

## بررسی پایداری ساختمان، کیفیت فیزیکی (شاخص S) و کربن آلی خاک در اثر چرخه-های تر و خشک شدن در حضور بقایای گلرنگ

وجیهه درستکار<sup>۱</sup>، زهرا گنجی نوروزی<sup>۲</sup> و صفورا ناهیدان<sup>۳</sup>

۱- استادیار گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲- استادیار گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۳- استادیار گروه خاکشناسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، همدان، ایران

تاریخچه مقاله	چکیده
دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۲۸ پذیرش نهایی: ۱۳۹۸/۰۱/۲۰	چرخه‌های تر و خشک شدن در خاک دارای اثرهای مثبت و منفی بر پایداری ساختمان خاک می‌باشد. مواد آلی می‌تواند پیامدهای این چرخه‌ها را در خاک تحت تأثیر قرار دهد. این پژوهش با هدف بررسی اثر هم‌زمان چرخه‌های تر و خشک شدن و مواد آلی بر شاخص‌های پایداری ساختمان خاک در روش ارزیابی منحنی مشخصه رطوبتی پر انرژی انجام گرفت. برای این منظور بقایای گلرنگ در سه سطح صفر، ۱ و ۲ درصد در شش تیمار چرخه‌های تر و خشک شدن شامل صفر، ۱، ۲، ۴، ۸ و ۱۰ چرخه در سه تکرار به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن از صفر تا ۴ چرخه با افزایش حجم منافذ قابل زهکشی و کاهش مکش در نقطه عطف منحنی رطوبتی سبب افزایش شاخص پایداری و نسبت پایداری ساختمان خاک شد. افزایش بیش تر تعداد چرخه‌ها پایداری ساختمان و شاخص‌ها مربوطه را کاهش داد. افزایش ماده آلی نیز سبب بهبود ساختمان خاک به ویژه در تیمار ۲ درصد بقایا شد و اثر مخرب اعمال ۱۰ چرخه تر و خشک شدن را کاهش داد. شاخص S در تیمار اعمال ۴ چرخه حداکثر بود و با افزایش بیش تر تعداد چرخه‌ها کاهش یافت. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که وقوع تعداد اندک چرخه‌های تر و خشک شدن باعث بهبود وضعیت ساختمانی خاک و کیفیت فیزیکی خاک می‌شود، اما اعمال چرخه‌های پی در پی می‌تواند آثار مخرب به دنبال داشته باشد.

\* عهده دار مکاتبات

Email: vdorostkar@shahroodut.ac.ir

### مقدمه

حفاظت و بهبود پایداری واحدهای ساختمانی خاک نقش اساسی برای مدیریت خاک در اکوسیستم‌های کشاورزی به ویژه در مناطق خشک و با پتانسیل فرسایش زیاد دارد (۵). ساختمان خاک یکی از ویژگی‌های

فیزیکی مهم خاک بوده که حاصل برهمکنش عامل‌های فیزیکی، زیستی و شیمیایی در خاک می‌باشد. هدایت هیدرولیکی، انتقال املاح و آلاینده‌ها، نفوذ آب به خاک و جذب، نگهداری و حرکت آب در خاک، تهویه، مقاومت مکانیکی و فرسایش‌پذیری خاک از جمله

می‌شود (۲۹). یوتومو و دکستر<sup>۲</sup> (۳۷) افزایش ابتدایی خاکدانه‌سازی در اثر چرخه‌های تر و خشک شدن در یک خاک تخریب شده توسط خاکورزی و سپس کاهش پایداری ساختمانی با اعمال چرخه‌های بیش‌تر را گزارش نمودند. اثر خشک شدن و تر شدن مجدد بر ساختمان خاک به عوامل متعددی همچون نوع خاک، میزان عوامل پایدارکننده و روش ارزیابی بستگی دارد (۳۹).

مواد آلی از جمله عوامل مهم در بهبود ویژگی‌های فیزیکی مانند افزایش تخلخل، بهبود فراهمی آب خاک، افزایش پایداری ساختمان خاک و کاهش چگالی ظاهری خاک است (۴ و ۲۴). تشکیل پلی‌ساکاریدها و کربوهیدرات‌ها تجزیه‌پذیر به عنوان محصول تجزیه بقایای گیاهی، به استحکام پیوندهای بین ذرات کمک نموده و پایداری واحدهای ساختمانی در برابر عامل‌های تخریبی را افزایش می‌دهد. پوشش خاکدانه‌ها به وسیله ترکیبات آبریز حاصل از تجزیه بقایا سبب کاهش فروپاشی خاکدانه‌ها در اثر ورود ناگهانی آب می‌شود و بر پایداری ساختمان می‌افزاید. از این رو به نظر می‌رسد وجود مواد آلی تا حدی بتواند از تأثیر تعداد زیاد چرخه‌های تر و خشک شدن بکاهد (۲۰). تاجیک و همکاران<sup>۳</sup> (۳۵) افزایش خاکدانه‌های پایدار در آب در اثر افزودن مواد آلی به خاک را گزارش نموده‌اند. درستکار و والی (۶) نیز کاهش رس قابل پراکنش خاک و پایداری ساختمان خاک در اثر افزودن بقایای گیاهی را نشان دادند.

ارزیابی ساختمان خاک بسته به هدف و شرایط به روش‌های گوناگونی انجام می‌پذیرد. یکی از این روش‌ها، ارزیابی منحنی مشخصه رطوبتی پر انرژی (HEMC) (دامنه مرطوب با پتانسیل ماتریک زیاد) بوده که در مناطق با پایداری کم ساختمان خاک مورد توجه قرار گرفته است (۸). ممدف و همکاران<sup>۴</sup> (۲۱) در پژوهشی اثر برخی اصلاح‌کننده‌های آلی از جمله لجن فعال و کمپوست

ویژگی‌های فیزیکی مهم بوده که تحت تأثیر مدیریت ساختمان خاک قرار می‌گیرد. ساختمان خاک با تعیین توزیع اندازه منافذ خاک بر حرکت و کارایی مصرف عناصر غذایی و در نتیجه بر حاصلخیزی خاک مؤثر می‌باشد. از سوی دیگر توزیع اندازه منافذ به عنوان محلی برای سکونت ریزجانداران خاک بر کیفیت بیولوژیک خاک و چرخه‌های بیوشیمیایی مؤثر است (۶). تشکیل و پایداری خاکدانه‌ها تحت تأثیر دو دسته عوامل درونی و بیرونی قرار دارد. از عوامل درونی می‌توان به ویژگی‌های خاک از جمله نوع و غلظت کاتیون‌های محلول، کربن خاک و مقدار و نوع کانی‌های رسی در خاک اشاره نمود. عوامل بیرونی مانند اقلیم، چرخه‌های تر و خشک شدن، موجودات زنده و مدیریت خاک نیز تأثیر قابل توجهی بر پایداری و یا تخریب ساختمان خاک دارند (۶). چرخه‌های تر و خشک شدن خاک یکی از فاکتورهای مؤثر بر پایداری ساختمان خاک است (۹) و (۳۹). مطالعات گوناگون اثرهای مثبت و منفی این چرخه‌ها در شرایط مختلف را نشان داده‌اند. برخی مطالعات نشان داده‌اند که در خاک‌های بدون ساختمان، چرخه‌ها باعث ساختمان‌سازی می‌شود (۳۱). مرطوب شدن خاک سبب هدایت عوامل سیمانی پایدارکننده بین ذرات خاک شده و خشک شدن مجدد خاک با تثبیت آرایش جدید ذرات در کنار یکدیگر به استحکام ساختمانی خاک کمک می‌نماید. از سوی دیگر خشک شدن خاک با افزایش تنش مؤثر ناشی از مکش ماتریک در خاک به نزدیک شدن ذرات به یکدیگر کمک می‌نماید (۴۰). پیرس و همکاران<sup>۱</sup> (۲۷) بهبود ساختمان خاک‌های آسیب دیده در اثر چرخه‌های تر و خشک شدن را گزارش نموده‌اند.

برخی مطالعات کاهش پایداری ساختمان خاک در اثر این چرخه‌ها را گزارش نموده‌اند. تر و خشک شدن متوالی با افزایش فشار هوای محبوس و آماس ناهماهنگ خاک در طی تر شدن باعث متلاشی شدن ساختمان شده و وجود آب منجر به سست شدن پیوندهای بین ذرات

2- Utomo and Dexter

3- Tajik et al.

1- Mamedov et al.

1- Pires et al.

