

## نقش مقادیر مختلف سنگریزه بر برخی شاخص‌های کیفیت فیزیکی یک خاک لوم سیلتي

حسین عسگرزاده<sup>۱\*</sup>، فرخ اسدزاده<sup>۲</sup>، پروین خالقی<sup>۳</sup>

۱. استادیار، گروه علوم خاک دانشگاه ارومیه

۲. استادیار، گروه علوم خاک دانشگاه ارومیه

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم خاک دانشگاه ارومیه

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۷/۷ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۱۰/۱۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۱۰/۲۵)

## چکیده

در این پژوهش نقش مقدار سنگریزه خاک بر شکل منحنی‌های مشخصه رطوبتی و مقاومت فروروی خاک بررسی شد. همچنین ارتباط شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک با مقدار سنگریزه مورد بررسی قرار گرفت. کلاس بافت خاک مورد مطالعه لوم سیلتي با ۵ درصد وزنی سنگریزه اولیه با قطر ۵ تا ۲۰ میلی‌متر بود. از گلدان‌های بزرگ مجهز به سیستم زهکشی با ابعاد ۴۰×۵۰ و عمق ۵۰ سانتی‌متر استفاده شد. آزمایش با ۶ تیمار و ۳ تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی در گلخانه دانشگاه ارومیه انجام شد. تیمارها شامل شش سطح ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد وزنی سنگریزه با اندازه ۵ تا ۲۰ میلی‌متر بود. بعد از کشت گندم گلدان‌ها در فضای باز قرار گرفته و در طول آزمایش تمام تیمارها آب کافی از طریق آبیاری و بارندگی دریافت کردند. مقدار رطوبت خاک در نقاط مهم پتانسیلی خاک در تیمارهای مورد بررسی تفاوت معنی‌داری داشت. بیش‌ترین ( $0.322 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) و کم‌ترین ( $0.269 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) مقدار رطوبت در مکش ماتریک  $10 \text{ hPa}$  به ترتیب برای مقدار سنگریزه معادل با ۱۰ و ۳۰ درصد به دست آمد. افزایش سنگریزه باعث شد که مقاومت فروروی  $2 \text{ MPa}$  به عنوان مقدار بحرانی برای رشد ریشه گیاهان در رطوبت‌های کمتری اتفاق بیفتد. رابطه معنی‌داری بین مقدار رطوبت در مقاومت فروروی  $2 \text{ MPa}$  و مقدار سنگریزه بدست آمد. افزایش مقدار سنگریزه از مقدار طبیعی (۵ درصد) به ۳۰ درصد به ترتیب موجب افزایش بیش از ۱۱ و ۲۵۴ درصدی چگالی ظاهری (BD) و مدت زمان نفوذ آب در خاک ( $T_r$ ) شد.

واژه‌های کلیدی: مقدار سنگریزه، منحنی مشخصه رطوبتی، منحنی مقاومت فروروی خاک، کیفیت فیزیکی خاک

## مقدمه

بسیاری از خاک‌های زراعی به طور طبیعی حاوی مقادیر مختلفی از سنگریزه در افق‌های خود می‌باشند. توزیع خاک‌های سنگریزه‌ای از منطقه‌ای به منطقه دیگر متفاوت بوده و در مناطق مدیترانه‌ای و کوهستانی خاک‌ها حاوی مقادیر قابل توجهی از سنگریزه هستند (Poesen and Lavee, 1994). سنگریزه شامل تمام ذرات منفرد بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر است. اغلب خاک‌های کشاورزی حاوی مقادیر مختلفی از سنگریزه می‌باشند که می‌توانند ویژگی‌های خاک را تحت تأثیر قرار دهند. هرچند در پژوهش‌های اندکی که در خصوص تأثیر سنگریزه بر منحنی نگه‌داری رطوبتی خاک و رفتار فشردگی خاک (Rücknagel et al., 2012) انجام گرفته است به نقش معنی‌دار مقدار سنگریزه بر این ویژگی‌ها تأکید شده است اما در اغلب

مطالعات گلدانی و گلخانه‌ای، خاک عبور داده شده از الک ۲ یا ۵ میلی‌متری به عنوان بستر آزمایش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه حذف مقادیری از سنگریزه موجود در خاک‌های طبیعی سبب تغییر ویژگی‌های فیزیکی خاک می‌شود، نتایج حاصل از این آزمایش‌ها می‌تواند متفاوت از شرایط واقعی (در حضور مقادیر مختلف سنگریزه) باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که قطعات سنگی، مقدار ذخیره آب (Cousin et al., 2003) و سرعت نفوذ آب در خاک (Brakensiek and Rawls, 2009) را تحت تأثیر قرار دهند. حضور سنگریزه‌ها می‌تواند از طریق تغییر در توزیع منافذ خاک بر کیفیت فیزیکی خاک (SPQ) تأثیرگذار باشد. از شاخص‌های مختلفی برای کمی‌سازی سطح یا درجه SPQ استفاده می‌شود. Dexter, (2004a) شاخص  $S^1$  (شیب منحنی مشخصه رطوبتی خاک در نقطه عطف) رابه عنوان شاخص کمی کیفیت فیزیکی

\* نویسنده مسئول : asgarzadeh8688@gmail.com

است که معمولاً برای توصیف درجه فشردگی و وضعیت ساختمانی خاک به کار می‌رود و به علت ارتباط تنگاتنگ با وضعیت تهویه و مقاومت فروری خاک، می‌تواند به عنوان شاخصی از کیفیت فیزیکی خاک به کار رود. (Rucknagel (2012) *et al.*, دریافتند که افزایش مقدار سنگریزه در حدود ۲۵ درصد حجمی، چگالی ظاهری خاک را افزایش می‌دهد. مقاومت فروری خاک ( $Q$ ) نیز یکی از شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک است که می‌تواند در اثر حضور سنگریزه در خاک تغییر نماید. این پارامتر بیان‌گر مقاومت خاک در برابر فروردن یک جسم میله‌ای شکل به درون آن می‌باشد (Soane and van Ouwkerk, 1994). این مشخصه می‌تواند به وسیله رطوبت، بافت و شرایط ساختمانی خاک تحت تأثیر قرار گیرد که در این بین مقدار آب خاک بیش‌ترین اهمیت را دارد (Dexter *et al.*, 2007). هرچه مقاومت مکانیکی خاک در برابر فروری ریشه افزایش یابد، میزان رشد ریشه کاهش یافته، شکل ریشه‌ها تغییر کرده و فرآیندهای مهمی که در قسمت هوایی گیاه صورت می‌گیرد، مختل می‌گردد (To and Kay, 2005). مقادیر مقاومت فروری خاک که توسعه ریشه را در خاک محدود می‌کند در دامنه‌ای بین ۱/۵ تا ۴ مگاپاسکال گزارش شده و ۲ مگاپاسکال مقداری است که بیش‌تر مورد قبول واقع شده است (da Silva *et al.*, 1994).

