Archive of SID
DOI: 10.22059/ijswr.2020.293912.668426 تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۱، شماره ۸، آبان ماه ۱۳۹۹ (ص ۱۹۴۵-۱۹۳۷)

Optimal Range of Relative Bulk Density Obtained Using Proctor and Axial Stress of 200 kPa for Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Growth

SAHAR AGHAEI[1], SARA NAZARI[1], HOSSEIN ASGARZADEH[2*], HABIB KHODAVERDILOO[3]
1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.
(Received: Dec. 11, 2019- Revised: Feb. 1, 2020- Accepted: June. 8, 2020)

ABSTRACT

The aim of this study was to determine the critical limits and optimal range of relative bulk density (RBD) obtained using proctor test ($RBD_{Proctor}$) and axial stress of 200 kPa (RBD_{200kPa}) for a silty clay loam soil which were determined based on relative grain yield, relative shoot dry, relative height and relative root volume of sunflower (*Helianthus annuus* L.). The relative values were obtained by dividing the absolute mean values of mentioned traits to observed maximum values of each trait. A range of soil bulk density (1.35 to 1.59 Mg m^{-3}) was prepared in 10 bins (40 cm × 50 cm with 50 cm depth) using rollers of different weights. The bins were located out-doors after sowing sunflower and the weight of bins and drained water volume were measured daily. The soil water content was retained in the range of field capacity (FC) to 0.6FC through irrigation. The optimal ranges of $RBD_{Proctor}$ and RBD_{200kPa} were assumed to be the ranges in which the relative traits of sunflower were greater or equal to 0.95 of maximum value predicted by obtained equations fitted to relative data versus RBD. Sunflower yield was maximum at $RBD_{Proctor}$ equal to 0.854 and the optimal range of $RBD_{Proctor}$ based on relative grain yield was from 0.823 to 0.884. In this range sunflower relative grain yield was greater or equal to 95%. The corresponding values of RBD_{200kPa} were 0.975, 0.940 to 1.009, respectively. This finding revealed that at the RBD values less than lower limit and greater than upper limit of starting restriction, unsuitable physical conditions reduce sunflower relative grain yield.

Keywords: Optimal Range of Relative Bulk Density, Proctor Test, Axial Stress of 200 Kpa, Sunflower Grain Yield.

* Corresponding Author's Email: asgarzadeh8688@gmail.com
www.SID.ir

Archive of SID

دامنه بهینه چگالی ظاهری نسبی بدست‌آمده از آزمون پروکتور و تنش محوری ۲۰۰ کیلو پاسکال برای رشد آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.)

سحر آقایی[۱]، سارا نظری[۱]، حسین عسگرزاده*[۱]، حبیب خداوردیلو[۱]

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۹/۲۰- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۱۲- تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۳/۱۹)

چکیده

هدف از این پژوهش تعیین حدود بحرانی و دامنه بهینه چگالی ظاهری نسبی (RBD) به‌دست‌آمده از آزمون پروکتور ($RBD_{Proctor}$) و تنش محوری ۲۰۰ کیلو پاسکال (RBD_{200kPa}) یک خاک لومی-رسی-سیلتی بر اساس وزن نسبی دانه، وزن نسبی خشک شاخساره، ارتفاع نسبی و حجم نسبی ریشه گیاه آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) بود. مقادیر نسبی از تقسیم میانگین مقادیر مطلق صفات مذکور در هر گلدان بر بیشینهٔ مشاهده‌شده همان صفت به‌دست آمد. دامنه‌ای از چگالی ظاهری خاک (۱/۳۵ تا ۱/۵۹ $Mg\ m^{-3}$) در ۱۰ گلدان (۴۰ cm × ۵۰ cm و عمق ۵۰ cm) توسط غلطک‌هایی با جرم‌های متفاوت ایجاد شدند. آفتابگردان کشت شده در گلدان‌ها در فضای باز قرار گرفت و در طول آزمایش وزن گلدان‌ها و میزان آب زهکشی شده به‌صورت روزانه اندازه‌گیری شد. مقدار رطوبت خاک در گلدان‌ها توسط آبیاری در محدوده FC تا ۰/۶FC نگه داشته شد. دامنه بهینه $RBD_{Proctor}$ و RBD_{200kPa} دامنه‌ای پنداشته شد که در آن صفت‌های نسبی گیاه بزرگتر یا مساوی ۰/۹۵ بیشینهٔ پیش‌بینی‌شده با معادلهٔ برازش یافته بر داده‌های نسبی در برابر RBD باشد. عملکرد دانه آفتابگردان در $RBD_{Proctor}$ برابر ۰/۸۵۴ به حداکثر مقدار رسید و دامنه بهینه $RBD_{Proctor}$ برای وزن نسبی دانه بین ۰/۸۲۳ تا ۰/۸۸۴ به‌دست آمد. مقادیر متناظر برای RBD_{200kPa} به ترتیب برابر ۰/۹۷۵، ۰/۹۴۰ تا ۱/۰۰۹ بودند. این یافته‌ها نشان داد که در RBD کمتر از حد پایین یا بیشتر از حد بالای شروع محدودیت، شرایط نامناسب فیزیکی خاک سبب کاهش عملکرد دانه آفتابگردان می‌شود.

واژه‌های کلیدی: دامنه بهینه چگالی ظاهری نسبی، آزمون پروکتور، تنش محوری ۲۰۰ کیلو پاسکال، عملکرد آفتابگردان.

مقدمه

تراکم خاک به عنوان یکی از مشکلات عمده پیش روی کشاورزی مدرن (Hamza and Anderson, 2005)، از مهم‌ترین عوامل موثر در کیفیت فیزیکی خاک است. کاهش تخلخل (Lima *et al.*, 2017) و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (Zink *et al.*, 2011) و افزایش مقاومت فروروی و چگالی ظاهری خاک (Chan *et al.*, 2006) از اولین تاثیرات تراکم بر کیفیت فیزیکی خاک است. استفاده بیش از حد از ماشین‌های کشاورزی سنگین، خاک‌ورزی در رطوبت‌های زیاد، ماده آلی اندک، کشت فشرده، تناوب‌های نامناسب و کوتاه‌مدت از عوامل مهمی هستند که منجر به تراکم زیاد خاک می‌شوند. با افزایش وزن و اندازه ماشین‌های کشاورزی افق‌های عمیق‌تر خاک در معرض اثرات منفی فشار مکانیکی قرار می‌گیرند و عملکرد خاک آسیب می‌بیند (Horn *et al.*, 2000). Berisso *et al.*, (2012) نشان دادند که ماشین‌های کشاورزی مورد استفاده کنونی می‌توانند خاک را تا عمق ۹۰ سانتی‌متری متراکم ساخته و در نتیجه کیفیت فیزیکی خاک رویی و زیرین را به شدت کاهش دهند. Arvidsson and Håkansson (1996) ماندگاری اثرات متراکم‌شدن خاک پس از عملیات خاک‌ورزی را بررسی کردند. اثرات تراکم ناشی از عبور و مرور ماشین‌های کشاورزی بر خاک رویین حتی پس از شخم دوباره خاک به‌طور کامل از بین نرفت. تراکم ایجادشده، مقدار محصول را در خاک-های درشت‌بافت کاهش محسوسی نداد اما در خاک‌های ریزبافت سبب کاهش بیش از ۲۰ درصدی محصول شد. ماندگاری کاهش محصول سه الی چهار سال پس از تراکم دیده می‌شد. زمانی که تراکم در رطوبت‌های زیاد انجام شد، ماندگاری اثرات تراکم افزایش یافت. Etana *et al.*, (2013) گزارش کردند که پیامدهای تراکم خاک زیرین حداقل تا ۱۴ سال ماندگار بوده و می‌تواند فرایندهای اساسی خاک مانند هواگذری، فعالیت‌های میکروبی و هم‌چنین منافذ درشت خاک را به شدت تحت تاثیر قرار دهد. این گزارش‌ها بیانگر اهمیت توجه به تراکم خاک است.

