

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده کشاورزی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مدیریت منابع گرایش فیزیک و حفاظت خاک

اثر بیوچار و چرخه‌های خشک و مرطوب شدن بر مفاهیم آب قابل استفاده خاک

نگارنده: فاطمه زهرا عرب‌عامری

اساتید راهنما:

دکتر وجیهه درستکار

دکتر یاسر صفری

استاد مشاور:

دکتر محمدهادی موحدنژاد

شهریور ۱۴۰۰

صورت جلسہ دفاع

اگر شایسته باشد

تقدیم به مقدس ترین واژه مادر لغت نامه دلم، مادر مهربانم که زندگیم را دیون مهر و عطوفت آن می دانم.

تقدیم بابوسه به دستان پدرم که از محاش صلابت و از صبرش ایستادگی آموختم.

و

تقدیم به برادرانم به همفران مهربان زندگیم که باهم آغاز کردیم و باهم آموختیم، قلمم لبریز از عشق به شاست

و خوشبختی تان منتهای آرزویم.

به نام افریدگار پاک که انسان را از خاک آفرید و به واسطه عقل بر تمام موجودات رحمان داد و آنگاه دانش را وسیله تکامل عقل قرار داد...

الکون که به پایان مرحله‌ای دیگر از این مسیر رسیده‌ام موجب افتخار من است تا از تمامی کسانی که در این راه همراه من بوده‌اند کمال تشکر را به عمل آورم. پاسگزاری می‌کنم از پدر و مادر عزیزم، که از آغاز بهواره مشوق و همراه من بوده‌اند و از بیچ محبتی برای من دین نگه‌داشته‌اند. از اساتید گرانقدر، محنتی‌ناپذیر و مهربان سرکار خانم دکتر وحیده دستگار و جناب آقای دکتر یاسر صفری که در تمام مراحل این پژوهش با حسن خلق و فروتنی مرا راهنمایی و همراهی کردند سپاسگزارم، باشد که این خردترین بخشی از زحمات اینجانبان را پاس گوید. از استاد مشاوره گرامی جناب آقای دکتر محمدیادی موحدنژاد که با مشاوره‌های ارزشمندشان من را در طول این پایان‌نامه همراهی نموده‌اند سپاس گزاری نموده و برای ایشان آرزوی سلامتی می‌نمایم. همچنین از اساتید محترم جناب آقای دکتر یادی قربانی و جناب آقای دکتر علی عباسپور که زحمات بازنوایی و داوری این پایان‌نامه را بر عهده داشتند کمال تشکر را دارم.

و همچنین از دوستان بسیار خوبم که حضورشان شادی بخش سال‌های حضور من در دانشگاه صنعتی شاهرود بوده کمال تشکر را دارم. یاد و خاطره این عزیزان همیشه در خاطرم خواهد ماند و برایشان آرزوی توفیق روزافزون و سلامتی دارم.

فاطمه زهرا عرب عامری

شهریور ۱۴۰۰

تهدنام

اینجانب فاطمه زهرا عرب‌عامری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته کشاورزی گرایش فیزیک و حفاظت خاک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه با موضوع اثر بیوچار و چرخه‌های خشک و مرطوب شدن بر مفاهیم آب قابل استفاده تحت راهنمایی دکتر وجیهه درستکار و دکتر یاسر صفری متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو: فاطمه زهرا عرب‌عامری

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود. استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

با توجه به اقلیم گرم و خشک کشور ایران، کمبود آب و خشکی از شایع‌ترین مشکلات کشاورزی به حساب می‌آید. بنابراین، یافتن راه‌کارهایی برای بهبود ساختمان خاک و مقاومت گیاه به تنش خشکی از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. اصلاح کننده‌های آلی می‌توانند بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، مقاومت مکانیکی خاک و ساختمان خاک تاثیر مثبتی بگذارند. بیوجار و بقایای گیاهی از طریق افزایش سطح ویژه، افزایش تخلخل خاک، پایداری خاک‌دانه‌ها و کاهش چگالی ظاهری باعث بهبود کیفیت فیزیکی خاک می‌شود. از سوی دیگر، نظر به شرایط اقلیمی کشور، بروز چرخه‌های تر و خشک شدن خاک در سال‌های اخیر افزایش یافته است. این چرخه‌هایی از فاکتورهای مؤثر بر پایداری ساختمان خاک است. در همین راستا، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر بیوجار و چرخه‌های خشک و مرطوب شدن بر مفاهیم آب قابل استفاده خاک اجرا گردید. پژوهش حاضر به صورت آزمون فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با دوفاکتور مستقل چرخه‌های خشک و مرطوب شدن در پنج سطح (صفر، ۲، ۴، ۸ و دائماً مرطوب) و مواد آلی در سه سطح صفر (شاهد) ۲/۵ درصد بیوجار و ۲/۵ درصد بقایای گیاهی در مجموع با ۱۵ تیمار و سه تکرار انجام شد. پس از اختلاط خاک با بیوجار، خاک مورد آزمون در استوانه‌هایی با قطر ۴ و ارتفاع ۳ سانتی‌متری ریخته شد. سپس، چرخه‌های خشک و مرطوب شدن در بازه زمانی دو ماه اعمال شد و در نهایت با اندازه‌گیری منحنی مشخصه رطوبتی خاک و مقاومت مکانیکی خاک، مفاهیم آب فراهم خاک، دامنه رطوبتی بدون محدودیت و با حداقل محدودیت و آب انتگرالی محاسبه شد. نتایج نشان داد که تیمارهای اصلاح کننده آلی با افزایش کربن آلی خاک سبب افزایش میانگین وزنی قطر ذرات خاکدانه و کاهش رس قابل پراکنش شد و در نهایت بهبود کیفیت فیزیکی خاک را رقم زد. از سویی، بیشترین مقدار ماده آلی در تیمار ۲ و ۴ چرخه و بیشترین مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در تیمار ۲ چرخه مشاهده شد. افزودن بیوجار به میزان ۲/۵ درصد باعث کاهش مقاومت فروروی خاک نسبت به تیمار شاهد در مکش‌های مورد مطالعه شد. همچنین، افزودن بقایای گیاهی و بیوجار به خاک، رطوبت حجمی خاک را به ترتیب ۰/۴۴ و ۰/۵۳ در مکش‌های اولیه افزایش داد و این افزایش در مکش‌های کم‌تر از ۱۰۰ سانتی‌متر مشهودتر بود. در مجموع، بیش‌ترین تأثیر چرخه‌ها بر افزایش نگهداشت آب خاک مربوط به تیمار اعمال دو چرخه خشک و مرطوب شدن بود. اعمال تیمار مواد آلی و چرخه‌های تر و خشک شدن، آب فراهم خاک (PAW_{100} و PAW_{330}) را از ۰/۷۷۹ در تیمار شاهد به ۰/۱۹۳۸ در تیمار بیوجار افزایش داد. در تیمار شاهد بدون بقایا و در تیمار بقایای گیاهی افزایش چرخه‌های خشک و مرطوب شدن مقدار رطوبت در هر دو نقطه ظرفیت مزرعه و پرمردگی دائم را افزایش داده است. در تیمارهای کاربرد بیوجار و بقایای گیاهی نیز کاربرد چرخه‌های خشک و مرطوب شدن سبب افزایش رطوبت در دامنه‌ی رطوبتی با حداقل محدودیت در مقایسه با تیمار بدون چرخه شده است. همچنین اعمال تیمارهای آلی در خاک سبب افزایش دو برابری تخلخل تهویه‌ای ده درصد در تیمار بیوجار (۰/۴۴۹۴) نسبت به تیمار شاهد (۰/۲۴۱۹) شد. نتایج حاصل از این پژوهش گویای آن بود که افزودن بیوجار و اعمال چرخه‌ها سبب افزایش خاک‌دانه سازی و بهبود ساختمان خاک شده است که از این طریق، کاهش مقاومت فروروی خاک را در پی دارد، همچنین نظر به احتمال گسترش بیش از پیش چرخه‌های تر و خشک شدن در خاک‌های کشور به دلیل نوسانات اقلیمی و تغییر الگوی بارش، بنابراین می‌توان گفت کاربرد بیوجار و بقایای گیاهی می‌تواند راهکاری سودمند در مدیریت خاک باشد.

کلید واژه: بیوجار، بقایای گیاهی، چرخه‌های تر و خشک شدن، مقاومت مکانیکی، رس قابل پراکنش، آب انتگرالی.

مقالات مستخرج از پایا نامه

- ۱- عرب عامری ف. ز، درستکار و، صفری ی، موحدنژاد م. ه. (۱۴۰۰) " اثر بیوچار و چرخه های تر و خشک شدن بر مقاومت مکانیکی خاک"، هفدهمین کنگره علوم خاک ایران و چهارمین همایش ملی مدیریت آب در مزرعه.

فهرست مطالب

فهرست مطالب	أ
فهرست جداول	ه
فهرست اشكال	و
فصل ۱ : مقدمه و کلیات	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- مفاهیم آب قابل استفاده	۳
۱-۲-۱- آب فراهم خاک (PAW)	۴
۲-۲-۱- دامنه رطوبتی بدون محدودیت (NLWR)	۴
۳-۲-۱- دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (LLWR)	۵
۴-۲-۱- گنجایش آب انتگرالی (IWC)	۵
۳-۱- عوامل مؤثر بر آب قابل استفاده خاک	۵
۴-۱- اثرات انواع مواد آلی بر حدود رطوبتی خاک	۶
۵-۱- چرخه‌های خشک و مرطوب شدن خاک	۸
۶-۱- ضرورت پژوهش	۹
۷-۱- فرضیات پژوهش	۱۰
۸-۱- اهداف پژوهش	۱۰
فصل ۲ مروری بر منابع	۱۱
۱-۲- مفاهیم آب قابل استفاده در خاک	۱۲
۱-۱-۲- آب فراهم خاک برای گیاه	۱۲

- ۱۳-۱-۲- دامنه رطوبتی بدون محدودیت و دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت..... ۱۳
- ۱۸-۱-۳- گنجایش آب انتگرالی..... ۱۸
- ۱۹-۲- عوامل مؤثر بر آب قابل استفاده خاک..... ۱۹
- ۱۹-۲-۱- بیوچار..... ۱۹
- ۲۲-۲-۲- چرخه‌های خشک و مرطوب شدن..... ۲۲
- ۲۷- فصل ۳ مواد و روش‌ها..... ۲۷
- ۲۸-۱- نمونه برداری و آماده سازی خاک..... ۲۸
- ۲۸-۱-۱-۳- بافت خاک..... ۲۸
- ۲۸-۱-۲- pH و EC خاک..... ۲۸
- ۲۹-۲- تهیه بقایای گیاهی و بیوچار..... ۲۹
- ۲۹-۲-۱- کربن آلی مواد اصلاح کننده..... ۲۹
- ۳۰-۳- آماده سازی تیمارهای آزمایشی..... ۳۰
- ۳۱-۴- اندازه گیری ویژگی های خاک در تیمارهای مورد بررسی..... ۳۱
- ۳۱-۴-۱- اندازه گیری رس قابل پراکنش خاک در آب..... ۳۱
- ۳۲-۴-۲- میانگین وزنی قطر ذرات خاکدانه ها..... ۳۲
- ۳۳-۴-۳- اندازه گیری کربن آلی خاک..... ۳۳
- ۳۳-۴-۴- اندازه گیری منحنی مشخصه رطوبتی..... ۳۳
- ۳۴-۵- اندازه گیری و مدل سازی منحنی مشخصه مقاومت مکانیکی خاک..... ۳۴
- ۳۵-۶- محاسبه آب قابل استفاده خاک برای گیاه..... ۳۵
- ۳۵-۶-۱- آب فراهم خاک (PAW)..... ۳۵
- ۳۶-۶-۲- دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (LLWR)..... ۳۶

۳-۶-۳- گنجایش آب انتگرالی (IWC)	۳۶
فصل ۴ نتایج و بحث	۴۳
۴-۱- ویژگی‌های بیوچار مورد استفاده	۴۴
۴-۲- اثر تیمارهای آزمایشی بر ماده آلی خاک	۴۷
۴-۳- اثر تیمارهای آزمایشی بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و رس قابل پراکنش	۴۹
۴-۴- اثر تیمارهای آزمایشی بر منحنی مشخصه مقاومت فروروی خاک	۵۴
۴-۴-۱- اثر نوع تیمار اصلاح کننده آلی و چرخه‌های تر و خشک شدن بر مقاومت فروروی خاک	۵۶
۴-۵-۵- اثر تیمارهای آزمایشی بر پارامترهای هیدرولیکی خاک	۶۱
۴-۵-۱- منحنی مشخصه رطوبتی خاک	۶۱
۴-۵-۲- پارامترهای مدل منحنی مشخصه رطوبتی خاک	۶۴
۴-۵-۳- اثر تیمارهای آزمایشی بر رطوبت ظرفیت مزرعه (FC)	۶۹
۴-۵-۴- اثر تیمارهای آزمایشی بر نقطه‌ی پژمردگی دائم (PWP)	۷۲
۴-۵-۵- اثر تیمارهای آزمایشی بر تخلخل تهویه‌ای ده درصد ($AFP_{10\%}$)	۷۴
۴-۵-۶- اثر تیمارهای آزمایشی بر آب فراهم خاک (PAW)	۷۶
۴-۵-۷- اثر تیمارهای آزمایشی بر دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (LLWR)	۷۹
۴-۵-۸- اثر تیمارهای آزمایشی بر گنجایش آب انتگرالی	۸۳
فصل ۵ نتیجه‌گیری	۸۷
۵-۱- نتیجه‌گیری کلی	۸۸
۵-۲- پیشنهادها	۹۰

فهرست جداول

- جدول ۱-۳- ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک مورد بررسی ۲۸
- جدول ۱-۴- ویژگی‌های شیمیایی بیوچار و بقایای گیاهی ۴۴
- جدول ۲-۴- تجزیه واریانس اثر ماده اصلاحی و چرخه بر ماده آلی خاک ۴۷
- جدول ۳-۴- تجزیه واریانس اثر ماده اصلاحی و چرخه‌های تر و خشک شدن بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و رس قابل پراکنش خاک ۵۰
- جدول ۴-۴- اثرهای اصلی و متقابل مواد اصلاح کننده و چرخه‌های تر و خشک شدن بر مقاومت فروروی در مکش‌های مختلف ۵۷
- جدول ۵-۴- اثرهای اصلی و متقابل مواد اصلاح کننده و چرخه‌های تر و خشک شدن بر پارامترهای هیدرولیکی معادله ونگنوختن-معلم ۶۵
- جدول ۶-۴- اثر اصلی و متقابل مواد اصلاح کننده و چرخه‌های تر و خشک شدن بر ظرفیت زراعی (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP)، تخلخل تهویه‌ای (AFP) ۷۰
- جدول ۷-۴- اثر اصلی و متقابل مواد اصلاح کننده و چرخه‌های تر و خشک شدن بر آب فراهم خاک (PAW)، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (LLWR)، گنجایش آب انتگرالی (IWC) ۷۷

فهرست اشکال

- شکل ۳-۱- تصویری از بقایای برگ درخت چنار و کاج ۲۹
- شکل ۳-۲- تصویری از بیوچار و بقایای گیاهی ۳۰
- شکل ۳-۳- اندازه گیری رس قابل پراکنش ۳۲
- شکل ۳-۴- نمایی از دستگاه اندازه گیری MWD (میانگین وزنی قطر ذرات خاکدانه) ۳۲
- شکل ۳-۵- نمایی از دستگاه صفحات فشاری ۳۴
- شکل ۴-۱- تصاویر مربوط به SEM بقایای برگ درختان چنار و کاج سوزنی برگ ۴۵
- شکل ۴-۲- تصاویر مربوط به SEM بیوچار برگ درختان چنار و کاج سوزنی برگ ۴۶
- شکل ۴-۳- تاثیر ماده‌های اصلاح کننده و چرخه‌های تر و خشک شدن بر ماده آلی خاک ۴۸
- شکل ۴-۴- اثر ماده اصلاحی بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها ۵۰
- شکل ۴-۵- اثر چرخه‌های خشک و تر شدن بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها ۵۱
- شکل ۴-۶- اثر تیمارهای ماده اصلاح کننده بر رس قابل پراکنش (WDC) خاک ۵۳
- شکل ۴-۷- اثر مواد اصلاح کننده بر منحنی مشخصه مقاومت فروروی خاک ۵۵
- شکل ۴-۸- اثر چرخه‌های تر و خشک شدن بر منحنی مشخصه مقاومت فروروی خاک ۵۶
- شکل ۴-۹- اثر مواد اصلاح کننده بر مقاومت فروروی الف) مکش ۱۰۰۰ سانتی‌متری، ب) مکش ۵۰۰۰ سانتی‌متری، ج) مکش ۱۰۰۰۰ سانتی‌متری، د) مکش ۱۵۰۰۰ سانتی‌متری ۵۸
- شکل ۴-۱۰- اثر چرخه‌های تر و خشک شدن بر مقاومت فروروی خاک الف) مکش ۱۰۰۰ سانتی‌متری، ب) مکش ۵۰۰۰ سانتی‌متری، ج) مکش ۱۰۰۰۰ سانتی‌متری، د) مکش ۱۵۰۰۰ سانتی‌متری ۶۰
- شکل ۴-۱۱- اثر مواد اصلاحی آلی بر منحنی مشخصه رطوبتی خاک ۶۲
- شکل ۴-۱۲- منحنی مشخصه رطوبتی خاک تحت تاثیر تیمار چرخه‌های تر و خشک شدن ۶۳
- شکل ۴-۱۳- اثر مواد اصلاح کننده و چرخه‌های تر و خشک شدن بر رطوبت اشباع خاک ۶۶
- شکل ۴-۱۴- اثر مواد اصلاح کننده و چرخه‌های تر و خشک شدن بر پارامتر رطوبت باقی مانده خاک ۶۷

- شکل ۴-۱۵- اثر مواد اصلاح کننده بر پارا متر α ۶۹
- شکل ۴-۱۶- اثر مواد اصلاحی آلی و چرخه‌های تر و خشک شدن بر: الف) ظرفیت مزرعه با مکش ۱۰۰ سانتی‌متری (FC100) و ب) ظرفیت مزرعه با مکش ۳۳۰ سانتی‌متری (FC330) ۷۲
- شکل ۴-۱۷- اثر متقابل ماده اصلاحی و چرخه‌های تر و خشک شدن بر نقطه‌ی پژمردگی دائم (pwp) ۷۳
- شکل ۴-۱۸- برهمکنش ماده اصلاح کننده و چرخه‌های تر و خشک شدن بر تخلخل تهویه‌ای ۱۰ درصد (AFP) ۷۵
- شکل ۴-۱۹- اثر تیمارهای آزمایشی بر: الف) اب قابل استفاده خاک بامکش ۱۰۰ سانتی‌متر (PAW100) و ب) اب قابل استفاده خاک بامکش ۳۳۰ سانتی‌متر (PAW330) ۷۹
- شکل ۴-۲۰- برهمکنش ماده اصلاح کننده و چرخه‌های تر و خشک شدن بر دامنه رطوبتی بدون محدودیت (LLWR100) ۸۰
- شکل ۴-۲۱- برهمکنش ماده اصلاح کننده و چرخه‌های تر و خشک شدن بر دامنه رطوبتی بدون محدودیت (LLWR330) ۸۳
- شکل ۴-۲۲- برهمکنش ماده اصلاح کننده و چرخه‌های تر و خشک شدن بر گنجایش آب انتگرالی (IWC) ۸۴

فصل ۱ : مقدمه و کلیات

۱-۱- مقدمه

خاک به عنوان بستر رشد گیاه دارای ویژگی‌های فیزیکی، زیستی و شیمیایی مهمی است. ویژگی‌های فیزیکی خاک (بافت، ساختمان، حرکت و فراهمی آب در خاک) و ویژگی‌های مکانیکی خاک به دلیل تاثیر مستقیم و غیرمستقیم بر ویژگی‌های شیمیایی و زیستی، از اهمیت بسیاری در مدیریت سیستم‌های کشاورزی برخوردار است [عسگرزاده و همکاران، ۲۰۱۱].

وجود آب در خاک از مهم‌ترین عوامل رشد گیاه و تولید انواع محصولات کشاورزی در راستای تأمین نیاز غذایی بشر است. عمده‌ترین میزان مصرف آب در ایران در بخش کشاورزی می‌باشد. ارقامی که در گزارش‌های مختلف در این رابطه ارائه گردیده حاکی از این است که حدود ۹۰ درصد از حجم آب مصرفی در کشور، صرف تولیدات کشاورزی می‌شود. از آن جایی که در اغلب نقاط ایران که دارای اقلیم خشک و نیمه خشک است مدیریت منابع آب از اولویت خاصی برخوردار است، یکی از راه‌های مفید در تأمین آب مورد نیاز بخش‌های مختلف در این مناطق و مقابله با بحران خشکسالی به کارگیری راهکارهای سودمند در راستای افزایش ذخایر آب در خاک است [اجایی و همکاران، ۲۰۱۶].

یکی از مهم‌ترین مسائل موجود در زمینه رابطه آب، خاک و گیاه، قابلیت استفاده آب در خاک برای گیاه است. روشن است که تمامی حجم آب موجود در خاک برای گیاهان قابل استفاده نیست. مقدار آب قابل استفاده در خاک نشان‌دهنده سهولت جذب آب توسط گیاه بوده و تابع بافت، ساختمان و توزیع اندازه ذرات خاک است [وانگ و هان، ۲۰۱۱]. آثار مستقیم و غیر مستقیم آب بر رشد گیاه و مقدار محصول سبب آن گشته که از دیرباز مقدار آب قابل استفاده خاک برای گیاه و اندازه گیری آن مورد توجه کشاورزان و پژوهشگران در این زمینه قرار گیرد. ارزیابی دقیق آب قابل استفاده خاک از جمله مهم‌ترین عوامل مؤثر در مدیریت خاک و تولید محصول است [کرخام، ۲۰۰۵]. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که مقدار آب فراهم خاک^۱ (PAW) به تنهایی نمی‌تواند نشان‌دهنده‌ی آب در دسترس گیاه باشد. به علاوه این مفهوم به درستی به تغییرهای مدیریتی خاک که سبب تغییر وضعیت ساختمانی خاک می‌شود، پاسخ نمی‌دهد. بنابراین استفاده از مفاهیمی چون آب فراهم خاک، دامنه رطوبتی بدون محدودیت^۲، دامنه رطوبتی با

^۱ Plant Available Water

^۲ Non-Limiting Water Range

حداقل محدودیت^۱ و گنجایش آب انتگرالی^۲ برای تعیین آب قابل استفاده در خاک برای گیاه ضروری است [عسگر زاده و همکاران، ۲۰۱۱؛ عسگر زاده و همکاران، ۲۰۱۰]. وجود انواع مختلف ترکیبات آلی در خاک بر اغلب ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک مؤثر بوده و فرایندهای خاک را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد و یکی از شاخص‌های مهم ارزیابی کیفیت خاک محسوب می‌شود. در واقع ماده آلی عاملی برای تداوم حاصلخیزی خاک و جلوگیری از فرسایش بوده و باعث افزایش گنجایش نگهداشت آب و در نتیجه افزایش میزان مقاومت گیاه در اقلیم‌های گرم و خشک می‌شود [اسپاسینی و همکاران، ۲۰۰۴].

بقایای گیاهی تازه و بیوچار حاصل از آن از جمله مواد آلی بهبود دهنده خاک بوده که دارای اثرهای متعدد بر ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند پایداری ساختمان خاک و گنجایش نگهداشت آب خاک هستند [استینر و همکاران، ۲۰۰۷؛ ابراهیم و همکاران، ۲۰۱۳]. همچنین پژوهش‌ها نشان داده است که مواد آلی می‌تواند اثرات مثبت و منفی رخداد چرخه‌های تر و خشک شدن در خاک بر ویژگی‌های فیزیکی خاک را اصلاح و تعدیل نماید [درستکار و همکاران، ۱۳۹۸].

هر ساله در فصل پاییز تعداد قابل توجهی از درختان فضای سبز شهری دچار خزان شده و بقایای گیاهی فراوانی تولید نموده که می‌تواند به عنوان منبع مهمی از مواد آلی در خاک مورد استفاده قرار گیرد. از سوی دیگر پژوهش‌های اندکی به بررسی هم‌زمان اثر بقایای تازه گیاهی و یا بیوچار حاصل از آن همراه با اثر چرخه‌های تر و خشک شدن بر مفاهیم آب قابل استفاده پرداخته است. بنابراین پژوهش حاضر با هدف بررسی آب قابل استفاده خاک در اثر افزودن بقایای درختان خزان برگ فضای سبز شهری و بیوچار حاصل از آن همراه با اعمال چرخه‌های خشک و مرطوب شدن انجام شده است.

۱-۲- مفاهیم آب قابل استفاده

آب قابل استفاده در خاک نشان دهنده سهولت جذب آب توسط گیاه است [وانگ و هان، ۲۰۱۱]. این ویژگی یکی از پارامترهای کلیدی کیفیت فیزیکی خاک است که بسته به فاکتورهای مؤثر بر رشد

^۱ Least-Limiting Water Range

^۲ Integral Water Capacity

ریشه گیاه و جذب آب، با مفاهیم متعددی از جمله آب فراهم خاک (PAW)، دامنه رطوبتی بدون محدودیت (NLWR)، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (LLWR) و گنجایش آب انتگرالی (IWC) بیان می‌شود [عسگر زاده و همکاران، ۲۰۱۰].

۱-۲-۱- آب فراهم خاک (PAW)

مفهوم آب فراهم خاک برای گیاه یکی از مفاهیم شناخته شده در زمینه آب قابل استفاده در خاک بوده که در گذشته بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این مفهوم اولین بار توسط ویهمایر و هندریکس [۱۹۲۷] ارائه شد و نشان‌دهنده مقدار آب خاک بین گنجایش مزرعه^۱ (FC) و نقطه پژمردگی دائم^۲ (PWP) است. از آنجایی که این مفهوم تنها انرژی آب خاک را در نظر گرفته و به سایر ویژگی‌های فیزیکی خاک که جذب آب و رشد ریشه گیاه را تحت تاثیر قرار می‌دهند توجهی ندارد، استفاده از آن مورد انتقاد قرار گرفته است [ویهمایر و هندریکس، ۱۹۲۷؛ عسگر زاده و همکاران، ۲۰۱۰].

۱-۲-۲- دامنه رطوبتی بدون محدودیت (NLWR)

به منظور رفع محدودیت‌های ناشی از آب فراهم خاک، لتی [۱۹۸۵] مفهوم دامنه رطوبتی بدون محدودیت را به صورت کیفی ارائه نمود. وی دما، پتانسیل ماتریک، مقاومت مکانیکی و تهویه خاک را به عنوان چهار عامل اصلی مؤثر بر رشد ریشه گیاه معرفی نمود. افزایش رطوبت خاک بر تهویه اثر نامطلوب دارد و باعث کاهش مقاومت مکانیکی در خاک می‌شود. بنابراین در دامنه خشک مقاومت مکانیکی خاک و در دامنه مرطوب تهویه خاک باعث کاهش آب قابل استفاده برای گیاه می‌شود. در یک خاک با کیفیت فیزیکی ضعیف، دامنه رطوبتی بدون محدودیت کوچک بوده و برای کشت گیاه نیاز به مدیریت ویژه است [لتی، ۱۹۸۵].

در دامنه رطوبتی بدون محدودیت فرض بر این است که هیچ محدودیت فیزیکی برای رشد گیاه و جذب آب وجود ندارد. در حالی که در واقعیت محدودیت‌های موجود در این دامنه برای جذب آب حداقل

^۱ Field Capacity

^۲ Permanent Wilting Point

بوده و پاسخ گیاه به محدودیت‌های مورد نظر تدریجی است. بنابراین استفاده از این دامنه برای بررسی فراهمی آب خاک چندان بدون اشکال نیست [لتی، ۱۹۸۵؛ داسیلوا و همکاران، ۱۹۹۴].

۱-۲-۳- دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (LLWR)

باتوجه به محدودیت‌های مطرح شده در زمینه استفاده از دامنه رطوبتی بدون محدودیت، داسیلوا و همکاران [۱۹۹۴] ضمن کمی کردن مفهوم این دامنه، واژه دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت را جایگزین این مفهوم نمودند، اما به‌طور کلی این دو دامنه از نظر کمی یکسان می‌باشند. در مفهوم جدید ارائه شده، گیاه با حداقل تنش‌های آبی، تهویه‌ای و مقاومت مکانیکی مواجه است [داسیلوا و همکاران، ۱۹۹۴].

۱-۲-۴- گنجایش آب انتگرالی (IWC)

مفهوم آب قابل استفاده و عامل‌های محدودکننده آن به صورت تدریجی و مطابق با پاسخ تدریجی گیاه به این محدودیت تعریف شده است. به همین منظور مفهوم گنجایش آب انتگرالی به عنوان شاخص جدیدی برای آب قابل استفاده گیاه تعریف شد [گرونولت و همکاران، ۲۰۰۱]. در این مفهوم از یک سری توابع وزنی پیوسته برای هر یک از محدودیت‌های خاک استفاده شده و با ضرب این توابع در گنجایش رطوبتی خاک (شیب منحنی مشخصه رطوبتی)، گنجایش ویژه رطوبتی مؤثر برای هریک از محدودیت‌های مورد نظر به دست می‌آید [عسگرزاده و همکاران، ۲۰۱۰].

۱-۳- عوامل مؤثر بر آب قابل استفاده خاک

آب قابل استفاده در خاک نشان دهنده سهولت جذب آب توسط گیاه و تابع بافت، ساختمان و توزیع اندازه ذرات خاک است [وانگ و هان، ۲۰۱۱]. برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک کنترل‌کننده اصلی مقدار آب قابل استفاده خاک هستند. در این میان، نقش ویژگی‌هایی هم‌چون ساختمان خاک، تخلخل و بافت خاک حائز اهمیت است. اندازه ذرات تشکیل‌دهنده خاک یکی از خصوصیات بسیار مهم فیزیکی است که بر بسیاری از خواص مانند تخلخل، بزرگی و کوچکی منافذ و سطوح جانبی ذرات خاک مؤثر است. اندازه ذرات با دو معیار متداول، شامل توزیع اندازه ذرات و بافت خاک ارزیابی می‌شود [علیزاده، ۱۳۸۸].

ساختمان خاک یکی از ویژگی‌های فیزیکی مهم خاک است که اهمیت آن بیش از ۱۵۰ سال پیش شناخته شده است. تشکیل ساختمان خاک ناشی از برهمکنش پیچیده‌ای از عامل‌های فیزیکی، زیستی و شیمیایی در خاک است [برونیک و ل، ۲۰۰۵]. 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 ویژگی‌های فیزیکی مهمی هستند 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 [برونیک و ل، ۲۰۰۵].

درمورد تأثیر ویژگی‌های ذاتی خاک از جمله ماده آلی، رس و کربنات کلسیم بر پایداری ساختمان خاک پژوهش‌های زیادی انجام گرفته است. ماده آلی در پایداری ساختمان خاک نقش مؤثری دارد. فرایند پایدارسازی خاکدانه‌ها با ماده آلی نه تنها به مقدار و ترکیب شیمیایی بستگی دارد، بلکه بیش از آن به آرایش و چگونگی ارتباط ماده آلی با اجزاء معدنی خاک نیز وابسته است [برونیک و ل، ۲۰۰۵]. بر اساس مدل سلسله مراتبی خاکدانه‌سازی، ابتدا عامل‌های پیونددهنده مانند مواد آلی و کاتیون‌های چند ظرفیتی باعث اتصال ذرات به یکدیگر و تشکیل خاکدانه‌های ریز شده و پس از اتصال این خاکدانه‌ها به یکدیگر، خاکدانه‌های درشت‌تر ایجاد می‌شوند. پیوندهای ایجاد شده در درون خاکدانه‌های ریز نسبت به پیوندهای تشکیل شده بین این خاکدانه‌ها پایدارتر و مستحکم‌تر است [تیس‌دال، ۱۹۸۲].

۴-۱- اثرات انواع مواد آلی بر حدود رطوبتی خاک

وجود انواع مختلف ترکیبات آلی در خاک بر اغلب ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک اثرات چشمگیری دارد. این مواد معمولاً موجب افزایش خاکدانه‌سازی و در نتیجه بهبود ساختمان خاک می‌شوند. میزان کربن آلی و قابلیت دسترسی عناصر غذایی، به عنوان مهمترین فاکتورهای تولید محصولات کشاورزی در خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه خشک محسوب می‌شوند. بنابراین، کشاورزان تلاش دارند تا با استفاده از منابع آلی سبب کاهش محدودیت‌های مذکور و در نتیجه، افزایش عملکرد محصولات زراعی خود شوند. کاربرد کودهای دامی و سایر منابع آلی می‌تواند سبب افزایش حاصل‌خیزی خاک می‌شود. یکی از مشکلات استفاده از این منابع، نشر گازهای گلخانه‌ای حاصل از کودهای دامی است که در سال

های اخیر به عنوان یک چالش زیست محیطی مهم شناخته شده است. تبدیل بیوشیمیایی این مواد به محصولاتی با خطر کم تر مانند بیوچار به عنوان یکی از راهکارهای کاهش نشر گازهای گلخانه‌ای تلقی می‌شود [خادمی جلگه نژاد و همکاران، ۱۳۹۸].

یکی از راهکارهای مورد توجه در سال‌های اخیر برای مدیریت مطلوب وضعیت آب خاک، افزودن اصلاح کننده‌های آلی به خاک از جمله بیوچار می‌باشد. بیوچار ترکیبی با خواص منحصر به فرد است که به ویژه در دهه‌های اخیر برای اصلاح طیف گسترده‌ای از ویژگی‌های نامناسب خاک‌ها به دفعات توسط پژوهش‌گران مختلف استفاده شده است. طبق تعریف، بیوچار زغال جامد و سرشار از کربن تهیه شده از زیست توده‌های گیاهی و ضایعات کشاورزی است که از طریق سوختن آنها در شرایط حضور کم و یا عدم حضور اکسیژن حاصل می‌شود [ربیعی و همکاران، ۱۳۹۲]. در واقع بیوچار یک ماده متخلخل، غنی از کربن، ریز دانه و یک ترکیب محتوای کربن آلی ثابت و مقاوم است که از گرمادهی بقایای آلی مانند ضایعات گیاهی، کودهای دامی و سایر ضایعات تشکیل می‌شود [جفری و همکاران، ۲۰۱۵؛ ورجیهان و همکاران، ۲۰۱۰].

