مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی/جلد ۸/ شماره ۲/ تابستان ۱۳۸۶/ص ۹۲-۷۹

افزایش بهره‌وری آب (WP) و تعیین مقدار و زمان بهینهٔ تک‌آبیاری برای کلزای بهارهٔ دیم

علیرضا توکلی و بهمن عبدالرحمنی*

* اعضای هیئت علمی مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، نشانی: مراغه، کمربند شمالی، جنب باغ فعالیت، موسسه تحقیقات دیم کشور، تلفن: ۶۱۴۳۴۸۴ (۰۹۱۲)، پیام‌نگار: art.tavakoli@gmail.com

تاریخ دریافت مقاله: ۸۴/۱۱/۸؛ تاریخ پذیرش: ۸۵/۷/۲۹

چکیده

به منظور بررسی تأثیر مقادیر مختلف تک‌آبیاری در مراحل مختلف رشد بر عملکرد کلزای بهاره و بهبود بهره‌وری آب مصرفی، این تحقیق بر پایهٔ طرح بلوک‌های کامل تصادفی و به صورت اسپلیت‌پلات، در سه تکرار و به مدت دو سال (۱۳۸۱ و ۱۳۸۲) روی رقم پیشرفته کلزای بهاره PF.7015.91 (ساری‌گل) در ایستگاه تحقیقات کشاورزی دیم مراغه به اجرا درآمد. کرت اصلی (مراحل رشد) در سه سطح (S_1 : مرحلهٔ طویل شدن ساقه، S_2 : مرحلهٔ گل‌دهی و S_3 : مرحلهٔ پر شدن غلاف یا غلاف‌بندی) و کرت فرعی در چهار سطح (مقادیر آب تک‌آبیاری) I_0 : شرایط دیم (بدون آبیاری)، I_{30} : آبیاری به میزان ۳۰ میلی‌متر، I_{60} : آبیاری به میزان ۶۰ میلی‌متر و I_{90} : آبیاری به میزان ۹۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. بهره‌وری آب مصرفی (WP)[1] و عملکرد دانه تعیین شد. نتایج نشان داد که در تولید دانه بین تیمارهای تک‌آبیاری، مراحل رشد، و تأثیرات متقابل تک‌آبیاری و مراحل رشد در سطح آماری یک درصد تفاوت معنی‌داری وجود دارد. تیمار تک‌آبیاری به میزان ۶۰ میلی‌متر در مرحلهٔ گل‌دهی با دارا بودن متوسط ۱۰۷۱ کیلوگرم در هکتار نسبت به تک‌آبیاری ۹۰ میلی‌متری تفاوت معنی‌داری ندارد. این تیمار دارای بالاترین میزان کارایی مصرف آب (WUE)[2] (۲/۴۶ کیلوگرم بر میلی‌متر آب مصرفی (تبخیر - تعرق واقعی))، بیشترین میزان بهره‌وری آب آبیاری (WP_I) ۸/۰۹ کیلوگرم بر میلی‌متر و بیشترین مقدار بهره‌وری مجموع آب آبیاری و بارش (WP_{I+P}) ۴/۷۹ کیلوگرم بر میلی‌متر است و در شرایط وجود مقدار ثابت آب و امکان افزایش سطح زیر کشت، تیمار تک‌آبیاری به میزان ۶۰ میلی‌متر در مرحلهٔ گل‌دهی با ۴/۲۸ کیلوگرم بر میلی‌متر نسبت به تیمارهای دیگر برتری دارد. لذا در شرایط آزمایش یک نوبت آبیاری کلزای بهاره در مرحلهٔ گل‌دهی به میزان ۶۰ میلی‌متر می‌تواند در افزایش معنی‌دار عملکرد محصول مؤثر باشد.

واژه‌های کلیدی

بهره‌وری آب، تک‌آبیاری، دیم، عملکرد، کارایی مصرف آب، کلزای بهاره

مقدمه

زراعت دیم، ضمن گستردگی، خصوصیاتی متمایز و متفاوت از زراعت آبی دارد. بسیاری از پدیده‌ها و عوامل در زراعت دیم، علی‌رغم تاثیرگذار بودنشان، غیرقابل کنترل یا تعدیل هستند. تغییرات سالانهٔ بارندگی‌ها و پراکنش آن، تغییرات درجه حرارت، عدم وقوع بارش در بخشی از سال زراعی، و کمبود رطوبت خاک در بخشی از سال که معمولاً با فصل رشد گیاهان زراعی همراه است، سبب می‌شوند که ضریب اعتماد و درجه ثبات و پایداری تولید در زراعت دیم پایین باشد و از این رو ابزارها و شیوه‌های مختلفی که در کاهش ریسک و ایجاد پایداری عملکرد محصولات دیم مؤثر باشند، مورد توجه است. از شیوه‌های مدیریتی مؤثر، اِعمال

1 - Water Productivity 2- Water Use Efficiency

© 2010,The Author(s). Published by Agricultural Engineering Research Institute. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

مدیریت آبیاری تکمیلی و تک‌آبیاری است که تعیین رقم مناسب، میزان آب مصرفی، زمان کاشت، و میزان افزایش عملکردبا آبیاری تکمیلی و تک‌آبیاری، از جمله مسائل مرتبط با آن است (Tavakoli *et al*., 2000; Tavakoli, 2001). نتایج تحقیقات در مراکش، ترکیه، قبرس، و پاکستان حاکی از افزایش عملکرد بیش از ۱۵۰ تا ۲۰۰ درصدی در شرایط آبیاری تکمیلی گندم نسبت به دیم است (Perrier & Salkini, 1991).