* نویسنده مسئول: asgarzadeh8688@gmail.com

www.SID.ir

Archive of SID

افزایش اندک تراکم خاک لزوماً برای رشد محصول زیان‌آور نیست، چرا که در حد معینی این افزایش ممکن است در ذخیره-سازی آب خاک و توانایی تحمل بار هنگامی که ترافیک ماشین-آلات یا رفت‌آمد حیوانات وجود دارد مثبت قلمداد شود (Reichert *et al*., 2009). از دیدگاه رشد گیاه و تولید محصول، مقدار بهینه‌ای برای درجه تراکم خاک وجود دارد که در مقادیر بیش‌تر و کم‌تر از آن رشد گیاه کاهش می‌یابد (Håkansson, 1990). مقادیر کم درجه تراکم خاک بیشتر به دلیل کاهش هدایت هیدرولیکی غیراشباع و تماس ضعیف ریشه-خاک و در نتیجه کاهش جذب آب و عناصر غذایی (Veen *et al*., 1992) و حمایت مکانیکی ناکافی و مقادیر زیاد درجه تراکم خاک عمدتاً به دلیل افزایش مقاومت فروروی (در دامنه خشک) و تهویه ضعیف (در دامنه مرطوب) (Lipiec and Hatano, 2003) سبب کاهش رشد ریشه و گیاه می‌شود. از این رو آگاهی از مقادیر بحرانی و بهینه درجه تراکم و میزان فشردگی خاک می‌تواند در مدیریت و بهبود کیفیت فیزیکی خاک مفید باشد.

با اینکه چگالی ظاهری[1] (BD) کمّیتی رایج برای بیان درجه تراکم خاک است، به‌علت وابستگی مقادیر بحرانی و بهینه آن به بافت و مقدار ماده آلی خاک، BD کارایی چندانی در بیان درجه تراکم ندارد و گاهی اوقات تفسیر آن گمراه‌کننده است (Dexter *et al*., 2007). برای نمونه، BD برابر ۱/۴ $Mg\ m^{-3}$ ممکن است برای رشد گیاه در یک خاک ریز بافت محدودکننده باشد، اما در یک خاک درشت بافت محدودیتی برای رشد ریشه گیاه ایجاد نکند (Håkansson, 1990; Dexter *et al*., 2007). از این رو از کمّیت دیگری به نام چگالی ظاهری نسبی[2] (RBD)، که مستقل از نوع (بافت) خاک بوده و مقادیر آن مستقیماً قابل مقایسه در تمامی خاک‌ها است، برای بیان درجه فشردگی خاک استفاده می‌شود. این کمّیت بی‌بعد بوده و برابر نسبت BD طبیعی به چگالی ظاهری مرجع[3] (BD_{ref}) می‌باشد (Håkansson, 1990). Carter (1990) از چگالی ظاهری بیشینه به‌دست آمده از آزمون پروکتور ($BD_{Proctor}$) به‌عنوان BD_{ref} استفاده کرد. برای به‌دست-آوردن چگالی ظاهری بیشینه در روش آزمون پروکتور، از انرژی ثابتی (با سقوط وزنه) در رطوبت‌های مختلف یک خاک استفاده می‌شود. Håkansson (1990) چگالی ظاهری خاک تحت تنش محوری ۲۰۰ کیلوپاسکال در فشردگی محصور (BD_{200kPa}) را به عنوان BD_{ref} به کار گرفت. از آنجایی‌که مقدار BD_{ref} تحت تنش محوری محصور ۲۰۰ کیلوپاسکال (BD_{200kPa}) کوچک‌تر از BD_{ref} به‌دست‌آمده از آزمون پروکتور است، مقدار RBD محاسبه‌شده با $BD_{Proctor}$ به‌عنوان BD_{ref} حدود ۷ الی ۱۷ درصد کوچک‌تر از RBD محاسبه‌شده با BD_{200kPa} به‌دست می‌آید (Håkansson, 1990). Reichert *et al*., (2009) توابعی برای تخمین $BD_{Proctor}$ و BD_{200kPa} با استفاده از مقادیر رس یا مجموع رس و سیلت ارائه کردند. Keller and Håkansson (2010) برای تخمین مقدار BD_{200kPa}، از مقدار ماده آلی (OM) و شن در کنار مقدار رس و سیلت خاک استفاده کردند.

تعیین مقدار RBD سریع‌تر و آسان‌تر از دیگر شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک می‌باشد. این شاخص ارتباطی قوی با شاخص‌هایی مانند دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت[4] (LLWR) و گنجایش آب انتگرالی[5] (IWC) (Asgarzadeh and Mosaddeghi, 2013; Asgarzadeh *et al*., 2010) دارد. مطالعات اثرات عبور و مرور ماشین‌آلات کشاورزی در مزرعه نشان داده‌اند که RBD شرایط خاک، ریشه و پاسخ محصول را بهتر از BD توجیه می‌کند (Håkansson and Lipiec, 2000). RBD همچنین پارامتر ورودی مناسبی در مدل‌سازی پاسخ رشد ریشه، سطح برگ و عملکرد محصول به فشردگی خاک در شرایط آب و هوایی مختلف است (Simota *et al*., 2000). بررسی‌های Reichert *et al*. (2009) شان داد که گندم نسبت به سویا و ماش سیاه حساسیت بیش‌تری به تراکم خاک داشته و مقدار بهینه RBD کم‌تری دارد. Håkansson (2005) بیان کرد که پیچیدگی‌های بسیاری در هنگام مقایسه حساسیت گیاهان مختلف به تراکم وجود دارد، به‌ویژه زمانی که محصولات با فصل‌های رشد متفاوت مقایسه می‌شوند. درجه فشردگی کم تماس ریشه با خاک را می-کاهد، در حالی که درجه فشردگی زیاد با کاهش تهویه خاک و افزایش مقاومت فروروی تأثیر منفی بر رشد و توسعه ریشه دارد. بنابراین، رشد محصول به‌طور منفی تحت تأثیر تراکم خاک قرار می‌گیرد، اما عملکرد گیاه خاک‌های خیلی سست نیز رضایت‌بخش نبوده است (Arvidsson and Håkansson, 1991). بیش‌ترین عملکرد محصول معمولاً در مقدار RBD بین ۰/۸ تا ۰/۹ به‌دست آمده است (Lipiec *et al*., 1991, Håkansson, 1990). با این حال، مقدار دقیق بستگی به روش استفاده شده برای اندازه‌گیری BD_{ref} دارد. Carter (1990) با استفاده از آزمون پروکتور، مشاهده کرد که با مقدار RBD ۰/۸۴ – ۰/۷۷ عملکرد نسبی بزرگتر یا مساوی ۹۵٪ برای غلات حاصل می‌شود و در RBD برابر با ۰/۹ عملکرد نسبی دانه غلات به طور چشمگیری کاهش می‌یابد.