به میزان ظرفیت مزرعه مرطوب گردید و سپس در طی دو ماه تعداد صفر، ۱، ۲، ۴، ۸ و ۱۰ چرخه بر روی خاک‌ها به ترتیب به مدت ۶۰، ۳۰، ۱۵، ۷/۵ و ۶ روز اعمال شد. در تیمار صفر چرخه خاک همواره در رطوبت ظرفیت مزرعه نگهداشته شد. در تیمارهای اعمال چرخه برای مرطوب شدن خاک از پل آبی برای رساندن رطوبت نمونه به ظرفیت مزرعه استفاده شد و سپس برای اعمال خشکی از آون در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد. پس از پایان دوره انکوباسیون، ماده آلی خاک به روش سوزاندن تر اندازه‌گیری شد (۷). برای عصاره‌گیری کربوهیدرات قابل عصاره‌گیری با اسید رقیق، ۱۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۰/۲۵ مولار به یک گرم خاک اضافه و به مدت ۱۶ ساعت تکان داده شد. غلظت کربوهیدرات توسط روش فنل-اسید سولفوریک به کمک دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۹۰ نانومتر و به کمک استاندارد گلوکز در عصاره حاصل اندازه‌گیری شد (۱۲).

اندازه‌گیری پایداری ساختمان خاک به روش منحنی مشخصه رطوبتی پرانرژی انجام شد. در این روش از خاکدانه‌های ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر استفاده می‌شود. در ابتدا خاکدانه‌ها به دو روش آهسته و سریع مرطوب شده و مقدار رطوبت خاک در دامنه مکش‌های صفر تا ۵۰ سانتی‌متر (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵ و ۵۰ سانتی‌متر) پس از تعادل در دستگاه جعبه شن اندازه‌گیری گردید. پس از تعادل در مکش ۵۰ سانتی‌متر، خاکدانه‌ها در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک شده و وزن خشک خاکدانه‌ها اندازه‌گیری شد. در روش مرطوب سازی سریع خاکدانه‌ها به صورت ناگهانی در آب مقطر قرار گرفته و برای ۲۴ ساعت باقی ماند. برای مرطوب سازی آهسته از روش پل آبی جهت مرطوب‌سازی نمونه‌ها استفاده شد. مدل‌سازی منحنی مشخصه رطوبتی خاک در دامنه پرانرژی به کمک داده‌های رطوبت وزنی و به‌وسیله مدل اصلاح شده ونگنوختن (رابطه ۱) و به کمک ابزار Excel Solver انجام شد (۲۶).

$$\theta = (\theta_s - \theta_r)[1 + (ah)^n]^{-\frac{1}{n}} + Ah^2 + Bh + C \quad (1)$$

کود دامی را بر پایداری ساختمان خاک توسط این روش بررسی نموده و نتایج نشان دهنده اهمیت اثرات متقابل نوع خاک و ترکیب شیمیایی مواد آلی بود.

با وجود پژوهش‌های انجام شده در مورد اثر چرخه-های تر و خشک شدن بر ویژگی‌های فیزیکی خاک، دانسته‌ها در مورد اثر مثبت یا منفی این چرخه‌ها در حضور مواد آلی بسیار محدود می‌باشد. این پژوهش با هدف بررسی پیامدهای چرخه‌های خشک و مرطوب شدن بر پایداری ساختمان و کیفیت فیزیکی خاک در حضور بقایای گیاه گلرنگ انجام شد.

### روش کار

این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو تیمار مقدار بقایای گلرنگ (صفر، ۱ و ۲ درصد) و تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن (صفر، ۱، ۲، ۴، ۸ و ۱۰ چرخه) در سه تکرار انجام شد. خاک از عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متری یکی از مزارع شهرستان شاهرود جمع‌آوری و پس از هواخشک شدن و عبور از الک ۲ میلی‌متری، برخی از ویژگی‌های آن اندازه‌گیری شد (جدول ۱). بافت خاک به روش پیپت و پ-هاش و قابلیت هدایت الکتریکی خاک در عصاره اشباع خاک به وسیله پ-هاش متر و هدایت سنج اندازه‌گیری شد. ماده آلی در خاک به روش سوزاندن تر، آهک با روش ختنی‌سازی با اسید کلریدریک و تیتراسیون برگشتی با هیدروکسید سدیم اندازه‌گیری شد (۷). بقایای گلرنگ پس از برداشت محصول اصلی از مزارع جمع‌آوری و پس از خشک شدن در آون در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، خرد و از الک یک میلی‌متری عبور داده شد. کربن به روش سوزاندن تر و نیتروژن به روش کلدال در بقایای گلرنگ اندازه‌گیری شد (۷) (جدول ۱). بقایا به میزان صفر، ۱ و ۲ درصد در هر تیمار با خاک مورد مطالعه (کوچکتر از ۴ میلی‌متر) مخلوط شد. سپس خاک در استوانه‌هایی با قطر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر با چگالی ظاهری ۱/۳ گرم بر سانتی‌متر مربع قرار گرفت و نمونه‌ها جهت شروع اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن آماده گردید. برای این منظور ابتدا همه نمونه‌ها

به منظور محاسبه شاخص کیفیت فیزیکی خاک دکستر ( $S$ ) در هر دو روش مرطوب کردن سریع و آهسته مدل سازی منحنی مشخصه رطوبتی توسط مدل ون-گنوختن (رابطه ۵) انجام شد (۱۰):

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) [1 + (\alpha h)^n]^{\frac{1}{n}-1} \quad (5)$$

در این رابطه  $\theta_s$  رطوبت اشباع (گرم بر گرم)،  $\theta_r$  رطوبت باقی مانده (گرم بر گرم)،  $\alpha$  مرتبط با عکس مکش در نقطه ورود هوا ( $hPa^{-1}$ )،  $h$  مکش ماتریک ( $hPa$ ) و  $n$  شاخص توزیع اندازه منافذ خاک می باشد. شاخص  $S$  از شیب منحنی مشخصه رطوبتی (درصد وزنی آب خاک در برابر لگاریتم طبیعی مکش) در نقطه عطف با استفاده رابطه ۶ محاسبه می شود:

$$S_i = n\alpha \times (\theta_s - \theta_r) \cdot \left[ \frac{n-1}{2n-1} \right]^{\frac{n-1}{n}} \quad (6)$$

پس از محاسبه این شاخص برای دو روش مرطوب نمودن سریع و آهسته، شاخص نسبت  $S$  برای بررسی پایداری ساختمان خاک به کمک رابطه ۷ محاسبه شد:

$$S \text{ Ratio} = \frac{S_{i \text{ fast wetting}}}{S_{i \text{ slow wetting}}} \quad (7)$$

مشابه با نسبت پایداری این شاخص نیز مقادیری بین صفر تا یک داشته و هر چه به یک نزدیک تر باشد نشان دهنده ساختمان بهتر خاک است. تجزیه آماری داده ها به وسیله نرم افزار آماری SAS انجام و مقایسه میانگین با آزمون LSD در سطح ۵ درصد صورت گرفت.

## نتایج و بحث

### مواد آلی و کربوهیدرات خاک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل بقایای گیاهی و چرخه های تر و خشک شدن بر کربن آلی و کربوهیدرات خاک در سطح یک درصد معنی دار بود (جدول ۲). بیشترین میزان کربن آلی خاک در تیمار شاهد (بدون چرخه) مشاهده شد و با افزایش تعداد چرخه ها، کربن آلی در خاک در هر سه سطح بقایا

### جدول (۱) برخی از ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک و بقایای مورد مطالعه

Table (1) Selected characteristics of the studied soil and crop residue

بقایای C:N	آهک CaCO <sub>3</sub>	کربن آلی Organic carbon (%)	pH	EC (dS m <sup>-1</sup> )	بافت texture
Safflower C:N					Clay loam
45	23	0.49	7.1	1.3	

در این رابطه  $\theta_s$  رطوبت اشباع (گرم بر گرم)،  $\theta_r$  رطوبت باقی مانده (گرم بر گرم)،  $\alpha$  مرتبط با عکس مکش در نقطه ورود هوا ( $hPa^{-1}$ )،  $h$  مکش ماتریک ( $hPa$ ) و  $n$  شاخص توزیع اندازه منافذ خاک و  $A$ ،  $B$  و  $C$  ضرایب درجه دوم برای برازش بهتر دو انتهای منحنی می باشد.

پس از مدل سازی منحنی مشخصه رطوبتی در دامنه پر انرژی، شاخص پایداری خاک با استفاده از شاخص چایلدز (رابطه ۲) محاسبه شد (۸):

$$SI = \frac{\Delta u_g}{\tau_d} \quad (2)$$

در این رابطه، حجم منافذ قابل زهکشی، مکش ماتریک در نقطه عطف منحنی مشخصه رطوبتی و شاخص پایداری خاک می باشد. به منظور محاسبه  $\Delta u_g$  ظرفیت رطوبتی ویژه خاک با استفاده از روش سیمپسون (رابطه ۳) محاسبه شد (۸):

$$\left(\frac{d\theta}{dh}\right) = -(\theta_s - \theta_r) [1 + (\alpha h)^n]^{\frac{1}{n}-1} \left(\frac{1}{n} - 1\right) (\alpha h)^n \left(\frac{n}{h[1 + (\alpha h)^n]}\right) + 2\alpha h + B \quad (3)$$

پس از محاسبه شاخص پایداری در دو روش مرطوب کردن سریع و آهسته، نسبت پایداری از رابطه ۴ محاسبه شد (۳۶):

$$SR = \frac{SI_{\text{fast wetting}}}{SI_{\text{slow wetting}}} \quad (4)$$

در این رابطه SR، نسبت پایداری در خاک بوده که مقادیری بین صفر تا یک دارد.