تمام شاخص‌های ذکر شده تحت تأثیر منحنی‌های رطوبتی و مقاومت فروری خاک قرار می‌گیرند. لذا هر عاملی مانند مقدار سنگریزه که منحنی‌های رطوبتی و مقاومت فروری خاک را تغییر دهد می‌تواند بر مقدار شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک موثر باشد. از این رو شناخت دقیق نقش سنگریزه در ویژگی‌های فیزیکی خاک و متعاقب آن بر کیفیت فیزیکی خاک می‌تواند از نظر مدیریت خاک بسیار سودمند باشد. بررسی اثر مقادیر مختلف سنگریزه در تغییر شکل منحنی‌های مشخصه رطوبتی و مقاومت فروری خاک و تعیین ارتباط شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک و سرعت نفوذ آب در خاک با افزایش مقدار سنگریزه از اهداف این پژوهش بودند.

### مواد و روش‌ها

در این آزمایش از گلدان‌های بزرگ مجهز به سیستم زهکشی با سطح ابعاد ۴۰×۵۰ و عمق ۵۰ سانتی‌متر استفاده شد. آزمایش با ۶ تیمار و ۳ تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی در فضای بیرونی گلخانه (محوطه رو باز) دانشگاه ارومیه انجام شد. تیمارها شامل شش سطح ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد وزنی سنگریزه با اندازه ۵ تا ۲۰ میلی‌متر بود. سنگریزه‌های با ابعاد

خاک پیشنهاد کرد. (Dexter, 2004a, b, c) شاخص  $S$  را با ویژگی‌های فیزیکی خاک مرتبط ساخت و نشان داد مقادیر بزرگ‌تر  $S$  نشان‌دهنده فراوانی منافذ ساختمانی و کیفیت فیزیکی بهتر خاک در ارتباط با رشد ریشه، خاک‌ورزی و جریان آب در خاک می‌باشد. (da Silva *et al.*, 1994) شاخص دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (LLWR) را ارائه دادند. LLWR دامنه‌ای از رطوبت خاک است که رشد گیاه از نظر پتانسیل ماتریک، تهویه و مقاومت مکانیکی خاک با حداقل محدودیت روبرو باشد. این مفهوم سه عامل مؤثر بر رشد گیاه را در یک متغیر، جمع‌بندی نموده و از این‌رو می‌تواند به عنوان شاخصی از کیفیت ساختمان خاک برای تولید محصول مورد استفاده قرار گیرد. این شاخص ارتباط قوی با ویژگی‌های ساختمانی خاک دارد (Asgarzadeh *et al.*, 2010; 2011). پژوهشی در خصوص تأثیر مقدار سنگریزه بر مقدار  $S$  یا LLWR صورت نگرفته است. مدت زمان لازم برای نفوذ آب در خاک ( $T_1$ ) از جمله ویژگی‌های مهم فیزیکی است که مقدار آن می‌تواند تحت تأثیر سطوح مختلف سنگریزه موجود در خاک قرار گیرد. (Verbist *et al.*, 2009) نشان دادند که حضور سنگریزه در خاک باعث افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌شود اما بر هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک اثر منفی دارد. (Beibei *et al.*, 2009) نیز اثر محتوای سنگریزه پروفیل را بر نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌های لسی مورد بررسی قرار داده و گزارش نمودند که با افزایش درصد سنگریزه تا ۴۰ درصد وزنی خاک، نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی اشباع کاهش یافته و در مقادیر بیش از ۴۰ درصد؛ نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی اشباع مجدداً افزایش می‌یابند. (Zhongjie *et al.*, 2008) اظهار کردند که با افزایش درصد سنگریزه سطحی تا ۲۰ درصد حجمی سرعت نفوذ ماندگار آب در خاک افزایش یافته و با بیشتر شدن سنگریزه از ۲۰ درصد سرعت یاد شده کمتر می‌شود. این پژوهشگران نتایج خود را در شرایط طبیعی خاک (درجا) و تحت پوشش جنگلی به دست آورده‌اند. طبق اظهارات (Zhongjie *et al.*, 2008) در مقادیر کم سنگریزه، اثر توام سنگریزه‌ها و ریشه درختان سبب ایجاد مسیرهای نفوذ ترجیحی در خاک می‌شوند در حالی که با افزایش سنگریزه تأثیر آن در کاهش سطح مقطع خاک در مقابل عبور جریان آب بارزتر شده و سرعت نفوذ کاهش می‌یابد. چگالی ظاهری<sup>۲</sup> (BD) به عنوان شاخصی از ساختمان خاک (Reynolds *et al.*, 2008) کمیته

1. Least Limiting Water Range

2. Bulk Density

محاسبه و به عنوان رطوبت اشباع در نظر گرفته شد. مدل منحنی مشخصه رطوبتی ون گنوختن با نرم افزار RETC بر داده های اندازه گیری شده نگه داشت آب خاک برازش داده شد. معادله (van Genuchten, 1980) به صورت زیر است:

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[ 1 + (\alpha h)^n \right]^{\frac{1}{n}-1} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در این رابطه،  $\theta(h)$ ، رطوبت حجمی خاک بر حسب  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$   $h$  مکش ماتریک خاک بر حسب  $\text{hPa}$   $\theta_r$  و  $\theta_s$  به ترتیب رطوبت باقیمانده و اشباع خاک بر حسب  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$   $\alpha$  و مرتبط با عکس مکش در نقطه عطف بر حسب  $\text{hPa}^{-1}$   $n$  و شاخص توزیع اندازه منافذ خاک می باشند.