1 - Bulk density
2 - Relative bulk density
3 - Reference bulk density
4 - Least limiting water range
5 - Integral water capacity

www.SID.ir

Archive of SID

da Silva *et al*. (1994) بالاترین مقدار LLWR را برای خاک‌های لوم سیلتی و شن لومی به‌ترتیب در RBD برابر با ۰/۷۶ و ۰/۷۸ به‌دست آوردند که تقریباً با یکدیگر برابرند. انتظار نمی‌رود که تفاوت‌های موجود منعکس‌کننده خصوصیات ذاتی خاک مانند، مقدار ماده آلی، و یا بافت خاک باشد، چرا که استفاده از RBD تلاشی برای نرمال‌کردن چنین تأثیراتی است.

هدف از این پژوهش تعیین مقادیر بحرانی و دامنه بهینه $RBD_{Proctor}$ و RBD_{200kPa} برای گیاه آفتابگردان با استفاده از روابط بین این شاخص‌ها با عملکرد دانه و تغییرات صفات رویشی آن بود.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از یک خاک کشاورزی غیرشور (EC = ۱/۵۵ dS m^{-1}) استان آذربایجان غربی با ۳۵ درصد رس، ۵۰ درصد سیلت و ۱۵ درصد شن (کلاس بافتی لومی رسی سیلتی) با pH = ۷/۵ استفاده شد. خاک انتخاب‌شده از الک ۸ میلی‌متری عبور داده شده و برای یکسان‌سازی مقدار رطوبت، نمونه خاک در سایه روی هم انباشته شد. براساس آزمون خاک، ۴۰ گرم سوپر فسفات تریپل، ۳۷ گرم اوره، ۱۵ گرم سولفات پتاسیم، ۳ گرم سولفات روی و ۱ گرم EDDHA برای هر ۱۰۰ کیلوگرم خاک خشک به خاک مورد آزمایش اضافه شد. رطوبت در حد خمیری با استفاده از روش استاندارد فیتله کردن (McBride, 1993) اندازه‌گیری شد. سپس رطوبت خاک به ۸۰ درصد حد خمیری رسانده شد. درجات مختلف فشردگی خاک در ۱۰ گلدان با ابعاد ۵۰ cm × ۴۰ cm و عمق ۵۰ cm توسط غلطک‌هایی با طول ۴۰ cm و جرم‌های ۲، ۶، ۱۰ و ۱۵ kg ایجاد شدند. برای اطمینان از یکنواختی فشردگی، خاک به‌صورت لایه لایه و در مقادیر ۵ kg به گلدان‌ها افزوده شد و در نهایت دامنه‌ای از BD از مقدار ۱/۳۵ تا ۱/۵۹ Mg m^{-3} در خاک ایجاد گردید.

کاشت و آبیاری گیاه آفتابگردان

در خرداد ۱۳۹۳ تخم آفتابگردان (رقم قلمی بومی ارومیه) در عمق ۷ cm به فاصلهٔ ۳۰ cm از هم (هر گلدان دو بوته آفتابگردان) کاشته شد. تمام گلدان‌ها در فضای باز مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه قرار داده شد. در طول آزمایش وزن گلدان‌ها و میزان آب زهکشی شده که در اثر نیروی ثقل و از طریق زهکش های تعبیه شده در زیر گلدان‌ها خارج می‌شد، به صورت روزانه اندازه‌گیری شدند. مقدار رطوبت خاک در مکش ماتریک ۱۰۰ سانتی‌متر به عنوان رطوبت ظرفیت زراعی (FC) توسط دستگاه صفحات فشاری تعیین شد. زمانیکه مقدار رطوبت خاک گلدان‌ها به ۰/۶FC کاهش می‌یافت، مجدداً با آبیاری به حد FC ارسانده می‌شد. آبیاری با استفاده از آب چاه (EC = ۰/۶۵ dS m^{-1}) واقع در دانشگاه ارومیه انجام شد.

ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده

ساقه و برگ‌های هر دو بوته آفتابگردان رشد یافته در هر گلدان در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. میانگین جرم دو بوته به‌عنوان جرم خشک ساقه و برگ آن گلدان در نظر گرفته شد. میانگین ارتفاع نهایی دو بوته در انتهای دوره رشد اندازه‌گیری شد. میانگین عملکرد دانه پس از خشک کردن دانه‌ها در هوای طبیعی آزمایشگاه به‌دست آمد. خاک گلدان‌ها بر روی الک ۰/۵ میلی‌متر ریخته شد و با استفاده از شستشو با آب ریشه‌ها به دقت از خاک جدا شد. حجم ریشه‌ها با استفاده از تعیین حجم آب افزایش‌یافته در استوانه مدرج در اثر وارد کردن ریشه‌ها در درون آب اندازه‌گیری شد. پس از پایان آزمایش (شهریور ۹۳) مقادیر BD طبیعی خاک گلدان‌ها در رطوبت نزدیک گنجایش زراعی با استفاده از سیلندرهای نمونه‌برداری با حجم ۱۰۰ cm^3 با سه تکرار اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری چگالی ظاهری مرجع (BD_{ref})

از چگالی ظاهری بیشینه به‌دست آمده از آزمون پروکتور ($BD_{Proctor}$) و چگالی ظاهری خاک تحت تنش محوری ۲۰۰ کیلوپاسکال در فشردگی محصور (BD_{200kPa}) به‌عنوان BD_{ref} استفاده شد. برای به‌دست‌آوردن $BD_{Proctor}$، ابتدا خاک هواخشک از الک ۴/۷۵ mm عبور داده شد. با اضافه کردن آب، رطوبت خاک ۴ درصد جرمی افزوده شد. خاک در قالب پروکتور استاندارد در سه لایه تقریباً مساوی ریخته شد و هر لایه با ۲۵ ضربه چکش ۲/۵ کیلوگرمی رها شده از ارتفاع ۳۰ cm متراکم شد. مقدار رطوبت و چگالی ظاهری خاک پس از اتمام متراکم‌سازی تعیین شد. سپس خاک خرد شد و اضافه‌کردن آب و متراکم‌سازی و اندازه‌گیری مقدار رطوبت و چگالی ظاهری خاک ۵ یا ۶ بار تکرار گردید. با رسم مقادیر BD در برابر مقدار رطوبت جرمی و برازش تابع درجه سوم مقدار بیشینه BD به عنوان $BD_{Proctor}$ تعیین شد.

