تحقیقات آب و خاک ایران، دورهٔ ۴۸، شمارهٔ ۴، آذر و دی ۱۳۹۶ (ص ۷۵۸-۷۴۹) DOI: 10.22059/ijswr.2017.212087.667505

برآورد ضریب تخلیه مجاز رطوبتی خاک برای گیاه کلزا و گندم با استفاده از برخی ویژگی‌های گیاهی و خاک

فاطمه مسکینی[۱]، محمدحسین محمدی[۲*]، محمدرضا نیشابوری[۳]، فرید شکاری[۴]

۱. دانشجوی سابق دکتری، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

۲. دانشیار، گروه خاکشناسی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج

۳. استاد، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز

۴. دانشیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۵/۵ – تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۸/۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۱۰/۸)

چکیده

در پژوهش حاضر رابطه بین ضریب حساسیت گیاه به تنش (K_y) و رطوبت بحرانی که در کمتر از آن گیاه دچار تنش می‌شود (θ_c)، در قالب یک مدل ریاضی مفهومی توسعه داده شد. ارزیابی دقت این مدل با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایشات کشت گلخانه‌ای گندم و کلزا در دو خاک لوم شنی و لوم رسی بررسی گردید. نتایج تحلیل مدل نشان داد که در یک K_y ثابت، عملکرد نسبی گیاه (Y_r) با اختلاف رطوبت خاک از θ_c (θ_c-θ) به‌صورت خطی کاهش می‌یابد. همچنین، هر چه حساسیت گیاه یا حساسیت مرحله رشد گیاه به کمبود آب بیشتر باشد (مقادیر K_y بیشتر)، شیب رابطه خطی بین Y_r و (θ_c-θ) بیشتر می‌شود. به‌عبارت‌دیگر در گیاهان با مقدار K_y کم می‌توان ضریب تخلیه مجاز رطوبتی را بزرگ‌تر در نظر گرفت و نیز به ازای یک Y_r مشخص، حساسیت گیاه با افت رطوبت خاک به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد. مشاهدات تجربی ضمن تأیید نتایج مدل نشان داد که مقدار رطوبت بحرانی خاک لوم رسی برای هر دو گیاه برابر با ۰/۲۸ $cm^3\ cm^{-3}$ و در خاک لوم شنی برای گندم و کلزا به ترتیب برابر با ۰/۲۱ و ۰/۱۹۵ $cm^3\ cm^{-3}$ می‌باشد. ضریب مجاز تخلیه رطوبتی خاک برای گندم در هر دو خاک مورد مطالعه تقریباً برابر با ۰/۳۵ به دست آمد؛ اما کلزا در خاک لوم شنی دارای ضریب مجاز تخلیه رطوبتی بالاتری (F= ۰/۴۴) نسبت به خاک لوم رسی (F= ۰/۳۸) بود.

واژه‌های کلیدی: آب قابل دسترس خاک، ضریب حساسیت گیاه، رطوبت بحرانی خاک

مقدمه

ایران دارای ۹۳/۳ میلیارد مترمکعب آب‌های تجدیدپذیر در سال می‌باشد که از این مقدار بخش کشاورزی با ۹۲/۱۸ درصد بیشترین مصرف آب را به خود اختصاص می‌دهد و بخش شرب با ۶/۶۵ درصد و بخش صنعت با ۱/۱۸ درصد به ترتیب در مکان‌های بعدی قرار دارند (FAO, 2013). کمبود آب و ناکارآمدی روش‌های استفاده از آن، از عوامل اصلی محدودکننده توسعه کشاورزی به‌ویژه در نواحی خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود (FAO, 2013). چگونگی دسترسی آب خاک برای گیاهان یک زمینه مطالعاتی مهم در روابط آب، خاک و گیاه است (Kirkham, 2005) و به دلیل اثرات عمده آب خاک بر رشد گیاه، می‌توان از آن به عنوان یک شاخص مهم در پیش‌بینی عملکرد گیاه استفاده کرد (Timlin *et al.*, 2001). مطالعات زیادی روی قابلیت دسترسی آب خاک برای گیاه با تمرکز بر تعیین اختلاف رطوبت خاک در شرایط ظرفیت مزرعه‌ای (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) و عوامل مؤثر بر مقدار آب سهل‌الوصول برای گیاهان مختلف صورت گرفته است (Veihmeyer and Hendrickson, 1949; Letey 1985; da Silva *et al*. 1994; Asgarzadeh *et al*., 2011). به طور معمول، PWP مقدار رطوبت خاک در مکش ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر و FC مقدار رطوبت خاک در مکش ۳۳۰ سانتی‌متر (Ratliff *et al*., 1983; Colman 1947; Kirkham, 2005) در نظر گرفته می‌شود. غالباً مقدار مکش معادل رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای به نوع بافت خاک وابسته است (Minasny and McBratney, 2003). درحالی‌که در مزرعه برآورد رطوبت FC بر اساس زمان زهکشی استوار است، برآورد آن در آزمایشگاه بر مبنای مکش خاک انجام‌شده است (Romano and Santini, 2002). در واقع FC یک مقدار رطوبت مشخصی نیست بلکه مقدار رطوبتی است که در آن، شدت‌جریان آب خاک به خارج از منطقه ریشه ناچیز می‌گردد و مقدار رطوبت خاک در طی زمان تغییر نمی‌یابد (Cassel and Nielsen, 1986). Hillel (1998) و Meyer and Gee (1999) نیز بیان نمودند که تعیین رطوبت ظرفیت مزرعه-

* نویسنده مسئول: mhmohamad@ut.ac.ir

Archive of SID
www.SID.ir

ای در یک مقدار مکش مشخصی از خاک (۳۳۰ cm یا ۱۰۰ cm) در تضاد با مفهوم آن بر مبنای جریان زهکشی خاک می‌باشد. چون هیچ تضمینی وجود ندارد که در شدت زهکشی ناچیز خاک مکش خاک برابر با ۳۳۰ cm گردد. لذا FC یک مقدار مشخص و یک ویژگی منحصر به فرد از خاک نیست. بر این مبنا Assouline and Or (2014) فرض نمودند که رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای رطوبتی است که در آن پیوستگی فاز مایع در طول ستون خاک در حال زهکشی از بین می‌رود. در روش پیشنهادی آن‌ها، مکش معادل رطوبت FC در هر خاک با توجه به خصوصیات هیدرولیکی آن خاک تعیین می‌گردد.

علاوه بر این، قابلیت دسترسی آب خاک متأثر از نوع گیاه نیز می‌باشد. مطالعات Bielorai (1973) و Ritchie (1981) نشان داد که برای چندین گیاه و خاک از رطوبت FC تا یک مقدار رطوبت بحرانی (θ_c) فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه مطلوب است و در رطوبت‌های کمتر از θ_c، با کاهش رطوبت خاک عملکرد گیاه نیز به‌صورت خطی کاهش می‌یابد. مفهوم رطوبت بحرانی به‌صورت گسترده‌ای برای شرح دادن اثرات مقدار رطوبت خاک روی عملکرد گیاه و سایر فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه به‌کاررفته است (Masinde *et al*., 2006; Casadebaig *et al*., 2008; Davatgar *et al*., 2009). تلاش‌هایی جهت تعیین اثر بافت خاک و شدت تعرق بر روی مقدار θ_c صورت گرفته است (Hammer and Muchow, 1990; Muchow and Sinclair, 1990; Ray *et al*., 2002; Wu *et al*., 2011). بر اساس مطالعات صورت گرفته توسط Robertson and Fukai (1994) بر روی اثر مقدار رطوبت خاک بر تبادلات گازی، مقدار رطوبت بحرانی برای سورگوم دانه‌ای برای خاک رسی و شنی به ترتیب ۰/۰۹۱ و m^3 ۰/۰۳۴ m^{-3} گزارش گردید. نتایج Turner *et al*. (1985) و Ray *et al*. (2002) نشان داد که شدت تعرق اثر اندکی بر میزان رطوبت بحرانی خاک برای آفتابگردان در خاک لوم و گیاه ذرت در خاک لوم شنی دارد. Novák *et al*. (2005) و Wu *et al*. (2011) نشان دادند که مقدار رطوبت بحرانی خاک متأثر از نوع بافت خاک است. به‌طورکلی اختلاف رطوبت نقطه ظرفیت مزرعه‌ای (θ_{FC}) و رطوبت بحرانی (θ_c) آب سهل‌الوصول خاک (RAW)[1] تعریف می‌شود. مقدار آب سهل‌الوصول خاک هم متأثر از خصوصیات خاک همچون منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی خاک و هم متأثر از ویژگی‌های گیاه همچون شاخص سطح برگ، تراکم و عمق ریشه دوانی و هدایت روزنه‌ای می‌باشد (Carlesso, 1993). درواقع RAW بخشی از کل آب قابل‌استفاده خاک (SAW)[2] است که در آن گیاه بدون ایجاد تنش کم‌آبی، قابلیت جذب آب را دارد و با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد (FAO, 1979):