کاهش یافت. افزایش تعداد چرخه‌ها در تیمار فاقد بقایای گیاهی باعث کاهش ۹/۷ تا ۳۶/۵ درصدی کربن آلی در مقایسه با تیمار شاهد (بدون چرخه) شد. با این وجود اختلاف میزان کربن آلی در تیمارهای ۴، ۸ و ۱۰ چرخه ناچیز بود. در تیمارهای ۱ و ۲ درصد بقایا افزایش تعداد چرخه‌ها از ۱ به ۱۰ چرخه به ترتیب باعث کاهش ۱۱/۷ تا ۵۱/۷ درصدی و ۴۳/۵ تا ۹۱ درصدی کربن آلی در مقایسه با تیمار شاهد (بدون چرخه) شد و اختلاف بین تیمارهای ۸ و ۱۰ چرخه معنی‌دار نبود (شکل ۱). کاهش مقدار کربن آلی خاک به دلیل معدنی شدن کربن در اثر چرخه‌های خشک و مرطوب شدن متناوب در سایر مطالعات نیز گزارش شده است. عوامل متعددی معدنی شدن کربن در طی چرخه‌های تر و خشک را تحت تأثیر قرار می‌دهند که از جمله مهم‌ترین آن‌ها تعداد چرخه‌های اعمال شده بر خاک می‌باشد (۱۶).

کاهش یافت. افزایش تعداد چرخه‌ها در تیمار فاقد بقایای گیاهی باعث کاهش ۹/۷ تا ۳۶/۵ درصدی کربن آلی در مقایسه با تیمار شاهد (بدون چرخه) شد. با این وجود اختلاف میزان کربن آلی در تیمارهای ۴، ۸ و ۱۰ چرخه ناچیز بود. در تیمارهای ۱ و ۲ درصد بقایا افزایش تعداد چرخه‌ها از ۱ به ۱۰ چرخه به ترتیب باعث کاهش ۱۱/۷ تا ۵۱/۷ درصدی و ۴۳/۵ تا ۹۱ درصدی کربن آلی در مقایسه با تیمار شاهد (بدون چرخه) شد و اختلاف بین تیمارهای ۸ و ۱۰ چرخه معنی‌دار نبود (شکل ۱). کاهش مقدار کربن آلی خاک به دلیل معدنی شدن کربن در اثر چرخه‌های تر و خشک را تحت تأثیر چرخه‌های خشک و مرطوب شدن متناوب در سایر مطالعات نیز گزارش شده است. عوامل متعددی معدنی شدن کربن در طی چرخه‌های تر و خشک را تحت تأثیر قرار می‌دهند که از جمله مهم‌ترین آن‌ها تعداد چرخه‌های اعمال شده بر خاک می‌باشد (۱۶).

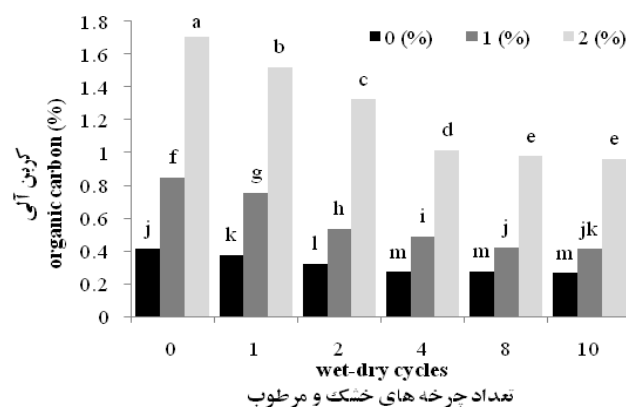
جدول (۲) تجزیه واریانس اثر چرخه‌های تر و خشک شدن و بقایای گیاهی بر مقدار کربن آلی و کربوهیدرات خاک

Table (2) Analysis of variance of wet and dry cycles and plant residue on the soil organic carbon and carbon and carbohydrate.

میانگین مربعات (Mean square)		درجه آزادی df	منبع تغییرات Variable source
Carbohydrate	Organic carbon		
0.512 **	0.3122 **	5	چرخه‌های تر و خشک شدن wet and dry cycles (C)
2.492 **	4.1592 **	2	مقدار بقایا Amount of residues (R)
0.068 **	0.0502 **	10	چرخه × بقایا (N*R)
0.003	0.0005	36	خطای آزمایش Error

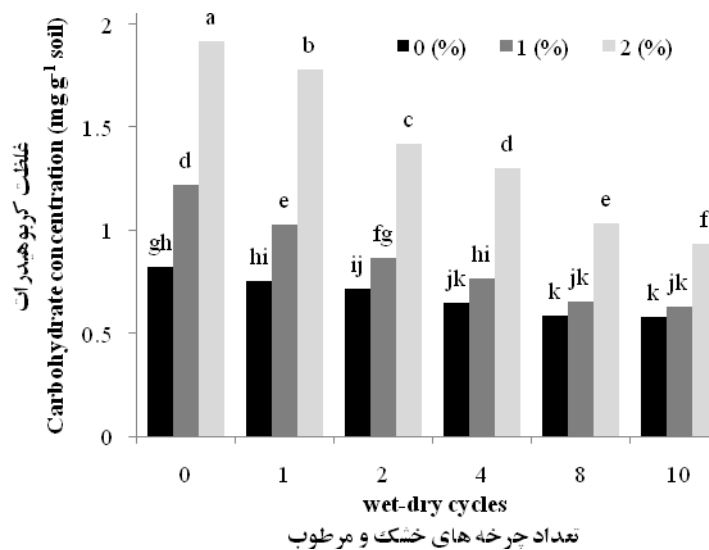
\* و \*\* به ترتیب بیانگر اثر معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد می‌باشد. <sup>ns</sup> بیانگر عدم وجود تفاوت معنی‌دار می‌باشد.

\* means  $P < 0.05$ ; \*\* means  $P < 0.01$ ; ns means not significant



شکل (۱) تأثیر تعداد چرخه‌های خشک و مرطوب شدن و مقدار بقایای گیاهی بر مقدار کربن آلی خاک

Figure (1) Effect of wet and dry cycles and the amount of crop residues on the soil organic carbon content



شکل (۲) تأثیر تعداد چرخه‌های خشک و مرطوب شدن و مقدار بقایای گیاهی بر غلظت کربوهیدرات خاک  
 Figure (2) Effect of wet and dry cycles and the amount of crop residues on the soil carbohydrate concentration

فعالیت‌های میکروبی قرار داده و احتمالاً یکی از دلایل کاهش ماده آلی خاک در اثر اعمال چرخه‌های متعدد می‌باشد (۱ و ۲۳). همان‌طور که مشاهده شد افزایش تعداد چرخه‌ها به ۸ و ۱۰ چرخه تغییر قابل توجهی در مقدار ماده آلی ایجاد نکرد که احتمالاً به دلیل مصرف ترکیبات تجزیه‌پذیرتر کربن آلی توسط ریزجانداران خاک در مراحل اولیه و باقی ماندن ترکیبات با تجزیه‌پذیری کم‌تر در خاک بوده است. از سوی دیگر با خشک شدن خاک از میزان جمعیت ریزجانداران خاک کم شده که می‌تواند دلیلی بر عدم تغییر معنی‌دار کربن خاک در تیمارهای ۸ و ۱۰ چرخه باشد.

افزایش سطح بقایا از صفر به ۲ درصد سبب بهبود وضعیت کربن آلی و غلظت کربوهیدرات در خاک شد. بیش‌ترین میزان کربن آلی و غلظت کربوهیدرات خاک در تیمار ۲ درصد بقایا و در تیمار عدم اعمال چرخه و کم‌ترین میزان در تیمار فاقد بقایا و در تیمار کاربرد ۱۰ چرخه خشک و مرطوب شدن مشاهده شد (شکل ۱ و ۲). افزایش تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن سبب کاهش غلظت کربوهیدرات‌ها در خاک شد. بیش‌ترین و کم‌ترین غلظت کربوهیدرات خاک به ترتیب در تیمار

به نظر می‌رسد خشک شدن و مرطوب شدن مجدد خاک سبب تحریک فعالیت‌های میکروبی در خاک می‌شود. شیانگ و همکاران<sup>۱</sup> (۳۸) افزایش کم تا متوسط فعالیت ریزجانداران در سطح خاک و افزایش قابل توجه آن در خاک زیر سطحی در اثر چرخه‌های تر و خشک شدن (۲۰ درجه سانتی‌گراد) متعدد را گزارش نموده‌اند. افزایش فعالیت میکروبی باعث مصرف شدن منابع کربنی و افزایش معدنی شدن کربن آلی خاک شده و از غلظت کربن آلی می‌کاهد. به طور کلی خشک شدن خاک از میزان جمعیت ریزجانداران خاک کم می‌نماید، اما این ریزجانداران در شرایط خشکی زنده مانده و در اثر مرطوب شدن جمعیت آنان به سرعت افزایش می‌یابد و در نتیجه در مجموع فعالیت دوره‌ای آن‌ها در طی چرخه‌های خشک و مرطوب شدن متعدد افزایش می‌یابد (۱۴ و ۲۲). از سوی دیگر فرآیند خشک و مرطوب شدن خاک منجر به شکست خاکدانه‌ها شده و در نتیجه حفاظت فیزیکی خاکدانه‌ها از مواد آلی کم‌تر می‌شود. شکست خاکدانه‌ها مواد آلی موجود در آن‌ها را در معرض

تیمارهای مورد مطالعه در مرطوب‌سازی سریع بر این دو ویژگی در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳).

