تأثیر خاکورزی بر فاکتورهای فیزیکی مؤثر بر رشد گیاه با استفاده از شاخص LLWR

حیدر غفاری گوشه[۱]*، محمد نکویی مهر و مجید فرزان

دانش آموخته کارشناسی ارشد فیزیک خاک دانشگاه تبریز؛ **heidar_ghafari@yahoo.com**

عضو هیأت علمی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری؛ **m_nekooeimehr@yahoo.com**

محقق مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری؛ **mj.farzan@yahoo.com**

چکیده

رشد گیاه بطور مستقیم تحت تأثیر رطوبت خاک، تهویه و مقاومت مکانیکی خاک در برابر نفوذ ریشه قرار دارد. دامنه رطوبتی با کمترین محدودیت (LLWR) دامنه‌ای از رطوبت خاک است که در آن رشد گیاه در ارتباط با مکش ماتریک، تهویه و مقاومت مکانیکی خاک با کمترین محدودیت روبرو است. در این پژوهش اثر خاکورزی بر فاکتورهای فیزیکی کنترل کننده رشد گیاه در قالب شاخص LLWR بررسی گردید. با استفاده از استوانه‌های فلزی تعداد شصت نمونه خاک دست نخورده از دو قطعه زمین کشاورزی مجاور هم، یکی با سیستم خاکورزی مرسوم و دیگری با سیستم بدون خاکورزی (به مدت ۲ سال) جمع آوری شده و منحنی رطوبتی، منحنی مقاومت و وزن مخصوص ظاهری نمونه‌های خاک اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان داد که مقدار LLWR در سیستم خاکورزی مرسوم به طور معنی‌دار بیشتر بود ($P<0.01$). در سیستم بدون خاکورزی در ۶۳٪ نمونه‌ها θ_{SR} (رطوبت معادل مقاومت فروروی ۲ مگاپاسکال) به عنوان حد پایینی LLWR جایگزین θ_{PWP} (رطوبت در نقطه پژمردگی) گردید. در حالیکه این رقم در خاکورزی مرسوم ۵۳٪ بود. مقدار شاخص LLWR در هر دو سیستم خاکورزی با افزایش وزن مخصوص ظاهری تا یک حد مشخص، ابتدا روند صعودی داشته و از آن به بعد کاهش یافته است.

واژه های کلیدی: مقاومت مکانیکی خاک، دامنه رطوبتی با کمترین محدودیت، خاکورزی، منحنی رطوبتی

مقدمه

اگر چه استفاده از حدود رطوبتی ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم و آب قابل استفاده برای برآورد نیاز آبی لازم است، اما کافی نیست. علاوه بر پتانسیل آب در خاک دو عامل عمده محدودیت رشد گیاه تهویه و مقاومت فروروی خاک می‌باشند. در این مورد لتی (۱۹۸۵) با توجه به محدودیت تهویه خاک در رطوبت‌های بالا (نزدیک به نقطه ظرفیت مزرعه) و محدودیت مقاومت مکانیکی خاک در برابر نفوذ ریشه در رطوبت‌های پایین، دامنه رطوبتی بدون محدودیت (NLWR[۲]) برای رشد گیاه را پیشنهاد نمود. خاک‌هایی با ویژگی‌های فیزیکی نامناسب دارای NLWR کم بوده و به مدیریت بسیار خوب نیاز دارند. در صورتی که خاک‌های با ویژگی‌های فیزیکی مناسب دارای NLWR زیاد بوده و نیاز به سطح مدیریت کمتری برای بدست آوردن حداکثر محصول دارند (لتی، ۱۹۸۵). در خاک‌های با ساختمان خاک ناپایدار، تخلخل تهویه‌ای در رطوبت ظرفیت مزرعه برای رشد گیاه کافی نیست و از طرف دیگر در رطوبت‌های کم نیز مقاومت فروروی خاک به علت فشردگی و

---

[۱] نویسنده مسئول، آدرس: شهرکرد خیابان معلم بیست متری ابوذر کوچه ۱۵ کد پستی ۸۸۱۴۸۳۶۷۵۹

* دریافت: آذر ۱۳۹۰ و پذیرش: شهریور ۱۳۹۱

[2] Non limiting water range

نشست خاک زیاد می باشد. بنابراین مقدار واقعی آب قابل استفاده گیاه بسیار کمتر از مقدار ظاهری آب قابل استفاده گیاه (دامنه بین ظرفیت مزرعه و پژمردگی دایم) می‌باشد (برزگر، ۱۳۸۰).