$$RAW = F \times SAW \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

F ضریب مجاز تخلیه‌ی رطوبتی خاک است. این ضریب یک مقدار تجربی بوده و به‌طورمعمول از ۰/۳ برای گیاهان با ریشه کم‌عمق و تبخیر و تعرق بالا تا ۰/۷ برای گیاهان با ریشه عمیق و تبخیر و تعرق پایین متغیر است. استفاده از مقدار F= ۰/۵، برای بسیاری از محصولات عمومیت دارد. جهت تعیین F یا از جداول ارائه‌شده توسط فائو (FAO, 1979) و یا از مشاهدات تجربی (Kashyap and Panda, 2003; Panda *et al*., 2003) استفاده می‌شود؛ و تاکنون روشی برای برآورد ضریب F پیشنهاد نشده است.

درمجموع نیمی از اراضی زیر کشت کشور ایران تحت کشت گندم (*Triticum a.*) به‌عنوان محصول عمده غذایی می‌باشند. همچنین کلزا (*Brassica napus L.*) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین دانه‌های روغنی از بیش‌ترین میزان رشد سالانه سطح زیر کشت در بین گیاهان روغنی مهم جهان و نیز کشورمان برخورداراست. ازآنجایی‌که عملکرد گیاهان مذکور، به‌ویژه گندم به‌شدت به مقدار آب ذخیره‌شده در پروفیل خاک در زمان کشت وابسته بوده و می‌تواند با عملیات آبیاری مناسب افزایش یابد (Kang *et al*., 2002). لذا تعیین ضریب مجاز تخلیه رطوبتی خاک برای گیاهان مذکور، جهت مدیریت مناسب آبیاری و حصول حداکثر عملکرد اهمیت دارد. با در نظر گرفتن این حقیقت که مقدار رطوبت خاک بین رطوبت نقطه ظرفیت مزرعه‌ای (θ_{FC}) و رطوبت بحرانی (θ_c) آب سهل‌الوصول خاک است. هدف این پژوهش استفاده از مفهوم رطوبت θ_c جهت بسط مدلی برای برآورد ضریب تخلیه‌ی مجاز رطوبتی خاک و سپس ارزیابی مدل بسط داده‌شده با استفاده از داده‌های تجربی برای دو گیاه گندم و کلزا در دو نوع مختلف بافت خاک می‌باشد.

تئوری

برای برآورد مقدار کاهش عملکرد محصول در اثر تنش حاصل از کمبود آب خاک، از رابطه (۲) استفاده می‌شود (Doorenbos and Kassam, 1979):

$$\left(1-\frac{Y}{Y_{\max}}\right)=K_y\left(1-\frac{ET_C}{ET_{C\max}}\right) \qquad \text{(رابطه ۲)}$$

Y: عملکرد واقعی گیاه، Y_{max}: حداکثر عملکرد گیاه در غیاب تنش‌های خشکی، K_y: ضریب حساسیت عملکرد، ET_C:

1 . Relative available water

2. Soil available water

Archive of SID

www.SID.ir

تبخیر و تعرق واقعی گیاه (رابطه ۳) و ET_{Cmax}: تبخیر و تعرق گیاه به ازای تولید حداکثر عملکرد است.

$$ET_C = ET_0.K_C \quad \text{(رابطه ۳)}$$

ET_0: تبخیر و تعرق مرجع و K_C: ضریب گیاهی است که با استفاده از رابطه (۴) قابل‌محاسبه می‌باشد (Doorenbos and Kassam, 1979).

$$K_C = K_S.K_{cb} + K_e \quad \text{(رابطه ۴)}$$

K_S: ضریب تنش، K_{cb}: ضریب گیاهی پایه و K_e: ضریب تبخیر از خاک می‌باشند. با تلفیق روابط (۲)، (۳) و (۴) و با در نظر گرفتن این‌که در شرایط بدون تنش K_S =۱ است (Doorenbos and Kassam, 1979)، رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$(1-\frac{Y}{Y_{\max}}) = K_y(1-\frac{ET_0(K_S.K_{cb}+K_e)}{ET_0(K_{cb}+K_e)}) \quad \text{(رابطه ۵)}$$

اگر پوشش گیاهی متراکم باشد، می‌توان فرض نمود که مقدار K_e در مقابل K_{cb} قابل صرف‌نظر می‌باشد؛ بنابراین رابطه (۵) به‌صورت زیر ساده می‌گردد:

$$(1-\frac{Y}{Y_{\max}}) = K_y(1-K_S) \quad \text{(رابطه ۶)}$$

Doorenbos and Kassam (1979) فرض کردند که زمانی که رطوبت خاک از یک مقدار آستانه کمتر باشد، تنش اعمال‌شده بر گیاه متناسب با مقدار کمبود رطوبت موجود در منطقه ریشه، خواهد بود:

$$K_S = \frac{\theta-\theta_{PWP}}{\theta_C-\theta_{PWP}} \quad \text{(رابطه ۷)}$$

θ: مقدار رطوبت خاک، θ_C: مقدار رطوبت آستانه خاک و θ_{PWP}: رطوبت خاک در نقطه پژمردگی دائم یا حد پایین آب قابل‌دسترس خاک برای گیاه می‌باشند. با تلفیق رابطه (۷) با رابطه (۶) و ساده‌سازی، رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$for\theta_{PWP} \le \theta \le \theta_C \quad \text{(رابطه ۸)}$$
$$for\theta > \theta_C, Y = Y_{\max}$$
$$Y = Y_{\max}\left[1+(\frac{\theta-\theta_C}{\theta_C-\theta_{PWP}}).K_y\right]$$

معادله (۸) رابطه بین ضریب حساسیت عملکرد با برخی خصوصیات خاک (θ_{FC} و θ_{PWP}) و گیاه (θ_C) را نشان می‌دهد.

