ ۱۵ و pH کمتر از ۸/۵)، ۳۳ درصد خاک‌ها در گروه خاک‌های شور (هدایت الکتریکی بیشتر از ۲ دسی زیمنس بر متر، نسبت جذب سدیم کمتر از $(meq/l)^{0.5}$ ۱۵ و pH کمتر از ۸/۵) و ۴ درصد خاک‌ها در گروه خاک‌های شور–سدیمی (هدایت الکتریکی بیشتر از ۲ دسی زیمنس بر متر، نسبت جذب سدیم بیشتر از $(meq/l)^{0.5}$ ۱۵ و pH کمتر از ۸/۵) قرار داشت. مقدار کم کربن آلی خاک‌ها با میانگین ۰/۴۸ را می‌توان به اراضی سبک بافت منطقه نسبت داد.

شاخص دکستر در دامنه ۰/۰۳ تا ۰/۰۶ با میانه ۰/۰۳۶ قرار داشت. بر پایه گروه‌بندی دکستر (Dexter, 2004) خاک‌های با $S<0/02$ دارای کیفیت فیزیکی خیلی ضعیف، $0/02\leq S<0/035$ دارای کیفیت فیزیکی ضعیف، $0/035\leq S<0/05$ دارای کیفیت فیزیکی خوب و $S\geq0/05$ دارای کیفیت فیزیکی خیلی خوب می‌باشند. با توجه به طبقه‌بندی (Dexter, 2004)، ۲۹ درصد از نمونه‌های خاک در کلاس ضعیف و ۶۷ درصد در کلاس خوب و خیلی خوب بودند.

جدول ۳- آمار توصیفی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و هیدرولیکی اندازه‌گیری شده

ویژگی	واحد	حداقل	حداکثر	میانگین	میانه	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی	ضریب تغییرات
C	%	۷/۰	۴۶/۰	۱۹/۹	۱۷/۵	۷/۸۰	۱/۴۱	۲/۱۴	۳۹
Si	%	۸/۰	۵۱/۰	۲۵/۲	۲۴/۵	۱۰/۱۰	۰/۵۴	-۰/۲۳	۴۰
Sa	%	۶/۰	۷۸/۰	۵۵/۰	۵۸/۰	۱۶/۰۰	-۰/۸۵	۰/۰۷	۲۹
d_g	mm	۰/۰۰۷	۰/۳۰۰	۰/۱۳۲	۰/۱۲۵	۰/۰۷۸	۰/۲۸	-۰/۸۴	۵۹
ρ_p	g/cm^3	۲/۶۱	۲/۶۸	۲/۶۵	۲/۶۵	۰/۰۲	-۰/۰۹	-۰/۳۳	۰/۶
ρ_b	g/cm^3	۱/۳۰	۱/۶۲	۱/۵۰	۱/۵۲	۰/۰۸	-۰/۹۱	۰/۰۴	۵
MWD	mm	۰/۲۰	۱/۰۰	۰/۵۲	۰/۴۵	۰/۲۲	۰/۷۶	-۰/۵۸	۴۳
EC	dS/m	۰/۷۶	۹/۳۰	۲/۴۴	۱/۷۷	۱/۸۸	۱/۶۶	۲/۲۰	۷۷
SAR	$(meq/l)^{0.5}$	۰/۸۴	۱۶/۴۴	۴/۳۰	۳/۱۰	۳/۵۰	۱/۷۹	۲/۴۷	۸۱
pH	-	۷/۶۰	۸/۳۸	۸/۰۵	۸/۰۸	۰/۱۸	-۰/۴۹	-۰/۳۱	۲
OC	%	۰/۲۱	۰/۷۹	۰/۴۸	۰/۴۶	۰/۱۲	۰/۴۹	۰/۰۴	۲۵
K_s	m/day	۰/۰۱۵	۱/۱۵۱	۰/۳۲۸	۰/۲۷۶	۰/۲۹	۱/۲۱	۰/۹۷	۸۹
CPAW	%	۱۱/۳۶	۲۳/۵۹	۱۵/۴۶	۱۴/۲۸	۲/۷۸	۰/۸۷۶	-۰/۲۰	۱۸
S_{dex}	-	۰/۰۳۰	۰/۰۶۰	۰/۰۳۸	۰/۰۳۶	۰/۰۰۵	۰/۹۸	۰/۴۵	۱۴
EI	J/Kg	۱۳۶/۵۱	۲۱۵/۸۰	۱۷۱/۸۹	۱۷۴/۶۶	۱۸/۷۹	-۰/۰۴	-۰/۷۳	۱۱
M_{h0}	cm^2/day	۱۱/۲۶	۱۵۸/۷۹	۸۹/۶۱	۹۲/۹۴	۳۰/۹۷	-۰/۵۱	-۰/۱۵	۳۵

C، Si و S: به ترتیب درصد اندازه ذرات رس، سیلت و شن؛ d_g: میانگین هندسی قطر ذرات (mm)؛ ρ_p و ρ_b: به ترتیب جرم مخصوص حقیقی و ظاهری (g/cm^3)؛ MWD: توزیع اندازه خاکدانه‌ها (mm)؛ EC: هدایت الکتریکی (dS/m)؛ SAR: نسبت جذب سدیم $(meq/l)^{0.5}$؛ pH: اسیدیته خاک (-)؛ OC: درصد کربن آلی؛ K_s: هدایت هیدرولیکی اشباع (m/day)؛ θ_{10KPa} و $\theta_{1500KPa}$: به ترتیب درصد رطوبت در فشارهای ۱۰ و ۱۵۰۰ کیلو پاسکال؛ CPAW: درصد آب قابل‌استفاده برای گیاه؛ n: پارامتر شکل منحنی رطوبتی (-)؛ α: پارامتر شکل منحنی رطوبتی ($1/cm$)؛ S_{dex}: شاخص دکستر (-)؛EI: انرژی انتگرالی (J/Kg)؛ M_{h0}: پتانسیل کرشهف (cm^2/day).

نتایج ضریب همبستگی خطی ویژگی‌های مطالعه شده در (جدول ۴) نشان داده شد. نکته مهم در شاخص دکستر در خاک‌های مورد پژوهش، همبستگی مثبت و معنی‌دار این شاخص با مقادیر رس ($r=0/76$ در سطح احتمال یک درصد) و همبستگی منفی و معنی‌دار آن با مقادیر شن ($r=-0/8$ در سطح احتمال یک درصد) بود. در واقع در این خاک‌ها، افزایش مقادیر رس، افزایش شاخص دکستر را به دنبال

۱. The terminology committee of soil science society of america

داشت که در بسیاری از مطالعات عکس این مطلب نشان داده‌شده است. امامی و همکاران (۱۳۸۷)، وجود رس زیاد در خاک را عامل افزایش نسبت منافذ بافتی به منافذ ساختمانی و در نتیجه باعث کاهش شیب منحنی رطوبتی در نقطه عطف و شاخص دکستر دانست. (Rahimi et al., 2000) نیز وجود دافعه زیاد بین رس‌ها در خاک‌های با رس زیاد را عامل ناپایداری ساختمان و کاهش شاخص دکستر دانست. مسکینی ویشکایی و میرخانی (۱۳۹۸)، همبستگی مثبت بین شاخص دکستر و مقدار رس در نتایج خود مشاهده کردند که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت داشت. میانگین و میانه رس (به ترتیب ۱۹/۹ و ۱۷/۵ درصد) نسبت به میانگین و میانه شن خاک‌های مورد پژوهش (به ترتیب ۵۵/۰ و ۵۸/۰ درصد) نشان داد که خاک‌ها از مقادیر رس کمتری نسبت به شن برخوردار بودند. وجود این مقدار رس بین ذرات شن در این خاک‌ها باعث افزایش منافذ ساختمانی –به‌ویژه منافذ ساختمانی کوچک نسبت به منافذ بافتی– بین ذرات شن و در نتیجه همبستگی منفی ذرات شن با شاخص دکستر شد. دکستر (۲۰۰۴)، دلیل همبستگی مثبت مقدار رس با شیب منحنی رطوبتی در نقطه عطف را حضور منافذ ساختمانی کوچک عنوان کرد (Dexter, 2004). این مطلب زمانی اهمیت پیدا کرد که همبستگی مثبت معنی‌دار بین شاخص دکستر با کربنات کلسیم معادل (r=۰/۶۴ در سطح احتمال یک درصد)، کربن آلی (r=۰/۲۲ در سطح احتمال پنج درصد)، هدایت الکتریکی (r=۰/۳۹ در سطح احتمال یک درصد) و نسبت جذب سدیم (r=۰/۴۳ در سطح احتمال یک درصد) مشاهده شد. (Bronick & Lal, 2005; SU et al., 2007) مقدار رس، سیلت، ماده آلی و کربنات کلسیم معادل را از عوامل مهم و موثر در تشکیل خاکدانه‌های نواحی خشک و نیمه‌خشک نشان داده‌اند. املاح موجود در خاک نیز باعث افزایش پایداری ساختمان خاک گشته و به تشکیل خاکدانه‌ها کمک می‌کند. لذا با افزایش هدایت الکتریکی، شاخص دکستر نیز افزایش می‌یابد. البته همبستگی بین شاخص دکستر و هدایت الکتریکی به نوع یون‌ها یا نوع نمک‌ها نیز بستگی دارد (امامی و همکاران، ۱۳۸۹). به نظر می‌رسد با توجه به اینکه با افزایش هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم، شاخص دکستر نیز افزایش یافته است، در املاح خاک‌های مورد پژوهش کاتیون‌های کلسیم و منیزیم نسبت به سدیم بیشتر بود. در واقع رس به همراه تمام این عوامل به تعدیل شیب منحنی رطوبتی و کاهش شاخص دکستر در خاک‌ها کمک کرده است. شاید یکی از دلایلی که سبب همبستگی مثبت و معنی‌داری بین شاخص دکستر و انرژی انتگرالی (r=۰/۳۳ در سطح احتمال یک درصد) شده است، همین مطلب باشد. چون خاک‌های با بافت سبک با ساختمان ناپایدار که رطوبت خود را در یک دامنه مکش معین به‌طور ناگهانی از دست می‌دهند، دارای شیب منحنی مشخصه رطوبتی بیشتری نسبت به خاک‌های با بافت سنگین بوده و درنتیجه مستلزم صرف انرژی کمتر برای جذب واحد آب خاک هستند. اما زمانی که بافت سبک دارای ساختمان مناسب و پایدار باشد، خروج رطوبت به صورت ناگهانی نبوده و به علت تعدیل شیب منحنی رطوبتی ناشی از عوامل موثر بر خاکدانه‌سازی یاد شده در بالا، شاخص دکستر کاهش پیدا کرده و خاک، انرژی بیشتری برای جذب واحد آب خاک مصرف می‌کند (Jiang et al., 2005). آب قابل‌استفاده برای گیاه نیز شاخصی از کیفیت فیزیکی خاک است که هرچه مقدار آن بیشتر باشد شاخص دکستر افزایش می‌یابد. وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار (r=۰/۸۰ در سطح احتمال یک درصد) بین این دو ویژگی، این گزاره را تائید می‌کند.