#### اندازه گیری مقاومت فروریو برآزش منحنی مقاومت فروریو خاک

پس از اتمام دوره رشد و تثبیت ساختمان خاک، میانگین مقاومت فروریو خاک هر یک از گلدان ها در عمق ۵ تا ۱۲ سانتی متری سطح خاک توسط دستگاه فروسنج مخروطی مزرعه ای اندازه گیری شد. اندازه گیری در هر گلدان در طول زمان و در چند مرحله صورت گرفت، به این ترتیب که با گذشت زمان رطوبت کاهش یافته و در نتیجه مقاومت فروریو مربوط به هر رطوبت تعیین و از این طریق منحنی مشخصه مقاومت فروریو برای هر گلدان جداگانه به دست آمد. منحنی مشخصه مربوط به مقاومت فروریو در برابر رطوبت خاک با استفاده از مدل تنظیم شده van Genuchten (1980) مدل سازی شد:

$$Q = Q_{wet} + (Q_{dry} - Q_{wet}) \left[ 1 + (\alpha_{Q\theta} \theta)^{n_{Q\theta}} \right]^{\frac{1}{n_{Q\theta}} - 1} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در این رابطه  $Q$  مقاومت فروریو خاک بر حسب MPa،  $\theta$  رطوبت حجمی خاک بر حسب  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  و  $Q_{dry}$ ،  $Q_{wet}$  و  $\alpha_{Q\theta}$  و  $n_{Q\theta}$  پارامترهای برآزش مدل، به ترتیب مرتبط با کمترین و بیشترین مقاومت فروریو پیش بینی شده خاک بر حسب MPa، و پارامترهای مرتبط با نقطه عطف و شیب تابع مقاومت فروریو در برابر رطوبت خاک می باشند.

#### آب قابل دسترس برای گیاه

آب قابل دسترس گیاه (PAW) با معادله زیر محاسبه گردید:

$$PAW = \int_{h_{FC}}^{h_{PWP}} \frac{d\theta}{dh} dh = \int_{h_{FC}}^{h_{PWP}} C(\theta) dh \quad (\text{رابطه ۳})$$

در این معادله FC و PWP حدود بالایی و پایینی آن و  $\frac{d\theta}{dh}$  یا  $C(\theta)$  گنجایش ویژه رطوبتی خاک است. برای حد بالایی

مدنظر (۲۰-۵ میلی متر) با استفاده از الک های ۲۰ و ۵ میلی متری جدا شده و به صورت درصد وزنی قبل از اینکه خاک به گلدان ها منتقل شود، افزوده شدند. در این پژوهش به منظور ایجاد شرایط طبیعی برای ساختمان خاک، گندم پاییزه (رقم زرین) در گلدان ها کشت شد. به این صورت که پس از افزودن عناصر غذایی ماکرو NPK و میکرو Zn و Fe در حد پایه به خاک، گندم پاییزه در آبان ماه در دو ردیف به فاصله ۲۰ سانتی متر از هم در گلدان ها کاشته شده و در فضای باز قرار گرفتند. در طول آزمایش گلدان ها به طور مرتب هر دو روز یک بار توزین شده و زمانی که رطوبت به ۰/۶ ظرفیت مزرعه ای می رسید، آبیاری شده و به حد رطوبت ظرفیت مزرعه ای رسانده می شدند.

#### اندازه گیری زمان نفوذ آب به خاک

اندازه گیری زمان نفوذ آب به خاک در اواخر دوره رشد گیاه که ریشه ها کاملاً رشد کرده و ساختمان خاک را تثبیت نموده بودند، انجام شد. برای این منظور ابتدا گلدان ها با مقدار نسبتاً زیادی از آب آبیاری شده و اجازه داده شد تا آب ثقلی نمونه ها از طریق سیستم زهکشی زیر گلدان ها تخلیه شود. بعد از حصول تعادل زمان لازم برای نفوذ حجم مشخصی از آب (۲۵ لیتر) به خاک در هر یک از گلدان ها تعیین شد.

#### اندازه گیری چگالی ظاهری

در اواخر دوره رشد رویشی گیاه، چگالی ظاهری هر گلدان در رطوبت نزدیک ظرفیت مزرعه ای با برداشت نمونه ای از عمق ۵ تا ۱۵ سانتی متری با استفاده از سیلندری به حجم  $\text{cm}^3$  ۱۰۰۰ و خشک کردن نمونه در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت، محاسبه شد.

#### اندازه گیری ویژگی های هیدرولیکی و برآزش منحنی رطوبتی خاک

به منظور تعیین ویژگی های هیدرولیکی مربوط به منحنی رطوبتی، در مجموع ۱۸ نمونه دست نخورده از خاک گلدان ها با استفاده از سیلندرهای نمونه برداری با قطر درونی ۱۱ و ارتفاع ۳/۵ سانتی متری از لایه ۵ تا ۱۲ سانتی متری سطح خاک گلدان ها برداشت شد. برای اندازه گیری مقدار نگه داشت آب، مکش های ماتریک ۰، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ hPa با استفاده از دستگاه جعبه ای شن و مکش های ماتریک ۱۰۰، ۳۳۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۸۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ hPa با استفاده از دستگاه صفحات فشاری بر نمونه های دست نخورده هر گلدان اعمال شده و با اندازه گیری رطوبت معادل هر فشار، منحنی رطوبتی نمونه های خاک تعیین شد. میانگین تخلخل خاک با توجه به چگالی ظاهری خاک

PAW مکش ماتریک  $100 \text{ hPa}$  و برای حد پایینی PAW، مکش ماتریک  $15000 \text{ hPa}$  در نظر گرفته شد.

#### محاسبه دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت

برای محاسبه دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (LLWR)، لازم است حد بالایی (UL) و حد پایینی (LL) آن مشخص شود. (da Silva et al, 1994) حد بالایی LLWR را میزان رطوبت در ظرفیت مزرعه‌ای  $100 \text{ hPa}$  یا در تخلخل تهویه‌ای برابر  $10$  درصد، هر کدام که کم‌تر باشد، و حد پایینی آن را میزان رطوبت در نقطه پژمردگی دائم یا در مقاومت فروری خاک برابر  $2 \text{ MPa}$ ، هر کدام که بیش‌تر باشد، تعیین کرد. مراحل محاسبه LLWR به ترتیب زیر بود:

- ۱- تعیین رطوبت حجمی نمونه خاک در مکش ماتریک  $100 \text{ hPa}$  با استفاده از مدل منحنی مشخصه رطوبتی خاک
- ۲- تعیین رطوبت حجمی نمونه خاک در تخلخل تهویه‌ای  $10$  درصد با استفاده از رطوبت اشباع پیش‌بینی شده توسط منحنی مشخصه رطوبتی خاک
- ۳- انتخاب رطوبت حجمی کم‌تر نمونه خاک در مکش ماتریک  $100 \text{ hPa}$  یا در تخلخل تهویه‌ای  $10$  درصد به عنوان حد بالایی LLWR
- ۴- تعیین رطوبت حجمی نمونه خاک در مکش ماتریک  $15000 \text{ hPa}$  با استفاده از مدل منحنی مشخصه رطوبتی
- ۵- تعیین رطوبت حجمی نمونه خاک در مقاومت مکانیکی برابر  $2 \text{ MPa}$  با استفاده از منحنی مشخصه مقاومت فروری
- ۶- انتخاب رطوبت حجمی بیش‌تر نمونه خاک در مکش ماتریک  $15000 \text{ hPa}$  یا در مقاومت فروری  $2 \text{ MPa}$  به عنوان حد پایینی LLWR
- ۷- محاسبه مقدار LLWR با استفاده از رابطه زیر:

$$LLWR = UL - LL \quad (\text{رابطه } ۴)$$

باید توجه شود که مقادیر منفی برای LLWR بی‌معنی بوده و در صورت بدست آمدن مقدار منفی آن را برابر صفر می‌گیریم.

#### محاسبه شاخص کمی کیفیت فیزیکی خاک (S)

برای محاسبه‌ی شاخص کمی کیفیت فیزیکی خاک،  $S$ ، از پارامترهای مدل ون‌گنوختن برازش داده شده بر داده‌های نگه‌داشت آب خاک به صورت زیر استفاده شد:

$$S = -n \left( \frac{\theta_s - \theta_r}{BD} \right) \left[ \frac{2n-1}{n-1} \right]^{\frac{1}{n}-1} \quad (\text{رابطه } ۵)$$

که در این رابطه  $\theta_s$  و  $\theta_r$  به ترتیب رطوبت حجمی اشباع و باقی‌مانده خاک بر حسب  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ،  $n$  شاخص توزیع اندازه

مفاذ خاک و BD چگالی ظاهری خاک بر حسب  $\text{Mg m}^{-3}$  می‌باشد. چون مقادیر  $S$  همیشه منفی است، هنگام استفاده مقادیر قدر مطلق آن بکار می‌روند.

#### تجزیه و تحلیل آماری

بررسی تفاوت بین تیمارهای سنگریزه و وجود روابط خطی و غیرخطی بین سطوح مختلف سنگریزه با برخی شاخص‌های مختلف کیفیت فیزیکی خاک و نیز رسم شکل‌ها به ترتیب توسط نرم افزارهای SAS (موسسه SAS، 1996)، Microsoft Excel و Sigmaplot 11 انجام شد.

#### نتایج و بحث

درصد رس، سیلت و شن خاک استفاده شده در این مطالعه به ترتیب برابر با  $15$ ،  $51$  و  $34$  (لوم سیلتی) بود. همچنین این خاک به طور طبیعی دارای  $5$  درصد سنگریزه‌ی با قطر  $2$  تا  $5$  میلی‌متر بود. واکنش و هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع خاک به ترتیب برابر  $7/6$  و  $1/7 \text{ dS m}^{-1}$  بود که در دامنه خاک‌های عادی زراعی قرار می‌گیرد.

میانگین پارامترهای برازش مدل ون‌گنوختن برای منحنی رطوبتی خاک و مدل تنظیم شده ون‌گنوختن برای منحنی مقاومت فروری خاک در تیمارهای مورد بررسی در جدول (۱) نشان داده شده است.

#### تأثیر مقادیر مختلف سنگریزه بر منحنی‌های مشخصه رطوبتی و مقاومت فروری خاک

افزوده شدن مقدار سنگریزه باعث تغییر شکل منحنی‌های مشخصه رطوبتی خاک‌های مورد بررسی شد (شکل ۱-الف). تفاوت معنی‌داری بین میانگین مقدار رطوبت حجمی در مکش ماتریک  $100$  ( $\theta_{h100}$ ) و  $330$  ( $\theta_{h330}$ ) اندازه‌گیری شده در سطوح مختلف سنگریزه خاک وجود داشت (جدول ۲). روابط بین درصد سنگریزه با  $\theta_{h100}$  و  $\theta_{h330}$  در شکل (۲) نشان داده شده است. کاهش مقدار رطوبت حجمی خاک با افزایش مقدار سنگریزه بیشتر ناشی از کاهش مقدار خاک متخلخل در واحد حجم خاک و جایگزینی آن با سنگریزه می‌باشد که قابلیت جذب و نگهداری آب را ندارد. شکل منحنی مشخصه رطوبتی خاک اهمیت زیادی در محاسبه LLWR و PAW (da Silva et al., 1994) و  $S$  (Dexter, 2004a) دارد. مقاومت فروری خاک که تأثیر زیادی بر میزان رشد ریشه، شکل ریشه‌ها و فرآیندهای مهم صورت گرفته در قسمت هوایی گیاه دارد (To and Kay, 2005, Beutler et al, 2005) تحت تأثیر مقادیر مختلف سنگریزه قرار گرفت. منحنی‌های مشخصه مقاومت فروری خاک