اگرچه مفهوم NLWR معرفی شده توسط لتی (۱۹۸۵) بر پایه مقدار آب قابل استفاده گیاه، مقاومت خاک و تهویه استوار بود. ولی شواهد زیادی در دست می‌باشد که نشان می‌دهند رشد گیاه در شرایط محیطی (نور و دما) یکسان، کاملاً متفاوت از رشد گیاه در شرایط متغیر مزرعه‌ای می‌باشد (دکستر، ۱۹۸۷). طی مطالعاتی دا سیلوا و همکاران (۱۹۹۴) دریافتند که تغییرات محیطی حتی در محدوده NLWR بر رشد گیاه اثر می‌گذارد لذا بکارگیری واژه "دامنه رطوبتی با کمترین محدودیت" (LLWR[1]) را به جای NLWR پیشنهاد کردند. بنابراین LLWR دامنه‌ای از مقدار رطوبت خاک است که در آن رشد گیاه در ارتباط با تهویه، مقاومت مکانیکی و مکش آب خاک با کمترین محدودیت مواجه بوده و در خارج از این دامنه، محدودیت‌ها از نظر دسترسی گیاه به آب کافی افزایش می‌یابد (دا سیلوا و همکاران، ۱۹۹۴).

وو و همکاران (۲۰۰۳) گزارش کردند که مقدار NLWR می‌تواند تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی خاک از قبیل چگالی ظاهری و توزیع اندازه منافذ خاک قرار گیرد. هرچه دامنه NLWR در خاکی بیشتر باشد شرایط برای رشد و نمو گیاه مناسب‌تر است. به عبارت دیگر در شرایط طبیعی، در خاکی با NLWR کمتر امکان اینکه در طول فصل رشد مقدار رطوبت خاک خارج از این محدوده قرار گیرد خیلی زیاد است و در این صورت احتمال اینکه گیاه در معرض تنش قرار گیرد، بیشتر است.

با استفاده از LLWR عوامل فیزیکی مؤثربر رشد گیاه در یک پارامتر خلاصه شده و می‌توان از آن به عنوان شاخصی برای ارزیابی ساختمان خاک استفاده کرد. همچنین در برنامه ریزی‌های آبیاری و تصمیم‌های خاکورزی (نوع و عمق شخم) LLWR شاخص مفیدی است به طوری که در خاک‌های با LLWR کم، روش آبیاری قطره‌ای روش مناسبی است (بنجامین و همکاران، ۲۰۰۳). چنانچه به دنبال یک مدیریت خاص، مقدارLLWR در یک خاک افزایش یابد و یا کاهشی نداشته باشد نشان دهنده مناسب بودن مدیریت است و کاهش این شاخص به این مفهوم است که قدرت تولید خاک کاهش یافته و عملیات مدیریتی نامناسب می باشد (زو و همکاران، ۲۰۰۰).

تاپ و همکاران (۱۹۹۴) مقدار NLWR را برای بافت‌های مختلف خاک محاسبه و گزارش کردند که در اکثر موارد NLWR خیلی کمتر از مقدار آب قابل دسترس برای گیاه بوده است. در شرایط این پژوهش، حدود ۳۰ درصد از افق‌های خاک در رطوبت FC با کمبود تهویه مواجه بوده و بیش از ۹۰ درصد افق‌های خاک در رطوبت PWP دارای مقاومت مکانیکی بیشتر از ۲ مگاپاسکال بوده‌اند. زو و همکاران (۲۰۰۰) نیز نشان دادند که مقدار NLWR متفاوت از PAW[2] بوده و این پارامتر نسبت به PAW بهتر می‌تواند مشخص کننده پایداری فیزیکی خاک برای رشد گیاه باشد و در واقع یک شاخص مفید برای بیان کیفیت فیزیکی خاک است.

زو و همکاران (۲۰۰۰) در چهار خاک مختلف شامل پومیک، لس، آرجیلیت و آتشفشانی تغییرات LLWR را با تراکم بررسی کردند و گزارش دادند که تراکم خاک باعث افزایش θ_{FC}، θ_{PWP} و θ_{SR} و کاهش θ_{AFP} (رطوبت معادل ۱۰٪ تهویه) گردید.

داسیلوا و کی (۱۹۹۷) اثر خصوصیات خاک مانند مقدار ماده آلی، درصد رس و چگالی ظاهری و خاکورزی‌های مختلف (شخم متداول و بی خاکورزی) بر LLWR را از طریق ایجاد توابع انتقالی برای منحنی رطوبتی و منحنی مقاومت خاک بررسی کردند. نتایج نشان دادند مقدار LLWR با چگالی ظاهری و مقدار رس رابطه معکوس و با مقدار مواد آلی رابطه مستقیم دارد. خاکورزی از طریق تأثیر بر مقدار ماده آلی و چگالی ظاهری به طور غیر مستقیم بر LLWR اثر گذاشت. (داسیلوا و کی، ۱۹۹۷). هدف از انجام این پژوهش، بررسی اثرات سیستم های خاکورزی مرسوم و بدون خاکورزی بر LLWR به عنوان شاخصی از کیفیت فیزیکی خاک برای رشد گیاه در کوتاه مدت بود.