اعمال ۲ و ۴ چرخه به ترتیب سبب افزایش معنی‌دار ۵۸ و ۱۰۶ درصدی حجم منافذ قابل زهکشی نسبت به تیمار شاهد شد. بیش‌ترین حجم منافذ قابل زهکشی در تیمار اعمال ۴ چرخه تر و خشک شدن مشاهده شد و افزایش بیش‌تر تعداد چرخه‌ها سبب کاهش معنی‌دار حجم این منافذ شد (جدول ۴).

اعمال ۲ و ۴ چرخه تر و خشک شدن سبب کاهش معنی‌دار مکش در نقطه عطف منحنی مشخصه در روش مرطوب‌سازی سریع به ترتیب به میزان ۱۶/۴ و ۲۲/۸ درصد در مقایسه با تیمار شاهد (بدون چرخه) شد، اما افزایش بیش‌تر تعداد چرخه‌ها این ویژگی را مجدداً افزایش داد و اختلاف تیمارهای ۸ و ۱۰ چرخه با تیمار شاهد معنی‌دار نبود. افزودن بقایای گلرنگ به خاک سبب کاهش مکش در نقطه عطف شد و کم‌ترین مکش در تیمار ۲ درصد بقایا مشاهده شد (جدول ۴).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر چرخه‌های تر و خشک شدن و بقایای گیاهی بر شاخص پایداری ساختمان خاک در حالت مرطوب شدن آهسته معنی‌دار نبود، در حالی که در روش مرطوب کردن سریع تأثیر هر دو تیمار مورد بررسی بر شاخص پایداری ساختمان معنی‌دار بود (جدول ۳). اعمال ۱ تا ۴ چرخه تر و خشک شدن در روش مرطوب‌سازی سریع سبب افزایش شاخص پایداری خاک شد. با این وجود این افزایش تنها در تیمارهای ۲ و ۴ چرخه معنی‌دار بود. اعمال ۲ و ۴ چرخه سبب افزایش حدود ۹۰ و ۱۳۷ درصدی شاخص پایداری نسبت به تیمار شاهد شد. افزایش تعداد چرخه‌ها به ۸ و ۱۰ چرخه سبب کاهش معنی‌دار شاخص پایداری در روش مرطوب شدن سریع شد؛ به گونه‌ای که اعمال ۸ و ۱۰ چرخه به ترتیب سبب کاهش ۴۶/۵ و ۶۵/۵ درصدی شاخص پایداری نسبت به تیمار ۴ چرخه و کاهش ۲۶/۵ و ۱۸ درصدی نسبت به تیمار شاهد شد (جدول ۴).

شاهد (بدون چرخه) و تیمار اعمال ۱۰ چرخه در هر سه سطح بقایای مورد مطالعه مشاهده شد. با این وجود کاهش غلظت کربوهیدرات خاک بین تیمارهای ۴، ۸ و ۱۰ چرخه در تیمار فاقد بقایا معنی‌دار نبود. همچنین در سطح یک درصد بقایا نیز تفاوت بین تیمارهای ۸ و ۱۰ چرخه از نظر غلظت کربوهیدرات از لحاظ آماری قابل توجه نبود (شکل ۲). نتایج نشان دهنده وجود همبستگی مثبت معنی‌دار در سطح یک درصد بین مقدار کربن آلی خاک و غلظت کربوهیدرات خاک ( $r = 0.95$ ) بود. یکی از منابع اصلی کربوهیدرات‌ها در خاک بقایای گیاهی است. کربوهیدرات‌ها به عنوان بخش قابل توجهی از ماده آلی خاک شناخته شده و ۵ تا ۲۵ درصد از مواد آلی خاک را تشکیل می‌دهند (۱۳). در نتیجه به نظر می‌رسد کاهش غلظت مواد آلی در خاک در طی چرخه‌های خشک و مرطوب شدن منجر به کاهش غلظت کربوهیدرات‌ها در خاک شده باشد. اسپارلینگ و همکاران<sup>۱</sup> (۳۴)، حسینی و همکاران<sup>۲</sup> (۱۸) و درستکار و والی (۱۱) نیز در مطالعه خود رابطه مثبت و معنی‌داری بین مقدار کربن آلی خاک و کربوهیدرات قابل عصارگیری با آب داغ و اسید رقیق را گزارش نموده‌اند. افزایش غلظت کربوهیدرات‌ها در اثر افزودن کود سبز به خاک توسط زوبیر و همکاران<sup>۳</sup> (۳۴) نیز گزارش شده است. غنی و همکاران<sup>۴</sup> (۱۵) نیز ارتباط مثبت و معنی‌دار بین غلظت کربوهیدرات‌ها در خاک و ماده آلی خاک را مشاهده کردند.

### حجم منافذ قابل زهکشی و مکش در نقطه عطف منحنی رطوبتی و شاخص‌های ساختمان خاک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که در مرطوب‌سازی به روش آهسته، تأثیر بقایای گیاهی و تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن بر حجم منافذ قابل زهکشی و مکش در نقطه عطف منحنی رطوبتی به دلیل اثر ناچیز این روش بر تخریب ساختمان خاک، معنی‌دار نبود. در حالی که اثر

1- Sparling *et al.*

2- Hosseini *et al.*

3- Zubair *et al.*

4- Ghani *et al.*

جدول (۳) تجزیه واریانس مربوط به اثرهای اصلی و متقابل تعداد چرخه‌های خشک و مرطوب شدن و مقدار بقایا بر حجم منافذ قابل زهکشی (VDP)، مکش در نقطه عطف منحنی ( $\tau_d$ )، شاخص پایداری (SI)، نسبت حجم منافذ قابل زهکشی (VDP Ratio) و نسبت پایداری (SR) در دو روش مرطوب کردن سریع (Fast) و آهسته (Slow) در خاک

Table (3) The analysis of variance of wet and dry cycles and plant residue on slow and fast VDP,  $\tau_d$ , SI, and soil VDP ratio and the stability ratio

SR	VDP Ratio	شاخص پایداری SI		مکش در نقطه عطف $\tau_d$		حجم منافذ قابل زهکشی (VDP)		درجه آزادی df	منبع تغییرات Variable source
		سریع Fast	آهسته Slow	سریع Fast	آهسته Slow	سریع Fast	آهسته Slow		
		0.238**	0.279**	$7.6 \times 10^{-5}$ **	$9.4 \times 10^{-6}$ ns	60.2**	1.34 ns		
0.361**	0.447**	$8.5 \times 10^{-5}$ **	$3.8 \times 10^{-5}$ ns	126.0**	1.06 ns	0.0246**	0.0058 ns	2	مقدار بقایا Amount of residues (R)
0.004*	0.005 ns	$2.5 \times 10^{-6}$ ns	$1.7 \times 10^{-5}$ ns	6.2**	1.01 ns	0.0009 ns	0.0008 ns	10	چرخه × بقایا (C*R)
0.001	0.007	$1.4 \times 10^{-6}$	$1.4 \times 10^{-5}$	3.0	1.40	0.0005	0.0021	36	خطای آزمایش Error

\* و \*\* به ترتیب بیانگر اثر معنی‌دار در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد می‌باشد. ns بیانگر عدم وجود تفاوت معنی‌دار می‌باشد.

\* means  $P < 0.05$ ; \*\* means  $P < 0.01$ ; ns means not significant.