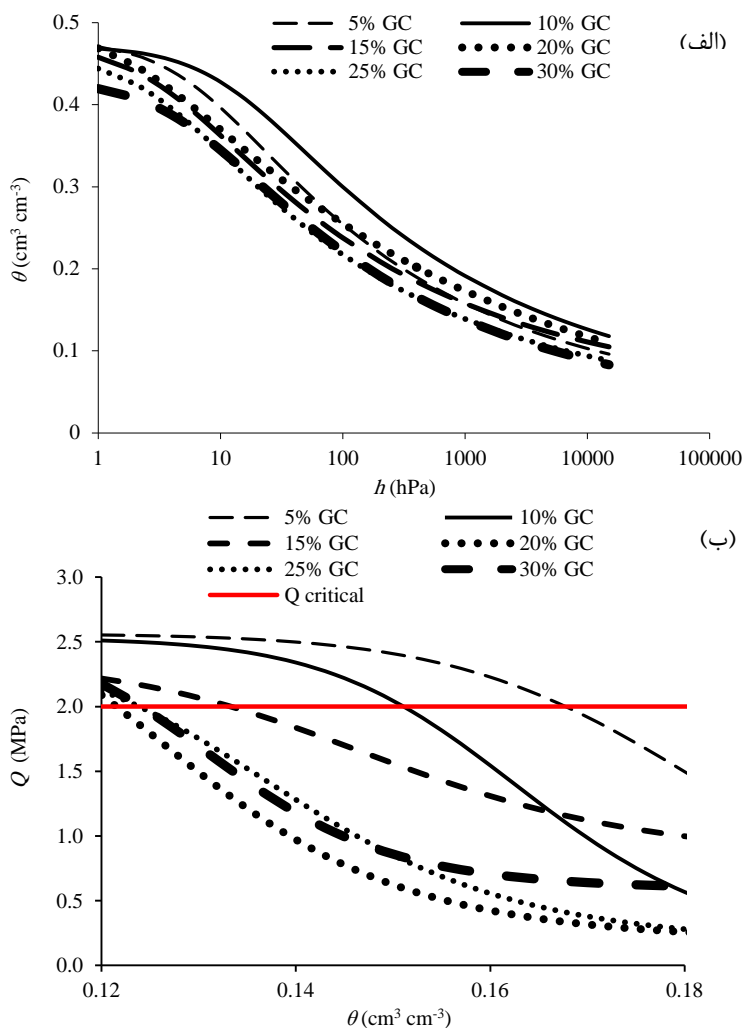
سنگریزه بدست آمده (شکل ۱-ب). روند کاهش مقدار رطوبت در  $Q$  برابر ۲ MPa با افزایش مقدار سنگریزه در شکل (۲-ج) نشان داده شده است.

بدست آمده از میانگین پارامترهای مدل تنظیم شده ون گنوختن در شکل (۱-ب) نشان داده شده است. مقدار  $Q$  بحرانی برابر ۲ MPa که در مدیریت آب خاک از اهمیت زیادی برخوردار است در رطوبت های متفاوتی برای خاک های با مقادیر متفاوت

جدول ۱. میانگین پارامترهای مدل ون گنوختن و ون گنوختن تنظیم شده برای منحنی های مشخصه رطوبتی و مقاومت فروری خاک\*

$n_{Q\theta}$	$\alpha_{Q\theta}$	$Q_{dry}$	$Q_{wet}$	$n$	$\alpha$	$\theta_r$	$\theta_s$	درصد سنگریزه
۱۳/۳۸۱	۵/۴۵۷	۲/۵۶۱	۰/۰۰۰	۱/۲۵۲	۰/۱۵۸	۰/۰۳۳	۰/۴۷۹	۵
۱۵/۷۷۳	۶/۱۳۰	۲/۵۲۸	۰/۰۹۲	۱/۲۳۵	۰/۰۷۹	۰/۰۳۵	۰/۴۷۲	۱۰
۱۱/۰۳۸	۶/۷۷۳	۲/۳۴۶	۰/۸۰۷	۱/۲۳۵	۰/۲۹۹	۰/۰۴۶	۰/۴۷۴	۱۵
۱۱/۳۵۰	۷/۸۷۳	۲/۹۸۳	۰/۱۸۴	۱/۱۶۹	۰/۴۸۷	۰/۰۰۰	۰/۴۹۴	۲۰
۱۱/۷۷۸	۷/۲۵۷	۲/۴۷۶	۰/۱۵۵	۱/۲۴۲	۰/۳۲۶	۰/۰۳۳	۰/۴۶۲	۲۵
۱۵/۰۰۰	۷/۶۱۴	۲/۵۵۵	۰/۵۸۸	۱/۲۳۷	۰/۲۰۱	۰/۰۲۲	۰/۴۲۹	۳۰

$\theta_r$  و  $\theta_s$  به ترتیب رطوبت باقیمانده و اشباع خاک و  $\alpha$  مرتبط با عکس مکش در نقطه عطف و  $n$  شاخص توزیع اندازه منافذ خاک؛  $Q_{dry}$ ،  $Q_{wet}$ ، به ترتیب مرتبط با کمترین و بیشترین مقاومت فروری پیش بینی شده خاک و  $\alpha_{Q\theta}$  و  $n_{Q\theta}$  مرتبط با نقطه عطف و شیب تابع مقاومت فروری می باشند.



شکل ۱. منحنی های مشخصه رطوبتی (الف) و مقاومت فروری (ب) خاک بدست آمده از میانگین پارامترهای مدل ون گنوختن و ون گنوختن تنظیم شده برای تیمارهای مختلف

جدول ۲. مقایسه میانگین ویژگی‌های مختلف فیزیکی خاک برای تیمارهای مورد بررسی\*

درصد سنگریزه	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰
$T_I$ (min)	۵۹ <sup>c**</sup>	۶۶ <sup>c</sup>	۱۳۹ <sup>b</sup>	۱۵۵ <sup>b</sup>	۲۱۳ <sup>a</sup>	۲۲۸ <sup>a</sup>
BD (Mg m <sup>-3</sup> )	۱/۳۱۰ <sup>b</sup>	۱/۳۴۱ <sup>b</sup>	۱/۳۴۹ <sup>ab</sup>	۱/۳۳۸ <sup>b</sup>	۱/۳۹۷ <sup>ab</sup>	۱/۴۹۵ <sup>a</sup>
$\theta_{2MPa}$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	۰/۱۶۵ <sup>a*</sup>	۰/۱۴۹ <sup>b</sup>	۰/۱۲۸ <sup>c</sup>	۰/۱۲۵ <sup>c</sup>	۰/۱۲۳ <sup>c</sup>	۰/۱۲۴ <sup>c</sup>
$\theta_{h100}$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	۰/۳۰۸ <sup>ab</sup>	۰/۳۲۲ <sup>a</sup>	۰/۲۸۹ <sup>ab</sup>	۰/۲۷۵ <sup>b</sup>	۰/۲۹۰ <sup>ab</sup>	۰/۲۶۹ <sup>b</sup>
$\theta_{h330}$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	۰/۲۳۳ <sup>ab</sup>	۰/۲۵۱ <sup>a</sup>	۰/۲۱۸ <sup>ab</sup>	۰/۲۰۹ <sup>ab</sup>	۰/۲۱۹ <sup>ab</sup>	۰/۲۰۳ <sup>b</sup>
$\theta_{h15000}$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	۰/۱۱۵	۰/۱۳۷	۰/۱۱۷	۰/۱۱۰	۰/۱۰۹	۰/۱۰۵
PAW (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	۰/۱۸۱	۰/۱۷۴	۰/۱۵۶	۰/۱۴۶	۰/۱۶۷	۰/۱۵۰
LLWR (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	۰/۱۲۹	۰/۱۴۸	۰/۱۴۰	۰/۱۳۰	۰/۱۵۳	۰/۱۲۸
S	۰/۰۴۹	۰/۰۴۴	۰/۰۴۴	۰/۰۴۱	۰/۰۴۳	۰/۰۳۷