مواد و روش ها

الف) نمونه برداری

آزمایش در زمینی به مساحت ۲ هکتار در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری با طول شرقی ′ ۵۵ °۵۰ و عرض شمالی ′۱۷ °۳۲ واقع در ۵ کیلومتری شرق مرکز استان انجام شد. ارتفاع از سطح دریا در محل اجرای طرح ۲۱۰۰ متر و میانگین سالیانه بارندگی ۳۲۰ میلیمتر برآورد شده است. تیمارها شامل سیستم خاکورزی مرسوم (شخم برگردان دار + دیسک) و سیستم بدون خاکورزی بوند. سیستم بدون خاکورزی در سال ۱۳۸۷ اجرا گردید و ۲ سال بطول

[1] Least limiting water range

[2] Plant available water

انجامید. تا قبل از انجام این آزمایش شرایط و مدیریت دو خاک کاملا یکسان بود. نمونه‌های خاک در اوایل اردیبهشت ماه سال ۱۳۸۹ جمع آوری گردیدند. از هر قطعه زمین ۳۰ نمونه دست نخورده از وسط عمق ۱۵-۰ سانتیمتری توسط استوانه‌های فلزی با قطر و ارتفاع ۵ سانتیمتر برای تعیین منحنی رطوبتی، منحنی مقاومت و وزن مخصوص ظاهری خاک و نیز سه نمونه دست خورده به منظور تعیین ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک تهیه شد (جدول ۱). بافت خاک لوم رسی تعیین گردید.

شاخص LLWR بر اساس منحنی رطوبتی[1](SMC) و منحنی مقاومت خاک[2](SRC) تعیین گردید (داسیلوا و همکاران، ۱۹۹۴). LLWR تفاضل بین دو حد رطوبتی بالا و پایین است. حد بالایی آن رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای (θ_{FC}) یا رطوبت در تخلخل تهویه‌ای ۱۰ درصد (θ_{AFP}) (هر کدام که کمتر باشد) و حد پایینی آن رطوبت در نقطه پژمردگی دایم (θ_{PWP}) یا رطوبت در مقاومت مکانیکی دو مگاپاسکال (θ_{SR}) (هر کدام که بیشتر باشد) است (داسیلوا و همکاران، ۱۹۹۴).

ب) تعیین منحنی رطوبتی خاک (SMC)

برای تعیین منحنی رطوبتی، ابتدا نمونه‌های دست نخورده به مدت ۲۴ ساعت از زیر با محلول ۰/۰۱ مولار کلرید کلسیم اشباع شدند. سپس رطوبت در مکش-های ماتریک ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۴ و ۰/۰۱ مگاپاسکال توسط ستون‌های آب آویزان (قیف هینز) و در مکش‌های ماتریک ۰/۰۳ و ۰/۱ مگاپاسکال توسط دستگاه صفحات فشاری اندازه‌گیری گردید. رطوبت در مکش های ۰/۵ و ۱/۵ مگاپاسکال با استفاده از نمونه دست خورده درون حلقه-های لاستیکی دستگاه صفحات فشاری (کلات، ۱۹۸۶) تعیین گردید. برای اندازه‌گیری θ_{FC} و θ_{PWP} مدل نمایی پیشنهاد شده توسط داسیلوا و همکاران (۱۹۹۴) به داده‌های آزمایشگاهی منحنی رطوبتی به برازش گردید. برازش یک مدل پیوسته ریاضی بر منحنی رطوبتی خاک این امکان را فراهم می‌کند تا الگوهای تیپیک اثرات فاکتورهای مختلف بر شاخص LLWR را بررسی کنیم. مدل پیشنهادی به شکل زیر است:

$$\theta = \exp(a + bD_b).\Psi^c \qquad [۱]$$

که در آن Ψ مکش ماتریک (MPa)، D_b چگالی ظاهری ($Mg\ m^{-3}$)، θ رطوبت حجمی خاک ($cm^3\ cm^{-3}$) و a، b و c ضرائب مدل هستند.

رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای در مکش ماتریک ۰/۰۱ MPa (هیز و همکاران، ۱۹۵۵) و رطوبت نقطه پژمردگی در مکش ماتریک ۱/۵ MPa (ریچارد و ویور، ۱۹۴۴) در نظر گرفته شد. برازش داده‌ها از طریق Solver که یکی از امکانات جانبی نرم افزار Excel است، صورت گرفت. این برنامه ضرایب را طوری انتخاب می‌کند که مجموع مربعات خطا (SSE) بین مقادیر اندازه گیری شده و مقادیر تخمین زده شده کمترین مقدار ممکن باشد (لئو و داسیلوا، ۲۰۰۴).

