

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 $\theta_c - \theta_c$ به صورت 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 $\theta_c - \theta_c$ بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر 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 به صورت نمایی افزایش می‌یابد. مشاهدات تجربی ضمن تأیید نتایج مدل نشان داد که مقدار رطوبت بحرانی خاک لوم رسی برای هر دو گیاه برابر با $0.28 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ و در خاک لوم شنی برای گندم و کلزا به ترتیب برابر با 0.21 و $0.195 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ می‌باشد. ضریب مجاز تخلیه رطوبتی خاک برای گندم در هر دو خاک مورد مطالعه تقریباً برابر با 0.35 به دست آمد؛ اما کلزا در خاک لوم شنی دارای ضریب مجاز تخلیه رطوبتی بالاتری ($F=0.44$) نسبت به خاک لوم رسی ($F=0.38$) بود.

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

مقدمه

نقطه پژمردگی دائم (PWP) و عوامل مؤثر بر مقدار آب سهل‌الوصول برای گیاهان مختلف صورت گرفته است (Vehmeyer and Hendrickson, 1949; Letey 1985; da Silva et al., 1994; Asgarzadeh et al., 2011). به طور معمول، مقدار رطوبت خاک در مکش 15000 سانتی‌متر و FC مقدار رطوبت خاک در مکش 330 سانتی‌متر (Ratliiff et al., 2005; Kirkham, 1947; Colman 1983) در نظر گرفته می‌شود. غالباً مقدار مکش معادل رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای به نوع بافت خاک وابسته است (Minasny and McBratney, 2003). در حالی که در مزرعه برآورد رطوبت FC بر اساس زمان زهکشی استوار است، برآورد آن در آزمایشگاه بر مبنای مکش خاک انجام شده است (Romano and Santini, 2002). در واقع FC یک مقدار رطوبت مشخصی نیست بلکه مقدار رطوبتی است که در آن، شدت جریان 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-

ایران دارای $93/3$ میلیارد مترمکعب آب‌های تجدیدپذیر در سال می‌باشد که از این مقدار بخش کشاورزی با $92/18$ درصد بیشترین مصرف آب را به خود اختصاص می‌دهد و بخش شرب با $6/65$ درصد و بخش صنعت با $1/18$ 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 پیش-بینی 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

قابل استفاده خاک (SAW) است که در آن گیاه بدون ایجاد تنش کم‌آبی، قابلیت جذب آب را دارد و با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد (FAO, 1979):

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

F ضریب مجاز تخلیه‌ی رطوبتی خاک است. این ضریب یک مقدار تجربی بوده و به‌طور معمول 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.

در مجموع نیمی از اراضی زیر کشت کشور ایران تحت کشت گندم (*Triticum a.*) به‌عنوان محصول عمده غذایی می‌باشد. 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 برخوردار است. از آنجایی‌که 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):

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

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

ای در یک مقدار مکش مشخصی از خاک (۳۳۰ cm یا ۱۰۰) 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 مبنای 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., 2009; Davatgar et al., 2008). تلاش‌هایی جهت تعیین اثر بافت خاک و شدت تعرق بر روی مقدار θ_c صورت گرفته است (Hammer and Muchow, 1990; Muchow and Sinclair, 2011; Wu et al., 2002; Ray et al., 1990). 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 $۰/۰۹۱ m^3$ و $۰/۰۳۴ m^3$ 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. به‌طور کلی اختلاف رطوبت نقطه ظرفیت مزرعه‌ای (θ_{FC}) و رطوبت بحرانی (θ_c) آب سهل‌الوصول خاک (RAW) 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). در واقع RAW بخشی از کل آب

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

تعیین کننده شکل منحنی مشخصه آب خاک می باشند. پارامترهای معادله ون گنوختن و $\alpha \left(\frac{1}{cm} \right)$ و $n(-)$ پارامترهای معادله ون گنوختن و θ_r و θ_s به ترتیب رطوبت حجمی باقیمانده و اشباع h مکش ماتریک خاک (cm) می باشند. رطوبت خاک در نقطه پژمردگی دائم (15000 cm) به عنوان θ_{PWP} در نظر گرفته شد. در انتها رابطه (۸) با استفاده از نواربازار SOLVER در نرم افزار اکسل حل شد (Wraith and Or, 1998) و مناسب ترین مقدار θ_C در دو گیاه مورد مطالعه در خاک لوم شنی و لوم رسی تعیین گردید. سپس ضریب مجاز تخلیه رطوبتی خاک با استفاده از رابطه (۱۱) محاسبه گردید:

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

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

مواد و روش ها

در این پژوهش دو نمونه خاک از عمق ۰-۳۰ سانتی متری از اراضی دانشگاه زنجان نمونه برداری و به آزمایشگاه منتقل شد. پس از کوبیدن و خشک نمودن از الک های ۸ میلی متری (برای آزمایش های گلدانی) و دو میلی متری (برای تجزیه های فیزیکی و شیمیایی) عبور داده شد. برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک های مورد مطالعه در جدول (۱) آمده است. منحنی توزیع اندازه ذرات خاک (PSD) به روش هیدرومتر و الک (Gee and Or, 2002) تعیین گردید. به منظور تعیین منحنی مشخصه آب خاک، ابتدا نمونه ها با محلول کلرید کلسیم ۰/۰۱ نرمال از پائین اشباع و رطوبت آن ها با استفاده از ستون کیف آویزان (۰/۱-۱۵ کیلو پاسکال)، دستگاه صفحات فشاری (۱۰۰-۱۵۰۰ کیلو پاسکال) و غشای فشاری (مکش ۱۰۰-۱۵۰۰ کیلو پاسکال) تعیین گردید (Dane and Hopmans, 2002).

کشت گیاه

این پژوهش به صورت 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

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

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

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

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

K_S : ضریب تنش، K_{cb} : ضریب گیاهی پایه و K_e : ضریب تبخیر از خاک می باشند. با تلفیق روابط (۲)، (۳) و (۴) و با در نظر گرفتن این که در شرایط بدون تنش $K_S = 1$ است (Doorenbos and Kassam, 1979)، رابطه (۵) به دست می آید:

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

اگر پوشش گیاهی متراکم باشد، می توان فرض نمود که مقدار K_e در مقابل K_{cb} قابل صرف نظر می باشد؛ بنابراین رابطه (۵) به صورت زیر ساده می گردد:

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

Doorenbos and Kassam (1979) فرض کردند که زمانی که رطوبت خاک از یک مقدار آستانه کمتر باشد، تنش اعمال شده 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 قابل دسترس خاک برای گیاه می باشند. با تلفیق رابطه (۷) با رابطه (۶) و ساده سازی، رابطه (۸) به دست می آید:

$$\begin{aligned} & \text{for } \theta_{PWP} \leq \theta \leq \theta_C \\ & \text{for } \theta > \theta_C, Y = Y_{max} \\ & Y = Y_{max} \left[1 + \left(\frac{\theta - \theta_C}{\theta_C - \theta_{PWP}} \right) \cdot K_y \right] \end{aligned} \quad (\text{رابطه ۸})$$

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

ابتدا رابطه (۲) بر داده های عملکرد و تبخیر و تعرق اندازه گیری شده در هر دو خاک لوم شنی و لوم رسی و برای هر دو گیاه گندم و کلزا برازش داده شده و مقادیر K_y برآورد گردید. سپس برای تعیین رطوبت ظرفیت مزرعه ای به عنوان حد بالای آب قابل دسترس خاک، ابتدا مقدار مکش در رطوبت ظرفیت مزرعه ای، h_{FC} به روش Assouline and Or (2014) با استفاده از رابطه (۹) برآورد گردید:

به صورت روزانه ثبت گردید. جمع آوری داده‌ها تا پایان دوره رشد گندم و کلزا ادامه یافت. بر اساس نتایج آزمون خاک، کمبود عناصر ضروری خاک در سه مرحله‌ی رشد گیاه محلول پاشی 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 اعمال شده با استفاده از تجزیه واریانس یک طرفه (ANOVA) و مقایسه میانگین‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۹۵ درصد و با استفاده از نرم افزار SPSS 19 انجام شد. برای مقایسه شاخص‌های گیاهی اندازه‌گیری شده در تیمارهای مختلف در دو خاک مورد استفاده، از آزمون T-test جفت شده و نرم افزار SPSS 19 استفاده شد.