$T_I$ \* مدت زمان نفوذ آب در خاک؛ BD چگالی ظاهری خاک؛  $\theta_{2MPa}$  رطوبت حجمی در مقاومت فروری ۲ MPa؛  $\theta_{h100}$ ،  $\theta_{h330}$  و  $\theta_{h15000}$  به ترتیب رطوبت حجمی در مکش‌های ماتریک ۱۰۰.۳۳۰ hPa و ۱۵۰۰۰ hPa؛ PAW، LLWR و IWC به ترتیب آب قابل دسترس، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت و گنجایش آب انتگرالی و S شاخص دکستر برای کیفیت فیزیکی خاک می‌باشند.  
\*\* میانگین‌های با حروف متفاوت دارای تفاوت معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ (آزمون چند دامنه‌ای دانکن) می‌باشند.

#### رابطه بین چگالی ظاهری و سطوح مختلف سنگریزه خاک

تفاوت معنی‌داری بین میانگین BD، به عنوان شاخصی از ساختمان خاک (Reynolds *et al.*, 2008)، در سطوح مختلف سنگریزه خاک وجود داشت (جدول ۲). افزایش مقدار سنگریزه از مقدار طبیعی خاک مورد بررسی (۵ درصد) به ۳۰ درصد، موجب افزایش بیش از ۱۱ درصدی BD شد. علت افزایش مقدار BD خاک با افزایش درصد سنگریزه به زیاد بودن وزن مخصوص سنگریزه در مقایسه با چگالی ظاهری توده خاک بدون سنگریزه مربوط است. چنین حالتی در مقایسه BD خاک‌های ریزبافت (مقدار شن کم) با درشت‌بافت (مقدار شن زیاد) وجود دارد. Rucknagel *et al.*, (2012) نشان دادند که با افزایش مقدار سنگریزه، علاوه بر افزایش BD طبیعی خاک، مقدار این ویژگی در فشارهای مختلف اعمال شده نیز بیشتر می‌شود. BD کمیتی است که معمولاً برای توصیف درجه فشردگی و وضعیت ساختمانی خاک به کار می‌رود، رابطه خطی بدست آمده بین مقدار سنگریزه و BD در شکل (ب) نشان داده شده است.

#### رابطه بین زمان نفوذ آب در خاک و سطوح مختلف سنگریزه خاک

تفاوت معنی‌داری بین میانگین  $T_I$  اندازه‌گیری شده در سطوح مختلف سنگریزه خاک وجود داشت (جدول ۲). افزایش مقدار سنگریزه از مقدار طبیعی (۵ درصد) به ۳۰ درصد، موجب افزایش بیش از ۲۵۴ درصدی  $T_I$  شد. افزایش بیش از ۲/۵ برابری مدت زمان لازم برای نفوذ آب در خاک بدون سنگریزه در مقایسه با خاک حاوی ۳۰ درصد وزنی سنگریزه، نشان دهنده تاثیرپذیری قابل توجه این ویژگی از وجود سنگریزه در خاک است. هرچند انتظار می‌رفت افزودن سنگریزه با ایجاد مسیریابی