ج) تعیین منحنی مقاومت خاک (SRC)

مقاومت فروروی خاک در نمونه‌های دست نخورده پس از حصول تعادل و اندازه‌گیری داده‌های مربوط به منحنی رطوبتی در رطوبت‌های معادل مکش‌های ماتریک ۰/۰۱، ۰/۰۳، ۰/۱، ۰/۵ و ۱/۵ MPa اندازه‌گیری شد (داسیلوا و همکاران، ۱۹۹۴). در هر مکش ۶ نمونه دست نخورده وجود داشت که پس از حصول تعادل، مقاومت فروروی خاک در استوانه با استفاده از دستگاه - فروسنج مخروطی دستی با زاویه مخروط ۳۰ درجه، قطر انتهایی مخروط ۶ میلی متر با سرعت فروروی یکنواخت اندازه‌گیری گردید. برای تعیین θ_{SR} داده‌های مقاومت فروروی در برابر مقدار رطوبت و چگالی ظاهری خاک با استفاده از مدل بوسچر (۱۹۹۰) برازش داده شد. معادله به شکل زیر است:

$$SR = d\theta^e D_b^f \qquad [۲]$$

که در آن D_b چگالی ظاهری خاک ($Mg\ m^{-3}$)، SRمقاومت فروروی خاک (Mpa)، θ رطوبت حجمی خاک ($cm^3\ cm^{-3}$) و e، f و d ضرایب مدل می‌باشند. برازش داده‌ها به مدل بوسچر (۱۹۹۰) مشابه با مدل SMC توسط Solver صورت گرفت. پس از تعیین ضرایب مدل، با قرار دادن عدد ۲ مگا پاسکال به عنوان مقدار بحرانی مقاومت خاک (تیلور و همکاران، ۱۹۶۶) به جای SR و با داشتن D_b هر استوانه، رطوبت خاک در مقاومت فروروی ۲ مگاپاسکال (θ_{SR}) محاسبه شد.

رطوبت معادل تخلخل تهویه‌ای ۱۰٪ از رابطه زیر بدست آمد:

$$\theta_{AFP} = \theta_s - 0.1 \qquad [۳]$$

با تعیین چهار ثابت رطوبتی، مقادیر LLWR در هر یک از دو سیستم خاکورزی محاسبه گردید (داسیلوا و همکاران، ۱۹۹۴).

تجزیه و تحلیل‌های آماری در قالب طرح کاملاً تصادفی توسط نرم افزار MSTATC انجام شد.

---

1. Soil moisture curve
2. Soil resistance curve

نتایج و بحث

ضرایب بدست آمده برای مدل منحنی رطوبتی و منحنی مقاومت خاک مربوط به هر کدام از سیستم‌های خاکورزی در جدول ۲ ارائه شده است. در منحنی رطوبتی ضریب b و c به ترتیب اثر چگالی ظاهری و مکش ماتریک بر نگهداری رطوبت و در منحنی مقاومت ضریب e و f به ترتیب اثر رطوبت و چگالی ظاهری بر مقاومت مکانیکی خاک را نشان می‌دهد. علامت منفی ضریب c و e به ترتیب بیانگر رابطه عکس بین مقدار رطوبت خاک با مکش ماتریک و بین مقدار رطوبت با مقاومت مکانیکی خاک است. مثبت بودن ضریب f نیز نشان می‌دهد با افزایش چگالی ظاهری، مقاومت خاک افزایش می‌یابد. افزایش مقاومت فروروی با D_b می‌تواند به دلیل متراکم شدن ماتریکس خاک در نتیجه افزایش اصطکاک بین ذرات باشد. در هر دو سیستم خاکورزی ضریب f مثبت و ضریب e و c منفی بدست آمد. افزایش مقاومت فروروی با کاهش رطوبت به دلیل افزایش زاویه تماس داخلی و چسبندگی بین ذرات می‌باشد (کمپ و گیل، ۱۹۶۹).