جدول (۴) مقایسه میانگین اثر چرخه‌های تر و خشک شدن و مقدار بقایا بر حجم منافذ قابل زهکشی (VDP)، مکش در نقطه عطف منحنی ( $\tau_d$ ) و شاخص پایداری (SI) در دو روش مرطوب کردن سریع (Fast) و آهسته (Slow) در خاک

نسبت حجم منافذ قابل زهکشی VDP Ratio	شاخص پایداری SI ( $\text{g g}^{-1} \text{hPa}^{-1}$ )		مکش در نقطه عطف $\tau_d$ (hPa)		حجم منافذ قابل زهکشی VDP ( $\text{g g}^{-1}$ )		چرخه‌های تر و خشک Wet-dry cycles
	سریع Fast	آهسته Slow	سریع Fast	آهسته Slow	سریع Fast	آهسته Slow	
	0.394 <sup>de</sup>	0.0049 <sup>de</sup>	0.0230 <sup>a</sup>	25.0 <sup>ab</sup>	13.49 <sup>a</sup>	0.112 <sup>cd</sup>	
0.448 <sup>cd</sup>	0.0056 <sup>cd</sup>	0.0223 <sup>a</sup>	24.6 <sup>ab</sup>	13.48 <sup>a</sup>	0.132 <sup>c</sup>	0.299 <sup>a</sup>	1
0.688 <sup>b</sup>	0.0093 <sup>b</sup>	0.0205 <sup>a</sup>	20.9 <sup>c</sup>	13.59 <sup>a</sup>	0.187 <sup>b</sup>	0.273 <sup>a</sup>	2
0.772 <sup>a</sup>	0.0116 <sup>a</sup>	0.0214 <sup>a</sup>	19.3 <sup>c</sup>	14.45 <sup>a</sup>	0.231 <sup>a</sup>	0.304 <sup>a</sup>	4
0.484 <sup>cd</sup>	0.0062 <sup>c</sup>	0.0209 <sup>a</sup>	23.8 <sup>b</sup>	13.90 <sup>a</sup>	0.131 <sup>c</sup>	0.282 <sup>a</sup>	8
0.317 <sup>e</sup>	0.0040 <sup>e</sup>	0.0227 <sup>a</sup>	25.9 <sup>a</sup>	13.49 <sup>a</sup>	0.093 <sup>d</sup>	0.306 <sup>a</sup>	10

نسبت حجم منافذ قابل زهکشی VDP Ratio	شاخص پایداری SI ( $\text{g g}^{-1} \text{hPa}^{-1}$ )		مکش در نقطه عطف $\tau_d$ (hPa)		حجم منافذ قابل زهکشی VDP ( $\text{g g}^{-1}$ )		مقدار بقایای گیاهی (درصد) Crop residues ( $\text{g } 100\text{g}^{-1} \text{ soil}$ )
	سریع Fast	آهسته Slow	سریع Fast	آهسته Slow	سریع Fast	آهسته Slow	
	0.396 <sup>c</sup>	$5.3 \times 10^{-3}$ <sub>b</sub>	0.0230 <sup>a</sup>	25.4 <sup>a</sup>	13.89 <sup>a</sup>	0.118 <sup>c</sup>	
0.461 <sup>b</sup>	$6.0 \times 10^{-3}$ <sub>b</sub>	0.0221 <sup>a</sup>	24.1 <sup>b</sup>	13.45 <sup>a</sup>	0.137 <sup>b</sup>	0.296 <sup>a</sup>	1
0.695 <sup>a</sup>	$9.4 \times 10^{-3}$ <sub>a</sub>	0.0202 <sup>a</sup>	20.3 <sup>c</sup>	13.85 <sup>a</sup>	0.189 <sup>a</sup>	0.275 <sup>a</sup>	2

در هر ستون حروف یکسان بیانگر عدم وجود تفاوت معنی‌دار می‌باشد.

Values with similar letters are not significantly different



محبوس منجر به متلاشی شدن خاکدانه‌ها می‌گردد (۳۳). همچنین روند کاهش ماده آلی خاک از ۴ به ۱۰ چرخه ادامه داشته که می‌تواند پایداری ساختمانی را تحت تأثیر قرار دهد. با این وجود در تیمارهای اعمال ۴ تا ۱۰ چرخه در حضور بقایای گلرنگ به دلیل بیش‌تر بودن میزان ماده آلی خاک نسبت به تیمار فاقد بقایا، کاهش پایداری ساختمان کم‌تر بود که نشان دهنده اثر مثبت وجود مواد آلی خاک در تعدیل اثر تخریبی تعداد زیاد چرخه‌های خشک و تر شدن بود.

نتایج تجزیه واریانس نشان‌دهنده تأثیر معنی‌دار تعداد چرخه‌های تر و خشک و بقایای گیاهی بر نسبت منافذ قابل زهکشی و اثر متقابل این دو فاکتور بر نسبت پایداری بود. هرچه این دو نسبت به عدد یک نزدیک‌تر باشد، پایداری ساختمان خاک بیش‌تر است (جدول ۳).

افزایش تعداد چرخه‌ها سبب افزایش نسبت حجم منافذ قابل زهکشی شد. بیش‌ترین مقدار این شاخص در تیمار اعمال ۴ چرخه مشاهده شد و افزایش بیش‌تر تعداد چرخه‌ها با کاهش این نسبت همراه بود. به طور متوسط اعمال ۲ و ۴ چرخه به ترتیب سبب افزایش حدود ۷۴ و ۹۶ درصدی نسبت حجم منافذ قابل زهکشی در مقایسه با تیمار شاهد شد، در حالی که اعمال ۸ و ۱۰ چرخه به ترتیب سبب کاهش ۳۷ و ۵۹ درصدی این نسبت در مقایسه با تیمار ۴ چرخه شد، به طوری که تفاوت این دو تیمار با تیمار شاهد معنی‌دار نبود (جدول ۴). افزودن بقایای گیاهی به خاک سبب افزایش معنی‌دار حجم منافذ قابل زهکشی در روش مرطوب شدن سریع در مقایسه با تیمار بدون بقایا شد. بیش‌ترین حجم این منافذ در تیمار ۲ درصد بقایای گیاهی مشاهده شد و حجم منافذ در این تیمار ۱/۶ برابر تیمار شاهد بود (جدول ۴).

در هر سه سطح بقایای گیاهی افزایش تعداد چرخه‌ها تر و خشک شدن از صفر تا ۴ چرخه سبب افزایش نسبت پایداری خاک شد. کاربرد تنها یک چرخه افزایش معنی‌دار نسبت پایداری را به همراه نداشت و افزایش تعداد چرخه به بیش از ۴ سبب کاهش نسبت پایداری در

به نظر می‌رسد اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن (از ۱ تا ۴ چرخه) سبب بهبود وضعیت ساختمانی خاک و در نتیجه افزایش حجم منافذ قابل زهکشی و کاهش مکش در نقطه عطف منحنی رطوبتی شده است. مطالعات گوناگون تأثیر مثبت و منفی اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن بر ساختمان خاک را نشان داده است. افزایش کشش سطحی و تنش مؤثر ناشی از مکش ماتریک در فرآیند خشک شدن خاک سبب افزایش نیروهای دگرچسبی بین خاک و آب شده و با نزدیک‌تر نمودن ذرات خاک به یکدیگر به ساختمان‌سازی کمک می‌نماید. از سوی دیگر تناوب چرخه‌های تر و خشک شدن باعث آرایش ذرات اولیه کنار یکدیگر شده و پایداری خاکدانه‌ها را افزایش می‌دهد (۱۹). پدیده تر و خشک شدن خاک، انتقال مواد پیوند دهنده بین ذرات را تسهیل نموده و در اتصال ذرات به یکدیگر نقش مهمی را ایفاء می‌نماید. به عنوان مثال می‌توان به نقش مثبت چرخه‌ها در پایداری ساختمان در خاک‌های آهکی به دلیل انحلال آهک و آزادسازی یون کلسیم در دوره مرطوب و رسوب مجدد این یون بین ذرات در دوره خشک اشاره نمود (۲ و ۴۰).

از سوی دیگر مشاهده شد که با افزایش بیش‌تر چرخه‌ها (از ۴ به ۱۰ چرخه) حجم منافذ قابل زهکشی کاهش و مکش در نقطه عطف افزایش یافت. به نظر می‌رسد اعمال پی در پی چرخه‌های خشک و مرطوب شدن باعث شکست خاکدانه‌ها و پراکنده شدن ذرات سیلت و رس گردیده و در نتیجه با کاهش پایداری ساختمان خاک از میزان حجم منافذ قابل زهکشی کاسته است. شکست خاکدانه‌ها و کاهش میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها با افزایش تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن در مطالعات خسروی و موسوی (۱۹) به دلیل پراکندگی ذرات سیلت و رس گزارش شده است. همچنین مرطوب شدن خاک سبب کاهش پیوندهای ناپایدار از جمله پیوندهای واندروالس بین ذرات خاک شده و گسیختگی خاکدانه‌ها را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر ورود ناگهانی آب به داخل خاکدانه‌ها به دلیل وجود فشار هوای

۱۰ چرخه تر و خشک شدن در مقایسه با شاهد (فاقد چرخه) ۵۰ درصد بود، در حالی که با همین تعداد چرخه اعمالی و با افزودن ۲ درصد بقایا کاهش نسبت پایداری در مقایسه با شاهد تنها ۵/۴ درصد بود (شکل ۳). این نتایج نشان دهنده تأثیر مثبت بقایای گیاهی در کاهش اثرات مخرب چرخه‌های تر و خشک شدن می‌باشد.