برای به‌دست‌آوردن BD_{200kPa}، ۱۰۰ گرم خاک هواخشک عبور داده‌شده از الک ۴/۷۵ mm به رطوبت بهینه برای فشردگی (حدود ظرفیت زراعی) رسانده شد. برای یکنواخت‌شدن توزیع رطوبت در توده خاک نمونه‌ها به‌مدت ۲۴ ساعت در داخل ظرف در بسته رها شدند. خاک تا یک سانتی‌متری لبه سیلندرهای استیل به حجم ۱۰۰ cm^3 ریخته شد. برای خروج آب اضافی از دو صفحه متخلخل پلی اتیلن و کاغذهای صافی در زیر و روی نمونه خاک استفاده شد. نمونه به مدت ۲۴ ساعت تحت تنش عمودی ۲۰۰- کیلوپاسکال قرار گرفت. مقدار BD_{200kPa} با اندازه‌گیری

www.SID.ir

Archive of SID

حجم خاک فشرده شده و جرم خاک خشک شده به‌دست آمد.

محاسبه RBD و دامنه بهینه $RBD_{Proctor}$ و RBD_{200kPa}

برای محاسبه RBD از رابطه $RBD = BD/BD_{ref}$ استفاده شد. چگالی ظاهری نسبی به‌دست‌آمده از آزمون پروکتور ($RBD_{Proctor}$) به‌صورت $RBD_{Proctor} = BD/BD_{Proctor}$ و چگالی ظاهری نسبی تحت تنش محوری ۲۰۰ کیلوپاسکال در فشردگی محصور (RBD_{200kPa}) به‌صورت $RBD_{200kPa} = BD/BD_{200kPa}$ به‌دست آمد. دامنه بهینه برای $RBD_{Proctor}$ و RBD_{200kPa} زمانی بود که مقادیر نسبی دانه (RY)، جرم خشک ساقه و برگ (RSDW)، ارتفاع گیاه (RH) و حجم ریشه (RRV) بزرگ‌تر یا معادل ۰/۹۵ بیشینهٔ پیش‌بینی‌شده با معادلهٔ برازش یافته بر داده‌های نسبی این ویژگی‌ها در برابر $RBD_{Proctor}$ و RBD_{200kPa} بود. دامنه با محدودیت کم برای RBD دامنه‌ای پنداشته شد که مقادیر نسبی این ویژگی‌ها بین ۰/۹۵ تا ۰/۸۵ مقدار بیشینه آن‌ها قرار می‌گرفت. دامنه با محدودیت شدید RBD دامنه‌ای فرض شد که سبب کاهش مقادیر RY، RSDW، RH و RRV به کمتر از ۰/۸۵ گردید. مقادیر RY، RSDW، RH و RRV از تقسیم میانگین صفات مذکور در هر گلدان (دو بوته آفتابگردان) بر بیشینهٔ مشاهده شده میان تمام گلدان‌ها بدست آمد.

تجزیه و تحلیل آماری

بررسی روابط غیرخطی بین مقادیر RY، RSDW، RH و RRV با $RBD_{Proctor}$ و RBD_{200kPa} توسط نرم‌افزار SPSS و رسم شکل‌ها توسط نرم‌افزار Microsoft Excel انجام شد.

نتایج و بحث

چگالی ظاهری خاک (BD)، مقادیر میانگین (دو بوته در هر گلدان) جرم محصول دانه (Y) و صفات رویشی آفتابگردان شامل جرم خشک ساقه و برگ (SDW)، جرم خشک برگ (LDW)، ارتفاع گیاه (H) و حجم ریشه (RV) در جدول (۱) نشان داده شده است. ایجاد دامنه‌ای از BD از مقدار ۱/۳۵۱ تا $Mg\ m^{-3}$ ۱/۵۹۲ در خاک باعث تغییر زیادی در مقدار جرم خشک دانه آفتابگردان شد. بیش‌ترین مقدار Y برابر ۱۱۲ گرم در BD برابر با $Mg\ m^{-3}$ ۱/۴۵۰ و کم‌ترین مقدار آن در DB برابر با $Mg\ m^{-3}$ ۱/۵۹۲ مشاهده شد. جرم خشک ساقه و برگ برابر با g ۲۷۵/۴۶ و ارتفاع cm ۲۰۳/۵ به‌دست‌آمده برای گلدان‌های بدون محدودیت، قابل مقایسه با رشد گیاه در شرایط مزرعه است و شرایط قابل قبول استفاده از گلدان‌های بزرگ به‌کار رفته در این مطالعه را برای شبیه‌سازی شرایط مزرعه و در عین حال اندازه‌گیری دقیق جرم آن‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۱- چگالی ظاهری ایجادشده در خاک مورد بررسی و برخی از ویژگی‌های رویشی گیاه آفتابگردان*

شماره گلدان	BD	Y	SDW	LDW	H	RV
	$Mg\ m^{-3}$	g			cm	cm^3
۱	۱/۳۵۱	۸۷/۹۳	۱۹۵/۴۹	۲۴/۱۹	۱۷۹/۰	۲۶/۸۰
۲	۱/۳۸۷	۹۳/۳۱	۲۱۵/۴۱	۲۷/۵۰	۱۸۷/۰	۲۱/۱۰
۳	۱/۴۳۲	۹۸/۰۰	۲۳۴/۷۴	۳۴/۲۳	۱۷۴/۰	۳۴/۷۵
۴	۱/۴۵۰	۱۱۲/۰۰	۲۲۷/۵۸	۴۰/۱۷	۲۰۳/۵	۳۰/۴۰
۵	۱/۴۵۶	۱۰۹/۴۰	۲۴۸/۶۳	۴۲/۶۳	۱۸۱/۰	۳۳/۳۰
۶	۱/۴۹۲	۱۰۰/۷۱	۲۳۴/۷۳	۳۵/۷۲	۱۸۲/۰	۲۹/۷۰
۷	۱/۴۹۹	۹۲/۰۸	۲۷۵/۴۶	۴۸/۴۶	۱۹۶/۵	۲۸/۷۰
۸	۱/۵۰۹	۸۲/۶۳	۲۵۲/۵۴	۴۱/۳۳	۱۸۰/۵	۲۴/۵۵
۹	۱/۵۳۰	۹۳/۹۶	۲۳۶/۹۲	۳۶/۸۲	۱۶۹/۵	۲۲/۶۰
۱۰	۱/۵۹۲	۵۹/۴۶	۱۶۴/۵۹	۲۴/۶۸	۱۴۸/۰	۱۶/۶۵
میانگین	۱/۴۵۸	۹۵/۹۲	۲۲۸/۶۱	۳۵/۵۷	۱۸۰/۱	۲۶/۸۶

*** BD چگالی ظاهری خاک؛ Y جرم محصول دانه؛ SDW جرم خشک ساقه و برگ؛ LDW جرم خشک برگ؛ H ارتفاع گیاه و RV حجم ریشه می‌باشند.**