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 تانسومتر 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

جدول ۱. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

ویژگی‌های فیزیکی خاک				ویژگی‌های شیمیایی خاک					
بافت خاک	جرم مخصوص ظاهری (g/cm ³)	رس (%)	سیلت (%) (0.05-0.002mm)	K (ppm)	P (ppm)	N (%)	ماده آلی (%)	EC (dS.m ⁻¹)	pH
لوم شنی	۱/۵	۱۴	۱۵	۴۲۴/۷	۲۶/۹	۰/۱۲	۱/۳	۰/۹	۷/۷
لوم رسی	۱/۲۵	۳۰	۳۳	۲۱۱	۱۳/۵	۰/۰۹	۱	۰/۷	۷/۷

نتایج و بحث

توان بیان نمود که با سبک‌تر شدن بافت خاک، عملکرد کلزا (وزن خشک قسمت هوایی گیاه) به طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. در حالی که 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 به صورت معنی‌داری ($p < 0/01$) بیشتر است (جدول ۲).

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 با وجود افزایش معنی‌دار عملکرد کلزا (وزن خشک قسمت هوایی گیاه) در خاک لوم شنی ($p < 0/01$)، تعداد دانه کلزا در خاک لوم شنی به طور معنی‌داری کمتر از خاک لوم رسی به دست آمد (جدول ۲)؛ بنابراین می‌

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

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

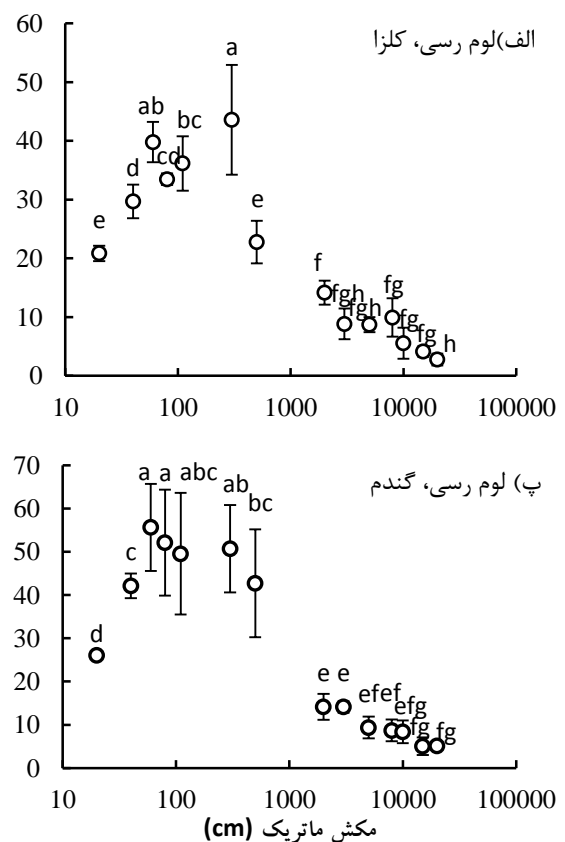
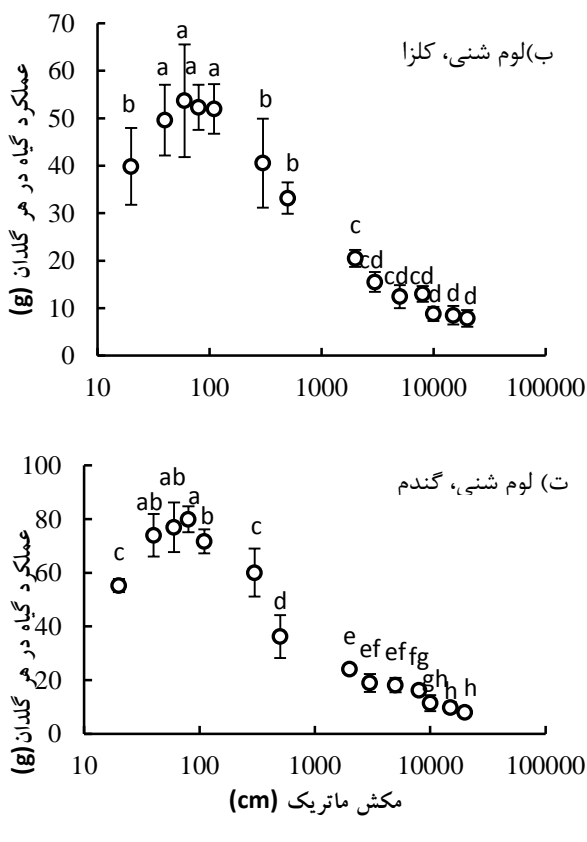
هر گلدان شامل ۸ بوته گندم و سه بوته کلزا و دارای سطح مقطعی برابر با ۵۳۰ cm² می‌باشد. اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده مقادیر کمینه و بیشینه هر یک از ویژگی‌های گیاهی می‌باشد.

