



## **The effect of different levels of soil water repellency resulting from the addition of manure on soil stability and soil water availability characteristics**

**Masumeh Nikpour<sup>1✉</sup>, Mohammad Rza Neyshaburi<sup>2</sup>, Shahin Oustan<sup>3</sup>, Hormozd Naghavi<sup>4</sup>**

1. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty Of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email:

[mnikpourn@gmail.com](mailto:mnikpourn@gmail.com)

2. Department of Soil Science, Faculty Of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: [neysmhr@hotmail.com](mailto:neysmhr@hotmail.com)

3. Department of Soil Science, Faculty Of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: [ostan@gmail.com](mailto:ostan@gmail.com)

4. Soil and Water Research Department, Agriculture and Natural Resources Research Center of Kerman; AREEO, Kerman, Iran, Email: [naghavii@yahoo.com](mailto:naghavii@yahoo.com)

---

### **Article Info**

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** May. 13, 2022

**Revised:** June. 29, 2022

**Accepted:** July. 5, 2022

**Published online:** Aug. 23, 2022

**Keywords:**

Intrinsic sorptivity,  
Optimum water repellency,  
Organic matter,  
Soil quality indices

---

### **ABSTRACT**

Soil water repellency is an important physical phenomenon. In sub-critical water repellency conditions, many studies have reported positive repellency impacts. It seems that the presence of soil water repellency in a Specified range (Optimum water repellency) is not only a cause of destructive impacts in the soil but also is a positive factor in improving the soil physical quality. In this study, pre-treatment of organic matter (as a hydrophobic agent) was applied on 0, 1, 3, 5, 8 and 10% by weight of manure, on sandy loam and clay loam samples (In Kerman province; through 2020-2021). After three months incubation period and wetting and drying cycles of soils, soil water repellency was calculated using WDPT (Water drop penetration time), RI (Repellency index) and  $\beta$  methods. Then 21 soil quality indices (water availability and soil stability structure characteristics) were measured in the samples, and MDS (Minimum data set) indicator were selected using PCA (Principal component analysis). The Optimum water repellency, which is equal to 0.95 of the predicted values with the equation fitted to data, was calculated by plotting the data of MDS indicator and water repellency index. Considering the significant effect of manure on soil water repellency indices, and also the significant correlation of RI with most of the water availability and soil structure characteristics, RI was selected to determine the optimum water repellency. After checking the results of graph and 11 MDS indicators, it was determined that DC, TS and  $Q_1$  indicators had a decreasing and then increasing trend with increasing water repellency, and the rest of indicators showed an increasing trend and then a decreasing trend. The Range of Optimum water repellency (0.95LL-0.95UL) is defined in an extensive range (4.40-4.86), when the soil structure indicators are investigated and in a limited range (3.72-4.28) when it is only affected by water availability. Finally, in unlimited conditions, the lower limit of 3.72 and the upper limit of 4.28 were considered for the optimum water repellency.

---

Cite this article: Nikpour, M., Neyshaburi, M. R., Oustan, Sh., & Naghavi, H. (2022). The effect of different levels of soil water repellency resulting from the addition of manure on soil stability and soil water availability characteristics. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (6), 1281-1296.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.341492.669243>



## تأثیر درجات مختلف آبگریزی خاک حاصل از افزودن کود گاوی بر ویژگی‌های پایداری خاک و فراهمی آب

معصومه نیکپور<sup>۱</sup>، محمدرضا نیشابوری<sup>۲</sup>، شاهین اوستان<sup>۳</sup>، هرمزد نقوی<sup>۴</sup>۱. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. ایمیل: [mnikpoumr@gmail.com](mailto:mnikpoumr@gmail.com)۲. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. ایمیل: [neyshmr@hotmail.com](mailto:neyshmr@hotmail.com)۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. ایمیل: [ostan@gmail.com](mailto:ostan@gmail.com)۴. بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی، کرمان، ایران. ایمیل: [naghavii@yahoo.com](mailto:naghavii@yahoo.com)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	آبگریزی خاک پدیده‌ی مهم فیزیکی است. در شرایط آبگریزی زیر-بحرانی، پژوهش‌های زیادی پیامدهای مثبت آبگریزی را گزارش کرده‌اند. به نظر می‌رسد وجود آبگریزی خاک در یک دامنه مشخص (آبگریزی بهینه) نه تنها عامل ایجاد پیامدهای مخرب در خاک نبوده بلکه عاملی مثبت در بهبود کیفیت فیزیکی خاک نیز می‌باشد. در این پژوهش روی دو خاک لومرسی و لوم‌شنی (در استان کرمان؛ در سال ۱۴۰۰-۱۳۹۹)، پیش‌تیمار ماده‌آلی (به‌عنوان عامل آبگریزی) در سطوح ۰، ۱، ۳، ۵، ۸ و ۱۰ درصد وزنی کود گاوی اعمال گردید. پس از دوره انکوباسیون سه‌ماهه و چرخه تر و خشک‌شدن خاک‌ها، آبگریزی خاک با استفاده از روش RI، WDPT و $\beta$ محاسبه شد. سپس ۲۱ ویژگی کیفیت خاک (فراهمی آب و پایداری ساختمان خاک) در نمونه‌ها اندازه‌گیری و با استفاده از PCA، نشانگرهای MDS انتخاب شد. با رسم نمودار داده‌های نشانگرهای MDS و آبگریزی، آبگریزی بهینه که معادل ۰/۹۵ مقادیر پیش‌بینی شده با معادله‌ی برازش یافته بر این داده‌ها است، محاسبه گردید. با توجه به اثر معنی‌داری کود گاوی بر شاخص‌های آبگریزی و همچنین همبستگی معنی‌دار RI با بیشتر ویژگی‌های فراهمی آب و ساختمان خاک؛ جهت تعیین آبگریزی بهینه انتخاب گردید. با بررسی نتایج نمودار تغییرات RI و ۱۱ نشانگر MDS، مشخص گردید که نشانگرهای DC، TS و Qi با افزایش آبگریزی ابتدا روند کاهشی و سپس افزایشی داشته و بقیه نشانگرها ابتدا روند افزایشی و سپس کاهشی داشتند. دامنه‌ی بهینه آبگریزی (0.95LL-0.95UL)، زمانی که نشانگرهای ساختمان خاک مورد بررسی قرار می‌گیرند در دامنه وسیع‌تر (۴/۸۶-۴/۴۰) و در مواجهه با نشانگرهایی که تنها تحت تأثیر فراهمی آب هستند در دامنه محدودتری (۴/۲۸-۳/۷۲) تعریف می‌گردند. در نهایت در شرایط بدون محدودیت، حد پایینی ۳/۷۲ و حد بالایی ۴/۲۸ برای آبگریزی بهینه در نظر گرفته شد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۲/۲۳	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۴/۸	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۴/۱۴	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۶/۱	
واژه‌های کلیدی:	
آبگریزی بهینه،	
جذب‌پذیری ذاتی،	
کیفیت خاک،	
ماده آلی.	

استناد: نیکپور، معصومه؛ نیشابوری، محمدرضا؛ اوستان، شاهین؛ نقوی، هرمزد (۱۴۰۱). تأثیر درجات مختلف آبگریزی خاک حاصل از افزودن کود گاوی بر ویژگی‌های پایداری خاک و فراهمی آب. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۶)، ۱۲۹۶-۱۲۸۱.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.342943.669268>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

## مقدمه

مقاومت خاک در برابر مرطوب شدن برای دوره‌های زمانی چند دقیقه، چند ساعت یا بیش‌تر را آبریزی می‌گویند (Doerr and Thomas, 2012). آبریزی در نتیجه پوشش مواد آبریز روی ذرات خاک یا در نتیجه تجمع مواد آبریز در خاک رخ می‌دهد. در بسیاری از پژوهش‌ها به پیامدهای مخرب آبریزی از جمله تخریب ساختمان خاک، کاهش نفوذپذیری آب، افزایش رواناب سطحی، کاهش رشد گیاه، ایجاد جریان‌های ترجیحی، آب‌شویی عناصر غذایی و آلاینده‌های شیمیایی اشاره شده است (Chau *et al.*, 2012; Carrick *et al.*, 2011). پیدایش این پیامدهای مخرب غالباً زمانی آشکار می‌شود که خاک آبریز حقیقی<sup>۱</sup> بوده و زاویه‌ی تماس آب با خاک بیش‌تر از ۹۰ درجه باشد و به عبارتی خاک در شرایط آبریزی بحرانی قرار گیرد. نقطه مقابل آن آبریزی زیر-بحرانی<sup>۲</sup> - زمانی رخ می‌دهد که زاویه‌ی تماس آب با خاک بین ۰ تا ۹۰ درجه است. حالت اخیر به صورت کلی می‌تواند سبب افزایش ثبات ساختمان خاک در برابر تنش‌های محیطی شده و پیامدهای مثبتی از جمله محفوظ ماندن خاک از فرآیندهای مرطوب شدن، افزایش پایداری خاکدانه‌ها (Badía-Villas *et al.*, 2014; Hallett, 2007; Jordán *et al.*, 2011; Zheng *et al.*, 2016)، کاهش تبخیر از سطح خاک (Bachmann *et al.*, 2001) و افزایش ذخیره کربن (Blanco-Canqui and Ruis, 2018) را به همراه داشته باشد. آبریزی زیر-بحرانی محدوده‌ی گسترده‌ای دارد و شناخت این محدوده بسیار حائز اهمیت است.

تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد که ماده آلی و مواد حاصل از تجزیه آن، ترشحات قارچ‌ها، فعالیت گیاهان و سایر میکروارگانیسم‌ها از یک سو منابع مهم مواد آبریز در خاک می‌باشند (Buczko *et al.*, 2005; Muller and Deurer, 2011) و به عنوان مخزن بالقوه ترکیبات آبریز عمل می‌کنند (Dekker *et al.*, 2009). از سوی دیگر ماده آلی خاک به صورت فنول‌ها، لیگنین، کربوهیدرات‌ها، پلی‌ساکاریدها و ترکیب‌های هومیکی یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین کننده در پایداری خاکدانه‌ها و بهبود فراهمی آب در خاک محسوب می‌شوند (Bronick and Lal, 2005; Carpenter and Chong, 2010; Fattet *et al.*, 2011) و از این رو مقدار ماده آلی و کربن آلی به عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها در اندازه‌گیری کیفیت فیزیکی خاک‌ها در اغلب پژوهش‌ها مطرح می‌گردد. با استناد بر این گزارش‌ها به نظر می‌رسد با یک رفتار دوگانه از ماده آلی در خاک در ارتباط با آبریزی مواجه هستیم. به این معنی که وجود آبریزی خاک در یک دامنه مشخصی (که از این به بعد آبریزی بهینه<sup>۳</sup> گفته می‌شود) نه تنها عامل ایجاد پیامدهای مخرب در خاک نبوده بلکه عاملی مثبت در بهبود شرایط فیزیکی خاک نیز می‌باشد. بررسی و تعیین دامنه مذکور و این که در چه محدوده‌ای از ماده آلی خاک آبریزی بهینه اتفاق می‌افتد مسلم تأثیر مهمی بر شناخت بهتر پدیده آبریزی دارد.