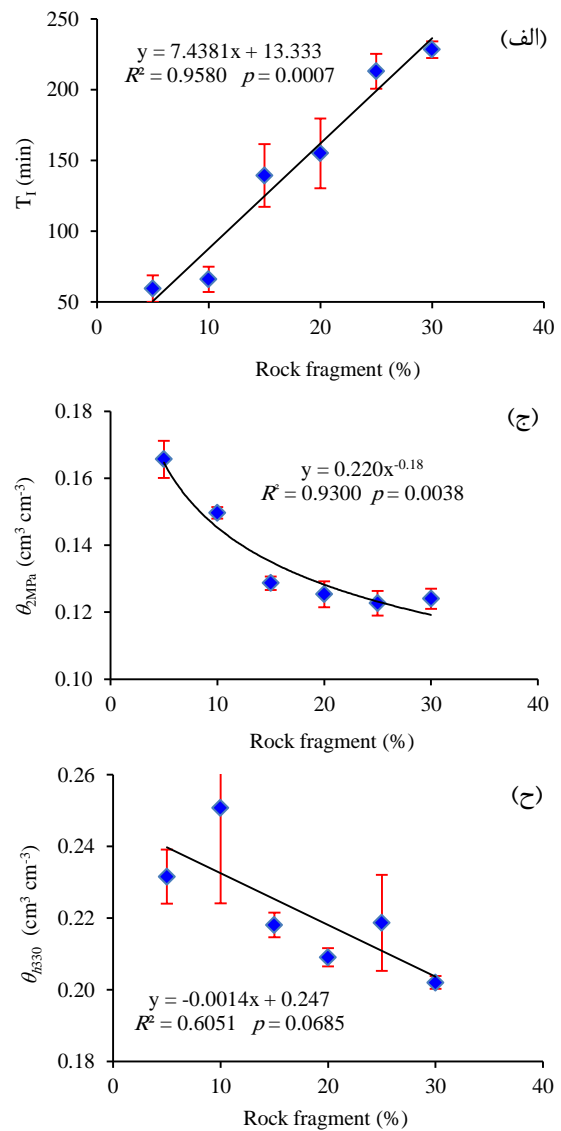
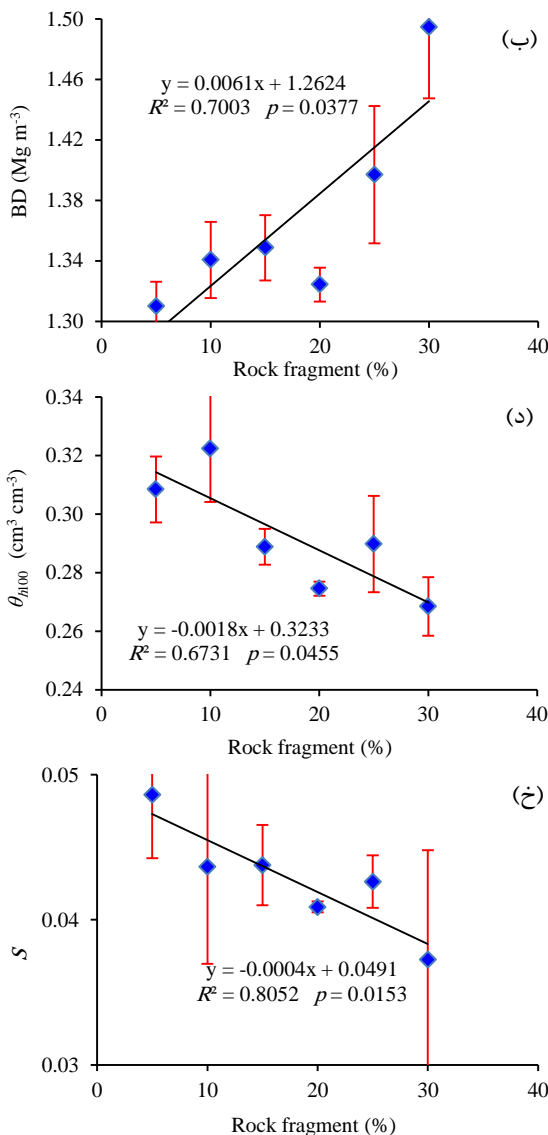
برای جریان ترجیحی در خاک موجب کاهش  $T_I$  شود اما افزایش چگالی ظاهری خاک باعث کاهش سطح مؤثر قابل دسترس جریان آب در خاک شده و در نتیجه موجب افزایش مقدار  $T_I$  شد. (Verbist *et al.*, 2009) نشان دادند که حضور سنگریزه در خاک باعث افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌شود، اما بر هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک اثر منفی دارد. (Beibei *et al.*, 2009) نیز اثر محتوای سنگریزه پروفیل را بر نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌های لسی مورد بررسی قرار داده و گزارش نمودند که با افزایش درصد سنگریزه تا ۴۰ درصد وزنی خاک، نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی اشباع کاهش یافته و در مقادیر بیش از ۴۰ درصد؛ نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی اشباع مجدداً افزایش می‌یابند. با توجه به دامنه سنگریزه مورد استفاده، می‌توان گفت که نتایج این تحقیق با یافته‌های (Beibei *et al.*, 2009) مطابقت دارد. رابطه قوی بین مقدار سنگریزه و  $T_I$  بدست آمد که در شکل الف ۲ نشان داده شده است. با توجه به تنوع نتایج گزارش شده در زمینه تأثیر سنگریزه بر نفوذ آب به خاک و نظر به تاثیرگذاری عواملی مانند مقدار، اندازه و شکل سنگریزه‌ها و مدت زمان داده شده به خاک برای شکل‌گیری مجدد ساختمان در خاک تأثیر این ویژگی بر  $T_I$  نیازمند تحقیقات بیشتری می‌باشد.

#### رابطه مفاهیم مختلف آب قابل استفاده و سطوح مختلف سنگریزه

میانگین مقادیر آب قابل دسترس و دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت در درصدهای وزنی مختلف سنگریزه خاک در جدول (۲) نشان داده شده است. مقدار PAW خاک با ۵ درصد سنگریزه در مقایسه با خاک با ۳۰ درصد سنگریزه ۲۴ درصد

فروری خاک بر مقدار LLWR مؤثر هستند (da Silva *et al.*, 1994). با افزایش سنگریزه مقدار رطوبت در مکش ۱۰۰ hPa به عنوان حد بالایی LLWR کاهش می یابد که اثر منفی بر مقدار LLWR دارد و از طرفی باعث می شود. مقدار رطوبت در مکش ۱۵۰۰۰ hPa و مقاومت فروری ۲ MPa به عنوان حد پایینی LLWR در رطوبت های کمتری اتفاق بیافتد (شکل ۱-الف و جدول ۲) که اثر مثبت بر مقدار LLWR دارد.

بیشتر بود با این حال تفاوت معنی داری بین میانگین PAW اندازه گیری شده در سطوح مختلف سنگریزه مشاهده نشد. شرایط مشابهی برای LLWR نیز مشاهده شد. از عوامل مهم عدم معنی دار شدن اختلاف میانگین PAW یا LLWR اختلاف زیاد بین مقادیر تکرارهای تیمارهای مختلف این مفاهیم در کنار روند کاهشی نسبتاً یکنواخت مقدار رطوبت با افزایش مکش ماتریک خاک با درصد سنگریزه متفاوت می باشد (شکل الف). ویژگی های هر دو منحنی مشخصه رطوبتی و مقاومت



شکل ۲. روابط درصد سنگریزه خاک با زمان نفوذ (T<sub>1</sub>) (الف)، چگالی ظاهری (BD) (ب)، مقدار رطوبت در مقاومت فروری ۲ MPa (θ<sub>2MPa</sub>) (ج)، مقدار رطوبت در مکش ۱۰۰ hPa (θ<sub>1000</sub>) (د)، مقدار رطوبت در مکش ۳۳۰ hPa (θ<sub>330</sub>) (ه) و شاخص کیفیت فیزیکی خاک (S) (و)

داده شده است. مقدار S خاک در خاک دارای ۵ درصد سنگریزه در مقایسه با خاک حاوی ۳۰ درصد سنگریزه ۳۲ درصد بیشتر بود. هرچند تفاوت معنی داری بین میانگین S اندازه گیری شده در سطوح مختلف سنگریزه مشاهده نشد. اختلاف زیاد بین مقادیر

رابطه مفاهیم مختلف آب قابل استفاده و سطوح مختلف سنگریزه میانگین مقادیر شاخص کمی کیفیت فیزیکی خاک در درصدهای وزنی مختلف سنگریزه خاک در جدول (۲) نشان