مثبت بودن ضریب b حاکی از آن است که افزایش چگالی ظاهری با افزایش مقدار رطوبت خاک همراه است و منفی بودن آن نشان می‌دهد با افزایش چگالی ظاهری، رطوبت خاک در یک مکش معین کاهش می‌یابد. دلیل افزایش نگهداری آب خاک با افزایش چگالی ظاهری، در یک مکش ماتریک معین، کاهش تخلخل درشت (هیل، ۱۹۹۰) و افزایش حجم تخلخل ریز (ون دن برگ و همکاران، ۱۹۹۷) است. برخی بررسی‌ها نیز اثر منفی چگالی ظاهری بر میزان نگهداری رطوبت را گزارش کردند (اسمدما، ۱۹۹۳؛ گوپتا و لارسون ۱۹۷۹). این پژوهشگران بیان کردند در مکش‌های پایین، نگهداری آب تحت کنترل تخلخل کل قرار دارد، در حالیکه در مکش‌های بالا نگهداری آب تحت کنترل تخلخل ریز است (کارتر، ۱۹۸۸).

نتایج تجزیه واریانس LLWR و ثابت‌های رطوبتی آن شامل θ_{FC}، θ_{PWP}، θ_{AFP} و θ_{SR} در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که اثر خاکورزی بر LLWR و ثابت‌های رطوبتی آن در سطح یک درصد معنی‌دار گردید. مقایسه میانگین LLWR و ثابت‌های رطوبتی (جدول ۴) نشان می‌دهد مقدار شاخص LLWR و θ_{AFP} در سیستم خاکورزی مرسوم و مقدار θ_{SR}، θ_{FC} و θ_{PWP} در سیستم بدون خاکورزی بطور معنی‌دار بیشتر بود.

مطالعات متعددی وجود دارد که افزایش مقاومت فروروی خاک در سیستم بدون خاکورزی را نشان می‌دهند (مک‌کوی و کاردینا، ۱۹۹۷؛ هیل، ۱۹۹۰). دلیل این افزایش تغییر در D_b و θ عنوان شده است. در هر دو سیستم خاکورزی با افزایش وزن مخصوص ظاهری θ_{SR} افزایش و θ_{AFP} کاهش یافت. ملاحظه می‌گردد در سیستم بدون خاکورزی با افزایش D_b، θ_{SR} با شدت بیشتری افزایش یافته است که حاکی از افزایش مقاومت فروروی خاک در این سیستم است (شکل ۱). جابجایی خاک در سیستم خاکورزی مرسوم باعث شکستن پیوند بین ذرات و خاکدانه‌ها گردیده و مقاومت خاک کاهش می‌یابد (دکستر و همکاران، ۱۹۸۸). افزایش مقاومت خاک در سیستم بدون خاکورزی ممکن است به دلیل توسعه فرآیند سخت شدگی زمانی[1] خاکدانه‌ها باشد (کمپر و روزنا، ۱۹۸۴). سیمیل و همکاران (۱۹۹۰) بیان کردند تردد وسایل نقلیه و چرخه‌تر و خشک شدن خاک باعث افزایش وزن مخصوص ظاهری و مقاومت خاک می‌گردد. در سیستم بدون خاکورزی در ۶۳٪ نمونه‌ها برای مقادیر Db=>1.158، θ_{SR} جایگزین θ_{PWP} گردید. در حالیکه این رقم در خاکورزی مرسوم ۵۳٪ در Db=>1.149 مشاهده گردید. رینرت و همکاران (۲۰۰۲) گزارش کردند در تراکم‌های بیشتر از ۱/۳ گرم بر سانتیمتر مکعب، فاکتورهای محدودکننده حد بالایی و پایینی دامنه LLWR به ترتیب رطوبت معادل ۱۰٪ تهویه و رطوبت معادل مقاومت مکانیکی ۲ مگاپاسکال است.

در هر دو سیستم خاکورزی در سراسر وزن مخصوص اندازه‌گیری شده θ_{AFP} بزرگتر از θ_{FC} بود (شکل ۱) که بیانگر وجود منافذ درشت و پایداری ریزساختارهای خاک برای حفظ فضای لازم برای تبادل گازی در خاک می‌باشد. ممکن است در وزن مخصوص-های بیشتر با کاهش منافذ درشت θ_{AFP} به عنوان حد بالای دامنه LLWR جایگزین θ_{FC} گردد. در هر دو سیستم با افزایش D_b هم θ_{FC} و هم θ_{PWP} افزایش یافته اما شدت افزایش θ_{FC} بیشتر بوده است. دلیل این امر را می‌توان چنین استدلال کرد که با افزایش D_b قطر منافذ بزرگ موجود بین خاکدانه‌ها کاهش یافته است و زمانی‌که قطر منافذ بزرگتر کاهش یابد سهم آنها در نگهداری آب بیشتر می‌شود (هیل، ۱۹۹۰).