هدف از این مطالعه، (۱) بررسی اثر مقادیر مختلف کود حیوانی (به عنوان منبع ورودی ماده آلی) روی تغییرات آبریزی خاک در دو بافت مختلف، (۲) بررسی امکان تعیین دامنه‌ای از آبریزی به عنوان آبریزی بهینه فیزیکی که در آن آبریزی نه تنها پیامدهای منفی در شاخص‌های کیفیت ساختمان خاک و فراهمی آب نداشته بلکه تأثیر مفید بر این شاخص‌ها دارد و (۳) تعیین دامنه‌ای از مقدار ماده آلی افزوده شده که در آن آبریزی بهینه اتفاق می‌افتد.

## مواد و روش‌ها

### آماده سازی نمونه‌ها

دو نمونه خاک با بافت‌های لوم شنی (SL) و لوم رسی (CL) از بین خاک‌های کشاورزی در استان کرمان (منطقه لاله‌زار شهرستان بردسیر؛ در سال ۱۴۰۰-۱۳۹۹) انتخاب شدند. دو خاک به گونه‌ای انتخاب شدند که از لحاظ درصد ماده آلی ذاتی ناچیز بوده و ویژگی‌های مانند کربنات کلسیم معادل، هدایت الکتریکی (EC) و واکنش خاک (pH) در آن‌ها تقریباً یکسان باشد تا نتایج به‌دست آمده نسبتاً مستقل از اثر ویژگی‌های ذاتی خاک‌ها باشد. نمونه‌برداری به صورت دست‌خورده از اراضی آیش با حداقل خردشدگی و با بیلچه مخصوص انجام و ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی اولیه (قبل از اعمال هر نوع تیمار) این خاک‌ها اندازه‌گیری گردید. نمونه خاک‌ها به منظور یکسان‌سازی خاکدانه‌ها و جداسازی کلوخه‌ها و سنگریزه‌ها و مواد زائد احتمالی، از الک ۴/۷۶ میلی‌متر (الک شماره ۴) عبور داده شدند. بافت خاک و درصد رس ریز بر پایه قانون استوک و به ترتیب به روش هیدرومتر و پیپت (Gee and Or, 2002) و مقدار کربن آلی خاک به روش هضم تر (Nelson

1 True water-repellent soil

2 Sub-critical water repellency

3 Optimum water repellency

1983، EC و pH در سوسپانسیون ۲ به ۱ آب به خاک (Thomas, 1996; Rhoades, 1996)، کرنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی با اسید (Loeppert and Suarez, 1996) و جرم مخصوص ظاهری خاک با روش سیلندر نمونه برداری (Klute, 1986) اندازه گیری شدند.

جهت بررسی آبریزی متأثر از ماده آلی در خاکها، با در نظر گرفتن درصد ماده آلی خاکهای کشاورزی ایران و همچنین تحقق اهداف این مطالعه که بتوان دامنه نسبتاً گسترده‌ای از آبریزی را ایجاد کرد، پیش تیمار ماده آلی در سطوح ۰، ۱، ۳، ۵، ۸ و ۱۰ درصد وزنی کود گاوی (با ویژگی‌های مشخص، جدول ۲) بر نمونه خاکها اعمال شد. نمونه خاکهای عبور داده شده از الک، با هر سطح از کود دامی در سه تکرار به آرامی و کامل مخلوط شدند. سپس خاکهای آماده شده به داخل گلدانها با ابعاد قطر ۲۰ و ارتفاع ۱۲ سانتی متر منتقل گردید. در پر کردن گلدانها رسیدن به چگالی ظاهری تقریباً ۱/۳ گرم بر سانتی متر مکعب مدنظر قرار گرفت. گلدانها در گلخانه‌ای با شرایط ثابت (دمای ۲۲-۲۰ درجه سانتی گراد و رطوبت نسبی هوا ۳۶-۳۳ درصد) به مدت ۳ ماه نگهداری شده و در این مدت خاکها تحت تناوبهای تر و خشک شدن در محدوده رطوبتی (رطوبت ۲۰ kPa تا رطوبت معادل با نصف مقدار اولیه) قرار گرفتند. این محدوده رطوبتی توسط دستگاه پرتابل TDR کنترل گردید. آب مورد نیاز به آرامی و بدون ایجاد بهم خوردگی به خاک گلدانها اضافه شد. در نهایت پس از اتمام دوره انکوباسیون نمونه‌های دست خورده و دست نخورده‌ای از خاک گلدانها تهیه و آزمایش‌های زیر روی آنها انجام شد.

### تعیین آبریزی خاک

جهت بررسی دوام<sup>۱</sup> آبریزی در نمونه‌ها با رطوبت هوا خشک، از روش مدت زمان نفوذ قطره آب به خاک (WDPT)<sup>۲</sup> و برای محاسبه شدت<sup>۳</sup> آبریزی از روش جذب پذیری ذاتی (ISM)<sup>۴</sup> استفاده شد. قابل ذکر است که علت انتخاب روش WDPT سرعت عمل در اندازه گیری و متداول بودن این روش بود. همچنین روش ISM نیز به دلیل دقت بالا و ارائه شاخص کمی آبریزی (RI)<sup>۵</sup> انتخاب شد (Li et al., 2021). در روش اول با استفاده از قطره چکان پزشکی سه قطره کوچک آب مقطر (هر کدام به حجم ۴۰ میکرولیتر) روی نمونه خاک قرار گرفته و زمان نفوذ آن در خاک یادداشت شد. میانگین مدت زمان نفوذ کامل این قطرات به درون خاک (۵ تا ۷ قرائت در هر تکرار) به عنوان WDPT تعیین شد. بر طبق تقسیم بندی (DeBano, 1981) اگر WDPT کمتر از ۵ ثانیه طول بکشد، خاک قابل خیس شدن؛ بین ۵ تا ۶۰ ثانیه، خاک آبریز خفیف؛ بین ۶۰ تا ۶۰۰ ثانیه، آبریز قوی؛ بین ۶۰۰ تا ۳۶۰۰ ثانیه، خاک به شدت آبریز و نهایتاً WDPT بیشتر از ۳۶۰۰ ثانیه، خاک بی نهایت آبریز است.

در روش ISM از ریز-نفوذسنج با قطر نوک ۴ میلی متر استفاده شده و در سه دقیقه‌ی اول جذب پذیری آب و اتانول روی هر نمونه خاک آون خشک (در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد) اندازه گیری شد (Hallett and Young, 1999; Hosseini et al., 2015). با استفاده از منحنی‌های حجم آب و اتانول نفوذ یافته در برابر زمان، شیب منحنی‌ها در بازه زمانی ۳۰ تا ۱۳۰ ثانیه با برازش قوی یک خط رگرسیونی به عنوان دبی جریان ماندگار (Q) ( $\text{mm}^3 \text{s}^{-1}$ ) به دست آمد. سپس جذب پذیری آب یا اتانول (S) با معادله زیر محاسبه شد:

$$S = \sqrt{\frac{Qf}{4br}} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

در این رابطه، f تخلخل هوا-پر خاک ( $\text{mm}^3 \text{mm}^{-3}$ )، b مقدار ثابت ۰/۵۵ و r شعاع نوک ریز-نفوذسنج است (Cosentino, 2010).

در نهایت RI خاک به کمک معادله‌ی زیر محاسبه شد:

$$RI = 1.95 \frac{S_E}{S_W} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

در این رابطه،  $S_E$  و  $S_W$  به ترتیب جذب پذیری آب و اتانول ( $\text{mm s}^{-0.5}$ )، همچنین ضریب ثابت ۱/۹۵ بیانگر اختلاف کشش سطحی

و گرانیوی بین آب و اتانول است. مقادیر RI کوچک‌تر از ۱/۹۵، بزرگ‌تر از ۱/۹۵ و بزرگ‌تر از ۵۰ به ترتیب بیانگر عدم آبریزی، آبریزی زیر-بحرانی و آبریزی شدید در خاک است (Li et al., 2021; Urbanek et al., 2007). همچنین برای تعیین آبریزی زیر-بحرانی زاویه تماس آب و خاک ( $\beta$ ) (rad) از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\beta = \arccos\left(\frac{1}{RI}\right) \quad \text{رابطه ۳}$$

### ویژگی‌های فراهمی آب

جهت بررسی کیفیت فیزیکی نمونه‌های تیمار شده ویژگی‌های فیزیکی مختلف در دو دسته ویژگی‌های فراهمی آب و ساختمان خاک مورد بررسی قرار گرفت. رطوبت نمونه‌های دست‌نخورده خاک با جعبه شن (در مکش‌های ۰، ۵، ۱۰، ۳۰، ۷۰، ۱۰۰ هکتوپاسگال) و دستگاه صفحات فشار (در مکش‌های ۳۳۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۵۰۰۰ هکتوپاسگال) اندازه‌گیری و با برآزش داده‌ها با مدل منحنی رطوبتی ونگنوختن (Van Genuchten, 1980) به وسیله نرم افزار RETC مقادیر پارامترهای مدل مذکور به دست آمد. آب قابل دسترس گیاه (PAW)، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (LLWR)، گنجایش آب انتگرالی (IWC)، انرژی انتگرالی (EI) به روش‌های مرسوم محاسبه شدند. PAW<sub>100</sub> و PAW<sub>330</sub> از تفاضل FC (مکش ماتریک ۱۰۰ و ۳۳۰ هکتوپاسگال) به عنوان حد بالایی رطوبت و PWP (۱۵۰۰۰ هکتوپاسگال) به عنوان حد پایینی رطوبت خاک به دست آمد (Kirkham, 2005). به طور مشابه LLWR<sub>100</sub> و LLWR<sub>330</sub> از تفاضل FC (یا تخلخل تهویه‌ای ۱۰ درصد هر کدام که کمتر بود) و PWP (یا رطوبت نظیر مقاومت فروری ۲ مگاپاسکال، هر کدام که بیشتر بود) بدست آمد (Da Silva, 1994). IWC نیز با تعیین ضرایب وزنی (با استفاده از توابع وزنی خاص (Groenevelt *et al.*, 2001)) و اعمال آن‌ها در مقدار آب خاک و سپس انتگرال‌گیری به روش عددی (روش ذوزنقه‌ای) محاسبه گردید. انرژی انتگرالی به منظور کمی کردن میانگین انرژی مورد نیاز برای جذب یک واحد جرمی آب در دامنه مشخص از مکش خاک مطرح شده و برای محاسبه آن از انتگرال‌گیری تابع منحنی رطوبتی (Van Genuchten, 1980) بر مبنای PAW<sub>100</sub>، PAW<sub>330</sub>، LLWR<sub>100</sub>، LLWR<sub>330</sub> و IWC استفاده گردید (Asgarzadeh *et al.*, 2014). تمام محاسبات مربوط به پارامترهای فراهمی آب در نرم افزار MATLAB صورت گرفت.