ارتباط منفی و معنی‌دار بین آب قابل‌استفاده برای گیاه و هدایت هیدرولیکی اشباع (r=−۰/۵۰ در سطح احتمال یک درصد)، سبب ارتباط معنی‌دار و مثبت انرژی انتگرالی با آب قابل‌استفاده برای گیاه (r=۰/۶۵ در سطح احتمال یک درصد) گردید. جدول ۴، نشان داد در بررسی جذب آب خاک توسط گیاه نباید آب قابل‌استفاده برای گیاه و هدایت هیدرولیکی خاک را مستقل از هم در نظر گرفت. ممکن است خاکی با وجود رطوبت مناسب، هدایت هیدرولیکی کمتر داشته باشد که خود سبب صرف انرژی بیشتر گیاه برای جذب همان مقدار آب شود (خزاعی و همکاران، ۱۳۹۲). برای رفع این چالش، در این پژوهش پارامتر پتانسیل کرشهف مطرح شد که اثر هدایت هیدرولیکی و مکش خاک را هم‌زمان در نظر می‌گیرد. مطابق جدول ۴، لحاظ کردن هم‌زمان مکش متناظر با رطوبت خاک و هدایت هیدرولیکی در قالب پتانسیل کرشهف، همبستگی منفی و معنی‌دار (r=−۰/۵۰ در سطح احتمال یک درصد)، بین پتانسیل کرشهف و انرژی انتگرالی را نتیجه داد که به این معناست با افزایش پتانسیل کرشهف، انرژی لازم برای جذب آب از خاک توسط گیاه کاهش یافت.

جدول ٤- ضرایب همبستگی خطی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و هیدرولیکی خاک‌های مورد پژوهش

ویژگی	C	Si	ρ_b	MWD	EC	SAR	pH	OC	K_s	CPAW	S_{dex}	EI	M_{h0}
C	۱												
Si	۰/۶۱**	۱											
ρ_b	۰/۷۵**	۰/۶۹**	۱										
MWD	۰/۰۲	−۰/۱۳	−۰/۰۰۳	۱									

EC	۰/۳۱**	۰/۴۷**	۰/۲۹**	۰/۳۰**	۱						
SAR	۰/۴۲**	۰/۵۱**	۰/۳۸**	۰/۳۲**	۰/۸۹**	۱					
pH	۰/۳۹**	۰/۵۶**	۰/۳۸**	۰/۱۷	۰/۷۵**	۰/۵۹**	۱				
OC	۰/۱۸	۰/۲۲*	۰/۲۳**	۰/۰۶	۰/۲۶*	۰/۱۱	۰/۲۶**	۱			
K_s	۰/۳۹**	۰/۵۴**	۰/۲۹**	۰/۰۶	۰/۲۲**	۰/۲۵**	۰/۳۵**	−۰/۰۶	۱		
CPA	۰/۸۴**	۰/۷۹**	۰/۷۶**	−۰/۰۱	۰/۳۹**	۰/۵۲**	۰/۴۸**	۰/۲۴*	۰/۵۰**	۱	
S_{dex}	۰/۷۶**	۰/۷۱**	۰/۸۴**	۰/۰۱	۰/۳۹**	۰/۴۳**	۰/۴۵**	۰/۲۲*	۰/۲۸**	۰/۸۰**	۱
EI	۰/۵۶**	۰/۵۹**	۰/۵۴**	۰/۰۷	۰/۲۶**	۰/۳۶**	۰/۳۰**	۰/۱۸	۰/۴۸**	۰/۶۵**	۰/۳۳**
M_{h0}	۰/۵۰**	۰/۳۷**	۰/۳۶**	−۰/۰۱	−۰/۲۱*	−۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۲۲*	۰/۲۱*	۰/۳۷**	۰/۲۳**

EC											
SAR											
pH											
OC											
K_s											
CPA											
S_{dex}											
EI	۱										
M_{h0}	۰/۵۳**	۱									

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

تعیین حداقل مجموعه داده و شاخص کیفیت خاک

ماتریس همبستگی خطی بین ویژگی‌های خاک، نشان داد ۶۲ جفت مقایسه از بین ۷۸ جفت در سطوح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار بودند (جدول ۴). ازاین‌رو به نظر می‌رسد تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای کاهش تعداد داده‌ها مؤثر باشد.

آرایه اول

نتایج روش تجزیه به مولفه‌های اصلی برای آرایه اول در جدول ۵ نشان داده شده است. ضریب KMO در این آرایه برابر ۰/۷۱۷ (بیشتر از ۰/۶) و آزمون کرویت بارتلت در سطح یک درصد معنی‌دار شد که نشان داد روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی می‌تواند برای کاهش تعداد داده و ویژگی‌های مورد پژوهش مؤثر باشد.

بعد از انجام تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، دو مؤلفه با ارزش ویژه بزرگ‌تر از یک (که ۶۵ درصد از تغییرات را تشریح می‌نمایند)، برای تحلیل انتخاب شدند (جدول ۵). در مؤلفه اصلی اول (PC_1) که ۳۶ درصد از کل واریانس را توجیه می‌کند، جرم مخصوص ظاهری دارای بیشترین بار عاملی (۰/۸۷۸−) بود و به‌عنوان ویژگی اصلی انتخاب شد (جدول ۵). بعد از جرم مخصوص ظاهری، رس و سیلت دارای بار عاملی بیشتر بودند، اما فقط رس در محدوده ۱۰ درصد حد مطلق ویژگی اصلی قرار داشت. با توجه به اینکه این دو ویژگی دارای ضریب همبستگی خطی برابر ۰/۷۵− (بیش از ۰/۶) بودند (جدول ۴)، رس، حذف شد و جرم مخصوص ظاهری با بیشترین بار عاملی به‌عنوان مؤلفه اصلی اول در حداقل مجموعه داده انتخاب شد. در مؤلفه اصلی دوم ویژگی‌های مرتبط با شوری- قلیائیت بار عاملی بیشتر از ۰/۶ داشتند. این مؤلفه اصلی (PC_2)، ۲۹ درصد از کل واریانس را تشریح نمودند. از آن‌جا که هدایت الکتریکی دارای بیشترین بار عاملی (۰/۸۵۲) بود، به‌عنوان ویژگی اصلی انتخاب شد. بعد از هدایت الکتریکی، فقط نسبت جذب سدیم در محدوده ۱۰ درصد حد مطلق ویژگی اصلی قرار داشت. با توجه به اینکه این دو ویژگی دارای ضریب همبستگی خطی برابر ۰/۸۹ (بیش از ۰/۶) بودند (جدول ۴)، نسبت جذب سدیم، حذف و هدایت الکتریکی با بیشترین بار عاملی به مؤلفه اصلی دوم در حداقل مجموعه داده انتخاب شد.