دانه‌های روغنی از جمله محصولات کشاورزی هستندکه در تغذیهٔ انسان از طریق روغن استحصالی و تأمین خوراک دام و طیور از طریق کنجاله تولیدی اهمیت زیادی دارند و در این میان کلزا (*Brassica napus* L.) با دارا بودن ویژگی‌های زراعی مناسب شامل امکان کشت آن در پاییز و بهار، تناوب با غلات، و کیفیت مطلوب روغن آن (Abdolrahmani, 2003) مورد توجه قرار گرفته است. کلزا سومین منبع مهم روغن گیاهی(Sovero, 1993; Starner *et al.,* 1996; Starner *et al*., 1999) و در برخی منابع دومین منبع روغن گیاهی در جهان (Raymer, 2002) به شمار می‌رود. درصد روغن دانه آن ۴۰-۳۷/۷ (Shafii *et al.,* 1992) و ۴۴-۴۰ (Savero, 1993; Downey, 1990) و اسیدهای اشباع آن در بین دانه‌های روغنی کمترین میزان (۸-۵ درصد) است (Sovero, 1993; Starner *et al.,* 1996). مهم‌ترین راه افزایش تولید محصول کلزا، افزایش عملکرد در واحد سطح و افزایش تولید به ازای واحد نهاده‌ها (آب، کود، و بذر) است. برای دستیابی به این هدف، اِعمال مدیریت زراعی مناسب ضروری می‌نماید. برای تک‌آبیاری کلزا، تحقیقاتی در برخی مناطق در دست اجراست؛ در اینجا به برخی از نتایج حاصل از تحقیقات در داخل و خارج کشور اشاره می‌شود: کلزا سیستم ریشه‌ای عمیق دارد و می‌تواند رطوبت را از اعماق خاک دریافت کند (Loof, 1972)، و در مناطقی که کلزا به صورت دیم کشت می‌شود خشکی و نبودن آب کافی سبب وارد آمدن خسارت به محصول می‌شود. درجه حرارت پایین، تنش رطوبتی، و ترک خوردن خاک (به دلیل ایجاد بستر بذر ضعیف)، استقرار کلزا را در مناطق نیمه خشک دچار مشکل می‌کند (Angadi *et al.,* 2003). طی تحقیقی روی آبیاری کلزا گزارش شد که آبیاری در مرحلهٔ غلاف‌بندی باعث افزایش تعداد غلاف در متر مربع می‌شود و آبیاری دیرتر از آن، تعداد دانه را در هر غلاف افزایش می‌دهد (Mendham *et al.,* 1984). طی تحقیقی نشان داده شد که از میان مراحل رشد کلزا، حساس‌ترین زمان برای آبیاری، مرحلهٔ گل‌دهی و اوایل غلاف‌بندی است (Richards & Thurling, 1978 ; Rao & Mendham, 1991; Pasban Eslam *et al.,* 2000). نتایج تحقیقات نشان داده است که آبیاری تکمیلی کلزا قبل از گل‌دهی باعث می‌شود با طولانی شدن دورهٔ گل‌دهی، تعداد غلاف و تعداد دانه در غلاف بالا رود (Clarke & Simpson, 1978). دلیل این امر شاید وجود سطح برگ بیشتر در جریان گل‌دهی باشد. بنابراین، عرضهٔ بیشتر مواد فتوسنتزی، همبستگی مثبت را بین تعداد غلاف و تعداد دانه در غلاف باعث می‌گردد (Rao & Mendham, 1991; Scarisbrick & Daniels, 1986). آبیاری تکمیلی موجب ثبات عملکرد دانه می‌شود. نتایج آزمایش‌های آبیاری تکمیلی طی ۵ سال در ایکاردا نشان داد که ضریب تغییرات عملکرد گندم از ۷۱ درصد در شرایط دیم به ۸ درصد در شرایط آبیاری تکمیلی کاهش پیدا می‌کند (Salkini & Ansell, 1992). میزان تولید به ازای واحد آب مصرفی از جمله شاخص‌هایی است که در تحقیقات آبیاری بررسی می‌شود و مبنای انتخاب گزینهٔ برتر قرار می‌گیرد. در شرایط دیم، تولید به ازای واحد بارش تعیین می‌شود و در شرایط تک‌آبیاری و آبیاری

تکمیلی تولید به ازای واحد آب آبیاری در اضافه تولید نسبت به شرایط دیم و تولید به ازای واحد آب آبیاری + بارش مورد توجه قرار می‌گیرد (Richards & Thurling, 1978; Anon, 1985; Kitamura, 1990; Nielsen, 1996; Oweis, 1997; Oweis & Huchum, 2003; Schneider & Howell, 1996; Tavakkoli & Oweis, 2004; Zhang *et al.,* 1999; Zhang & Oweis, 1999; Zhang, 2003). بهره‌وری بارش (WP_P) برای گندم دیم، ۶-۳ کیلوگرم بر میلی‌متر است و با تک‌آبیاری بهینه مقادیر WP_{I+P} و WP_I به ترتیب به ۶/۵ - ۵ و ۱۹-۱۳ کیلوگرم بر میلی‌متر افزایش می‌یابد (Tavakoli *et al.,* 2000). علاوه بر آب، هر عامل رشدی که میزان محصول را افزایش دهد، بازده (کارایی) مصرف آب را نیز بهتر می‌کند. این عوامل عبارت‌اند از: رقم، آرایش کاشت، دفع آفات، زمان کاشت، و تأمین عناصر غذایی مورد نیاز گیاه (Malakoti & Riyazi Hamedani, 2001). اهداف این پژوهش شامل افزایش و تثبیت عملکرد، تعیین حد بهینه تک‌آبیاری، تعیین زمان و مرحلهٔ مناسب اعمال تک‌آبیاری، تعیین کارایی مصرف آب (WUE)، بهره‌وری آب آبیاری در اضافه عملکرد نسبت به شرایط دیم (WP_I)، و بهره‌وری آب مصرفی مجموع آبیاری + بارش (WP_{I+P}) است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در ایستگاه تحقیقات کشاورزی دیم مراغه (عرض جغرافیایی ´۱۵°۳۷ شمالی، طول جغرافیایی ´۱۵°۴۶ شرقی و ارتفاع ۱۷۲۵ متر از سطح دریا) روی محصول کلزای بهاره و به مدت دو سال (۱۳۸۱ و ۱۳۸۲) در قطعه زمینی به اجرا درآمد که عملیات تهیهٔ زمین آن در پاییز انجام گرفته بود.