وجه مشترک بیوچار با زغال این است که عمدتاً از اشکال آروماتیک کربن آلی تشکیل یافته و در مقایسه با کربن موجود در مواد اولیه در شرایط مساعد و مناسب مانند آنچه در خاک وجود دارد به راحتی به صورت دی اکسید کربن به اتمسفر بر نمی‌گردد [خادم و همکاران، ۱۳۹۶]. از مزایای استفاده از بیوچار، می‌توان به کاهش پدیده گرمایش زمین از طریق ترسیب کربن اشاره کرد. همچنین بیوچار به عنوان ماده‌ای اصلاحی برای افزایش حاصلخیزی، افزایش pH در خاک‌های اسیدی و افزایش فراوانی جمعیت بیولوژیک خاک به کار می‌رود. چنین تغییراتی روی چرخه عناصر غذایی و ساختمان خاک تاثیر گذاشته و به صورت غیر مستقیم رشد گیاه را بهبود بخشد [دهقانی احمد ابادی و همکاران، ۱۳۹۷]. نقش مثبت بیوچار در ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند افزایش تخلخل [سینگ و آگرا، ۲۰۰۸]، بهبود سطح ویژه، افزایش تهویه [لارید و همکاران، ۲۰۱۰] و افزایش نگهداشت آب، نفوذپذیری و زهکشی خاک [ابراهیم و همکاران، ۲۰۱۳؛ سینگ و آگرا، ۲۰۰۸] در مطالعات متعدد گذشته تصدیق و تایید شده است. افزودن بیوچار به خاک منجر به مزایای زیادی از جمله بهبود کیفیت و سلامت خاک، افزایش عملکرد محصول، بهبود جذب عناصر غذایی توسط گیاهان، افزایش نگهداشت آب خاک، کاهش یا افزایش pH خاک

بسته به شرایط تولید، افزایش گنجایش تبادل کاتیونی و بهبود ساختمان خاک می‌شود [بسلی و همکاران، ۲۰۱۱؛ لهن و ریلیگ، ۲۰۱۱].

در واقع خاک‌ها در سراسر جهان به شدت از کربن به عنوان ماده مغذی تخلیه شده‌اند؛ این موضوع باعث شده است که بسیاری از پژوهشگران به این نتیجه برسند که بهبود کیفیت خاک با افزودن بیوپار به آن باعث افزایش باروری خاک و کاهش مصرف کود می‌شود. ضمن اینکه ممکن است به طور قابل توجهی به مقابله با تغییرات آب و هوایی کمک کند [بسلی و همکاران، ۲۰۱۱].

خصوصیات مطلوب بیوپار باعث شده تا کاربرد آن در خاک برای بهبود گستره‌ای از ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل تخلخل کل، توزیع اندازه ذرات، چگالی خاک، ظرفیت نگهداری آب یا ظرفیت آب موجود و نفوذ یا رسانایی هیدرولیکی مورد توجه قرار گیرد. این در حالی است که مکانیزم‌ها یا فرآیندهایی که بیوپار ممکن است بر توزیع اندازه منافذ خاک تاثیر بگذارد، به وضوح مشخص نشده است. بنابراین انجام پژوهش‌های بیشتر با هدف تبیین روند بهبود خصوصیات خاک در پی افزودن این ترکیب آلی به خاک ضروری است [هاردی و همکاران، ۲۰۱۴].

۱-۵- چرخه‌های خشک و مرطوب شدن خاک

خشک و مرطوب شدن از جمله فرایندهای فیزیکی خاک است که در اغلب زمین‌های زراعی رخ می‌دهد [بوترلی و همکاران، ۲۰۰۶]. از آنجایی که این چرخه‌ها روند خاکدانه‌سازی، تنفس خاک، تغییرات جمعیت میکروبی و چرخه عناصر غذایی خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهند، بنابراین درک چگونگی تاثیر این چرخه‌ها بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک بسیار حائز اهمیت است [لکزیان و همکاران، ۱۳۸۹]. در طبیعت به دلیل توزیع نامنظم بارش‌ها، خاک همواره در معرض فرآیند خشک و مرطوب شدن قرار دارد [دنف و همکاران، ۲۰۰۱]. از سویی، با توجه به اقلیم گرم و خشک ایران و توزیع نامنظم بارندگی در بخش‌های مختلف سال، بروز این چرخه‌ها در سال‌های اخیر افزایش یافته است.

چرخه‌های تر و خشک شدن خاک یکی از فاکتورهای مؤثر بر پایداری ساختمان خاک است. در خاک‌های بدون ساختمان، وقوع چرخه‌های خشک و مرطوب شدن خاک باعث ساختمان‌سازی می‌شود [صفا دوست و همکاران، ۲۰۱۲]. 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 موجب نزدیک شدن ذرات به یکدیگر می‌شود [ژانگ و همکاران، ۲۰۰۵]. از سوی متقابل تر و خشک شدن متوالی با افزایش فشار هوای محبوس و آماس ناهماهنگ خاک طی تر شدن باعث متلاشی شدن ساختمان خاک شده و از سوی دیگر وجود آب منجر به سست شدن پیوندهای بین ذرات می‌شود [صفادوست، ۲۰۱۶].

تجمع انواع مواد آلی در خاک می‌تواند پیامدهای این چرخه‌ها را در خاک تعدیل و اصلاح نماید [دنف و همکاران، ۲۰۰۲]. تشکیل پلی‌ساکاریدها و کربوهیدرات‌های تجزیه‌پذیر به عنوان محصول تجزیه بقایای گیاهی در خاک، به استحکام پیوندهای بین ذرات کمک نموده و پایداری واحدهای ساختمانی خاک در برابر عامل‌های تخریبی را افزایش می‌دهد. پوشش خاکدانه‌ها به وسیله ترکیبات آگریز حاصل از تجزیه بقایا سبب کاهش فروپاشی خاکدانه‌ها در اثر ورود ناگهانی آب می‌شود و بر پایداری ساختمان خاک می‌افزاید. از این رو به نظر می‌رسد وجود مواد آلی تا حدی بتواند از تأثیر مخرب تعداد زیاد چرخه‌های تر و خشک شدن بکاهد [لیوو و بامک، ۲۰۰۵]. به هر حال، چنین اثری بی‌شک به نوع و مقدار مواد آلی خاک و نیز دیگر ویژگی‌های خاک بستگی دارد.

۱-۶- ضرورت پژوهش

کشور ایران در منطقه خشک و نیمه خشک جهان قرار دارد و به دلیل کمبود آب و فقر پوشش گیاهی، خاک‌های کشور از ماده آلی کمی برخوردارند. مقدار کم ماده آلی در خاک منجر به آب فراهم کم برای گیاه و ساختمان ضعیف بسیاری از خاک‌های کشاورزی می‌شود. با توجه به شرایط اقلیمی منطقه شاهرود و استفاده نادرست از بقایای آلی تولیدی، در این پژوهش سعی بر آن است که تأثیر بقایای تازه و بیوچار شاخ و برگ درختان کاج و چنار بر میزان آب قابل استفاده خاک برای گیاه و شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک بررسی گردد تا بتوان راهکار مدیریتی مناسب در این مورد ارائه کرد. لازم به ذکر است که تعداد پژوهش‌های انجام شده درباره پیامدهای کاربرد بیوچار و اثر چرخه‌های تر و خشک شدن بر ویژگی‌های خاک و به ویژه خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک مانند چگالی ظاهری، پایداری

خاکدانه‌ها، منحنی نگهداشت آب و مقدار آب قابل استفاده اندک است؛ بنابراین انجام پژوهش در این رابطه ضروری است.

۷-۱- فرضیات پژوهش

۱. بقایای تازه برگ درختان کاج و چنار با بهبود وضعیت فیزیکی خاک، مقدار آب قابل استفاده خاک برای گیاه را افزایش می‌دهند.
۲. چرخه های تر و خشک شدن باعث بهبود وضعیت ساختمانی و کیفیت فیزیکی خاک می‌شود.
۳. مواد آلی می‌تواند پیامدهای چرخه‌های تر و خشک شدن را در خاک تحت تأثیر قرار دهد.

۸-۱- اهداف پژوهش

۱. بررسی اثر افزودن بقایای تازه و بیوپار برگ درختان کاج و چنار بر ساختمان خاک و مقاومت مکانیکی خاک
۲. بررسی اثر بقایای تازه و بیوپار برگ درختان کاج و چنار بر میزان آب قابل استفاده خاک برای گیاه.
۳. بررسی هم‌زمان اثر چرخه های تر و خشک شدن و کاربرد مواد آلی بر شاخص های پایداری ساختمان خاک و کیفیت فیزیکی خاک.

فصل ۲ مروری بر منابع

۲-۱- مفاهیم آب قابل استفاده در خاک

۲-۱-۱- آب فراهم خاک برای گیاه

طی صد سال گذشته مفاهیم مختلفی برای محاسبه آب قابل استفاده خاک ارائه شده است. آب فراهم خاک برای گیاه که توسط ویشمایر و هندریکسون [۱۹۲۷، ۱۹۳۱، ۱۹۴۹] پیشنهاد شد، اولین مفهومی است که در رابطه با میزان آب قابل استفاده خاک، در علوم کشاورزی به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. در این دیدگاه آب فراهم خاک، کل آب خاک در محدوده گنجایش مزرعه (FC) تا نقطه پژمردگی دائم (PWP) است [ویهمایر و هندریکس، ۱۹۳۱].

$$PAW = FC - PWP = \int_{h_{FC}}^{h_{PWP}} C(h)dh \quad (۱-۲)$$

در این معادله PAW، آب فراهم خاک برای گیاه، FC و PWP حدود بالایی و پایینی آن و $C(h)$ گنجایش ویژه رطوبتی خاک است. یکی از مشکلات استفاده از این مفهوم در نظر گرفتن ظرفیت زراعی به عنوان حد بالایی آب فراهم خاک است. هر آبی که به سختی به ذرات خاک نچسبیده باشد، حتی اگر با سرعت در حال زهکشی باشد، در صورت تماس با ریشه می‌تواند جذب شود. آنچه جذب آب را محدود می‌کند خارج شدن آب از محدوده گسترش ریشه و کمبود اکسیژن در خاک است [کرخام، ۲۰۰۵]. در سال‌های اخیر حد بالایی PAW از مکش ماتریک h_{pa} ۳۳۰ [ویهمایر و هندریکسون، ۱۹۳۱] به h_{pa} ۱۰۰ [داسیلوا و همکاران، ۱۹۹۴]، h_{pa} ۵۰ [وایت، ۱۹۹۷] و حتی h_{pa} ۵ [جوری و همکاران، ۱۹۹۱] تغییر کرده است. این عدم ثبات در حد بالایی PAW یکی از ایرادها برای استفاده عملی از این مفهوم می‌باشد که باعث تغییرات زیادی در مقدار PAW می‌شود.

در محاسبه آب فراهم خاک مکش ماتریک ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر مطابق با حد پایینی PAW در نظر گرفته می‌شود. گاردنر [۱۹۶۰] اظهار داشت این حد باید در مزرعه برای گیاهان مختلف تعیین گردد، زیرا برخی گیاهان پیش از رسیدن به این مکش به حد پژمردگی دائم می‌رسند. سالیس بوری و روز [۱۹۷۸] اظهار کردند برخی از گیاهان می‌توانند آب را در مکش‌های ماتریک خیلی بیشتر از h_{pa} ۱۵۰۰۰ نیز جذب کنند. برای نمونه، بوته کریئوزوت (*Larrea divaricata*) می‌تواند تا مکش ماتریک h_{pa} ۶۰۰۰۰ آب جذب کند اما آب واقعی نگهداشته شده بین ۱۵۰۰۰ و h_{pa} ۶۰۰۰۰ معمولاً مقدار کوچکی است، از این رو

تاثیر کمی بر مقدار PAW دارد. در مدل‌ها (مدل‌های خرد)، نقطه پژمردگی دائم نه تنها به مقدار مکش آب خاک هنگام پژمردگی، بلکه به هدایت هیدرولیکی خاک، قطر ریشه گیاه و میزان تعرق نیز وابسته است [کرخام، ۲۰۰۵].

همچنین در محاسبه آب فراهم خاک فرض می‌شود تمام آب موجود بین گنجایش مزرعه و نقطه پژمردگی دائم به طور یکنواخت برای گیاه قابل دسترس می‌باشد. با وجود سودمند بودن این مفهوم، به منظور رفع کاستی‌های آن، مفاهیم دیگری برای محاسبه آب فراهم استفاده مورد توجه قرار گرفته‌اند [ویهمایر و هندریکس ۱۹۲۷؛ عسگر زاده و همکاران، ۲۰۱۰].

۲-۱-۲- دامنه رطوبتی بدون محدودیت و دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت

در سه دهه اخیر با شناسایی عوامل مختلفی که بر جذب آب توسط گیاه مؤثر هستند، مفاهیم دیگری مانند دامنه رطوبتی بدون محدودیت (NLWR) و دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (LLWR) مطرح شده است. لتی [۱۹۸۵] دامنه رطوبتی بدون محدودیت را تعریف کرد. این مفهوم دامنه‌ای از رطوبت خاک است که در آن محدودیتی برای جذب آب به وسیله گیاه، در اثر زیاد بودن مقاومت مکانیکی و کمبود تهویه ایجاد نمی‌شود. عمل تنفس در ریشه‌ها انرژی لازم برای فعالیت‌های متابولیکی را فراهم می‌کند. در این فرایند اکسیژن مصرف شده و دی‌اکسید کربن آزاد می‌شود. این گازها باید با گازهای اتمسفر تبادل شوند و پخشیدگی مکانیسم اصلی برای این تبادل است. لتی [۱۹۸۵] گزارش داد رشد گیاهان تا زمانی که شدت پخشیدگی اکسیژن^۱ (ODR) اندازه‌گیری شده به وسیله تکنیک الکترو پلاتین، بیشتر از $0.4 \text{ gcm}^{-2}\mu\text{min}^{-1}$ است، کاهش نمی‌یابد اما رشد بیشتر گیاهان در مقادیر (ODR) کمتر از $0.2 \text{ gcm}^{-2}\mu\text{min}^{-1}$ دچار کاهش شدید می‌شوند. پخشیدگی اکسیژن حساس به مقدار آب خاک بوده و در حالت اشباع تقریباً برابر صفر است و با کاهش میزان آب خاک افزایش می‌یابد [وو و همکاران، ۲۰۰۳]. در شرایط بی‌هوازی ریشه‌های گیاهان تولید موادی مانند اتانول و استالدهید می‌کنند که غلظت زیاد آن‌ها

^۱ Oxygen diffusion rate

برای گیاه سمی است. همچنین ترکیباتی مانند S^{-2} ، Fe^{+2} ، Mn^{+2} ، NO_3^{-2} که در شرایط بی‌هوازی تولید می‌شوند برای رشد گیاهان مضر می‌باشد [ویلد، ۱۹۸۸].

کاهش اکسیژن موجب افزایش مقاومت غشاء سیتوپلاسمی در برابر حرکت آب به درون ریشه‌ها می‌شود. معمولاً به جز ریشه گیاهان آبدوست مانند برنج، رشد ریشه اکثر گیاهان پنج دقیقه پس از قطع کامل اکسیژن، متوقف می‌شود. البته در صورت برقراری مجدد جریان اکسیژن پس از مدت کوتاه، رشد ریشه دوباره شروع می‌شود ولی در صورت ادامه شرایط بی‌هوازی رشد ریشه برای همیشه متوقف می‌شود. حد بحرانی تخلخل تهویه‌ای^۱ (AFP) برای رشد ریشه بیشتر گیاهان حدود ۱۰ درصد است [برزگر، ۱۳۸۳؛ ۱۳۸۳ b].

بیشینه توان تحمل خاک در برابر تنش‌های مکانیکی، بدون تغییر شکل و گسیختگی را مقاومت مکانیکی خاک گویند. مقاومت فروروی خاک (Q) یکی از انواع مقاومت‌های مکانیکی خاک است و بیانگر مقاومت خاک در برابر فرو بردن یک جسم میله‌ای شکل به درون آن می‌باشد [سوئن و ون اوورکرک، ۱۹۹۴] که تحت تاثیر بافت، چگالی ظاهری و میزان مواد آلی خاک قرار می‌گیرد [داسیلوا و همکاران، ۱۹۹۴].

هرچه مقاومت مکانیکی خاک در برابر فروروی ریشه افزایش یابد، میزان رشد ریشه کاهش یافته، شکل ریشه‌ها تغییر کرده و فرایندهای مهم در قسمت هوایی گیاه مختل می‌گردد [تو و کی، ۲۰۰۵]. به علت کاهش رشد طولی و گسترش ریشه در اثر مقاومت فروروی زیاد خاک و در نتیجه، کاهش جذب آب و دسترسی به عناصر غذایی، رشد قسمت هوایی گیاه کاهش می‌یابد [هود و همکاران، ۲۰۰۱]. بینگام و بنگوق [۲۰۰۳] ریشه‌های اصلی گندم بهاره را به دو بخش تفکیک کرده، قسمتی را درون خاکی با Q برابر ۰/۳ MPa و قسمتی دیگر را درون خاکی با Q برابر ۱ MPa قرار دادند. چنین مشاهده شد که رشد بخش هوایی گندم در این شرایط نسبت به زمانی که همه ریشه‌ها در درون خاکی با Q برابر ۰/۳ MPa قرار داشت، کاهش یافت [تو و کی، ۲۰۰۵].

^۱ Air-filled porosity

با توجه به کاهش رشد گیاه و جذب آب توسط ریشه گیاه در اثر مقاومت مکانیکی زیاد و کمبود تهویه، لتی [۱۹۸۵] این پارامتر را به عنوان یکی از فاکتورهای مهم در تعیین دامنه رطوبتی بدون محدودیت (NLWR) معرفی نمود. این محدوده در خاک‌های با ساختمان خوب با PAW برابری می‌کند اما در خاک‌های با ساختمان ضعیف و چگالی ظاهری زیاد، نسبت به مقدار PAW کاهش می‌یابد [لتی، ۱۹۸۵]. تاپ و همکاران [۱۹۹۴] در مطالعه خاک‌های مختلف در کانادا مشاهده نمودند که در اکثر موارد مقدار NLWR کمتر از PAW است. وو و همکاران [۲۰۰۳] گزارش کردند خاک‌های با NLWR کمتر نسبت به خاک‌های با NLWR بیشتر، برای کشت نامناسب‌تر هستند؛ زیرا امکان اینکه مقدار آب خاک مزرعه در طول فصل رشد گیاه خارج از این محدوده باشد، بیشتر می‌شود.

داسیلوا و همکاران [۱۹۹۴] برای اولین بار دامنه رطوبتی بدون محدودیت را کمی کردند و چون تغییرات محیطی و عوامل محدودکننده دیگری نیز در این مفهوم برای رشد گیاه وجود دارند، این محدوده را دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت نامیدند. این مفهوم سه فاکتور مؤثر بر رشد گیاه شامل تهویه خاک، مقاومت فروروی و هدایت هیدرولیکی را در یک متغیر جمع نموده و از این رو می‌تواند به عنوان شاخصی از کیفیت ساختمان خاک برای تولید محصول مورد استفاده قرار گیرد.

مفهوم LLWR دامنه‌ای از رطوبت خاک است که رشد گیاه در ارتباط با پتانسیل ماتریک، تهویه و مقاومت مکانیکی خاک با حداقل محدودیت روبرو باشد. داسیلوا و همکاران [۱۹۹۴] حد بالایی LLWR را میزان رطوبت در گنجایش مزرعه (مکش ماتریک برابر 100 hPa) یا تخلخل تهویه‌ای ۱۰ درصد، هر کدام که کمتر باشد و حد پایینی آن را میزان رطوبت نقطه پژمردگی دائم (مکش ماتریک برابر 15000 hPa) یا مقاومت فروروی 2 MPa هر کدام که بیشتر باشد، در نظر گرفتند. بنابراین در شرایطی که تهویه و مقاومت فروروی خاک محدودکننده نباشند، LLWR برابر PAW خواهد شد. با افزایش چگالی ظاهری و ایجاد محدودیت‌های تهویه‌ای و یا مقاومت فروروی خاک مقدار LLWR کمتر از PAW خواهد شد.

داسیلوا و کی [۱۹۹۷] نشان دادند که رشد گیاه در خاک‌های با دامنه باریک‌تر LLWR نسبت به خاک‌های با دامنه وسیع‌تر LLWR، بیشتر در معرض آسیب ناشی از شرایط خشکی (محدودیت مقاومت مکانیکی) یا بارندگی زیاد (محدودیت تهویه) قرار دارند. فیضی دولت آبادی [۱۳۸۹] تاثیر کشت گیاهان گندم و یونجه را در دو بافت لوم شنی و لوم رسی بر مقدار LLWR بررسی کرد. مقدار LLWR در

خاک‌های زیر کشت یونجه نسبت به خاک‌های زیر کشت گندم بیش‌تر بود. صرف نظر از نوع کشت که ساختمان خاک را تحت تاثیر قرار می‌داد، مقادیر زیاد درصد رس در خاک لوم رسی باعث افزایش مقاومت فروری خاک و کاهش مقدار LLWR شد. همچنین داسیلوا و کی [۲۰۰۴] نشان دادند که LLWR می‌تواند به عنوان شاخص کیفیت ساختمان خاک در ارزیابی قابلیت خاک برای رشد گیاه مورد استفاده قرار گیرد. کارلن [۲۰۰۴] نیز LLWR را شاخص بالقوه برای کیفیت خاک نامید.

بتز و همکاران [۱۹۹۸] تاثیر انواع خاک‌ورزی و تردد ماشین‌های کشاورزی بر LLWR را بررسی و مشاهده کردند که حدود بالایی و پایینی LLWR با تغییر چگالی ظاهری خاک تغییر کردند که شاهدهی بر تأثیر ساختمان بر فرایندهای اساسی، تهویه، مقاومت مکانیکی و میزان آب قابل استفاده خاک است که متقابلاً بر محدودیت‌های محیط ریشه اثر می‌گذارند. یو و واندر [۲۰۰۶] بیان نمودند که توزیع اندازه منافذ خاک و LLWR می‌تواند برای پیش‌بینی تأثیر عملیات بی‌خاک‌ورزی^۱ (NT) بر تجزیه یا تجمع مواد آلی در خاک به کار روند، اما LLWR در صورت موجود بودن توابع انتقالی^۲ مربوط به مقاومت مکانیکی و منحنی مشخصه رطوبتی خاک به آسانی قابل محاسبه است.

داسیلوا و همکاران [۱۹۹۴] نتیجه گرفتند که مهم‌ترین بحث در کاربرد LLWR انتخاب حدود در ارتباط با پتانسیل ماتریک، تخلخل تهویه‌ای و مقاومت مکانیکی خاک است. آنها حساسیت LLWR به تغییر حدود بحرانی یکی از این سه محدودیت با ثابت نگهداشتن بقیه را بررسی کردند. برای FC مکش‌های ماتریک ۵۰، ۱۰۰، ۳۳۰ hPa و برای تخلخل تهویه‌ای مقادیر ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ درصد و برای مقاومت فروری مقادیر ۲، ۳، ۴ و ۵ MPa و برای PWP تنها از مکش ماتریک ۱۵۰۰۰ hPa استفاده شد. هرچند تغییر این حدود بالایی و پایینی تأثیر زیادی بر مقدار LLWR محاسبه‌ای داشت اما تأثیر مقادیر بحرانی برای مقاومت فروری بیش‌تر بود. این پژوهشگران بیان کردند که مقادیر این حدود بایستی با توجه به پاسخ گیاه در مزرعه و پیش از ارزیابی LLWR تعیین شود. در این صورت LLWR شاخص خوبی از کیفیت خاک برای تولید محصول خواهد بود. مقادیر مقاومت فروری خاک که توسعه ریشه را در خاک

^۱ No-tillage

^۲ Pedotransfer function

محدود می‌کند در دامنه‌ای بین ۱/۵ تا ۴ MPa گزارش شده و ۲ MPa مقداری است که بیشتر مورد قبول واقع شده است [داسیلوا و همکاران، ۱۹۹۴].

بیوتلر و همکاران [۲۰۰۵] گزارش کردند ارتفاع گیاه سویا در مقاومت فروروی برابر ۱/۴۶ MPa، ماده خشک هوایی در مقاومت فروروی برابر ۰/۳۹ MPa و محصول این گیاه در مقاومت فروروی برابر ۰/۸۵ MPa شروع به کاهش می‌کند. مقاومت فروروی مشخصه‌ای است که در بیشتر خاک‌های متراکم شاخص LLWR را کاهش می‌دهد، بنابراین اندازه‌گیری درست و تعیین مقادیر محدودکننده آن برای رشد گیاه اهمیت زیادی دارد. این مشخصه می‌تواند تحت تأثیر رطوبت، بافت و شرایط ساختمانی خاک قرار گیرد. تمام این عوامل تعیین مقدار بحرانی مقاومت فروروی برای رشد یک گیاه مشخص را دشوار می‌سازد [بیوتلر و همکاران، ۲۰۰۵].

از عوامل مهم در اندازه‌گیری مقاومت فروروی و استفاده از آن برای محاسبه LLWR، ویژگی‌های فروسنج می‌باشد. جونپور و همکاران [۲۰۰۶] استفاده از فروسنج ضربه‌ای را برای اندازه‌گیری مقاومت فروروی در خاک‌های زراعی که به صورت مرسوم شخم‌خورده و سطح خاک رطوبت زیادی داشته باشد، توصیه نکردند زیرا فروسنج تحت وزن خود و بدون ضربه وارد خاک می‌شود. وایتلی و دکستر [۱۹۸۱] نشان دادند که مقدار مقاومت فروروی اندازه‌گیری شده با افزایش قطر فروسنج کاهش می‌یابد. از این رو هنگام گزارش مقدار بحرانی مقاومت فروروی برای یک گیاه مشخص بایستی قطر فروسنج نیز در نظر گرفته شود. هرچند فریتون [۱۹۹۰] بیان کرد که تأثیر قطر و سرعت فروروی فروسنج در مقدار مقاومت فروروی اندازه‌گیری شده کم بوده و تغییر در زاویه مخروط فروسنج و عمق اندازه‌گیری اهمیت بیشتری دارد.

یکی از معایب LLWR این است که مرز مقادیر محدودکننده تخلخل تهویه‌ای، مقاومت مکانیکی، و پتانسیل آب خاک را ناگهانی در نظر می‌گیرد. در حالی که در طبیعت این مرزها به صورت تدریجی تغییر می‌کنند. همچنین تأثیر شوری که موجب کاهش جذب آب توسط ریشه گیاه می‌شود در مفهوم LLWR در نظر گرفته نشده است. برای رفع این کاستی‌ها، مفهوم گنجایش آب انتگرالی (IWC) تعریف شد [گرونولت و همکاران، ۲۰۰۱].

۲-۱-۳- گنجایش آب انتگرالی

برای اعمال واقعیت تدریجی بودن تغییرات رشد گیاه و جذب آب توسط ریشه با تغییر مکش ماتریک، مقاومت مکانیکی، تهویه و کاهش هدایت هیدرولیکی، گرونولت و همکاران [۲۰۰۱] روش نوینی برای محاسبه آب قابل استفاده خاک ارائه دادند. برای این منظور توابع وزنی با توجه به دامنه تغییر محدودیت‌ها، به عنوان ضریب، در مقدار آب لایه خاک ضرب شده و سپس انتگرال گیری برای تعیین کل آب قابل استفاده خاک برای گیاه صورت می‌گیرد (معادله ۲-۲):

$$IWC = \int_0^{\infty} \left[\prod_{i=1}^n \omega_i(h) c(h) \right] dh \quad (2-2)$$

در این معادله $c(h) = |d\theta/dh|$ گنجایش ویژه رطوبتی (مشتق یک تابع منحنی مشخصه رطوبتی خاک) بر حسب hpa^{-1} و $\omega_i(h)$ توابع وزنی برای انواع محدودیت‌های فیزیکی از i تا n ، h مکش ماتریک بر حسب hPa و Π نشان دهنده این است که توابع وزنی ضریب پذیر هستند. تابع گنجایش ویژه رطوبتی، $c(h)$ نشان دهنده شیب منحنی مشخصه رطوبتی خاک است که برای بدست آوردن آن بایستی تابع منحنی مشخصه رطوبتی خاک مشخص باشد. گرونولت و همکاران [۲۰۰۱] از مدل مشهور ونگنوختن (۱۹۸۰) در این روش استفاده کردند.

عسگرزاده و همکاران [۲۰۱۰] پس از بررسی مقدار آب قابل استفاده خاک برای گیاه با استفاده از مفاهیمی مانند PAW، LLWR و IWC به این نتیجه رسیدند که مقدار آب فراهم خاک محاسبه شده با IWC اغلب بیشتر از مقدار LLWR بوده است. این یافته می‌تواند به علت تدریجی بودن اعمال محدودیت‌های در نظر گرفته شده باشد. همچنین آنها به وجود رابطه خطی بین کمیت‌های IWC و LLWR330 یا LLWR100 اشاره نمودند که این رابطه نشان دهنده وجود همبستگی بین IWC و LLWR است.

دومین محدودیت در انتهای خشک آب قابل استفاده، افزایش مقاومت مکانیکی خاک در برابر فروروی ریشه می‌باشد. بر خلاف LLWR این محدودیت در IWC به صورت تدریجی موجب کاهش آب قابل استفاده می‌شود [تیلور و راتلیف، ۱۹۶۹].

یکی از نقاط قوت استفاده از IWC همخوانی آن با قوانین طبیعت و شرایط واقعی است. در واقع در این روش مرز محدودیت‌ها تدریجی در نظر گرفته می‌شود. در این روش می‌توان اثر سایر عوامل محدودکننده جذب آب مانند شوری را به صورت یک تابع وزنی وارد محاسبات کرد [گرونولت و همکاران، ۲۰۰۴]. هیلل [۱۹۸۰] بیان کرد، زمان شروع کاهش میزان تعرق واقعی گیاه از مقدار بهینه، وابسته به برآیند اثر شرایط خاک، گیاه و اقلیم می‌باشد. از این رو هر گونه کوششی برای بررسی جداگانه این عوامل کار بی‌فایده‌ای است. با وجود این می‌توان از مفاهیمی چون LLWR و IWC مستقلاً به عنوان مشخصه‌ای از خاک که در ارتباط با کیفیت فیزیکی خاک است، استفاده نمود و زمانی که جذب یا تعرق گیاه بررسی می‌شود تاثیر عوامل مربوط به گیاه و اقلیم را نیز وارد محاسبات کرد.

۲-۲- عوامل مؤثر بر آب قابل استفاده خاک

به منظور توصیف آب قابل استفاده خاک مفاهیم مختلفی در دهه‌های اخیر ارائه شده‌اند. پایداری ساختمان (خاکدانه) یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی خاک است زیرا بر حرکت و ذخیره آب، تهویه، فرسایش، فعالیت‌های بیولوژیکی خاک و رشد محصولات مؤثر است [وانگ و هان، ۲۰۱۱]. در واقع پایداری خاکدانه بیان کننده مقاومت خاک در برابر عوامل تخریب کننده مانند مرطوب شدن، انرژی جنبشی قطرات باران و کشت و کار است. در نتیجه مقدار خاکدانه‌های تخریب شده تحت تاثیر بزرگی نیروهای مخرب و استحکام نیروهای چسبنده و نگهدارنده‌ی ذرات به یکدیگر است. از دیگر عوامل مؤثر بر آب فراهم خاک می‌توان به کاربرد مواد آلی از جمله بیوپار و چرخه‌های تر و خشک شدن خاک اشاره کرد.

۲-۲-۱- بیوپار

بیوپار در زمینه‌های مختلف در اصلاح و بهبود عملکرد خاک تأثیر دارد. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که افزودن مقدار ۲۰ تن در هکتار بیوپار لجن فاضلاب به یک خاک آهکی با داشتن صرفه اقتصادی، آب قابل استفاده خاک برای گیاه را افزایش و رس قابل پراکنش مکانیکی خاک را کاهش داده، باعث بهبود توزیع اندازه منافذ و کیفیت فیزیکی خاک شده و پایداری ساختمان خاک را بهبود داده است [ابراهیمی، ۱۳۹۲]. گلاسرو و همکاران [۲۰۰۲] گزارش کردند که ظرفیت نگهداری آب در خاک‌های تراپرتا حدود ۱۸ درصد

نسبت به خاک‌های مجاور که فاقد بیوپار بودند، بیشتر بود. ایشان، علت افزایش ظرفیت نگهداری آب در اثر افزودن بیوپار را تخلخل زیاد و سطح ویژه‌ی داخلی بالای آن عنوان کردند [گلاسر و همکاران، ۲۰۰۲].

توزیع اندازه ذرات بیوپار ممکن است در مقیاس بزرگ، اثرات مستقیمی بر ساختمان خاک‌های ریز بافت داشته باشد اما این یک اثر کوتاه مدت است؛ عواملی مثل خشک و مرطوب شدن پی‌درپی قطعات بیوپار، باعث می‌شود که ذرات بیوپار پس از مدتی در اندازه سیلت ظاهر شوند این مطالب نشان می‌دهد که در بلند مدت بیوپار بر فراهمی رطوبت در خاک‌های شنی می‌تواند اثر مثبت داشته باشد [سوهی و همکاران، ۲۰۱۰]. لهن و همکاران [۲۰۱۱] نیز افزایش ظرفیت نگهداشت آب با افزودن بیوپار به یک خاک شنی را مشاهده نمودند. ماده آلی به دلیل ایجاد هسته‌ی مرکزی در تشکیل خاکدانه‌ها، در پایداری و قوام آنها بسیار موثر است. ماده آلی علاوه بر اینکه منابع غذایی مهم را برای رشد گیاهان فراهم می‌سازد، در تشکیل و پایداری ساختمان خاک و نگهداری اکوسیستم خاک نیز دارای اهمیت است، با افزایش ماده آلی خاک، فرسایش‌پذیری خاک کاهش می‌یابد [سلیک و همکاران، ۲۰۰۵]. از طرفی مواد آلی گنجایش نگهداشت آب و هدایت آبی خاک را افزایش می‌دهند. زیرا هوموس قدرت جذب آب زیادی داشته و توان آبرگیری خاک را بهبود می‌بخشد.