سپس ارزش هر یک از ویژگی‌های انتخاب‌شده با استفاده از تابع تبدیل غیرخطی (رابطه ۷) به مقادیر صفر تا یک تبدیل شد و به دنبال آن مقدار شاخص کیفیت خاک برای هر نمونه خاک مورد پژوهش، بعد از وزن‌دهی ویژگی‌های حداقل مجموعه داده به سه روش واریانس، ضریب تغییرات و سهم اشتراک‌پذیری، تعیین شد.

جدول ۵- مقادیر ویژه، واریانس کل و تجمعی و بارهای عاملی استخراج‌شده به روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای آرایه اول

	PC_1	PC_2	اشتراک واریانس
مقدار ویژه	۲/۸۷۳	۲/۳۳۶	−
واریانس کل (%)	۳۵/۹۱۰	۲۹/۲۰۱	−
واریانس تجمعی (%)	۳۵/۹۱۰	۶۵/۱۱۲	−
ویژگی‌ها			
ρ_b	−۰/۸۷۸		۰/۷۸۰
Clay	۰/۸۵۰	۰/۱۰۶	۰/۷۳۴
Silt	۰/۷۷۸	۰/۲۹۷	۰/۶۹۳
OC	۰/۳۹۷		۰/۱۶۵
EC	۰/۳۸۴	۰/۸۵۲	۰/۸۷۴

SAR	۰/۴۰۹	۰/۷۸۳	۰/۷۸۰
MWD	۰/۲۷۵	−۰/۶۸۴	۰/۵۴۳
pH	−۰/۴۷۴	−۰/۶۴۳	۰/۶۳۹

شاخص کیفیت تجمعی خاک به ترتیب در روابط ۱۰، ۱۱ و ۱۲ به تفکیک هر یک از روش‌های وزن‌دهی واریانس، ضریب تغییرات و سهم اشتراک‌پذیری نشان داده شدند:

$$IQI_{1V} = (0.36\,\rho_b + 0.29\,EC)/0.65 \rightarrow IQI_{1V} = 0.55\,\rho_b + 0.45\,EC$$ رابطه ۱۰)

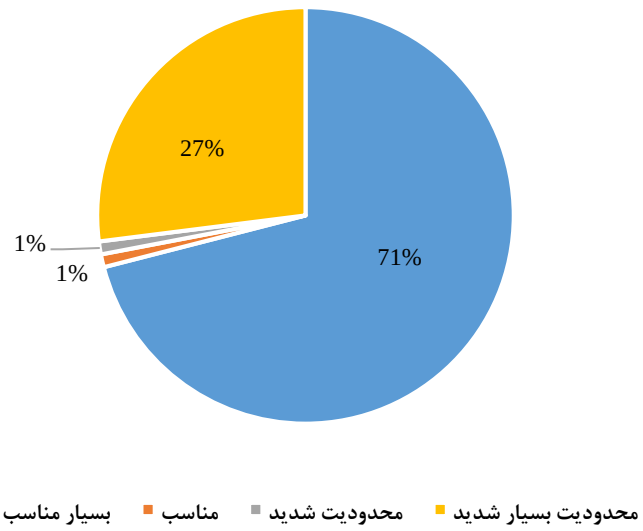
$$IQI_{1CV} = (5\,\rho_b + 77\,EC)/82 \rightarrow IQI_{1CV} = 0.06\,\rho_b + 0.94\,EC$$ رابطه ۱۱)

$$IQI_{1Com} = (0.780\,\rho_b + 0.874\,EC)/1.654 \rightarrow IQI_{1Com} = 0.47\,\rho_b + 0.53\,EC$$ رابطه ۱۲)

در روابط ۱۰ و ۱۲ ضرایب وزنی بین جرم مخصوص ظاهری و هدایت الکتریکی به هم نزدیک بودند درحالی‌که در رابطه ۱۱، تفاوت محسوسی بین وزن‌های دو ویژگی که از طریق ضریب تغییرات حاصل شده‌اند، وجود دارد. مقایسه مقادیر ضریب حساسیت برای سه روش وزن‌دهی (جدول ۶) نشان داد که وزن‌دهی به روش ضریب تغییرات دارای حساسیت بالایی بوده و اختلاف بین خاک‌های مختلف را بهتر نشان می‌دهد. مطابق آرایه اول، ۷۱ درصد از خاک‌های مورد پژوهش دارای کیفیت فیزیکی بسیار مناسب و ۲۷ درصد خاک‌ها محدودیت بسیار شدید داشتند (شکل ۲). با توجه به ضریب رگرسیون بسیار کم جرم مخصوص ظاهری و ضریب زیاد هدایت الکتریکی در رابطه ۱۱، در این آرایه طبقه‌بندی کیفیت خاک در ناحیه مورد پژوهش (دو گروه خاک‌های بسیار مناسب و خاک‌های با محدودیت بسیار شدید) عمدتاً متأثر از شوری خاک بود. مجموعه کوچک از ویژگی‌ها بایستی تغییرات موجود در داده‌ها را توجیه و اطلاعات موجود در ویژگی‌ها را حفظ نماید (Jiang & Thelen, 2004) ولی یکی از معایب این روش آن است که حداقل مجموعه داده ممکن است بیش‌ازاندازه ساده اتفاق افتد و نتواند تغییرات موجود در داده‌ها را توجیه کند (مانند آرایه اول). به همین منظور این آرایه در بررسی کیفیت فیزیکی خاک منطقه حذف شد.

جدول ٦- ضریب حساسیت روش‌های وزن‌دهی در آرایه اول

روش وزن‌دهی	IQI_{min}	IQI_{max}	ضریب حساسیت
واریانس	۷/۸×۱۰$^{-۳}$	۰/۹۹	۱۲۶/۹
ضریب تغییرات	۸/۷×۱۰$^{-۴}$	۱/۰۰	۱۱۴۹/۴
سهم اشتراک‌پذیری	۶/۷×۱۰$^{-۳}$	۰/۹۹	۱۴۷/۸



شکل ۲- طبقه‌بندی خاک‌ها بر اساس شاخص کیفیت تجمعی خاک به روش حداقل مجموعه داده در آرایه اول (Qi et al., 2009)

آرایه دوم

نتایج روش تجزیه به مولفه‌های اصلی برای آرایه دوم در جدول ۷ نشان داده شده است. مقدار ضریب KMO در این آرایه برابر ۰/۷۶۴ (بیشتر از ۰/۶) و آزمون کرویت بارتلت در سطح یک درصد معنی‌دار شد که نشان از مناسب بودن داده‌ها برای تجزیه به مؤلفه‌های اصلی بود.

بعد از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، سه مؤلفه با ارزش ویژه بزرگ‌تر از یک (که ۷۳ درصد از تغییرات را تشریح می‌نمودند)، برای تحلیل انتخاب شدند (جدول ۷). در مؤلفه اصلی اول (PC_1) که ۳۶ درصد از کل واریانس را توجیه می‌کند، آب قابل‌استفاده برای گیاه دارای بیشترین بار عاملی (۰/۹۱۱) بود و به‌عنوان ویژگی اصلی انتخاب شد. بعد از آب قابل‌استفاده برای گیاه، فقط رس در محدوده ۱۰ درصد حد مطلق ویژگی اصلی قرار داشت. رس نقش مهمی در نگهداری آب در خاک و عرضه آن به گیاه دارد. با توجه به اینکه این دو ویژگی دارای ضریب همبستگی خطی برابر ۰/۸۴ (بیش از ۰/۶) بودند (جدول ۴)، رس، حذف و آب قابل‌استفاده برای گیاه با بیشترین بار عاملی در حداقل مجموعه داده انتخاب گردید. در مؤلفه اصلی دوم (PC_2) که ۲۶ درصد از کل واریانس را تشریح می‌کند، هدایت الکتریکی دارای بیشترین بار عاملی (۰/۹۱۲) بود و به‌عنوان ویژگی اصلی انتخاب شد. بعد از هدایت الکتریکی، فقط نسبت جذب سدیم در محدوده ۱۰ درصد حد مطلق ویژگی اصلی قرار داشت. با توجه به ویژگی‌های باقی‌مانده، این مؤلفه در ارتباط با شوری و قلیائیت بود. با توجه به اینکه این دو ویژگی دارای ضریب همبستگی خطی برابر ۰/۸۹ (بیش از ۰/۶) بودند (جدول ۴)، نسبت جذب سدیم، حذف شد و هدایت الکتریکی با بیشترین بار عاملی در مؤلفه اصلی دوم در حداقل مجموعه داده انتخاب گردید. در مؤلفه اصلی سوم (PC_3) نیز که حدود ۱۲ درصد از کل واریانس را تشریح می‌کند، کربن آلی دارای بیشترین بار عاملی (۰/۸۲۷) بود و به‌عنوان ویژگی اصلی انتخاب شد. هیچ ویژگی دیگری در محدوده ۱۰ درصد حد مطلق ویژگی اصلی قرار نداشت. (Zangiabadi et al., 2020) به بررسی روابط شکل و موقعیت منحنی توزیع اندازه منافذ به عنوان یک خصوصیت مهم فیزیکی خاک با آب قابل‌استفاده برای گیاه و دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که میانه، میانگین معادل قطر منافذ، انحراف معیار و چولگی منحنی توزیع اندازه منافذ با آب قابل‌استفاده برای گیاه و دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت در مکش ۳۳۰ سانتی‌متر همبستگی معنی‌دار دارد. (Cullotta et al., 2016) در ارزیابی شاخص کیفیت خاک در دو نوع کاربری متفاوت، از منحنی مشخصه رطوبتی خاک، هدایت هیدرولیکی، شکل و توزیع منافذ و شاخص دکستر استفاده کردند. آن‌ها منحنی مشخصه رطوبتی خاک را به عنوان مهم‌ترین شاخص کیفیت فیزیکی نام بردند، زیرا بسیاری از اطلاعات را می‌توان از این منحنی به دست آورد.