بافت خاک محل آزمایش رس سیلتی و متوسط نقطه ظرفیت زراعی، نقطهٔ پژمردگی دائم، و جرم ویژه ظاهری خاک به ترتیب ۳۸ و ۲۰ درصد حجمی و ۱/۱۷۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و متوسط آب قابل استفاده در یک متر عمق خاک برابر ۱۸۰ میلی‌متر بوده است. خصوصیات خاک عبارت بود از: pH = ۷/۷، (دسی زیمنس بر متر) EC = ۰/۶۱، پتاسیم و فسفر به ترتیب ۶۲۲ و ۱۶/۳ (قسمت در میلیون قسمت)، نیتروژن کل، O.C، و T.N.V نیز به ترتیب ۰/۰۵۵، ۰/۶۵، و ۴/۲ درصد. میزان کل بارش در سال اول و دوم از زمان کاشت تا برداشت به ترتیب برابر ۱۹۹/۲ و۱۲۸/۴ میلی‌متر بود (جدول۱). منبع تأمین آب، چاه بود که مشکلی خاص و محدودکننده از نظرکیفی نداشت (۷/۶ =pH ، (دسی زیمنس بر متر) ۱=EC و ۱/۵=SAR) و آبیاری به صورت سطحی و از طریق انتقال آب با لوله و شلینگ و کنترل دقیق با کنتور حجمی صورت می‌گرفت. برای دستیابی به یکنواختی توزیع مناسب، آبیاری در کرت‌های فرعی از طریق لولهٔ سوراخ‌دار متحرک دستی انجام می‌شد به نحوی که آب از منافذ تعبیه شده به فواصل ۴-۳ سانتی‌متری روی لولهٔ پلی‌اتیلن ۶۳ میلی‌متری و به طول ۴ متر و با حرکتی دستی یکنواخت در سطح کرت پخش می‌شد.

جدول ۱- زمان کاشت، مراحل اساسی رشد و وضعیت بارش ایستگاه هواشناسی تحقیقات کشاورزی دیم

	۱۳۸۱	۱۳۸۲
رطوبت خاک زمان کاشت (درصد وزنی)	۳۱	۲۹/۸
تاریخ کاشت	۱۸ اسفند	۱۶ فروردین
دو برگی	۱۶ فروردین	۳۰ فروردین
طویل شدن ساقه	۳۱ اردیبهشت	۱۹ خرداد
گل‌دهی	۷ خرداد	۲۷ خرداد
پر شدن دانه	۱۷ خرداد	۶ تیر
رطوبت خاک زمان برداشت (درصد وزنی)	۱۷/۲	۱۶/۳
طول دورهٔ کاشت تا پرشدن دانه (روز)	۹۲	۸۴
آخرین بارندگی بهاره (میلی‌متر)	۲۴-۱۴ اردیبهشت ۴۵	(۹-۷ اردیبهشت) ۳۶/۲ و (۲۶ خرداد) ۱۳/۳
کل بارش سالیانه (میلی‌متر)	۳۸۲	۳۶۷
کل بارش از کاشت تا برداشت (میلی‌متر)	۱۹۹/۲	۱۲۸/۴

این آزمایش مزرعه‌ای بر پایهٔ طرح بلوک‌های کامل تصادفی و به صورت اسپلیت‌پلات با سه مرحله رشد (کرت اصلی) و چهار تیمار مقادیر تک‌آبیاری (کرت فرعی) روی کلزای بهاره رقم پیشرفته PF.7015-91 (ساری‌گل) و در سه تکرار به اجرا درآمد. مراحل رشد شامل: مرحلهٔ طویل شدن ساقه (S_1)، مرحلهٔ گل‌دهی (S_2)، و مرحلهٔ پر شدن دانه= غلاف‌بندی (S_3) و سطوح تک‌آبیاری نیز شامل: بدون آبیاری (شرایط دیم) (I_0)، تک‌آبیاری به میزان ۳۰ میلی‌متر (I_{30})، تک‌آبیاری به میزان ۶۰ میلی‌متر (I_{60})، و تک‌آبیاری به میزان ۹۰ میلی‌متر (I_{90}) بوده است.

کود مصرفی بر اساس تجزیهٔ خاک و با نظر کارشناسان تغذیه شامل ۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص از منبع نیترات آمونیم و ۲۰ کیلوگرم در هکتار فسفر خالص از منبع سوپر فسفات تریپل و به صورت یک جا و قبل از کاشت با دستگاه جان‌شیرر مصرف شد. مساحت کرت‌های فرعی ۲۴ متر مربع (۴×۶ متر) بود، در هر کرت فرعی ۱۸ خط به طول ۶ متر با فواصل خطوط ۲۰ سانتی‌متر وجود داشت. بذر مصرفی براساس ۸ کیلوگرم در هکتار و با توجه به مساحت هر کرت تعیین و با قارچ‌کش ویتاواکس به نسبت دو در هزار ضدعفونی شد. با بذرکار آزمایشی وینتراشتایگر و در عمق ۴-۳ سانتی‌متری، در اولین فرصت عملیات کاشت انجام شد تا امکان استفاده از بارش‌های مؤثر بهاره وجود داشته باشد.

برای تعیین کارایی مصرف آب (WUE) رطوبت حجمی خاک به ویژه قبل از کاشت و زمان برداشت با دستگاه رطوبت‌سنج ترایم[1] و از طریق جایگذاری لوله‌های مخصوص در کرت‌های فرعی تعیین شد. پس از محاسبهٔ تبخیر- تعرق واقعی (ETa)، کارایی مصرف آب (نسبت عملکرد دانه به تبخیر- تعرق واقعی) به دست آمد. برای تعیین تبخیر- تعرق از نرم افزار CropWat - FAO استفاده شد که بر اساس داده‌های ماهانه دورهٔ رشد و نمو محصول، تبخیر - تعرق پتانسیل روزانه را براورد می‌کند. آبیاری بر اساس مراحل رشد (وقتی که ۵۰ درصد محصول کرت به مرحله رشد تعیین شده وارد می‌شد) و منطبق بر مقادیر پیش‌بینی شده اجرا شد. مراقبت‌های زراعی از جمله کنترل علف‌های هرز (با دست)، مبارزه با آفات جونده (موش با جایگذاری قرص‌های سمی فسفید آلومینیم)، مبارزه با آفات از طریق