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 به صورت منحنی

شکل (۱) عملکرد (وزن خشک قسمت هوایی گیاه) کلزا و گندم در دو خاک لوم رسی و لوم شنی به عنوان تابعی از مکش ماتریک خاک را نشان می‌دهد. افزایش مکش ماتریک خاک از

ویژگی تا مکش ماتریک ۳۰۰ cm مقدار تغییرات اجزای عملکرد بسیار اندک بوده اما پس از آن (مکش ماتریک خاک <math>cm < 300</math>) با افزایش بیشتر مکش ماتریک خاک، مقدار عملکرد گیاه و اجزای آن کاهش می‌یابند (شکل ۱). 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 در نتیجه وزن خشک قسمت هوایی گیاه را کاهش داد (شکل ۱). 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 در نتیجه تولید ماده خشک گیاه کاهش می‌یابد (Sinclair and Muchow, 2001). نتایج مشابهی توسط سایر محققان نیز گزارش شده است (Shrestha et al., 2006; Yarnia et al., 2005).

زنگوله‌ای (شکل ۱) 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. با وجود اینکه 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

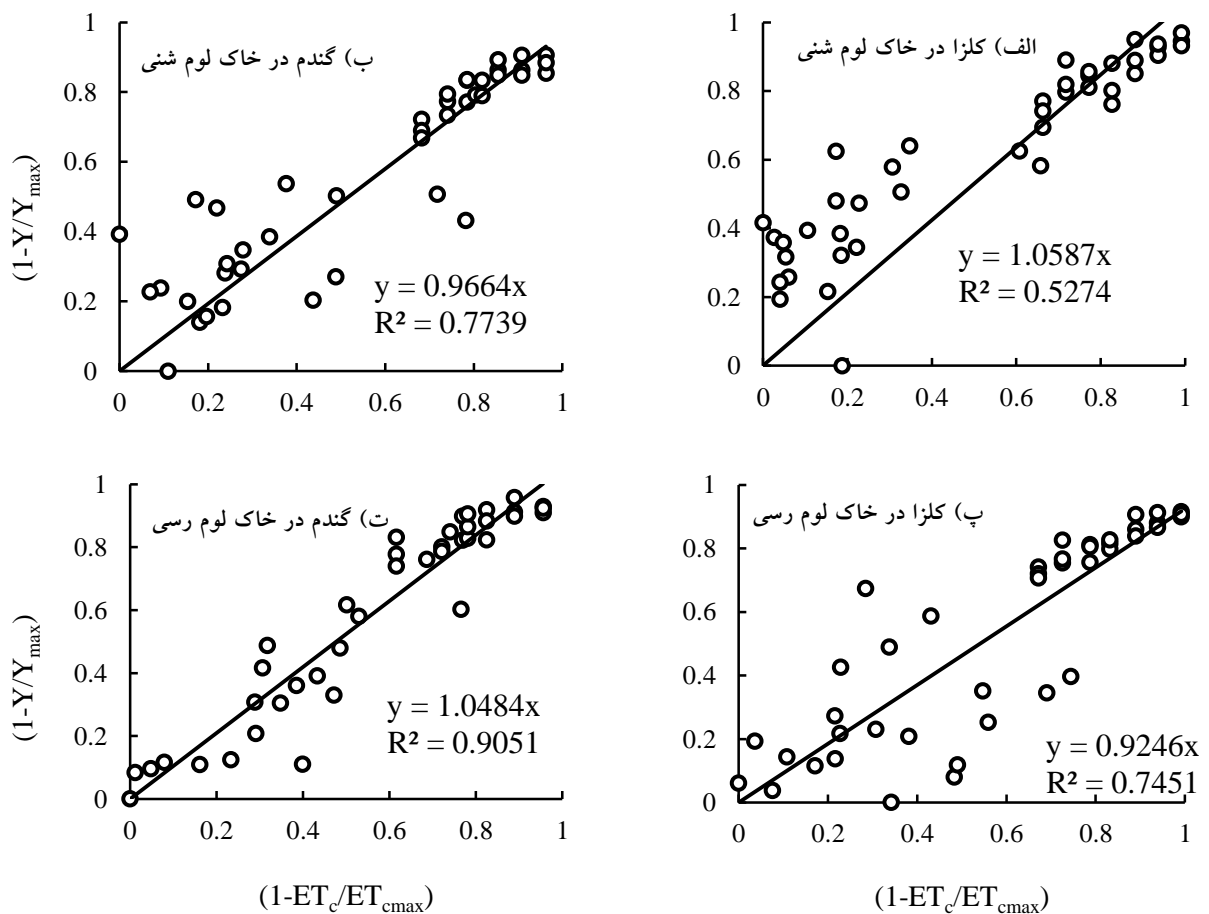


شکل ۱. تغییرات عملکرد (g) کلزا و گندم در هر گلدان در دو خاک لوم رسی و لوم شنی در مقادیر مختلف مکش ماتریک خاک.

حروف متفاوت نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین مقدار ویژگی‌های مختلف در سطح احتمال ۹۵ درصد است. میله‌های خط نشان‌دهنده \pm انحراف معیار هستند (۹ داده). هر گلدان شامل سه بوته کلزا یا ۸ بوته گندم و دارای سطح مقطعی برابر با 530 cm^2 می‌باشد.

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)، شیب خط 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 ۰/۹۲ و ۱/۰۶ 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 (شکل ۲). این در حالی است 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 به دست آمده

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)، شیب خط 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 ۰/۹۲ و ۱/۰۶ 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 (شکل ۲). این در حالی است 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 به دست آمده



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 ب) و گندم (ب و ت) در دو خاک لوم شنی و خاک لوم رسی.

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

زمانی که مقدار رطوبت خاک به قدر کافی باشد، خاک، آب موردنیاز گیاه را به اندازه کافی تأمین می‌کند در این حالت،