### ویژگی‌های ساختمان خاک

در این پژوهش از ویژگی‌های زیر برای ارزیابی اثر تیمارهای آزمایش روی ساختمان نمونه‌های خاک و ارتباط آن با آبگیری استفاده شد. برای محاسبه میانگین وزنی قطر خاکدانه (MWD) ۵۰ گرم خاکدانه در آب (MWD<sub>w</sub>) یا به حالت خشک (MWD<sub>d</sub>) بر روی سری غربال‌ها (۴/۷۵، ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۱ میلی‌متر) غربال گردید و پس از توزین خاکدانه‌های باقی‌مانده بر روی غربال‌ها، مقدار MWD محاسبه گردید. بسته به اینکه نمونه خاکدانه قبل از غربال در آب به صورت سریع خیس شده باشد یا به صورت آهسته، MWD<sub>w</sub> حاصل به ترتیب با MWD<sub>fw</sub> و MDW<sub>sw</sub> نشان داده می‌شود (Briedis *et al.*, 2012).

مقاومت کششی<sup>۱</sup> خاکدانه‌ها (TS) با استفاده از روش غیرمستقیم برزیلی (Lehrsch *et al.*, 2012) انجام و نیروی بیشینه شکست در خاکدانه هوا-خشک و در دو دامنه اندازه ۴-۶/۳ و ۸-۶/۳ میلی‌متر اندازه‌گیری گردید. مقاومت فروری<sup>۲</sup> خاک (Q) برحسب مگاپاسکال در مکش‌های ماتریک (h) ۳۳۰، ۱۰۰۰، ۳۰۰۰، ۸۰۰۰ اندازه‌گیری و با استفاده مدلی مشابه مدل ونگنوختن (۱۹۸۰) مدل سازی شد (Asgarzadeh *et al.*, 2014؛ Stock and Downes, 2008). در نهایت Q<sub>1</sub> و Q<sub>h</sub> که به ترتیب به عنوان کم‌ترین و بیش‌ترین مقاومت فروری پیش بینی شده در خاک، محاسبه شدند.

در ادامه منحنی رطوبتی با رسم رطوبت جرمی (kg.kg<sup>-1</sup>) در مقابل لگاریتم طبیعی مکش (hPa) ترسیم و شیب این منحنی در نقطه عطف، روی شاخه آب‌گیری، به عنوان شاخص دکستر (Si) اندازه‌گیری شد. شاخص Si از روی ضرایب مدل ونگنوختن (۱۹۸۰) محاسبه گردید (Dexter, 2004). اندازه‌گیری رس قابل پراکنش در آب (DC)<sup>۳</sup> با استفاده از قانون استوک و میکروپیپیت انجام شد (Burt *et al.*, 1993). هدایت هیدرولیکی اشباع (K<sub>s</sub>) با استفاده از روش بار ثابت اندازه‌گیری گردید (Klute and Dirksen, 1986).

### تحلیل نتایج

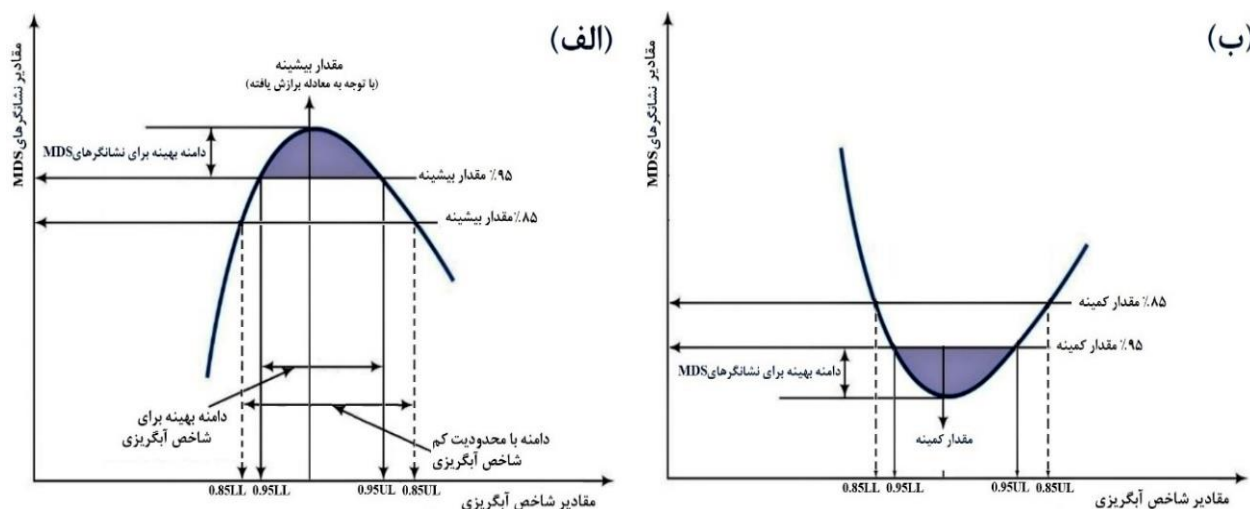
به منظور بررسی اثر تیمار آزمایشی از آزمون فاکتوریل دو عاملی (بافت خاک در ۲ سطح و مقدار کود گاوی در ۶ سطح) در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار استفاده شد. آزمون همگنی واریانس‌ها و نرمال بودن باقی‌مانده‌ها با نرم افزار SPSS (version 26.0) و تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها با نرم‌افزار SAS (version 9.1) انجام گرفت. در مقایسه میانگین‌ها معیار LSD در سطح احتمال ۵ درصد بکار گرفته شد. جهت تشخیص دامنه‌ای از آبگیری که تأثیر مطلوبی بر ویژگی‌های کیفیت فیزیکی خاک دارد؛ ابتدا لازم بود

1 tensile strength  
2 penetration resistance  
3 Dispersible clay

ویژگی‌هایی که همبستگی معنی‌داری با شاخص آبریزی دارند مشخص شوند (با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون). سپس از بین ویژگی‌ها با همبستگی معنی‌دار، برای انتخاب حداقل ویژگی‌های مؤثر (MDS)<sup>۱</sup> به عنوان نماینده‌ای از کل ویژگی‌های اندازه‌گیری شده از تجزیه به عامل‌ها (FA)<sup>۲</sup> و به روش مؤلفه‌های اصلی (PCA)<sup>۳</sup> استفاده گردید (Doran and Parkin, 1994). همچنین به منظور بهبود روابط بین متغیرها (ویژگی‌های مورد بررسی) و عامل‌های اولیه و اعمال تبدیلات خاص روی عامل‌ها، چرخش داده‌ها از نوع واریمکس<sup>۴</sup> به کار برده شد. این روش به عنوان ابزار کاهش‌دهنده برای انتخاب تعداد مناسبی نشانگر کیفیت<sup>۵</sup> از بین ویژگی‌های کیفیت فیزیکی مورد مطالعه، استفاده شد. به منظور جلوگیری از تأثیر زیاد یک یا دو ویژگی روی مؤلفه‌های اصلی، معمولاً در شروع تجزیه ویژگی‌ها را استاندارد می‌کنند تا دارای میانگین صفر و واریانس یک باشند. سپس مؤلفه‌های با ارزش ویژه<sup>۶</sup> بزرگتر از ۱ استخراج شده و ویژگی‌هایی که مقدار وزنی<sup>۷</sup> آن‌ها در محدوده قدر مطلق ۱۰٪ بالاترین وزن‌های موجود در هر مؤلفه بودند، به عنوان نشانگرهای MDS انتخاب شدند.

دامنه بهینه شاخص آبریزی زمانی است که مقادیر نشانگرهای MDS بزرگ‌تر یا معادل ۰/۹۵ بیشینه‌ی پیش‌بینی شده با معادله‌ی برازش یافته بر داده‌های این نشانگرها در برابر شاخص آبریزی باشد (شکل ۱، الف). البته گاهی مشاهده می‌شود با افزایش آبریزی بعضی نشانگرهای MDS در ابتدا روند کاهشی و سپس روند افزایشی پیدا می‌کنند (شکل ۱، ب). در این نشانگرها دامنه بهینه شاخص آبریزی زمانی است که مقادیر نشانگرهای MDS کوچک‌تر یا معادل ۰/۹۵ کمینه‌ی پیش‌بینی شده با معادله‌ی برازش یافته بر داده‌های این نشانگرها در برابر شاخص آبریزی باشد (شکل ۱، ب).

دامنه با محدودیت کم برای شاخص آبریزی دامنه‌ای در نظر گرفته شد که در آن دامنه مقادیر نشانگرهای انتخاب شده بین ۰/۹۵ تا ۰/۸۵ مقدار بیشینه (یا کمینه) آن‌ها قرار گیرد. دامنه با محدودیت زیاد شاخص آبریزی دامنه‌ای فرض شد که سبب کاهش نشانگرها به کمتر از ۰/۸۵ مقدار بیشینه (یا کمینه) گردید. در نهایت برای رسم نمودارها نیز از نرم‌افزار Excel (version 2021) استفاده شد.



شکل ۱. نمودار تابع پیشنهادی بین نشانگرهای MDS و شاخص آبریزی

## نتایج و بحث

خاک‌های انتخاب شده دارای ماده آلی ذاتی اندکی بودند و به جز بافت، ویژگی‌های اولیه آنها شباهت زیادی به یکدیگر داشتند (جدول ۱)؛ بنابراین بررسی اثر بافت بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک پس از افزودن ماده آلی (کود گاوی پوسیده) با ویژگی‌های مشخص (جدول ۲) امکان‌پذیر است.

- 1 Minimum data set
- 2 Factor analysis
- 3 Principal component analysis
- 4 varimax
- 5 Quality indicator
- 6 Eigenvalue
- 7 Factor loading

جدول ۱. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی دو خاک آزمایش شده

جرم مخصوص ظاهری	EC	pH	کربن آلی	کربنات کلسیم معادل	رس ریز	شن	سیلت	رس	بافت خاک
Mg.m <sup>-3</sup>	dS.m <sup>-1</sup>				g.kg <sup>-1</sup>				
۱/۶۱	۱/۲۷	۷/۶	۲/۱	۲۱/۲	۸۷/۸	۳۴۴	۳۰۵	۲۵۱	لوم رسی
۱/۷۴	۰/۹۶	۷/۳	۱/۹	۱۹/۸	۲۸/۲	۶۶۳	۱۸۵	۱۵۲	لوم شنی

جدول ۲. برخی از ویژگی‌های شیمیایی ماده آلی افزوده شده (کود گاوی)

EC	pH	C/N	کربن آلی	نیترژن	ماده آلی
dS.m <sup>-1</sup>			g.kg <sup>-1</sup>		
۱۰/۶	۸/۲	۱۷/۲۵	۳۳۸/۲	۱۹/۶	کود گاوی پوسیده

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان می‌دهد که افزودن مقادیر مختلف کود گاوی به خاک و پس از گذشت دوره سه ماهه انکوباسیون علاوه بر ایجاد تغییرات معنی‌دار در کربن آلی خاک‌ها بر شاخص‌های آبگریزی خاک نیز اثر معنی‌داری گذاشته است. با توجه به اینکه دو خاک انتخاب شده به لحاظ میزان کربن آلی اولیه مشابه بوده و همچنین تیمارهای افزودن کود گاوی با شرایط یکسانی برای دو خاک اعمال گردید اما مشاهده شد که اثر نوع خاک بر تغییرات میزان کربن آلی معنی‌دار است. این یافته به سبب جذب سطح و تثبیت شیمیایی و فیزیکی بیشتر مواد آلی توسط کانی‌های رسی (سطح ویژه بالا) در خاک لوم رسی، مقاومت در برابر تجزیه ریزجانداران و حفاظت بیشتر کربن آلی در این خاک‌ها قابل توجیه است (Jindaluang *et al.*, 2013). همچنین می‌توان گفت دلایلی نظیر غیرفعال شدن آنزیم‌های تجزیه کننده مواد آلی با جذب توسط کانی‌های رسی و تهویه ضعیف‌تر در خاک‌های متوسط و ریز بافت مزید بر علت است (Feller and Beare, 1997).