اثرات مثبت افزودن مواد آلی به خاک بر خاکدانه-سازی شناخته شده است. مقدار و ترکیب پسماندهای گیاهی اضافه‌شده به خاک می‌تواند پایداری ساختمان خاک را تحت تأثیر قرار دهد (۳۴). مواد آلی از طریق ایجاد پیوندهای استری و الکترواستاتیکی باعث اتصال ذرات کلوئیدی خاک به یکدیگر شده و از تخریب خاکدانه‌ها جلوگیری می‌نماید. افزودن بقایای گیاهی به خاک می‌تواند سبب افزایش فرآیندهای میکروبی و تسریع تجزیه ترکیبات آلی شود. این امر باعث تشکیل کمپلکس‌های آلی-معدنی در خاک شده که پس از خشک شدن خاک اتصال ذرات به یکدیگر را نسبت به حالت فاقد بقایای گیاهی افزایش می‌دهد و احتمالاً منجر به افزایش خاکدانه‌سازی در شرایط اعمال یک تا چهار چرخه تر و خشک شدن و کاهش اثرات مخرب افزایش بیش‌تر چرخه‌ها بر ساختمان خاک شده است (۵ و ۹).

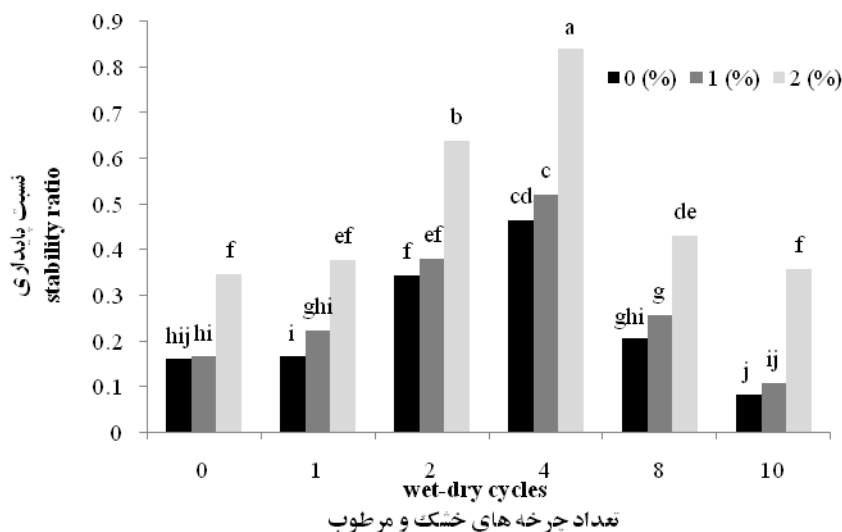
شاور و همکاران<sup>۴</sup> (۳۲) افزایش تشکیل خاکدانه‌های درشت را در اثر بقایای گیاهی به خاک گزارش نموده‌اند. باتاچاریا و همکاران<sup>۵</sup> (۳) نیز افزایش پایداری ساختمان خاک در اثر افزودن مواد آلی به خاک را مشاهده نمودند. براو-گارزا و همکاران<sup>۶</sup> (۵) در پژوهشی نشان دادند که تشکیل خاکدانه‌های بزرگ (بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر) پایدار در برابر آب با افزودن بقایای آلی به خاک کنترل می‌شود.

همه سطوح بقایا شد (شکل ۳). روند نسبت حجم منافذ قابل زهکشی و نسبت پایداری به عنوان شاخص ساختمان خاک در پاسخ به چرخه‌های اعمالی مشابه شاخص پایداری و حجم منافذ قابل زهکش بود که خود نشان-دهنده اثرات مفید چرخه‌های اعمالی تا ۴ چرخه بر بهبود وضعیت ساختمانی و سپس تخریب آن با افزایش تعداد بیش‌تر چرخه‌ها بوده است. مشابه با این نتایج صفادوست و همکاران<sup>۱</sup> (۳۰) نیز اثرات مثبت چرخه‌های تر و خشک شدن در افزایش ساختمان‌سازی به ویژه در خاک‌های رسی را گزارش نموده‌اند. دنف و همکاران<sup>۲</sup> (۹) نیز افزایش تشکیل خاکدانه‌ها پایدار بزرگ‌تر از ۲۵۰ میکرومتر را در اثر تشکیل پیوندهای بین مولکول‌های آلی با سطح معدنی ذرات خاک در اثر خشک شدن خاک را گزارش نمودند.

صفادوست و همکاران (۳۰ و ۳۱) در مطالعه‌ای افزایش پایداری ساختمان با اعمال یک و سه چرخه تر و خشک شدن و سپس کاهش پایداری ساختمان در اثر اعمال پنج چرخه را به دلیل ایجاد ترک‌های ریز در خاکدانه‌ها گزارش نموده است (۲۹). شی و همکاران<sup>۳</sup> (۳۹) نیز کاهش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در اثر اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن را گزارش نموده‌اند.

اختلاف یک درصد بقایای گیاهی با خاک تأثیر معنی‌داری بر نسبت پایداری نداشت، اما افزایش ۲ درصد بقایا سبب افزایش قابل توجه نسبت پایداری در تمام تیمارها در مقایسه با تیمار شاهد شد. بیش‌ترین نسبت پایداری در تیمار دارای ۲ درصد بقایا همراه با ۴ چرخه تر و خشک شدن و کم‌ترین آن در تیمار بدون بقایا همراه با ۱۰ چرخه مشاهده شد. کاهش نسبت پایداری در اثر اعمال بیش از ۴ چرخه تر و خشک شدن در تیمار دارای ۲ درصد بقایای گلرنگ نسبت به تیمار فاقد بقایا کم‌تر بود؛ به‌گونه‌ای که کاهش نسبت پایداری در تیمار فاقد بقایا با

4- Shaver *et al.*5- Bhattacharyya *et al.*3- Bravo-Garza *et al.*1- Safadoust *et al.*2- Deneff *et al.*3- Xu *et al.*



شکل (۳) تأثیر تعداد چرخه‌های خشک و مرطوب شدن و مقدار بقایای گیاهی بر نسبت پایداری خاک  
 Figure (3) The effect of wet and dry cycles and the amount of crop residues on the soil stability ratio

صفادوست (۲۹) نیز در بررسی توزیع خاکدانه‌ها نشان داد که افزایش تعداد چرخه‌ها به پنج عدد سبب افزایش خاکدانه‌های ریز در اثر تخریب خاکدانه‌های درشت‌تر شد. شی و همکاران (۳۹) نیز با مطالعه منحنی توزیع اندازه ذرات خاک مشاهده نمودند که در اثر افزایش چرخه‌ها تر و خشک، پیک منحنی به سمت منافذ ریزتر حرکت می‌نماید. در مجموع چرخه‌های تر و خشک شدن با تغییر در مقاوت خاک و چسبندگی ذرات، اندازه و پایداری خاکدانه‌ها را تغییر داده که نتیجه این عمل تغییر در اندازه منافذ خاک بوده است (۲۵).

افزایش مقدار بقایای گیاهی باعث کاهش حجم منافذ ریز و افزایش حجم منافذ درشت و متوسط در خاک شد. نتایج نشان داد که تنها افزودن ۲ درصد بقایا بر حجم منافذ دارای اثر معنی‌دار بود (جدول ۶).

پژوهش‌های پیشین افزایش تشکیل خاکدانه‌های بزرگ در اثر کاربرد بقایای گیاهی را نشان داده است (۵ و ۲۸). همان‌طور که اشاره شد تشکیل خاکدانه‌ها توزیع اندازه منافذ در خاک را تحت تأثیر قرار داده (۲۵) و در نتیجه به نظر می‌رسد این افزایش خاکدانه‌سازی در اثر اختلاط بقایای گلرنگ منجر به افزایش سهم منافذ درشت و کاهش حجم منافذ ریز در خاک شده است.

### حجم منافذ ریز، متوسط و درشت

تأثیر چرخه‌های تر و خشک و بقایای گیاهی بر حجم منافذ ریز، متوسط و درشت تنها در روش مرطوب کردن سریع معنی‌دار بود (جدول ۵).

با افزایش تعداد چرخه‌ها تا ۴ چرخه، حجم منافذ ریز کاهش یافت، اما افزایش بیشتر تعداد چرخه‌ها حجم این منافذ را مجدداً افزایش داد؛ به گونه‌ای که حجم این منافذ در دو تیمار ۸ و ۱۰ چرخه تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد (بدون چرخه) نداشت. افزایش تعداد چرخه‌ها تا ۴ چرخه سبب افزایش حجم منافذ متوسط و درشت شد، اما افزایش بیشتر تعداد چرخه‌ها حجم این منافذ را کاهش داد (جدول ۶).