به دست آمده در این پژوهش می باشد (جدول ۳). از آنجایی که تفاوت پتانسیل آب بین خاک و ریشه تعیین کننده ی جذب آب توسط ریشه می باشد، بنابراین برای مقایسه اثرات بافت خاک، استفاده از مکش ماتریک خاک نسبت به رطوبت خاک مناسب تر خواهد بود. از این رو مقادیر مکش ماتریک خاک معادل رطوبت های بحرانی خاک نیز در جدول ۳ ارائه شده اند. با وجود اینکه در هر دو گیاه مورد مطالعه، مقدار رطوبت بحرانی در خاک لوم رسی بیشتر از خاک لوم شنی است، مقدار رطوبت سهل الوصول ($\theta_c - \theta_{FC}$) خاک لوم رسی (برای کلزا 0.068 و برای گندم $0.062 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) بیشتر از خاک لوم شنی (برای کلزا 0.065 و برای گندم $0.052 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) می باشد. دلیل این امر را می توان به هدایت هیدرولیکی بالاتر خاک لوم شنی در مکش های ماتریک کم خاک نسبت داد (Kikham, 2005). هدایت هیدرولیکی غیراشباع معمولاً به عنوان یکی از عوامل تعیین کننده پاسخ تعرقی گیاه به قابلیت دسترسی آب خاک در نظر گرفته می شود (Wu et al., 2011). علاوه بر این، تفاوت مقدار آب سهل الوصول 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 می باشد.

می شود جذب آب گیاه کمتر از $ET_{c \max}$ می شود و عملکرد گیاه، Y ، نیز کاهش می یابد. مقدار رطوبت آستانه خاک (θ_c) حاصل از برازش رابطه (۸) بر داده های اندازه گیری شده به همراه مقدار رطوبت خاک در حدهای بالا (θ_{FC}) و پایین (θ_{PWP}) آب قابل دسترسی خاک لوم شنی و لوم رسی در جدول (۳) ارائه شده است. مقدار رطوبت بحرانی خاک لوم رسی که در رطوبت های کمتر از آن، عملکرد گیاه کاهش می یابد، برای هر دو گیاه کلزا و گندم برابر با $0.28 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ به دست آمد؛ اما در خاک لوم شنی رطوبت بحرانی برای گندم برابر با $0.21 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ و برای کلزا برابر با $0.195 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 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 نمی باشد؛ اما Wahbi and Sinclair (2007) نشان دادند که رطوبت بحرانی خاک برای ذرت کشت شده در پیت و خاک لوم شنی به ترتیب برابر با 0.34 و 0.16 می باشد. نتایج Wu et al. (2011) نیز مؤید تأثیر نوع بافت خاک بر میزان رطوبت بحرانی خاک بود. مشاهدات آن ها نیز نشان داد که مقدار رطوبت بحرانی برای گیاه گندم در خاک لوم رسی ($0.228 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) بیشتر از خاک لوم شنی ($0.19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) است. مقادیر گزارش شده توسط Wu et al. (2011) در هر دو خاک برای گیاه گندم کمتر از مقادیر رطوبت بحرانی