کاربرد بیوپار در خاک ممکن است برگنجایش نگهداشت آب در خاک تاثیر گذار باشد. به این صورت که بیوپار می‌تواند منجر به تغییر ویژگی‌های فیزیکی خاک شود که به موجب آن ذرات کوچک زغال و خاکستر منافذ موجود در خاک را پر کرده و سرعت و مقدار آب نفوذی را کاهش می‌دهد. حضور بیوپار در ترکیب خاک می‌تواند موجب تغییر در ساختار، تخلخل و یکنواختی آن به وسیله تغییر در مقدار سطح ویژه، توزیع اندازه ذرات، منافذ و چگالی خاک شود. این عوامل تاثیر مستقیم بر رشد گیاه دارند، زیرا عمق نفوذ و دسترسی آب و هوا در ناحیه ریشه عمدتاً به وسیله ماهیت فیزیکی افق‌های خاک تعیین می‌شود. سطح ویژه بیوپار عموماً بیشتر از شن و قابل مقایسه با رس یا حتی بیشتر است. بنابراین وقتی به عنوان اصلاح کننده به خاک افزوده شود باعث افزایش سطح ویژه خاک می‌شود [لهمان و جوزف، ۲۰۱۵].

توانایی بالای بیوپار در حفظ آب و عناصر غذایی ناشی از ساختار متخلخل و سطح ویژه بالایی آن بوده که همین ویژگی باعث در دسترس بودن آب و مواد غذایی برای گیاه و جلوگیری از هدررفت آب و آبشویی مواد مغذی می‌شود [وانگ و همکاران، ۲۰۰۵؛ تریفونویچ و همکاران، ۲۰۱۸].

یکی از مهم‌ترین پارامترهای فیزیکی خاک که به‌شدت تولید محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهد، آب قابل دسترس گیاه است [اویبا و همکاران، ۲۰۱۶]. برخی بیوچارها به دلیل داشتن سطح ویژه بالا، باعث تغییر در توزیع اندازه ذرات و تخلخل خاک شده و میزان آب قابل دسترس گیاه را افزایش می‌دهند [اندرندلی و همکاران، ۲۰۱۶]. نتایج حاصل از یک بررسی نشان داد که بیوچار تهیه شده از درخت بلوط باعث افزایش قابل ملاحظه آب قابل دسترس گیاه شد [موخرجی و همکاران، ۲۰۱۴].

بورل و همکاران [۲۰۱۶] در بررسی اثر بیوچار تولیدشده از خرده چوب در دمای ۵۲۵ درجه سانتی‌گراد بر وزن مخصوص ظاهری و آب قابل دسترس در سه نوع خاک با بافت‌های لوم‌شنی، سیلتی‌لوم و لوم‌رسی به میزان سه درصد وزنی به خاک، به این نتیجه رسیدند که افزودن بیوچار به خاک‌های مورد مطالعه به ترتیب سبب افزایش ۹/۶، ۴/۲ و ۱/۹ درصدی آب قابل دسترس و سبب کاهش ۱۳/۳، ۱۰/۳ و ۹/۹ درصدی وزن مخصوص ظاهری شده است.

پژوهش کوییدی و همکاران [۲۰۱۵] بر روی اصلاح خاک با بیوچار حاصل از شاخساره‌های درخت نشان داد که افزودن این بیوچار، مقدار آب موجود در خاک را افزایش داده و باعث بالا بردن مقدار آب موجود در حد رطوبتی ظرفیت مزرعه در خاک شد.

اندرنللی و همکاران [۲۰۱۶] در یک آزمایش مزرعه‌ای، به بررسی تأثیر دو نوع بیوچار تولید شده از سبوس در دماهای ۸۰۰ و ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد (۱۴ تن در هکتار) در یک خاک لوم‌رسی‌سیلتی پرداختند و بیان کردند که مصرف بیوچار وزن حقیقی خاک را کاهش می‌دهد. نتیجه مطالعه دیگری نیز که توسط رزاقی و رضایی [۱۳۹۶] در بررسی اثر سطوح مختلف بیوچار (۲۵، ۵۰ و ۷۵ تن در هکتار) بر ویژگی‌های فیزیکی خاک با بافت‌های مختلف انجام شد گویای آن بود که این سطوح، وزن مخصوص حقیقی را به ترتیب ۱۳/۸، ۲۵/۴ و ۳۳ درصد کاهش دادند.

گلاسرو و همکاران [۲۰۰۱] بیان نمودند که افزودن بیوچار به خاک نه تنها سبب تغییر ویژگی‌های شیمیایی خاک ها می‌شود، بلکه بر ویژگی‌های فیزیکی خاک‌ها مانند نگهداشت آب و خاکدانه‌سازی نیز تأثیر می‌گذارد.

یزدان پناهی و همکاران [۱۳۹۸] در بررسی اثر افزودن بیوپار کمپوست زباله شهری بر ویژگی‌های فیزیکی خاک (وزن مخصوص ظاهری، وزن مخصوص حقیقی، رطوبت ظرفیت مزرعه، رطوبت نقطه پژمردگی، آب قابل دسترس، هدایت هیدرولیکی اشباع و دور آبیاری)، نشان دادند که افزودن بیوپارها به خاک تأثیر افزایشی معناداری بر ظرفیت مزرعه، آب قابل دسترس و دور آبیاری و تأثیر کاهشی معنی‌داری بر هدایت هیدرولیکی اشباع، وزن مخصوص ظاهری و حقیقی داشت. به‌طوری‌که با افزودن بیوپارها به خاک ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم، آب قابل دسترس و دور آبیاری هر کدام به ترتیب میانگین افزایش ۱۷/۲، ۱۶/۸، ۱۷/۴ و ۳/۲ درصدی و هدایت هیدرولیکی، وزن مخصوص ظاهری و حقیقی هر کدام به ترتیب میانگین کاهش ۳۹/۴، ۴/۴ و ۱۱/۷ درصدی نسبت به تیمار شاهد داشتند. جفری و همکاران [۲۰۱۵] بیان کردند که بسته به برخی ویژگی‌های مهم خاک، افزودن بیوپار به خاک پیامدهای مثبت معنی‌داری بر خاک و عملکرد محصول داشت. بیشترین تأثیر مثبت با توجه به تجزیه‌های خاک در خاک‌های اسیدی (۱۴٪) و هم‌چنین خاک‌های با pH خنثی (۱۳٪) و در خاک‌های با بافت متوسط (۱۳٪) تا درشت (۱۰٪) دیده شد. این نتایج نشان می‌دهد که مکانیزم‌های اصلی ممکن برای افزایش عملکرد گیاه، افزایش pH و بهبود گنجایش نگهداشت آب خاک همراه با بهبود فراهمی مواد غذایی برای گیاه در نتیجه‌ی افزودن بیوپار می‌باشد.

موضوع جالبی که پس از بررسی و پژوهش‌های محققان توجه آنها را به بیوپار معطوف کرده است این است که بیوپار آثار بسیار متفاوتی بر خاک‌های مختلف و در شرایط متفاوت دارد. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که مناطق خشک و نیمه‌خشک و خاک‌های فقیر از مواد مغذی و تخریب یافته بیشترین تأثیر را از افزودن بیوپار می‌پذیرند. در حالی که استفاده از بیوپار در خاک‌های حاصل خیز و دارای ماده آلی زیاد همیشه منجر به تغییرات مثبت و تولید بیشتر نمی‌شود [بسلی و همکاران، ۲۰۱۱].

۲-۲-۲- چرخه‌های خشک و مرطوب شدن

چرخه‌های تر و خشک شدن در خاک دارای اثرهای مثبت و منفی بر پایداری ساختمان خاک و در نتیجه آب فراهم خاک می‌باشد. با توجه به اقلیم گرم و خشک ایران بروز این چرخه‌ها در سال‌های اخیر افزایش یافته است. چرخه‌های تر و خشک شدن خاک یکی از فاکتورهای مؤثر بر پایداری ساختمان خاک

است. مطالعات گوناگون اثرهای مثبت و منفی این چرخه‌ها در شرایط مختلف را نشان داده‌اند. در طبیعت به دلیل توزیع نامنظم بارش‌ها، خاک همواره در معرض فرآیند خشک و مرطوب شدن قرار دارد [دنف و همکاران، ۲۰۰۱]. نکته مهم در مورد اثرات چرخه‌های تر و خشک شدن بر ویژگی‌های خاک آن است که مواد آلی می‌تواند پیامدهای این چرخه‌ها را در خاک تحت تأثیر قرار دهد [دنف و همکاران، ۲۰۰۱]. تشکیل پلی‌ساکاریدها و کربوهیدرات‌ها تجزیه‌پذیر به عنوان محصول تجزیه بقایای گیاهی در خاک، به استحکام پیوندهای بین ذرات کمک نموده و پایداری واحدهای ساختمانی خاک در برابر عامل‌های تخریبی را افزایش می‌دهد. پوشش خاکدانه‌ها به وسیله ترکیبات آگریز حاصل از تجزیه بقایا سبب کاهش فروپاشی خاکدانه‌ها در اثر ورود ناگهانی آب می‌شود و بر پایداری ساختمان خاک می‌افزاید. از این رو به نظر می‌رسد وجود مواد آلی تا حدی بتواند از اثرات منفی تعداد زیاد چرخه‌های تر و خشک شدن بکاهد [لیوو و همکاران، ۲۰۱۵]. مطالعات گوناگون اثرهای مثبت و منفی این چرخه‌ها در شرایط مختلف را نشان داده‌اند. برخی مطالعات نشان داده که در خاک‌های بدون ساختمان، چرخه‌ها باعث ساختمان‌سازی می‌شود مرطوب‌شدن 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 [ژانگ و همکاران، ۲۰۰۵].

لگزیان و همکاران [۱۳۸۹] با بررسی اثرات چرخه تر و خشک شدن متوالی بر مواد آلی دو نمونه خاک لوم رسی و لوم شنی، چنین نتیجه‌گیری کردند که اعمال چرخه تر و خشک شدن متوالی خاک باعث کاهش مواد آلی خاک می‌شود. از آنجائیکه کاهش مواد آلی در خاک باعث سست شدن پیوندهای بین ذرات خاک می‌شود، آنها نتیجه گرفتند که کاهش مواد آلی خاک باعث کاهش پیوندها بین ذرات خاک شده و مقاومت خاک را کاهش می‌دهد.

سلطانی و رئیسی استبرق [۱۳۹۳] اثر چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی خاک‌های متورم شونده را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی‌های آنها نشان داد که اعمال چرخه‌های رطوبتی تر و خشک شدن متوالی خاک باعث افزایش حجم نمونه‌ها شده و این افزایش حجم در هر چرخه با افزایش تعداد چرخه‌های

تر و خشک شدن، کاهش می‌یابد تا در چرخه پنجم تغییر حجم نمونه‌ها مقداری ثابت پیدا کرده و دیگر تغییر حجمی در نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود.

صفادوست [۱۳۹۴] با اعمال چرخه تر و خشک شدن متوالی بر روی چهار نمونه خاک با درصدهای مختلف رس، پایداری ساختاری خاکدانه‌ها و توزیع منافذ آن را مورد بررسی قرار داد. نتایج این بررسی نشان داد که اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی خاک بر روی نمونه‌هایی که درصد رس آن‌ها بیش‌تر است نسبت به نمونه خاک‌هایی که درصد رس کمتری دارد به صورت واضح‌تر به چشم می‌خورد. ایشان چنین بیان کرد که اعمال چرخه تر و خشک شدن متوالی باعث کاهش مقاومت و پایداری خاکدانه‌ها می‌شود و دلیل آن را ایجاد درز و ترک در نمونه‌ها دانست.

پارسایی و همکاران [۱۳۸۹] با اعمال چرخه تر و خشک شدن متوالی پتانسیل تورم یک نمونه خاک متورم شونده را مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که چرخه‌های متوالی تر و خشک شدن در روندی کلی باعث افزایش پتانسیل تورم خاک می‌شود. افزایش پتانسیل تورم خاک با افزایش تعداد چرخه‌ها روندی کاهشی از خود نشان داد به صورتی که از چرخه پنجم به بعد پتانسیل تورم تقریباً ثابت شده و تغییر چندانی نداشته است.

موسوی و همکاران [۱۳۹۲] تأثیر چرخه‌های تر و خشک شدن را بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی رس تثبیت شده با سیمان و آهک مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که اعمال چرخه‌های رطوبتی بر روی رس‌های تثبیت شده با سیمان و آهک، مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها را کاهش می‌دهد.

مقدس و همکاران [۱۳۹۱] تأثیر چرخه تر و خشک شدن متوالی با آب شور، پتانسیل تورم خاک‌های متورم شونده را با استفاده از دستگاه تحکیم، مورد بررسی قرار دادند. با توجه به این که دستگاه تحکیم معمولی، تنها قادر به اعمال چرخه تر شدن می‌باشد، دستگاه تحکیم را اصلاح کردند به صورتی که قادر به اعمال چرخه‌های خشک شدن نیز باشد. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی با آب شور باعث کاهش پتانسیل تورم خاک شده به صورتی که از چرخه پنجم به بعد، تغییر حجم نمونه‌ها حالتی برگشت پذیر دارند.

نصری و همکاران [۱۳۹۴] اثر تغییرات رطوبتی را بر روی خاک‌های فروریزی مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده از بررسی آن‌ها نشان داد که افزایش رطوبت در این نوع باعث نشست شدید و غیرقابل برگشت در این نوع از خاک‌ها می‌شود.

صالحیان دستجردی و همت [۱۳۹۱] پارامترهای مقاومت برشی خاک مزرعه نیشکر اهواز را تحت اثر چرخه تر و خشک شدن متوالی، مورد بررسی قرار دادند. آنها با اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی بر اساس رطوبت‌های مشابه با آبیاری مزرعه، اثرات تر و خشک شدن متوالی خاک را بر پارامترهای مقاومت برشی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که چرخه تر و خشک شدن متوالی خاک باعث کاهش زاویه اصطکاک داخلی از ۲۲/۱ درجه به ۱۴ درجه شده و همچنین مقدار چسبندگی از ۳۸/۲ به ۳۵ کیلوپاسکال کاهش می‌یابد.

کلارک و اسمتراست [۲۰۱۰] اثرات تغییرات آب و هوایی و تر و خشک شدن‌های متوالی را بر پایداری شیب‌های خاکی در انگلستان را در طول ۱۰ سال متوالی مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان داد که تر و خشک شدن در خاک‌های رسی پتانسیل تورم را افزایش داده و باعث کاهش پایداری شیب‌های خاکی می‌شود. همچنین بیان کردند که در طول تابستان‌ها به دلیل گرم شدن هوا و کاهش نسبی رطوبت موجود در خاک، احتمال تخریب شیب‌های خاکی افزایش می‌یابد.

الداود و همکاران [۲۰۱۴] با اعمال چرخه رطوبتی تر و خشک شدن متوالی بر روی یک نمونه خاک تثبیت شده با آهک، چنین نتیجه گرفتند که وجود آهک در خاک باعث افزایش مقاومت خاک می‌شود و می‌توان از آن به عنوان یک ماده اصلاحی برای کنترل کاهش مقاومت خاک در برابر اعمال چرخه‌های تر و خشک متوالی استفاده کرد.

تریپاتی و همکاران [۲۰۰۲] با اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی بر روی یک نمونه خاک متورم شونده چنین نتیجه گرفتند که اعمال چنین چرخه‌هایی باعث کنترل و کاهش تورم این خاک‌ها می‌شوند. نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان داد که چرخه‌های تر و خشک شدن بعد از ۶ چرخه متوالی تورم خاک به حد ثابتی رسیده و اثرات ناشی از حجم نمونه‌ها در اثر انبساط و انقباض آنها قابل چشم پوشی می‌باشد.

لیو و همکاران [۲۰۱۵] با اعمال چرخه تر و خشک کردن متوالی بر روی یک نمونه خاک رسی با پلاستیسیته پایین چنین نتیجه‌گیری کردند که اعمال چرخه تر و خشک شدن متوالی بر روی چنین خاکی باعث کاهش حجم خلل و فرج خاک شده و رطوبت بهینه خاک را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد.

خلقی فرد و همکاران [۲۰۱۴] با اعمال چرخه تر و خشک شدن متوالی بر روی یک نمونه خاک سیلتی چنین نتیجه گرفتند که اعمال چنین چرخه‌ای باعث کاهش مقاومت برشی خاک شده و پتانسیل تورم خاک را رفته رفته افزایش می‌دهد.

ونگ و هوو [۲۰۱۶] اثر تر و خشک شدن متوالی خاک را بر قطر خاکدانه‌های خاک و پایداری آنها مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده از بررسی آن‌ها نشان داد که اعمال چرخه تر و خشک شدن متوالی در خاک‌هایی که درصد رس آنها زیاد باشد، افزایش قطر خاکدانه‌ها و پایداری آنها را در پی دارد. ما و همکاران [۲۰۱۵] اثر تر و خشک شدن متوالی را بر روی قطر ذرات خاکدانه‌ها و پایداری آنها، مورد بررسی قرار دادند. آنها با انجام این آزمایش چنین نتیجه گرفتند که اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی باعث کاهش قطر خاکدانه‌ها و پایداری آن‌ها می‌شود.

با توجه به بررسی منابع انجام گرفته می‌توان دریافت که مطالعات گسترده‌ای در مورد اثرات تر و خشک شدن متوالی خاک بر روی مشخصه‌های مختلف فیزیکی و مکانیکی خاک، صورت گرفته است. با وجود پژوهش‌های انجام شده در مورد اثر چرخه‌های تر و خشک شدن بر ویژگی‌های فیزیکی خاک، دانسته‌ها در مورد اثر مثبت یا منفی این چرخه‌ها در حضور مواد آلی محدود می‌باشد. این پژوهش با هدف بررسی پیامدهای چرخه‌های خشک و مرطوب شدن بر پایداری ساختمان خاک و آب قابل استفاده در خاک در حضور بیوجار و بقایای برگ درخت کاج و چنار انجام شده است.

فصل ۳ مواد و روش‌ها

۳-۱- نمونه برداری و آماده سازی خاک

در این پژوهش از خاک سیلتی لومی مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود واقع در شهر بسطام در شمال شهرستان شاهرود و از لایه ۳۰-۰ سانتی متری خاک استفاده شد.

نمونه خاک تهیه شده در کیسه‌های پلاستیکی به آزمایشگاه منتقل شد و پس از هوا خشک شدن از الک ۸ میلی متری عبور داده شده و آماده اعمال تیمارها گردید. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه اندازه‌گیری و در جدول (۳-۱) مشاهده می‌شود.

جدول ۳-۱- ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک مورد بررسی

سیلت	رس	شن	کلاس بافت خاک
درصد	درصد	درصد	
۹/۳۲	۳۲	۸	سیلتی لومی

۳-۱-۱- بافت خاک

برای تعیین بافت خاک به روش پیپت، ۵۰ گرم خاک کوچکتر از ۲ میلی‌متر، پس از حذف مواد آلی و پراکنده سازی ذرات در استوانه ۱۰۰۰ میلی‌لیتری ترسیب قرار گرفت و در فواصل زمانی تعیین شده بر اساس قانون استوک، به کمک پیپت نمونه‌برداری انجام شد و در نهایت درصد رس، سیلت و شن در نمونه‌ها تعیین گردید [حفاظت خاک، ۱۹۸۴].

۳-۱-۲- pH و EC خاک

ابتدا گل اشباع به روش استاندارد تهیه شد؛ سپس pH عصاره اشباع توسط دستگاه pH متر (متر اهم مدل ۹۶۹) و EC توسط دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی (متر اهم مدل ۷۲۰) اندازه‌گیری شد [نلسون و سامرز، ۱۹۸۲].

۳-۲- تهیه بقایای گیاهی و بیوچار

بقایای گیاهی مورد استفاده در این پژوهش از برگریزان پاییزی درختان کاج و چنار موجود در فضای سبز شهرستان شاهرود تهیه شد (شکل ۳-۱). ابتدا برگ درختان کاج از فضای سبز و معابر شهری جمع آوری و پس از هواخشک شدن و آسیاب کردن، از الک ۲ میلی متر برای تهیه بقایای تازه و ساختن بیوچار عبور داده شد.



شکل ۳-۱- تصویری از بقایای برگ درخت چنار و کاج

برای تهیه بیوچار بقایای گیاهی تهیه شده به شرکت نوآوران زیست بنیان آویسا ارسال و بیوچار به کمک فرآیند پیرولیز در دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۲۰ دقیقه تهیه شد (شکل ۳-۲).

۳-۲-۱- کربن آلی مواد اصلاح کننده

برای اندازه گیری کربن آلی بقایا و بیوچار از روش احتراق خشک استفاده شد؛ در این روش با احتراق نمونه، ماده آلی تجزیه شده که با کاهش جرم برآوردی از مقدار کربن آلی بدست می آید [شوماخر، ۲۰۰۲].



شکل ۳-۲- تصویری از بیوچار و بقایای گیاهی

۳-۳- آماده‌سازی تیمارهای آزمایشی

نمونه‌های خاک هوا خشک شده از الک ۸ میلی متری عبور داده شد. برای تهیه تیمارهای دارای مواد آلی، بقایای گیاهی و بیوچار به میزان ۲/۵ درصد بر اساس وزن خشک به خاک‌ها افزوده شد. سپس با افزودن آب در تیمارهای ۲، ۴، ۸ چرخه و تیمار دائما مرطوب، رطوبت در نمونه‌ها به حد ۰/۹ ظرفیت مزرعه رسید. سپس خاک مورد نیاز در هر تیمار به سیلندرهای پلاستیکی با قطر ۴ و ارتفاع ۳ سانتی متر با وزن مخصوص ظاهری ۱/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب انتقال یافت. برای هر تیمار در هر تکرار ۷ سیلندر به منظور اندازه‌گیری منحنی مشخصه رطوبتی، منحنی مقاومت خاک و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در نظر گرفته شد.

به منظور بررسی اثر چرخه‌های تر و خشک شدن، ۵ تیمار چرخه تر و خشک شدن شامل صفر (دائما خشک)، ۲، ۴ و ۸ چرخه و یک تیمار دائما مرطوب بر نمونه‌های خاک اعمال شد. برای اعمال چرخه‌ها کل دوره انکوباسیون به مدت دو ماه در نظر گرفته شد. نحوه اعمال چرخه‌ها به این صورت بود که تیمار چرخه شاهد بدون هیچ‌گونه آبیاری، تیمار دو چرخه ۲ دفعه، تیمار چهار چرخه شامل ۴ بار آبیاری و تیمار هشت چرخه ۸ بار آبیاری و تیمار دائما مرطوب در ۱۶ بار آبیاری در بازه زمانی دو ماه صورت گرفت.

۳-۴- اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک در تیمارهای مورد بررسی

پس از اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به شرح زیر اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری رس قابل‌پراکنش، کربن‌آلی، میانگین وزنی اندازه ذرات (MWD)، نمونه‌های خاک از داخل سیلندرهای خارج شدند. برای اندازه‌گیری منحنی مشخصه رطوبتی و منحنی مشخصه مقاومت فروروی از نمونه‌های دست نخورده درون سیلندرهای استفاده شد.

۳-۴-۱- اندازه‌گیری رس قابل پراکنش خاک در آب

برای اندازه‌گیری رس قابل پراکنش در آب^۱ (WDC)، نمونه‌های خاک از سیلندرهای خارج شده، خاکدانه‌ها به آرامی با دست از یکدیگر جدا شده و بدون کوبیدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. رس قابل پراکنش خاک به روش بورت و همکاران [۱۹۹۳] اندازه‌گیری شد. به این منظور ۴ گرم خاک خشک به لوله‌های فالكون ۵۰ میلی‌لیتری انتقال یافته و ۳۰ میلی‌لیتر آب مقطر به آن‌ها افزوده شد. نمونه‌ها به مدت ۱ ساعت با سرعت ۹۰ دور در دقیقه تکان داده شد. سپس لوله‌ها به مدت دو ساعت به حالت سکون روی میز قرار داده شد و میزان رس پراکنده‌شده بر اساس قانون استوکس و با استفاده از پیپت ریز^۲ اندازه‌گیری شد. بعد از گذشت زمان مورد نظر ۵ میلی‌لیتر از سوسپانسیون در عمق ۲/۵ سانتی‌متر برداشت شد و در آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد و مقدار رس قابل پراکنش آب بر اساس رس کل خاک بیان گردید (شکل ۳-۳).

^۱ Water-dispersible clay

^۲ Micropipette



شکل ۳-۳- اندازه گیری رس قابل پراکنش

۳-۴-۲- میانگین وزنی قطر ذرات خاکدانه‌ها

برای انجام این آزمایش ۵۰ گرم خاک از الک ۸ میلی‌متری عبور داده شد و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش الک تر اندازه‌گیری شد (شکل ۳-۴).



شکل ۳-۴- نمایی از دستگاه اندازه‌گیری MWD (میانگین وزنی قطر ذرات خاکدانه)

خاک بر روی سری الک‌ها با اندازه ۴، ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۱۲۵، ۰/۰۵ میلی‌متر قرار داده شد. الک‌ها با سرعت ۳۰ دور در دقیقه و دامنه نوسان ۱/۳ سانتی‌متر به مدت ۱۰ دقیقه در آب تکان داده شده و

سپس محتویات هر الک پس از خشک شدن توزین و با در نظرگیری مقدار شن در هربخش میانگین وزنی خاکدانه‌ها (MWD) از رابطه ۳-۱ محاسبه گردید [کمپر و رزنو، ۱۹۸۶].

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n X_i W_i}{W_T} \quad (۳-۱)$$

در این رابطه X_i میانگین قطر خاکدانه‌ها روی هر الک، W_i جرم خاکدانه‌های روی هر الک و W_T جرم کل خاکدانه‌ها است.

۳-۴-۳- اندازه‌گیری کربن آلی خاک

برای اندازه‌گیری کربن آلی از روش سوزاندن تر استفاده شد. در این روش ماده آلی در مجاورت اسید سولفوریک با بی کرومات پتاسیم اکسید گردید. باقیمانده بی کرومات پتاسیم از طریق تیتراسیون با فروآمونیم سولفات در مجاورت معرف ارتوفنانترولین اندازه‌گیری شد [والکلی و بلک، ۱۹۳۴].

۳-۴-۴- اندازه‌گیری منحنی مشخصه رطوبتی

برای اندازه‌گیری منحنی مشخصه رطوبتی، نمونه‌های خاک تهیه‌شده درون سیلندرها به آهستگی طی ۲۴ ساعت از زیر اشباع شدند. سپس مقدار رطوبت در مکش‌های ماتریک ۰، ۵، ۲۰، ۵۰، ۷۰، ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر به کمک ستون آویزان آب و دستگاه صفحه فشاری اندازه‌گیری شد. زمان لازم برای تعادل آبی نمونه‌ها بسته به تیمار و مکش اعمالی از چند روز تا چند هفته متغیر بود (شکل ۳-۵).



شکل ۳-۵- نمایش از دستگاه صفحات فشاری

در پایان، مقادیر رطوبت وزنی هر نمونه در مکش‌های ماتریک مختلف بدست آمد. مدل سازی منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک به کمک مدل ون گنوختن-معلم و به کمک ابزار Excel Solver صورت گرفت [پیرسون و مولا، ۱۹۸۹].

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)[1 + (ah)^n]^{(\frac{1}{n}-1)} \quad (۲-۳)$$

در این معادله θ رطوبت حجمی خاک ($\text{cm}^{-3}\text{cm}^{-3}$)، θ_s و θ_r به ترتیب رطوبت باقیمانده و اشباع خاک ($\text{cm}^{-3}\text{cm}^{-3}$)، h مکش ماتریک (cm)، a پارامتر مرتبط با عکس مکش ورود هوا (cm^{-1})، n پارامتر مرتبط با توزیع اندازه منافذ است [پیرسون و مولا، ۱۹۸۹].

۳-۵- اندازه گیری و مدل سازی منحنی مشخصه مقاومت مکانیکی

خاک

برای اندازه‌گیری مقاومت فروروی خاک از ۴ استوانه دست نخورده در هر تیمار استفاده شد. این ویژگی در مکش‌های ماتریک ۱۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی متر به کمک ریز فروسنج مخروطی با قطر مخروط ۲ میلی‌متری با سرعت فروروی ۱ میلی‌متر در دقیقه اندازه‌گیری شد. پس از

یکنواخت شدن توزیع رطوبت در نمونه‌های خاک، نیروی فروری با فواصل عمقی ۱ میلی‌متری از سطح خاک تا عمق ۲۵ میلی‌متری نمونه‌های خاک قرائت شد. مقاومت فروری خاک با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد [داسیلوا و همکاران، ۱۹۹۴].

$$Q = \frac{F \text{ average}}{A} \quad (3-3)$$

$$F_{av} = \sqrt[n]{F_1 F_2 \dots F_n} \quad (4-3)$$

$$A = \pi r l \quad (5-3)$$

که در این معادله Q مقاومت فروری بر حسب مگاپاسکال، $F \text{ average}$ نیروی فروری بر حسب نیوتن (میانگین هندسی نیروهای فروری از عمق ۵ الی ۲۵ میلی‌متر)، A سطح مقطع جانبی مخروط بر حسب میلی‌متر مربع، اندیس r شعاع مخروط بر حسب میلی‌متر و l وتر مخروط بر حسب میلی‌متر است [داسیلوا و همکاران، ۱۹۹۴]. مدل‌سازی منحنی مشخصه مقاومت فروری خاک به کمک مدل توانی ساده و به کمک ابزار Excel Solver صورت گرفت:

$$Q(h) = ah^b \quad (6-3)$$

در این رابطه h مکش ماتریک و a و b پارامترهای برازش مدل می‌باشد.

در نهایت به کمک مدل‌های برازش یافته بر داده‌های آزمایشگاهی، کمیت‌های LLWR، PAW و IWC محاسبه شده و با یکدیگر مقایسه شد.

۳-۶- محاسبه آب قابل استفاده خاک برای گیاه

۳-۶-۱- آب فراهم خاک (PAW)

محاسبه آب فراهم خاک به روش ویهمایر و هندریکسن [۱۹۲۷] انجام شد:

$$PAW = FC - PWP = \int_{h_{FC}}^{h_{PWP}} C(h)dh \quad (7-3)$$

مشتق معادله ۳-۱ برای ایجاد $C(h)$ به صورت زیر است:

$$c(h) = (\theta_s - \theta_r)(n-1)h^{-1}(ah)^n [1 + (ah)^n]^{\frac{1-2n}{n}} \quad (8-3)$$

در این معادله PAW آب قابل استفاده گیاه، FC و PWP حدود بالایی و پائینی این دامنه و $C(h)$ گنجایش ویژه رطوبتی خاک می‌باشند. از آنجایی که توافق در مورد حد بالایی آب فراهم خاک وجود ندارد، مقدار رطوبت در ظرفیت زراعی، معادل دو مکش ۱۰۰ و ۳۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده و آب فراهم خاک به دو صورت PAW₁₀₀ و PAW₃₃₀ ارائه شده است. حد پائینی این دامنه رطوبت در مکش ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر (مکش در نقطه پژمردگی دائم، h_{PWP}) در نظر گرفته شد.

۳-۶-۲- دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (LLWR)

برای محاسبه دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (LLWR₁₀₀ و LLWR₃₃₀) از رابطه زیر استفاده شد [داسیلوا و همکاران، ۱۹۹۴]:

$$LLWR = UL - LL = \int_{h_{UL}}^{h_{LL}} C(h)dh \quad (9-3)$$

به منظور تعیین حد بالایی (UL) در این مفهوم از گنجایش زراعی (مکش ۱۰۰ یا ۳۳۰ سانتی‌متر) و یا رطوبت نظیر تخلخل تهویه‌ای ۱۰ درصد، هر کدام کمتر باشند، استفاده شد. برای تعیین حد پائینی (LL) نیز از نقطه پژمردگی دائم و یا رطوبت نظیر مقاومت مکانیکی خاک برابر با ۲ مگاپاسکال، هر کدام بیش‌تر بود، استفاده شد [داسیلوا و همکاران، ۱۹۹۴].

۳-۶-۳- گنجایش آب انتگرالی (IWC)

برای محاسبه گنجایش آب انتگرالی از روش گرونولت و همکاران [۲۰۰۱] استفاده شد:

$$IWC = \int_0^{\infty} \left(\prod_{i=1}^n \omega_i(h) \right) C(h) dh \quad (10-3)$$

در این رابطه IWC گنجایش آب انتگرالی (سانتی متر مکعب بر سانتی متر مکعب)، $\omega_i(h)$ تابع وزنی مربوط به محدودیت‌های در نظر گرفته شده و $C(h)$ گنجایش ویژه رطوبتی خاک ($-d\theta/dh$) بر حسب cm^{-1} ، برابر شیب منحنی مشخصه رطوبتی خاک می‌باشند. محدودیت‌های در نظر گرفته شده شامل زهکشی¹، سریع و تهویه ضعیف در دامنه مرطوب و هدایت هیدرولیکی کم و مقاومت مکانیکی زیاد در دامنه خشک بوده است [گرونولت و همکاران، ۲۰۰۴؛ گرونولت و همکاران، ۲۰۰۱].

با ضرب تابع گنجایش ویژه رطوبتی، $C(h)$ ، در توابع وزنی، $\omega_i(h)$ ، تابع گنجایش ویژه رطوبتی مؤثر، $E_i(h)$ ، به صورت زیر ایجاد می‌شود [گرونولت و همکاران، ۲۰۰۱]:

$$E_i(h) = \omega_i(h) C(h) \quad (11-3)$$

مقدار توابع وزنی، $\omega_i(h)$ ، که ممکن است به صورت خطی یا غیرخطی با مکش ماتریک تغییر کند، در دامنه صفر (محدودیت کامل) تا ۱ (بدون محدودیت) قرار می‌گیرد [گرونولت و همکاران، ۲۰۰۱].