جدول ۳. تجزیه واریانس برای کربن آلی (OC)، زمان نفوذ قطره آب (WDPT)، جذب‌پذیری آب (S<sub>w</sub>)، جذب‌پذیری اتانول (S<sub>E</sub>)، شاخص آبگریزی (RI) و زاویه تماس آب و خاک (β) در نمونه خاک‌های تیمار شده

میانگین مربعات (MS)						درجه آزادی	منابع تغییرات
β degree	RI	S <sub>E</sub> cm s <sup>-0.5</sup>	S <sub>w</sub> cm s <sup>-0.5</sup>	WDPT s	OC g.kg <sup>-1</sup>		
						۱۱	تیمار
۷۱/۵۰۴ **	۱/۱۰۵ **	۱/۲۲۹ **	۰/۰۰۲ **	۶۶۳/۳۴ **	۱/۶۴۵ *	۱	نوع خاک
۳۳۳/۷۷ **	۹/۷۴۶ **	۰/۰۳ **	۰/۰۰۳ **	۱۰۰۶۷/۴۷۴ **	۸۶۳/۴۱۷ **	۵	کود گاوی
۱۸/۴۷۹ **	۰/۱۶۱ **	۰/۰۱۳ **	۰/۰۰۱ **	۳۶۸/۵۹۶ **	۰/۰۷۳ ns	۵	نوع خاک × کود گاوی
۰/۲۷۸	۰/۰۱۵	۰/۰۰۲	۰/۰۰۸	۳۶/۷۷۱	۰/۳۳۰	۲۴	خطا

\*, \*\* و ns به ترتیب نشان دهنده اثر معنی‌دار در سطح احتمال ۱، ۵ و اثر غیر معنی‌دار می‌باشند.

جذب‌پذیری اتانول (S<sub>E</sub>) در تیمارهای ۱، ۳ و ۵ درصد روند افزایشی دارد. با توجه به اینکه S<sub>E</sub> تنها تحت تأثیر شکل هندسی و توزیع اندازه منافذ خاک است و آبگریزی خاک بر آن مؤثر نیست، لذا روند افزایشی S<sub>E</sub> در این تیمارها نشان از بهبود اندازه منافذ و ساختمان خاک دارد. این روند متأثر از افزایش کربن آلی و بالطبع آن افزایش مواد آبگریز در خاک و همچنین سپری شدن دوره انکوباسیون است. پژوهش‌های دیگری نیز روند مشابهی برای S<sub>E</sub> گزارش کرده‌اند (Hosseini *et al.*, 2015). اما در مقادیر بالاتر کود گاوی به نظر می‌رسد افزایش کربن آلی و آبگریزی نتوانسته است تأثیر معنی‌داری بر بهبود منافذ و ساختمان خاک بگذارد و به همین علت مقایسه میانگین مقادیر S<sub>E</sub> در تیمارهای ۵، ۸ و ۱۰ درصد تفاوت معنی‌داری نشان نداد (جدول ۴) و در نهایت در درصد وزنی بالاتر کود گاوی روند کاهش S<sub>E</sub> مشاهده شد (جدول ۴ و شکل ۲، د).

جذب‌پذیری آب (S<sub>w</sub>) با افزایش کربن آلی خاک روند متفاوت‌تر از S<sub>E</sub> نشان داد. مشاهده شد در خاک لوم شنی تیمارهای ۰٪، ۱٪ و ۳٪ کود گاوی و در خاک لوم رسی تیمارهای ۰٪، ۱٪، ۳٪ و ۵٪ با افزایش کربن آلی خاک S<sub>w</sub> افزایش یافت (جدول ۴ و شکل ۲، د). این مسئله در نتیجه گسترش ساختمان خاک، افزایش پایداری، بهبود فراهمی آب و بطور کلی ارتقاء کیفیت فیزیکی خاک قابل توجیه

است و تحقیقات زیادی به این نقش کربن آلی اشاره کرده‌اند (Abiven *et al.*, ; Johannes *et al.*, 2017; Mirbabaei *et al.*, 2021). روند افزایشی  $S_w$  در مقادیر بالاتر کربن آلی در نمونه خاک لوم رسی می‌تواند بعلت سطح ویژه بیشتر و ظرفیت بالاتر این خاک در بهبود ساختمان و منافذ باشد.

نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد نوع خاک و افزودن مقادیر مختلف کود گاوی سبب ایجاد تغییرات معنی‌داری در شاخص‌های آبگریزی ( $RI$ ،  $WDPT$  و  $\beta$ ) شد. بررسی اثر متقابل معنی‌دار بین سطح کود گاوی و بافت خاک در شاخص‌های آبگریزی، نشان می‌دهد که تاثیر افزایش کود گاوی روی شاخص‌های آبگریزی در دو خاک همسو یا مشابه نبوده است. به عنوان مثال در تیمار کود گاوی ۱، ۳ و ۵ درصد مقادیر بیشتر شاخص  $WDPT$  و  $S_w$  در خاک لوم شنی مشاهده گردید در حالی که در دو سطح ۸ و ۱۰ درصد نتیجه برعکس اتفاق افتاده است (جدول ۳ و شکل ۲، الف و د).  $WDPT$  با افزایش تیمارهای کود گاوی به صورت خطی افزایش یافت (شکل ۲، الف) و صرف نظر از نوع خاک ( $WDPT$  تا تیمار ۵ درصد سبب آبگریزی زیر ۶۰ ثانیه و خفیف شد. اما در تیمارهای ۸ و ۱۰ درصد میانگین مقادیر آبگریزی به بالای ۶۰ ثانیه رسیده و در محدوده آبگریزی قوی قرار گرفت (Mirbabaei *et al.*, 2013).

جدول ۴. مقایسه میانگین‌ها برای کربن آلی ( $OC$ )، زمان نفوذ قطره آب ( $WDPT$ )، جذب پذیری آب ( $S_w$ )، جذب پذیری اتانول ( $S_E$ )، شاخص آبگریزی ( $RI$ ) و زاویه تماس آب و خاک ( $\beta$ ) بین ۶ سطح تیمار کود گاوی

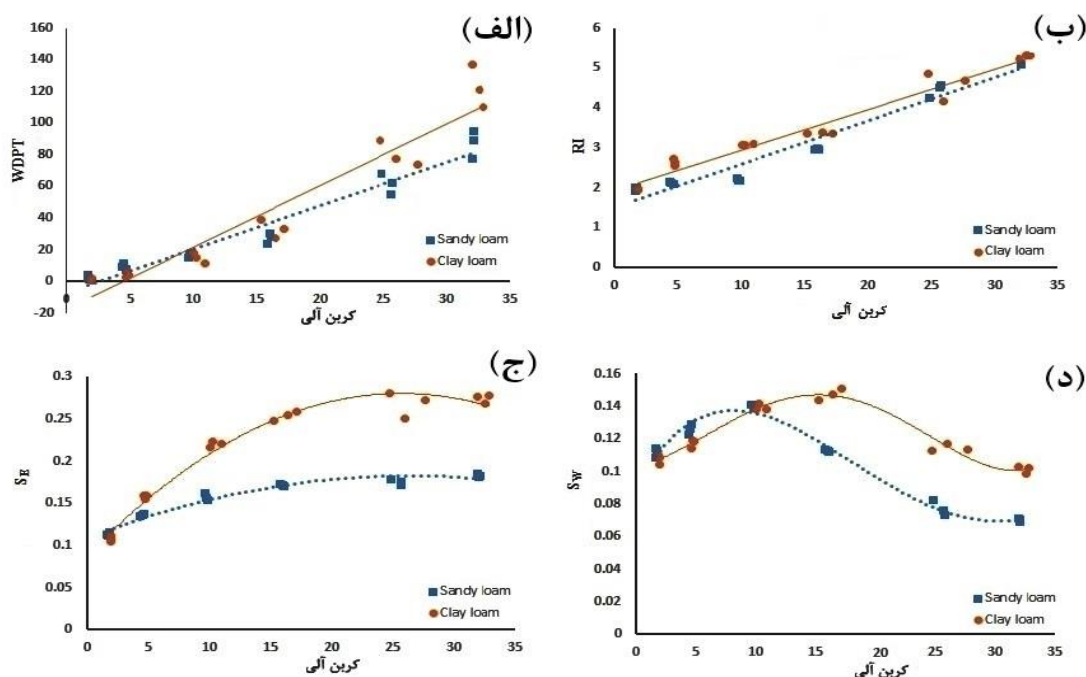
$\beta$	$RI$	$S_E$	$S_w$	$WDPT$	$OC$	مقدار کود
degree	-	$cm\ s^{-0.5}$	$cm\ s^{-0.5}$	S	$g\ kg^{-1}$	درصد وزنی
$59/35 \pm (0/6)^a$	$1/96 \pm (0/03)^a$	$0/11 \pm (0/04)^a$	$0/11 \pm (0/03)^b$	$1/75 \pm (1/3)^a$	$1/85 \pm (0/12)^a$	۰
$64/6 \pm (3/3)^b$	$2/37 \pm (0/29)^b$	$0/147 \pm (0/012)^b$	$0/122 \pm (0/005)^{bc}$	$6/8 \pm (3/0)^a$	$4/66 \pm (0/17)^b$	۱
$66/9 \pm (4/5)^b$	$2/63 \pm (0/49)^c$	$0/189 \pm (0/035)^{bc}$	$0/14 \pm (0/002)^d$	$15/6 \pm (2/7)^b$	$10/09 \pm (0/48)^c$	۳
$71/5 \pm (1/3)^c$	$3/16 \pm (0/22)^d$	$0/213 \pm (0/045)^c$	$0/13 \pm (0/019)^{cd}$	$30/1 \pm (5/2)^c$	$16/15 \pm (0/65)^d$	۵
$77/3 \pm (0/8)^d$	$4/50 \pm (0/26)^c$	$0/222 \pm (0/050)^c$	$0/096 \pm (0/021)^{ab}$	$70/8 \pm (11/9)^d$	$25/79 \pm (1/05)^c$	۸
$78/9 \pm (0/2)^d$	$5/18 \pm (0/11)^f$	$0/185 \pm (0/056)^c$	$0/086 \pm (0/017)^a$	$104/8 \pm (22/1)^e$	$32/26 \pm (0/36)^c$	۱۰

مقایسه میانگین براساس مقدار کود گاوی صورت گرفته است؛ در هر ستون اعداد دارای حروف مختلف تفاوت معنی‌داری دارند ( $LSD$ ،  $P < 0/05$ ). اعداد داخل پرانتز مقادیر انحراف معیار می‌باشند.