برابر ۲ MPa در رطوبت‌های کمتری اتفاق افتاد. حضور سنگریزه در خاک با کاهش سطح مقطع حرکت آب در خاک سبب افزایش زمان نفوذ آب به خاک شده و چگالی ظاهری خاک را نیز بالا می‌برد. هرچند تفاوت معنی‌داری بین میانگین  $S$  اندازه‌گیری‌شده در سطوح مختلف سنگریزه مشاهده نشد با این حال از نظر کمی مقدار  $S$  در خاک دارای ۵ درصد سنگریزه در مقایسه با خاک حاوی ۳۰ درصد سنگریزه ۳۲ درصد بیشتر بود. بسیاری از مناطق کشور ما به ویژه در نواحی کوهستانی و شیب‌دار که دربرگیرنده بخش بزرگی از اراضی تحت کشت دیم هستند، دارای مقادیر متفاوتی از سنگریزه هستند. تأثیرپذیری ویژگی‌های مرتبط با مدیریت آب خاک و کیفیت فیزیکی آن از محتوای سنگریزه که در این پژوهش به‌روشنی مشاهده شد، بیانگر این نکته است که برای مدیریت صحیح این خاک‌ها نیاز است تا تأثیر سنگریزه‌ها نیز در نظر گرفته شود. یافته‌ها نشان می‌دهد که اندازه‌گیری شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک دارای دشواری‌های فراوانی است که مهم‌ترین آن‌ها، تغییرپذیری ویژگی‌ها در تکرارهای مختلف اندازه‌گیری است. این امر نشان می‌دهد که حجم نمونه معرف در این گونه خاک‌ها بایستی بیشتر در نظر گرفته شود. با توجه به اثر سنگریزه بر شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک، پیشنهاد می‌شود که تأثیر سنگریزه بر روی پارامترهای مرتبط با رشد گیاهان نیز در پژوهش‌های آینده موردتوجه قرار گیرد.

## REFERENCES

- Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M. R., Mahboubi, A. A., Nosrati, A. and Dexter, A. R. (2010) Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. *Plant Soil*, 335 (1-2), 229-244.
- Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M. R., Mahboubi, A. A., Nosrati, A. and 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: 34-42.
- Baetens, J. M., Verbist, K., Cornelis, W. M., Gabriels, D. and Soto, G. (2009) On the influence of coarse fragments on soil water retention. *Water Resources Research*, 45 (7).
- Beibei, Z., Ming'an, S. and Hongbo, S. (2009) Effects of rock fragments on water movement and solute transport in a Loess Plateau soil. *Comptes Rendus Geoscience*, 341(6), 462-472.
- Beutler, A. N., Centurion, J. F. and Silva, A. P. D. (2005) Soil resistance to penetration and least limiting water range for soybean yield in a haplustox from Brazil. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 48(6), 863-871.
- Brakensiek, D. L. and Rawls, W. J. (1994) Soil containing rock fragments: effects on infiltration. *Catena*, 23, 99-110.
- Cousin, I., Nicoullaud, B. and Coutadeur, C. (2003) Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soil. *Catena*, 53 (2), 97-114.
- Da Silva, A. P., Kay, B. D. and Perfect, E. (1994) Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58(6), 1775-1781.
- Dexter, A.R. (2004a) Soil physical quality; Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120, 201-214.
- Dexter, A.R. (2004b) Soil physical quality; Part II. Friability, tillage, tith and hard- Setting. *Geoderma*, 120, 215-225.
- Dexter, A.R. (2004c) Soil physical quality; Part III: Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. *Geoderma*, 120, 227-239.
- Dexter, A.R., Czyż, E.A. and Gałę, O.P. (2007) A method for prediction of soil penetration resistance. *Soil & Tillage Research*. 93, 412-419.

تکرارهای تیمارهای مختلف مهم‌ترین عامل عدم معنی‌داری میانگین شاخص  $S$  بود (شکل ۲-خ). این امر اهمیت اندازه (حجم) نمونه‌برداری برای تهیه نمونه‌های یکنواخت را نشان می‌دهد. رابطه خطی معنی‌داری بین مقادیر  $S$  و درصد سنگریزه خاک بدست آمد (شکل ۲-خ). مقادیر بزرگ‌تر  $S$  نشان‌دهنده کیفیت فیزیکی بهتر خاک در ارتباط با رشد ریشه، خاک‌ورزی و جریان آب در خاک می‌باشد (Dexter, 2004c). از این رو می‌توان گفت که افزایش مقدار سنگریزه از ۵ درصد وزنی به ۳۰ درصد وزنی باعث تنزل کیفیت فیزیکی می‌شود.

## نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر سنگریزه بر شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک انجام شد. یافته‌ها به روشنی نمایانگر تأثیرپذیری ویژگی‌های هیدرولیکی و همچنین شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک از محتوای سنگریزه آن است. منحنی‌های مشخصه رطوبتی و همچنین فروروی که در مدیریت آب خاک و رشد گیاهان اهمیت ویژه‌ای دارند، تحت تأثیر مقادیر مختلف سنگریزه قرار گرفتند. افزایش مقدار سنگریزه خاک باعث کاهش مقدار خاک متخلخل در واحد حجم خاک شده و در نتیجه میانگین مقدار رطوبت حجمی در تمامی مکش‌های ماتریک خاک کاهش یافت. از سوی دیگر رابطه معنی‌داری بین درصد سنگریزه با مقدار رطوبت در مقاومت فروروی ۲ MPa وجود داشت و با افزایش مقدار سنگریزه خاک مقدار  $Q$  بحرانی



- Poesen, J. and Lavee, H. (1994). Rock fragments in top soils: significance and processes. *Catena*, 23, 1-28.
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Yang, X.M. and Tan, C.S. (2008) Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma*, 146, 466-474.
- Rücknagel, J., Rücknagel, S. and Christen, O. (2012) Impact on soil compaction of driving agricultural machinery over ground frozen near the surface. *Cold Regions Science and Technology*, 70, 113-116.
- Soane, B.D. and van Owerkerk, C. (1994) *Soil Compaction in Crop Production*. Amsterdam: Elsevier.
- To, J. and Kay, B.D. (2005) Variation in penetrometer resistance with soil properties: the contribution of effective stress and implications for pedotransfer functions. *Geoderma*, 126, 261-276.
- van Genuchten, M.Th. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.
- Verbist, K., Baetens, J., Cornelis, W. M., Gabriels, D., Torres, C. and Soto, G. (2009) Hydraulic conductivity as influenced by stoniness in degraded drylands of Chile. *Soil Science Society of America Journal*, 73(2), 471-484.
- Zhongjie, S., Yanhui, W., Pengtao, Y., Lihong, X., Wei, X. and Hao, G. (2008) Effect of rock fragments on the percolation and evaporation of forest soil in Liupan Mountains, China. *Acta Ecologica Sinica*, 28(12), 6090-6098.