چگالی ظاهری بیشینه به‌دست آمده از آزمون پروکتور ($BD_{Proctor}$) و چگالی ظاهری خاک تحت تنش محوری ۲۰۰ کیلوپاسکال در فشردگی محصور (BD_{200kPa}) به عنوان BD_{ref} به ترتیب برابر با ۱/۶۹ و $Mg\ m^{-3}$ ۱/۴۸ بود. مقادیر $RBD_{Proctor}$ و RBD_{200kPa} با تقسیم BD بر $BD_{Proctor}$ و BD_{200kPa} به‌دست آمد که در جدول (۲) نشان داده شده است. همچنین مقادیر نسبی ویژگی‌های رشد آفتابگردان شامل دانه (RY)، جرم خشک ساقه و برگ (RSDW)، ارتفاع گیاه (RH) و حجم ریشه (RRV) به دست آمده از تقسیم مقادیر این ویژگی‌ها بر مقدار بیشینه متناظر آن‌ها در جدول (۲) نشان داده شده است. RRV در بیش‌ترین مقدار $RBD_{Proctor}$ و RBD_{200kPa} (گلدان ۱۰) به ۰/۴۷۹ مقدار بیشینه رسید که در بین ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده بیش‌ترین

www.SID.ir

Archive of SID

کاهش را نشان می‌دهد. در مقابل کم‌ترین مقدار RH برابر ۰/۷۲۷ داد (جدول ۲). بود که کم‌ترین کاهش را در برابر افزایش فشردگی خاک نشان

جدول ۲- چگالی ظاهری نسبی ایجادشده در خاک مورد بررسی و مقادیر نسبی ویژگی‌های رویشی گیاه آفتابگردان*

شماره گلدان	$RBD_{Proctor}$	RBD_{200kPa}	RY	RSDW	RLDW	RH	RRV
۱	۰/۷۹۹	۰/۹۱۳	۰/۷۸۵	۰/۷۱۰	۰/۴۹۹	۰/۸۸۰	۰/۷۷۱
۲	۰/۸۲۱	۰/۹۳۷	۰/۸۳۳	۰/۷۸۲	۰/۵۶۸	۰/۹۱۹	۰/۶۰۷
۳	۰/۸۴۷	۰/۹۶۸	۰/۸۷۵	۰/۸۵۲	۰/۷۰۶	۰/۸۵۵	۱/۰۰۰
۴	۰/۸۵۸	۰/۹۸۰	۱/۰۰۰	۰/۸۲۶	۰/۸۲۹	۱/۰۰۰	۰/۸۷۵
۵	۰/۸۶۲	۰/۹۸۴	۰/۹۷۷	۰/۹۰۳	۰/۸۸۰	۰/۸۸۹	۰/۹۵۸
۶	۰/۸۸۳	۱/۰۰۸	۰/۸۹۹	۰/۸۵۲	۰/۷۳۷	۰/۸۹۴	۰/۸۸۵
۷	۰/۸۸۷	۱/۰۱۳	۰/۸۲۲	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۹۶۶	۰/۸۲۶
۸	۰/۸۹۳	۱/۰۲۰	۰/۷۳۸	۰/۹۱۷	۰/۸۵۳	۰/۸۸۷	۰/۷۰۶
۹	۰/۹۰۶	۱/۰۳۴	۰/۸۳۹	۰/۸۶۰	۰/۷۶۰	۰/۸۳۳	۰/۶۵۰
۱۰	۰/۹۴۲	۱/۰۷۶	۰/۵۳۱	۰/۵۹۷	۰/۵۰۹	۰/۷۲۷	۰/۴۷۹
میانگین	۰/۸۷۰	۰/۹۹۳	۰/۸۳۰	۰/۸۳۰	۰/۷۳۴	۰/۸۸۵	۰/۷۷۳

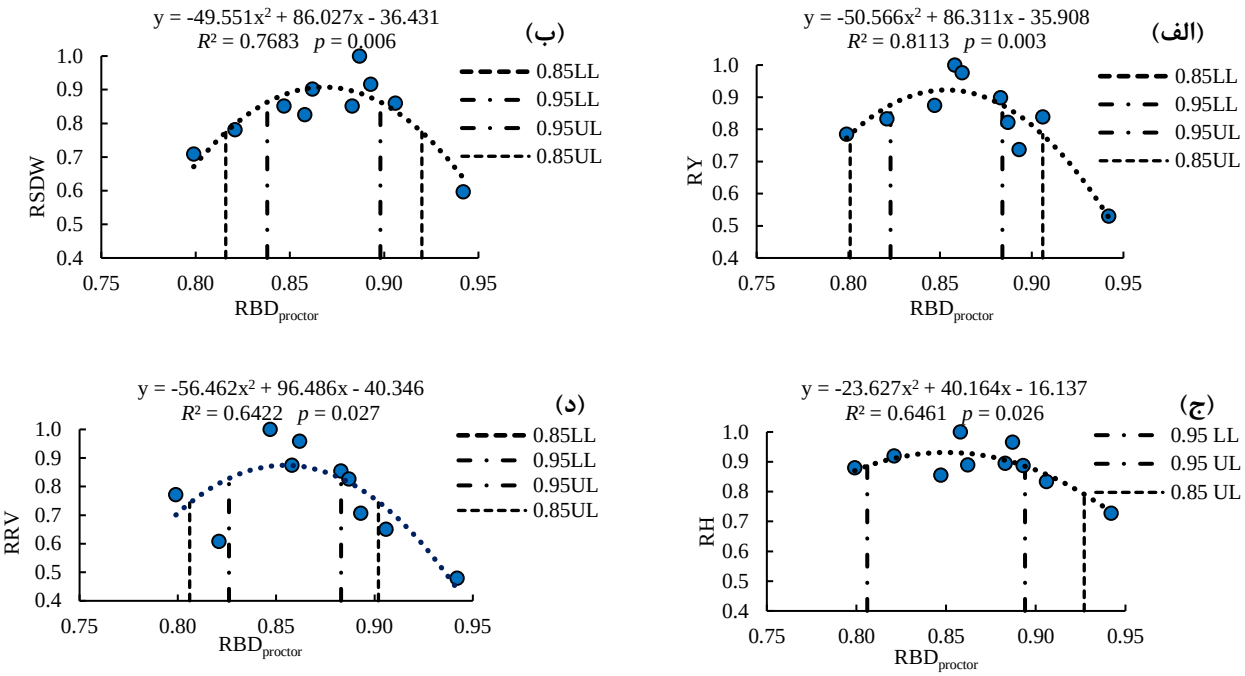
* **$RBD_{Proctor}$ و RBD_{200kPa} به‌ترتیب چگالی ظاهری نسبی به‌دست‌آمده از آزمون پروکتور و تنش محوری ۲۰۰ کیلوپاسکال در فشردگی محصور؛ RY جرم محصول دانه نسبی؛ RSDW جرم خشک ساقه و برگ نسبی؛ RLDW جرم خشک برگ نسبی؛ RH ارتفاع گیاه نسبی و RRV حجم ریشه نسبی می‌باشند.**