برای خاک‌های غیر منبسط شونده، هدایت هیدرولیکی خاک در حالت اشباع به اندازه‌ای زیاد است که نیروی ثقل، آبی را که در منافذ درشت قرار دارد به سرعت خارج می‌کند؛ در این شرایط مقدار تابع وزنی برابر صفر بوده و هیچ آبی قابل جذب نیست. با خروج آب و افزایش مکش ماتریک هدایت هیدرولیکی خاک کاهش می‌یابد. در این حالت مقدار تابع وزنی به تدریج از صفر بزرگ‌تر می‌شود و در صورت عدم وجود محدودیت دیگر (تهویه)، قسمتی از آب، قابل استفاده گیاه خواهد بود. خروج بیشتر آب از خاک باعث کاهش بیشتر هدایت هیدرولیکی و به تبع آن افزایش بیشتر مقدار تابع وزنی مرتبط با آن و در نتیجه آب قابل استفاده می‌شود. با رسیدن مکش ماتریک به ۳۳۰ cm (مکش پیشنهادی [گرونولت و همکاران، ۲۰۰۱]) مقدار تابع وزنی برابر ۱ می‌شود؛ یعنی هیچ محدودیتی از جهت هدایت هیدرولیکی زیاد (خروج آب ثقلی) برای جذب آب وجود ندارد و در صورت عدم وجود محدودیت دیگر، تمامی آبی که در این مکش

و بیشتر از آن وجود دارد قابل استفاده گیاه می‌باشد. بنابراین تابع وزنی هدایت هیدرولیکی زیاد $\omega_k(h)$ ، که به وسیله گرونولت و همکاران [۲۰۰۱] پیشنهاد شده است به صورت زیر است:

$$\omega_k(h) = \left[\frac{k_{r(330)}}{k_r(h)} \right]^p \quad (۱۲-۳)$$

در این معادله ضریب p به صورت فرضی برابر $۰/۰۸$ در نظر گرفته شده است که برای تعیین دقیق آن نیاز به آزمایش‌های بیشتری است. $k_{r(330)}$ هدایت هیدرولیکی نسبی در h برابر ۳۳۰ cm و $k_r(h)$ هدایت هیدرولیکی نسبی وابسته به مکش ماتریک خاک است که می‌تواند به وسیله مدل ونگنوختن-معلم به صورت زیر محاسبه شود:

$$K_r(h) = \frac{[1 - (ah)^{n-1}][1 + (ah)^n]^{[1-\frac{1}{n}]}}{[1 + (ah)^n]^{[\frac{n-1}{2n}]}} \quad (۱۳-۳)$$

گنجایش ویژه رطوبتی مؤثر هدایت هیدرولیکی، $E_k(h)$ ، از رابطه زیر به دست می‌آید [گرونولت و همکاران، ۲۰۰۱]:

$$E_k(h) = \omega_k(h) C(h) \quad (۱۴-۳)$$

دومین محدودیت در انتهای مرطوب آب قابل استفاده تهویه ناکافی می‌باشد. در مفهوم LLWR مرز بین جذب و عدم جذب آب تخلخل تهویه‌ای ۱۰ درصد در نظر گرفته شد. پنفلد [۱۹۹۹] گزارش کرد که رشد ریشه نهال کاج در محدوده‌ای از بافت‌های مختلف خاک در AFP کمتر از ۵ درصد متوقف شد و در ۱۶ درصد به بیشترین مقدار خود رسید که نشان دهنده تدریجی بودن تغییرات جذب آب در اثر کاهش AFP می‌باشد. گرونولت و همکاران [۲۰۰۱] فرض کردند، تا AFP برابر ۱۰ درصد هیچ آبی جذب گیاه نمی‌شود. از این رو تابع وزنی تخلخل تهویه‌ای، $\omega_a(h)$ برابر صفر است و هیچ آبی جذب گیاه نمی‌شود. با افزایش AFP به بیش از ۱۰ درصد، $\omega_a(h)$ از صفر بزرگ‌تر شده و در AFP برابر ۱۵ درصد به ۱ می‌رسد و پس از آن هیچ محدودیتی از جهت تهویه برای جذب آب وجود ندارد. آنها معادله‌ای به شکل زیر (که تابع لگاریتمی از مکش ماتریک است) را برای محاسبه $\omega_a(h)$ پیشنهاد کردند:

$$\omega_a(h) = A \log\left[\frac{h}{h_0}\right] \quad (15-3)$$

که در این رابطه h مکش ماتریک، h_0 مکش ماتریک در تخلخل تهویه‌ای ۱۰ درصد است و A از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$A = \frac{1}{\log\left[\frac{h_f}{h_0}\right]} \quad (16-3)$$

که در این رابطه h_f مکش ماتریک در تخلخل تهویه‌ای ۱۵ درصد می‌باشد. گنجایش ویژه رطوبتی مؤثر تخلخل تهویه‌ای، $E_a(h)$ از رابطه زیر به دست می‌آید [گرونولت و همکاران، ۲۰۰۱]:

$$E_a(h) = \omega_a(h)C(h) \quad (17-33)$$

در صورتی که دو محدودیت یاد شده در دامنه مرطوب همزمان وجود داشته باشند، بر اساس ضرب پذیری توابع، گنجایش ویژه رطوبتی مؤثر، حاصل ضرب توابع وزنی مربوط به هدایت هیدرولیکی زیاد و تخلخل تهویه‌ای کم در گنجایش ویژه رطوبتی می‌باشد:

$$E_{ka}(h) = \omega_k(h) \omega_a(h)C(h) \quad (18-3)$$

برای انتهای خشک محدوده آب قابل استفاده نیز حداقل دو محدودیت وجود دارد که باعث کاهش یا عدم جذب آب توسط گیاه می‌شود. اولین محدودیت کاهش هدایت هیدرولیکی خاک است. این محدودیت در LLWR در نظر گرفته نمی‌شود. با افزایش مکش ماتریک خاک، هدایت هیدرولیکی به حدی کاهش می‌یابد که به تدریج میزان آب انتقال یافته به سمت ریشه، نیاز گیاه را برآورده نمی‌سازد. گرونولت و همکاران [۲۰۰۱] با بررسی رابطه بین هدایت هیدرولیکی نسبی و مکش ماتریک خاک نشان دادند که هیچ تغییر ویژه‌ای در مکش ماتریک ۱۵۰۰ cm برای $K_r(h)$ رخ نمی‌دهد و $K_r(h)$ به صورت لگاریتمی با افزایش h کاهش می‌یابد.

گرونولت و همکاران [۲۰۰۱] از رابطه توانی زیر برای ایجاد تابع پیوسته بین $K_r(h)$ و h استفاده کرد:

$$K_r(h) = ch^d \quad (19-2)$$

در این رابطه d نشان دهنده شدت کاهش $K_r(h)$ با افزایش h است که می‌تواند به عنوان یک ثابت در تابع وزنی مورد استفاده قرار گیرد. گرونولت و همکاران [۲۰۰۱] شروع محدودیت ناشی از کاهش هدایت هیدرولیکی را مکش ماتریک 12000 cm در نظر گرفتند. در این صورت تابع وزنی، هدایت هیدرولیکی برای انتهای خشک، ω_{Kdry} ، از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\omega_{Kdry} = \left[\frac{12000}{h} \right]^{-d} \quad (20-3)$$

که مقدار d از رابطه $3-18$ به دست می‌آید. در نهایت گنجایش ویژه رطوبتی مؤثر از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{Kdry}(h) = \omega_{Kdry}(h) C(h) \quad (21-3)$$

زمانی که مکش ماتریک برابر 12000 cm باشد، $\omega_{Kdry}(h)$ برابر ۱ است و هر چه قدر مکش ماتریک از 12000 cm بزرگ‌تر شود، $\omega_{Kdry}(h)$ از ۱ کوچک‌تر می‌شود. هرچند $\omega_{Kdry}(h)$ در مکش ماتریک 15000 hcm به صفر نمی‌رسد اما به دلیل کمبود مقدار آب و آبدهی خاک در مکش‌های ماتریک بیشتر از 15000 cm ، محاسبات تا این مکش انجام می‌شود.

بر اساس یافته‌های تیلور و همکاران [۱۹۶۶] محدودیت فروروی ریشه از مقاومت 0.5 مگاپاسکال شروع می‌شود و در مقاومت $2/5$ مگاپاسکال محدودیت کامل ایجاد می‌شود. وقتی شرایط فروروی ریشه بهینه نیست لزوماً آب برای گیاه غیر قابل استفاده نیست اما وقتی محدودیت فروروی ریشه شدید می‌شود، دسترسی به آب خاک کاهش می‌یابد. با توجه به این نکته، برای ارائه تابع وزنی، گرونولت و همکاران [۲۰۰۱] فرض کردند محدودیت جذب آب در مقاومت $1/5$ مگاپاسکال شروع می‌شود و در مقاومت $2/5$ مگاپاسکال محدودیت کامل ایجاد می‌شود. در این صورت تابع وزنی مقاومت مکانیکی، $\omega_R(h)$ ، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\omega_R(h) = 2.5 - (ah^b) \quad (22-3)$$

برای محاسبه گنجایش ویژه رطوبتی مؤثر از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$E_R(h) = \omega_R(h)c(h) \quad (23-3)$$

برای دامنه‌ای از مکش ماتریک که محدودیت کاهش هدایت هیدرولیکی و فروروی ریشه همزمان وجود دارد، گنجایش ویژه رطوبتی مؤثر، E_{RKdry} ، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{kdry}(h) = \omega_{kdry}(h) C(h) \quad (24-3)$$

حال با داشتن توابع وزنی محدودیت‌های مختلف و گنجایش ویژه رطوبتی مؤثر کلی، به کمک معادله IWC (۱۰-۳) محاسبه می‌شود.

پژوهش حاضر به صورت آزمون فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور مستقل چرخه‌های خشک و مرطوب شدن در پنج سطح (صفر، ۲، ۴ و ۸ چرخه و دائماً مرطوب) و مواد آلی در سه سطح صفر (شاهد)، ۲/۵ درصد بیوچار و ۲/۵ درصد بقایای گیاهی در مجموع با ۱۵ تیمار و سه تکرار انجام شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم افزار STATISTIX 8 انجام گرفت. در صورت معنی‌دار بودن اثر تیمارها، مقایسه میانگین با استفاده از آزمون LSD در سطح ۵٪ انجام گرفت و در نهایت، نمودارها با استفاده از نرم افزار Excel رسم گردید.

فصل ۴ نتایج و بحث

۱-۴- ویژگی‌های بیوچار مورد استفاده

برای درک بهتر تغییرات انجام‌شده در بقایای گیاهی در زمان تبدیل شدن به بیوچار، در جدول ۴-۱ برخی از مهم‌ترین ویژگی‌های بقایای گیاهی و بیوچار تهیه شده از آن ارائه شده است.

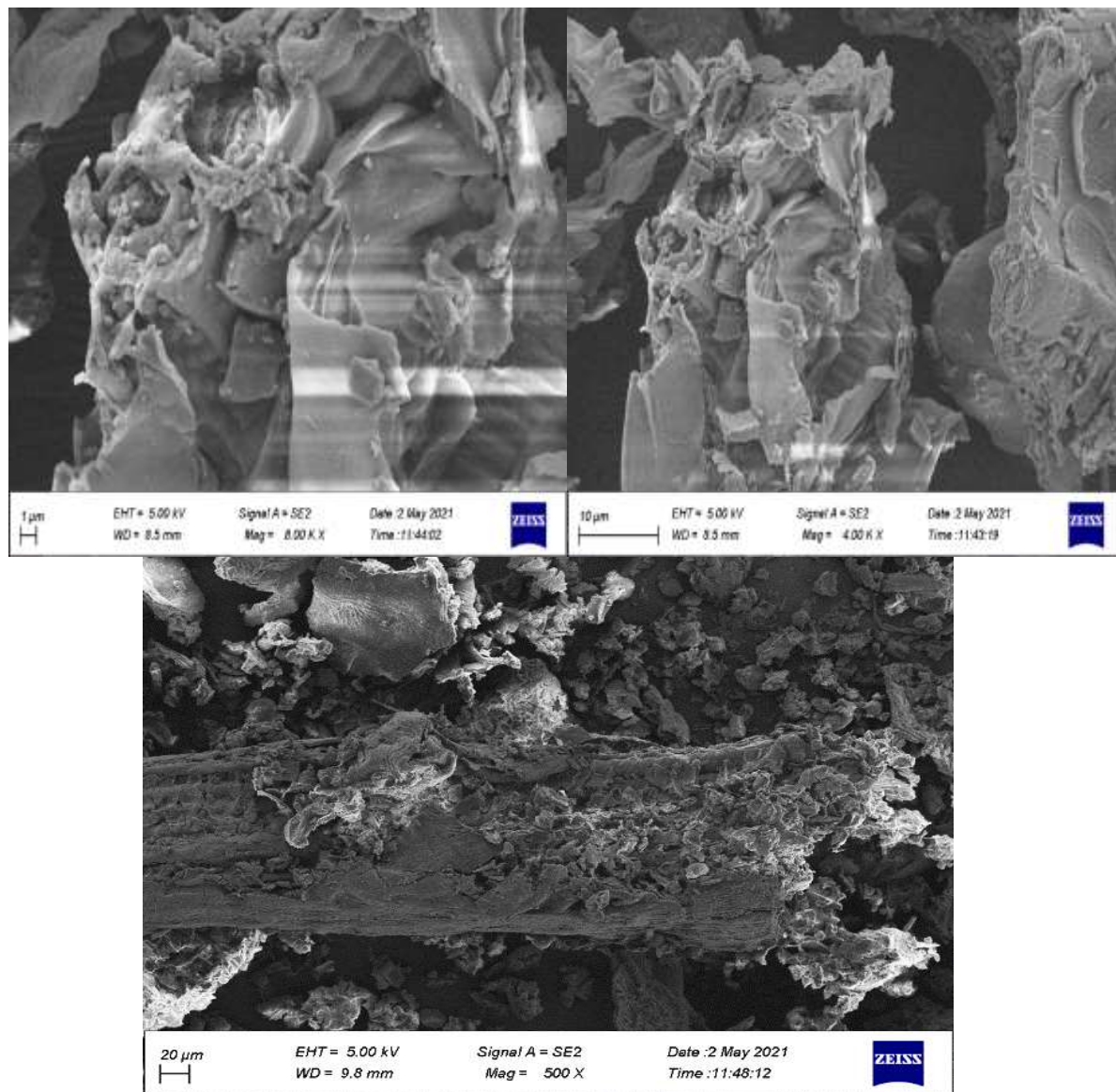
جدول ۴-۱- ویژگی‌های شیمیایی بیوچار و بقایای گیاهی

ماده آلی (%)	هدایت الکتریکی (dS/m)	پ‌هاش	نمونه
۸۸٪	۵/۵۲	۵/۷۲	بقایای گیاهی
۶۸٪	۵/۶۰	۹/۰۰	بیوچار

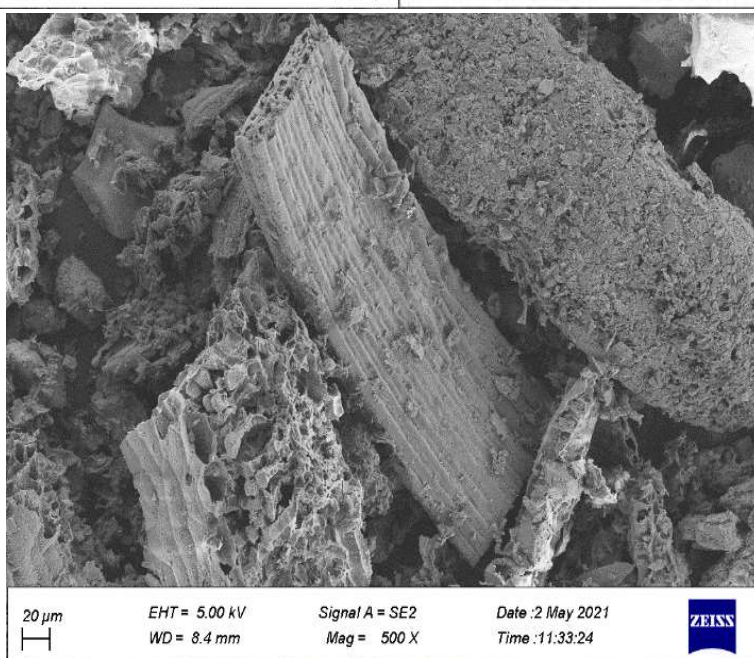
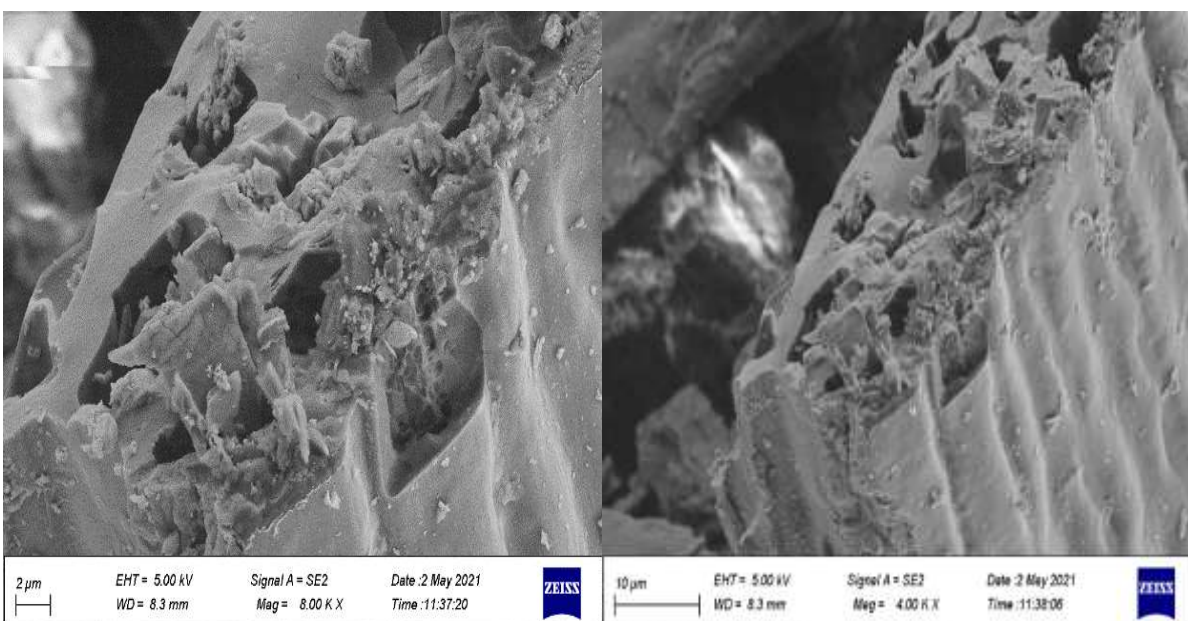
نتایج ارائه‌شده در جدول ۴-۱ گویای آن است مقدار ماده آلی در بقایای اولیه بیشتر از بیوچار تولیدی بوده است که به دلیل تصعید ترکیب‌های کربن بقایای گیاهی طی پیرولیز می‌باشد. حسین و همکاران [۲۰۱۰] نیز گزارش کردند که طی تولید بیوچار، کربن آلی و نیتروژن کاهش یافته است. در این پژوهش برای بررسی مرفولوژی مخلوط بقایای برگ درختان چنار و کاج سوزنی (شکل ۴-۱) و بیوچار (شکل ۴-۲) حاصل از همین بقایا با کمک دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ (SEM) از نمونه‌ها عکس برداری شد. با توجه به شکل می‌توان متخلخل بودن سطح داخلی بیوچار و بقایا را مشاهده کرد، که

^۱ Scanning electron microscopy

میزان این منافذ در بیوپار بیش تر از بقایا بوده است. این منافذ فضای مناسبی جهت ذخیره آب، زیستگاهی برای میکروارگانیسم‌ها و فضایی برای جذب عناصر می‌باشد.



شکل ۴-۱- تصاویر مربوط به SEM بقایای برگ
درختان چنار و کاج سوزنی برگ



شکل ۴-۲- تصاویر مربوط به SEM بیوپچار برگ
درختان چنار و کاج سوزنی برگ

۴-۲- اثر تیمارهای آزمایشی بر ماده آلی خاک

نتایج تجزیه واریانس میزان کربن آلی خاک نشان داد که اثر اصلی و متقابل دو فاکتور ماده اصلاحی (A) و چرخه تر و خشک شدن (WDC) در سطح ۹۹ درصد معنی دار بوده است (جدول ۴-۱).

جدول ۴-۲- تجزیه واریانس اثر ماده اصلاحی و چرخه بر ماده آلی خاک

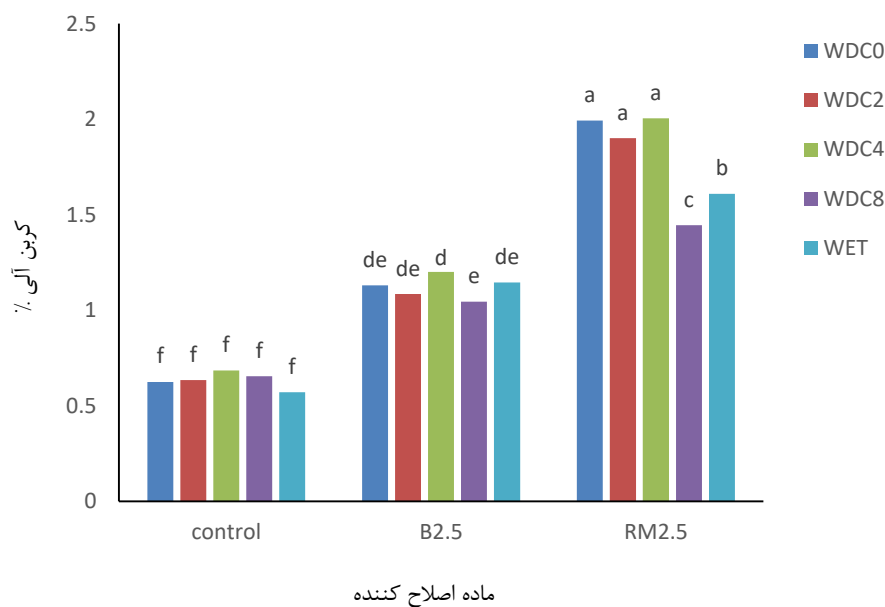
میانگین مربعات		
ماده آلی (OC)	درجه آزادی	منابع تغییرات
۵/۱۲۵**	۲	ماده اصلاحی (A)
۰/۰۹۷**	۴	چرخه (WDC)
۰/۰۵۹ **	۸	ماده اصلاحی × چرخه
۰/۰۰۶	۳۰	خطا
۶/۸	-	ضریب تغییرات

***، *، ns به ترتیب نشان‌دهنده‌ی معنی دار بودن نتایج در سطح ۹۹ درصد، ۹۵ درصد و عدم معنی دار در سطح ۹۵ درصد می‌باشد.

افزایش بیوچار و بقایای گیاهی به مقدار ۲/۵ درصد باعث افزایش معنی‌دار کربن آلی نسبت به تیمار شاهد شده است. محتوای کربن آلی خاک در تیمار بقایای گیاهی برگ درختان چنار و کاج سوزنی بیش‌تر از تیمار بیوچار در همه تیمارهای چرخه‌های خشک و مرطوب شدن بوده است (شکل ۴-۳). افزایش کربن در اثر افزودن بقایای گیاهی در مقایسه با بیوچار به خاطر وجود کربن آلی بیش‌تر در بقایا است. علاوه بر آن، بقایای گیاهی تازه حاوی ترکیبات زود تجزیه شونده کربن هستند؛ حال آن‌که در بیوچار و طی فرآیند پیرولیز، چنین ترکیباتی عمدتاً با ترکیبات مقاوم‌تر کربن به تجزیه جایگزین می‌شوند. نتایج سایر پژوهش‌ها نیز افزایش کربن آلی خاک در اثر مصرف ماده‌های اصلاح کننده را گزارش نموده اند [رز و همکاران ۲۰۰۳، پارتاساراتی ۲۰۰۸]. همچنین افزایش ماده آلی خاک در اثر افزودن بقایای برگ انگور و پوست انار نیز توسط درستکار و والی [۱۳۹۶] و در اثر افزودن بقایای یونجه توسط یزدان‌پناه و همکاران (۱۳۹۱) گزارش شده است.

(control: شاهد، B: بیوچار، RM: بقایای گیاهی، WDC: چرخه های خشک و مرطوب شدن، Wet:

همیشه مرطوب)



شکل ۳-۴- تاثیر ماده‌های اصلاح کننده و چرخه‌های تر و خشک شدن بر ماده آلی خاک

مقایسه اثر چرخه‌های خشک و مرطوب شدن خاک گویای آن است که در تیمار شاهد (بدون ماده اصلاحی) تفاوت معنی‌داری از نظر ماده آلی بین تیمارها وجود ندارد (شکل ۳-۴). در تیمارهای دارای بقایا و بیوچار نیز افزایش تعداد چرخه‌ها از صفر به ۴ چرخه تفاوت معنی‌داری در میزان ماده آلی خاک ایجاد ننموده در حالی که با افزایش تعداد چرخه‌ها به ۸ چرخه، ماده آلی خاک کاهش یافته است. در تیمار دائما مرطوب نیز ماده آلی تنها در تیمار دارای بقایای گیاهی نسبت به تیمار دائما خشک کاهش یافته است (شکل ۳-۴).

چرخه‌های خشک و مرطوب شدن متوالی خاک سبب تحریک فعالیت‌های میکروبی در خاک می‌شود. 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 [گئو و همکاران، ۲۰۱۲]. به طور کلی خشک شدن خاک جمعیت ریزجانداران خاک را کاهش می‌دهد، 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 که می‌تواند سبب تجزیه مواد آلی و کاهش آن در خاک شود [مرکس و همکاران، ۲۰۰۱]. از سوی دیگر فرآیند خشک و مرطوب شدن خاک منجر به متلاشی شدن خاکدانه‌ها شده و در نتیجه حفاظت فیزیکی خاکدانه‌ها از مواد آلی کم‌تر می‌شود. شکست خاکدانه‌ها مواد آلی موجود در آن‌ها را در معرض فعالیت‌های میکروبی قرار داده و احتمالاً یکی از دلایل کاهش ماده آلی خاک در اثر اعمال چرخه‌های متعدد می‌باشد [زوو و همکاران، ۲۰۱۷].

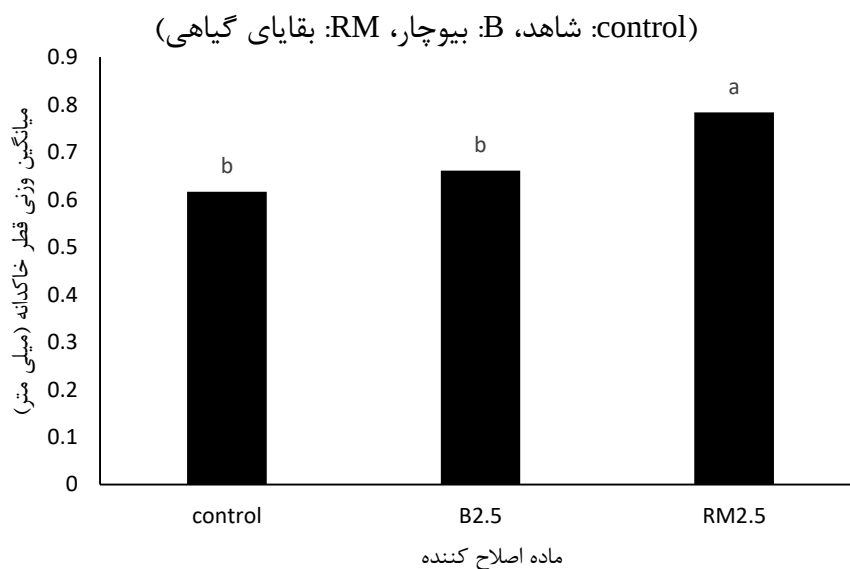
۳-۴- اثر تیمارهای آزمایشی بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و رس قابل پراکنش

نتایج تجزیه واریانس میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و رس قابل پراکنش خاک در جدول (۳-۴) ارائه شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که اثرات ساده مواد اصلاحی و چرخه‌های خشک و مرطوب شدن خاک بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و اثر ساده مواد اصلاح‌کننده بر رس قابل پراکنش خاک در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار است.

جدول ۴-۳- تجزیه واریانس اثر ماده اصلاحی و چرخه‌های تر و خشک شدن بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و رس قابل پراکنش خاک

میانگین مربعات			
منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (میلی‌متر)	رس قابل پراکنش (DC)
ماده اصلاحی (A)	۲	۰/۱۱۱۹**	۳/۰۹**
چرخه (WDC)	۴	۰/۰۲۶۴**	۱/۱۰ ^{ns}
ماده اصلاحی × چرخه	۸	۰/۰۰۶۱ ^{ns}	۱/۱۶ ^{ns}
خطا	۳۰	۰/۰۰۴۲	۵/۶۳
ضریب تغییرات	-	۹/۴۴	۱۳/۴۸

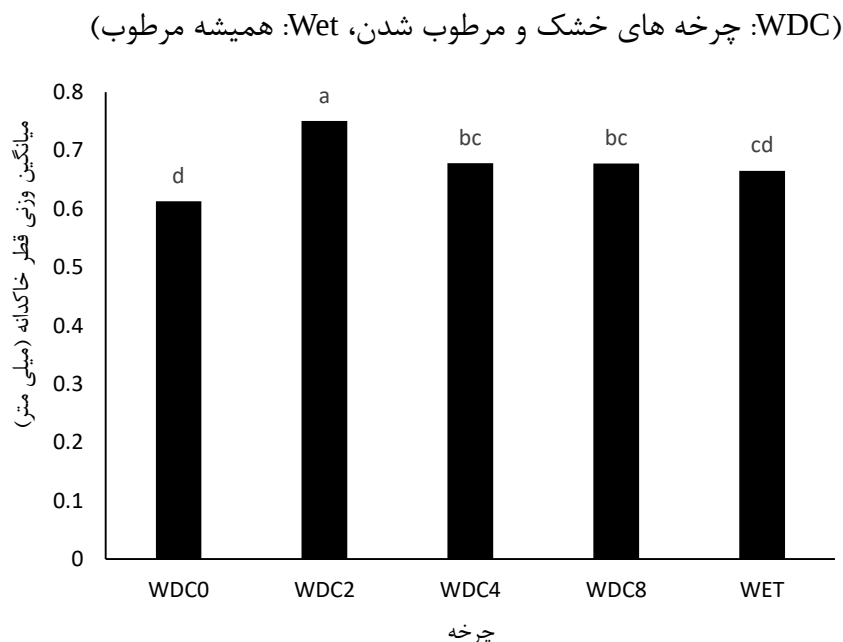
ns، *، ** به ترتیب نشان‌دهنده‌ی معنی دار بودن نتایج در سطح ۹۹ درصد، ۹۵ درصد و عدم معنی دار در سطح ۹۵ درصد می‌باشد.



شکل ۴-۴- اثر ماده اصلاحی بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها

نتایج شکل ۴-۴ گویای آن است که با اضافه کردن ماده‌های اصلاح کننده میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در هر دو تیمار ماده‌های اصلاحی نسبت به شاهد افزایش یافت، با این وجود تنها اثر تیمار بقایا معنی‌دار بوده است. مطالعات نشان داده است که مقدار و ترکیب ماده اصلاح کننده به خاک می‌تواند پایداری ساختمان را تحت تاثیر قرار دهد.

نوتیگ و همکاران [۲۰۰۵] چنین مشاهده کردند که در اثر افزودن بقایای بادام زمینی به خاک پایداری ساختمان خاک افزایش یافت. لیو و همکاران [۲۰۰۵] گزارش کردند که افزودن ترکیبات آلی به خاک سبب افزایش فعالیت میکروبی در خاک شده که می‌تواند منجر به تولید پلی ساکاریدهای خارج سلولی شود. پلی ساکاریدها نقش مهمی در پایداری منافذ خاک و خاکدانه‌سازی ایفا می‌کنند. همچنین افزایش زیست توده حاصل از برگرداندن بقایای گیاهی سبب افزایش تشکیل خاکدانه‌های درشت به ویژه در ۲/۵ سانتی‌متری سطح خاک می‌شود که توسط شاور و همکاران [۲۰۰۳] گزارش شد.