1- TRIME

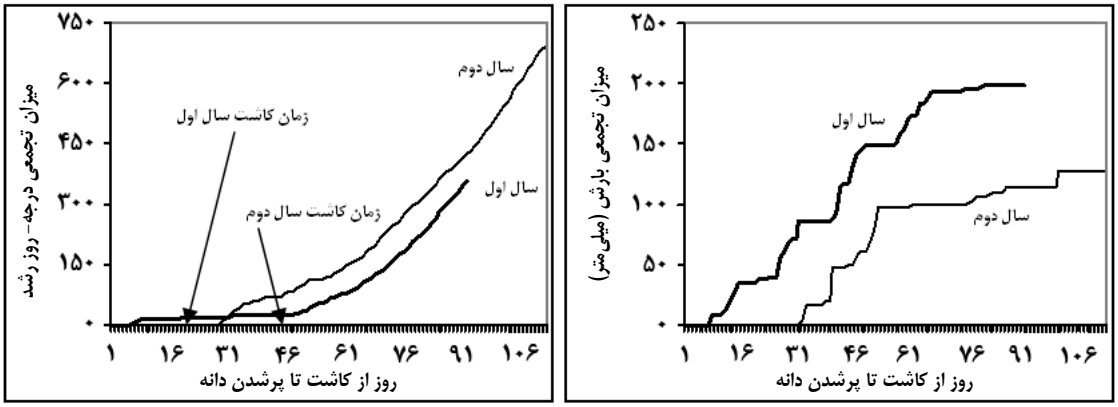
پخش طعمهٔ مسموم (۱۰ کیلوگرم سبوس + ۴ کیلوگرم سم سوین) و نیز سمپاشی برای کنترل علف‌های هرز با سم گراماکسون (۳ لیتر در هزار) در مرحلهٔ دو برگی کلزا انجام گردید. پس از رسیدن محصول و حذف حواشی و برداشت با دست، میزان عملکرد دانه محصول تعیین شد. علاوه بر تعیین کارایی مصرف آب (WUE)، شاخص‌های بهره‌وری آب مصرفی (WP) نیز مشخص شد. شاخص بهره‌وری آب مصرفی ناشی از تک‌آبیاری در اضافه عملکرد نسبت به شرایط دیم (نسبت اختلاف عملکرد تیمارهای تک‌آبیاری با متوسط دیم به میزان آب مصرفی تیمار تک‌آبیاری) (WP_I) و شاخص بهره‌وری آب مصرفی مجموع آب آبیاری و بارش (نسبت عملکرد تیمارهای تک‌آبیاری به مجموع آب آبیاری و بارش) (WP_{I+P}) تعیین گردید.

برای بررسی نتایج سالانه، بارش تجمعی و درجه- روز رشد تجمعی برای هر سال تعیین و تحلیل شد. نتایج بر اساس جدول تجزیهٔ واریانس و مقایسهٔ میانگین‌ها براساس آزمون دانکن با کاربرد نرم افزار MSTATC بررسی و مقایسه شدند.

نتایج و بحث

نتایج متوسط عملکرد دانهٔ کلزای بهاره در دو سال آزمایش همراه با آزمون آماری در جدول ۲ خلاصه شده است. اثر سطوح مختلف تک‌آبیاری، مراحل رشد، و اثر متقابل تک‌آبیاری و مراحل رشد بر عملکرد دانه در سطح آماری یک درصد معنی‌دار است. بر اساس مقایسهٔ میانگین‌ها به روش آزمون دانکن، مقادیر تک‌آبیاری در تولید دانه در کلاس‌های مجزا قرار می‌گیرند، به نحوی که تک‌آبیاری ۹۰ میلی‌متری با ۹۱۳ کیلوگرم در هکتار در گروه A قرار می‌گیرد (جدول ۲). در بررسی مراحل رشد معلوم می‌شود که مرحلهٔ گل‌دهی در گروه A قرار می‌گیرد که نشان می‌دهد تک‌آبیاری در مرحلهٔ طویل شدن ساقه به دلیل وجود رطوبت کافی در خاک، مناسب بودن هوا از نظر درجهٔ حرارت، کمتر بودن میزان تبخیر- تعرق، و اینکه ریشه به طور کامل توسعه نیافته است نمی‌تواند نقش مؤثری در افزایش عملکرد دانه داشته باشد. تک‌آبیاری در مرحلهٔ پرشدن دانه نیز به دلیل پایان یافتن رشد رویشی و ناممکن بودن ایجاد شاخ و برگ و غلاف جدید تنها می‌تواند در افزایش وزن دانه و پرشدن دانه مؤثر باشد. در واقع در این حالت تنش خشکی، تأثیرات منفی را بر گیاه گذاشته است که به طور کامل قابل جبران نیست. اما برای مرحلهٔ گل‌دهی، هنوز شدت خشکی به آن حد نرسیده که غیر قابل جبران باشد، ضمن اینکه تنها ۵۰ درصد بوته‌های هر کرت به مرحلهٔ گل‌دهی رسیده‌اند، لذا امکان ادامه رشد رویشی و تشکیل شاخه‌های فرعی و افزایش تعداد و اندازه غلاف‌ها وجود دارد و آبیاری ذخیرهٔ رطوبتی مناسب را در نیمرخ خاک فراهم می‌کند تا با توجه به سایه-اندازی کامل گیاه که تبخیر از سطح خاک را کاهش می‌دهد، آب آبیاری عمدتاً صرف تعرق گیاه شود و به طور مؤثری عملکرد دانه را افزایش دهد.

در سال اول، میزان بارش تجمعی بیشتر بوده است (جدول ۱). زمان کاشت در کشت بهارهٔ دیم تابع شرایط اقلیمی است و در سال اول با توجه به شرایط خاک، امکان کشت زودتر و استقرار سریع‌تر محصول برای بهره‌گیری از شرایط مطلوب طبیعی مهیا شد (جدول۱)، اما در سال دوم میزان بارش تجمعی کمتر بود، میزان درجه- روز به مراتب بیشتری داشته است (شکل ۱) و اگر چه در ابتدای دورهٔ بارش مناسبی وجود داشت (۹۸ میلی‌متر در طی ۵۳ روز پس از کاشت) ولی به مدت ۲۴ روز بارندگی نبود و طی ۵۳ تا ۹۹ روز پس از کاشت تنها ۱۶ میلی‌متر بارش وجود داشت. با اینکه شرایط دو سال تحقیق تفاوت می‌کند اما آنچه نتیجه را ترسیم می‌کند هم‌سویی نتایج دو سال در انتخاب گزینهٔ برتر است.