جدول ۳. مقدار رطوبت خاک در حد بالا (θ_{FC}) و پایین (θ_{PWP}) آب قابل دسترسی خاک برای گیاه و مقدار رطوبت آستانه ی 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	کلزا			گندم		
	θ_{FC} ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	θ_{PWP} ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	θ_c ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	h_c (cm)	θ_c/θ_{FC}	h_c (cm)
لوم شنی	0.26	0.112	0.195	255	0.75	198
لوم رسی	0.348	0.169	0.280	230	0.80	204

تقریباً برابر با 0.35 به دست آمد؛ اما کلزا در خاک لوم شنی دارای ضریب مجاز تخلیه رطوبتی بالاتری ($F=0.44$) نسبت به خاک لوم رسی ($F=0.38$) بود. به طور کلی، ضریب مجاز تخلیه رطوبتی خاک در هر دو خاک مورد مطالعه برای کلزا بیشتر از گندم به دست آمد. علاوه بر این، مقادیر F به دست آمده در این پژوهش برای هر دو گیاه در هر دو بافت خاک کمتر از مقادیر پیشنهادی توسط FAO (1976) (گندم $=0.55$ و کلزا $=0.6$) است. مقادیر F پیشنهادی در این پژوهش برای گیاه گندم (0.35) کمتر از مقادیر پیشنهادی توسط Panda et al. (2003) (0.45) نیز می باشد. پیشنهاد مقدار ضریب F برابر با 0.45 توسط Panda et al. (2003) در مراحل غیر حساس رشد گندم

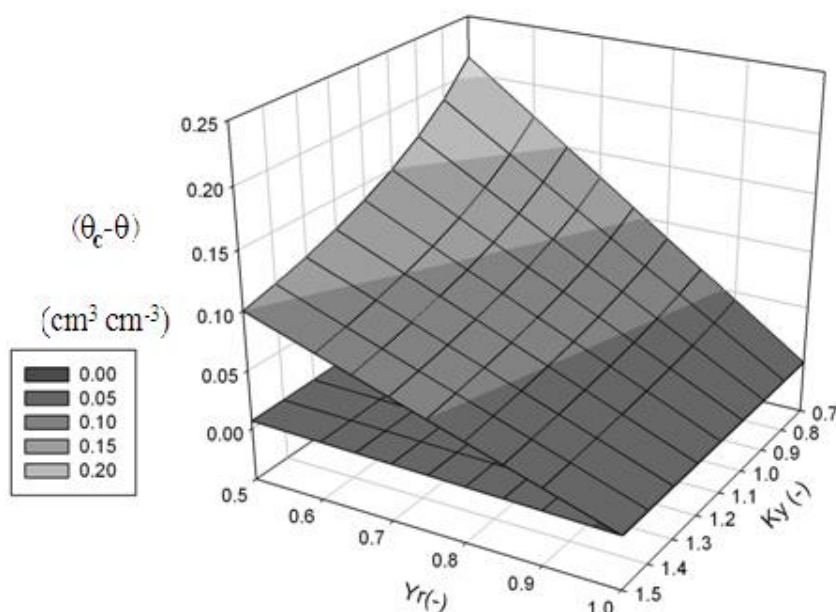
نتایج جدول (۳) نشان می دهد که جهت جلوگیری از کاهش عملکرد گیاه گندم و وقوع تنش آبی، رطوبت هر دو خاک مورد مطالعه باید در 0.80 رطوبت FC در طول فصل رشد حفظ شود. در حالی که در خاک لوم شنی برای کلزا، حفظ رطوبت خاک در 0.75 رطوبت FC در طول فصل رشد موجب تولید حداکثر عملکرد گیاه خواهد شد. Wu et al. (2011) نیز حفظ مقدار 0.60 و 0.70 رطوبت FC را به ترتیب در خاک لوم رسی و لوم شنی برای تولید حداکثر عملکرد گندم در دشت های 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