همان‌طور که در پیش یاد شد وزن‌دهی ویژگی‌های حداقل مجموعه داده به سه روش واریانس، ضریب تغییرات و سهم اشتراک‌پذیری انجام شد.

جدول ۷- مقادیر ویژه، واریانس کل و تجمعی و بارهای عاملی استخراج‌شده به روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای آرایه دوم

	PC_1	PC_2	PC_3	اشتراک واریانس
مقدار ویژه	۳/۵۵۳	۲/۶۱۹	۱/۱۶۳	-
واریانس کل (%)	۳۵/۵۲۶	۲۶/۱۹۵	۱۱/۶۳۱	-
واریانس تجمعی (%)	۳۵/۵۲۶	۶۱/۷۲۰	۷۳/۳۵۱	-
ویژگی‌ها				
CPAW	۰/۹۱۱	۰/۱۹۳	۰/۱۵۸	۰/۸۹۲
Clay	۰/۸۵۲	۰/۱۶۰	۰/۱۴۰	۰/۷۷۲
ρ_b	-۰/۸۰۸	-۰/۱۷۷	-۰/۲۰۶	۰/۷۲۶
Silt	۰/۸۰۲	۰/۳۳۵		۰/۷۵۹
K_s	-۰/۶۳۶	-۰/۱۱۶	۰/۲۱۸	۰/۴۶۵
EC	۰/۲۲۳	۰/۹۱۲	۰/۱۴۴	۰/۹۰۷
SAR	۰/۳۳۲	۰/۸۱۷		۰/۷۷۹
pH	-۰/۳۳۷	-۰/۷۱۴	-۰/۲۲۳	۰/۶۷۳
MWD	۰/۱۱۷	-۰/۵۷۴	۰/۵۱۸	۰/۶۱۵
OC		۰/۲۳۶	۰/۸۲۷	۰/۷۴۶

شاخص کیفیت تجمعی خاک به تفکیک هر یک از روش‌های وزن‌دهی واریانس، ضریب تغییرات و سهم اشتراک‌پذیری به ترتیب در روابط ۱۳، ۱۴ و ۱۵ نشان داده شدند:

رابطه ۱۳)
$$IQI_{2V} = (0.36\,CPAW + 0.26\,EC + 0.12\,OC)/0.74 \rightarrow IQI_{2V} = 0.49\,CPAW + 0.35\,EC + 0.16\,OC$$

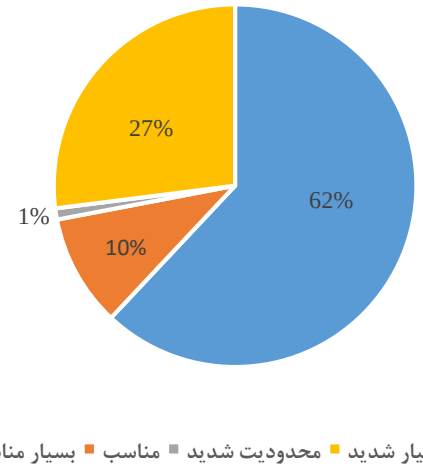
رابطه ۱۴)
$$IQI_{2CV} = (18\,CPAW + 77\,EC + 25\,OC)/120 \rightarrow IQI_{2CV} = 0.15\,CPAW + 0.64\,EC + 0.21\,OC$$

رابطه ۱۵)
$$IQI_{2Com} = (0.892\,CPAW + 0.907\,EC + 0.746\,OC)/2.545 \rightarrow IQI_{2Com} = 0.35\,CPAW + 0.35\,EC + 0.30\,OC$$

مقایسه ضریب حساسیت برای سه روش وزن‌دهی (جدول ۸) نشان داد که وزن‌دهی به روش ضریب تغییرات دارای حساسیت بیشتری بوده و اختلاف بین خاک‌های مختلف را بهتر نشان می‌دهد. مطابق آرایه دوم، ۶۲ و ۱۰ درصد از خاک‌های مورد پژوهش به ترتیب دارای کیفیت فیزیکی بسیار مناسب و مناسب و ۲۷ درصد خاک‌ها دارای محدودیت بسیار شدید بودند (شکل ۳). در آرایه دوم افزون بر هدایت الکتریکی، کربن آلی و آب قابل‌استفاده برای گیاه در شاخص کیفیت خاک وارد شدند. اما همچنان هدایت الکتریکی بر پایه ضریب رگرسیون اهمیت بیشتری داشت.

جدول ۸- ضریب حساسیت روش‌های وزن‌دهی در آرایه دوم

روش وزن‌دهی	IQI_{min}	IQI_{max}	ضریب حساسیت
واریانس	۰/۴۷	۰/۸۴	۱/۷۸
ضریب تغییرات	۰/۱۵	۰/۷۹	۵/۴۳
سهم اشتراک‌پذیری	۰/۳۴	۰/۷۰	۲/۰۸



شکل ۳- طبقه‌بندی خاک‌ها بر اساس شاخص کیفیت تجمعی خاک به روش حداقل مجموعه داده در آرایه دوم (Qi et al., 2009)

آرایه سوم

نتایج روش تجزیه به مولفه‌های اصلی برای آرایه سوم در جدول ۹ نشان داده شده است. مقدار ضریب KMO در این آرایه برابر ۰/۷۸۷ (بیشتر از ۰/۶) و آزمون کرویت بارتلت در سطح یک درصد معنی‌دار شد که نشان از مناسب بودن اطلاعات برای تحلیل بود.

بعد از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، سه مؤلفه با ارزش ویژه بزرگ‌تر از یک (که ۷۱ درصد از تغییرات را تشریح می‌نمودند)، برای تحلیل انتخاب شد (جدول ۹). نکته جالب‌توجه این بود که هر سه مؤلفه اصلی شبیه مؤلفه‌های آرایه دوم بود. درواقع همانند آرایه دوم، مؤلفه اول، دوم و سوم، به ترتیب به‌عنوان "نگهداشت آب در خاک و عوامل مؤثر بر آن"، "شوری و قلیائیت" و "کربن آلی خاک" انتخاب شدند. البته لازم به ذکر است انرژی انتگرالی و شاخص دکستر به دلیل اینکه در محدوده ۱۰ درصد حد مطلق ویژگی اصلی نبودند، وارد مؤلفه‌های

اصلی نشدند. از طرفی به نظر می‌رسد آب قابل‌استفاده برای گیاه، خود نماینده مناسبی از منحنی مشخصه رطوبتی خاک و درنتیجه شرایط منافذ خاک برای تحلیل کیفیت فیزیکی خاک است و همچنین تعیین آن نسبت به انرژی انتگرالی و شاخص دکستر آسان، کم‌هزینه و کم زمان است. (Pulido-Moncada et al., 2015) با مقایسه شاخص دکستر و ۱۲ ویژگی فیزیکی خاک (آب قابل‌استفاده برای گیاه، جرم مخصوص ظاهری، تهویه، هدایت هیدرولیکی اشباع، مقدار ماده آلی خاک، و چند خصوصیت کیفیت بصری ساختمان خاک) پرداخته و در نهایت بیان کردند که برای ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک نمی‌توان تنها به شاخص دکستر اکتفا کرد.