شکل ۱- تغییرات میزان تجمعی بارش و درجه- روز رشد طی دو سال تحقیق

بررسی اثر متقابل تک‌آبیاری و مراحل رشد نشان می‌دهد که تک‌آبیاری به میزان ۶۰ و ۹۰ میلی‌متر در تولید دانه تفاوت معنی‌دار نداشته است و در یک گروه قرار می‌گیرند (قسمت الف جدول۲). اما نکتهٔ جالب توجه این است که برای همین مرحله گل‌دهی که متوسط عملکرد محصول در شرایط دیم ۵۸۶ کیلوگرم در هکتار است در مقایسه تیمارهای ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی‌متر مصرف آب، تیمار تک‌آبیاری ۳۰ میلی‌متری، به ازای هر میلی‌متر آب مصرفی حدود ۶ کیلوگرم دانه نسبت به شرایط دیم تولید می‌شود اما با ۳۰ میلی‌متر اضافه‌تر (تک‌آبیاری ۶۰ میلی‌متری)، به ازای هر میلی‌متر آب مصرفی نسبت به تک‌آبیاری ۳۰ میلی‌متری، ۱۰/۲ کیلوگرم دانه تولید می‌شود و در تیمار تک‌آبیاری ۹۰ میلی‌متری نیز با ۳۰ میلی‌متر آب مصرفی بیشتر نسبت به تیمار ماقبل (تک‌آبیاری ۶۰ میلی‌متری)، به ازای هر میلی‌متر آب مصرفی تنها ۱/۲ کیلوگرم دانه تولید می‌شود. این مسئله نشان‌دهنده برتری تک‌آبیاری ۶۰ میلی‌متری است.

عملکرد دانه و آزمون آماری آن به تنهایی نمی‌تواند تعیین‌کنندهٔ تیمار برتر باشد. در ارزیابی تیمارهای آبیاری، یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها میزان تولید به ازای واحد آب مصرفی است که در قالب سه شاخص که در زیر مشخص می‌شوند بررسی خواهد شد: کارایی مصرف آب، بهره‌وری آب مصرفی ناشی از آب آبیاری در افزایش عملکرد نسبت به شرایط دیم (میزان تولید به ازای واحد آب آبیاری)، و بهره‌وری آب مصرفی ناشی از مجموع آب آبیاری و بارش در عملکرد کل (که به ترتیب با WUE ، WP_I و WP_{I+P} نشان داده می‌شوند). میزان تولید به ازای واحد آب مصرفی برای متوسط دو سال در جداول ۲ تا ۴ خلاصه شده است. انتظار می‌رود عملکرد دانه در شرایط دیم برای هر سه مرحلهٔ رشد برابر باشد اما به دلیل خطاهای موجود، اختلاف اندکی بین آنها وجود دارد. از این رو در محاسبهٔ کارایی مصرف آب و بهره‌وری آب مصرفی از میانگین عملکرد دیم در سه مرحلهٔ رشد استفاده شد که متوسط دو سال ۵۸۶ کیلوگرم در هکتار است (قسمت الف جدول۲). بهره‌وری آب مصرفی ناشی از مجموع آب آبیاری و بارش در عملکرد کل (WP_{I+P}) و برای متوسط دو سال، نشان می‌دهد که تک‌آبیاری ۶۰ میلی‌متری در مرحلهٔ گل‌دهی بالاترین میزان بهره‌وری را دارد و مقدار متوسط آن ۴/۷۹ کیلوگرم بر میلی‌متر است (قسمت ب جدول ۲). از سویی دیگر، بهره‌وری آب مصرفی ناشی از آب آبیاری در اضافه عملکرد نسبت به شرایط دیم (WP_I) و برای

متوسط دو سال نشان می‌دهد که تک‌آبیاری ۶۰ میلی‌متری در مرحلهٔ گل‌دهی بالاترین میزان بهره‌وری را دارد و مقدار متوسط آن ۸/۰۹ کیلوگرم بر میلی‌متر است (قسمت ج جدول۲).

جدول ۲- بهره‌وری آب مصرفی (WP) کلزای بهاره در تولید دانه (کیلوگرم برمیلی‌متر)، متوسط دو سال

	عملکرد دانه کلزای بهاره (کیلوگرم در هکتار)					بهره‌وری آب مصرفی ناشی از آبیاری+ بارش در عملکرد کل (WP_{I+P})، (کیلوگرم برمیلی‌متر)				
الف	I_0	I_{30}	I_{60}	I_{90}	میانگین	ب	I_0	I_{30}	I_{60}	I_{90}
S_1	۵۹۴ d	۷۲۷ c	۷۷۵ bc	۸۰۵ b	۷۲۵ B	S_1	۳/۶۳	۳/۷۵	۳/۴۶	۲/۷۸
S_2	۵۸۶ d	۷۶۵ bc	۱۰۷۱ a	۱۱۰۸ a	۸۸۲ A	S_2	۳/۵۸	۳/۹۵	۴/۷۹	۳/۸۳
S_3	۵۷۷ d	۷۰۲ c	۷۵۹ bc	۸۲۷ b	۷۱۶ B	S_3	۳/۵۲	۳/۶۲	۳/۳۹	۲/۸۶
میانگین	۵۸۶ D	۷۳۱ C	۸۶۸ B	۹۱۳ A		بهره‌وری آب مصرفی ناشی از آب آبیاری در افزایش عملکرد نسبت به شرایط دیم (WP_I)، (کیلوگرم برمیلی‌متر)				
LSD1%	S (۳۶/۶)	I (۴۰/۶)	I × S (۷۰/۲)			ج	I_0	I_{30}	I_{60}	I_{90}
میانگین‌های دارای حروف مشترک هستند از نظر آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.						S_1	-	۴/۷۱	۳/۱۶	۲/۴۴
متوسط بارش دو سال ۸۲-۱۳۸۰: ۳۷۵ میلی‌متر						S_2	-	۵/۹۸	۸/۰۹	۵/۸۰
متوسط بارش از کاشت تا برداشت: ۱۶۳/۸ میلی‌متر						S_3	-	۳/۸۸	۲/۸۹	۲/۶۸

در زراعت دیم معمولاً زمین وجود ندارد، لذا در شرایط وجود مقدار ثابت آب قابل دسترس برابر با بالاترین میزان آب مصرفی (تیمار ۹۰ میلی‌متری) و برای ارزیابی گزینه‌های تک‌آبیاری به طور نسبی، تیمارهای تک‌آبیاری ۶۰ و ۳۰ میلی‌متری با تیمار تک‌آبیاری ۹۰ میلی‌متری مقایسه شدند. با توجه به نسبت مقادیر تک‌آبیاری، زمینی به مساحت ۳ هکتار فرض می‌گردد که با اِعمال تک‌آبیاری ۹۰، ۶۰، و ۳۰ میلی‌متر به ترتیب ۱، ۱/۵ و ۳ هکتار تحت مدیریت تک‌آبیاری و ۲، ۱/۵ و صفر هکتار تحت شرایط دیم قرار خواهد گرفت. نتایج این تحلیل در جدول ۳ برای متوسط دو سال نشان داده شده است. فرمول‌های مورد نیاز برای تعیین عملکرد کل و بهره‌وری آب مصرفی در زیر جدول ۳ ذکر شده است. بر اساس این نتایج، برتری تیمارها مربوط به تک‌آبیاری ۶۰ میلی‌متری در مرحلهٔ گل‌دهی است که حداکثر بهره‌وری کل در تولید دانه و به میزان ۴/۲۸ کیلوگرم به ازای هر میلی‌متر دارد (جدول ۳).