رابطه خطی بین Y_r و $(\theta_c - \theta)$ در یک K_y مشخص، رابطه بین K_y و $(\theta_c - \theta)$ برای رسیدن به یک عملکرد نسبی مشخص به صورت نمایی می‌باشد (شکل ۳). به عنوان مثال، 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 ۰/۱۵ می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌نماید 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 به صورت خطی نیست. با وجود اینکه اختلاف مقادیر ضریب K_y بین بادامزمینی، ذرت خوشه‌ای و سیبزمینی مشابه هم و برابر با ۰/۲ است؛ اما تفاوت $(\theta_c - \theta)$ بین بادامزمینی و ذرت خوشه‌ای برابر با $۰/۴ \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ و بین ذرت خوشه‌ای و سیبزمینی برابر با $۰/۲ \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ است؛ بنابراین، هر چه ضریب حساسیت گیاه به تنش آبی بیشتر باشد، ضریب F نیز کوچک‌تر خواهد شد.

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

عملکرد نسبی گیاه، Y_r ، به عنوان تابعی از K_y و مقدار انحراف رطوبت خاک از رطوبت بحرانی خاک $(\theta_c - \theta)$ بر اساس رابطه (۸) برآورد شده و در شکل (۳) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای هر گیاه خاص یا در هر مرحله رشد گیاه (K_y ثابت)، بین تغییرات $(\theta_c - \theta)$ و عملکرد نسبی گیاه رابطه مشخصی وجود دارد. به طوری که عملکرد نسبی گیاه با اختلاف رطوبت خاک از θ_c به صورت 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 Y_r و $(\theta_c - \theta)$ 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 با وجود



شکل ۳. تغییرات عملکرد نسبی گیاه (Y_r) به صورت تابعی از مقدار عامل حساسیت گیاه به کم‌آبی (K_y) و مقادیر مختلف اختلاف رطوبت خاک از رطوبت آستانه‌ای کاهش عملکرد گیاه $(\theta_c - \theta)$ در رطوبت‌های کمتر از رطوبت بحرانی خاک

نتیجه‌گیری کلی

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 به دست آمده در این پژوهش برای هر دو گیاه در هر دو بافت خاک کمتر از مقادیر پیشنهادی توسط فائو (گندم =

این پژوهش به منظور 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 قابل استفاده گیاه توسعه داده شد و برای ارزیابی این مدل پاسخ‌های دو گیاه گندم و کلزا به طیف وسیعی از رطوبت خاک

(1979) صرفاً جدولی با اعداد محدود برای گیاهان مختلف ارائه شده است و توصیه شده 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 داده شده است و در شرایط تنش شدید و یا تراکم پایین کشت قابل استفاده نمی‌باشد. هرچند این مدل ابتدا باید برای شرایط مختلف مزرعه ارزیابی گردد، اما می‌تواند برای برآورد اولیه ضریب تخلیه مجاز رطوبتی و در نتیجه زمان و مقدار آبیاری و یا مدیریت آب مزرعه استفاده گردد. محدودیت بکارگیری 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: Defining 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. Agron.*, 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.

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_p)، حد بالای رطوبت قابل جذب یا حد بالای تحمل گیاه به تنش تهویه‌ای و حد پایین رطوبت قابل استفاده 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. با وجود اینکه ضریب تخلیه مجاز رطوبتی در منابع مختلف به صورت یک عدد صرفاً تجربی ارائه شده است و روش خاصی برای محاسبه‌ی این ضریب و در نهایت محاسبه‌ی میزان دقیق آب آبیاری خاک وجود ندارد (برای مثال در نشریه FAO

- 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*

- 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
- Letej, J. (1985). Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1, 277-294.
- Masinde, P. W., Stuzel, 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. sarrachoides* Sendtn.) 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., Hurlalova, 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 robust 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 and soybean 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 components of azarghol (*Helianthus annuus*) in different density. P2.99. InterDrought-II. 24-28 Sept. Rome, Italy.