ابتدا رابطه (۲) بر داده‌های عملکرد و تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده در هر دو خاک لوم شنی و لوم رسی و برای هر دو گیاه گندم و کلزا برازش داده‌شده و مقادیر K_y برآورد گردید. سپس برای تعیین رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای به‌عنوان حد بالای آب قابل‌دسترس خاک، ابتدا مقدار مکش در رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای، h_{FC}، به روش Assouline and Or (2014) با استفاده از رابطه (۹) برآورد گردید:

$$h_{FC} = \frac{1}{\alpha}\left(\frac{n-1}{n}\right)^{(1-2n)/n} \quad \text{(رابطه ۹)}$$

α($\frac{1}{cm}$) و n(-) پارامترهای معادله ون گنوختن و تعیین‌کننده شکل منحنی مشخصه آب خاک می‌باشند. پارامترهای معادله van Genuchten (1980) از برازش رابطه (۱۰) بر داده‌های منحنی مشخصه آب خاک اندازه‌گیری شده به دست آمد و سپس مقدار رطوبت خاک در مکش معادل ظرفیت مزرعه‌ای محاسبه شد.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s-\theta_r}{\left[1+(\alpha h)^n\right]^{\left[1-\frac{1}{n}\right]}} \quad \text{(رابطه ۱۰)}$$

θ_r و θ_S به ترتیب رطوبت حجمی باقیمانده و اشباع (cm^3cm^{-3})، h مکش ماتریک خاک (cm) می‌باشند. رطوبت خاک در نقطه پژمردگی دائم (۱۵۰۰۰ cm) به‌عنوان θ_{PWP} در نظر گرفته شد. در انتها رابطه (۸) با استفاده از نوارابزار SOLVER در نرم‌افزار اکسل حل شد (Wraith and Or, 1998) و مناسب‌ترین مقدار θ_C در دو گیاه موردمطالعه در خاک لوم شنی و لوم رسی تعیین گردید. سپس ضریب مجاز تخلیه رطوبتی خاک با استفاده از رابطه (۱۱) محاسبه گردید:

$$F = \frac{\theta_{FC}-\theta_c}{\theta_{FC}-\theta_{PWP}} \quad \text{(رابطه ۱۱)}$$

مواد و روش‌ها

در این پژوهش دو نمونه خاک از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری از اراضی دانشگاه زنجان نمونه‌برداری و به آزمایشگاه منتقل شد. پس از کوبیدن و خشک نمودن از الک‌های ۸ میلی‌متری (برای آزمایش‌های گلدانی) و دو میلی‌متری (برای تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی) عبور داده شد. برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های موردمطالعه در جدول (۱) آمده است. منحنی توزیع اندازه ذرات خاک (PSD) به روش هیدرومتر و الک (Gee and Or, 2002) تعیین گردید. به‌منظور تعیین منحنی مشخصه آب خاک، ابتدا نمونه‌ها با محلول کلرید کلسیم ۰/۰۱ نرمال از پائین اشباع و رطوبت آن‌ها با استفاده از ستون قیف آویزان (۰/۱- ۱۵ کیلو پاسکال)، دستگاه صفحات فشاری (۳۰- ۱۰۰ کیلو پاسکال) و غشای فشاری (مکش ۱۰۰- ۱۵۰۰ کیلو پاسکال) تعیین گردید (Dane and Hopmans, 2002).

کشت گیاه

این پژوهش به‌صورت کشت گلدانی و در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در دو سال متوالی (۱۳۹۱ و ۱۳۹۲) با ۸ ساعت تاریکی و ۱۴ ساعت روشنایی با شدت تابش ۱۱ تا ۱۴ کیلو لوکس بسته به ساعات روز با نور طبیعی یا توسط نور لامپ

Archive of SID

www.SID.ir

انجام شد. در طول دوره رشد دمای گلخانه در دامنه ۱۸ تا ۲۲ درجه سانتی‌گراد حفظ گردید. گیاهان در گلدان‌های با حجم تقریباً ۱۱ لیتر و ارتفاع ۲۷ سانتی‌متر کشت شدند. پس از استقرار گیاهان، ۳ گیاهچه کلزا و ۸ گیاهچه گندم در هر گلدان حفظ شدند. پس از استقرار گیاه‌ها، ۱۴ تیمار مکش خاک شامل ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۱۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۵۰۰۰، ۸۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ سانتی‌متر با ۳ تکرار بر مجموع ۱۶۸ گلدان اعمال شدند. مکش خاک در تیمارهای مکش ۲۰ تا ۵۰۰ سانتی‌متری با دو نوع تانسیومتر معمولی و حساس کنترل و اندازه‌گیری گردید. جهت کنترل رطوبت خاک در تیمارهای ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ سانتی‌متر از دستگاه بلوک گچی استفاده شد. مقدار تبخیر و تعرق واقعی (ET_c) برای هر گلدان به‌صورت روزانه ثبت گردید. جمع‌آوری داده‌ها تا پایان دوره رشد گندم و کلزا ادامه یافت. بر اساس نتایج آزمون خاک، کمبود عناصر ضروری خاک در سه مرحله‌ی رشد گیاه محلول‌پاشی شد. پس از اتمام دوره رشد جهت تعیین مقدار عملکرد، قسمت هوایی گیاهان در آون در دمای ۷۰°C به مدت حداقل ۷۲ ساعت خشک و سپس توزین شدند. بررسی آماری اثرات تیمارهای اعمال‌شده با استفاده از تجزیه واریانس یک‌طرفه (ANOVA) و مقایسه میانگین‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۹۵ درصد و با استفاده از نرم‌افزار SPSS 19 انجام شد. برای مقایسه شاخص‌های گیاهی اندازه‌گیری شده در تیمارهای مختلف در دو خاک مورداستفاده، از آزمون T-test جفت شده و نرم‌افزار SPSS 19 استفاده شد.

جدول ۱. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های موردمطالعه

ویژگی‌های شیمیایی خاک						ویژگی‌های فیزیکی خاک			
pH	EC ($dS.m^{-1}$)	ماده آلی(%)	N (%)	P (ppm)	K (ppm)	بافت خاک	جرم مخصوص ظاهری(g/cm^3)	رس(%)	سیلت(%) (.05-.002mm)
۷/۷	۰/۹	۱/۳	۰/۱۲	۲۶/۹	۴۲۴/۷	لوم شنی	۱/۵	۱۴	۱۵
۷/۷	۰/۷	۱	۰/۰۹	۱۳/۵	۲۱۱	لوم رسی	۱/۲۵	۳۰	۳۳

نتایج و بحث

جهت تعیین اثر بافت خاک بر شاخص‌های عملکرد کلزا و گندم در تیمارهای رطوبتی مختلف از آزمون T-test جفت شده استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد باوجود افزایش معنی‌دار عملکرد کلزا (وزن خشک قسمت هوایی گیاه) در خاک لوم شنی ($p<۰/۰۱$)، تعداد دانه کلزا در خاک لوم شنی به‌طور معنی‌داری کمتر از خاک لوم رسی به دست آمد (جدول ۲)؛ بنابراین می‌توان بیان نمود که با سبک‌تر شدن بافت خاک، عملکرد کلزا (وزن خشک قسمت هوایی گیاه) به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. درحالی‌که در خاک سنگین‌تر، تعداد دانه کلزا بیشتر از خاک سبک است. نتایج نشان می‌دهد عملکرد گندم در هر گلدان در خاک لوم شنی نسبت به لوم رسی به‌صورت معنی‌داری ($p<۰/۰۱$) بیشتر است (جدول ۲).

جدول ۲. خلاصه‌ی مقایسه آماری شاخص‌های عملکرد گندم و کلزا در هر گلدان در دو خاک لوم شنی و لوم رسی