جدول ۳- مقایسه بهره‌وری آب مصرفی (بارش + آبیاری) در تولید دانهٔ کلزا تحت گزینه‌های مختلف، متوسط دو سال (آب قابل دسترس برابر ۹۰ میلی‌متر + ۱۶۳/۸ مِیلی‌متر بارش از کاشت تا برداشت)

	آب آبیاری (Irr) (میلی‌متر)	سطح آبیاری A_{Irr} (هکتار)	سطح دیم $A_{Rainfed}$ (هکتار)	کل سطح A (هکتار)	عملکرد با آبیاری Y_{Irr} (کیلوگرم در هکتار)	عملکرد دیم $Y_{Rainfed}$ (کیلوگرم در هکتار)	کل عملکرد Y (کیلوگرم در هکتار)	کل آب مصرفی (آبیاری + بارش) (Irr+Rain) (میلی‌متر)	WP (کیلوگرم بر میلی‌متر)
مرحلهٔ طویل شدن ساقه	۹۰	۱	۲	۳	۸۰۵	۵۸۶	۱۹۷۷	۵۸۱	۳/۴
	۶۰	۱/۵	۱/۵	۳	۷۷۵	۵۸۶	۲۰۴۲	۵۸۱	۳/۵۱
	۳۰	۳	۰	۳	۷۲۷	۵۸۶	۲۱۸۱	۵۸۱	۳/۷۵
مرحلهٔ گل‌دهی	۹۰	۱	۲	۳	۱۱۰۸	۵۸۶	۲۲۸۰	۵۸۱	۳/۹۲
	۶۰	۱/۵	۱/۵	۳	۱۰۷۱	۵۸۶	۲۴۸۶	۵۸۱	۴/۲۸
	۳۰	۳	۰	۳	۷۶۵	۵۸۶	۲۲۹۵	۵۸۱	۳/۹۵
مرحلهٔ پر شدن غلاف	۹۰	۱	۲	۳	۸۲۷	۵۸۶	۱۹۹۹	۵۸۱	۳/۴۴
	۶۰	۱/۵	۱/۵	۳	۷۵۹	۵۸۶	۲۰۱۸	۵۸۱	۳/۴۷
	۳۰	۳	۰	۳	۷۰۲	۵۸۶	۲۱۰۶	۵۸۱	۳/۶۲

$Y = A_{Irr} \times Y_{Irr} + A_{Rainfed} \times Y_{Rainfed}$ (تک‌آبیاری ۹۰ و ۶۰ میلی‌متری)

$Y = A_{Irr} \times Y_{Irr}$ (تک‌آبیاری ۳۰ میلی‌متری)

$WP = Y / [Irr \times A_{Irr} + Rain \times (A_{Rainfed} + A_{Irr})]$ (تک‌آبیاری ۹۰ و ۶۰ میلی‌متری)

$WP = Y / [(Irr+Rain) \times A_{Irr})]$ (تک‌آبیاری ۳۰ میلی‌متری)

جدول ۴- کارایی مصرف آب (WUE) کلزای بهاره در تولید دانه (کیلوگرم برمیلی‌متر)، متوسط دو سال

	کل بارش طی دوره رشد (میلی‌متر)	آب آبیاری (میلی‌متر)	رطوبت خاک (میلی‌متر بر متر) در زمان:		تبخیر- تعرق دوره‌ی رشد ETa (میلی‌متر)	عملکرد دانه (کیلوگرم بر هکتار)	WUE (کیلوگرم بر میلی‌متر- تبخیر و تعرق واقعی)
			کاشت	برداشت			
متوسط دو سال	۱۶۳/۸	۹۰	۲۸۶	۱۵۷	۳۸۳	۹۱۳	۲/۳۹
		۶۰	۲۸۶	۱۵۷	۳۵۳	۸۶۸	**۲/۴۶**
		۳۰	۲۸۶	۱۵۷	۳۲۳	۷۳۱	۲/۲۶
		۰	۲۸۶	۱۵۷	۲۹۳	۵۸۶	۲

یکی از مزایای شاخص کارایی مصرف آب (WUE) نسبت به شاخص بهره‌وری آب مصرفی (WP) در نظر گرفتن رطوبت خاک در ابتدا و انتهای دورهٔ رشد در معادلهٔ بیلان رطوبتی است. همان طور که جدول ۴ نشان می‌دهد، تک‌آبیاری ۶۰ میلی‌متری در مرحلهٔ گل‌دهی بالاترین میزان کارآیی مصرف آب را دارد که متوسط آن ۲/۴۶ کیلوگرم بر میلی‌متر است.