حدود بحرانی و دامنه بهینه $RBD_{Proctor}$

روابط $RBD_{Proctor}$ با RY، RSDW، RH و RRV در شکل (۱) نشان داده شده است. $RBD_{Proctor}$ به‌عنوان شاخصی از کیفیت فیزیکی و وضعیت ساختمان خاک، ارتباط قوی و معنی‌داری با این ویژگی‌ها داشت. بر اساس رابطه به‌دست آمده بین $RBD_{Proctor}$ با RY، مقدار این صفت در $RBD_{Proctor}$ برابر با ۰/۸۵۴ به حداکثر مقدار خود (۰/۹۲۳) رسید. Reichert *et al.* (2009) بیش‌ترین محصول ماش سیاه و گندم را به‌ترتیب در $RBD_{Proctor}$ برابر با ۰/۸۹۷ و ۰/۹۵۲ به‌دست آوردند. با کاهش $RBD_{Proctor}$ از ۰/۸۵۴ به ۰/۸۲۳ مقدار محصول نسبت به بیشینه مقدار به‌دست آمده از رابطه، ۵ درصد کاهش یافت. با کاهش بیشتر $RBD_{Proctor}$ به ۰/۸۰۱ این کاهش به ۱۵ درصد رسید. علت کاهش عملکرد دانه با کاهش $RBD_{Proctor}$، تماس ضعیف‌تر ریشه-خاک و در نتیجه کاهش جذب آب و عناصر غذایی می‌باشد (Veen *et al.*, 1992). همچنین با افزایش مقدار $RBD_{Proctor}$ از ۰/۸۵۴ به ۰/۸۸۴ مقدار محصول ۵ درصد نسبت به مقدار بیشینه کاهش داشت. در $RBD_{Proctor}$ برابر ۰/۹۰۶ مقدار محصول نسبت به مقدار بیشینه ۱۵ درصد کاهش یافت که علت کاهش محصول با افزایش $RBD_{Proctor}$، عمدتاً به کاهش تخلخل و تهویه ضعیف (Lima *et al.*, 2017) و افزایش مقاومت فروروی خاک (Lipiec and Hatano, 2003, Chan *et al.*, 2006) مربوط می‌شود که سبب کاهش رشد ریشه (Bengough *et al.*, 2006) و گیاه می‌شوند. با توجه به شکل (۱-الف) و رابطه بدست آمده، دامنه ۰/۸۲۳ تا ۰/۸۸۴ دامنه بهینه $RBD_{Proctor}$ بوده و مقادیر ۰/۸۲۳ و ۰/۸۸۴ به ترتیب برابر با حد پایین شروع محدودیت (0.95LL) و حد بالای شروع محدودیت (0.95UL) می‌باشند. زمانی‌که مقدار $RBD_{Proctor}$ در این دامنه باشد، در صورت عدم وجود محدودیت-های دیگر رشد، انتظار بر این است که مقدار دانه آفتابگردان برابر یا بیش از ۹۵ درصد حد بیشینه باشد. مقادیر ۰/۸۰۱ و ۰/۹۰۶ به ترتیب برابر با حد پایین محدودیت شدید (0.85LL) و حد بالای محدودیت شدید (0.85UL) می‌باشند. زمانی‌که مقدار $RBD_{Proctor}$ خاک از ۰/۹۰۶ بیشتر شود یا از ۰/۸۰۱ کمتر شود، محدودیت شدید شرایط فیزیکی خاک سبب می‌شود مقدار دانه آفتابگردان به کمتر از ۸۵ درصد حد بیشینه کاهش یابد. رابطه $RBD_{Proctor}$ با RDSW در شکل (۱-ب) نشان داده شده است. بر اساس رابطه به‌دست‌آمده بین $RBD_{Proctor}$ با RDSW، مقدار این صفت در $RBD_{Proctor}$ برابر با ۰/۸۶۸ به حداکثر مقدار خود (۰/۹۰۸) رسید. دامنه بهینه $RBD_{Proctor}$ برای RDSW ۰/۸۳۸ تا ۰/۸۹۸ بود. دامنه بهینه برای RH و RRV به‌ترتیب ۰/۸۳۸ تا ۰/۸۹۸ و ۰/۸۳۸ تا ۰/۸۹۸ بود (جدول ۳). در بین صفت‌های مورد بررسی بزرگترین دامنه بهینه مربوط به RH می‌باشد. این نتیجه نشان داد که ارتفاع گیاه آفتابگردان در مقایسه با حجم ریشه و مقدار دانه آن، کمتر تحت تاثیر تغییرات چگالی ظاهری خاک قرار می‌گیرد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱- روابط چگالی ظاهری نسبی به‌دست‌آمده از آزمون پروکتور ($RBD_{Proctor}$) با جرم محصول دانه نسبی (RY)(الف)؛ جرم خشک ساقه و برگ نسبی (RSDW) (ب)؛ ارتفاع گیاه نسبی (RH) (ج) و حجم ریشه نسبی (RRV) (د)

حدود بحرانی و دامنه بهینه RBD_{200kPa}

روابط RBD_{200kPa} با RY، RSDW، RH و RRV در شکل (۲) نشان داده شده است. مقادیر 0.95LL و 0.95UL برای RBD_{200kPa} که محدوده دامنه بهینه برای این شاخص را نشان می‌دهند به‌ترتیب برابر با ۰/۹۴۰ و ۱/۰۰۹ بود (جدول ۳ و شکل ۲-الف). بر اساس رابطه به‌دست‌آمده بین RBD_{200kPa} با RY، مقدار این صفت در RBD_{200kPa} برابر با ۰/۹۷۵ به بیشینه مقدار خود رسید. این مقدار در مقایسه با بیشینه مقدار به‌دست آمده برای $RBD_{Proctor}$ (۰/۸۵۴)، ۱۴ درصد بزرگ‌تر است. علت این امر بزرگتر بودن مقدار $BD_{Proctor}$ از BD_{200kPa} به‌عنوان BD_{ref} می‌باشد (Håkansson, 1990). Reichert *et al.* (2009) بیش‌ترین عملکرد سویا و گندم را به‌ترتیب در RBD_{200kPa} برابر با ۱/۰۵۲ و ۱/۰۲۰ به‌دست آوردند. این مقدار برای ماش سیاه مشابه گندم و برابر با ۱/۰۲۰ بود که کمی بزرگ‌تر از RBD_{200kPa} بدست آمده برای حداکثر دانه آفتابگردان در این آزمایش می‌باشد. تفاوت در فصل رشد و نوع گیاه از عوامل مهم تاثیرگذار در تعیین مقادیر بهینه و بحرانی RBD می‌باشند (Håkansson, 2005). با توجه به شکل (۱-الف)، دامنه ۰/۹۴۰ تا ۱/۰۰۹ دامنه بهینه RBD_{200kPa} برای دانه آفتابگردان است. در این دامنه انتظار بر این است که مقدار دانه آفتابگردان برابر یا بیش از ۹۵ درصد حد بیشینه باشد. حد پایین محدودیت شدید (0.85LL) و حد بالای محدودیت شدید (0.85UL) به‌ترتیب برابر با ۰/۹۱۵ و ۱/۰۳۴ بود. در RBD_{200kPa} بزرگتر از ۱/۰۳۴ یا کوچکتر از ۰/۹۱۵ مقدار دانه آفتابگردان به‌علت شرایط فیزیکی نامطلوب خاک کمتر از ۸۵ درصد مقدار بیشینه خواهد شد. بر اساس رابطه RBD_{200kPa} با RDSW (شکل ۱-ب)، دامنه بهینه برای RDSW ۰/۹۵۷ تا ۱/۰۲۶ بود. دامنه بهینه برای RH و RRV به‌ترتیب ۰/۹۲۰ تا ۱/۰۲۱ و ۰/۹۷۶ تا ۱/۰۳۱ بود (جدول ۳).