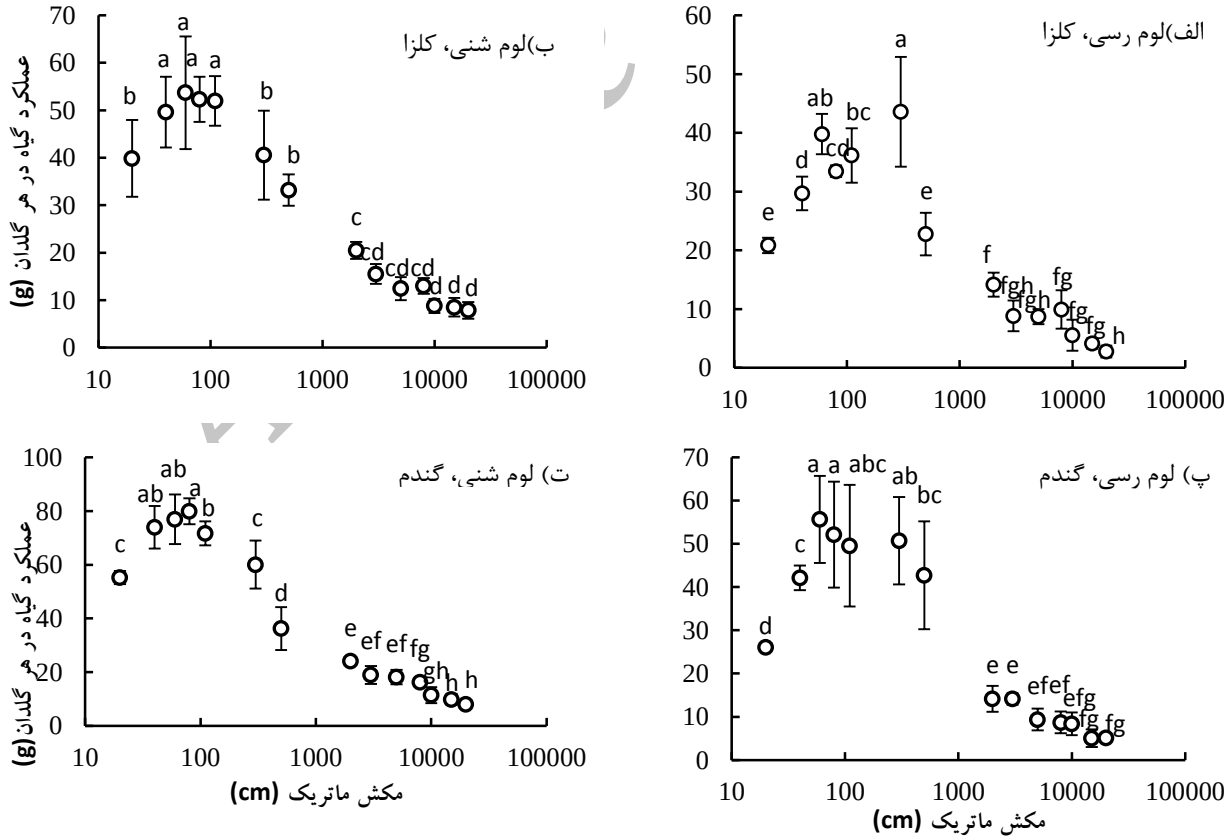
	گندم			کلزا		
	عملکرد (وزن خشک قسمت هوایی گیاه) (g)	تعداد دانه	وزن هزار دانه (g)	عملکرد (وزن خشک قسمت هوایی گیاه) (g)	تعداد دانه	وزن هزار دانه (g)
لوم شنی	۴۰/۰ (۸۷-۷/۳)	۵۲۴ (۱۲۳۱-۰)	۳۳/۸ (۴۸/۶-۰)	۲۸/۷ (۶۶/۷-۶/۲)	۱۲۴۸ (۳۰۸۰-۰)	۳/۲۷ (۴/۴۲-۰)
لوم رسی	۲۶/۰ (۶۵/۰-۲/۸)	۴۰۹ (۱۱۰۴-۴۰)	۲۷/۵ (۳۸/۶-۱۷/۲)	۲۰ (۵۳/۶-۱/۷)	۱۷۲۵ (۵۴۵۳-۰)	۲/۹۶ (۳/۸۲-۰)

هر گلدان شامل ۸ بوته گندم و سه بوته کلزا و دارای سطح مقطعی برابر با ۵۳۰ cm^2 می‌باشد. اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده مقادیر کمینه و بیشینه هر یک از ویژگی‌های گیاهی می‌باشد.

شکل (۱) عملکرد (وزن خشک قسمت هوایی گیاه) کلزا و گندم در دو خاک لوم رسی و لوم شنی به‌عنوان تابعی از مکش ماتریک خاک را نشان می‌دهد. افزایش مکش ماتریک خاک از ۲۰ cm تا ۲۰۰۰۰ cm موجب تغییرات معنی‌داری در عملکرد گندم و کلزا در دو خاک لوم شنی و لوم رسی می‌شود. در هر دو گیاه، عملکرد گیاه با تغییر مکش ماتریک خاک به‌صورت منحنی

Archive of SID
www.SID.ir

زنگوله‌ای (شکل۱) نمایه‌ای تغییر می‌یابد. به‌طوری‌که در مکش‌های ماتریک کم خاک (۲۰ cm) عملکرد گیاه از یک مقدار نسبتاً کم شروع به افزایش می‌نماید. این افزایش تا رسیدن به بیشینه مقدار، در محدوده مکش ماتریک ۶۰ تا ۳۰۰ cm (بسته به نوع گیاه و بافت خاک) ادامه می‌یابد. احتمالاً بخش اول این منحنی مربوط به محدود شدن سرعت تبادل گازهای خاک در رطوبت‌های بالا می‌باشد (Dasberg and Bakker, 1970). به‌طوری‌که کمبود اکسیژن خاک جذب آب توسط ریشه را کنترل می‌کند. باوجوداینکه سرعت مصرف اکسیژن یا انتقال اکسیژن به ریشه گیاهان به بسیاری از عوامل زنده و غیرزنده (مانند دمای خاک، بافت، مرحله رشد گیاه و فعالیت میکروبی) وابسته است اما رطوبت خاک (تخلخل تهویه‌ای) عامل اصلی کنترل‌کننده تبادل گاز بین ریشه گیاهان و هوا می‌باشد (Feddes *et al*., 1978). در مکش‌های ماتریک بالا (رطوبت‌های کمتر) به دلیل افزایش پیوستگی منافذ پر از هوا، محدودیت ناشی از کمبود تخلخل تهویه‌ای کمتر می‌گردد. سپس در محدوده‌ای از مکش ماتریک (از مکش ماتریک دارای حداکثر ویژگی تا مکش ماتریک ۳۰۰ cm) مقدار تغییرات اجزای عملکرد بسیار اندک بوده اما پس‌ازآن (مکش ماتریک خاک>cm ۳۰۰) با افزایش بیشتر مکش ماتریک خاک، مقدار عملکرد گیاه و اجزای آن کاهش می‌یابند (شکل۱). Sinaki *et al*. (2007) نیز مشاهده کردند که کمبود آب در مراحل رویشی و گلدهی کلزا باعث کاهش ماده خشک کل می‌شود و کلزا تحت تنش کم‌آبی، ماده خشک، تعداد خورجین و دانه کمتری در واحد سطح تولید می‌کند. پایین بودن ضریب پخشیدگی آب خاک در مکش‌های ماتریک بالای خاک، جذب آب به‌وسیله ریشه هر دو گیاه را محدود کرده و درنتیجه وزن خشک قسمت هوایی گیاه را کاهش داد (شکل۱). گیاهان در پاسخ به تنش کم‌آبی، تعداد و سطح برگ‌ها را کاهش می‌دهند. علاوه بر این، اندازه کوچک‌تر برگ‌ها موجب فراهم شدن فرصت کمتری برای جذب تابش خورشیدی شده و درنتیجه تولید ماده خشک گیاه کاهش می‌یابد (Sinclair and Muchow, 2001). نتایج مشابهی توسط سایر محققان نیز گزارش‌شده است (Shrestha *et al*., 2006; Yarnia *et al*., 2005).