بر اساس تحقیقی در شمال شرقی ایالت کلرادو (امریکا)، نشان داده شدکه بعد از ۱۷۲ میلی‌متر مصرف آب، به ازای هر میلی‌متر آب مصرفی ۱۷/۲۱ کیلوگرم دانه تولید شده است (Nielsen, 1995)؛ در شرایط ایالت آلبرتا (کانادا) با ۲۰۳ میلی‌متر آب مصرفی ۱۰۰۸ کیلوگرم در هکتار دانه و به ازای هر میلی‌متر آب مصرفی بیشتر ۵/۹۵ کیلوگرم دانه تولید گردید (Anon, 1985). عملکرد دانهٔ کلزا تابع شرایط محیطی از جمله میزان آب قابل دسترس است. به طوری که تغییرات آن از ۵۳۸ کیلوگرم در هکتار با ۲۴۹ میلی‌متر آب مصرفی تا ۳۴۱۶ کیلوگرم در هکتار با ۵۲۱ میلی‌متر آب مصرفی گزارش شده است. بر اساس رگرسیون خطی داده‌های آزمایشی دو ساله نشان داده شد که بعد از ۱۵۸ میلی‌متر مصرف آب، به ازای هر میلی‌متر آب مصرفی ۷/۷۳ کیلوگرم دانه تولید می‌شود (Anon, 1985). تغییرات سالانه مقدار و پراکنش بارش منجر به تغییراتی در زمان و شدت تنش آبی می‌شود (Nielsen, 1996)، به طوری که تفاوت آماری معنی‌داری از اثر زمان تنش آبی روی عملکرد دانه گزارش شده است (Nielsen, 1996)، از لحاظ مرحلهٔ مناسب اجرای تک‌آبیاری، نتایج این تحقیق در تعیین مرحلهٔ حساس رشد کلزا به کم‌آبی، با نتایج دیگر محققان تطابق دارد که مرحلهٔ گل‌دهی و تشکیل غلاف را حساس‌ترین مرحله دانسته‌اند (Arshi, 2001; Pasban Eslam *et al.,* 2000; Mendham *et al.,* 1984; Rao & Mandham, 1991; Richards & Thurling, 1978). بروز خشکی دیر هنگام در زمان دانه‌بندی سبب تولید دانه‌های چروکیده می‌شود (Arshi, 2001). مشاهده و گزارش شده است که به کارگیری ۵۰ میلی‌متر آب آبیاری در مراحل حساس، عملکرد را افزایش می‌دهد (Mendham *et al.,* 1984). همچنین نشان داده شده است که آبیاری تکمیلی کلزا با طولانی کردن دورهٔ گل‌دهی، تعداد غلاف‌ها و تعداد دانه در غلاف‌ها را بالا می‌برد (Clarke & Simpson, 1978)، شاید این امر به دلیل وجود سطح برگ بیشتر در جریان گل‌دهی باشد. بنابراین، عرضهٔ بیشتر مواد فتوسنتزی، فقدان همبستگی منفی بین تعداد غلاف و تعداد دانه در غلاف را باعث می‌شود (Rao & Mandham, 1991). سکاریس‌برایک و دانیل (Scarisbrick & Daniels, 1986) گزارش کردند که باید از بروز تنش آب در طول دورهٔ بحرانی گل‌دهی تا رسیدن فیزیولوژیک پرهیز شود؛ این محققان می‌گویند که در طول این دوره میزان آب نباید کمتر از ۵۰ درصد ظرفیت نگهداری آب در خاک باشد (Dehshiri *et al.,* 2001). نشان داده شده است که در صورت بروز تنش گرمایی در طول دورهٔ گل‌دهی، عملکرد دانه کاهش می‌یابد و مناسب‌ترین دما را برای کلزا حدود ۲۰ درجه سانتی‌گراد دانسته‌اند (Morrison & Stewart, 2002). در مرحلهٔ گل‌دهی شاید یکی از دلایل برتری تک‌آبیاری، کنترل تنش رطوبتی و گرمایی باشد. بر این اساس، نتیجهٔ تحقیق که شامل نقش تک‌آبیاری بهینه در افزایش و بهبود عملکرد دانهٔ کلزای بهاره و تعیین مرحلهٔ گل‌دهی به عنوان حساس‌ترین مرحله رشد برای انجام تک‌آبیاری است با نتایج و گزارش‌های دیگر پژوهشگران ذکر شده همسوست.

نتیجه‌گیری

در شرایط دیم، تک‌آبیاری و مصرف بهینهٔ آب برای تثبیت عملکرد دانه کفایت می‌کند (Tavakoli, 2001). لذا بر اساس مجموع نتایج به دست آمده و بر مبنای شاخص‌های کارایی مصرف آب و بهره‌وری آب مصرفی، تک‌آبیاری ۶۰ میلی‌متری در مرحلهٔ گل‌دهی بهترین گزینه برای کلزای بهاره رقم PF.7045.91 (ساری‌گل) به شمار می‌رود. پیشنهاد می‌شود تحقیقات تک‌آبیاری پاییزه و بهاره برای دیگر محصولات دانه‌های روغنی از جمله گلرنگ، آفتابگردان، و ارقام دیگر کلزا نیز به اجرا درآید تا در کنار نتایج تک‌آبیاری گندم و جو به دستورالعملی جامع وکاربردی با توجه بر کارایی مصرف آب (WUE) و بهره‌وری آب (WP) در زراعت دیم دست یافت.

مراجع

Abdolrahmani, B. 2003. Agronomic management of producing rapeseed at rainfed condition. Extension Paper. Dryland Agricultural Research Institute. (in Farsi)

Angadi, S. V., Cutforth, H. W., Mc Conkey, B. G. and Gan, Y. 2003. Yield adhustment by canola grown at different plant population under semiarid conditions. Crop Sci. 43, 1358-1366.

Anon. 1985. Canola production in Alberta. Alberta Agric. Field Crops Branch AGDEX 149/20-1.

Arshi, Y. 2001. Rapessed Producing Manuals. Oilseed Crops Development Co. (in Farsi)

Clarke, J. M. and Simpson, G. M. 1978. Influence of irrigation and seeding rates on yield and yield components of Brassica napus cv. Tower. Canadian J. Plant Sci. 58, 731-737.

Dehshiri, A., Ahmadi, M. R. and Tahmasbi-Sarvestani, Z. 2001. Response of rapeseed cultivars to water stress. Iranian J. Agric. Sci. 32(3): 649-659. (in Farsi)

Downey, R. K. 1990. Canola: A Quality Brassica Oilseed. In: Janick, J. and Simon, J. E. (Eds.). Advances in New Crops. Timber Press. Portland, OR.

Kitamura, Y. 1990. Management of an irrigation system for double cropping culture in the tropical monsoon area. Technical bulletin 27. Tropical Agricultural Research Center. Ministry of Agriculture. Forestry and Fisheries. Tsukuba. Ibaraki. Japan.

Loof, B. 1972. Cultivation of Rapeseed. In: Appelqvist, L. A. and Ohlson, R. (Eds.). Rapeseed. Elsevier Pub. Co. Amsterdam.

Malakoti, M. J. and Riyazi-Hamedani, S. A. 2001. Fertilizers and Soil Fertility. University Press Center. (in Farsi)

Mendham, N. J., Buzza, G. C. and Russell, J. 1984. The contribution of seed surrival to yield in new Australian cultivars of oil seed rape (*Brassica napus*). J. Agric. Sci. Cambridge. 103, 303-316.

Morrison, M. J. and Stewart, D. W. 2002. Heat stress during flowering in summer Brassica. Crop Sci. 42, 797-803.