ورود ناگهانی آب به داخل خاکدانه‌ها و افزایش فشار هوای محبوس و آماس ناهمگن توده خاک منجر به متلاشی شدن خاکدانه‌ها می‌شود. هرچه پایداری خاکدانه‌ها در برابر آب کم‌تر باشد، فروپاشی خاکدانه‌ها و تبدیل آن‌ها به خاکدانه‌های ریز بیشتر خواهد بود. در نتیجه هر عاملی که از پایداری خاکدانه‌ها کم نماید در واقع از سهم منافذ درشت و متوسط کاسته و بر میزان منافذ ریزتر می‌افزاید (۳۳). نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش تعداد چرخه‌ها از ۴ به ۱۰ چرخه از حجم منافذ درشت و متوسط کاسته شد و حجم منافذ ریز به دلیل تخریب مجدد ساختمان خاک افزایش یافت (جدول ۶).

درستکار و همکاران: بررسی پایداری ساختمان...

جدول (۵) تجزیه واریانس مربوط به اثرهای اصلی و متقابل تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن و مقدار بقایا بر حجم منافذ ریز، متوسط و درشت و شاخص کیفیت S و نسبت S در دو روش مرطوب کردن سریع و آهسته در خاک  
Table (5) The analysis of variance of wet and dry cycles and plant residue on fine, medium, and coarse pores volume in slow and fast wetting methods and S quality index

نسبت S	شاخص S		منافذ درشت		منافذ متوسط		منافذ ریز		درجه آزادی df	منبع تغییرات Variable source
	S index		Coarse pores		Medium pores		Fine pores			
	سریع Fast	آهسته Slow	سریع Fast	آهسته Slow	سریع Fast	آهسته Slow	سریع Fast	آهسته Slow		
0.223*	$1.0 \times 10^{-4}$ **	$2.6 \times 10^{-5}$ ns	$1.5 \times 10^{-4}$ **	0.0002 ns	0.0145 **	0.0020 ns	$4.5 \times 10^{-4}$ *	$1.1 \times 10^{-4}$ ns	5	چرخه‌های تر و خشک wet and dry cycles (C)
0.352**	$1.5 \times 10^{-4}$ **	$2.1 \times 10^{-5}$ ns	$1.7 \times 10^{-4}$ **	0.0008 ns	0.0180 **	0.0030 ns	$5.9 \times 10^{-4}$ *	$7.1 \times 10^{-5}$ ns	2	مقدار بقایا Amount of residues (R)
0.007 ns	$9.2 \times 10^{-6}$ ns	$2.6 \times 10^{-5}$ ns	$3.6 \times 10^{-5}$ ns	0.0010 ns	0.0012 ns	0.0003 ns	$2.9 \times 10^{-4}$ ns	$1.0 \times 10^{-4}$ ns	10	تعداد چرخه × بقایا (C*R)
0.008	$7.4 \times 10^{-6}$ 6	$1.4 \times 10^{-5}$ 5	$2.0 \times 10^{-5}$ 5	0.0005	0.0006	0.0011	$1.6 \times 10^{-4}$ 4	$1.7 \times 10^{-4}$ 4	36	خطای آزمایش Error

\* و \*\* به ترتیب بیانگر اثر معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد می‌باشد. ns بیانگر عدم وجود تفاوت معنی دار می‌باشد.

\* means  $P < 0.05$ ; \*\* means  $P < 0.01$ ; ns means not significant.

جدول (۶) مقایسه میانگین اثر اصلی چرخه‌های تر و خشک شدن و مقدار بقایا بر حجم منافذ ریز، متوسط و درشت و شاخص کیفیت S و نسبت S در روش مرطوب کردن سریع در خاک

Table (6) Effect of wet and dry cycles and crop residues on fine, medium and coarse pores volume in fast wetting method and S quality index

نسبت S	شاخص S	منافذ درشت	منافذ متوسط	منافذ ریز	چرخه‌های تر و خشک شدن
S ratio	S index	Coarse pores	Medium pores	Fine pores	Wet-dry cycles
0.38 <sup>d</sup>	0.01 <sup>b</sup>	0.0021 <sup>c</sup>	0.053 <sup>c</sup>	0.047 <sup>a</sup>	0
0.4 <sup>d</sup>	0.011 <sup>b</sup>	0.0023 <sup>c</sup>	0.060 <sup>c</sup>	0.042 <sup>ab</sup>	1
0.63 <sup>b</sup>	0.016 <sup>a</sup>	0.0099 <sup>ab</sup>	0.108 <sup>b</sup>	0.035 <sup>bc</sup>	2
0.75 <sup>a</sup>	0.018 <sup>a</sup>	0.0123 <sup>a</sup>	0.151 <sup>a</sup>	0.027 <sup>c</sup>	4
0.51 <sup>c</sup>	0.012 <sup>b</sup>	0.0055 <sup>bc</sup>	0.071 <sup>c</sup>	0.036 <sup>abc</sup>	8
0.35 <sup>d</sup>	0.01 <sup>b</sup>	0.0019 <sup>c</sup>	0.049 <sup>c</sup>	0.043 <sup>ab</sup>	10
نسبت S	شاخص S	منافذ درشت	منافذ متوسط	منافذ ریز	بقایای گیاهی (درصد)
S ratio	S index	Coarse pores	Medium pores	Fine pores	Crop residues (g 100g <sup>-1</sup> soil)
0.409 <sup>b</sup>	0.01 <sup>b</sup>	$2.8 \times 10^{-3}$ <sup>b</sup>	0.060 <sup>b</sup>	0.044 <sup>a</sup>	0
0.447 <sup>b</sup>	0.011 <sup>b</sup>	$5.0 \times 10^{-3}$ <sup>b</sup>	0.068 <sup>b</sup>	0.038 <sup>ab</sup>	1
0.668 <sup>b</sup>	0.016 <sup>a</sup>	$9.2 \times 10^{-3}$ <sup>a</sup>	0.118 <sup>a</sup>	0.033 <sup>b</sup>	2

در هر ستون حروف یکسان بیانگر عدم وجود تفاوت معنی دار می‌باشد.

Values with similar letters are not significantly different

روند نسبت S مشابه با شاخص S بود و با افزایش تعداد چرخه‌ها تا ۴ چرخه بهبود یافت و با افزایش بیش تر تعداد چرخه‌ها کیفیت فیزیکی خاک روند کاهشی داشت. اعمال ۲ و ۴ چرخه سبب افزایش ۶۶ و ۹۷ درصدی شاخص کیفیت فیزیکی (S) شد (جدول ۶).

### شاخص کیفیت فیزیکی خاک (S)

اثر تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن و بقایای گیاهی بر شاخص کیفیت فیزیکی خاک (S) و نسبت S معنی دار بود (جدول ۵). بیشترین مقدار شاخص S در تیمار ۴ چرخه مشاهده شد و کاربرد ۱، ۸ و ۱۰ چرخه تفاوت معنی داری با تیمار شاهد (بدون چرخه) نداشت.

شاخص‌های پایداری ساختمان خاک مورد مطالعه قرار گرفت. در مجموع نتایج نشان داد که افزایش چرخه‌های خشک و مرطوب شدن تا حدی (۱ تا ۴ چرخه) باعث بهبود وضعیت ساختمانی خاک، شاخص‌های نسبت پایداری و کیفیت فیزیکی خاک گردید. اما افزایش بیش-تر تعداد چرخه‌ها از ۴ به ۱۰ چرخه سبب کاهش فروپاشی خاکدانه‌ها، افزایش سهم منافذ ریز و کاهش شاخص S دکستر شد. با این وجود در شرایطی که ۲ درصد بقایای گیاهی به خاک افزوده شده بود، این اثرهای منفی چرخه-ها بر شاخص‌های پایداری کاهش یافت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که وجود مواد آلی تا حدی از تخریب خاک جلوگیری نموده و این امر لزوم حفظ بقایای گیاهان زراعی پس از برداشت محصول در مزارع و اختلاط آن‌ها با خاک را نشان می‌دهد.

تنها اختلاط ۲ درصد بقایای گلرنگ با خاک شاخص کیفیت فیزیکی (S) و نسبت S را به صورت معنی‌دار افزایش داد. شاخص S و نسبت S به ترتیب در تیمار ۲ درصد بقایا ۶۰ و ۶۸ درصد بیش‌تر از تیمار شاهد (بدون بقایا) بود (جدول ۶). در مجموع مشاهده می‌شود که روند کیفیت فیزیکی خاک (S) و نسبت S مشابه با روند مشاهده شده برای نسبت پایداری بوده و کیفیت فیزیکی خاک از وضعیت ساختمانی خاک تبعیت نموده است. نتایج همبستگی مثبت و معنی‌دار در سطح یک درصد بین نسبت پایداری و نسبت S ( $r=0/91$ ) نیز نشان دهنده اثر مستقیم وضعیت ساختمانی خاک بر کیفیت فیزیکی آن بوده است.