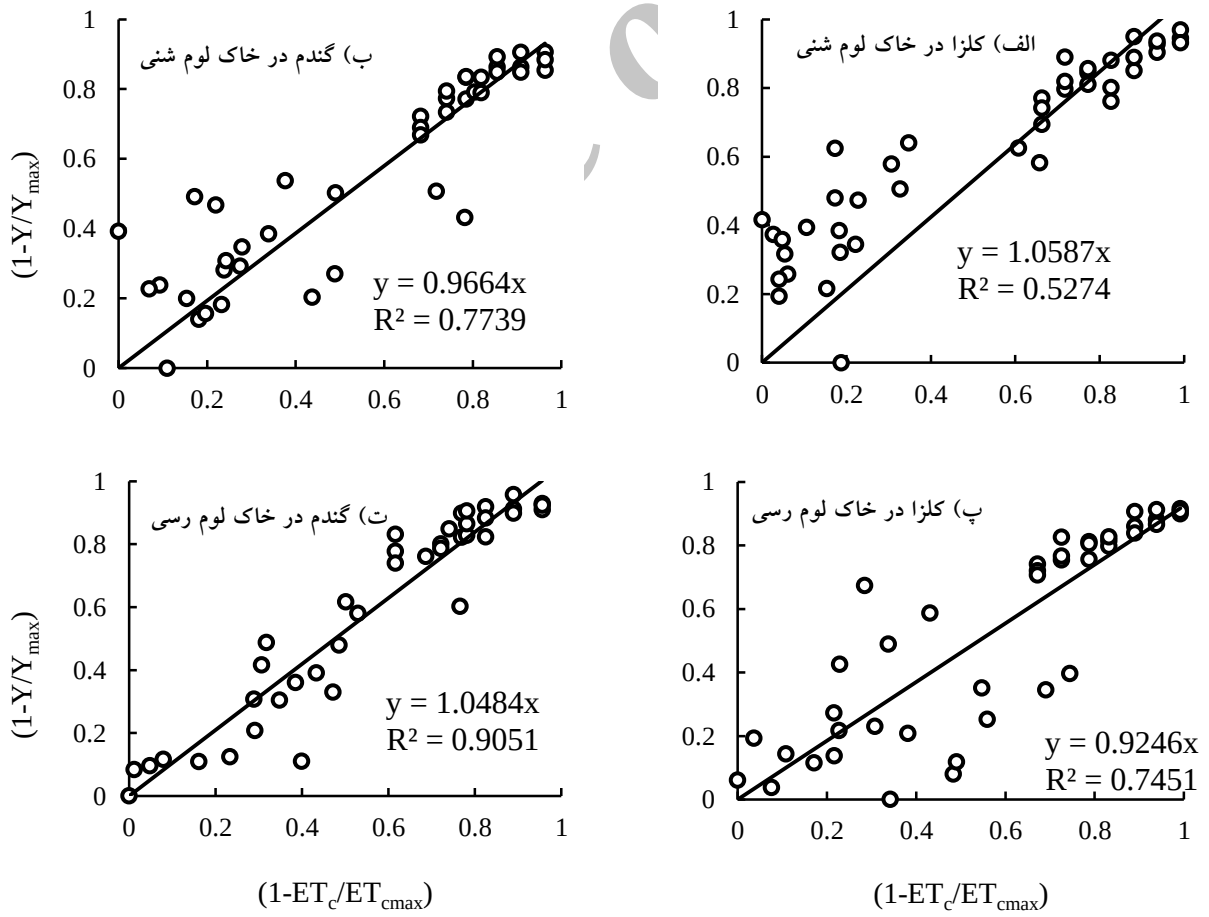


شکل ۱. تغییرات عملکرد (g) کلزا و گندم در هر گلدان در دو خاک لوم شنی و لوم رسی در مقادیر مختلف مکش ماتریک خاک.

حروف متفاوت نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین مقدار ویژگی‌های مختلف در سطح احتمال ۹۵ درصد است. میله‌های خطا نشان‌دهنده ± انحراف معیار هستند (۹ داده). هر گلدان شامل سه بوته کلزا یا ۸ بوته گندم و دارای سطح مقطعی برابر با ۵۳۰ cm^2 می‌باشد.

www.SID.ir

شکل (۲) تغییرات افت نسبی عملکرد (ماده خشک اندام‌های هوایی) ($1-Y/Y_{max}$) در برابر افت نسبی تبخیر و تعرق ($1-ET_c/ET_{cmax}$) دو گیاه کلزا و گندم را در دو خاک لوم شنی و خاک لوم رسی نشان می‌دهد. برم بنای رابطه (۲)، شیب‌خط برازش داده‌شده بر داده‌های افت نسبی عملکرد ($1-Y/Y_{max}$) در برابر افت نسبی تبخیر و تعرق برابر با مقدار K_y می‌باشد (FAO, 1979). مقدار K_y کلزا در خاک لوم شنی و لوم رسی به ترتیب برابر با ۱/۰۶ و ۰/۹۲ به دست آمد. هر چه K_y بیشتر باشد، نشان‌دهنده حساسیت بیشتر گیاه به کمبود آب خاک می‌باشد؛ بنابراین عملکرد کلزا در خاک لوم شنی بیشتر از خاک لوم رسی متأثر از کمبود آب خاک قرار می‌گیرد (شکل۲). این در حالی ست که در گندم، مقدار K_y در خاک لوم رسی (۱/۰۵) بیشتر از خاک لوم شنی (۰/۹۷) به دست آمد. Asadi *et al.* (2003) نیز مقدار K_y گندم در خاک لوم رسی را در منطقه کرج برای کل دوره رشد ۱/۰۸ گزارش کردند. تفاوت مقدار K_y به‌دست‌آمده (۱/۰۵ در خاک لوم رسی و ۰/۹۷ در خاک لوم شنی) با مقدار K_y پیشنهادی FAO (FAO, 1979) (۱/۰۵ برای گندم پاییزه و ۱/۱۵ برای گندم بهاره) مؤید وابستگی مقدار K_y به شرایط محلی، اقلیم، خاک، واریته محصول، مرحله رشد گیاه، مدیریت زراعی و برنامه آبیاری است (Sepaskhah *et al.*, 2006). Kipkorir *et al.* (2002) گزارش نمودند که K_y حاصل از برازش رابطه (۲) بر عملکرد نسبی پیاز و ذرت با مقدار K_y پیشنهادی FAO (FAO, 1979) به ترتیب ۱۶ و ۳ درصد تفاوت دارد. بااین‌وجود، K_y پیشنهادشده توسط FAO قادر به توجیه حدود ۸۰ تا ۸۵ درصد تغییرات عملکرد در طیف وسیعی از شرایط مختلف می‌باشد (Raes *et al.*, 2006). برآورد K_y در مطالعات گلخانه‌ای دارای محدودیت‌هایی است. به همین دلیل برآوردهای مزرعه‌ای K_y به‌عنوان مقادیر دقیق‌تر مورد اقبال عموم قرار می‌گیرند (FAO, 2013).



شکل ۲. تغییرات افت نسبی عملکرد ($1-Y/Y_{max}$) در برابر افت نسبی تبخیر و تعرق گیاه ($1-Et_c/Et_{cmax}$) دو گیاه کلزا (الف و پ) و گندم (ب و ت) در دو خاک لوم شنی و خاک لوم رسی.

زمانی که مقدار رطوبت خاک به‌قدر کافی باشد، خاک، آب موردنیاز گیاه را به‌اندازه کافی تأمین می‌کند در این حالت، جذب آب گیاه برابر با $ET_{c\ max}$ و مقدار عملکرد Y_{max} است. وقتی مقدار آب خاک کاهش می‌یابد و از یک مقدار آستانه کمتر