$RI$  در خاک لوم رسی و در تمامی مقادیر کربن آلی بیشتر از خاک لوم شنی است که علت آن با توجه به مفهوم فیزیکی و معادله این شاخص (بر مبنای شکل هندسی منافذ و جذب آب و الکترولیت در بازه زمانی کوتاه) قابل توضیح است. لازم به ذکر است در بعضی پژوهش‌ها (Zavala *et al.*, 2009) افزودن مقادیر یکسان از ماده آلی سبب آبگریزی بیشتری در خاک شنی نسبت به خاک رسی شده است اما در این پژوهش می‌توان گفت در سطوح بالای ماده آلی عکس این نتیجه حاصل شده است. دلیل اصلی این رویداد نمونه‌برداری اولیه با حداقل تخریب خاک‌ها، دوره‌ی سه ماهه انکوباسیون و چرخه‌های خشک و تر کردن خاک‌ها قبل از شروع آزمایش‌ها است که سبب تشکیل خاکدانه‌ها در خاک لوم رسی شده است (Hallett *et al.*, 2009). در مواجهه با مواد آبگریزی، خاکدانه‌ها مشابه ذرات درشت شن رفتار کرده و سطح ویژه کمتری برای محصور شدن با مواد آبگریزی داشته و در نتیجه آبگریزی را در سطح وسیع‌تری نشان می‌دهند (Feeney *et al.*, 2006 و Dorostkar *et al.*, 2016). از سوی دیگر خاک لوم رسی به علت ویژگی‌های حفاظتی که بر مواد آلی دارد مانع تجزیه این مواد شده و در نتیجه پس از اتمام دوره انکوباسیون متوسط مقادیر کربن آلی در نمونه‌های لوم رسی بیشتر از لوم شنی بوده و این امر نیز سبب وجود مواد آبگریزی بیشتر در خاک‌های لوم رسی نسبت به لوم شنی شده است (شکل ۲). مقادیر  $RI$  و  $\beta$  نشان می‌دهد که در تمامی تیمارهای کود گاوی آبگریزی زیر-بحرانی پدید آمده است (جدول ۴).

در ادامه پژوهش به منظور بررسی آبگریزی بهینه، در ابتدا تاثیر آبگریزی بر ویژگی‌های کیفیت فیزیکی مورد بررسی قرار گرفت. برای بیان آبگریزی از  $RI$ ،  $WDPT$  و  $\beta$  استفاده شد. با توجه به همبستگی پایین‌تر  $WDPT$  و  $\beta$  با غالب شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک نسبت به  $RI$  و همچنین معنی‌دار نبودن بعضی از معادلات رگرسیونی متغیرهای  $WDPT$  و  $MDS$ ؛ نهایتاً شاخص  $RI$  برای بررسی دامنه آبگریزی بهینه انتخاب گردید. جهت انتخاب  $MDS$ ، بررسی همبستگی پیرسون بین شاخص آبگریزی ( $RI$ ) و ویژگی فیزیکی خاک صورت گرفت. مشخص گردید  $RI$  با ویژگی  $S_i$ ،  $PAW_{330}$  و  $LLWR_{330}$  در سطح ۱ یا ۵ درصد همبستگی معنی‌داری نداشت و در نتیجه این سه ویژگی جهت محاسبه حداقل ویژگی‌های مؤثر فیزیکی ( $MDS$ ) لحاظ نشدند.





شکل ۲. اثر افزوده شدن کربن آلی ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) در دو خاک مورد بررسی بر WDPT (s)، RI،  $S_w$  ( $\text{cm s}^{-0.5}$ ) و  $S_e$  ( $\text{cm s}^{-0.5}$ )

MDS بر اساس سه مؤلفه اول با ارزش ویژه بزرگتر از ۱ استخراج شدند که در برگیرنده ۹۴/۴۲ درصد تغییرات داده‌های اندازه‌گیری بودند (جدول ۵). ضریب KMO<sup>۱</sup> با مقدار ۰/۸۲۱ (بیانگر توانایی بسیار خوب مؤلفه‌های تعیین شده در تبیین واریانس‌های متغیرهای مورد مطالعه و کفایت نمونه‌گیری است) و همچنین معنی‌دار شدن آزمون کرویت بارتلت ( $\text{Sig} < 0/0001$ ) تأییدی بر سودمندی و مطلوب بودن انجام تجزیه به عامل‌ها است. به طور کلی نتایج حاصل از روش واریانس نشان داد که هر یک از ویژگی‌ها با یک مؤلفه نسبت به سایر مؤلفه‌ها همبستگی قوی‌تری داشته و تفکیک ویژگی‌ها به مؤلفه‌های اصلی به خوبی صورت گرفته است. علاوه بر این تجزیه به عامل‌ها به شکل مطلوبی ویژگی‌های فیزیکی متأثر از آبگریزی را در سه دسته اصلی تقسیم‌بندی کرد. دسته اول ( $\text{PCA}_1$ ) با توصیف ۳۲/۶۹ درصد واریانس داده‌ها دارای دامنه اطلاعات وسیع‌تری نسبت به سایر مؤلفه‌ها می‌باشد و با توجه به ویژگی‌ها با مقادیر وزنی بالا در این مؤلفه می‌توان این مؤلفه را نشان‌دهنده ساختمان خاک و خاکدانه‌سازی دانست. به همین ترتیب دسته دوم ( $\text{PCA}_2$ ) مرتبط با فراهمی آب بودند و به نظر می‌رسد متغیرهایی که به صورت برابر تحت تأثیر ساختمان و فراهمی آب هستند در دسته سوم ( $\text{PCA}_3$ ) قرار گرفتند (جدول ۵). در نهایت یازده نشانگر در MDS قرار گرفته‌اند که در جدول ۵ مشخص شده‌اند.

پس از انتخاب نشانگرهای MDS، رابطه این نشانگرها با آبگریزی مورد بررسی قرار گرفت. رابطه بین RI و با هر یک از ۱۱ نشانگر MDS به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳). بر اساس نمودار پیشنهاد شده (شکل ۱) و با توجه به معادله رگرسیونی برازش شده بر داده‌های نشانگرها در مقابل RI، حد پایین (0.95LL) و حد بالای (0.95UL) شروع محدودیت و همچنین حد پایین (0.85LL) و حد بالای (0.85UL) محدودیت بیشتر مشخص گردید. مقادیر دقیق مربوط به این حدود در جدول ۶ آورده شده است.

بررسی تغییرات رس قابل پراکنش (DC) با RI نشان داد با افزایش آبگریزی در ابتدا DC کاهش معنی‌دار داشته که چنین روندی در برخی پژوهش‌ها DC گزارش شده است (Hosseini et al., 2015). اما در محدوده RI ۴/۶ (به عبارتی در تیمار ۸٪ کود گاوی و ۲۵/۷ گرم بر کیلوگرم کربن آلی) روند این شاخص تغییر کرده و با افزایش RI رس قابل پراکنش نیز افزایش می‌یابد (شکل ۳، الف). لازم به ذکر است در پژوهش‌های گذشته نیز همبستگی منفی و قوی بین DC و کیفیت فیزیکی خاک گزارش شده است (Czyż and Vizitiu, 2012). با افزایش RI تغییرات مقاومت کششی خاک (TS) و کمترین مقاومت فروروی ( $Q_1$ )، مشابه DC بود. TS در هر دو اندازه خاکدانه رابطه معنی‌داری با تغییرات RI نشان داد اما به علت رابطه قوی‌تر اندازه خاکدانه‌های ۴ تا ۶/۳ میلی‌متر این دامنه در تجزیه به عامل‌ها

انتخاب گردید (جدول ۵). با افزایش آبگریزی تا حدود ۴/۷۹ (در تیمار ۸٪ کود گاوی)، TS کاهش می‌یابد که با توجه به کاهش رس قابل پراکنش (Abid and Lal, 2009)، وجود دوره‌های متناوب تر و خشک شدن و افزایش مواد آبگریز آلیفاتیک با زنجیره‌های بلند و مؤثر در تردی منافذ خاک قابل توجیه است (Smettem et al., 2021). همچنین (Mohammadi and Khademalrasoul, 2021) در مقادیری از آبگریزی کاهش مقاومت کششی و افزایش تردی خاک را گزارش کردند. سپس با افزایش بیشتر آبگریزی (بزرگتر از ۴/۷۹)، TS نیز روند افزایشی را طی می‌کند (شکل ۳، ب). همچنین در مقادیر پایین آبگریزی (تا حدود ۴/۴۴)، با افزایش آبگریزی،  $Q_1$  با تأثیرپذیری از افزایش حجم منافذ و بهبود ساختمان خاک کاهش می‌یابد (شکل ۳، ی) و سپس در مقادیر بیشتر آبگریزی روند  $Q_1$  تغییر می‌کند.