### نتیجه گیری

در این مطالعه اثرهای مثبت و منفی اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن در حضور بقایای گیاه گلرنگ بر برخی

### منابع

1. Aelamaneh, P., Mosaddeghi, M.R., Mahboubi, A.A., Ahrens, B., and Sinigani, A.S. 2014. Water repellency in calcareous soils under different land uses in western Iran. *Pedosphere*, 24:378–390.
2. Aldaood, A., Bouasker, M., and Al-Mukhtar, M. 2014. Impact of wetting–drying cycles on the microstructure and mechanical properties of lime-stabilized gypseous soils. *Engineering Geology*, 174: 11-21.
3. Bhattacharyya, R., Chandra, S., Singh, R.D., Kundu, S., and Gupta, H.S. 2007. Long-term farmyard manure application effects on properties of a silty clay loam soil under irrigated wheat-soybean rotation. *Soil and Tillage Research*, 94: 386–396.
4. Blanco-Canqui, H., and Lal, R. 2009. Extent of soil water repellency under long-term no-till soils. *Geoderma*, 149: 171–180.
5. Bravo-Garza, M.R., Bryan, R.B., and Voroney, P. 2009. Influence of wetting and drying cycles and maize residue addition on the formation of water stable aggregates in Vertisols. *Geoderma*, 151: 150–156.
6. Bronick, C.J., and Lal, R. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124: 3–22.

7. Burt, R. 2004. Soil survey laboratory methods manual: Soil survey investigations. Version 4.0. Natural Resources Conservation Service, Nebraska, United States.
8. Collis-George, N., and Figueroa, B.S. 1984. The use of high energy moisture characteristic to assess soil stability. *Australian Journal of Soil Resreach*, 22: 349–356.
9. Deneff, K., Six, J., Merckx, R., and Paustian, K. 2002. Short-term effects of biological and physical forces on aggregate formation in soils with different clay mineralogy. *Plant and Soil*, 246: 185–200.
10. Dexter, A.R. 2004. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*. 120: 201–214.
11. Dorostkar, V., and Vali, R., 2018. Effect of grape leaves and pomegranate peel on soil structural stability and water repellency in different salinity levels. *Journal of Agricultural Engineering*, 40: 29–46. (In Persian with English abstract)
12. Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P.A., and Smith, F. 1956. Colorimetric method of determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28: 350–356.
13. Fallahzade, J., and Hajabbasi, M.A. 2010. Evaluation of organic matter storage in aggregate of clayey soils under degraded pasture and cropland in central Zagros. *Journal of Water and Soil Conservation*, 17: 179–194. (In Persian with English abstract)
14. Fierer, N., and Schimel, J.P. 2001. Effects of drying-wetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations. *Soil Biology and Biochemistry*, 34: 777–787.
15. Ghani, A., Dexter, M., and Perrott, K.W. 2003. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation. *Soil Biology and Biochemistry*, 35: 1231–1243.
16. Guo, X., Drury, C.F., Yang, X., Reynolds, W.D., and Zhang, R., 2012. Impacts of wet–dry cycles and a range of constant water contents on carbon mineralization in soils under three cropping treatments. *Soil Science Society of America Journal*, 76: 485–493.
17. Hosseini, F., Mosaddeghi, M.R., Hajabbasi, M.A., Sabzalian, M.R., Soleimani, M., and Sepehri, M. 2017. Effects of endophyte-infected (*Epichloë coenophaila*) tall fescue residues on water repellency and structural stability of texturally-different soils. *Journal of Water and Soil Research*, 21: 69–82.
18. Hosseini, F., Mosaddeghi, M.R., Hajabbasi, M.A., and Sabzalian, M.R. 2015. Aboveground fungal endophyte in tall fescue alters rhizosphere chemical, biological, and hydraulic properties in texture-dependent ways. *Plant and Soil*, 388: 351–366.
19. Khosravi, A., and Moosavi, A.A. 2017. Influence of Organic Acids and Wetting-Drying Cycles on the Aggregate Stability and Size Distribution in a Calcareous Soil. *Iranian Journal of Soil Research*, 31: 263-276. (In Persian with English abstract)

20. Liu, A., Ma, B.L., and Bomke, A.A. 2005. Effects of cover crops on soil aggregate stability, total organic carbon, and polysaccharides. *Soil Science Society of American Journal*, 69: 2041–2048.
21. Mamedov, A.I., Bar-Yosef, B., Levkovich, I., Rosenberg, R., Silber, A., Fine, P., and Levy, G.J. 2014. Amending soil with sludge, manure, humic acid, orthophosphate and phytic acid: effects on aggregate stability. *Soil Research*, 52: 317–326.
22. Merckx, R., Brans, K., and Smolders, E. 2001. Decomposition of dissolved organic carbon after soil drying and wetting as an indicator of metal toxicity in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 33:235–240.
23. Miller, A.E., Schimel, J.P., Meixner, T., Sickman, J.O., and Melack, J.M. 2005. Episodic wetting enhances carbon and nitrogen release from chaparral soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 37: 2195–22049.
24. Mirzaee, M., and Mahmoudabadi, M. 2015. Effect of different type and management of crop residues on soil physical properties and water infiltration. *Journal of soil researches*, 28: 659–671. (In Persian with English abstract)
25. Newman, A.C.D., and Thomasson, A.J. 1979. Rothamsted studies of soil structure. III. Pore size distributions and shrinkage processes. *Journal of Soil Science*, 30: 415–439.
26. Pierson, F.B., and Mulla, D.J. 1989. An improved method for measuring aggregate stability of a weakly aggregated loessial soil. *Soil Science Society of American Journal*, 53: 1825–1831.
27. Pires, L.F., Bacchi, O.O.S., and Reichardt, K. 2007. Assessment of soil structure repair due to wetting and drying cycles through 2D tomographic image analysis. *Soil and Tillage Research*, 94: 537–545.
28. Plante, A.F., and McGill, W.B. 2002. Intraseasonal soil macroaggregate dynamics in two contrasting field soils using labeled tracer spheres. *Soil Science Society of America Journal*, 66: 1285–1295.
29. Safadoust, A., 2016. Effects of the Number of Wetting-Drying Cycles on Structure Stability, Particle Size Distribution and Pore System of Soil. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 46: 759-767. (In Persian with English abstract)
30. Safadoust, A., Mahboubi, A.A., Mosaddeghi, M.R., Gharabaghi, B., Unc, A., Voroney, P., and Heydari, A. 2012a. Effect of regenerated soil structure on unsaturated transport of *Escherichia coli* and bromide. *Journal of Hydrology*, 430–431: 80–90.
31. Safadoust, A., Mahboubi, A.A., Mosaddeghi, M.R., Gharabaghi, B., Voroney, P., Unc, A. and Khodakaramian, G.h. 2012b. Significance of physical weathering of two-texturally different soils for the saturated transport of *E. coli* and bromide. *Journal of Environmental Management*, 107: 147–158.

32. Shaver, T.M., Peterson, G.A., and Sherrod, L.A. 2003. Cropping intensification in dryland systems improves soil physical properties: regression relations. *Geoderma*, 116: 149–164.
33. Shiel, R.S., Adey, M.A., and Lodder, M. 1988. The effect of successive wet/dry cycles on aggregate size distribution in a clay texture. *Journal of Soil Science*, 39: 71–80.
34. Sparling, G., Vojvodic-Vukovic, M., and Schipper, L.A. 1998. Hot-water soluble C as a simple measure of labile soil organic matter: the relationship with microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 30: 1469–1472.
35. Tajik, F., Rahimi, H., and Pazira, E. 2003. Effect of electrical conductivity and sodium adsorption ratio of water on aggregate stability in soils with different organic matter content. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 5: 67–75.
36. Tisdall, J.M., and Oades, J.M. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soil. *Journal of Soil Science*, 33: 141–163.
37. Utomo, W.H., and Dexter, A.R. 1982. Changes in soil aggregate water stability induced by wetting and drying cycles in non-saturated soil. *European Journal of Soil Science*, 33: 623–637.
38. Xiang, S.R., Doyle, A., Holden, P.A., and Schimel, J.P. 2008. Drying and rewetting effects on C and N mineralization and microbial activity in surface and subsurface California grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 40: 2281–2289.
39. Xu, J., Tang, Y., and Zhou, J. 2017. Effect of drying-wetting cycles on aggregate breakdown for yellow-brown earths in karst areas. *Geoenvironmental Disasters*, 4: 1–13.
40. Zhang, B., Horn, R., and Hallett, P.D. 2005. Mechanical resilience of degraded soil amended with organic matter. *Soil Science Society American Journal*, 69: 864–871.
41. Zubair, M., Anwar, F., Ashraf, M., Ashraf A., and Chatha, S.A.S. 2012. Effect of green and farmyard manure on carbohydrates dynamics of salt-affected soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12: 497–510.