Nielsen, D. C. 1995. Water use - yield relationships for central Great Plains crops. Central Great Plains Res. Sta., Akron. Colorado. Conservation Tillage Fact Sheet #2-95.

Nielsen, D. C. 1996. Potential of Canola as a Dryland Crop in Northeastern Colorado. In: Janick, J. (Ed.). Progress in New Crops. ASHS Press. Alexandria, VA.

Oweis, T. 1997. Supplemental Irrigation: A Highly Efficient Water Use Practice. ICARDA. Aleppo. Syria.

Oweis, T. Y. and Hachum, A. 2003. Improving Water Productivity in the Dry Areas of West Asia and North Africa. In: Kijne, J. W., Barker, R. and Molden, D. (Eds.). Water Productivity in Agriculture, Limits and Opportunities for Improvement. International Water Management Institute (IWMI). Colombo. Sri Lanka.

Pasban Eslam, B., Shakiba, M. R., Neishabori, M. R., Moghaddam, M. and Ahmadi, M. R. 2000. Effects of water stress on quality and quantity characteristics of rapeseed. J. Agric. Sci. 10(4): 75-85. (in Farsi)

Perrier, E. R. and Salkini, A. B. 1991. Supplemental Irrigation in the Near East and North Africa. ICARDA. Aleppo. Syria.

Rao, M. S. S. and Mendham, N. J. 1991. Soil - plant - water relations of oil seed rape (*Brassica napus and B. Campestris*). J. Agric. Sci. Cambridge. 117, 197-205.

Raymer, P. L. 2002. Canola: An Emerging Oilseed Crop. In: Janick, J. and Whipkey, A. (Eds.). Trends in New Crops and New Uses. ASHS Press. Alexandria, VA.

Richards, R. A. and Thurling, N. 1978. Variation between and within species of rapeseed (*Brassica campestris and B.Napus*) in response to drought stress. I: Sensivity at different stages of development. Aust. J. Agric. Res. 29, 469-477.

Salkini, A. and Ansell, D. 1992. Agro-economic impact of supplemental irrigation on rainfed wheat production under the Mediterranean environment of Syria. International Conference on

Supplementary Irrigation and Drought Water Management. Valenzano (IT). Sep. 27-Oct. 2. Vol. 1. Supplementary Irrigation in Arid and Semi Arid Regions.

Scarisbrick, D. H. and Daniels, R.W. 1986. Oil Seed Rape. 1st Ed. Great Britian Pub. Collins Professional and Technical Books.

Schneider, A. D. and Howell, T. A. 1996. Methods, amounts and timing of sprinkler irrigation for winter wheat. Trans. ASAE. 40, 137-142.

Shafii, B., Mahler, K. A., Price, W. J. and Auld, D.L. 1992. Genotype x environment interaction effects on winter rapeseed yield and oil content. Crop Sci. 32, 922-927.

Sovero, M. 1993. Rapeseed, a New Oilseed Crop for the United States. In: Janick, J. and Simon, J. E. (Eds.). New Crops. Wiley. N. Y.

Starner, D. E., Bhardwaj, H. L., Hamama, A. A. and Rangappa, M. 1996. Canola Production in Virginia. In: Janick, J. (Ed.). Progress in New Crops. ASHS Press. Alexandria, VA.

Starner, D. E., Hamama, A. A. and Bhardwaj, L. 1999. Canola Oil Yield and Quality as Affected by Production Practices in Virginia. In: Janick, J. (Ed.). Perspectives on New Crops and New Uses. ASHS Press. Alexandria, VA.

Tavakkoli, A. R. and Oweis, T. 2004. The role of supplemental irrigation and nitrogen in producing bread wheat in the highlands of Iran. Agric. Water Manag. 65, 225-236.

Tavakoli, A. R. 2001. Optimal management of single irrigation on dryland wheat farming. J. Agric. Eng. Res. 2(7): 41-50. (in Farsi)

Tavakoli, A. R. 2004. Optimal supplemental irrigation management and optimization of nitrogen for rainfed wheat variety. J. Pajouhesh-va-Sazandegi (In Agronomy and Hort). No. 62. 17(1): 35-42. (in Farsi)

Tavakoli, A. R., Belson, V. and Ferri, F. 2000. Response of advanced wheat varieties to supplemental irrigation. Research Report. No. 729. Dryland Agricultural Research Institute. (in Farsi)

Zhang, H. and Oweis T. 1999. Water - yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region. Agric. Water Manag. 38, 195-211.

Zhang, H., Wang, X., You, M. and Liu, C. 1999. Water-yield relations and water use efficiency of winter wheat in North China Plain. Irrig. Sci. 19, 37-45.

Zhang, H. 2003. Improving Water Productivity through Deficit Irrigation: Examples from Syria, the North China Plain and Oregon, USA. In: Kijne, J. W., Barker, R. and Molden, D. (Eds.). Water Productivity in Agriculture, Limits and Opportunities for Improvement. International Water Management Institute. Colombo. Sri Lanka.

AERI JAER *Journal of Agricultural Engineering Research/Vol.8 /No.2 / Summer 2007/ P: 72-92*

Improving Water Productivity and Optimal Time and Amount of Single Irrigation for Rainfed Spring Rapeseed

A. R. Tavakoli[*] and B. Abdolrahmani

[*] Academic Member, Dryland Agriculture Research Institute, Maraghe, Iran. E-mail: art.tavakoli@gmail.com

In order to investigate the effects of single irrigation amounts at different stages of rapeseed growth on yield and the improvement of water use efficiency and water productivity indices, this experiment was conducted as split plot arranged in a randomized complete block design (RCBD) with three replications during 2002-2003 for rainfed spring rapeseed variety (PF.7015.91= Sarigol) at Maragheh Agricultural Research Station of DARI. The treatments included four levels of single irrigation amounts (rainfed, 30, 60 and 90mm of water use) at three growth stages (stem elongation, flowering and filling stage). The analysis of variance showed that, during two seasons of the study, there were significant effects due to single irrigation amounts, growth stages and their interactions. Results showed that the optimum level of single irrigation for increase and yield stability of rapeseed was 60mm water use at flowering stage which produced 1071kg.grain.ha^{-1}. The WP_{I+P}, WP_I and WUE for this treatment were 4.79, 8.09 and 2.46kg.mm^{-1}, respectively.

Key words: Rainfed, Single Irrigation, Spring Rapeseed, Water Productivity, Water use Efficiency, Yield