جدول ۹- مقادیر ویژه، واریانس کل و تجمعی و بارهای عاملی استخراج‌شده به روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای آرایه سوم

	PC_1	PC_2	PC_3	اشتراک واریانس
مقدار ویژه	۴/۶۹۹	۲/۶۴۶	۱/۱۹۶	-
واریانس کل (%)	۳۹/۱۵۵	۲۲/۰۵۲	۹/۹۶۶	-
واریانس تجمعی (%)	۳۹/۱۵۵	۶۱/۲۰۸	۷۱/۱۷۴	-
ویژگی‌ها				
CPAW	۰/۹۱۳	۰/۱۹۱	۰/۱۳۹	۰/۸۸۹
Clay	۰/۸۴۳	۰/۱۵۹	۰/۱۶۴	۰/۷۶۲
ρ_b	-۰/۸۱۷	-۰/۱۶۱	-۰/۲۷۵	۰/۷۶۹
Silt	۰/۸۰۱	۰/۳۴۲		۰/۷۵۹
S_{dex}	۰/۷۷۲	۰/۱۹۷	۰/۳۴۵	۰/۷۵۳
EI	۰/۷۴۲		-۰/۱۰۱	۰/۵۶۶
K_s	-۰/۶۱۴	-۰/۱۶۴	۰/۴۳۲	۰/۵۹۰
EC	۰/۲۳۷	۰/۹۰۰	۰/۱۹۰	۰/۹۰۲
SAR	۰/۳۳۳	۰/۸۰۹		۰/۷۷۴
pH	-۰/۳۳۷	-۰/۷۱۰	-۰/۲۰۴	۰/۶۵۹
MWD	۰/۱۵۶	-۰/۶۱۰	۰/۳۹۰	۰/۵۴۹
OC	۰/۱۳۵	۰/۱۷۵	۰/۷۲۱	۰/۵۶۹

شاخص کیفیت تجمعی خاک به تفکیک هر یک از روش‌های وزن‌دهی واریانس، ضریب تغییرات و سهم اشتراک‌پذیری به ترتیب در روابط ۱۶، ۱۷ و ۱۸ نشان داده شدند:

$$IQI_{3V} = (0.39\ CPAW + 0.22\ EC + 0.10\ OC)/0.71 \rightarrow IQI_{3V} = 0.55\ CPAW + 0.31\ EC + 0.14\ OC$$ رابطه ۱۶)

$$IQI_{3CV} = (18\ CPAW + 77\ EC + 25\ OC)/120 \rightarrow IQI_{3CV} = 0.15\ CPAW + 0.64\ EC + 0.21\ OC$$ رابطه ۱۷)

$$IQ_{3Com} = (0.889\ CPAW + 0.902\ EC + 0.569\ OC)/2.360 \rightarrow IQI_{3Com} = 0.38\ CPAW + 0.38\ EC + 0.24\ OC$$ رابطه ۱۸)

مقایسه ضریب حساسیت برای سه روش وزن‌دهی نشان داد که وزن‌دهی به روش ضریب تغییرات همانند دو آرایه پیشین دارای حساسیت بالایی بوده و اختلاف بین خاک‌های مختلف را بهتر نشان می‌دهد (جدول ۱۰). در آرایه سوم نیز مشابه آرایه دوم، ۶۲ و ۱۰ درصد از خاک‌های مورد پژوهش به ترتیب دارای کیفیت فیزیکی بسیار مناسب و مناسب و ۲۷ درصد خاک‌ها دارای محدودیت بسیار شدید بودند. از این‌رو برای این یافته شکل جدید نشان داده نشد.

جدول ۱۰- ضریب حساسیت روش‌های وزن‌دهی در آرایه سوم

روش وزن‌دهی	IQI_{min}	IQI_{max}	ضریب حساسیت
واریانس	۰/۵۳	۰/۸۶	۱/۶۲
ضریب تغییرات	۰/۱۵	۰/۷۹	۵/۴۳
سهم اشتراک‌پذیری	۰/۳۷	۰/۷۶	۲/۰۸

آرایه چهارم

نتایج روش تجزیه به مولفه‌های اصلی برای آرایه چهارم در جدول ۱۱ نشان داده شده است. همانند آرایه‌های پیشین، مقدار ضریب KMO در این مدل برابر ۰/۷۷۹ (بیشتر از ۰/۶) و آزمون کرویت بارتلت در سطح یک درصد معنی‌دار شد که نشان از مناسب بودن اطلاعات برای تحلیل بود.

بعد از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، چهار مؤلفه با ارزش ویژه بزرگ‌تر از یک (که ۷۶ درصد از تغییرات را تشریح می‌نمودند)، برای تحلیل انتخاب شد (جدول ۱۱). در مؤلفه اصلی اول (PC_1) که ۲۹ درصد از کل واریانس را توجیه می‌کند، شاخص دکستر، آب قابل‌استفاده برای گیاه، رس و سیلت دارای بیشترین بار عاملی بودند. به‌نوعی این مؤلفه را می‌توان در ارتباط با مشخصه‌های نگهداشت رطوبتی خاک دانست. در مؤلفه اول، شاخص دکستر دارای بیشترین بار عاملی (۰/۹۴۲) بود و به‌عنوان ویژگی اصلی انتخاب شد. بعد از شاخص دکستر، فقط جرم مخصوص ظاهری در محدوده ۱۰ درصد حد مطلق ویژگی اصلی قرار داشت. با توجه به اینکه این دو ویژگی دارای ضریب همبستگی خطی برابر ۰/۸۴- (بیش از ۰/۶) بودند (جدول ۴)، جرم مخصوص ظاهری، حذف شد و شاخص دکستر با بیشترین بار عاملی به‌عنوان مؤلفه اصلی اول در حداقل مجموعه داده انتخاب شد. تاثیرپذیری زیاد منحنی رطوبتی از اندازه و آرایش منافذ خاک نشان می‌دهد که شیب این منحنی در نقطه عطف (شاخص دکستر)، می‌تواند منعکس‌کننده جنبه‌های مختلف کیفیت خاک از قبیل نفوذ، سخت شدگی و فشردگی باشد که بر سهولت رشد گیاه موثرند (Dexter, 2004). در مؤلفه اصلی دوم (PC_2) که ۲۰ درصد از کل واریانس را تشریح کرد، همانند آرایه‌های پیشین ویژگی‌های مرتبط با شوری و قلیائیت قرار داشتند. در این مؤلفه، هدایت الکتریکی دارای بیشترین بار عاملی (۰/۸۹۶) بود و به‌عنوان ویژگی اصلی انتخاب شد. بعد از هدایت الکتریکی، فقط نسبت جذب سدیم در محدوده ۱۰ درصد حد مطلق ویژگی اصلی قرار داشت. با توجه به اینکه این دو ویژگی دارای ضریب همبستگی خطی برابر ۰/۸۹ (بیش از ۰/۶) بودند (جدول ۴)، نسبت جذب سدیم، حذف و هدایت الکتریکی با بیشترین بار عاملی به‌عنوان مؤلفه اصلی دوم در حداقل مجموعه داده انتخاب شد. در مؤلفه اصلی سوم (PC_3) که ۱۷ درصد از کل واریانس را تشریح کرد، ویژگی‌های مرتبط با قابلیت و انرژی جذب آب توسط گیاه (انرژی انتگرالی و پتانسیل کرشهف) دارای بیشترین بار عاملی بودند. در این مؤلفه انرژی انتگرالی آب دارای بیشترین بار عاملی (۰/۷۹۸) بود و به‌عنوان ویژگی اصلی انتخاب شد. بعد از انرژی انتگرالی آب، فقط پتانسیل کرشهف در خاک در محدوده ۱۰ درصد حد مطلق ویژگی اصلی قرار داشت. با توجه به این‌که این دو ویژگی دارای ضریب همبستگی خطی برابر ۰/۵۳- (کمتر از ۰/۶) بودند (جدول ۴)، پتانسیل کرشهف نیز در مجموعه باقی ماند و انرژی انتگرالی آب با بیشترین بار عاملی و پتانسیل کرشهف به ترتیب به‌عنوان ویژگی اصلی و دوم در حداقل مجموعه داده انتخاب گردید. در مؤلفه اصلی چهارم (PC_4) نیز که حدود ۹ درصد از کل واریانس را تشریح می‌کند، کربن آلی دارای بیشترین بار عاملی (۰/۸۴۸) بود و به‌عنوان ویژگی اصلی انتخاب شد. هیچ ویژگی دیگری در محدوده ۱۰ درصد حد مطلق ویژگی اصلی قرار نداشت. (Andrews et al., 2002) معتقدند برای ارزیابی کیفیت خاک، بایستی ویژگی‌هایی که تغییرات کیفیت را به درستی نشان دهد انتخاب شوند. ایشان از بین ۸۰ ویژگی که در ارتباط با ویژگی‌های اکوسیستمی و روابط مربوط به کیفیت خاک بود، ۱۰ ویژگی را برای بررسی تغییرات کیفیت خاک انتخاب کردند. (Sione et al., 2017) از بین ویژگی‌های خاک، شاخص پایداری ساختمان، مواد آلی، سدیم قابل تبادل، اسیدیته خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع و هدایت الکتریکی را به عنوان حداقل مجموعه داده انتخاب نمودند. زنگی‌آبادی و همکاران (۱۴۰۰)، به منظور ارزیابی شاخص کیفیت فیزیکی خاک برای به دست آوردن حداقل مجموعه داده‌ها، از تجزیه به مولفه‌های اصلی استفاده کرد. ۶ ویژگی متاثر از منافذ خاک مانند رطوبت قابل استفاده و انرژی انتگرالی در مولفه‌ها باقی ماند که ۹۰ درصد از تغییرات خاک‌ها را توجیه می‌کرد.