جدول ۵. تعیین مؤلفه‌های اصلی و ضرایب آنها با روش چرخش واریمکس و انتخاب حداقل ویژگی‌های مؤثر (MDS) با استفاده از تجزیه فاکتورها

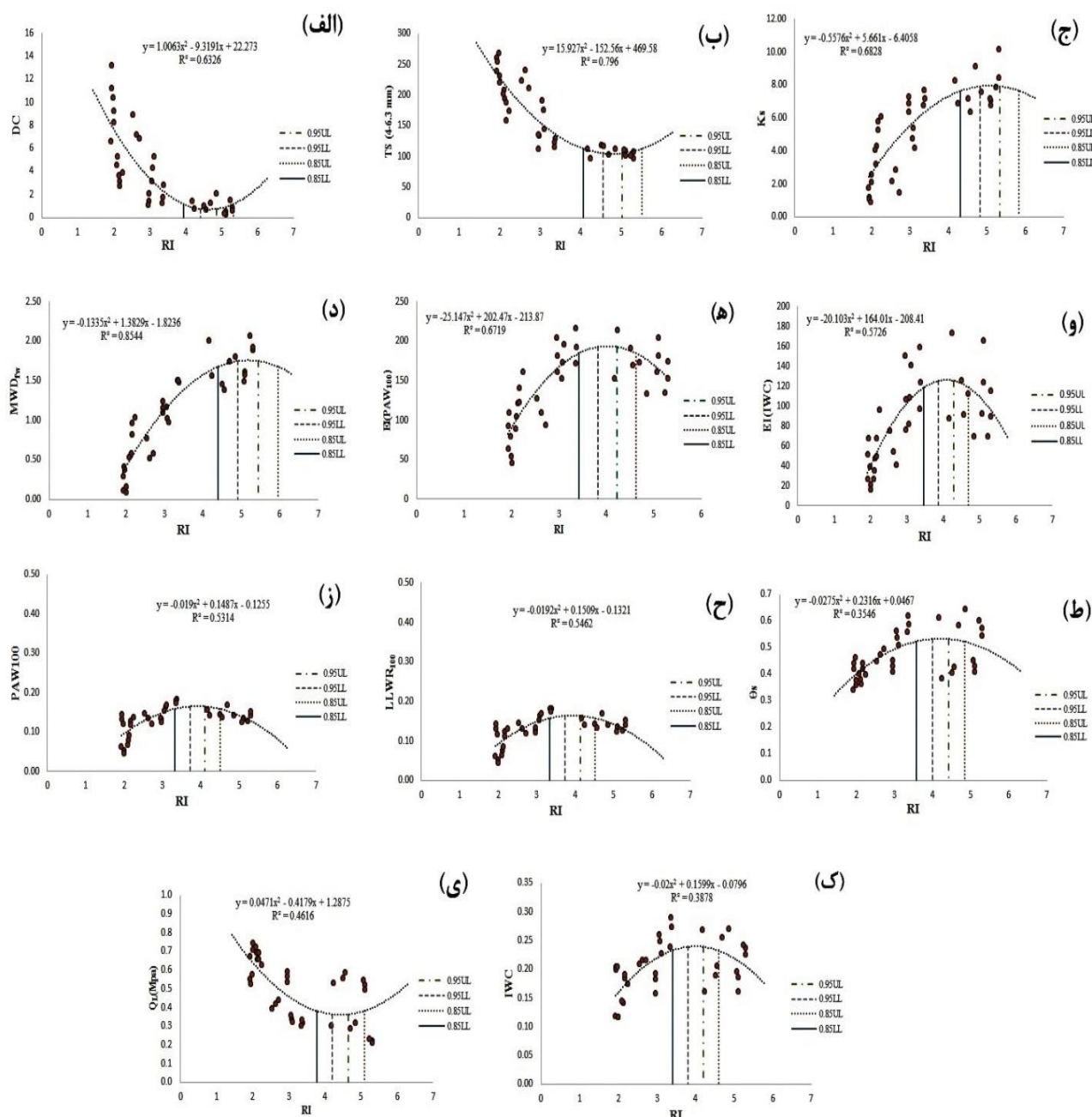
		مؤلفه		
		PCA <sub>3</sub>	PCA <sub>2</sub>	PCA <sub>1</sub>
ارزش ویژه		۵/۶۸	۶/۰۴۹	۶/۲۱۱
درصد از واریانس		۲۹/۹۰	۳۱/۸۴	۳۲/۶۹
درصد تجمعی		۹۴/۴۳	۶۴/۵۳	۳۲/۶۹
مقدار وزنی	مقدار وزنی	PCA <sub>3</sub>	PCA <sub>2</sub>	PCA <sub>1</sub>
$\theta_r$		۰/۸۲۷	-۰/۲۵۴	۰/۳۰۰
$\theta_s$		۰/۹۳۶	۰/۱۸۲	۰/۱۷۷
$Q_h$		-۰/۵۷۶	-۰/۶۷۵	-۰/۳۹۸
$Q_1$		-۰/۸۶۸	-۰/۳۷۴	-۰/۱۸۴
PAW <sub>100</sub>		۰/۵۵۳	۰/۸۰۴	۰/۱۱۷
LLWR <sub>100</sub>		۰/۵۶۶	۰/۸۰۲	۰/۱۲۹
IWC		۰/۸۶۴	۰/۳۹۷	۰/۰۴۳
EI(PAW <sub>100</sub> )		۰/۰۹۲	۰/۸۰۴	۰/۵۷۵
EI(PAW <sub>330</sub> )		۰/۱۲۳	۰/۷۴۴	۰/۵۷۲
EI(LLWR <sub>100</sub> )		۰/۲۲۹	۰/۷۴۱	۰/۵۵۴
مقدار وزنی	مقدار وزنی	PCA <sub>3</sub>	PCA <sub>2</sub>	PCA <sub>1</sub>
EI(LLWR <sub>330</sub> )		۰/۵۴۰	۰/۷۱۱	۰/۳۰۸
EI(IWC)		۰/۴۹۰	۰/۸۳۷	۰/۰۴۳
MWD <sub>fw</sub>		۰/۸۳۸	۰/۳۴۹	۰/۴۹۶
MWD <sub>sw</sub>		۰/۶۵۴	۰/۳۳۶	۰/۵۸۹
MWD <sub>d</sub>		۰/۳۹۷	۰/۳۶۷	۰/۷۹۳
TS(4-6.3mm)		-۰/۸۹۳	-۰/۳۴۵	-۰/۲۲۹
TS(6.3-8mm)		-۰/۸۲۶	-۰/۳۵۸	-۰/۱۷۰
DC		-۰/۹۲۷	-۰/۲۵۱	-۰/۰۸۵
K <sub>s</sub>		۰/۸۷۹	۰/۲۵۰	۰/۳۳۲

\*ویژگی‌ها در محدوده ۱۰٪ بالاترین وزن‌های موجود در هر مؤلفه با خط زیر نشان داده شده و به عنوان نشانگرهای MDS انتخاب شدند.

هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ ) با افزایش آبگریزی (متأثر از افزایش ماده آلی) روند صعودی دارد که نتایج مشابهی در مطالعات مختلف دیده شده است (Major et al., 2010; Sepehrnia et al., 2017). این امر به دلیل بهبود ساختمان سازی خاک و احتمال وقوع جریان‌های ترجیحی قابل توجیه است (White and Sully, 1987). البته لازم به ذکر است طبق پژوهش‌های پیشین حد پایینی و بالایی بحرانی برای  $K_s$  در خاک‌های کشاورزی به ترتیب ۰/۰۰۰۱ و ۰/۰۰۱ سانتی‌متر در ثانیه (۰/۳۶ تا ۳۶ سانتی‌متر در ساعت) می‌باشد (McQueen and Shepherd 2002, Reynolds et al., 2008). با استناد به این نتیجه می‌توان بیان کرد در مطالعه حاضر در تمامی مقادیر آبگریزی محدودیت بحرانی برای  $K_s$  مطرح نمی‌شود. اما در حدود RI برابر ۵/۱ (در تیمار ۱۰٪ کود گاوی) روند تغییرات  $K_s$  تغییر کرده و با افزایش آبگریزی  $K_s$  سیر کاهشی پیدا می‌کند (شکل ۳، ج). در این مطالعه  $MWD_{fw}$  نسبت به  $MWD_{sw}$  و  $MWD_{dry}$  تغییرات را بهتر نشان داد و به عنوان یکی از نشانگرهای MDS انتخاب شد. در این مطالعه با افزایش RI تا مقادیر آبگریزی ۵/۱۷ (تیمار ۸٪ و ۱۰٪ کود گاوی)، افزایش  $MWD_{fw}$  مشاهده می‌شود (شکل ۳، د). مطالعات زیادی افزایش  $MWD$  و پایداری خاکدانه را با افزایش آبگریزی گزارش کرده‌اند (Farahnak et al., 2019; Sepehrnia et al., 2017).

مفهوم EI این قابلیت را دارد تا انرژی ویژه برای جذب واحد جرم آب محاسبه شده به روش PAW، LLWR و IWC را تعیین کند (Asgarzadeh et al., 2011). در تمامی آبگریزی‌ها مقادیر EI(IWC) نسبت به EI(PAW<sub>100</sub>) کمتر بود (شکل ۳، ه؛ و) که به این مفهوم است که روش IWC فرض می‌کند بیش‌تر آب قابل استفاده در مقادیر کمتر مکش ماتریک قرار دارد و از این رو انرژی مورد نیاز برای جذب واحد جرم آب خاک در روش IWC نسبت به PAW کمتر است. مقادیر آبگریزی بهتر توانستند EI(PAW<sub>100</sub>) را تبیین کنند ( $R^2=0.67$ ) و با توجه به مطالب ذکر شده به نظر می‌رسد آبگریزی انرژی برای جذب آب در مقادیر مکش ماتریک بالاتر را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد. با افزایش آبگریزی مقادیر EI(IWC) و EI(PAW<sub>100</sub>) در ابتدا افزایش می‌یابد و در RI حدود ۳/۹ تا ۴/۲ (بین تیمار ۵٪ و ۸٪ کود گاوی) روند کاهشی شروع شده و سبب کاهش مجدد انرژی جهت جذب آب شد (جدول ۶). PAW و LLWR، روند تقریباً یکسانی را در مواجهه با تغییرات آبگریزی از خود نشان دادند. روند تغییرات این دو متغیر تا RI حدود ۳/۸ (بین تیمار ۵٪ و ۸٪ کود گاوی)

افزایشی بوده و بعد از این نقطه تغییرات هر دو متغیر کاهش می‌دهد. این امر نشان می‌دهد در بررسی PAW و LLWR تأثیر منفی آبریزی در مقادیر کمتر RI نسبت به سایر متغیرهای MDS نمود پیدا کرد و به عبارتی این دو شاخص نسبت به افزایش آبریزی حساسیت بیشتری دارند (شکل ۳، ز و ح). روند افزایشی رطوبت اشباع ( $\theta_s$ ) در RI حدود ۴/۲ (تیمار ۸٪ کود گاوی) تغییر کرده و کاهش می‌شود. این تغییر نشان می‌دهد در ابتدا آبریزی حاصل از مواد آلی (به عنوان تنها عامل در حال تغییر) با بهبود ساختمان خاک و بهبود منافذ سبب افزایش نگهداشت آب در حالت اشباع شدند. از طرفی با توجه به اینکه در شرایط اشباع تأثیر مواد آبریز در سطح ذرات خاک و همچنین در محلول خاک به حداقل مقدار خود می‌رسد، کاهش رطوبت اشباع با افزایش آبریزی در مقادیر بیشتری از RI رخ می‌دهد (شکل ۳، ط). در آخر گنجایش آب انتگرالی (IWC)، روندی مشابه EI(IWC) طی می‌کند (شکل ۳، ک) (Hosseini et al., 2016).