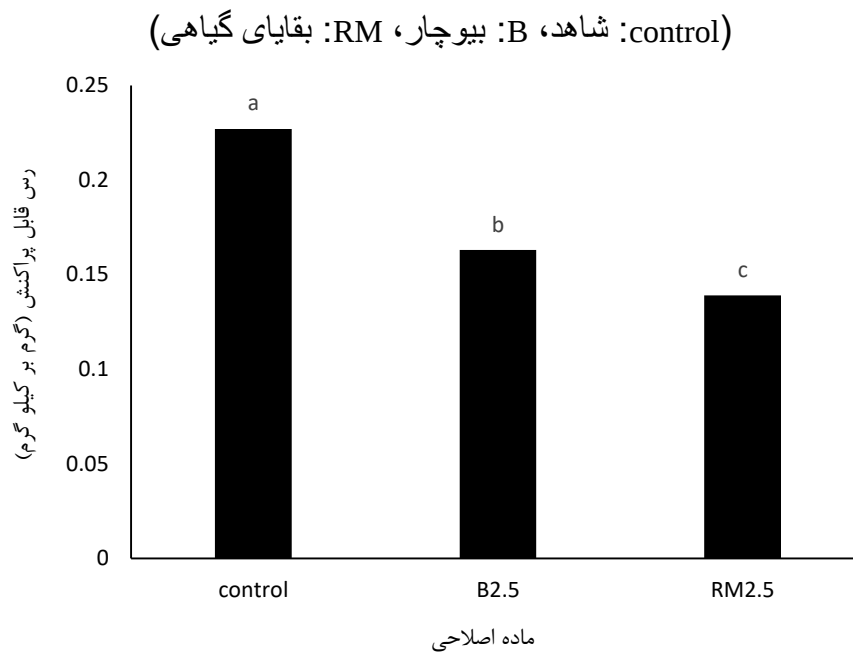


شکل ۴-۵- اثر چرخه‌های خشک و تر شدن بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها

نتایج آزمون مقایسه میانگین اثر چرخه‌های مختلف بر مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در شکل ۴-۵ آمده است. همه چرخه‌های خشک و مرطوب شدن سبب افزایش پایداری ساختمان خاک نسبت به تیمار شاهد (بدون چرخه) شدند. بیش‌ترین پایداری ساختمان خاک در تیمار با دو چرخه خشک و مرطوب مشاهده شد و با افزایش تعداد چرخه‌ها میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها کاهش یافت. چنین گزارشی شده است که مرطوب شدن خاک سبب افزایش نیروهای هم چسبی بین مولکول‌های آب و دگرچسبی بین آب و ذرات خاک و نزدیک شدن ذرات خاک به یکدیگر می‌شود [ژانگ و همکاران، ۲۰۰۵]. همچنین تر و خشک شدن خاک می‌تواند سبب چیدمان مجدد ذرات اولیه خاک و افزایش مقاومت و پایداری خاکدانه‌ها شود. یوتومو و دکستر [۱۹۸۱] در بررسی اثر چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی بر پایداری ساختمان خاک نشان دادند که در تمامی خاک‌ها با افزایش چرخه‌های تر و خشک شدن، مقدار خاکدانه‌های بزرگتر از ۰/۲۵ میلی‌متر افزایش یافت. همچنین هورن و دکستر [۱۹۸۹]، گزارش کردند که چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی باعث آرایش یافتن مجدد ذرات و افزایش پایداری خاکدانه‌ها می‌شود. آنها گزارش کردند که تر و خشک شدن سبب سهولت جابه‌جایی مواد پیوند دهنده بین ذرات خاک می‌شود و در اتصال ذرات به یکدیگر نقش مهمی ایفا می‌کند، به گونه‌ای که خشک شدن سبب افزایش نیروهای کشش سطحی یا تنش مؤثر ناشی از مکش ماتریک می‌شود و ذرات خاک را به یکدیگر نزدیک می‌کند. کلارک و اسمتراست [۲۰۱۰] اثرات تغییرات آب و هوایی و تر و خشک شدن‌های متوالی را بر پایداری شیب‌های خاکی در انگلستان در طول ۱۰ سال متوالی مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی‌های آنها نشان داد که تر و خشک شدن در خاک‌های رسی پتانسیل تورم را افزایش داده و باعث کاهش پایداری شیب‌های خاکی می‌شود.

در انطباق با یافته‌های پژوهش حاضر، دکستر [۲۰۰۴]؛ برونیک و لعل [۲۰۰۵]؛ الدائوب و همکاران [۲۰۱۴]؛ ما و همکاران [۲۰۱۵] گزارش کردند که افزایش تر و خشک شدن خاک سبب افزایش تولید خاکدانه‌ها می‌شود، اما تر و خشک شدن‌های متوالی، شکسته شدن خاکدانه‌های تولید شده را به دنبال خواهد داشت. به همین دلیل در مطالعه حاضر نیز با افزایش چرخه‌ها از صفر به دو چرخه افزایش پایداری ساختمان مشاهده شد و با افزایش فراتر رفتن تعداد چرخه‌های اعمال شده پایداری ساختمان خاک کاهش یافت.

نتایج تجزیه واریانس گویای آن بود که اثر تیمار ماده اصلاح کننده بر رس قابل پراکنش خاک (WDC) در آب در سطح ۹۹ درصد معنی دار بوده است (جدول ۳-۴). رس قابل پراکنش خاک به عنوان شاخصی از ناپایداری ساختمان خاک است. از جمله عوامل موثر بر رس قابل پراکنش خاک، مواد آلی و اصلاح کننده های خاک هستند که براساس نتایج به دست آمده در این پژوهش، نوع تیمارهای آلی در کاهش مقدار رس قابل پراکنش اثر معنی داری داشته است.



شکل ۴-۶- اثر تیمارهای ماده اصلاح کننده بر رس قابل پراکنش (WDC) خاک.

مقایسه میانگین اثر تیمارهای ماده های اصلاح کننده بر رس قابل پراکنش خاک نشان می دهد که تیمار شاهد با مقدار ۰/۲۲۷ گرم بر کیلو گرم بیشترین مقدار رس قابل پراکنش و کمترین میزان پایداری در ساختمان خاک و خاک تیمار شده با بقایای گیاهی با مقدار ۰/۱۳۹ گرم بر کیلو گرم خاک کمترین میزان رس قابل پراکنش و بیشترین پایداری ساختمان را دارند. هر عاملی که سبب افزایش پایداری خاکدانه ها در خاک شود می تواند مقدار رس قابل پراکنش در آب را در خاک را کاهش دهد. مواد آلی از جمله عوامل مهم شناخته شده در بهبود ویژگی های فیزیکی مانند افزایش تخلخل، بهبود فراهمی آب

خاک، افزایش پایداری ساختمان خاک و کاهش رس قابل پراکنش خاک در آب محسوب می‌شود [میرزایی و محمود آبادی، ۲۰۰۵]. پوشش خاکدانه‌ها به وسیله ترکیبات آبگریز حاصل از تجزیه بقایا سبب کاهش فروپاشی خاکدانه‌ها در اثر ورود ناگهانی آب می‌شود و بر پایداری ساختمان خاک می‌افزاید [لیو و همکاران، ۲۰۰۵].

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 خاک و کاهش رس قابل پراکنش آب در خاک می‌شود [براوو و همکاران، ۲۰۰۹]. درستکار و والی [۱۳۹۶] نیز کاهش رس قابل پراکنش خاک و پایداری ساختمان خاک در اثر افزودن بقایای گیاهی را نشان دادند. در همین ارتباط تاجیک و همکاران [۲۰۰۳] نیز افزایش خاکدانه‌های پایدار در آب در اثر افزودن مواد آلی به خاک را گزارش نموده‌اند. یافته‌های شاور و همکاران [۲۰۰۳] نیز حاکی از افزایش تشکیل خاکدانه‌های درشت را در اثر بقایای گیاهی به خاک بوده است.

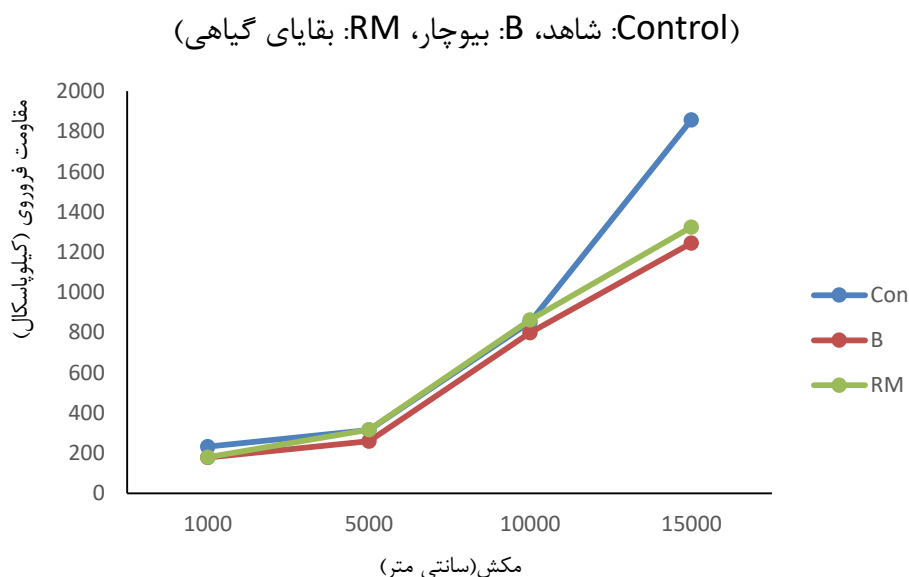
۴-۴- اثر تیمارهای آزمایشی بر منحنی مشخصه مقاومت فروروی

خاک

افزودن بقایا بر مقدار مقاومت فروروی خاک در دامنه مرطوب اثر چندانی نداشته است، در حالی که در دامنه خشک سبب کاهش قابل توجه مقاومت فروروی خاک گردیده است؛ به گونه‌ای که استفاده از بیوچار و بقایای گیاهی موجب کاهش ۳۳ درصدی مقاومت مکانیکی خاک نسبت به تیمار شاهد شده است (شکل ۴-۷). در دامنه خشک افزایش کودهای آلی سبب نگه داشت آب در خاک شده و در نتیجه رطوبت خاک را افزایش داده و مقاومت فروروی خاک را کاهش می‌دهد (برزگر و همکاران، ۲۰۰۰). همچنین در تیمارهای مربوط به چرخه‌های تر و خشک شدن نیز اثر این تیمارها با افزایش مکش در خاک در دامنه خشک بیشتر دیده شده است؛ به گونه‌ای که بیش‌ترین مقاومت مکانیکی در تیمار صفر چرخه و دائماً مرطوب

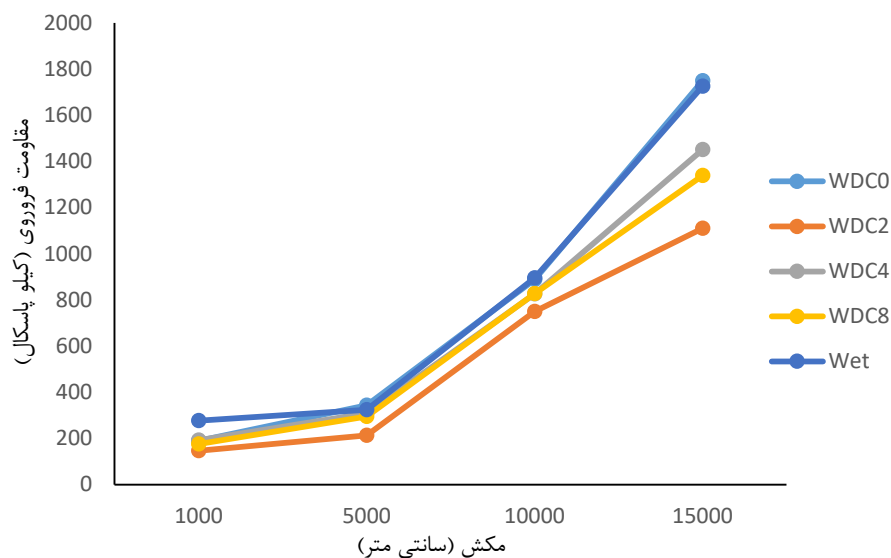
و کمترین مقاومت مکانیکی در تیمار اعمال دو چرخه مشاهده شد. در سایر تیمارهای چرخه‌های تر و خشک شدن هم در سه مکش اولیه اختلاف تیمار چرخه‌ها کم‌تر بوده ولی در مکش ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر اختلاف بین تیمارها مشاهده شد (شکل ۴-۸).

کاهش رطوبت خاک سبب شده تا ذرات خاک به یکدیگر نزدیک شده و اصطکاک بین ذرات خاک افزایش یابد. این امر باعث محکم‌تر شدن پیوند بین ذرات خاک و در نتیجه افزایش مقاومت مکانیکی خاک شده است (شکل ۴-۷ و ۴-۸). آلن و موسیک [۱۹۹۷] در طی پژوهش‌های خود رطوبت خاک را مهم‌ترین فاکتور مؤثر بر مقاومت فروروی دانستند و توصیه کردند که در مقایسه مقاومت فروروی خاک‌های مختلف، اندازه‌گیری‌ها در رطوبت ظرفیت مزرعه صورت گیرد. نتایج بررسی مقاومت فروروی خاک در ۴ پتانسل مورد مطالعه نشان داد که در سه مکش اولیه یعنی مکش ۱۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰ سانتی‌متر، مقاومت فروروی در تمامی تیمارها تقریباً یکسان بوده ولی در مکش ۱۵۰۰۰ سانتی‌متری در تیمار شاهد (بدون بقایا)، مقاومت فروروی ۳۳ درصد بیشتر از تیمار بیوچار و بقایای گیاهی بوده است.



شکل ۴-۷- اثر مواد اصلاح کننده بر منحنی مشخصه‌ی مقاومت فروروی خاک

(WDC: چرخه های خشک و مرطوب شدن، Wet: همیشه مرطوب)



شکل ۴-۸- اثر چرخه های تر و خشک شدن بر منحنی مشخصه ی مقاومت فروری خاک.

۴-۴-۱- اثر نوع تیمار اصلاح کننده آلی و چرخه های تر و خشک شدن بر مقاومت فروری خاک

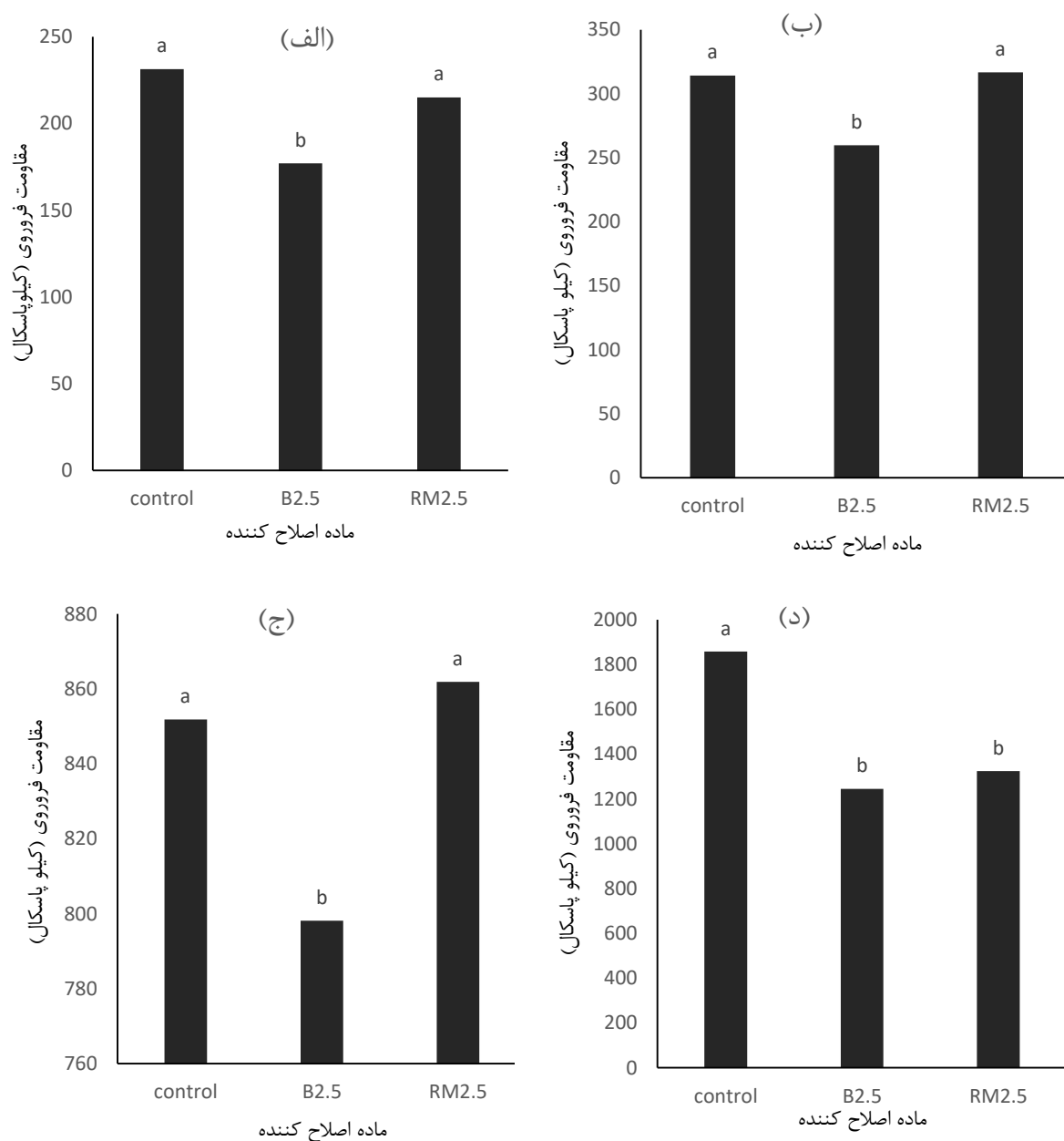
نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات اصلی دو فاکتور ماده اصلاحی (A) و چرخه (WDC) بر مقاومت مکانیکی خاک در همه مکش های مورد مطالعه در سطح ۹۹ درصد معنی دار بوده است.

جدول ۴-۴- اثرهای اصلی و متقابل مواد اصلاح کننده و چرخه های تر و خشک شدن بر مقاومت فروری در مکش های مختلف.

میانگین مربعات				درجه آزادی	منابع تغییر
Q_{15000}	Q_{10000}	Q_{5000}	Q_{1000}		
۱۶۶۵۲۵ ^{**}	۱۷۶۱۳ ^{**}	۱۵۵۴۳ ^{**}	۱۴۰۸۱ ^{**}	۲	ماده اصلاحی (A)
۶۵۲۱۲۱ ^{**}	۳۱۱۰۸ ^{**}	۲۲۳۳۳ ^{**}	۲۱۱۱۷ ^{**}	۴	چرخه (WDC)
۴۹۴۷۷ ^{ns}	۸۵۷ ^{ns}	۱۰۴۲ ^{ns}	۲۴۸۳ ^{ns}	۸	ماده اصلاحی X چرخه
۵۳۹۷۸	۵۸۳	۱۳۲۰	۱۲۱۰	۳۰	خطا
۱۵	۲	۱۲	۱۷	-	ضریب تغییرات

***، **، ns به ترتیب نشان دهنده ی معنی دار بودن نتایج در سطح ۹۹ درصد، ۹۵ درصد و عدم معنی دار در سطح ۹۵ می باشد.

(control: شاهد، B: بیوچار، RM: بقایای گیاهی)



شکل ۹-۴- اثر مواد اصلاح کننده بر مقاومت فروروی (الف) مکش ۱۰۰۰ سانتی متری، (ب) مکش

۵۰۰۰ سانتی متری، (ج) مکش ۱۰۰۰۰ سانتی متری، (د) مکش ۱۵۰۰۰ سانتی متری

افزودن بیوچار به میزان ۲/۵ درصد باعث کاهش مقاومت فروروی خاک نسبت به تیمار شاهد در مکش‌های مورد مطالعه شده است (شکل ۹-۴). کاهش مقاومت خاک بر اثر افزودن بیوچار حاصل از

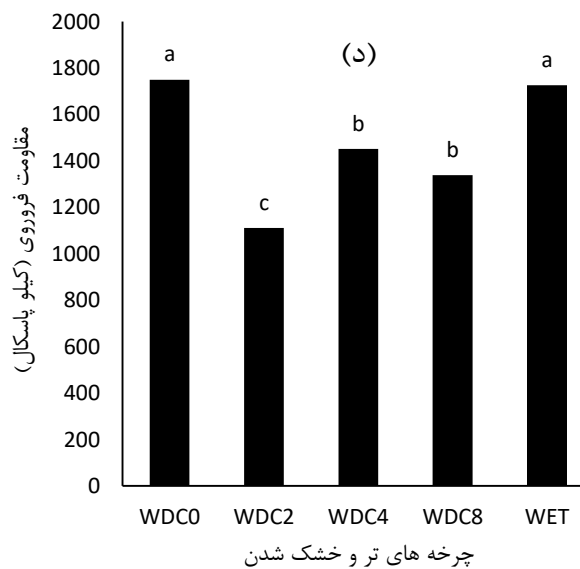
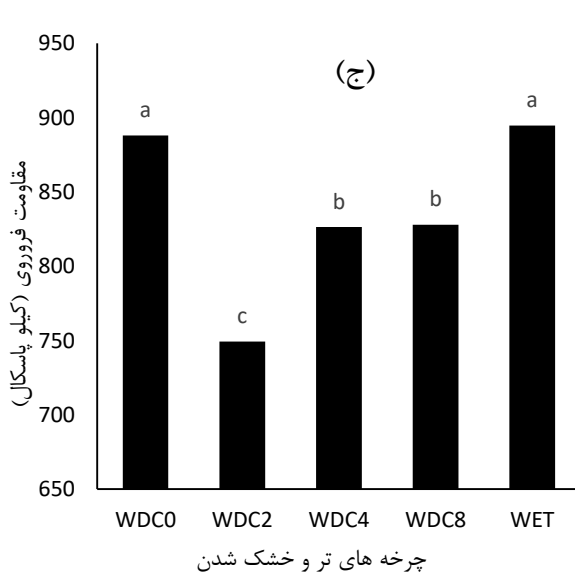
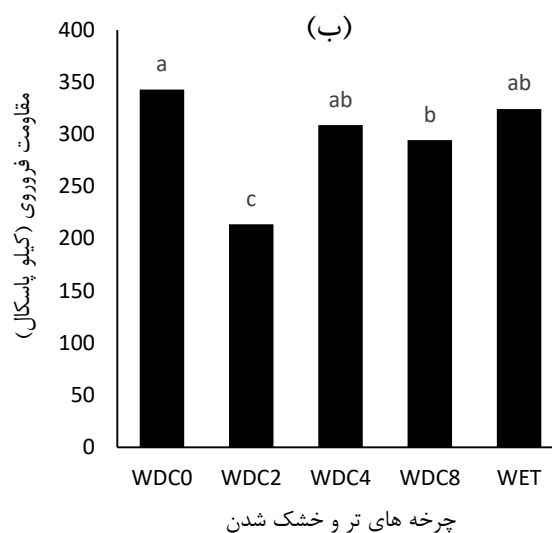
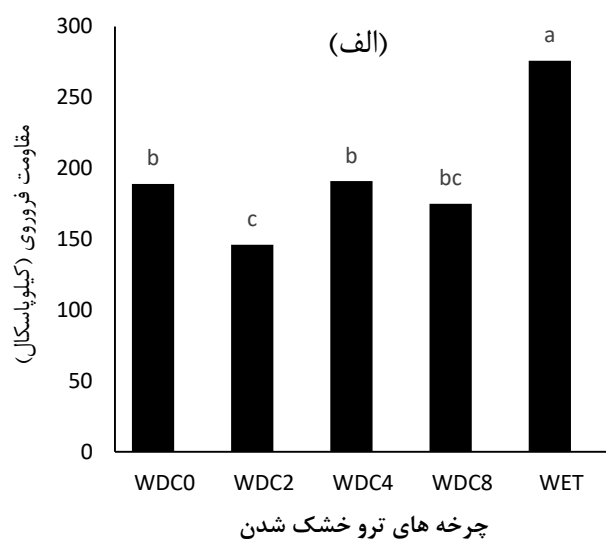
بقایای گیاهی را می‌توان به آثار کوتاه مدت مواد آلی مانند پوک و سبک کردن خاک مرتبط دانست. مواد آلی در حال تجزیه یا تجزیه شده می‌تواند باعث کاهش تراکم‌پذیری و مقاومت خاک گردد. این تاثیر ممکن است با آثار دراز مدت مواد آلی تفاوت داشته باشد که علت آن تغییر این مواد حتی پس از تجزیه است. پژوهش‌های متعددی نیز کاهش مقاومت مکانیکی خاک تحت تاثیر افزودن مواد آلی به خاک را گزارش کرده‌اند. کاهش مقاومت فروروی خاک با افزودن بقایای گیاهی و بیوچار به بهبود پایداری ساختمان و افزایش ماده آلی خاک مرتبط است [سور و همکاران، ۱۹۹۳].

افزودن بقایای گیاهی به خاک تنها در مکش ۱۵۰۰۰ سانتیمتر سبب کاهش معنی‌دار مقاومت فروروی خاک شده است (شکل د ۴-۹). استوک و دونز [۲۰۰۸] نیز مشاهده نمودند که با افزودن کمپوست به خاک، مقاومت فروروی خاک در دامنه مرطوب افزایش می‌یابد. در توجیه این پدیده می‌توان گفت بقایای گیاهی به علت گنجایش تبادل کاتیونی زیاد، سبب چسبندگی بیشتر ذرات خاک به یکدیگر شده و همین امر سبب افزایش مقاومت خاک شده است.

بررسی اثر اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن بر میانگین مقاومت فروروی خاک نشان داد که اعمال ۲، ۴ و ۸ چرخه سبب کاهش مقاومت مکانیکی خاک نسبت به شرایط همیشه خشک و همیشه مرطوب شده است (شکل ۴-۱۰). با این وجود در دامنه خشک (مکش ۱ و ۵ بار) تنها اثر اعمال تیمار ۲ چرخه معنی‌دار بوده است و با افزایش تعداد چرخه‌ها مقاومت فروروی افزایش یافته است. کاهش مقاومت فروروی در اثر اعمال دو چرخه تر و خشک شدن احتمالاً به دلیل افزایش ساختمان سازی در این تیمار بوده است و با افزایش تعداد چرخه‌ها و شکسته شدن خاکدانه‌ها مقاومت فروروی کاهش یافته است.

آلدود و همکاران [۲۰۱۴] گزارش کردند که افزایش تر و خشک شدن خاک سبب افزایش تولید خاکدانه می‌شود، اما تر و خشک شدن‌های متوالی، شکسته شدن خاکدانه‌های تولید شده را به دنبال خواهد داشت و سبب تخریب ساختمان خاک شده و مقاومت فروروی خاک را افزایش می‌دهد. افزایش تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن سبب افزایش فشار هوای محبوس و آماس ناهماهنگ خاک در طی تر شدن گردیده و باعث متلاشی شدن ساختمان خاک می‌شود و از سوی دیگر شکسته شدن خاکدانه‌های تولید شده را به دنبال خواهد داشت [صفا دوست و همکاران، ۲۰۱۶].

WDC: چرخه های خشک و مرطوب شدن، Wet: همیشه مرطوب)



شکل ۴-۱۰- اثر چرخه های تر و خشک شدن بر مقاومت فروری خاک (الف) مکش ۱۰۰۰ سانتی متری،
(ب) مکش ۵۰۰۰ سانتی متری، (ج) مکش ۱۰۰۰۰ سانتی متری، (د) مکش ۱۵۰۰۰ سانتی متری

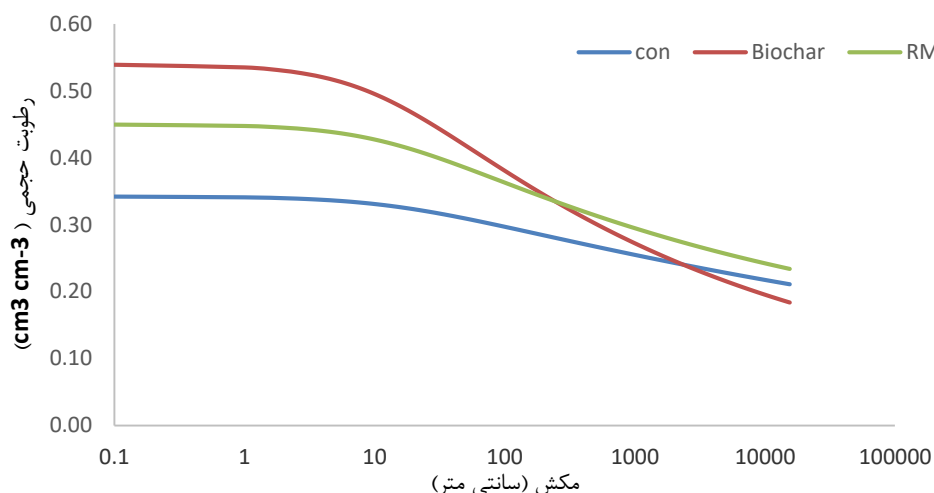
مقاومت فروروی در چرخه دائم مرطوب و صفر چرخه (شکل ۴-۱۰) و در تیمار شاهد (بدون ماده آلی) در مکش ۱۵۰۰۰ سانتی متر نزدیک به ۲ مگاپاسکال بوده است. پژوهش‌های گذشته محدودیت رشد و عدم توانایی رشد مناسب ریشه در خاک‌های با مقاومت بیش از ۲ مگاپاسکال را گزارش نموده‌اند [کرزیک و همکاران، ۲۰۰۰]. افزوده شدن ماده آلی و اعمال چرخه‌های تر و خشک شد توانسته مقاومت مکانیکی خاک در این مکش را کاهش دهد و احتمال محدودیت رشد ریشه به لحاظ مقاومت مکانیکی خاک را کم نماید.

۴-۵- اثر تیمارهای آزمایشی بر پارامترهای هیدرولیکی خاک

۴-۵-۱- منحنی مشخصه رطوبتی خاک

منحنی مشخصه رطوبتی از مشخصه‌های مهم فیزیکی خاک و بیانگر رابطه بین مکش ماتریک و رطوبت خاک است و در مسائل آب و خاک، مانند آبیاری و زهکشی، حفاظت خاک و حرکت مواد آلاینده در خاک از اهمیت زیادی برخوردار است. اثر مواد اصلاحی آلی و چرخه‌های خشک و مرطوب شدن بر منحنی مشخصه رطوبتی خاک در شکل (۴-۱۱) و (۴-۱۲) نشان داده شده است. منحنی رطوبتی در مکش‌های کمتر از صد سانتی‌متر بیش‌تر تابعی از ساختمان خاک و در مکش‌های بالاتر تابع توزیع اندازه ذرات خاک است.

(Control: شاهد، B: بیوچار، RM: بقایای گیاهی)



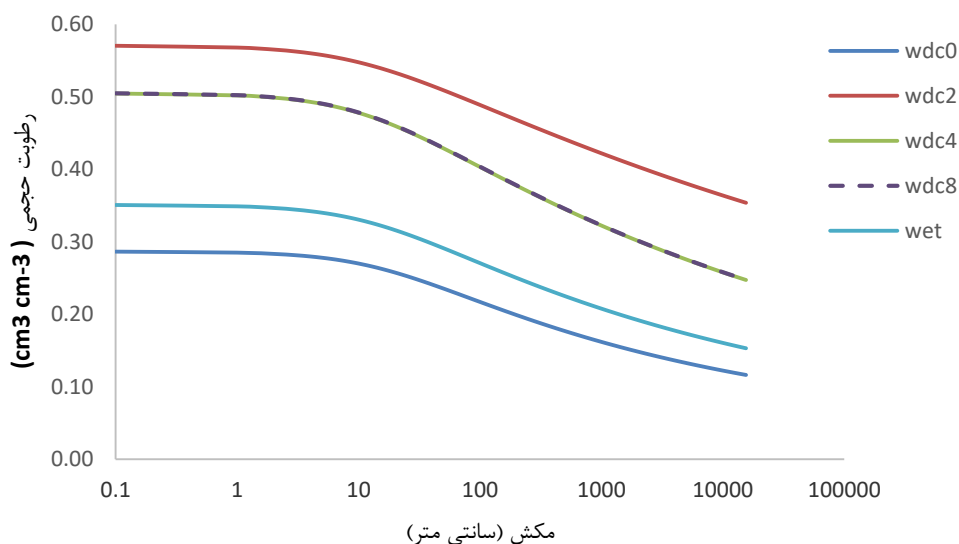
شکل ۴-۱۱- اثر مواد اصلاحی آلی بر منحنی مشخصه رطوبتی خاک

افزودن بقایای گیاهی و بیوچار به خاک، رطوبت حجمی خاک را به ترتیب ۰/۴۴ و ۰/۵۳ در مکش‌های اولیه افزایش داده است و این افزایش در مکش‌های کم‌تر از ۱۰۰ سانتی‌متر بیش‌تر بوده است (شکل ۴-۱۱). بهبود ساختمان خاک و افزایش حجم کل منافذ خاک در تیمار دارای بقایای گیاهی سبب افزایش نگهداشت آب در خاک در همه مکش‌های مورد مطالعه شده است. جسینگ و اشمید هالتر [۲۰۰۴] نیز مؤید افزایش ظرفیت نگهداری آب خاک با مصرف ماده جاذب رطوبت است. سامانی مجد [۱۳۹۲] در پژوهشی اظهار داشت که اضافه کردن منابع آلی باعث بهبود ویژگی‌های فیزیک خاک مانند افزایش خلل و فرج، کاهش چگالی و بهبود ساختمان خاک شده است به همین دلیل نیز رطوبت در مکش‌های مختلف بیش از تیمار شاهد شده است. هانای و همکاران [۲۰۰۴] اظهار داشتند که بقایای گیاهی به عنوان موانع فیزیک در مقابل انتشار بخار آب از سطح خاک عمل کرده و بدین ترتیب موجب ذخیره بیشتر آب برای مصارف بعدی گیاه می‌شوند. در حالی که در تیمار بیوچار رطوبت حجمی خاک تنها در مکش‌های صفر تا ۱۰۰ سانتی‌متر به صورت قابل ملاحظه‌ای بیش‌تر از سایر تیمارها بوده که به دلیل نقش بیوچار در افزایش حجم منافذ درشت خاک است. برخی بیوچارها به دلیل داشتن سطح ویژه بالا، باعث تغییر در توزیع اندازه ذرات و تخلخل خاک شده و افزایش منافذ درشت و میزان آب قابل

دسترس گیاه را در پی دارند [اندرندلی و همکاران، ۲۰۱۶]. اساعی و همکاران [۲۰۰۹] چنین بیان کردند که بیشترین تأثیر در افزایش رطوبت حجمی در سطوح بالاتر از مواد سوپر جاذب مشاهده شد که با نتایج این پژوهش در خصوص استفاده از بیوپار مطابقت داشت.