شاخص کیفیت تجمعی خاک به تفکیک هر یک از روش‌های وزن‌دهی واریانس، ضریب تغییرات و سهم اشتراک‌پذیری به ترتیب در روابط ۱۹، ۲۰ و ۲۱ نشان داده شدند:

$$IQI_{4V} = (0.29\,S_{dex} + 0.20\,EC + 0.17\,EI + 0.17\,M_{h0} + 0.09\,OC)/0.92 \rightarrow IQI_{4V} = 0.31\,S_{dex} + 0.21\,EC + 0.19\,EI + 0.19\,M_{h0} + 0.10\,OC$$ رابطه ۱۹)

$$IQI_{4CV} = (14\,S_{dex} + 77\,EC + 11\,EI + 35\,M_{h0} + 25\,OC)/162 \rightarrow IQI_{4CV} = 0.09\,S_{dex} + 0.48\,EC + 0.07\,EI + 0.21\,M_{h0} + 0.15\,OC$$ رابطه ۲۰)

$$IQ_{4Com} = (0.930\,S_{dex} + 0.904\,EC + 0.769\,EI + 0.630\,M_{h0} + 0.770\,OC)/4.003 \rightarrow IQI_{4Com} = 0.23\,S_{dex} + 0.23\,EC + 0.19\,EI + 0.16\,M_{h0} + 0.19\,OC$$ رابطه ۲۱)

مقایسه ضریب حساسیت برای سه روش وزن‌دهی نشان داد که وزن‌دهی به روش ضریب تغییرات دارای حساسیت بیشتری بوده و

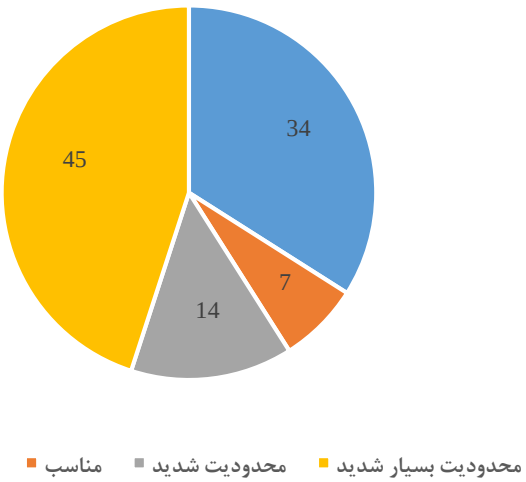
اختلاف بین خاک‌های مختلف را بهتر نشان می‌دهد (جدول ۱۲). مطابق آرایه چهارم، ۳۴ و ۷ درصد از خاک‌های مورد پژوهش دارای کیفیت فیزیکی بسیار مناسب و مناسب و ۱۴ و ۴۵ درصد خاک‌ها دارای محدودیت شدید و بسیار شدید بودند (شکل ۴).

جدول ۱۱- مقادیر ویژه، واریانس کل و تجمعی و بارهای عاملی استخراج شده به روش تجزیه به مولفه‌های اصلی برای آرایه چهارم

	PC_1	PC_2	PC_3	PC_4	اشتراک واریانس
مقدار ویژه	۳/۸۲۷	۲/۶۱۹	۲/۲۳۹	۱/۱۵۹	–
واریانس کل (%)	۲۹/۴۴۲	۲۰/۱۵۰	۱۷/۲۲۱	۸/۹۱۸	–
واریانس تجمعی (%)	۲۹/۴۴۲	۴۹/۵۹۲	۶۶/۸۱۳	۷۵/۷۳۱	–
ویژگی‌ها					
S_{dex}	۰/۹۴۲	۰/۱۸۶			۰/۹۳۰
ρ_b	-۰/۸۶۳	-۰/۱۴۷	-۰/۲۲۲	-۰/۱۰۹	۰/۸۲۸
CPAW	۰/۸۲۲	۰/۱۸۷	۰/۴۱۵		۰/۸۸۷
Clay	۰/۷۸۱	۰/۱۴۱	۰/۳۹۴		۰/۷۹۲
Silt	۰/۶۵۵	۰/۳۴۱	۰/۴۵۴		۰/۷۵۲
EC	۰/۲۳۶	۰/۸۹۶		۰/۱۹۰	۰/۹۰۴
SAR	۰/۳۲۲	۰/۸۰۱	۰/۱۴۷		۰/۷۷۱
pH	-۰/۳۰۶	-۰/۷۱۶	-۰/۱۴۲	-۰/۲۱۵	۰/۶۷۲
MWD	۰/۱۷۵	-۰/۶۰۳		۰/۳۹۵	۰/۵۵۱
EI	۰/۳۳۸		۰/۷۹۸	۰/۱۱۴	۰/۷۶۹
M_{h0}	-۰/۱۴۰		-۰/۷۱۹	-۰/۳۰۲	۰/۶۳۰
K_s	-۰/۲۲۸	-۰/۱۸۷	-۰/۶۶۲	۰/۲۵۴	۰/۵۹۰
OC		۰/۱۷۶	۰/۱۰۴	۰/۸۴۸	۰/۷۷۰

جدول ۱۲- ضریب حساسیت روش‌های وزن‌دهی در آرایه چهارم

روش وزن‌دهی	IQI_{min}	IQI_{max}	ضریب حساسیت
واریانس	۰/۳۰	۰/۹۰	۳/۰۴
ضریب تغییرات	۰/۰۹	۰/۸۵	۹/۷۸
سهم اشتراک‌پذیری	۰/۲۲	۰/۸۱	۳/۶۸



شکل ٤- طبقه‌بندی خاک‌ها بر اساس شاخص کیفیت تجمعی خاک به روش حداقل مجموعه داده در آرایه چهارم (Qi et al., 2009)

مقایسه میانگین بین آرایه‌ها

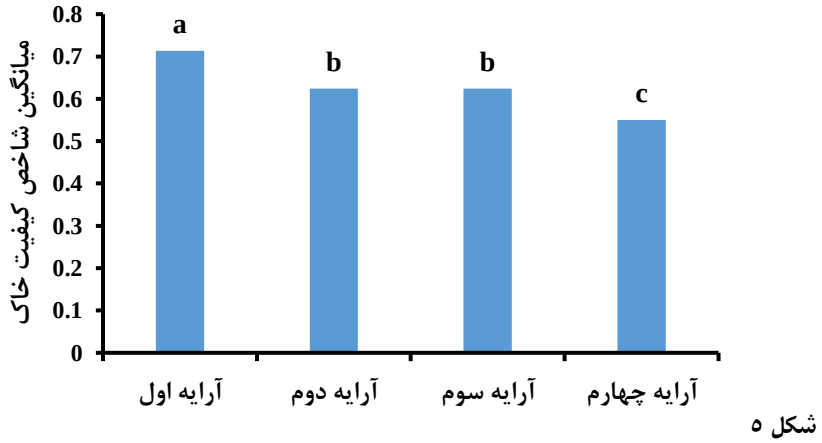
برای مقایسه اختلاف آماری بین آرایه‌ها از روش تجزیه واریانس (ANOVA) استفاده شد. با توجه به جدول تجزیه واریانس (جدول ۱۳)، بین آرایه‌ها از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۹۹ درصد (p<۰/۰۱) مشاهده شد.

جدول ۱۳- جدول تجزیه واریانس مقایسه آرایه‌های مختلف

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات
آرایه	۳	۰/۸۵**
خطا	۷۴۸	۰/۰۸
کل	۷۵۱	۰/۰۸

** معنی‌داری در سطح احتمال ۹۹ درصد (p<۰/۰۱)

میانگین شاخص کیفیت فیزیکی خاک در آرایه اول (۰/۷۱)، آرایه دوم و سوم (۰/۶۲) و آرایه چهارم (۰/۵۵) بود. نتایج مقایسه میانگین شاخص کیفیت فیزیکی بین آرایه‌های مختلف با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن (شکل ۵) نشان داد که بین آرایه‌های دوم و سوم تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۹۹ درصد (p<۰/۰۱) وجود نداشت. به این معنا که اضافه شدن انرژی انتگرالی و شاخص دکستر در آرایه سوم، با وجود صرف انرژی و زمان بیشتر نسبت به آرایه دوم، تغییری در میانگین کیفیت فیزیکی خاک نداشت و آب قابل‌استفاده برای گیاه، خود نماینده مناسبی از منحنی مشخصه رطوبتی خاک و شرایط منافذ آن بود. بین آرایه چهارم با بقیه آرایه‌ها تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۹۹ درصد (p<۰/۰۱) وجود داشت. اضافه کردن پتانسیل کرشهف (لحاظ کردن هم‌زمان مکش متناظر با رطوبت خاک و هدایت هیدرولیکی) در آرایه چهارم با هدف تاثیرگذاری انتخاب درست ویژگی‌ها بر کیفیت فیزیکی خاک انجام شد. درواقع این فرضیه آزمون شد که در صورت ورود ویژگی‌های صحیح در تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، حتی با صرف هزینه و زمان بیشتر، نتایج مناسب و متفاوتی از کیفیت فیزیکی خاک حاصل می‌شود. نتایج نشان داد کیفیت خاک‌ها از ۶۲ درصد خاک‌های بسیار مناسب و ۲۷ درصد خاک‌های با محدودیت بسیار شدید در آرایه دوم و سوم به ۳۴ درصد خاک‌های بسیار مناسب و ۴۵ درصد با محدودیت بسیار شدید در آرایه چهارم تبدیل شد. بسیاری از پژوهشگران ویژگی‌هایی از خاک که نماینده بهتری از کیفیت خاک و منعکس‌کننده اهداف مدیریتی هستند را به عنوان حداقل مجموعه داده‌های موثر بر کیفیت خاک پیشنهاد کردند. در نتیجه بایستی ویژگی‌هایی استفاده شود که نسبت به مدیریت حساسیت بیشتری دارند (Imaz et al., 2010; Masto et al., 2007). (Qi et al., 2009)، معتقدند با وجود این‌که استفاده از کل ویژگی‌ها منجر به حصول نتایج دقیق‌تری می‌گردد ولی محاسبه شاخص کیفیت خاک با استفاده از حداقل مجموعه داده، صرفه‌جویی در وقت و هزینه را به دنبال دارد.