شکل ۳. بررسی اثر شاخص آبریزی (RI) بر نشانگرهای MDS: DC (%),  $K_s$  ( $\text{cm hr}^{-1}$ ),  $MWD_{tw}$  (mm),  $EI(PAW_{100})$  ( $\text{J kg}^{-1}$ ),  $PAW_{100}$  ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  $LLWR_{100}$  ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  $Q_z$  (MPa),  $IWC$  ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) و  $EI(IWC)$  ( $\text{J kg}^{-1}$ )



جدول ۶. تعیین دامنه بهینه و با محدودیت کم شاخص آبریزی (RI)؛ DC (%)، TS (kPa)،  $K_s$  ( $cm\ hr^{-1}$ )،  $MWD_{fw}$  (mm)،  $EI(PAW_{100})$  ( $J\ kg^{-1}$ )،  $EI(LLWR_{100})$  ( $J\ kg^{-1}$ )،  $PAW_{100}$  ( $cm^3\ cm^{-3}$ )،  $LLWR_{100}$  ( $cm^3\ cm^{-3}$ )،  $\theta_s$  ( $cm^3\ cm^{-3}$ )،  $Q_1$  (MPa) و  $IWC$  ( $cm^3\ cm^{-3}$ )

Sig	0.85LL-0.85UL		0.95LL-0.95UL		حداقل ویژگی‌های مؤثر فیزیکی (MDS)	
	نشانهگر MDS	دامنه با محدودیت کم RI	نشانهگر MDS	دامنه بهینه RI		
۰/۰۰۹	۱/۱۸	۳/۹۴-۵/۳۲	۰/۷۵	۴/۴۰-۴/۸۶	DC	PCA <sub>1</sub>
۰/۰۰۱	۱۱۲/۴۷	۴/۰۷-۵/۵۱	۱۰۵/۱۶	۴/۵۵-۵/۰۳	TS(4-6.3mm)	
۰/۰۰۳	۷/۶۴	۴/۳۱-۵/۸۴	۷/۹۳	۴/۸۲-۵/۳۳	$K_s$	
۰/۰۰۸	۱/۶۸	۴/۴۰-۵/۹۶	۱/۷۵	۴/۹۲-۵/۴۴	$MWD_{fw}$	
۰/۰۰۱	۱۸۴/۵	۳/۴۲-۴/۶۳	۱۹۲/۶۶	۳/۸۲-۴/۲۳	$EI(PAW_{100})$	PCA <sub>2</sub>
۰/۰۰۱	۱۱۸/۵۸	۳/۴۷-۴/۶۹	۱۲۵/۲۷	۳/۸۸-۴/۲۸	$EI(IWC)$	
۰/۰۰۱	۰/۱۵۹	۳/۳۳-۴/۵۰	۰/۱۶۵	۳/۷۲-۴/۱۱	$PAW_{100}$	
۰/۰۰۱	۰/۱۵۸	۳/۳۴-۴/۵۲	۰/۱۶۴	۳/۷۳-۴/۱۳	$LLWR_{100}$	
۰/۰۲۵	۰/۵۲	۳/۵۸-۴/۸۴	۰/۵۳	۴/۰۰-۴/۴۲	$\theta_s$	PCA <sub>3</sub>
۰/۰۲۶	۰/۳۸۱	۳/۷۷-۵/۱۰	۰/۳۶۳	۴/۲۱-۴/۶۶	$Q_1$	
۰/۰۰۳	۰/۲۳۲	۳/۴۰-۴/۶۰	۰/۲۴	۳/۸۰-۴/۲۰	$IWC$	

بررسی دقیق‌تر مقادیر RI هر مؤلفه (جدول ۶ و ۷) نشان داد مؤلفه اول وسیع‌ترین و مؤلفه دوم محدودترین دامنه تغییرات را برای RI دارد. همانطور که از انتخاب نشانگرهایی که در هر یک از مؤلفه‌ها انجام شده مشخص است، PCA<sub>1</sub> نشان‌دهنده ساختمان خاک و خاکدانه‌سازی است. با بررسی نشانگرهای مربوط به این مؤلفه (DC، TS،  $K_s$  و  $MWD_{fw}$ ) مشخص گردید با اعمال تیمار کود گاوی و شروع افزایش آبریزی، روند تغییرات هر چهار نشانگر انتخاب شده در جهت بهبود ساختمان خاک بود. DC (به عنوان عامل ناپایداری) و TS روند کاهش و  $K_s$  و  $MWD_{fw}$  (به عنوان عامل پایداری) روند افزایشی داشتند. RI در دامنه ۴/۴۰-۴/۸۶ به حداکثر اثرات مطلوب خود می‌رسد و پس از آن آغاز محدودیت‌های مربوط به آبریزی است و می‌توان RI ۴/۸۶ را آستانه بحرانی این شاخص برای نشانگرهای مربوط به پایداری خاک دانست.

در PCA<sub>2</sub> ویژگی‌هایی از فراهمی آب قرار گرفته‌اند که این ویژگی‌ها ارتباط نزدیکی با جذب و نگهداشت آب در خاک دارند و به عبارتی حساسیت بالایی نسبت به افزایش آبریزی از خود نشان می‌دهند. از این رو اگر بخواهیم دامنه ای از آبریزی که حداکثر تأثیر مثبت بر این شاخص‌ها را داشته باشد انتخاب کنیم، می‌توان دامنه ۳/۷۲-۴/۲۸ را انتخاب کرد. در آخر PCA<sub>3</sub> شامل سه نشانگر رطوبت اشباع ( $\theta_s$ )، کمترین مقاومت فروروی ( $Q_1$ ) و آب انتگرالی شده ( $IWC$ ) است که این نشانگرها هم تحت تأثیر پیوند ذرات خاک، پایداری خاکدانه‌ها و همچنین عوامل مؤثر در جذب و نگهداشت آب هستند و حداکثر تأثیر مفید آبریزی در دامنه ۳/۸۰-۴/۶۶ در این نشانگرها برآورد شد (جدول ۷). دامنه آبریزی بهینه فیزیکی، دامنه ای از آبریزی است که هیچگونه محدودیتی برای هیچ یک از ویژگی‌ها و نشانگرهای کیفیت فیزیکی خاک نداشته، و علاوه بر آن آبریزی در حداکثر تأثیر مفید خود قرار دارد. در نهایت با استفاده از دامنه بهینه آبریزی بدست آمده در سه مؤلفه، می‌توان یک دامنه بهینه‌ای از آبریزی برای خاک‌های مورد آزمایش گزارش کرد. این دامنه از مقادیر 0.95LL و 0.95UL حاصل از سه مؤلفه به دست می‌آید. در بین مقادیر حاصله (جدول ۷) هر کدام از مقادیر که کمترین باشد (محدود کننده‌تر)، در نظر گرفته می‌شود. در نهایت مقادیر 0.95LL و 0.95UL به ترتیب ۳/۷۲ و ۴/۲۸ انتخاب می‌گردد.

جدول ۷. دامنه بهینه و با محدودیت کم شاخص آبریزی (RI)

مؤلفه‌های اصلی	دامنه بهینه RI	دامنه با محدودیت کم RI
PCA <sub>1</sub>	۴/۴۰-۴/۸۶	۳/۹۴-۵/۹۶
PCA <sub>2</sub>	۳/۷۲-۴/۲۸	۳/۳۳-۴/۶۹
PCA <sub>3</sub>	۳/۸۰-۴/۶۶	۳/۴۰-۵/۱۰

## نتیجه‌گیری

اهمیت کلیدی و مهم ماده آلی در بهبود ساختمان و پایداری خاک و همچنین فراهمی و نگهداشت آب در خاک خصوصاً در مناطق خشک و نیمه خشک، سبب می‌گردد که مدیریت اراضی کشاورزی در این مناطق به سمت افزایش هرچه بیشتر ماده آلی در خاک‌ها برنامه ریزی

شود. اما افزایش ماده آلی خاک‌ها نگرانی از اثرات مخرب آبگریزی را افزایش می‌دهد. در این راستا با تعریف محدوده آبگریزی زیر-بحرانی ( $90^\circ < \beta < 1.95 > RI > 50$ ) به پیامدهای مثبت آبگریزی اشاره و از نگرانی‌های افزایش آبگریزی کاسته شد. با این حال نتایج متفاوت از پیامدهای مثبت و منفی آبگریزی در محدوده آبگریزی زیر-بحرانی گزارش می‌گردد که به نظر می‌رسد به علت گستردگی این محدوده و وجود عوامل مختلف اثرگذار بر پدیده آبگریزی است. در این پژوهش سعی گردید با ثابت قرار دادن اغلب عوامل اثرگذار بر آبگریزی دامنه محدودتری از آبگریزی زیر-بحرانی مشخص شده و با توجه به اهمیت این دامنه با عنوان آبگریزی بهینه تعریف گردید. در این راستا دو نوع از مهمترین خاک‌های کشاورزی (لوم شنی و لوم رسی) انتخاب و مقادیر حداقل تا حداکثری (۱ تا ۱۰٪) از کود گاوی مورد استفاده در مزارع و باغات، اعمال شد. در تمامی خاکها و درصدهای تیمار ماده آلی پدیده آبگریزی رخ داد و اثر تیمار ماده آلی و نوع خاک بر تغییرات آبگریزی معنی‌دار بود. پس انتخاب نشانگرهای MDS مشخص گردید زمانی که تنها ویژگی‌های ساختمان خاک مورد بررسی قرار می‌گیرند آبگریزی بهینه در دامنه وسیع‌تری تعریف می‌شود اما در زمان بررسی ویژگی‌های فراهمی آب این دامنه محدودتر می‌گردد که حساسیت بیشتر شاخص‌های فراهمی آب را به آبگریزی نشان می‌دهد. در نهایت دامنه‌ی بهینه آبگریزی (0.95LL-0.95UL)، در دامنه با حداکثر پیامدهای مثبت و حداقل محدودیت برای تمامی ویژگی‌های کیفیت خاک (اعم از ویژگی‌های ساختمان خاک و فراهمی آب) در دامنه ۳/۷۲-۴/۲۸ تعریف شد. آنچه مسلم است تعریف و تعیین روش عملی آبگریزی بهینه (به عنوان بخشی از آبگریزی زیر-بحرانی) بسیار از نگرانی‌ها در خصوص وجود آبگریزی در زمین‌های کشاورزی را از بین می‌برد. می‌توان آبگریزی در این دامنه را یک عامل مفید در بهبود شرایط فیزیکی خاک مطرح کرد و به عنوان یکی از ویژگی‌ها و شاخص‌های کیفیت فیزیکی پیشنهاد نمود. به هر حال به نظر می‌رسد که نیاز است نتایج این مطالعه را در بررسی‌ها بیشتر در مورد تیمارهای دیگر یا دامنه‌ای وسیع‌تر از مقادیر آبگریزی مورد ارزیابی و تحلیل قرار داد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