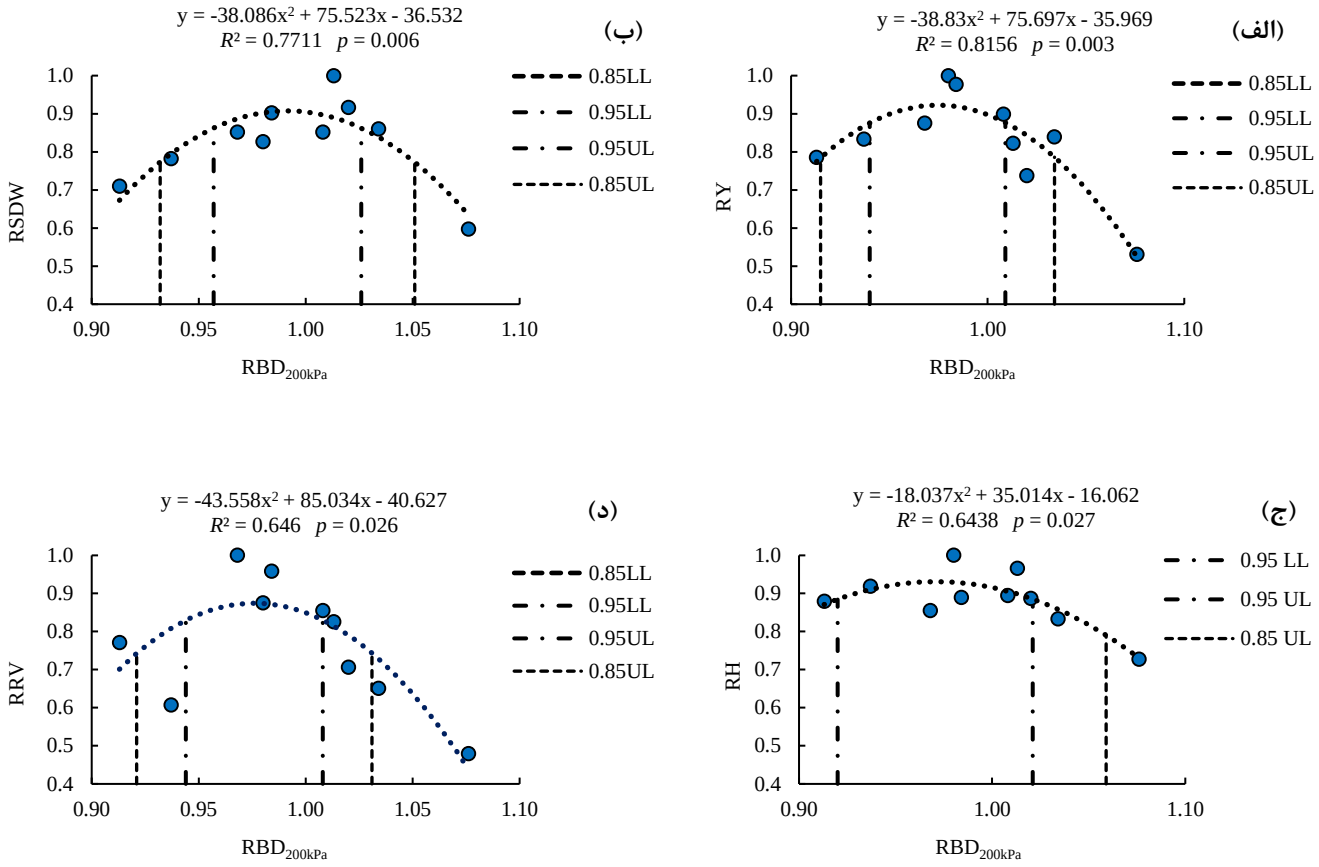
جدول ۳- مقادیر بحرانی و دامنه بهینه $RBD_{Proctor}$ و RBD_{200kPa} برای صفات رویشی گیاه آفتابگردان*

صفت	$RBD_{Proctor}$				RBD_{200kPa}			
	0.85LL	0.95LL	دامنه بهینه	0.95UL	0.85UL	0.95LL	دامنه بهینه	0.95UL	0.85UL
RY	۰/۸۰۱	۰/۸۲۳	◄----►	۰/۸۸۴	۰/۹۰۶	۰/۹۴۰	◄----►	۱/۰۰۹	۱/۰۳۴
RSDW	۰/۸۱۶	۰/۸۳۸	◄----►	۰/۸۹۸	۰/۹۲۰	۰/۹۵۷	◄----►	۱/۰۲۶	۱/۰۵۱
RH	—	۰/۸۰۶	◄----►	۰/۸۹۴	۰/۹۲۷	۰/۹۲۰	◄----►	۱/۰۲۱	۱/۰۵۹
RRV	۰/۸۰۶	۰/۸۲۶	◄----►	۰/۸۸۳	۰/۹۰۲	۰/۹۷۶	◄----►	۱/۰۳۱	۱/۰۷۶
میانگین	۰/۸۰۸	۰/۸۲۳		۰/۸۹۰	۰/۹۱۴	۰/۹۴۸		۱/۰۲۲	۱/۰۵۵

* $RBD_{Proctor}$ و RBD_{200kPa} به‌ترتیب چگالی ظاهری نسبی بدست‌آمده از آزمون پروکتور و تنش محوری ۲۰۰ کیلوپاسکال در فشردگی محصور؛ RY جرم محصول دانه نسبی؛ RSDW جرم خشک ساقه و برگ نسبی؛ RLDW جرم خشک برگ نسبی؛ RH ارتفاع گیاه نسبی؛ RRV حجم ریشه نسبی؛ 0.85LL حد پایین محدودیت شدید؛ 0.95LL حد پایین شروع محدودیت؛ 0.95UL حد بالای شروع محدودیت و 0.85UL حد بالای محدودیت شدید می‌باشند.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲- روابط چگالی ظاهری نسبی بدست‌آمده از تنش محوری ۲۰۰ کیلو پاسکال در فشردگی محصور (RBD_{200kPa}) با جرم محصول دانه نسبی (RY)(الف)؛ جرم خشک ساقه و برگ نسبی (RSDW) (ب)؛ ارتفاع گیاه نسبی (RH) (ج) و حجم ریشه نسبی (RRV) (د)