مقدار LLWR در هر دو سیستم خاکورزی با افزایش D_b تا یک D_b خاص (نقطه تلاقی θ_{SR} با θ_{PWP}) دارای روند صعودی بوده و از آن به بعد با افزایش D_b کاهش یافت (شکل ۲). این D_b خاص برای سیستم بدون خاکورزی برابر با ۱/۱۵۸ و برای خاکورزی مرسوم ۱/۱۴۹

[1] Age hardening

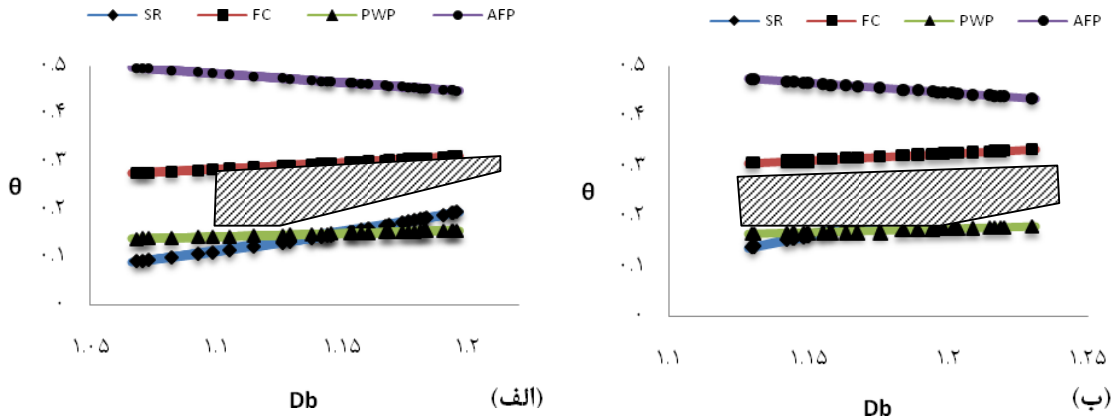
بود. زو و همکاران (۲۰۰۰) گزارش کردند در خاک‌های درشت بافت در اثر تراکم، ابتدا به دلیل کاهش منافذ درشت و افزایش منافذ با اندازه متوسط LLWR افزایش، اما با تراکم بیشتر به دلیل افزایش مقاومت خاک و کاهش تهویه LLWR کاهش می‌یابد. اما در خاک‌های ریز بافت با افزایش تراکم خاک از کم تا زیاد به دلیل افزایش مقاومت خاک مقدار LLWR کاهش یافت. زیرا با افزایش درصد رس پیوند میان ذرات خاک محکم‌تر شده و در نتیجه مقاومت خاک و در نتیجه θ_{SR} افزایش می‌یابد.

مقدار LLWR در سیستم خاکورزی مرسوم نسبت به سیستم بدون خاکورزی در سطح احتمال یک درصد به‌طور معنی‌دار بیشتر بود (مطابق با نتایج تورمنا و همکاران، ۱۹۹۹). میانگین مقدار LLWR در سیستم بدون خاکورزی و خاکورزی مرسوم به ترتیب برابر با ۰/۱۱۵ و ۰/۱۳۶ درصد حجمی بود. نتایج داسیلوا و کی (۱۹۹۷) نشان داد مقدار LLWR در یک خاک لوم رسی نسبت به خاک لوم شنی با مقادیر ماده آلی یکسان کمتر بود و همچنین در هر دو خاک با افزایش چگالی ظاهری مقدار آن کاهش یافت.

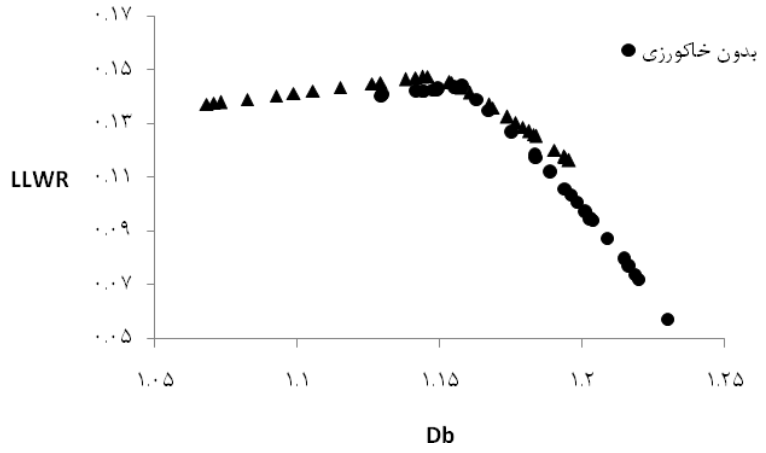
در هر دو سیستم خاکورزی ثابت‌های θ_{SR} و θ_{AFP} نسبت به ثابت‌های ماتریکی شامل θ_{FC} و θ_{PWP} به شدت تحت تأثیر وزن مخصوص ظاهری قرار گرفتند که نشان می‌دهد در خاک مورد مطالعه پارامتر LLWR نسبت به آب قابل دسترس گیاه (PAW) از حساسیت بیشتری در برابر تغییرات ساختمانی خاک برخوردار است. داسیلوا و همکاران (۱۹۹۴) اثر سطوح مختلف وزن مخصوص ظاهری را بر ضرایب رطوبتی FC و PWP در دو خاک لوم سیلتی و شن لومی بررسی کرده و دریافتند که تغییر در وزن مخصوص ظاهری خاک تأثیر کمی بر FC و PWP دارد. بنابراین بر مقدار آب قابل استفاده گیاه نیز اثر اندکی دارد.