www.SID.ir

می‌شود جذب آب گیاه کمتر از $ET_{c\ max}$ می‌شود و عملکرد گیاه، Y، نیز کاهش می‌یابد. مقدار رطوبت آستانه خاک (θ_c) حاصل از برازش رابطه (۸) بر داده‌های اندازه‌گیری شده به همراه مقدار رطوبت خاک در حدهای بالا (θ_{FC}) و پایین (θ_{PWP}) آب قابل‌دسترس خاک لوم شنی و لوم رسی در جدول (۳) ارائه‌شده است. مقدار رطوبت بحرانی خاک لوم رسی که در رطوبت‌های کمتر از آن، عملکرد گیاه کاهش می‌یابد، برای هر دو گیاه کلزا و گندم برابر با ۰/۲۸ $cm^3\ cm^{-3}$ به دست آمد؛ اما در خاک لوم شنی رطوبت بحرانی برای گندم برابر با ۰/۲۱ $cm^3\ cm^{-3}$ و برای کلزا برابر با ۰/۱۹۵ $cm^3\ cm^{-3}$ به دست آمد (جدول ۳). Hammer and Muchow (1990) و Muchow and Sinclair (1991) گزارش نمودند که مقدار رطوبت بحرانی خاک برای گیاه ذرت و سورگوم متأثر از نوع بافت خاک نمی‌باشد؛ اما Wahbi and Sinclair (2007) نشان دادند که رطوبت بحرانی خاک برای ذرت کشت‌شده در پیت و خاک لوم شنی به ترتیب برابر با ۰/۳۴ و ۰/۱۶ می‌باشد. نتایج Wu *et al.* (2011) نیز مؤید تأثیر نوع بافت خاک بر میزان رطوبت بحرانی خاک بود. مشاهدات آن‌ها نیز نشان داد که مقدار رطوبت بحرانی برای گیاه گندم در خاک لوم رسی (۰/۲۲۸ $m^3\ m^{-3}$) بیشتر از خاک لوم شنی (m^3 ۰/۱۹ m^{-3}) است. مقادیر گزارش‌شده توسط Wu *et al.* (2011) در هر دو خاک برای گیاه گندم کمتر از مقادیر رطوبت بحرانی به‌دست‌آمده در این پژوهش می‌باشد (جدول ۳). ازآنجایی‌که تفاوت پتانسیل آب بین خاک و ریشه تعیین‌کننده‌ی جذب آب توسط ریشه می‌باشد، بنابراین برای مقایسه اثرات بافت خاک، استفاده از مکش ماتریک خاک نسبت به رطوبت خاک مناسب‌تر خواهد بود. ازاین‌رو مقادیر مکش ماتریک خاک معادل رطوبت‌های بحرانی خاک نیز در جدول ۳ ارائه‌شده‌اند. باوجوداینکه در هر دو گیاه مورد مطالعه، مقدار رطوبت بحرانی در خاک لوم رسی بیشتر از خاک لوم شنی است، مقدار رطوبت سهل‌الوصول (θ_{FC} -θ_C) خاک لوم رسی (برای کلزا ۰/۰۶۸ و برای گندم $m^3\ m^{-3}$ ۰/۰۶۲) بیشتر از خاک لوم شنی (برای کلزا ۰/۰۶۵ و برای گندم $m^3\ m^{-3}$ ۰/۰۵۲) می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان به هدایت هیدرولیکی بالاتر خاک لوم شنی در مکش‌های ماتریک کم خاک نسبت داد (Kikham, 2005). هدایت هیدرولیکی غیراشباع معمولاً به‌عنوان یکی از عوامل تعیین‌کننده پاسخ تعرقی گیاه به قابلیت دسترسی آب خاک در نظر گرفته می‌شود (Wu *et al.*, 2011). علاوه بر این، تفاوت مقدار آب سهل‌الوصول در هر دو بافت خاک لوم رسی و لوم شنی برای گیاه گندم بیشتر از کلزا به دست آمد که مؤید تأثیر بیشتر نوع بافت خاک بر پاسخ تعرقی گندم نسبت به کلزا می‌باشد.

جدول ۳. مقدار رطوبت خاک در حد بالا (θ_{FC}) و پایین (θ_{PWP}) آب قابل‌دسترس خاک برای گیاه و مقدار رطوبت آستانه‌ی کاهش عملکرد (θ_c) و مکش ماتریک معادل آن (h_c) برای گندم و کلزا در دو خاک لوم شنی و لوم رسی

بافت خاک	θ_{FC} ($cm^3\ cm^{-3}$)	θ_{PWP} ($cm^3\ cm^{-3}$)	کلزا			گندم		
			θ_c ($cm^3\ cm^{-3}$)	h_c (cm)	θ_c/θ_{FC}	θ_c($cm^3\ cm^{-3}$)	h_c (cm)	θ_c/θ_{FC}
لوم شنی	۰/۲۶	۰/۱۱۲	۰/۱۹۵	۲۵۵	۰/۷۵	۰/۲۰۸	۱۹۸	۰/۸۰
لوم رسی	۰/۳۴۸	۰/۱۶۹	۰/۲۸۰	۲۳۰	۰/۸۰	۰/۲۸۶	۲۰۴	۰/۸۲

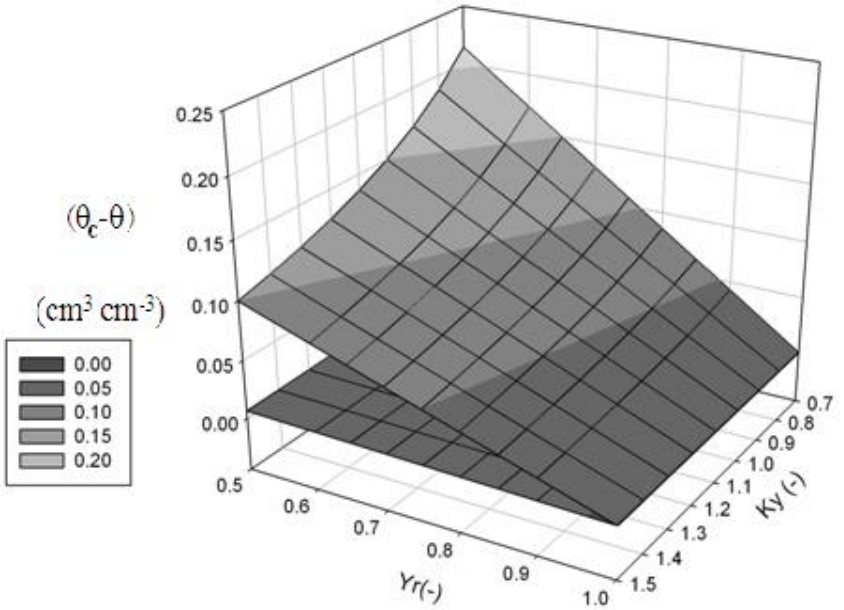
نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد که جهت جلوگیری از کاهش عملکرد گیاه گندم و وقوع تنش آبی، رطوبت هر دو خاک مورد مطالعه باید در ۰/۸۰ رطوبت FC در طول فصل رشد حفظ شود. درحالی‌که در خاک لوم شنی برای کلزا، حفظ رطوبت خاک در ۰/۷۵ رطوبت FC در طول فصل رشد موجب تولید حداکثر عملکرد گیاه خواهد شد. Wu *et al.* (2011) نیز حفظ مقدار ۰/۶۰ و ۰/۷۰ رطوبت FC را به ترتیب در خاک لوم رسی و لوم شنی برای تولید حداکثر عملکرد گندم در دشت‌های کشور چین پیشنهاد دادند.

ضریب مجاز تخلیه رطوبتی خاک با استفاده از رابطه (۱۱) و اطلاعات جدول (۳)، برای گندم در هر دو خاک مورد مطالعه تقریباً برابر با ۰/۳۵ به دست آمد؛ اما کلزا در خاک لوم شنی دارای ضریب مجاز تخلیه رطوبتی بالاتری (F= ۰/۴۴) نسبت به خاک لوم رسی (F= ۰/۳۸) بود. به‌طورکلی، ضریب مجاز تخلیه رطوبتی خاک در هر دو خاک مورد مطالعه برای کلزا بیشتر از گندم به دست آمد. علاوه بر این، مقادیر F به‌دست‌آمده در این پژوهش برای هر دو گیاه در هر دو بافت خاک کمتر از مقادیر پیشنهادی توسط FAO (1976) (گندم= ۰/۵۵ و کلزا= ۰/۶) است. مقادیر F پیشنهادی در این پژوهش برای گیاه گندم (۰/۳۵) کمتر از مقادیر پیشنهادی توسط Panda *et al.* (2003) (۰/۴۵) نیز می‌باشد. پیشنهاد مقدار ضریب F برابر با ۰/۴۵ توسط Panda *et al.* (2003) در مراحل غیر حساس رشد گندم

Archive of SID
www.SID.ir

به کمبود آب می‌باشد. درحالی‌که ضریب پیشنهادی در این پژوهش مربوط به‌کل دوره رشد گندم است.