شواهدی وجود دارد که نشان می‌دهد که بیوپار در خاک ممکن است سطح خاک خالص را افزایش و در نتیجه ممکن است نگهداری آب خاک را بهبود بخشد [کنی و همکاران، ۲۰۱۲؛ دانی و همکاران، ۲۰۰۷]. افزایش سطح خاک نیز ممکن است به نفع جوامع میکروبی بومی، همراه با ظرفیت جذب کلی از خاک همراه باشد [ورجیهان و همکاران، ۲۰۱۰]. شیب منحنی رطوبتی مربوط به تیمار بیوپار در ناحیه نزدیک به مکش ۱۰ سانتی‌متر که مربوط به تخلیه آب توسط حفرات درشت است از سایر تیمارها بیش‌تر بوده که نتیجه افزایش منافذ درشت خاک بوسیله این ماده است. در ناحیه با مکش‌های بیش‌تر از ۱۰۰ سانتی‌متر بیوپار نتوانست تأثیر چشمگیری بر نگهداشت آب خاک داشته باشد که این موضوع می‌تواند ناشی از عدم تأثیر این ماده بر منافذ ریز خاک باشد؛ زیرا بیوپار به دلیل ساختار متخلخل سبب افزایش خاکدانه سازی و بهبود منافذ ماکرو می‌شود [تریفونویچ و همکاران، ۲۰۱۸].

(WDC: چرخه های خشک و مرطوب شدن، Wet: همیشه مرطوب)



شکل ۴-۱۲- منحنی مشخصه رطوبتی خاک تحت تأثیر تیمار چرخه‌های تر و خشک شدن

بررسی منحنی مشخصه رطوبتی خاک نشان داد که اعمال چرخه‌های خشک و مرطوب شدن سبب افزایش نگه‌داشت آب در خاک در مقایسه با تیمارهای بدون چرخه و دائماً مرطوب شده است (شکل ۴-۱۲). بیش‌ترین تأثیر چرخه‌ها بر افزایش نگه‌داشت آب خاک مربوط به تیمار اعمال دو چرخه خشک و مرطوب شدن بوده است. همانطور که قبلاً توضیح داده شد چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی باعث آرایش یافتن مجدد ذرات و افزایش پایداری خاکدانه‌ها می‌شود. تر و خشک شدن سبب سهولت جابه‌جایی مواد پیوند دهنده بین ذرات خاک می‌شود و در اتصال ذرات به یکدیگر نقش مهمی ایفا می‌کند، به گونه‌ای که خشک شدن سبب افزایش نیروهای کشش سطحی یا تنش مؤثر ناشی از مکش ماتریک می‌شود و ذرات خاک را به یکدیگر نزدیک می‌کند [دکستر، ۱۹۸۷]. در نتیجه با توجه به بیش‌تر بودن میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در تیمار اعمال چرخه‌ها و به ویژه در تیمار اعمال دو چرخه به نظر می‌رسد بهبود نگه‌داشت آب در خاک در این تیمارها، به دلیل بهبود ساختمان خاک می‌باشد.

۴-۵-۲- پارامترهای مدل منحنی مشخصه رطوبتی خاک

نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای آلی و چرخه‌های تر و خشک شدن بر پارامترهای برازش یافته مدل ون‌گنوختن- معلم بر داده‌های رطوبت حجمی در جدول ۴-۷ نشان داده شده است. اثر اصلی و متقابل تیمارهای آلی و چرخه‌های تر و خشک شدن بر پارامترهای θ_s ، θ_r و α (مرتبط با معکوس مکش ماتریک در نقطه عطف) در سطح آماری یک درصد معنی‌دار بوده است.

جدول ۴-۵- اثرهای اصلی و متقابل مواد اصلاح کننده و چرخه‌های تر و خشک شدن بر پارامترهای هیدرولیکی معادله ونگنوختن-معلم.

میانگین مربعات			درجه آزادی	منابع تغییر
α	θ_r	θ_s		
۰/۰۰۱۹۲**	۰/۰۳۱۹۰۰**	۰/۱۴۶۶۴**	۲	ماده اصلاحی (A)
۰/۰۰۰۸۵**	۰/۰۰۰۱۹۴**	۰/۱۲۸۲۴**	۴	چرخه (WDC)
۰/۰۰۰۰۱۰**	۰/۰۰۰۰۰۴۵**	۰/۰۰۳۶۵**	۸	ماده اصلاحی X چرخه
۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۶۷	۳۰	خطا
۴/۷۲	۴/۰۹	۵/۸۲	-	ضریب تغییرات

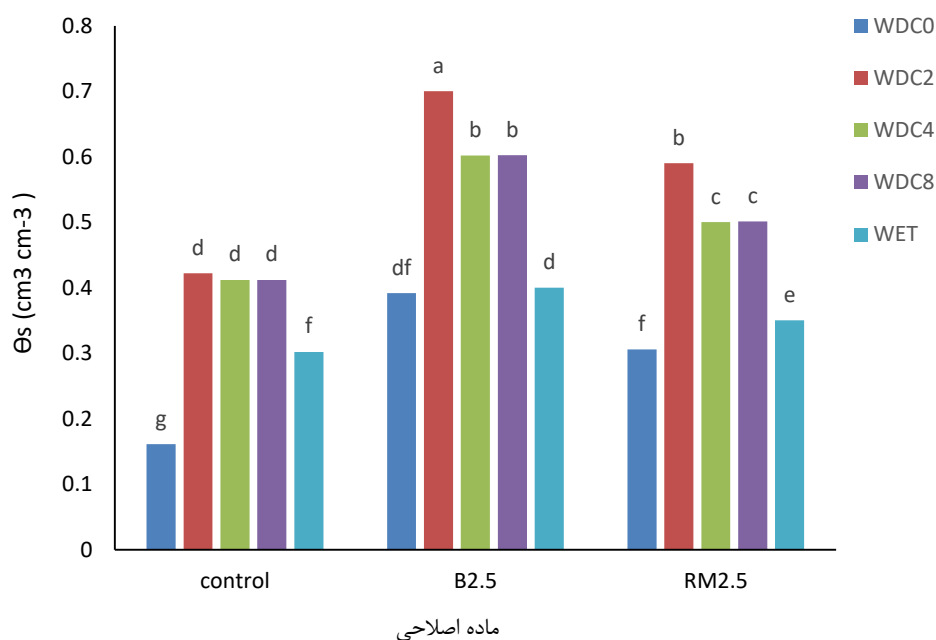
***، **، ns به ترتیب نشان‌دهنده‌ی معنی دار بودن نتایج در سطح ۹۹ درصد، ۹۵ درصد و عدم معنی دار در سطح ۹۵ می‌باشد.

مقدار رطوبت اشباع خاک (θ_s) در تیمار بیوچار و بقایای گیاهی در همه تیمارهای چرخه‌های مورد مطالعه نسبت به شاهد بیش‌تر بوده که به دلیل افزایش حجم کل منافذ خاک در اثر افزودن مواد آلی به خاک می‌باشد [کنی و همکاران، ۲۰۱۲؛ اندرندلی و همکاران، ۲۰۱۶]. همچنین افزودن بیوچار به خاک تأثیر بیش‌تری در افزایش رطوبت اشباع خاک نسبت به تیمار بقایا داشته است که به دلیل سهم بیش‌تر بیوچار در افزایش منافذ درشت خاک بوده است. به عنوان مثال در تیمار اعمال دو چرخه افزودن بیوچار و بقایای گیاهی به ترتیب سبب افزایش ۸۰ و ۵۲ درصدی رطوبت اشباع نسبت به تیمار شاهد بدون بقایا شده است. عابدی کوهپایی و همکاران [۲۰۰۸] دو نوع سوپر جاذب PR3005A و A100 استفاده کردند و دریافتند که افزایش رطوبت خاک در خاک‌های رسی کمتر از بافت‌های لومی‌شنی و لومی بود. آنها علت احتمالی این امر را به انبساط کمتر سوپر جاذب‌ها در خاک رسی نسبت دادند و برای خاک‌های رس مقادیر کمتر سوپر جاذب را توصیه نمودند. علت افزایش میزان رطوبت تأثیر مثبت بیوچار و بقایا در تشکیل خاکدانه‌ها، بهبود ساختمان خاک و در نتیجه افزایش تخلخل و منافذ درشت خاک می‌باشد [امامی و همکاران، ۱۳۹۱].

بیشترین اثر چرخه‌های تر و خشک شدن بر افزایش رطوبت اشباع خاک مربوط به تیمار اعمال دو چرخه بوده است که به دلیل افزایش قابل توجه منافذ ساختمانی در این تیمار است. مشابه با روند ساختمانی‌سازی در خاک (شکل ۴-۱۳) با افزایش تعداد چرخه‌ها به دلیل شکسته شدن پیوند بین خاکدانه‌ها و افزایش منافذ ریزتر، رطوبت اشباع نیز کاهش یافته است.

(control: شاهد، B: بیوچار، RM: بقایای گیاهی، WDC: چرخه‌های خشک و مرطوب شدن، Wet:

همیشه مرطوب)



شکل ۴-۱۳- اثر مواد اصلاح کننده و چرخه‌های تر و خشک شدن بر رطوبت اشباع خاک.

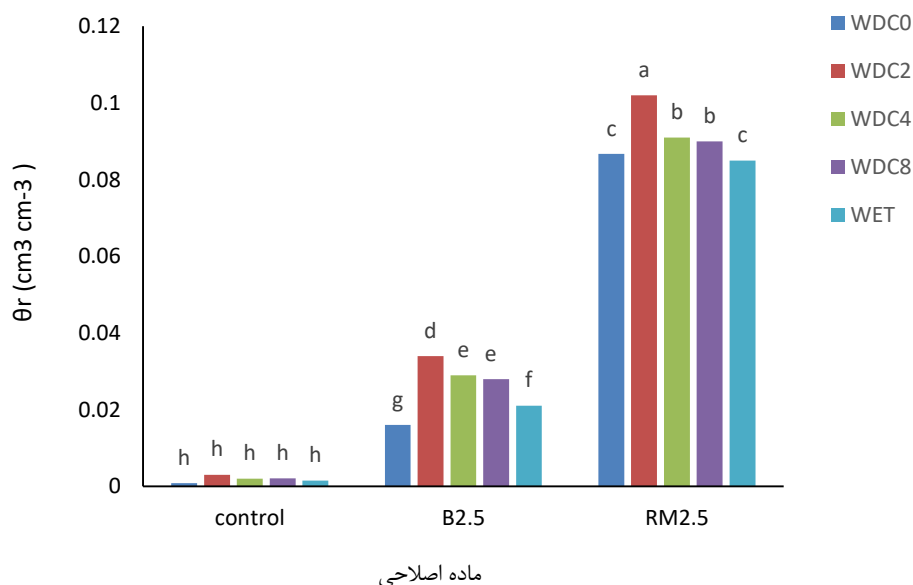
افزودن بیوچار و بقایای گیاهی به خاک سبب افزایش پارامتر رطوبت باقی مانده در خاک نسبت به تیمار شاهد در تمامی تعداد چرخه‌های مورد مطالعه شد (شکل ۴-۱۴). تأثیر بقایای گیاهی در افزایش رطوبت باقی مانده خاک بیش‌تر از بیوچار بوده است. این افزایش نشان دهنده افزایش فراوانی منافذ ریز و آب جذب سطحی شده در اثر افزایش ماده آلی خاک است. پژوهش‌های گائولو و همکاران [۲۰۱۴] بیان

کردند که کاربرد بیوچار سبوس برنج در خاک رسی موجب افزایش ماکروپورها، مزوپورها، میکروپورها، و اولترا میکروپورها نسبت به تیمار شاهد گردید. حق شناس گرگایی و بیگی هرچگانی [۱۳۸۹] در بررسی اثر زئولیت بر ظرفیت نگهداری آب چنین مشاهده کردند که کاربرد زئولیت باعث افزایش نگهداری رطوبت خاک شده، به گونه‌ای که مقدار θ_s و θ_r به صورت معنی‌داری افزایش یافت و اظهار داشتند که این افزایش در خاک‌های سبک بافت مشهودتر است.

در تیمار بدون بقایا تفاوت معنی‌داری بین تیمار چرخه‌های مورد مطالعه مشاهده نشد. در حالی که در دو تیمار کاربرد بیوچار و بقایا بیش‌ترین رطوبت باقی‌مانده در تیمار اعمال دو چرخه تر و خشک شدن بوده است. با افزایش تعداد چرخه‌ها رطوبت باقی‌مانده کاهش یافته اما همچنان بیش‌تر از تیمار دائما مرطوب و تیمار بدون چرخه تر و خشک شدن است (شکل ۴-۱۴).

(control: شاهد، B: بیوچار، RM: بقایای گیاهی، WDC: چرخه‌های خشک و مرطوب شدن، Wet:

همیشه مرطوب)

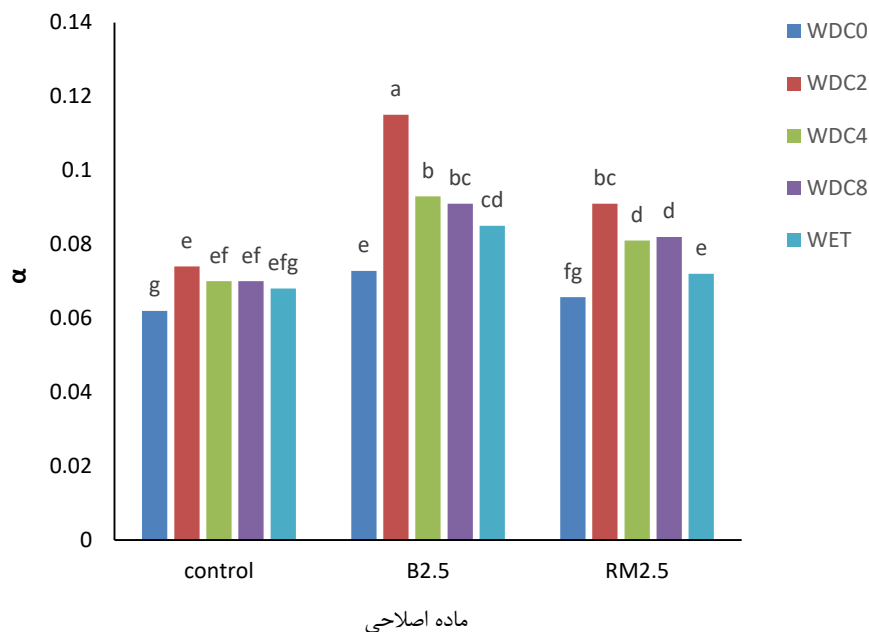


شکل ۴-۱۴- اثر مواد اصلاح کننده و چرخه‌های تر و خشک شدن بر پارامتر رطوبت باقی مانده خاک.

نتایج شکل ۴-۱۵ گویای آن است که تیمارهای حاوی مواد اصلاح کننده باعث افزایش معنی دار α نسبت به تیمار شاهد شدند و تاثیر بیوچار در افزایش α بیش تر از بقایای گیاهی بوده است. در تیمار بقایای گیاهی تنها در تیمار اعمال ۲، ۴ و ۸ چرخه افزایش معنی دار این پارامتر نسبت به تیمار بدون بقایا مشاهده شد و در تیمار دائما مرطوب و بدون چرخه افزایش معنی دار نبود (شکل ۴-۱۵). از آنجایی که پارامتر α در ارتباط با عکس مکش ورود هوا می باشد، تاثیر بیش تر بیوچار بر این پارامتر بیانگر غیر اشباع شدن سریع تر خاک در این تیمار و بهبود سریع تر وضعیت تهویه خاک در تیمار بیوچار می باشد. پژوهش نانگ [۲۰۱۲] نشان داد که همزیستی قارچ میکوریزا با گیاه علاوه بر اثرهای مثبت بر رشد گیاه باعث افزایش پایداری ساختمان خاک و منافذ آن شده و این افزایش خاکدانه سازی باعث زهکشی بهتر خاک و کاهش نگهداشت آب خاک به ویژه در مکش ماتریک زیاد می شود.

مشابه با روند خاکدانه سازی در تیمار اعمال دو چرخه بیش ترین مقدار α مشاهده و سپس کاهش یافت (شکل ۴-۱۵). در نتیجه زهکشی خاک در تیمار اعمال دو چرخه سریع تر بوده و شرایط تهویه ای احتمالاً مطلوب تری در خاک بر قرار خواهد بود. در مجموع تاثیر بیش تر بیوچار بر افزایش منافذ درشت و افزایش منافذ درشت ساختمانی در تیمار اعمال دو چرخه سبب کاهش مکش ورود هوا و زهکشی سریع تر خاک شده است.

(control: شاهد، B: بیوجار، RM: بقایای گیاهی، WDC: چرخه های خشک و مرطوب شدن، WET: همیشه مرطوب)



شکل ۴-۱۵- اثر مواد اصلاح کننده بر پارامتر α

۴-۵-۳- اثر تیمارهای آزمایشی بر رطوبت ظرفیت مزرعه (FC)

اثر اصلی و متقابل مواد اصلاحی آلی و چرخه های خشک و مرطوب شدن بر رطوبت خاک در حد ظرفیت مزرعه به ترتیب با در نظر گرفتن مکش ماتریک ۱۰۰ و ۳۳۰ سانتی متر در سطح ۹۹ درصد معنی دار بوده است (جدول ۴-۶).

جدول ۴-۶- اثر اصلی و متقابل مواد اصلاح کننده و چرخه های تر و خشک شدن بر ظرفیت زراعی (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP)، تخلخل تهویه ای (AFP)

میانگین مربعات				درجه آزادی	منابع تغییر
AFP_{10}	PWP	FC_{330}	FC_{100}		
۰/۱۶۱۴**	۰/۰۰۴۲**	۰/۰۱۱۳**	۰/۰۳۳۱**	۲	ماده اصلاحی (A)
۰/۱۲۴۱**	۰/۰۸۶۹**	۰/۱۲۱۷**	۰/۱۲۷۵**	۴	چرخه (WDC)
۰/۰۰۲۲**	۰/۰۰۱۸**	۰/۰۰۲۸**	۰/۰۰۲۷**	۸	اثر متقابل (A×WDC)
۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۳۰	خطا
۳/۶۳	۵/۷۳	۴/۰۶	۳/۶۱	-	ضریب تغییرات

ns، *، ** به ترتیب نشان دهنده معنی دار بودن نتایج در سطح ۹۹ درصد، ۹۵ درصد و عدم معنی دار در سطح ۹۵ می باشد.

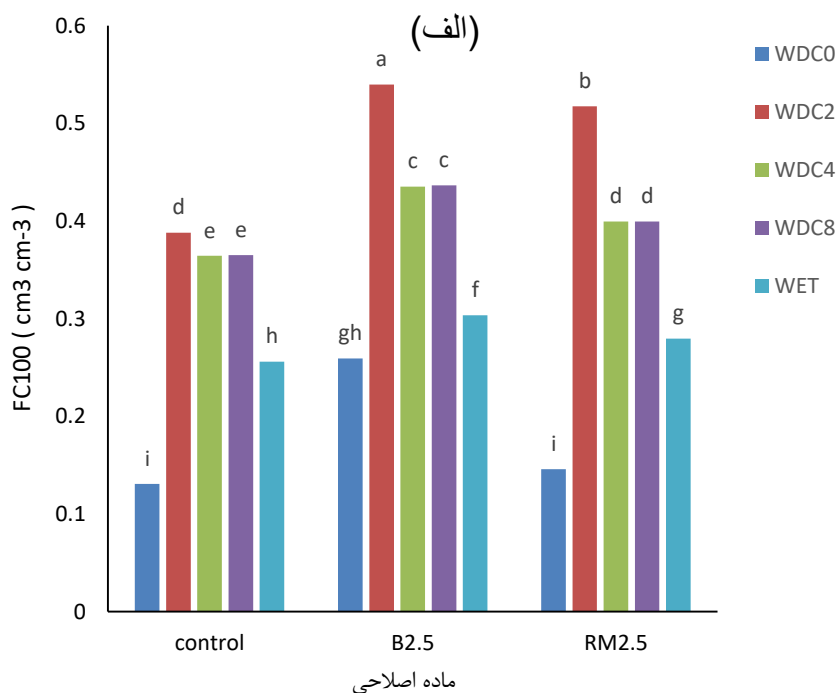
تیمار کردن خاک مورد مطالعه با مواد آلی موجب افزایش رطوبت ظرفیت مزرعه نسبت به تیمار شاهد شده است. همانطور که در بررسی روند منحنی مشخصه رطوبتی مشاهده شد، کاربرد مواد آلی اصلاحی سبب افزایش نگهداشت آب در خاک شده و در نتیجه رطوبت در نقطه ظرفیت مزرعه در هر دو مکش ۱۰۰ و ۳۳۰ سانتی متر افزایش یافته است. هانای و همکاران [۲۰۰۴] نشان دادند که با افزودن ماده آلی میزان رطوبت در نقطه ظرفیت مزرعه افزایش می یابد و علت اصلی چنین مشاهده ای، افزایش میزان ماده آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک بیان شد. با افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و بار منفی توان جذب و نگهداری آب بالا می رود. آنها اظهار داشتند که مواد آلی در مقایسه با رس ها ظرفیت تبادل کاتیونی بالاتری دارند و در نتیجه ظرفیت نگهداری آب را افزایش داده و آب جذب شده را راحت تر از رس ها در اختیار گیاه قرار می دهند. نناج پژوهش یزدان پناهی و همکاران [۱۳۹۸] نیز نشان داد که افزودن بیوپار کمپوست زباله شهری موجب افزایش معناداری ظرفیت مزرعه شد.

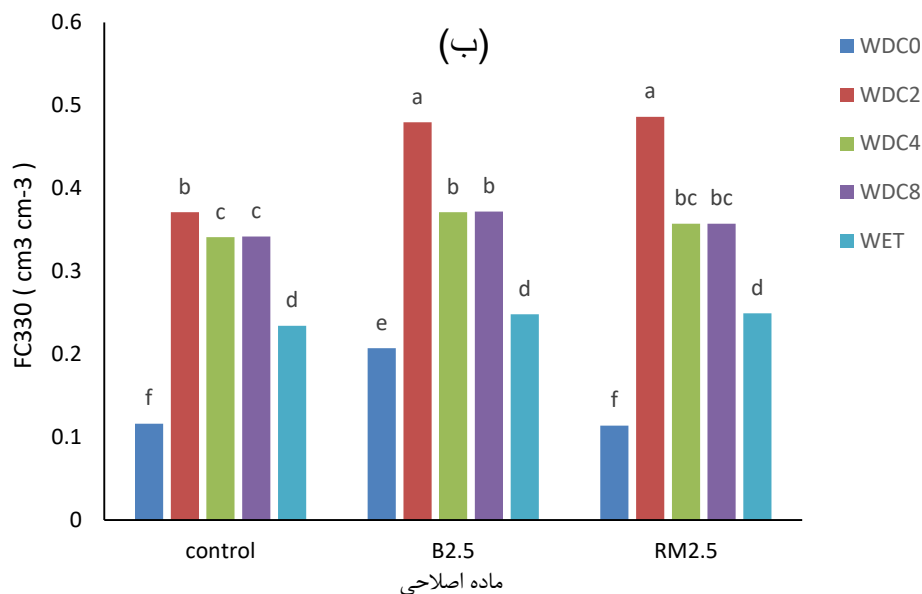
تأثیر بیوپار در افزایش ظرفیت مزرعه در مقایسه با بقایای گیاهی در همه تیمارهای چرخه های تر و خشک شدن مورد مطالعه بیش تر بوده است. پژوهش کوئید و همکاران [۲۰۱۵] بر روی اصلاح خاک با بیوپار حاصل از شاخسارهای درخت نشان داد که افزودن این بیوپار، مقدار آب موجود در خاک را افزایش داده و باعث بالا بردن مقدار آب موجود در ظرفیت مزرعه در خاک شد.

همچنین اعمال چرخه‌های خشک و مرطوب شدن نیز باعث افزایش ظرفیت مزرعه نسبت به تیمار بدون چرخه و تیمار دائما مرطوب شده است. در تیمار چرخه‌ها نیز بیش‌ترین ظرفیت مزرعه مربوط به تیمار دو چرخه بوده و افزایش بیش‌تر چرخه‌ها سبب کاهش رطوبت در این نقطه شده است. رطوبت خاک در نقطه ظرفیت مزرعه بیشتر تحت تأثیر ساختمان خاک، میزان و نوع تخلخل است؛ به همین دلیل ماده آلی و اعمال چرخه‌ها با بهبود ساختمان خاک باعث افزایش رطوبت در این نقطه می‌شود [سامان مجد، ۱۳۹۲]. در تیمار دائما مرطوب نیز ظرفیت مزرعه در هر دو نقطه پتانسیلی مورد مطالعه بیش‌تر از تیمار بدون اعمال چرخه‌ها بوده است. چنین اظهار شده است که وجود رطوبت در خاک سبب تحریک فعالیت‌های میکروبی شده و تا حدی بهبود وضعیت ساختمانی و پایداری منافذ خاک را به دنبال دارد [ورجیهان و همکاران، ۲۰۱۰]. به نظر می‌رسد که همین امر باعث افزایش ظرفیت مزرعه در تیمار دائما مرطوب نسبت به تیمار دائما خشک شده است.

(control: شاهد، B: بیوچار، RM: بقایای گیاهی، WDC: چرخه های خشک و مرطوب

شدن، WET: همیشه مرطوب)





شکل ۴-۱۶- اثر مواد اصلاحی آلی و چرخه‌های تر و خشک شدن بر: الف) ظرفیت مزرعه با مکش ۱۰۰ سانتی‌متری (FC۱۰۰) و ب) ظرفیت مزرعه با مکش ۳۳۰ سانتی‌متری (FC۳۳۰)

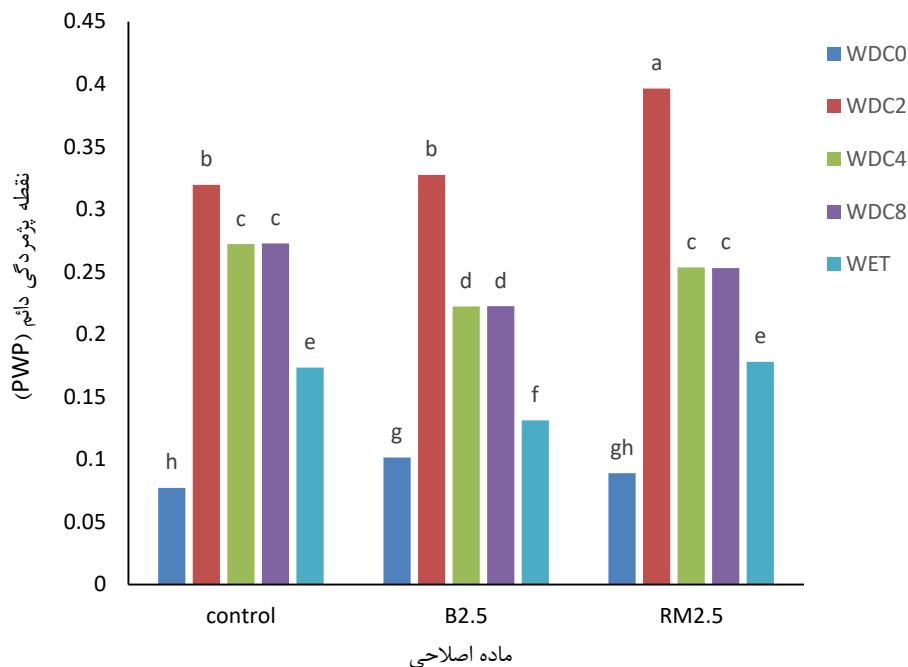
۴-۵-۴- اثر تیمارهای آزمایشی بر نقطه‌ی پژمردگی دائم (PWP)

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تاثیر نوع ماده اصلاحی و چرخه‌های تر و خشک شدن بر نقطه‌ی پژمردگی دائم در سطح ۹۹ درصد معنی دار بوده است (جدول ۴-۶).

افزودن بقایای آلی به خاک تنها در تیمار اعمال دو چرخه تر و خشک شدن سبب افزایش معنی‌دار نقطه پژمردگی دائم شده است (شکل ۴-۱۷).

(control: شاهد، B: بیوچار، RM: بقایای گیاهی، WDC: چرخه های خشک و مرطوب

شدن، WET: همیشه مرطوب)



شکل ۴-۱۷- اثر متقابل ماده اصلاحی و چرخه های تر و خشک شدن بر نقطه پژمردگی دائم (pwp)

چنین گزارش شده است که افزودن بقایای گیاهی به خاک باعث افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک شده و با افزایش مقدار بقایای گیاهی این ظرفیت بیشتر شده است [پارتاساراتی ۲۰۰۸]. نتایج پژوهش یزدان پناهی و همکاران [۱۳۹۸] نیز نشان داد که افزودن بیوچار کمپوست زباله شهری سبب افزایش نقطه پژمردگی دائم با میانگین ۱۶/۸ درصدی نسبت به تیمار شاهد شد.

از طرفی رطوبت خاک در نقطه پژمردگی دائم بیشتر تحت تأثیر میزان رس و مواد آلی در خاک است. به نظر می رسد افزودن بقایای آلی به تنهایی و بدون اعمال چرخه ها نتوانسته کمکی در افزایش رطوبت در نقطه پژمردگی دائم نماید. درحالی که در تیمار شاهد بدون بقایا با اعمال چرخه ها به دلیل خاکدانه سازی ظرفیت نگهداشت آب در خاک افزایش یافته است. نتایج تحقیقات گلاسر و همکاران [۲۰۰۲] و همچنین اویانگ و همکاران [۲۰۱۳] نیز با نتایج بدست آمده در شکل ۴-۱۷ مطابقت دارد.

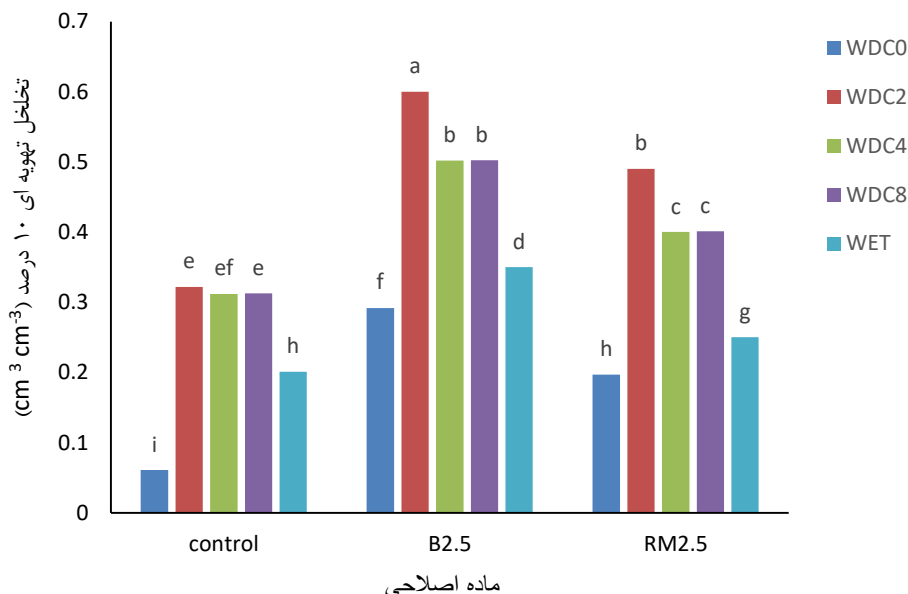
اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن در همه تیمارهای مورد بررسی سبب افزایش رطوبت خاک در نقطه پژمردگی دائم نسبت به تیمار صفر چرخه شده است. بیش‌ترین افزایش نسبت به تیمار بدون چرخه مربوط به تیمار اعمال دو چرخه تر و خشک شدن بوده است. تأثیر اعمال دو چرخه بر افزایش رطوبت در این نقطه در مقایسه با تیمار بدون چرخه در تیمار کاربرد بقایای گیاهی بیش‌تر از بیوچار بوده و کاربرد ۴ و ۸ چرخه سبب کاهش معنی‌دار رطوبت شده است (شکل ۴-۱۷). به طور کلی بیوچار باعث افزایش منافذ درشت خاک و در نتیجه زهکشی بهتر خاک سبب شده تا رطوبت در نقطه پژمردگی دائم در مقایسه با کاربرد تیمار بقایا افزایش کم‌تری داشته باشد.

۴-۵-۵- اثر تیمارهای آزمایشی بر تخلخل تهویه‌ای ده درصد ($AFP_{10\%}$)

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴-۶) نشان داد که اثر مواد اصلاح کننده و اثر چرخه‌های تر و خشک شدن بر تخلخل تهویه ای ۱۰ درصد در سطح آماری یک درصد معنی دار شده است.

(control: شاهد، B: بیوچار، RM: بقایای گیاهی، WDC: چرخه های خشک و مرطوب

شدن، WET: همیشه مرطوب)



شکل ۴-۱۸- برهمکنش ماده اصلاح کننده و چرخه های تر و خشک شدن بر تخلخل تهویه ای ۱۰ درصد (AFP)

شکل (۴-۱۸) اثر متقابل مواد اصلاح کننده و چرخه های تر و خشک بر تخلخل تهویه ای ۱۰ درصد خاک را نشان می دهد. استفاده از اصلاح کننده آلی سبب افزایش تخلخل تهویه ای ۱۰ درصد در خاک شده است. با افزایش مواد آلی، ذرات خاک هم آوری شده باعث تشکیل خاکدانه شده و منافذ جدید در خاک ایجاد شده اند [لیو و همکاران، ۲۰۰۵]. بالاترین مقدار تخلخل خاک مربوط به تیمار بیوچار و کمترین مقدار این پارامتر مربوط به تیمار شاهد بدون اصلاح کننده بوده است. در واقع می توان گفت افزودن بیوچار باعث افزایش دو برابری تخلخل تهویه ای خاک ۱۰ درصد شده است. افزودن بیوچار سبب کاهش جرم مخصوص ظاهری و تراکم ذرات خاک شده است و بر تخلخل خاک به ویژه تخلخل درشت خاک تأثیر گذار بوده است. ذکر این نکته خالی از لطف نیست که ذرات بیوچار به طور متوسط تخلخلی بین ۷۰ تا ۹۰ درصد دارند که اضافه کردن این ذرات متخلخل به خاک می تواند موجب بهبود قابل ملاحظه تخلخل تهویه ای ۱۰٪ خاک شود [بلنکوکنکویی، ۲۰۱۷].

اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن بر تخلخل تهویه‌ای در تمامی تیمارهای اصلاحی سبب افزایش تخلخل تهویه‌ای نسبت به تیمار فاقد چرخه شده است (شکل ۴-۱۸). اعمال چرخه سبب بهبود ساختمان خاک و تشکیل خاکدانه‌های جدید، افزایش منافذ درشت و در واقع کاهش منافذ ریز در خاک می‌شود. همچنین هورن و دکستر [۱۹۸۹]، گزارش کردند که چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی باعث آرایش یافتن مجدد ذرات و افزایش پایداری خاکدانه‌ها و بهبود ساختمان خاک می‌شود. از آنجایی که اعمال ۲ چرخه تر و خشک شدن بیش‌ترین تأثیر را در افزایش خاکدانه‌سازی داشته است، تخلخل تهویه‌ای ۱۰ درصد را نیز بیش‌تر از سایر تیمارها افزایش داده و اعمال تعداد بیش‌تر چرخه‌ها به دلیل شکسته شدن خاکدانه‌ها باعث کاهش این پارامتر شده است.

۴-۵-۶- اثر تیمارهای آزمایشی بر آب فراهم خاک (PAW)

اثر مواد اصلاحی آلی و چرخه‌های تر و خشک شدن بر آب فراهم خاک (PAW_{100} و PAW_{330}) به ترتیب با در نظر گرفتن مکش ماتریک ۱۰۰ و ۳۳۰ سانتی‌متر برای محاسبه رطوبت خاک در ظرفیت مزرعه، در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار بوده است (جدول ۴-۷). با افزودن مواد اصلاح کننده به خاک آب فراهم خاک با هر دو مفهوم یاد شده افزایش یافت و تأثیر بیوچار بیش‌تر از بقایای گیاهی بوده تا جایی که در دو تیمار صفر چرخه و دائماً مرطوب تیمار شاهد بدون بقایا و تیمار اعمال بقایای گیاهی معنی‌دار نبود (شکل ۴-۱۹). به طور کلی افزودن مواد آلی به خاک سبب افزایش نگهداشت آب در خاک شده و در نتیجه رطوبت در نقطه پتانسیلی ظرفیت مزرعه و پژمردگی دائم افزایش یافته است. بیش‌تر بودن اثر بیوچار بر آب فراهم خاک به دلیل تأثیر بیش‌تر آن بر منافذ درشت خاک و در نتیجه تأثیر بیش‌تر بر رطوبت در ظرفیت مزرعه و تأثیر کم‌تر آن بر رطوبت در نقطه پژمردگی دائم در مقایسه با تیمار بقایا بوده است (شکل ۴-۱۶ و ۴-۱۷).

جدول ۴-۷- اثر اصلی و متقابل مواد اصلاح کننده و چرخه های تر و خشک شدن بر آب فراهم خاک (PAW)، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (LLWR)، گنجایش آب انتگرالی (IWC)

میانگین مربعات					درجه آزادی	منابع تغییر
IWC	LLWR ₃₃₀	LLWR ₁₀₀	PAW ₃₃₀	PAW ₁₀₀		
۰/۱۳۸۹**	۰/۰۴۶۹**	۰/۱۱۰۶**	۰/۰۲۳۵**	۰/۰۵۲۵**	۲	ماده اصلاحی (A)
۰/۰۰۳۷**	۰/۰۰۴۵**	۰/۰۰۶۳**	۰/۰۰۴۰**	۰/۰۰۵۷**	۴	چرخه (WDC)
۰/۰۰۱۴**	۰/۰۰۰۶**	۰/۰۰۰۹**	۰/۰۰۰۴**	۰/۰۰۰۵**	۸	اثر متقابل (A×WDC)
۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۳۰	خطا
۱۱/۱۷	۱۴/۸۶	۱۰/۹۸	۱۳/۸۹	۹/۷۴	-	ضریب تغییرات

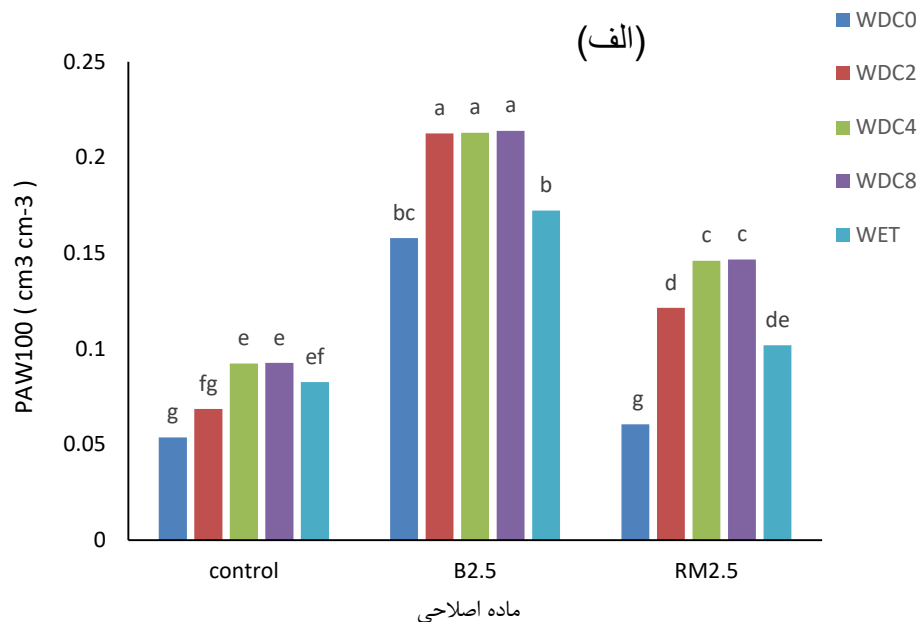
***، **، ns به ترتیب نشان دهنده ی معنی دار بودن نتایج در سطح ۹۹ درصد، ۹۵ درصد و عدم معنی دار در سطح ۹۵ می باشد.

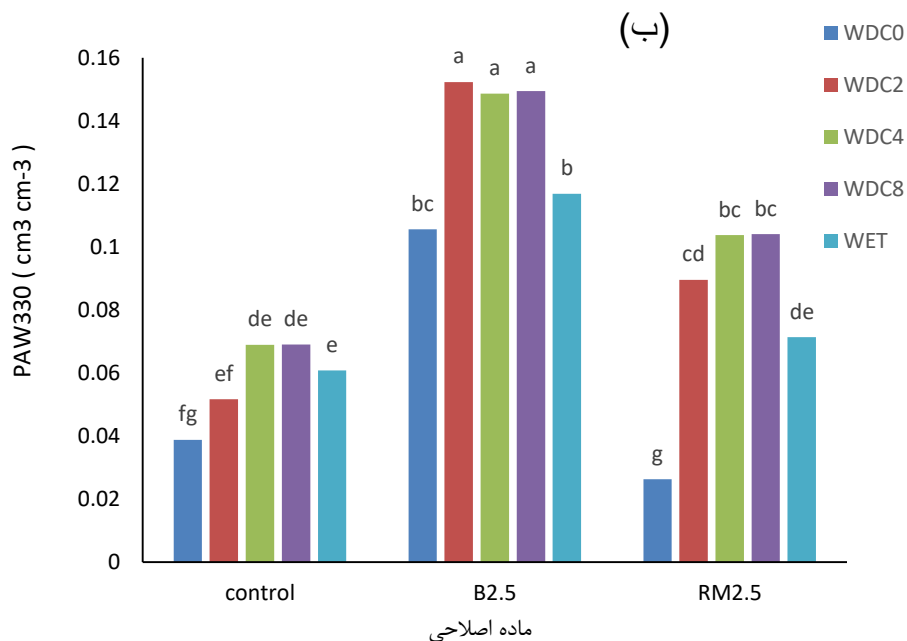
اعمال چرخه های تر و خشک شدن، آب فراهم خاک را با هر دو مفهوم یاد شده نسبت به تیمار شاهد افزایش داده است. در تیمار شاهد بدون بقایا و در تیمار بقایای گیاهی افزایش چرخه های خشک و مرطوب شدن مقدار رطوبت در هر دو نقطه ظرفیت مزرعه و پژمردگی دائم را افزایش داده است. با افزایش چرخه ها تأثیر مثبت آن ها بر افزایش مقدار رطوبت بر نقطه پژمردگی دائم کاهش یافته است. به همین دلیل با وجود بیش تر بودن رطوبت در هر دو نقطه پتانسیلی مهم در محاسبه آب فراهم خاک در تیمار دو چرخه، میزان آب فراهم خاک در این تیمار نسبت به دو تیمار ۴ و ۸ چرخه کم تر بوده است. با این وجود در تیمار بیوچار به دلیل اثر بیش تر این تیمار بر منافذ درشت خاک و در نتیجه بر نقطه ظرفیت زراعی، تفاوت تیمار ۲ چرخه با ۴ و ۸ چرخه معنی دار نبوده است.

همچنین در تیمار دائما مرطوب میزان آب فراهم خاک در دو تیمار شاهد بدون بقایا و تیمار بقایای گیاهی بیش تر از تیمار صفر چرخه بوده که به دلیل بهبود فعالیت های بیولوژیک خاک در شرایط مرطوب و افزایش خاکدانه سازی در این تیمار بوده که در مجموع باعث افزایش نگهداشت آب خاک در دو نقطه پتانسیلی مهم در محاسبه آب فراهم خاک شده است. در تیمار بیوچار اختلاف بین تیمار صفر چرخه و تیمار دائما مرطوب معنی دار نبوده که احتمالا به دلیل اثرات مثبت بیوچار در افزایش نگهداشت آب بوده تا جایی که اثر خشک بودن خاک و کاهش فعالیت میکروبی در تیمار صفر چرخه را تعدیل نموده است. در

انطباق با این یافته‌ها، ابل و همکاران [۲۰۱۳] همبستگی مثبت بین میزان کاربرد بیوچار و گنجایش نگهداشت آب خاک را گزارش کردند. برخی بیوچارها به دلیل داشتن سطح ویژه بالا، باعث تغییر در توزیع اندازه ذرات و تخلخل خاک شده و میزان آب قابل دسترس گیاه را افزایش می‌دهند [بورل و همکاران، ۲۰۱۶]. نتایج پژوهش‌های سلیک و همکاران [۲۰۰۵] نشان داد که افزودن کود آلی و کمپوست به خاک سبب افزایش PAW شد. در نتیجه با کاربرد بیوچار و بقایای گیاهی در خاک، مصرف آب آبیاری کمتر شده و باعث می‌شود که به‌ویژه در مناطق خشک، گیاهان در شرایط تنش آبی از آب خاک استفاده بیشتری ببرند.

(control: شاهد، B: بیوچار، RM: بقایای گیاهی، WDC: چرخه های خشک و مرطوب شدن، WET: همیشه مرطوب)





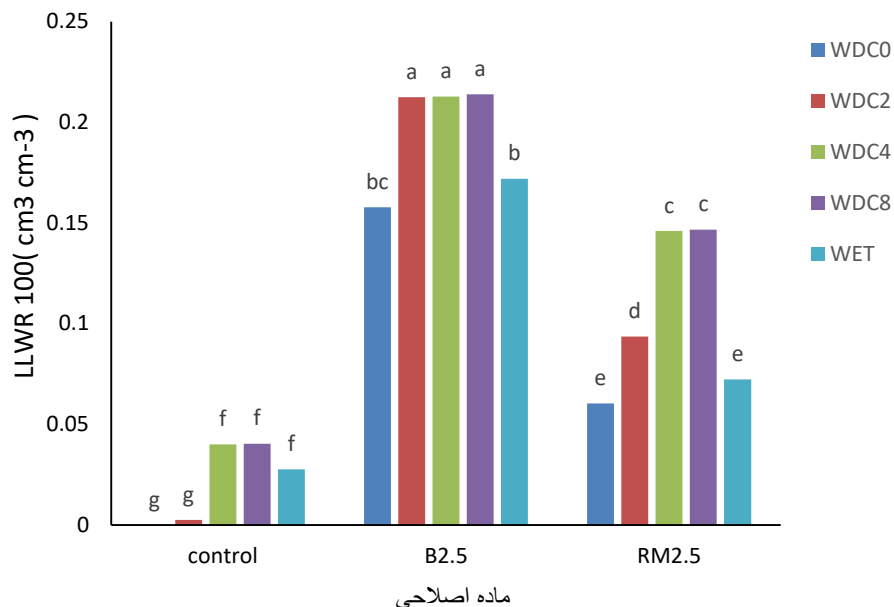
شکل ۴-۱۹- اثر تیمارهای آزمایشی بر: الف) آب قابل استفاده خاک با مکش ۱۰۰ سانتی متر (PAW_{۱۰۰}) و ب) آب قابل استفاده خاک با مکش ۳۳۰ سانتی متر (PAW_{۳۳۰})

۴-۵-۷- اثر تیمارهای آزمایشی بر دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (LLWR)

نتایج تجزیه واریانس دامنه‌ی رطوبتی با حداقل محدودیت ($LLWR_{100}$ و $LLWR_{330}$) در جدول (۴-۷) ارائه شده است. اثر اصلی و متقابل ماده اصلاحی آلی و چرخه‌های خشک و مرطوب شدن بر دامنه‌ی رطوبتی با حداقل محدودیت با در نظر گرفتن دو مکش ۱۰۰ و ۳۳۰ سانتی متر برای ظرفیت مزرعه در سطح ۹۹ درصد معنی دار بوده است. در شکل‌های (۴-۲۰) و (۴-۲۱) مشاهده می‌شود که بین کمیت‌های $LLWR_{100}$ و $LLWR_{330}$ تفاوت وجود دارد که دلیل این تفاوت بخاطر انتخاب حد بالایی متفاوت (FC_{100} و FC_{330}) در هنگام محاسبات آب قابل استفاده خاک بوده است.

(control: شاهد، B: بیوچار، RM: بقایای گیاهی، WDC: چرخه های خشک و مرطوب

شدن، WET: همیشه مرطوب)



شکل ۴-۲۰- برهمکنش ماده اصلاح کننده و چرخه های تر و خشک شدن بر دامنه رطوبتی بدون محدودیت (LLWR100)

در تیمار شاهد بدون بقایای گیاهی دامنه ی رطوبتی با حداقل محدودیت با هر دو پتانسیل مورد مطالعه در تیمار بدون اعمال چرخه صفر و در تیمار اعمال دو چرخه بسیار ناچیز بوده است. در این دو تیمار حد بالایی این دامنه توسط تخلخل تهویه ای و حد پایینی توسط رطوبت در نقطه پژمردگی دائم کنترل شده است. در حالی که مقدار رطوبت در شرایط تخلخل تهویه ای ۱۰ درصد از مقدار رطوبت در نقطه پژمردگی دائم در تیمار صفر چرخه کم تر و در تیمار ۲ چرخه اندکی بیش تر بوده است. همین امر سبب شده تا محدودیت تهویه جدی در این دو تیمار مشاهده شود و دامنه ی رطوبتی با حداقل محدودیت در این دو تیمار بسیار ناچیز باشد. این در حالی است که مقدار آب قابل استفاده خاک با مفهوم آب فراهم خاک، بیشتر بوده و در نتیجه در مدیریت آب مزرعه استفاده از مفهوم آب فراهم در این دو تیمار می تواند سبب اشتباه در برنامه ریزی آبیاری شود.

همچنین در تیمار شاهد (بدون بقایا) با افزایش چرخه‌ها از ۲ به ۸ چرخه، دامنه‌ی رطوبتی با حداقل محدودیت افزایش یافته و تفاوتی بین تیمار ۴ و ۸ چرخه و تیمار دائماً مرطوب مشاهده نشد. در این تیمارها نیز با وجود کاهش مشکل تهویه، همچنان محدودیت حاصل از آن وجود داشته و حد بالایی دامنه‌ی رطوبتی با حداقل محدودیت توسط تخلخل تهویه‌ای کنترل می‌شود.

در تیمارهای کاربرد بیوچار و بقایای گیاهی نیز کاربرد چرخه‌های خشک و مرطوب شدن سبب افزایش رطوبت در دامنه‌ی رطوبتی با حداقل محدودیت در مقایسه با تیمار بدون چرخه شده است. در این تیمارها رطوبت در تخلخل تهویه‌ای ۱۰ درصد در مقایسه با تیمار بدون چرخه افزایش یافته و حد بالایی دامنه‌ی رطوبتی با حداقل محدودیت توسط نقطه ظرفیت مزرعه کنترل شده و مشکل تهویه خاک با افزودن بقایای گیاهی و بیوچار همراه با چرخه‌های خشک و مرطوب شدن به ترتیب کاهش یافته و یا حل شده است. در واقع در تیمار ۲ چرخه دامنه‌ی رطوبتی با حداقل محدودیت در شرایط کاربرد بقایای آلی از تیمار ۴ و ۸ چرخه کم‌تر بوده است. در حالی که در تیمار بیوچار تفاوت بین تیمارهای اعمال چرخه‌ها بسیار ناچیز بوده است. بررسی وضعیت تهویه خاک نشان می‌دهد که در تیمار کاربرد بیوچار و هر سه تیمار اعمال چرخه‌ها میزان رطوبت در تخلخل تهویه‌ای ۱۰ درصد بیش‌تر از ظرفیت مزرعه بوده که نشان دهنده عدم وجود مشکل تهویه در این تیمارها است. در حالی که با افزودن بقایای گیاهی در تیمار ۲ چرخه همچنان مشکل تهویه وجود داشته و مقدار رطوبت آن کم‌تر از ظرفیت مزرعه می‌باشد. همین امر باعث شده تا دامنه‌ی رطوبتی با حداقل محدودیت در این تیمار نسبت به تیمارهای ۴ و ۸ چرخه محدودتر شود.

همچنین مقایسه دامنه‌ی رطوبتی با حداقل محدودیت در تیمار دائماً مرطوب با سایر تیمارها نشان داد که در تیمارهای دارای بقایا و بیوچار تفاوتی بین این تیمار با تیمار صفر چرخه وجود نداشته اما میزان رطوبت در این دامنه نسبت به تیمارهای اعمال چرخه‌ها به صورت معنی‌داری کم‌تر بوده است که به دلیل اثر مثبت چرخه‌ها در کنترل حدود بالا و پایین این محدوده می‌باشد.

در همه تیمارهای چرخه‌های مورد مطالعه دامنه‌ی رطوبتی با حداقل محدودیت در تیمار بیوچار بیش‌تر از بقایای گیاهی بوده است. از آنجایی که در همه این تیمارها حد پایین توسط نقطه پژمردگی دائم کنترل شده و مقاومت مکانیکی مشکلی برای رشد ریشه ایجاد نکرده است، به نظر می‌رسد نقش بیوچار در

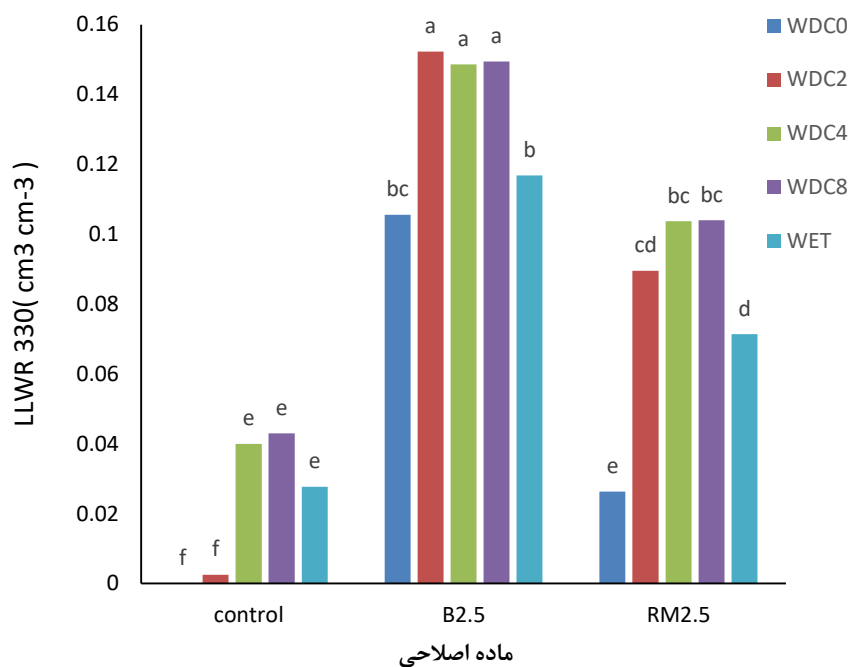
افزایش تخلخل درشت خاک باعث بهبود وضعیت تهویه در تیمارهای دارای بیوچار شده و از این راه دامنه‌ی رطوبتی با حداقل محدودیت را گسترش داده است.

توجه به این نکته ضروری است که در همه تیمارهای مورد مطالعه مکش معادل مقاومت فروری ۲ مگاپاسکال بیش‌تر از ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر بوده و در نتیجه محدودیتی برای رشد ریشه وجود نداشته و حد پایین دامنه‌ی رطوبتی با حداقل محدودیت توسط نقطه پژمردگی دائم کنترل شده است. تنها در دو تیمار فاقد بقایای گیاهی در شرایط صفر چرخه و دائما مرطوب مکش معادل مقاومت فروری ۲ مگاپاسکال به طور میانگین به ترتیب ۱۵۶۳۹ و ۱۵۷۹۹ سانتی‌متر بوده که به نقطه پژمردگی دائم بسیار نزدیک است. باید توجه داشت که نقطه پژمردگی دائم برای همه گیاهان مکش ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر نبوده و مقاومت بحرانی نیز برای همه گیاهان ۲ مگاپاسکال نمی‌باشد. بنابراین در شرایط وجود گیاهان حساس به خشکی بررسی این دامنه‌های رطوبت قابل استفاده باید با در نظر گیری شرایط گیاهان صورت گیرد.

مشابه با این یافته‌ها، صفادوست و همکاران [۲۰۱۴] نیز دریافتند که مقدار LLWR در خاک لوم رسی بیشتر از خاک لوم شنی است. فیضی دولت‌آبادی [۱۳۸۹] تاثیر کشت دو گیاه گندم و یونجه را در دو بافت خاک لوم شنی و لوم رسی بر مقدار LLWR بررسی کرد. مقدار LLWR در خاک‌های تحت کشت یونجه بیشتر از مقدار آن در خاک‌های تحت کشت گندم بود. صرف نظر از نوع کشت که بر ساختمان خاک اثر دارد، مقادیر زیاد رس در خاک لوم رسی سبب افزایش مقاومت فروری و در نتیجه کاهش مقدار LLWR شد.

(control: شاهد، B: بیوچار، RM: بقایای گیاهی، WDC: چرخه های خشک و مرطوب

شدن، WET: همیشه مرطوب)



شکل ۴-۲۱- برهمکنش ماده اصلاح کننده و چرخه های تر و خشک شدن بر دامنه رطوبتی بدون

محدودیت (LLWR₃₃₀)

۴-۵-۸- اثر تیمارهای آزمایشی بر گنجایش آب انتگرالی

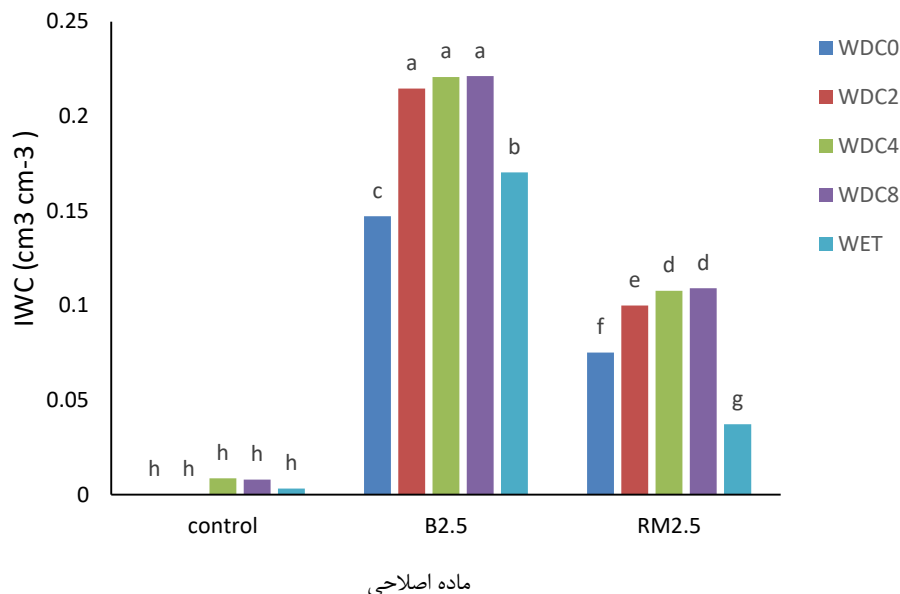
نظر به معنی دار شدن اثرهای اصلی و متقابل مواد اصلاح کننده و چرخه ها بر گنجایش آب انتگرالی

(IWC) در سطح ۹۹ درصد (جدول ۴-۷)، نتایج مقایسه میانگین های مربوط به این پارامتر در قالب شکل

۴-۲۲ ارائه شده است.

(control: شاهد، B: بیوچار، RM: بقایای گیاهی، WDC: چرخه های خشک و مرطوب

شدن، WET: همیشه مرطوب)



شکل ۴-۲۲- برهمکنش ماده اصلاح کننده و چرخه های تر و خشک شدن بر گنجایش آب انتگرالی (IWC)

در همه تیمارهای چرخه های مورد مطالعه در تیمار فاقد مواد اصلاحی میزان گنجایش آب انتگرالی بسیار ناچیز بوده در حالی که در دو مفهوم آب فراهم خاک و دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت میزان آب قابل استفاده خاک بیش تر بوده است. در نتیجه استفاده از مفهوم گنجایش آب انتگرالی با در نظر گرفتن تدریجی محدودیت ها توانسته آب قابل استفاده خاک را دقیق تر محاسبه نماید.

افزودن بقایای گیاهی و بیوچار به خاک سبب کاهش بخشی از محدودیت ها شده و گنجایش آب انتگرالی را افزایش داده است. در این میان، تأثیر بیوچار بر افزایش گنجایش آب انتگرالی بیش تر از بقایای گیاهی بوده است. اعمال چرخه های تر و خشک شدن نیز سبب افزایش گنجایش آب انتگرالی نسبت به تیمار بدون چرخه و دائما مرطوب شده است. بهبود شرایط فیزیکی خاک در اثر اعمال چرخه های تر و خشک شدن و نقش آن ها در خاکدانه سازی و تغییر توزیع اندازه منافذ خاک از یک سو و کاهش مقاومت

مکانیکی خاک از سوی دیگر سبب کاهش محدودیت‌های مورد نظر در محاسبه گنجایش آب انتگرالی شده است. از آنجایی که در محاسبه گنجایش آب انتگرالی دامنه‌ای از رطوبت مربوط به تخلخل تهویه‌ای بین ۱۰ تا ۱۵ درصد و مقاومت مکانیکی نیز در دامنه ۱/۵ تا ۲/۵ مگاپاسکال منظور می‌شوند، در تیمارهای مورد مطالعه قطعاً محدودیت مربوط به مقاومت تهویه‌ای و مکانیکی به صورت شدیدتری نسبت به دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت بر محاسبه گنجایش آب انتگرالی تأثیرگذار بوده و به همین دلیل در تیمار فاقد مواد اصلاحی گنجایش آب انتگرالی بسیار ناچیز و در برخی تیمارها صفر بوده است. در این شرایط نقش چرخه‌ها و استفاده از مواد اصلاحی در کنترل این محدودیت‌ها از اهمیت بیش‌تری برخوردار بوده است. میناسنی و مکبراتی [۲۰۰۳] با انجام پژوهشی برای ۱۵۲۰ گروه از خاک‌های استرالیا و جهان بررسی کرده و نشان دادند با افزایش رس و مواد آلی گنجایش آب انتگرالی افزایش می‌یابد. همچنین نتایج پژوهش درستکار [۱۳۹۴] حکایت از آن داشت که افزودن قارچ میکوریزا سبب افزایش گنجایش آب انتگرالی نسبت به تیمار شاهد شده‌است.

فصل ۵ نتیجه گیری

۵-۱- نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش اهمیت اثر بیوچار و چرخه‌های خشک و مرطوب شدن بر مفاهیم آب قابل استفاده مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل از این پژوهش به صورت مختصر به شرح ذیل می‌باشد:

- ❖ افزایش بیوچار و بقایای گیاهی به مقدار ۲/۵ درصد باعث افزایش معنی‌دار کربن آلی خاک شد. کربن آلی خاک در تیمار بقایای گیاهی برگ درختان چنار و کاج سوزنی، بیش‌تر از تیمار بیوچار در همه تیمارهای چرخه‌های خشک و مرطوب شدن بود. از سوی دیگر، در تیمارهای دارای بقایا و بیوچار، افزایش تعداد چرخه‌ها از صفر به ۴ چرخه تفاوت معنی‌داری در میزان ماده آلی خاک ایجاد ننموده در حالی که با افزایش تعداد چرخه‌ها به ۸ چرخه، ماده آلی خاک کاهش یافته است.
- ❖ با اضافه کردن مواد اصلاح‌کننده، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها افزایش یافت؛ با این وجود، تنها اثر تیمار بقایای گیاهی معنی‌دار بود. تمامی چرخه‌های خشک و مرطوب شدن سبب افزایش پایداری ساختمان خاک نسبت به تیمار (بدون چرخه) شد و بیش‌ترین پایداری ساختمان خاک در تیمار با دو چرخه خشک و مرطوب مشاهده شد.
- ❖ مقایسه میانگین اثر تیمارهای ماده‌های اصلاح‌کننده بر رس قابل پراکنش خاک نشان داد که تیمار شاهد بیش‌ترین مقدار رس قابل پراکنش و کم‌ترین میزان پایداری ساختمان خاک و خاک تیمار شده با بقایای گیاهی کم‌ترین میزان رس قابل پراکنش و بیش‌ترین پایداری ساختمان خاک را داشتند.
- ❖ افزودن تیمارهای آلی سبب کاهش معنی‌دار مقاومت مکانیکی خاک نسبت به شاهد در دامنه رطوبتی خشک شد؛ در حالی که افزودن بقایا بر مقدار مقاومت فروری خاک در دامنه مرطوب اثر چندانی نداشته است. همچنین، در تیمارهای مربوط به چرخه‌های تر و خشک شدن نیز اثر این تیمارها در دامنه خشک مشهودتر بود؛ به گونه‌ای که بیش‌ترین مقاومت مکانیکی در تیمار صفر چرخه و دائماً مرطوب و کم‌ترین مقاومت مکانیکی در تیمار دو چرخه مشاهده شد.
- ❖ افزودن بقایای گیاهی و بیوچار به خاک، رطوبت حجمی خاک را نسبت به تیمار شاهد در مکش‌های اولیه افزایش داد؛ در حالی که در تیمار بیوچار، رطوبت حجمی خاک تنها در مکش‌های صفر تا ۱۰۰ سانتی‌متر به صورت قابل ملاحظه‌ای بیش‌تر از سایر تیمارها بود. اعمال چرخه‌های

خشک و مرطوب شدن سبب افزایش نگهداشت آب در خاک در مقایسه با تیمارهای بدون چرخه و دائماً مرطوب شده است و بیشترین تأثیر بر افزایش نگهداشت آب خاک مربوط به تیمار دو چرخه خشک و مرطوب شدن بود.

❖ افزایش مواد آلی اصلاح‌کننده و اعمال تیمار چرخه‌های خشک و مرطوب شدن باعث افزایش رطوبت ظرفیت مزرعه نسبت به تیمار شاهد شد. تأثیر بیوچار در افزایش رطوبت خاک در حد ظرفیت مزرعه در مقایسه با بقایای گیاهی در همه تیمارهای چرخه‌های تر و خشک شدن مورد مطالعه بیش‌تر بوده است و بیشترین مقدار این شاخص در تیمار دو چرخه تر و خشک شدن مشاهده شد.

❖ اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن در همه تیمارهای مورد بررسی سبب افزایش رطوبت خاک در نقطه پژمردگی دائم نسبت به تیمار بدون چرخه شد که بیشترین افزایش نسبت به تیمار شاهد مربوط به اعمال دو چرخه تر و خشک شدن بود.

❖ اثر متقابل استفاده از اصلاح‌کننده آلی و چرخه‌های تر و خشک شدن سبب افزایش تخلخل تهویه‌ای ۱۰ درصد در خاک شده است. بالاترین مقدار تخلخل خاک مربوط به تیمار بیوچار و تیمار دو چرخه تر و خشک شدن و کمترین مقدار این پارامتر مربوط به تیمار شاهد بدون اصلاح‌کننده و بدون چرخه بود.

❖ با افزودن مواد اصلاح‌کننده به خاک، آب فراهم خاک (PAW_{100} و PAW_{330}) افزایش یافت. در این مورد، تأثیر بیوچار بیش‌تر از بقایای گیاهی بود؛ تا جایی که در دو تیمار صفر چرخه و دائماً مرطوب اختلاف تیمار شاهد بدون بقایا و تیمار اعمال بقایای گیاهی معنی‌دار نبود. در شرایط اعمال چرخه‌ها، بیشترین مقدار آب فراهم خاک مربوط به تیمار ۴ و ۸ چرخه تر و خشک شدن می‌باشد.

❖ اثر نوع تیمارهای آلی بر $LLWR_{100}$ و $LLWR_{330}$ معنی‌دار شد که بیوچار در مقایسه با دو تیمار دیگر بیشترین مقدار دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت را در هر دو دامنه سبب شد. همچنین، کاربرد ۴ و ۸ چرخه خشک و مرطوب شدن در مقایسه با تیمار بدون چرخه سبب افزایش رطوبت در دامنه‌ی رطوبتی با حداقل محدودیت شد.

❖ افزودن بقایای گیاهی و بیوپار به خاک سبب کاهش بخشی از محدودیت‌ها شده و گنجایش آب انتگرالی را افزایش داده است. تأثیر بیوپار بر افزایش گنجایش آب انتگرالی بیش‌تر از بقایای گیاهی بود. در همه تیمارهای چرخه‌های خشک و مرطوب شدن خاک و در شرایط فاقد مواد اصلاحی، میزان گنجایش آب انتگرالی بسیار ناچیز بود؛ در حالی که در دو مفهوم آب فراهم خاک و دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت، میزان آب قابل استفاده خاک بیش‌تر بوده است.