نتیجه گیری

اجرای سیستم بدون خاکورزی به‌طور نسبی باعث افزایش وزن مخصوص ظاهری خاک سطحی شده که نتیجه آن کاهش نسبی دامنه LLWR شده است. در سیستم بدون خاکورزی مقاومت فروروی خاک فاکتور فیزیکی محدود کننده دامنه LLWR در مکش‌های بالا بود. دامنه LLWR در هر دو سیستم خاکورزی تحت تأثیر تخلخل تهویه ۱۰٪ قرار نگرفت. به‌طور کلی انتظار می‌رود در شرایط مزرعه انجام خاکورزی باعث افزایش دامنه LLWR و در نتیجه کاهش محدودیت‌های فیزیکی کنترل کننده رشد گیاه گردد. استفاده از مفهوم LLWR به منظور شناخت فاکتورهای فیزیکی کنترل کننده کیفیت فیزیکی خاک و انتخاب مدیریت مناسب در ارتباط با رشد گیاه مفید بوده و نسبت به مقدار آب قابل دسترس گیاه (PAW) از حساسیت بیشتری در برابر تغییرات ساختمانی خاک در اثر نوع سیستم مدیریتی برخوردار است.



شکل ۱- تغییرات ثابت‌های رطوبتی LLWR با وزن مخصوص ظاهری الف) خاکورزی مرسوم ب) بدون خاکورزی



شکل ۲- تغییرات LLWR با وزن مخصوص ظاهری در سیستم‌های مختلف خاکورزی

جدول ۱- ویژگیهای فیزیکی و شیمیایی خاک (میانگین ۳ نمونه)

سیستم خاکورزی	رس (٪)	شن (٪)	OC (٪)	EC dS/m	pH
خاکورزی مرسوم	۲۹/۴	۴۱/۲	۰/۶۶	۰/۶۳۷	۷/۴۲
بدون خاکورزی	۳۰/۷	۳۹/۹	۰/۸۱	۰/۵۹۴	۷/۵

جدول ۲- ضرائب برازش منحنی رطوبتی و مقاومت خاک‌های تحت سیستم های مختلف خاکورزی

		خاکورزی مرسوم	بدون خاکورزی
ضرائب منحنی رطوبت	a	-2.92	-2.63
	b	0.94	0.80
	c	-0.14	-0.16
	r^2	0.78	0.95
	S.S.E	0.07	0.018
ضرائب منحنی مقاومت	d	0.19	0.18
	e	-0.73	-0.81
	f	4.93	6.43
	r^2	0.90	0.79
	S.S.E	1.68	1.75
میانگین وزن مخصوص	-	1.145	1.179

جدول ۳- تجزیه واریانس LLWR و ثابت های رطوبتی

منبع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		θ_{AFP}	θ_{FC}	θ_{PWP}	θ_{SR}	LLWR
خاکورزی	۱	۰/۰۰۳**	۰/۰۰۸**	۰/۰۰۹**	۰/۰۴۰**	۰/۰۰۷**
خطا	۵۸	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰

** : نشاندهنده معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد

جدول ۴- مقایسه میانگین LLWR و ثابت‌های رطوبتی با استفاده از آزمون دانکن (۵٪)

نوع سیستم خاکورزی	θ_{AFP}	θ_{FC}	θ_{PWP}	θ_{SR}	LLWR
خاکورزی مرسوم	۰/۴۶۸^{a} ± ۰/۰۰۳	۰/۲۹۶^{b} ± ۰/۰۰۲	۰/۱۴۹^{b} ± ۰/۰۰۵	۰/۱۴۸^{b} ± ۰/۰۰۶	۰/۱۳۶^{a} ± ۰/۰۰۲
بدون خاکورزی	۰/۴۵۵^{b} ± ۰/۰۰۲	۰/۳۱۹^{a} ± ۰/۰۰۱	۰/۱۷۳^{a} ± ۰/۰۰۴	۰/۲۰۰^{a} ± ۰/۰۰۷	۰/۱۱۵^{b} ± ۰/۰۰۵

میانگین‌های دارای حرف لاتین متفوت در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌دار دارند.

فهرست منابع:

۱. برزگر، ع.ر. ۱۳۸۰، الف. فیزیک خاک پیشرفته.انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.

2. Benjamin, J. G., Nielsen, D. C. and Vigil, M. F. (2003). Quantifying effects of soilconditions on plant growth and crop production. Geoderma. 116: 137–148.
3. Busscher, W. J. (1990). Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. American Society Agricultural Engineers. 3: 519-524.
4. Camp, C.R. and Gill. W. R. (1969). The effect of drying on soil strength parameters. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 33: 519-524
5. Carter, M. R. (1988). Temporal variability of soil macroporosity in a fine sandy loam under moldboard ploughing and direct drilling. Soil Tillage Research. 12: 37-51.
6. Da Silva, A. P. and Kay, B. D. (1997). Estimating least limiting water range ofsoils from properties and management. Soil Science Society of America Journal. 61: 877–883.
7. Da Silva, A. P., Kay, B. D. and Perfect, E. (1994). Characterization of the least limiting water range of soils. Soil Science Society of America Journal. 58: 1775–1781.
8. Dexter, A. R. (1987). Mechanics of root growth. Plant Soil 98: 303–312.
9. Dexter, A.R., Horn, R., Kemper, W.D., 1988. Two mechanisms for age-hardening of soil. J. Soil Sci. 39, 163-175.
10. Gupta, S. C. and Larson, W. E. (1979). Estimating soil water characteristics from size distribution, organic carbon and bulk density. Water Resources Res. 15: 1633-1635.
11. Haise, H. R., Haas, H. J. and Jensen, L. R., (1955). Soil moisture studies of some Great Plains soils. II. Field capacity as related to 1/3-atmosphere percentage, and minimum point as related to 15- and 26-atmosphere percentage. Soil Science Society of America Proceedings. 19: 20-25.
12. Hill, R.L., 1990. Long-term conventional and no-till effects on selected soil physical properties. Soil Sci. Soc. Am. J. 54, 161-166.
13. Kemper, W.D., Rosenau, R.C., 1984. Soil cohesion as affected by time and water content. Soil Sci. Soc. Am. J. 48, 1001-1006.
14. Klute, A. (1986). Water retention: laboratory methods. pp. 635– 662.In: Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis: Part 1. 2nd ed.Physical and Mineralogical Methods,. Agron. Monogr., vol. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
15. Leao, T. P. and Da Silva, A. P. (2004). A simplified excel® algorithm for estimatingthe least limiting water range of soils. Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.). 61: 649-654
16. Letey, J. (1985). Relationship between soil physical properties and crop production. Adv. Soil Sci. 1: 276– 294.
17. McCoy, E.L., Cardina, J., 1997. Characterizing the structure of undisturbed soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 61, 280-286.
18. Reinert Dalvan, J., Wolkowski Richard, P., Lowery, B. and Arriaga Farancisco, J. (2002). Compaction effects on least limiting water range and plant growth. 17th

WCSS, 14-21 August, Thailand.
19. Richards, L. A. and Weaver, L. R. (1944). Fifteen-atmosphere percentage as related to the permanent wilting point. Soil Sci. 56: 331–339.
20. Semmel, H., Horn, R., Hell, U., Dexter, A.R., Schulze, E.D., 1990. The dynamics of soil aggregate formation and the effect on soil physical properties. Soil Technol. 3, 113-129.
21. Smedemma, L. K. (1993). Drainage performance and soil management. Soil Technol. 6: 183-189.
22. Taylor H. M., Roberson G. M., Parker J.J. 1966. Soil strength– root penetration relations for medium to coarse-textured soil materials. Soil Science. 102: 18– 22.
23. Topp, G. C., Galganov, Y. T., Wires, K. C. and Culley, J. L. B. (1994). Nonlimiting water range (NLWR): an approach for assessing soil structure. In: Soil Quality Evaluation Program Tech. Rep. 2. Centre for Land and Biological Resources Research, Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa,Ont.
24. Tormena, C. A., da Silva, A. P. and Libardi, P. L. (1999). Soil physical quality of Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting waterrange approach. Soil Till. Res. 52: 223–232.
25. Van den Berg, M., Klamt, E., Van Reuwijk, L. P. and Sombroek, W. G. (1997). Pedotransfers functions for the estimation of moisturereretention characteristics of Ferralsols and related soils. Geoderma. 78: 161-180.
26. 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.
27. Zou, G., Sands, R., Buchan, G. And Hudson, I. (2000). Least limiting water range: A potential indicator of soil physical quality of forest soil. Aust. J. Soil Res. 38: 947-958.