عملکرد نسبی گیاه، Y_r، به‌عنوان تابعی از K_y و مقدار انحراف رطوبت خاک از رطوبت بحرانی خاک (θ_c-θ) بر اساس رابطه (۸) برآورد شده و در شکل (۳) نشان داده‌شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای هر گیاه خاص یا در هر مرحله رشد گیاه (K_y ثابت)، بین تغییرات (θ_c-θ) و عملکرد نسبی گیاه رابطه مشخصی وجود دارد. به‌طوری‌که عملکرد نسبی گیاه با اختلاف رطوبت خاک از θ_c به‌صورت خطی کاهش می‌یابد. هر چه حساسیت گیاه یا حساسیت مرحله رشد گیاه به کمبود آب بیشتر باشد (مقادیر K_y بیشتر)، شیب رابطه خطی بین Yr و (θ_c-θ) بیشتر می‌شود. این یافته نشان می‌دهد که در گیاهان با مقدار K_y کم (در مراحل رشد یک گیاه با مقدار K_y کم) می‌توان ضریب تخلیه مجاز رطوبتی را بزرگ‌تر در نظر گرفت، بدون آنکه کاهشی در عملکرد اتفاق بیافتد و یا تنشی به محصول وارد آید. چنانچه Y_r به سمت به مقادیر کم (مانند ۰/۵) میل کند، مقدار افزایش ضریب F بیشتر خواهد بود. باید توجه نمود که باوجود رابطه خطی بین Y_r و (θ_c-θ) در یک K_y مشخص، رابطه بین K_y و (θ_c-θ) برای رسیدن به یک عملکرد نسبی مشخص به‌صورت نمایی می‌باشد (شکل ۳). به‌عنوان‌مثال، برای رسیدن به عملکرد نسبی ۰/۵، مقدار اختلاف رطوبت خاک از رطوبت بحرانی خاک برای بادام‌زمینی (K_y= ۰/۷)، ذرت خوشه‌ای (K_y= ۰/۹) و سیب‌زمینی (K_y= ۱/۱) به ترتیب برابر با ۰/۲۱، ۰/۱۷ و $m^3\ m^{-3}$ ۰/۱۵ می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌نمایید با افزایش K_y و حساسیت بیشتر گیاه به کم‌آبی، جهت رسیدن به یک عملکرد نسبی مشخص، اختلاف رطوبت خاک از رطوبت بحرانی کاهش می‌یابد؛ اما روند این کاهش به‌صورت خطی نیست. باوجوداینکه اختلاف مقادیر ضریب K_y بین بادام‌زمینی، ذرت خوشه‌ای و سیب‌زمینی مشابه هم و برابر با ۰/۲ است؛ اما تفاوت (θ_c-θ) بین بادام‌زمینی و ذرت خوشه‌ای برابر با ۰/۴ $m^3\ m^{-3}$ و بین ذرت خوشه‌ای و سیب‌زمینی برابر با ۰/۲ $m^3\ m^{-3}$ است؛ بنابراین، هر چه ضریب حساسیت گیاه به تنش آبی بیشتر باشد، ضریب F نیز کوچک‌تر خواهد شد.



شکل ۳. تغییرات عملکرد نسبی گیاه (Y_r) به‌صورت تابعی از مقدار عامل حساسیت گیاه به کم‌آبی (K_y) و مقادیر مختلف اختلاف رطوبت خاک از رطوبت آستانه‌ی کاهش عملکرد گیاه (θ_c-θ) در رطوبت‌های کمتر از رطوبت بحرانی خاک

نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش به‌منظور بررسی عوامل دخیل در مقدار رطوبت بحرانی خاک انجام شد. ابتدا یک مدل ریاضی برای تبیین رابطه بین رطوبت بحرانی و ضریب حساسیت گیاه و حد پایین رطوبت قابل‌استفاده گیاه توسعه داده شد و برای ارزیابی این مدل پاسخ‌های دو گیاه گندم و کلزا به طیف وسیعی از رطوبت خاک بررسی گردید. سپس با استفاده از مفهوم رطوبت بحرانی، روشی برای برآورد ضریب تخلیه مجاز رطوبتی خاک پیشنهاد گردید. به‌طورکلی، ضریب مجاز تخلیه رطوبتی خاک در هر دو خاک مورد مطالعه برای کلزا بیشتر از گندم به دست آمد. علاوه بر این، مقادیر F به‌دست‌آمده در این پژوهش برای هر دو گیاه در هر دو بافت خاک کمتر از مقادیر پیشنهادی توسط فائو (گندم=

www.SID.ir

۰/۵۵ و کلزا= ۰/۶) به دست آمد. مشاهدات تجربی ضمن تأیید نتایج مدل نشان دادند که رطوبت بحرانی و در نتیجه ضریب مجاز تخلیه‌ی رطوبتی خاک به نوع خاک و گیاه وابسته است. ویژگی‌های گیاهی مستتر در این مدل شامل ضریب حساسیت گیاه (K_y)، حد بالای رطوبت قابل‌جذب یا حد بالای تحمل گیاه به تنش تهویه‌ای و حد پایین رطوبت قابل‌استفاده یا رطوبت پژمردگی دائم می‌باشد. ویژگی‌های خاکی مؤثر در مدل شامل مقدار رطوبت موجود در نقطه پژمردگی دائم (تابعی از سطح ویژه و انرژی سطح ذرات خاک و ضریب پخشیدگی رطوبتی خاک) و توانایی خاک در انتقال گازها در رطوبت‌های نزدیک به اشباع (توزیع اندازه منافذ تهویه‌ای و نحوه اتصال آن‌ها) می‌باشد. باوجوداینکه ضریب تخلیه مجاز رطوبتی در منابع مختلف به‌صورت یک عدد صرفاً تجربی ارائه‌شده است و روش خاصی برای محاسبه‌ی این ضریب و درنهایت محاسبه‌ی میزان دقیق آب آبیاری خاک وجود ندارد (برای مثال در نشریه FAO (1979) صرفاً جدولی با اعداد محدود برای گیاهان مختلف ارائه‌شده است و توصیه‌شده است که برای بسیاری از موارد مقدار این ضریب برابر با ۰/۵ در نظر گرفته شود)؛ اما نتایج این پژوهش نشان داد که ضریب مجاز تخلیه رطوبتی خاک برای هر گیاه و خاک با توجه به ویژگی‌های آن‌ها تا حدودی قابل برآورد می‌باشد. این مدل برای شرایط وجود پوشش کاملی از گیاه یا ناچیز بودن تبخیر از سطح خاک توسعه داده‌شده است و در شرایط تنش شدید و یا تراکم پایین کشت قابل‌استفاده نمی‌باشد. هرچند این مدل ابتدا باید برای شرایط مختلف مزرعه ارزیابی گردد، اما می‌تواند برای برآورد اولیه ضریب تخلیه مجاز رطوبتی و درنتیجه زمان و مقدار آبیاری و یا مدیریت آب مزرعه استفاده گردد. محدودیت بکار گیری مدل فائو برای برآورد کاهش عملکرد در کشت گلخانه‌ای نیز، ضرورت ارزیابی مدل مفهومی پیشنهادی در شرایط مزرعه را تأیید می‌کند.

REFERENCES

Asadi, H. Neishaboori, M. R. and Siadat, H. (2003). Evaluating the wheat response factor to water (Ky) in different growth stages in Karaj. *Iranian J. Agric. Sci.*, 34(3), 586-579.(In Farsi)

Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M. R., Mahboubi, A. A., Nosrati, A. and Dexter, A. R. (2011). Integral energy of conventional available water, least limiting water range and integral water capacity for better characterization of water availability and soil physical quality. *Geoderma*, 166, 34-42.

Assouline, S. and Or, D. (2014). The concept of field capacity revisited: Definig intrinsic static and dynamic criteria for soil internal drainage dynamics. *Water Resour. Res.*, 50, 1-16. doi:10.1002/2014WR015475.