## REFERENCES

- Abid, M., & Lal, R. (2009). Tillage and drainage impact on soil quality: II. Tensile strength of aggregates, moisture retention and water infiltration. *Soil and Tillage research*, 103(2), 364-372.
- Abiven, S., Menasseri, S., & Chenu, C. (2009). The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability—A literature analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(1), 1-12.
- Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M. R., Dexter, A. R., Mahboubi, A. A., & Neyshabouri, M. R. (2014). Determination of soil available water for plants: consistency between laboratory and field measurements. *Geoderma*, 226, 8-20.
- Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M. R., Mahboubi, A. A., Nosrati, A., & Dexter, A. R. (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(1), 34-42.
- Bachmann, J., Horton, R., & Van Der Ploeg, R. R. (2001). Isothermal and nonisothermal evaporation from four sandy soils of different water repellency. *Soil Science Society of America Journal*, 65(6), 1599-1607.
- Badía-Villas, D., González-Pérez, J. A., Aznar, J. M., Arjona-Gracia, B., & Martí-Dalmau, C. (2014). Changes in water repellency, aggregation and organic matter of a mollic horizon burned in laboratory: Soil depth affected by fire. *Geoderma*, 213, 400-407.
- Blanco-Canqui, H., & Ruis, S. J. (2018). No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*, 326, 164-200.
- Briedis, C., de Moraes Sá, J. C., Caires, E. F., de Fátima Navarro, J., Inagaki, T. M., Boer, A., ... & Dos Santos, J. B. (2012). Soil organic matter pools and carbon-protection mechanisms in aggregate classes influenced by surface liming in a no-till system. *Geoderma*, 170, 80-88.
- Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1-2), 3-22.
- Buczko, U., Bens, O., & Hüttl, R. F. (2005). Variability of soil water repellency in sandy forest soils with different stand structure under Scots pine (*Pinus sylvestris*) and beech (*Fagus sylvatica*). *Geoderma*, 126(3-4), 317-336.
- Burt, R., Reinsch, T. G., & Miller, W. P. (1993). A micro-pipette method for water dispersible clay. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 24(19-20), 2531-2544.
- Carpenter, D. R., & Chong, G. W. (2010). Patterns in the aggregate stability of Mancos Shale derived soils. *Catena*, 80(1), 65-73.
- Carrick, S., Buchan, G., Almond, P., & Smith, N. (2011). Atypical early-time infiltration into a structured soil



- near field capacity: The dynamic interplay between sorptivity, hydrophobicity, and air encapsulation. *Geoderma*, 160(3-4), 579-589.
- Chau, H. W., Goh, Y. K., Vujanovic, V., & Si, B. C. (2012). Wetting properties of fungi mycelium alter soil infiltration and soil water repellency in a  $\gamma$ -sterilized wettable and repellent soil. *Fungal biology*, 116(12), 1212-1218.
- Cosentino, D., Hallett, P. D., Michel, J. C., & Chenu, C. (2010). Do different methods for measuring the hydrophobicity of soil aggregates give the same trends in soil amended with residue?. *Geoderma*, 159(1-2), 221-227.
- Czyż E.A. & Vizitiu O.P., (2012). Soil physical quality in relation to readily-dispersible clay, friability and saturated hydraulic conductivity. In: *Practical Applications of Environmental Research* (Eds J. Kostecka, J. Kaniuczak), Science for Economy, University of Rzeszów, Poland.
- Da Silva, A. P., Kay, B. D., & Perfect, E. (1994). Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58(6), 1775-1781.
- DeBano, L. F. (1981). *Water repellent soils: a state-of-the-art* (Vol. 46). US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station.
- Dekker, L. W., Ritsema, C. J., Oostindie, K., Moore, D., & Wesseling, J. G. (2009). Methods for determining soil water repellency on field-moist samples. *Water resources research*, 45(4).
- Dexter, A. R. (2004). Soil physical quality: Part III: Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. *Geoderma*, 120(3-4), 227-239.
- Doerr, S. H., & Thomas, A. D. (2012). Soil moisture: a controlling factor in water repellency? *Soil Water Repellency: Occurrence, Consequences, and Amelioration*, 137.
- Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. *Defining soil quality for a sustainable environment*, 35, 1-21.
- Dorostkar, V., Afyuni, M., Khoshgoftarmanesh, A. H., Mosaddeghi, M. R., & Rejali, F. (2016). Subcritical soil hydrophobicity in the presence of native and exotic arbuscular mycorrhizal species at different soil salinity levels. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62(3), 429-443.
- Farahnak, M., Mitsuyasu, K., Otsuki, K., Shimizu, K., & Kume, A. (2019). Factors determining soil water repellency in two coniferous plantations on a hillslope. *Forests*, 10(9), 730.
- Fattet, M., Fu, Y., Ghestem, M., Ma, W., Foulonneau, M., Nespoulous, J., ... & Stokes, A. (2011). Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength. *Catena*, 87(1), 60-69.
- Feeney, D. S., Crawford, J. W., Daniell, T., Hallett, P. D., Nunan, N., Ritz, K., ... & Young, I. M. (2006). Three-dimensional microorganization of the soil-root-microbe system. *Microbial ecology*, 52(1), 151-158.
- Feller, C., & Beare, M. H. (1997). Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, 79(1-4), 69-116.
- Gee, G.W. & Or, D. (2002). Particle – Size Analysis. In: Warren, A. D. (Ed) *Methods of Soil Analysis*. Part 4. Physical Methods. Soil Science Society of America Inc, pp. 255-295.
- Groenevelt, P. H., Grant, C. D., & Semetsa, S. (2001). A new procedure to determine soil water availability. *Soil Research*, 39(3), 577-598.
- Hallett, P. D. (2007). An introduction to soil water repellency In: Proceedings of the 8th International Symposium on Adjuvants for Agrochemicals (ISAA2007). *Columbus, USA*.
- Hallett, P. D., & Young, I. M. (1999). Changes to water repellence of soil aggregates caused by substrate-induced microbial activity. *European Journal of Soil Science*, 50(1), 35-40.
- Hallett, P. D., Baumgartl, T., & Young, I. M. (2001). Subcritical water repellency of aggregates from a range of soil management practices. *Soil Science Society of America Journal*, 65(1), 184-190.
- Hallett, P. D., Feeney, D. S., Bengough, A. G., Rillig, M. C., Scrimgeour, C. M., & Young, I. M. (2009). Disentangling the impact of AM fungi versus roots on soil structure and water transport. *Plant and Soil*, 314(1), 183-196.
- Hosseini, F., Mosaddeghi, M. R., Hajabbasi, M. A., & Sabzalian, M. R. (2016). Role of fungal endophyte of tall fescue (*Epichloë coenophiala*) on water availability, wilting point and integral energy in texturally-different soils. *Agricultural Water Management*, 163, 197-211.
- Hosseini, F., Mosaddeghi, M. R., Hajabbasi, M. A., & Sabzalian, M. R. (2015). Aboveground fungal endophyte infection in tall fescue alters rhizosphere chemical, biological, and hydraulic properties in texture-dependent ways. *Plant and soil*, 388(1), 351-366.
- Jindaluang, W., Kheoruenromne, I., Suddhiprakarn, A., Singh, B. P., & Singh, B. (2013). Influence of soil

- texture and mineralogy on organic matter content and composition in physically separated fractions soils of Thailand. *Geoderma*, 195, 207-219.
- Johannes, A., Matter, A., Schulin, R., Weiskopf, P., Baveye, P. C., & Boivin, P. (2017). Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter?. *Geoderma*, 302, 14-21.
- Jordán, A., Zavala, L. M., Mataix-Solera, J., Nava, A. L., & Alanís, N. (2011). Effect of fire severity on water repellency and aggregate stability on Mexican volcanic soils. *Catena*, 84(3), 136-147.
- Kirkham, M. B. (2005). *Principles of soil and plant water relations*. Academic Press. pp. 500.
- Klute, A. (1986). Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods; SSSA Book Series 5. Soil Science Society of America: Madison WI.
- Klute, A., & Dirksen, C. (1986). Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 5, 687-734.
- Lehrsch, G. A., Sojka, R. E., & Koehn, A. C. (2012). Surfactant effects on soil aggregate tensile strength. *Geoderma*, 189, 199-206.
- Li, S., Lu, J., Liang, G., Wu, X., Zhang, M., Plougonven, E., ... & Degré, A. (2021). Factors governing soil water repellency under tillage management: The role of pore structure and hydrophobic substances. *Land Degradation & Development*, 32(2), 1046-1059.
- Loeppert, R. H., & Suarez, D. L. (1996). Carbonate and gypsum. Methods of soil analysis: Part 3 chemical methods, 5, 437-474.
- Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S. J., & Lehmann, J. (2010). Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and soil*, 333(1), 117-128.
- McQueen, D. J., & Shepherd, T. G. (2002). Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil (Typic Endoaquept) under varying durations of cropping, Manawatu Region, New Zealand. *Soil and Tillage Research*, 63(3-4), 93-107.
- Mirbabaei, S. M., Shabanpour, M., Khaledian, M., & Zolfaghari, A. (2021). Investigation of the relationship between natural hydrophobicity and physicochemical properties of soil in different land uses in the coastal areas of West Guilan. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(7), 1807-1823. (In Farsi)
- Mirbabaei, S. M., Shahrestani, M. S., Zolfaghari, A., & Abkenar, K. T. (2013). Relationship between soil water repellency and some of soil properties in northern Iran. *Catena*, 108, 26-34.
- Mohammadi, N., & Khademalrasoul, A. (2021). Assessment of Zeopant and biochar of sugarcane residual on mean weight diameter and Atterberg limits of soil contaminated with total petroleum hydrocarbon. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(2), 395-407. (In Farsi)
- Müller, K., & Deurer, M. (2011). Review of the remediation strategies for soil water repellency. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(1), 208-221.
- Nelson, D. A., & Sommers, L. (1983). Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties*, 9, 539-579.
- Reynolds, W. D., Drury, C. F., Yang, X. M., & Tan, C. S. (2008). Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma*, 146(3-4), 466-474.
- Rhoades, J. D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods, 5, 417-435.
- Sepehrnia, N., Hajabbasi, M. A., Afyuni, M., & Lichner, L. U. (2017). Soil water repellency changes with depth and relationship to physical properties within wetttable and repellent soil profiles. *J. Hydrol. Hydromech*, 65(2017), 1.
- Smettem, K. R. J., Rye, C., Henry, D. J., Sochacki, S. J., & Harper, R. J. (2021). Soil water repellency and the five spheres of influence: A review of mechanisms, measurement and ecological implications. *Science of the Total Environment*, 787, 147429.
- Stock, O., & Downes, N. K. (2008). Effects of additions of organic matter on the penetration resistance of glacial till for the entire water tension range. *Soil and Tillage Research*, 99(2), 191-201.
- Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. Methods of soil analysis: part 3 chemical methods, 5, 475-490.
- Urbanek, E., Hallett, P., Feeney, D., & Horn, R. (2007). Water repellency and distribution of hydrophilic and hydrophobic compounds in soil aggregates from different tillage systems. *Geoderma*, 140(1-2), 147-155.
- 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.
- White, I., & Sully, M. J. (1987). Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration. *Water Resources Research*, 23(8), 1514-1522.
- Zavala, L. M., González, F. A., & Jordán, A. (2009). Fire-induced soil water repellency under different



vegetation types along the Atlantic dune coast-line in SW Spain. *Catena*, 79(2), 153-162.

Zheng, W., Morris, E. K., Lehmann, A., & Rillig, M. C. (2016). Interplay of soil water repellency, soil aggregation and organic carbon. A meta-analysis. *Geoderma*, 283, 39-47.