۵-۲- پیشنهادها

- ❖ نظر به در دسترس بودن و ارزانی نسبی مواد اولیه برای تولید انبوه بیوپار در ایران از یک سو و اثر مثبت بیوپار بر افزایش رشد گیاه، بهبود کیفیت فیزیکی خاک و نگهداشت آب در خاک از سوی دیگر، پیشنهاد می‌شود از بیوپار حاصل از انواع ضایعات کشاورزی و یا خانگی برای افزایش عملکرد در سطح مزرعه استفاده شود.
- ❖ باتوجه به این که اصلاح کننده‌های آلی بر کاهش مقاومت فروروی خاک موثر بوده است، پیشنهاد می‌شود که مکانسیم‌های اثر آنها به کمک نظریه‌های مکانیک خاک بررسی گردد.
- ❖ نظر به اثر پذیری شاخص‌های مختلف کیفیت خاک از شوری، پیشنهاد می‌شود اثر بیوپار و چرخه‌های تر و خشک شدن حاصل از آن بر رشد و عملکرد گیاهان تحت تنش شوری مورد بررسی قرار گیرد.
- ❖ پیشنهاد می‌شود که اثر بیوپار و بقایای گیاهی و چرخه‌های تر و خشک شدن در شرایط واقعی مزرعه در حضور گیاهان بررسی شود.

مراجع

- (۱) ابراهیمی، س.، ۱۳۹۲. اثر قارچ میکوریزا، لجن فاضلاب و بیوپار حاصل از آن بر شاخص‌های ساختمان و کیفیت فیزیکی خاک تحت کشت گیاه ذرت، پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- (۲) امامی، ح.، آستارایی، ع.، فرحبخش، ع. مهاجرپور، م. ۱۳۹۱. تاثیر اصلاح‌گرها بر میزان نگهداشت آب در مکش‌های گوناگون یک خاک شور و سدیمی. نشریه بوم‌شناسی کشاورزی، ۴(۲): ۱۱۱-۱۰۴.
- (۳) برزگر، ع. (۱۳۸۳a). مبانی فیزیک خاک. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز. صفحه ۱۹۷.
- (۴) برزگر، ع. (۱۳۸۳b). فیزیک خاک پیشرفته. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز. صفحه ۳۱۷.
- (۵) پارسایی، ب.، رئیسی استبرق، ع.، مرادی، م. ۱۳۸۹. اثر چرخه‌های تر و خشک متوالی بر پتانسیل تغییر حجم یک خاک متورم شونده. دومین سمینار ملی مسائل ژئوتکنیکی شبکه‌های آبیاری و زهکشی. موسسه تحقیقاتی فنی و مهندسی کشاورزی. کرج. البرز.
- (۶) حق‌شناس، ر.، و بیگی هرچگانی، ح. ۱۳۸۹. اثر ژئولیت بر ظرفیت نگهداری آب و ضرایب مدل‌های منحنی رطوبتی دو بافت خاک شنی و لومی رسی. مجله پژوهش آب ایران، ۶: ۳۵-۴۲.
- (۷) خادم، ا.، ریسی، ف.، بشارتی، ف. ۱۳۹۶. مروری بر اثرات کاربرد بیوپار بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک. نشریه علمی ترویجی مدیریت اراضی/جلد ۵/شماره ۱/۱۳۹۶.
- (۸) خادمی جلگه نژاد، ا.، فکری، م.، محمود آبادی، م. ۱۳۹۸. اثر کاربرد بیوپار ضایعات مختلف پسته بر برخی ویژگی‌های حاصل‌خیزی یک خاک لومی. تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۰، شماره ۱، فروردین و اردیبهشت ۱۳۹۸.
- (۹) درستکار، و.، گنجی نوروزی، ز. و ناهیدان لبنانی، ص. ۱۳۹۸. بررسی پایداری ساختمان، کیفیت فیزیکی و کربن آلی خاک در اثر چرخه‌های تر و خشک شدن در حضور بقایای گلرنگ. مجله مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی) جلد ۴۲ شماره ۲ تابستان ۱۳۹۸.

- (۱۰) درستکار، و.، والی، ر.، ۱۳۹۶. "بررسی پایداری ساختمان خاک و ابرگریزی خاک در پاسخ به افزودن بقایای برگ انگور و پوست انار در سطوح مختلف شوری" مهندسی زراعی (مجله کشاورزی) جلد ۲.
- (۱۱) درستکار، و.، ۱۳۹۴. تاثیر قارچ آربوسکولار میکوریزا بر پایداری ساختمان خاک، آب قابل استفاده برای گیاه و کیفیت فیزیکی خاک در سطوح مختلف شوری. رساله دکتری خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- (۱۲) دهقانی احمد آبادی، م.، شاه نظری، ع.، ضیاتباب احمدی، م.، اردکانی، م.، فیروز آبادی، ع.، ۱۳۹۷. تأثیر تیمارهای مختلف بیوپار بر مشخصه‌های رطوبت خاک در کم آبیاری گیاه ذرت. نشریه آبیاری و زهکشی ایران شماره ۵، جلد ۱۲، آذر - دی ۱۳۹۷، ص. ۱۲۲۸-۱۲۱۷.
- (۱۳) ربیعی، ه.، داوری، م.، مقیمی نژاد، س.، و ارمغان، ف.، ۱۳۹۲. بیوپار ماده اصلاح کننده در کشاورزی پایدار، همایش ملی علوم و فنون کشاورزی، ملایر، دانشگاه ملایر.
- (۱۴) رزاقی، ف. و رضایی، ن. ۱۳۹۶. اثر سطوح مختلف بیوپار بر خواص فیزیکی خاک با بافت‌های مختلف. مجله حفاظت منابع آب و خاک، ۷(۱): ۸۷-۷۵.
- (۱۵) سامانی مجد، س. ۱۳۹۲. افزایش بازدهی آب کشاورزی و بهبود پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از ترکیب بینه زئولیت طبیعی و بررسی ابعاد زیست محیطی طرح همراه با مطالعات میدانی. مجموعه خلاصه پروژهای پژوهشی شرکت مدیریت منابع آب ایران. وزارت نیرو شرکت مدیریت منابع آب ایران. ص ۹-۲۰.
- (۱۶) سلطانی، ا.، رئیسی استبرق، ع. ۱۳۹۳. بررسی آزمایشگاهی بهسازی یک خاک متور شونده با استفاده از اعمال چرخه‌های مرطوب و خشک شدن متناوب. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۴(۱) ص ۶۲-۴۹.
- (۱۷) صالحیان دستجردی، م.، همت، ع. ۱۳۹۲. تاثیر چرخه‌های تر و خشک بر منحنی فشردگی و ارزیابی روش‌های برآورد تراکم پذیری خاک درشت بافت. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۷(۱) ص ۲۵۶-۲۴۷.
- (۱۸) صفادوست، آ. ۱۳۹۴. اثر تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن در بر پایداری ساختمان، توزیع اندازه ذرات و سیستم منافذ خاک. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۲۴ (۴) ص ۷۶۷-۷۵۹.
- (۱۹) عزیزاده، ا. ۱۳۸۳. فیزیک خاک. چاپ چهارم. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع). ۵۸۶ ص.

- ۲۰) فیضی دولت آبادی، پیام (۱۳۸۹) "اثر مدیریت زراعی و بافت خاک بر دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت". پایان نامه کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.
- ۲۱) گلچ، ب. ۱۳۹۳. تأثیر زغال زیستی پوسته شلتوک برنج بر برخی خصوصیات خاک و رشد ذرت. پایان نامه کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- ۲۲) لکزیان، ا.، حلاج نیا، ا.، رحمانی، ح. ۱۳۸۹. تأثیر چرخه های متناوب خشک و مرطوب شدن خاک بر کربن آلی، فسفر و نیتروژن آلی و معدنی محلول. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی) جلد ۲۴، شماره ۲، خرداد - تیر ۱۳۸۹، ص. ۲۴۳-۲۳۱.
- ۲۳) مقدس، م.، رئیسی استبرق، ع.، عبداللهی بیک، ج. ۱۳۹۱. مسیرهای تورمی انقباضی یک خاک متور شونده در چرخه های تر و خشک با آب شور. نشریه دانش آب و خاک. ۳۳ (۲). ص ۱۳۸-۱۲۸.
- ۲۴) مهرموسوی، ز.، بهمنش، ج.، محمدنژاد، ب. ۱۳۹۲. تأثیر دوره های تر و خشک بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس تثبیت شده با سیمان و آهک. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۷ (۵) ص ۹۴۸-۹۴۰.
- ۲۵) نصرتی، ا.، ۱۳۸۶. تعیین دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت و بررسی عوامل مؤثر بر آن در برخی از خاک های استان همدان. پایان نامه کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان.
- ۲۶) نصری، ع.، سلطانی، ف.، جم، ه.، صباغ گل، م. ۱۳۹۴. رفتار خاک فروریزی و راه کارهای بهسازی آن. دهمین سمپوزیوم پیشرفت های علوم و تکنولوژی. موسسه آموزش عالی خاوران. مشهد. خراسان رضوی.
- ۲۷) یزدان پناه، ن.، پذیرا، ا.، نشاط، ع.، محمودآبادی، م. ۱۳۹۱. بررسی تأثیر مواد مختلف اصلاحی بر ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک شور و سدیمی. دو فصل نامه علمی پژوهشی خشک بوم، ۲(۱): ۸۳-۹۷.
- ۲۸) یزدان پناهی، ع.، احمدآلی، خ.، زارع، س. و جعفری، م. ۱۳۹۸. اثر دو نوع بیوپار بر خصوصیات فیزیکی خاک موثر در مدیریت آبیاری مناطق بیابانی. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۰ (۴): ۹۷۵-۹۶۵.
- 29) Abedi-Koupai, J., Sohrab, F. and Swarbrick, G. 2008. Evaluation of hydrogel application on soil waterretention characteristics. *Journal of Plant Nutrition*, 31(2): 317-331.
- 30) Abel, S., Peters, A., Trinks, S., Schonsky, H., Facklam, M. and Wessolek, G. 2013. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. *Geoderma*, 183-191.

- 31) Ahmad, M., S. S. Lee, A. U. Rajapaksha, M. Vithanage, M. Zhang, J. S. Cho, S. E. Lee and Y. S. Ok. 2013. Trichloroethylene adsorption by pine needle biochars produced at various pyrolysis temperatures. *Bioresour. Technol.* 143: 615–622.
- 32) Ajayi, A.E., Holthusen, D., and Horn, R. 2016. Changes in microstructural behaviour and hydraulic functions of biochar amended soils. *Soil Tillage. Research.*, 155:166-175.
- 33) 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, pp.11-21.
- 34) Allen, R.R., Musick, J.T. 1997. Furrow irrigation in iteration with multiple traffic and increased axle mass. *Application England Agrigation*, (13): 39-45
- 35) Amonette, J. E., & Joseph, S. (2009). Characteristics of biochar: microchemical properties. Biochar for environmental management: *Science and technology, and Hydrogeology*, 43(4), pp.473-486.
- 36) Andrenelli, M. C., Maienza, A., Genesio, L., Miglietta, F., Pellegrini, S., Vaccari, F. P., & Vignozzi, N. (2016). Field application of pelletized biochar: Short term effect on the hydrological properties of a silty clay loam soil. *Agricultural Water Management*, 163, 190-196.
- 37) Asai, H., Samson, B. K. Stephan, H. M. Songyikhangsuthor, K. Homma, K. Kiyono, Y. Inoue, Y. Shiraiwa, T. and Horie, T. 2009. “Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield,” *Field Crop Res*, 111: 81-84.
- 38) Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, MR ., Mahboubi, 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 and Soil* 335:229–244.
- 39) Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, MR ., Mahboubi, A., Nosrati, A., and Dexter, A.R. 2011. Internal energy of conventional available water range and integral water capacity for better characterization of water availability and Soil physical quality. *Geoderma*. 166: 34-42
- 40) Barzegar, A. R., Assodar, M. A., Ansari, M. 2000. Effectiveness of sugarcane residue incorporation at different water contents and the proctor compaction loads in reducing soil compactibility. *Soil & Tillage Research*, (57): 167-172.
- 41) Beesley, L., E. Moreno-Jiménez, J.L. Gomez-Eyles., E. Harris, B. Robinson, and T. Sizmur. 2011. A review of biochars’ potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils. *Environ. Pollut.* 159: 3269–3282.
- 42) Betz, C.L., Allmaras, R.R., Copeland, S.M. and Randall, G.W. (1998) “Least limiting water range: traffic and long term tillage influences in a Webster soil”. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 1384–1393.

- 43) Beutler, A.N. Centurion, J.F. and da Silva, A.P. (2005) "Soil resistance to penetration and least limiting water range for soybean yield in a Haplustox from Brazil". *Braz. Arch. Biol. Techno.* 48: 863–871.
- 44) Blanco-Canqui, H. 2017. Biochar and soil physical properties. Review and Analysis-Soil Physics and Hydrology. *Soil Science Society of America Journal*. 81:687-711.
- 45) Brantley, K.T., Brye, K.R., Savin, M.C. and Longer, D.E. 2015. Biochar source and application rate effects on soil water retention determined using wetting curves. *Scientific Research Publishing*, 5: 1-10
- 46) 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.
- 47) Bronick, C. J. and R. Lal. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma*. 124:3- 22.
- 48) Burrell, L. D., Zehetner, F., Rampazzo, N., Wimmer, B., & Soja, G. (2016). Long-term effects of biochar on soil physical properties. *Geoderma*, 282, 96-102.
- 49) Burt R . , Reinsch T.G. and Miller W , P . (1993) ." A micro - pipette method for water dispersible clay " , *Communications in Soil Scienand Plant Analysis* 24 : 2531 - 2544 .
- 50) Butterly C.R., Marschner P. and Baldock J. 2006. Drying and wetting cycles and phosphorus dynamics, 18th World Congress of *Soil Science*.
- 51) Celik, I. 2005. Land-use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey. *Soil Till Res.* 83:270–277.
- 52) Clarke, D. and Smethurst, J. (2010) Effects of Climate Change on Cycles of Wetting and Drying in Engineered Clay Slopes in England. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 43, 473-486.
- 53) Da Silva, A.P. and Kay, B.D. (1997) "Estimating least limiting water range of soils from properties and management". *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 877–883.
- 54) Da Silva, A.P. and Kay, B.D. (2004) "Linking process capability analysis and least limiting water range for assessing soil physical quality". *Soil Till. Res.* 79: 167–174.
- 55) DaSilva, A.P., Kay, B. D., and Perfect, E. 1994. characterization of the least limiting water range of soils. *soil Soc.Sci.Am.j*.58:1775-1781.
- 56) Denef, 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.
- 57) Denef, K.; Six, J.; Paustian, K.; & R. Merckx, 2001. Importance of macro-aggregate dynamics in controlling soil carbon stabilization: short-term effects of physical disturbance induced by dry-wet cycles, *Soil Biology and Biochemistry*, 33 (15), 2145 - 2153.
- 58) Dexter, A.R. (1987) "Mechanics of root growth". *Plant Soil*. 98: 303–312.

- 59) Dexter, A.R. (2004b) “Soil physical quality; Part II. Friability, tillage, tilth and hard-Setting”. *Geoderma*. 120: 215–225.
- 60) Downie, A., Van Zwieten, L. Doughty, W. Joseph, F. 2007. Nutrient retention characteristics of chars and the agronomic implication, Preceedings, *International Agrichar Conference*, Terrigal, Australia.
- 61) Fritton, D.D. (1990) “A standard for interpreting soil penetrometer measurements”. *Soil Sci.* 150(2): 542–551.
- 62) Gao Lu, S., Fang, S.F., Tong, Z.Y. 2014. Effect of rice husk biochar and coal fly ash on some physical propertice of expansive clayey soil(Vertisoil). *Catena*, 114: 37-44
- 63) Gardner, W.R. (1960) “Dynamic aspects of water availability to plant”. *Soil Sci.* 89, 63–73.
- 64) Geesing, D. and Schmidhalter, U. 2004. Influence of sodium polyacrylate on the water-holding capacity of three different soils and effects on growth of wheat. *Soil use and management*, 20(2): 207-209.
- 65) Glaser, B., Lehmann, J, and Zech, W., 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review. *Biology and Fertility of Soils* 35: 219–230
- 66) Groenevelt, P. H., C. D. Grant and R. S. Murray. 2004. On water availability in saline soils. *Aust. J. Soil Res.* 42: 833–840.
- 67) Groenevelt, P.H., Grant, C.D., and Semetsa, S.2010.A new procedure to determine soil water availability.Aust .J.soil Res.39:577-598.
- 68) Groenevelt, P.H. Grant, C.D. and Semetsa, S. (2001) “A new procedure to determine soil water availability”. *Aust. J. Soil Res.* 39: 577–598.
- 69) Guedes Filho, O., H. Blanco-Canqui and A. P. da Silva. 2013. Least limiting water range of the soil seedbed for long-term tillage and cropping systems in the central Great PLAns, USA. *Geoderma*. 207: 99–110.
- 70) Hanay, A., Biiyiiksonmez, F. Kiziloglu, F. M. and Canbolat, T. M. Y. 2004. Reclamation of Saline-Sodic Soils with Gypsum and MSW Compost. *Compost Science and Utilization*. 12(2): 175-179.
- 71) Hardie, M., Clothier, B., Bound, S., Oliver, G., Chose, D.2014. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? *Plant Soil* (2014) 376:347–361.
- 72) Hillel, D. (1980) “Applications of soil physics”. Academic Press: New York.
- 73) Hoad, S.P. Russel, G. Lucas, M.E. and Bingham, I.J. (2001) “The management of wheat, barley and oat root systems”. *Adv. Agron.* 38: 95–158.
- 74) Horn, R., and Dexter, A.R. (1989) Dynamic of soil aggregation in an irrigated desert loess. *Soil and Tillage Research*, 13, 253–266.

- 75) Hossain, M. K., V. Strezoz, K. Yin chan and P.F. Nelson. 2010. Agronomic properties of waste water sludge biochar and bioavailability of metal in production of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*). *Chemospher.* 78: 1167–1171.
- 76) Ibrahim, H. M., M. I. Wabel, A. R. A. Usman and A. Al-Omran. 2013. Effect of Conocarpus Biochar application on the hydraulic properties of a sandy loam soil. *Soil* 178: 165–173.
- 77) Jeffery, S., Meinders, M.B.J., Stoof, C.R., Bezemer, T.M., van de Voorde, T.F.J., Mommer, L., van Groenigen, J.W. 2015. Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil. *Geoderma* 251–252.
- 78) Junior, V.V. Carvalho, M.P. Dafonte, J. Freddi, O.S. Vazquez, E.V. and Ingaramo, O.E. (2006) “Spatial variability of soil water content and mechanical resistance of Brazilian Ferralsol”. *Soil Till. Res.* 85: 166–177.
- 79) Jury, W.A. Gardner, W.R. and Gardner W.H. (1991) “Soil Physics.” 5th ed. John Wiley and Sons Inc., New York.
- 80) Karlen, D.L. (2004) “Soil quality as an indicator of sustainable tillage practices”. *Soil Till. Res.* 78: 129–130.
- 81) Kemper, W.D., and R.C. Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods.* Agronomy Monograph No. 9. American Society of Agronomy. *Soil Science Society of America*, Madison WI, pp. 425–442.
- 82) Kholghifard, M., Ahmad, K., Ali, N., Kassim, A. and Kalatehjari, R., 2014. Collapse/Swell Potential of Residual Laterite Soil Due to Wetting and Drying-wetting Cycles. *National Academy Science Letters*, 37(2), pp.147-153.
- 83) Kinney, T. J., Masiello, C. A. Dugan, B. Hockaday, W. C. Dean, M. R. Zygourakis, K. 2012. Hydrologic properties of biochars produced at different temperatures. *Biomass Bioenerg*, 41(5): 34–43.
- 84) Kirkham MB (2005) Principles of soil and plant water relations. *Elsevier Academic Press, Amsterdam*, pp 500.
- 85) Koide, R. T., Nguyen, B. T., Skinner, R. H., Dell, C. J., Peoples, M. S., Adler, P. R., & Drohan, P. J. (2015). Biochar amendment of soil improves Clay-Loam, Saline-Sodic Soil. *Journal of Water and Soil Science*, 27(4), 49-1.
- 86) Koide, R. T., Petprakob, K., & Peoples, M. (2011). Quantitative analysis of biochar in field soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(7), 1563-1568.
- 87) Krzic M., Fortin M.C. and A.A. Bomke. (2000). "Short-term responses of soil physical properties to corn tillageplanting systems in a humid maritime climate", *Soil and Till. Res.* 54: 171-178.
- 88) Laird, D., Fleming, P., Wang, B., Horton, R., & Karlen, D. (2010). Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158(3-4), 436-442.

- 89) Leao, T.P. and da Silva, A.P. (2004) "A simplified Excel algorithm for estimating the least limiting water range of soils". *Sci. Agric.* 61: 649–654.
- 90) Lehmann, J. 2007. Bioenergy in the black. *Front. Ecol. Environ.* 5: 381–387.
- 91) Lehmann, J., & Joseph, S. (2009). Biochar for environmental management: an introduction. *Biochar for environmental management: Science and technology*, 1, 1-12.
- 92) Lehmann, J., and M. Rillig. 2011. Biochar effects on soil biota e A review. *Soil Biol Biochem.* 43: 1812–1836.
- 93) Lehmann, J., da Silva, J. P., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W., & Glaser, B. (2003). Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and soil*, 249(2), 343-357.
- 94) Letey, J. (1985) "Relationship between soil physical properties and crop production". *Adv. Soil Sci.* 1:277–294.
- 95) 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: 77 2041–2048.
- 96) Liu, W., Tang, X., Yang, Q. and Li, W., 2015. Influence of drying/wetting cycles on the mechanical cyclic behaviours of silty clay. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 19(7), pp.867-883.
- 97) Ma, R., Cai, C., Li, Z., Wang, J., Xiao, T., Peng, G. and Yang, W., 2015. Evaluation of soil aggregate microstructure and stability under wetting and drying cycles in two Ultisols using synchrotron-based X-ray micro-computed tomography. *Soil and Tillage Research*, 149, pp.1-11.
- 98) 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.
- 99) Minasny, B. and A.B. McBratney. (2003) "Integral energy as a measure of soil-water availability". *Plant Soil*. 249: 253–262.
- 100) 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).
- 101) Mukherjee, A., Lal, R., & Zimmerman, A. R. (2014). Effects of biochar and other amendments on the physical properties and greenhouse gas emissions of an artificially degraded soil. *Science of the Total Environment*, 487, 26-36.
- 102) Nang, N. 2012. Plant Availability of Water in Soils being Reclaimed from the SalineSodic State. PhD Thesis, *Adelaide University*, Australia.

- 103) Nelson, D. W. and L. E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Methods of Soil Analysis. Part 2. *Chemical Methods*. Agron. ASA, SSSA, Madison, WI.
- 104) Nottidge D.O., Ojeniyi S.O. and Asawalam D.O. (2005). "Comparative effects of plant residues and fertilizer on soil properties in a humid ultisol", *Nigerian Journal of Soil Science*, 15: 9–13.
- 105) Obia, A., Mulder, J., Martinsen, V., Cornelissen, G., & Børresen, T. (2016). In situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils. *Soil and Tillage Research*, 155, 35-44.
- 106) Ouyang, L., Wang, F. Tang, J. Yu, L. and Zhang, R. 2013. Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties. *J. Soil Sci. Plant Nutr*, 13: 991–1002.
- 107) Parthasarathi, K., Balamurugan, M., Ranganathan, L.S. 2008. Influence of vermicompost on the Physico-Chemical and Biological properties in different types of soil along with yield and quality of the pulse Crop– Blackgram. *Journal Environ. Health. Science Engineering*, 5(1): 51-58.
- 108) Penfold, C.L. (1999) “Influence of soil air-filled porosity on primary root length and growth of radiata pine”. MSc. Thesis. New Zealand School of Forestry, *University of Canterbury*.
- 109) Pierson, F. B. and D. J. Mulla. 1989. An improved method for measuring aggregate stability of a weakly aggregated loessial soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1825–1831.
- 110) Rondon, M., Ramirez, J. A., & Lehmann, J. (2005, March). Charcoal additions reduce net emissions of greenhouse gases to the atmosphere. In Proceedings of the 3rd USDA Symposium on Greenhouse Gases and Carbon Sequestration in Agriculture and Forestry (Vol. 208, pp. 21-24). *USDA Baltimore*.
- 111) Roz, M., M. T. Hernandez and C. Garcia. 2003. Soil microbial activity after restoration of a semiarid soil by organic amendments. *Soil Biol. Biochem.* 35: 463–469.
- 112) 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.
- 113) 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.
- 114) Safadoust, A., P. Feizee, A. A. Mahboubi, B. Gharabaghi, M. R. Mosaddeghi and B. Ahrens. 2014. Least limiting water range as affected by soil texture and cropping system. *Agric. Water Manage.* 136: 34–41.
- 115) Salisbury, F.B. and C.W. Ross. 1978. “Plant Physiology”. *Wadsworth: Belmont, California*. Salisbury and Ross.

- 116) Schumacher, B.A. 2002. Methods for the determination of total organic carbon (TOC) in soils and sediments. Ecological Risk Assessment Support Center Office of Research and Development US. *Environmental Protection Agency*. Pp: 1-26.
- 117) 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.
- 118) Singh, R. P., and M. Agrawal. 2008. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Manage.* 28: 347–358.
- 119) Soane, B.D., and van Owerkerk, C., 1994. “Soil Compaction in Crop Production”. *Elsevier, Amsterdam*, 662 pp.
- 120) Sohi SP, Krull E, Lopez-Capel E, Bol R, Donald LS (2010) Chapter 2—a review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy. Academic*, New York.
- 121) Soil Conservation Service. 1984. Soil Survey Laboratory Methods and Procedure for Collecting Soil Samples. Soil Survey Investigations. U.S. *Department of Agriculture, Washington, DC*.
- 122) Song, Z., F. Lian, Z. Yu, L. Zhu, B. Xing and W. Qiu. 2014. Synthesis and characterization of a novel MnOx-loaded biochar and its adsorption properties for Cu²⁺ in aqueous solution. *Chem. Eng. J.* 242: 36–42.
- 123) Spaccini R, Mbagwu JSC, Igwe CA, Conte P and Piccolo A, 2004. Carbohydrate and aggregation in lowland soils of Nigeria as influenced by organic input. *Soil and Tillage Research*, (75): 161-172.
- 124) Steiner, C., Teixeira, W.G., Lehmann, J., Nehls, T., de Macêdo, J.L. V., Blum, W.E., and Zech, W. 2007. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and soil*, 291: 275-290.
- 125) Stock, O., and N. K. Downes. 2008. Effects of additions of organic matter on the penetration resistance of glacial till for the entire water tension range. *Soil Tillage Res.* 99: 191–201.
- 126) Sur, H. S., Sidhu, A. S., Rachhpal, S., Agarwal, G. C. and Sandh, K. S. 1993. Long-term effect of green manure on soil physical properties and production potential in green manure-maize-wheat sequence. *Ann. Agri. Res.* 14: 125–131.
- 127) 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.
- 128) Taylor, H.M. and Ratliff, L.F. (1969) “Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soil strength and soil water content”. *Soil Sci.* 108: 113–119.
- 129) Taylor, H.M. Roberson, G.M. and Parker, J.J. (1966) “Soil strength–root penetration relations for medium- to coarse-textured soil materials”. *Soil Sci.* 102:18–22.

- 130) Tisdall P (1982) *Agents of Change: The Development and Practice of Management Consultancy*. London: Heinemann.
- 131) 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.
- 132) Topp, G.C. Galganov, T.Y. Wires, K.C. and Culley, J.L.B. (1994) "Nonlimiting water range: an approach for assessing soil structure". Soil Quality Evaluation Program, Technical Report No.2. *Agriculture and Agri-Food*, Canada. pp: 36.
- 133) Trifunovic, B., Gonzales, H. B., Ravi, S., Sharratt, B. S., & Mohanty, S. K. (2018). Dynamic effects of biochar concentration and particle size on hydraulic properties of sand. *Land Degradation & Development*, 29(4), 884-893.
- 134) Tripathy, S., Rao, K.S. and Fredlund, D.G., 2002. Water content-void ratio swell-shrink paths of compacted expansive soils. *Canadian geotechnical journal*, 39(4), pp.938-959.
- 135) Utomo, W.H. and Dexter, A.R. (1981) Age hardening of agricultural top soils, *Journal of Soil Science*, 32, 335–350.
- 136) Veihmeyer, F.J. and Hendrickson, A. H. (1931) "The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils". *Soil Sci*. 32: 181–193.
- 137) Veihmeyer, F.J. and Hendrickson, A.H. (1949) "Methods of measuring field capacity and wilting percentages of soils". *Soil Sci*. 68: 75–94.
- 138) veihmeyer, F.J., and Hendrickson, A.H. 1927. the relation of soil moisture to cultivation and plant growth .*soil Sic* .3:498-513.
- 139) Verheijen, F. Jeffery, S. Bastos, A. C. Vander Velde M, Diafas, I. 2010. Biochar application to soils: A critical scientific review of effects 011 soil properties, processes and functions. JRC Scientific and technical Reports. Office for the Official Publications of the European Communities. *Luxembourg*, P. 149.
- 140) Walkley, A. and I. A. Black. 1934. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci*. 37: 29–38.
- 141) Wang, B., Hu, B., 2016. Dynamics of aggregate stability under drying and wetting cycles for yellow soil in China.
- 142) Wang, H., and Han, B. 2011.Using energy integral of soil water retention curve to evaluate the soil water availability. *International Symposiom on water Resource and invironmental protection*, china.
- 143) Wang, K., Wang, P., Liu, J., Sparrow, M., Haginoya, S., & Zhou, X. (2005). Variation of surface albedo and soil thermal parameters with soil moisture content at a semi-desert site on the western Tibetan Plateau. *Boundary-Layer Meteorology*, 116(1), 117-129.
- 144) White, R. E. (1997) "Principles and Practice of Soil Science. The Soil as a *Natural Resource*". 3rd Edn. Blackwell Science: Carlton, Vic.

- 145) Whiteley, G.M. and Dexter, A.R. (1981) “The dependence of soil penetrometer pressure on penetrometer size”. *J. Agric. Engng. Res.* 26: 467–476.
- 146) Wield, A. (1988) *Russell's soil conditions and plant growth. 11th Edition, Longmans, London.*
- 147) Wu, L. Feng, G. Letey, J. Ferguson, L. Mitchell, J. McCullough-Sanden, B. and Markegard, G. (2003) “Soil management effects on the nonlimiting water range”. *Geoderma*. 114: 401–414.
- 148) 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.
- 149) Yoo, G. Nissen, T.M. and Wander, M.M. (2006) “Use of physical properties to predict the effects of tillage practices on organic matter dynamics in three Illinois soils”. *J. Environ. Qual.* 35: 1576–1583.
- 150) 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.

Abstract

Due to the warm and dry climate of Iran, water shortage and drought is one of the most common agricultural problems. Therefore, finding solutions to improve soil structure and plant resistance to drought stress is of particular importance. Organic modifiers may positively affect soil hydraulic properties, soil mechanical strength and soil structure. Biochar and crop residues improve soil physical quality by increasing specific surface area, soil porosity, and soil aggregate stability, and decreasing soil bulk density. On the other hand, given the climate situation of the country, the incidence of wet and dry cycles has increased during recent years. These cycles are among the factors influencing the stability of soil structure. Accordingly, with the aim of assessing the impact of biochar and wetting-drying cycles on soil available water concepts, the current research was carried out using a factorial experiment in completely randomized design, including two factors of drying and wetting cycles were performed at five levels (zero, 2, 4, 8 cycles and constantly wetting) and organic matter at three levels (biochar, plant residue and control sample). After mixing with biochar, the soil was poured in cylinders with a diameter of 4 and a height of 3 cm. Then, the drying and wetting cycles were applied for a period of two months and finally, by measuring the soil moisture characteristic curve and soil mechanical strength, the concepts of soil water supply, Non-Limiting and Least-Limiting water ranges, and integral water were calculated. The results showed that organic treatments by increasing soil organic carbon decreased the mean weight diameter of aggregate particles and reduced dispersible clay and ultimately led to improved soil physical quality. On one hand, the highest soil organic matter content was observed in 2 and 4-cycle treatments and the highest mean weight diameter of aggregates was achieved by applying 2 cycles. Addition of biochar at the weighting rate of 2.5% reduced the soil penetration resistance compared to the control under the studied suctions. Applying crop residues and biochar increased the soil moisture content by 0.44 and 0.53, respectively, compared to the control in the initial suctions, and this increase was more evident under the suctions less than 100 cm. Overall, the greatest effect of wetting-drying cycles on increasing soil water retention was related to the treatment of two cycles. Applying wet and drying cycles increased plant available water (PAW_{330} و PAW_{100}) from 0.079 in the control treatment to 0.1938 in the biochar treatment. In the control treatment without residues and in the soils treated with crop residues, the increased number of wetting-drying cycles raised soil moisture content in both limits of field capacity and permanent wilting point. Similarly, when applying biochar and plant residues, the use of dry and wet cycles has increased the moisture in least limiting water range compared to the zero non-cycle treatment. Also, the application of organic treatments in the soil increased twice the air filled porosity of 10% in the biochar treatment (0.4494) compared to the control treatment (0.2419). The results of this study showed that the addition of biochar and the application of cycles increased the aggregate reconstruction and improvement of the soil structure, consequently reduces the soil penetration resistance. The use of biochar and plant residues can be a useful solution in soil management, considering the possibility of further expansion of wet and drying cycles in the soils of the country due to climate fluctuations and changing rainfall patterns.

Keywords: Biochar, Crop residues, Wet and drying cycles, Mechanical strength, Dispersible clay, Integral water.



Shahrood University of
Technology

Faculty of Agriculture

Master Thesis in Resource Management- Physics and Soil Conservation

The effect of biochar and wetting drying cycles on soil available water concepts

Author: Fatemeh Zahra Arab Ameri

Supervisors:

Dr. Vajiheh Dorostkar

Dr. Yaser Safari

Advisor:

Dr. Mohammad Hadi Movahednejad

September, 2021