شکل ۵

شکل ۵- مقایسه میانگین شاخص کیفیت خاک بین آرایه‌ها
حروف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌داری بین میانگین‌هاست.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف تعیین نقش تعداد و نوع ویژگی‌ها بر کیفیت فیزیکی خاک در گندم‌زارهای دشت شبستر با استفاده از روش حداقل مجموعه داده انجام شد. نتایج ضریب حساسیت بین سه روش وزن‌دهی نشان داد، وزن‌دهی به روش ضریب تغییرات دارای بیشترین

حساسیت است. اختلاف معنی‌دار ($p<۰/۰۱$) آرایه چهارم با آرایه‌های پیشین و ضریب حساسیت بالای این آرایه (۹/۷۸) با آرایه‌های دوم و سوم (هر دو ۵/۴۳) نشان داد که اضافه شدن صحیح پتانسیل کرشهف به همراه انرژی انتگرالی و شاخص دکستر به مجموعه داده‌ها، باوجود صرف هزینه و زمان بیشتر، منجر به نتایج مناسب و متفاوتی از کیفیت فیزیکی خاک شد. به طوری‌که کیفیت خاک‌ها از ۷۲ درصد خاک‌های بسیار مناسب و مناسب، و ۲۸ درصد خاک‌های با محدودیت شدید و بسیار شدید در آرایه دوم و سوم به ۴۱ درصد خاک‌های بسیار مناسب و مناسب، و ۵۹ درصد خاک‌های با محدودیت شدید و بسیار شدید در آرایه چهارم تبدیل شد. این مطلب نشان‌دهنده آن است که ساده‌سازی نظام ارزیابی کیفیت خاک با استفاده از ویژگی‌های آسان اندازه‌گیری شونده لزوماً به نتایج صحیح منتهی نمی‌شود. نکته دارای اهمیت، حضور هدایت الکتریکی در تمام آرایه‌ها به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های اصلی بود و این نشان از اهمیت این ویژگی در منطقه مورد پژوهش بود.

نتایج این پژوهش نشان داد فقط ورود تعداد زیادی از ویژگی‌های فیزیکی خاک در تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای تعیین شاخص کیفیت فیزیکی خاک، ملاک عمل نبوده و بایستی چند نکته را مدنظر قرار داد:

انتخاب مجموعه صحیح و مناسب از ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی

هزینه و زمان اندازه‌گیری ویژگی‌ها

انتخاب مناسب‌ترین ویژگی‌های فیزیکی خاک و تجمیع آن‌ها در قالب یک شاخص کیفی، می‌تواند به گرفتن تصمیمات صحیح مدیریتی اراضی بیانجامد. البته بایستی توجه شود که در بررسی کیفیت خاک و تصمیمات مدیریتی، عوامل مختلفی غیر از شرایط متأثر از ویژگی‌های خاک در منطقه، ازجمله نوع محصول، شرایط اقلیمی، کیفیت آب، شرایط توپوگرافی و مؤلفه‌های مدیریت مزرعه (تاریخ کشت، تراکم کشت، آفات و غیره) مؤثرند که نتایج را تحت‌تاثیر قرار می‌دهند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

امامی، حجت.، شرفا، مهدی.، نیشابوری، محمدرضا و لیاقت، عبدالمجید (۱۳۸۷). برآورد شاخص کیفیت فیزیکی خاک با استفاده از ویژگی‌های زودیافت خاک در تعدادی از خاک‌های شور و آهکی. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۳۹(۱)، ۳۹-۴۶.

امامی، حجت.، لکزیان، امیر و مهاجرپور، مهدی (۱۳۸۹). بررسی روابط بین شیب منحنی رطوبتی و بعضی از ویژگی‌های فیزیکی کیفیت خاک. *نشریه آب و خاک*، ۲۴(۵)، ۱۰۲۷-۱۰۳۵.

خزاعی، سحر.، انصاری، حسین.، قهرمان، بیژن و ضیایی، علی‌نقی (۱۳۹۲). بررسی تاثیر شوری و سدیم بر پخشیدگی و هدایت هیدرولیکی غیراشباع. *نشریه آب و خاک*، ۲۷(۲)، ۳۰۴-۳۱۲.

زنگی‌آبادی، مهدی.، گرجی، منوچهر و کشاورز، پیمان (۱۴۰۰). تعیین شاخص کیفیت فیزیکی خاک‌های با بافت متوسط و سبک در استان خراسان رضوی. *نشریه آب و خاک*، ۳۵(۱)، ۱۰۷-۱۱۹.

عثمانی، ایوب.، عسگرزاده، حسین و اسدزاده، فرخ (۱۳۹۹). مقایسه شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک سطحی و زیر سطحی زیر کشت آفتابگردان و گندم. *مجله پژوهش‌های خاک*، ۳۴(۳)، ۳۷۳-۳۸۶.

مسکینی ویشکایی، فاطمه و میرخانی، رسول (۱۳۹۸). اثر رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای در تعیین و ارزیابی شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۰(۴)، ۸۳۶-۸۴۶.

REFRENCES

Andrews, S. S., Karlen, D., & Mitchell, J. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *90*(1), 25-45 .

Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M. R., Mahboubi, A .A., Nosrati, A., & Dexter, A. R. (2010). Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. *Plant and soil*, *335*, 229-244 .

Bartlett, M. S. (1954). A note on the multiplying factors for various χ 2 approximations. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 296-298 .

Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, *124*(1-2), 3-22 .

Cullotta, S., Bagarello, V ,.Baiamonte, G., Gugliuzza, G., Iovino, M., La Mela Veca, D. S., Sferlazza, S. (2016).

Comparing different methods to determine soil physical quality in a Mediterranean forest and pasture land. *Soil Science Society of America Journal*, *80*(4), 1038-1056 .

da Paixão, F. J., de Andrade, A. R., de Azevedo, C. A., de Lima, V. L., & Dantas Neto, J. (2009). Uso da aproximação fractal no ajuste da curva de retenção de água no solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, *13*(3), 282-288 .

Dane ,J. (2002). Water retention and storage. *Physical Methods*, 671-720 .

Dexter, A. (2004). Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, *120*(3-4), 201-214 .

Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. *Defining soil quality for a sustainable environment*, *35*, 1-21 .

Emami, H., Shorafa, M., Neyshabouri, M. R., & Liyaghat, A. M. (2009). Determining soil quality index using the easily measured soil properties in salin and calcareous soils. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *39*(1), 39-46. (In Persian)

Emami, H., Lakzian, A., & Mohagerpour, M. (2010). Study of the relationship between slope of retention curve and some physical properties of soil quality. *Journal of Water and soil*, *24*(5), 1027-1035. (In Persian)

Flint, A. L., & Flint, L. E. (2002). 2.2 Particle Density. *Methods of soil analysis: Part 4 physical methods*, *5*, 229-240 .

Gee, G., Or, D., Dane, J., & Topp, C. (2002). Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods. *Soil Science Society of America, Inc*, 255-293 .

Govaerts, B., Sayre, K. D., & Deckers, J. (2006). A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil and Tillage Research*, *87*(2), 163-174 .

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 .

Imaz, M ,.Virto, I., Bescansa, P., Enrique, A., Fernandez-Ugalde, O., & Karlen, D. (2010). Soil quality indicator response to tillage and residue management on semi-arid Mediterranean cropland. *Soil and Tillage Research*, *107*(1), 17-25 .

Institute, S. Q. (1998 .(*Soil quality test kit guide*. Soil Quality Institute, National Resources Conservation Service, US ….

Jeffries, C. (1941). A method of preparing soils for petrographic analysis. *Soil Science*, *52*(6), 451-454 .

Jiang, P., & Thelen, K. (2004). Effect of soil and topographic properties on crop yield in a North-Central corn–soybean cropping system. *Agronomy Journal*, *96*(1), 252-258 .

Jiang, Y., Liang, W., Wen, D., Zhang, Y., & Chen, W. (2005). Spatial heterogeneity of DTPA-extractable zinc in cultivated soils induced by city pollution and land use. *SCIENCE IN CHINA SERIES C LIFE SCIENCES-ENGLISH EDITION-*, *48*, 82 .