نتیجه‌گیری کلی

شاخص‌های $RBD_{Proctor}$ و RBD_{200kPa} به‌عنوان دو روش اصلی برای محاسبه چگالی ظاهری نسبی، روابط قوی با عملکرد دانه، رشد ریشه و بخش هوایی گیاه آفتابگردان داشتند که نشان دهنده توانایی زیاد این دو شاخص برای پیش‌بینی مقدار رشد گیاه و عملکرد گیاه آفتابگردان است. برای استفاده عملی از این شاخص‌ها دامنه بهینه و مقادیر بحرانی $RBD_{Proctor}$ و RBD_{200kPa} تعیین شدند. عملکرد دانه آفتابگردان در $RBD_{Proctor}$ ۰/۸۲۳ تا ۰/۸۸۴ (دامنه بهینه) برابر یا بیش از ۹۵ درصد حد بیشینه بود. مقادیر ۰/۸۰۱ و ۰/۹۰۶ به‌ترتیب برابر با حد پایین محدودیت شدید (0.85LL) و حد بالای محدودیت شدید (0.85UL) بودند. زمانیکه مقدار $RBD_{Proctor}$ خاک از ۰/۹۰۶ بیش‌تر شود به‌دلیل کاهش تهویه و افزایش مقاومت فروروی خاک و زمانیکه مقدار $RBD_{Proctor}$ خاک از ۰/۸۰۱ کمتر شود، به‌دلیل تماس ضعیف‌تر ریشه-خاک و در نتیجه کاهش جذب آب و عناصر غذایی مقدار دانه آفتابگردان کمتر از ۸۵ درصد حد بیشینه می‌شود. در این آزمایش دامنه بهینه RBD_{200kPa} برای دانه آفتابگردان ۰/۹۴۰ تا ۱/۰۰۹ به‌دست آمد. مقادیر 0.85LL و 0.85UL به‌ترتیب برابر با ۰/۹۱۵ و ۱/۰۳۴ بودند.

به‌علت اندازه‌گیری بسیار راحت و سریع شاخص RBD و قدرت بالای این شاخص برای ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک و توصیف عملکرد گیاه، پیشنهاد می‌شود دامنه بهینه و مقادیر بحرانی این شاخص برای دیگر گیاهان زراعی در شرایط آب و هوایی مختلف تعیین شود. در تعیین مقادیر بهینه RBD، بررسی سایر پارامترهای مهم مانند شاخص کلروفیل، شاخص سطح برگ، تغییرات مقادیر هورمون‌های مرتبط با تنش‌های فیزیکی و کارآیی مصرف آب می‌تواند مفید و ارزشمند باشد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Arvidsson, J. and Håkansson, I. (1991) A model for estimating crop yield losses caused by soil compaction. *Soil and Tillage Research*, 20, 319–332.

www.SID.ir

Archive of SID

Arvidsson, J. and Håkansson, I. (1996) Do effects of soil compaction persist after ploughing? Results from 21 long-term field experiments in Sweden. *Soil and Tillage Research*, 39, 175–197.

Asgarzadeh, H. and Mosaddeghi, M. R. (2013) Proposing and evaluating a laboratory method for quick determination of different quantities of soil available water to plant. *Applied Soil Research*, 1 (1), 56–73. (In Farsi)

Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M. R., Mahboubi, A. A., Nosrati, A. and Dexter, A. R. (2010) Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. *Plant and Soil*, 335 (1-2), 229–244.

Bengough, A. G., Bransby, J. Hans, M. F. McKenna, S. J., Roberts, T. J. and Valentine, T. A. (2006) Root responses to soil physical conditions: growth dynamics from field to cell. *Journal of Experimental Botany*, 57: 437–447.

Berisso, F. E., Schjønning, P., Keller, T., Lamandé, M., Etana, A., de Jonge, L. W., Iversen, B. V., Arvidsson, J. and Forkman, J. (2012) Persistent effects of subsoil compaction on pore size distribution and gas transport in a loamy soil. *Soil and Tillage Research*, 122, 42–51.

Carter, M. R. (1990) Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. *Can. J. Soil Sci*., 70, 425–433.

Chan, K. Y., Oates A. Swan, A. D., Hayes, R. C., Dear, B. S. and Peoples, M. B. (2006) Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. *Soil and Tillage Research*, 89, 13–21.

Da Silva, A. P., Kay, B. D. and Perfect, E. (1994) Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58(6), 1775-1781.

Etana, A., Larsbo, M., Keller, T., Arvidsson, J., Schjønning, P., Forkman, J. and Jarvis, N. (2013) Persistent subsoil compaction and its effects on preferential flow patterns in a loamy till soil. *Geoderma*, 192, 430–436.

Håkansson, I. (1990) A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil and Tillage Research*, 16, 105–120.

Håkansson, I., (2005). Machinery-induced compaction of arable soils, incidence-consequences-counter-measures. SLU, Uppsala, *Reports from the Division of Soil Management*, No. 109, 154 pp.

Håkansson, I. and Lipiec, J. (2000) A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil and Tillage Research*, 53, 71–85.

Hamza, M. A. and Anderson, W. K. (2005) Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, 82, 121–145.

Horn, R., van den Akker, J. J. H. and Arvidsson, J. (2000) Subsoil Compaction – Distribution, Processes and Consequences. *Advances in GeoEcology*, Reiskirchen, pp. 32, 462.

Keller, T. and Håkansson, I. (2010) Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. *Geoderma*, 154, 398–406.

Lima, R. P., Silva, A. P., Giarola, N. F. B., Silva, A. R. and Rolim M. M. (2017) Changes in soil compaction indicators in response to agricultural field traffic. *Biosystems engineering*, 162, 1–10.

Lipiec, J., Håkansson, I., Tarkiewicz, S., Kossowski, J. (1991) Soil physical properties and growth of spring barley related to the degree of compactness of two soils. *Soil and Tillage Research*, 19, 307–317.

Lipiec, J. and Hatano, R. (2003) Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*, 116, 107–136.

McBride, R. A. (1993) Soil consistency limits. In: Carter MR (Ed.), Soil Sampling and Methods of Analysis. Lewis Publication/CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 519–527.Reichert, J. M., Suzuki, L. E. A. S., Reinert, D. J., Horn, R. and Håkansson, I. (2009) Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage Research*, 102, 242–254.

Simota, C., Lipiec, J., Dumitru, E. and Tarkiewicz, S. (2000) SIBIL – A simulation model for soil water dynamics and crop yield formation considering soil compaction effects: I. Model description. In: Horn, R., van den Akker, J. J. H. and Arvidsson, J. (Eds.), Subsoil compaction–distribution, processes and consequences. *Advances in GeoEcology*, 32. Catena Verlag. Reiskirchen, Germany: 155– 169.

Veen, B. W., van Noordwijk, M., de Willigen, P., Boone, F. R. and Kooistra, M. J. (1992) Root-soil contact of maize, as measured by a thin-section technique. *Plant and Soil*, 139, 131–138

Zink, A., Fleige, H. and Horn R. (2011) Verification of harmful subsoil compaction in loess soils. *Soil and Tillage Research*, 114, 127–134.

www.SID.ir