Bielorai, H. (1973). *Prediction of Irrigation Needs*. Berlin: Springer

Carlesso, R. (1993). Influence of soil water deficits on maize growth and leaf area adjustments. Ph.D. Thesis. Michigan State University.

Casadebaig, P., Debaeke, P. and Lecoeur, J. (2008). Thresholds for leaf expansion and transpiration response to soil water deficit in a range of sunflower genotypes. *Eur. J. Argon.*, 28, 646–654.

Cassel, D. K. and Nielsen, D. R. (1986). Field capacity and available water capacity. In Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods. *Agronomy Monograph* 9: 901–926.

Colman, E. A. (1947). A laboratory procedure for determining the field capacity of soils. *Soil Sci.*, 63, 277–283.

da Silva, A. P., Kay, B. D. and Perfect, E. (1994). Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58, 1775–1781.

Dane, J. H., Hopmans J. (2002) Water retention and storage. In J. H. Dane and G. C. Clake (Eds.), Methods of Soil Analysis: *Part 4. Physical Methods*. (pp. 671-720). Madison: SSSA Book Series.

Dasberg, S. and Bakker, J. W. (1970). Characterizing soil aeration under changing soil moisture conditions for bean growth. *Agronomy J.*, 62: 689-692.

Davatgar, N., Neishabouri, M. R., Sepaskhah, A. R., Soltani, A. (2009). Physiological and morphological responses of rice (Oryzasativa L.) to varying water stress management strategies. *Int. J. Plant Prod.* 3 (4), 19–32.

Doorenbos, J. and Kassam, A. H. (1979). *Yield response to water*. Irrigation and Drainage Paper No.33, FAO, Rome.

FAO. (1979). *Yield response to water*. Irrigation and Drainage Paper No. 33, Rome.

FAO. (2013). Home. Country profiles. http://faostat.fao.org/site/666/default.aspx

FAO. (2013). Production. Crops. http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor

Feddes, R. A., Kowalik, P. J. and Zaradny, H. (1978). *Simulation of Field Water Use and Crop Yield*. Pudoc, Wageningen, The Netherlands: Simulation Monograph

Gee, G. W. and Or, D. (2002). Particle-size analysis. In J. H. Dane and G. C. Topp (Eds.), Methods of Soil Analysis: *Part 4. Physical Methods.* (pp. 255- 293). Madison: SSSA Book Series.

Hammer, G. L. and Muchow, R. C. (1990). Quantifying climatic risk to sorghum in Australia's semiarid tropics and subtropics: model development and simulation. In R. C. Muchow and J. A. Bellamy (Eds.), *Climatic Risk*

Archive of SID

www.SID.ir

in Crop Production: Models and Management for the Semi-arid Tropics and Subtropics. (pp. 205-232). Wallingford: C.A.B. International.

Hillel, D. (1998). Redistribution of water in soil. In D. Hillel (Ed.), Environmental Soil Physics. (pp. 449– 470). San Diego, Calif: Academic.

Kang, S. Z., Zhang, L., Liang, Y. L., Hu, X. T., Cai, H. J., Gu, B. J., (2002). Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China. *Agric. Water Manage.*, 55 (3), 203–216.

Kipkorir, E. C., Raes, D. and Massawe, B. 2002. Seasonal water production functions and yield response factors for maize and onion in Perkerra, Kenya. Agric. Water Manage. 56: 229–240.

Kirkham, M. B. (2005). *Principles of soil and plant water relations*. Amsterdam: Elsevier Academic Press

Letey, J. (1985). Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1, 277–294.

Masinde, P. W., Stu˝ tzel, H., Agong, S. G., Fricke, A. (2006). Plant growth, water relations and transpiration of two species of African nightshade (Solanum villosum Mill. ssp.) Miniatum (Bernh. ex Willd.) Edmonds and S. sarrachoidesSendtn.) under water-limited conditions. *Sci. Hortic.*, 110 (1), 7–15.

Meyer, P. D. and Gee, G. (1999). Flux-based estimation of field capacity. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 125, 595–599.

Minasny, B. and McBratney, A. B. (2003). Integral energy as a measure of soil–water availability. *Plant Soil*, 249, 253–262.

Muchow, R. C. and Sinclair, T. R. (1991). Water deficit effects on maize yields modeled under current and "greenhouse" climates. *Agron. J.*, 83, 1052–1059.

Novák, V., Hurtalova, T. and Matejka, F. (2005). Predicting the effects of soil water content and soil water potential on transpiration of maize. *Agric. Water Manage.* 76 (3), 211–223.

Raes, D., Geerts, S., Kipkorir, E., Wellens, J. and Sahli, A. (2006). Simulation of yield decline as a result of water stress with a rebust soil water balance model. *Agric. Water Manage.*, 81, 335-357.

Ratliff, L. F., Ritchie, J. T. and Cassel, D. K. (1983). Field-measured limits of soil water availability as related to laboratory-measured properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47, 770–775.

Ray, J. D., Gesch, R. W., Sinclair, T. R. and Allen, L. H. (2002). The effect of vapor pressure deficit on maize transpiration response to a drying soil. *Plant Soil*, 239(1), 113–121.

Ritchie, J.T. (1981). Water dynamics in the soil–plant–atmosphere system. *Plant Soil*, 58, 81–96.

Robertson, M. J. and Fukai, S. (1994). Comparison of water extraction models for grain sorghum under continuous soil drying. *Field Crops Res.*, 36 (2), 145–160.

Romano, N. and Santini, A. (2002). Field. In J. H. Dane and G. C. Topp (Ed.s), *Methods of Soil Analysis. Part 4, Physical Methods*. (pp. 721–738). Madison: SSSA Book Series.

Shrestha, R., Turner, N. C., Siddique, K. H., Turner, D. W. and Speijers, J. (2006). A water deficit during pod development in lentils reduces flower and pod number but not pod size. Aust. *J. Agric. Res.*, 57(4), 427-438.

Sinaki, J. M., Majidi Heravan, E., Shirani Rad, A. H., Noormohamadi, G. and Zarei, G. (2007). The effects of water deficit during growth stages of canola (Brassica napus L.). *Ameri-Eurasi. J. Agric. Environ.*, 2(4), 417- 424.

Sinclair, T. R. and Muchow, R. C. (2001). System analysis of plant traits to increase grain yield on limited water supplies. *Agronomy J.*, 93, 263-70.

Timlin, D. J., Pachepsky, Y., Snyder, V. A. and Bryant, R. B. (2001). Water budget approach to quantify corn grain yields under variable rooting depths. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65, 1219–1226.

Turner, N. C., Schulze, E. D. and Gollan, T. (1985). The responses of stomata and leaf gas exchange to vapour pressure deficits and soil water content (II): in the mesophytic herbaceous species Helianthus annuus. *Oecologia*, 65 (3), 348–355.

Van Genuchten, M. Th. (1980). A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892–898.

Veihmeyer, F. J. and Hendrickson, A. H. (1949). Methods of measuring field capacity and wilting percentages of soils. *Soil Sci.*, 68, 75–94.

Wahbi, A. and Sinclair, T. R. (2007). Transpiration response of Arabidopsis, maize andsoybean to drying of artificial and mineral soil. *Environ. Exp. Bot.*, 59(2), 188–192.

Wraith, J. M. and Or, D. (1998). Nonlinear parameter estimation using spreadsheet software. *J. Nat. Resour. Life Sci. Educ.*, 27, 13–19.

Wu, Y., Huang, M. and Gallichand, J. (2011). Transpirational response to water availability for winter wheat as affected by soil textures. *Agric. water manage.*, 98, 569-576.

Yarnia, M., Amirhallaji, H., Alyari, H., Valizade, M. and Khorshidi, M. B. (2005). Evaluation of drought on yield and yield componenents of azarghol (Helianthus annuus) in different density. P2.99. InterDrought-II. 24-28 Sept. Rome, Italy.

Archive of SID

www.SID.ir