Jolliffe, I. T. (2002). Principal component analysis for special types of data. Springer .

Kaiser, H. F. (1974). An index of factorial simplicity. *psychometrika*, *39*(1), 31-36 .

Karlen, D. L., Ditzler, C. A., & Andrews, S. S. (2003). Soil quality: why and how? *Geoderma*, *114*(3-4), 145-156 .

Khazaei, S., Ansari, H., Ghahraman, B., & Ziaee, A. N. (2013). Evaluation of water salinity and sodicity effect on diffusivity and unsaturated hydraulic conductivity. *Journal of Water and soil*, *27*(2), 304-312. (In Persian)

Kline, R. B. (2005). Principles and practice of structural equation modeling 2nd ed. *New York: Guilford*, *3* .

Lal, R .(1994) .Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics .

Magalhães, W. d. A., Freddi, O. d. S., Wruck, F. J., Petter, F. A., & Tavanti, R. F. (2018). Soil water retention curve and s index as soil physical quality indicators for integrated production systems. *Engenharia Agrícola*, *38*, 64-73 .

Masto, R. E., Chhonkar, P. K., Singh, D., & Patra, A. K. (2007). Soil quality response to long-term nutrient and crop management on a semi-arid Inceptisol. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *118*(1-4), 130-142 .

Masto, R. E., Chhonkar, P. K., Singh, D., & Patra, A. K. (2008). Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilisation and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. *Environmental monitoring and assessment*, *136*(1), 419-435 .

Meskini-Vishkaee, F., & Mirkhani, R. (2019). The Effect of Field Capacity in Determination and Evaluation of the Soil Physical Quality Indices. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *50*(4), 836-846 . (In Persian)

Minasny, B., & McBratney, A. (2003). Integral energy as a measure of soil-water availability. *Plant and Soil*, *249*(2), 253-262 .

Nelson, D. a., & Sommers, L. E. (1983). Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties*, *9*, 539-579 .

Nimmo, J. R., & Perkins, K. S. (2002). 2.6 Aggregate stability and size distribution. *Methods of soil analysis: Part 4 physical methods*, *5*, 317-328 .

Noellemeyer, E., Quiroga, A. R & ,.Estelrich, D. (2006). Soil quality in three range soils of the semi-arid Pampa of Argentina. *Journal of Arid Environments*, *65*(1), 142-155 .

Ortega, R. A., & Santibanez, O. A. (2007). Determination of management zones in corn (Zea mays L.) based on soil fertility. *Computers and Electronics in agriculture*, *58*(1), 49-59 .

Osmani, A., Asgarzadeh, H., & Asadzadeh, F. (2020). Comparison of Physical Quality Indices of Topsoil and Subsoil under Wheat and Sunflower Cultivation. *Iranian Journal of Soil Research* ,*34*(3) ,373-386 . (In Persian)

Page, A., Miller, R., & Keeney, D. (1982). Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy, Inc., and Soil Science Society of America. *Inc., Publisher, Madison, Wisconsin USA* .

Pallant, J. (2020). SPSS survival manual: A step by step guide to data analysis using IBM SPSS. Routledge .

Peters, D. (1965). Water availability. Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling, 9, 279-285 .

Pulido-Moncada, M., Ball, B. C., Gabriels, D., Lobo, D., & Cornelis, W. M. (2015). Evaluation of soil physical quality index S for some tropical and temperate medium-textured soils. *Soil Science Society of America Journal*, *79*(1), 9-19 .

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 .

Rahimi, H., Pazira, E., & Tajik, F. (2000). Effect of soil organic matter, electrical conductivity and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates. *Soil and Tillage Research*, *54*(3-4), 145-153 .

Reynold, W., Elrick, D., Youngs, E., Amoozegar, A., Booltink, H., & Bouma, J. (2002). Saturated and field saturated water flow parameters. pp: 797-878. *Methods of soil analysis. Parth, 4* .

Rezaei, S. A., Gilkes, R. J., & Andrews, S. S. (2006). A minimum data set for assessing soil quality in rangelands. *Geoderma*, *136*(1-2), 229-234 .

Şeker, C., Özaytekin, H. H., Negiş, H., Gümüş, İ., Dedeoğlu, M., Atmaca, E., & Karaca, Ü. (2017). Assessment of soil quality index for wheat and sugar beet cropping systems on an entisol in Central Anatolia. *Environmental monitoring and assessment*, *189*, 1-11 .

Shukla, M., Lal, R., & Ebinger, M. (2006). Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil and Tillage Research*, *87*(2), 194-204 .

Sione, S. M. J., Wilson, M. G., Lado, M., & González, A. P. (2017). Evaluation of soil degradation produced by rice crop systems in a Vertisol, using a soil quality index. *Catena*, *150*, 79-86 .

SU, Y.-z., Fang, W., ZHANG, Z.-h., & DU, M.-w. (2007). Soil properties and characteristics of soil aggregate in marginal farmlands of oasis in the middle of Hexi Corridor Region, Northwest China. *Agricultural Sciences in China*, *6*(6), 706-714 .

Topp, G., Reynolds, W., Cook, F., Kirby, J., & Carter, M. (1997). Physical attributes of soil quality. In *Developments in soil science* (Vol. 25, pp. 21-58). Elsevier .

Van Dam, J. C., & Feddes, R. A. (2000). Numerical simulation of infiltration, evaporation and shallow groundwater levels with the Richards equation. *Journal of Hydrology*, *233*(1-4), 72-85 .

Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, *44*(5), 892-898 .

Van Genuchten, M. v., Leij, F., & Yates, S. (1991). The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils .

Van Lier, Q. d. J., Metselaar, K., & Van Dam, J. C. (2006) .Root water extraction and limiting soil hydraulic conditions estimated by numerical simulation. *Vadose Zone Journal*, *5*(4), 1264-1277 .

Wander, M. M., Walter, G. L., Nissen, T. M., Bollero, G. A., Andrews, S. S., & Cavanaugh-Grant, D. A. (2002). Soil quality: science and process. *Agronomy Journal*, *94*(1), 23-32 .

Zangiabadi, M., Gorji, M., & Keshavarz, P. (2021). Determination of Soil Physical Quality Index in Medium to Coarse-textured Soils of Khorasan-Razavi Province. *Water and Soil*, *35*(1), 107-119 .(In Persian)

Zangiabadi, M., Gorji, M., Shorafa, M., Khorasani, S. K., & Saadat, S. (2020). Effect of soil pore size distribution on plant-available water and least limiting water range as soil physical quality indicators. *Pedosphere*, *30*(2), 253-262 .

The effect of number and type of soil physical and hydraulic properties on representing the soil physical quality (case study: Shabestar Plain)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Making management decisions for the quantitative and qualitative improvement of product production effectively begins with selecting the correct and appropriate set of physical and hydraulic characteristics in the form of a soil physical quality index.

Materials and Methods

In order to investigate the physical quality of Shabaster Plain which were under wheat cultivation and to determine the role of the number and type of properties on the quality of the soils, 94 soils from these lands until the year 2022, were selected. To determine the soil physical quality index (SPQI), the minimum data set (MDS) was used by principal component analysis (PCA). 13 physical, chemical, and hydraulic properties were consciously entered into four stages in the principal component analysis so that the output be not only the minimum data set but also the best data set. The first array includes 8 soil properties that are easily measured, the second array includes properties of the first array along with conventional plant available water (CPAW) and hydraulic conductivity (K_s), the third array includes properties of the second array along with integral energy (EI) and dexter index (S_{dex}), and the fourth array includes properties of the third array along with Kirchhoff potential (M_{h0}).

Results and Discussion

The first array was discarded due to the oversimplification of the minimum data set, as it could not properly justify the information of variables. Despite spending more time and cost on the third array than the second array, in both arrays, the three components (CPAW, EC, and OC) remained in the minimum data set and no significant difference was observed in the average of physical quality index between the two arrays. While in the fourth array, the inclusion of M_{h0} as a property that includes the suction corresponding to soil moisture and hydraulic conductivity at the same time, caused the effect of other properties to be revealed correctly. Comparing the mean soil physical quality index between the arrays with Duncan's test showed a significant difference at the 99% probability level ($p<0.01$) between the fourth array and the second and third arrays. The high sensitivity coefficient of the fourth array (9.78) with the second and third arrays (5.43) showed that the correct addition of the Kirchhoff potential to the data set, led to different results in terms of classifying soil physical quality. As a result, the quality of the soils decreased from 72% of very suitable and suitable soils and 28% of soils with severe and very severe restrictions in the second and third arrays to 41% of very suitable and suitable soils and 59% of soils with restrictions in the fourth array, it got really, high intense. The important point was the presence of EC in all arrays as one of the main components, which was a sign of the importance of this property in the studied region.

Conclusion

This data demonstrates that using traits that can be easily measured to simplify the soil quality assessment system does not always produce accurate results.

Keywords: Kirchhoff Potential, Minimum Data Set, Principal Component Analysis, Sensitivity Coefficient.