نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۲، شماره ۲ ، تابستان ۱۳۹۳، ص. ۱۶۳-۱۵۳

Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 12, No. 2, Summer. 2014, p. 153-163

مقایسه راندمان جذب، مصرف و بهره‌وری آب در سیستم‌های تک‌کشتی و چندکشتی کلزا (*Brassica napus* L.)، لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) و ذرت (*Zea mays* L.)

سمانه نجیب‌نیا[1*]- علیرضا کوچکی[2]- مهدی نصیری محلاتی[3]- حسن پُرسا[4]

تاریخ دریافت:۱۳۸۸/۹/۱۵
تاریخ پذیرش:۱۳۹۱/۱۱/۵

چکیده

به‌منظور بررسی راندمان جذب، مصرف و بهره‌وری آب در سیستم‌های تک‌کشتی و چندکشتی سه گیاه کلزا، لوبیا و ذرت، آزمایشی در سال زراعی ۸۷-۱۳۸۶ در منطقه مشهد به مرحله اجرا درآمد. در این بررسی، ۶ تیمار کشت شامل سه تیمار تک‌کشتی برای هر یک از سه گیاه (کلزا در اول مهر، ذرت و لوبیا در ۱۰ اردیبهشت) و سه تیمار چندکشتی شامل تیمار چندکشتی دوگانه (کشت همزمان لوبیا و ذرت در ۱۰ اردیبهشت)، چندکشتی تأخیری دومرحله‌ای (کلزا در اول مهر و لوبیا و ذرت در ۱۰ اردیبهشت) و چندکشتی تأخیری سه‌مرحله‌ای (کلزا در اول مهر، لوبیا در ۲۰ فروردین و ذرت در ۱۰ اردیبهشت) در نظر گرفته شد. این آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. بر اساس نتایج، ترکیب کشت، تأثیر معنی‌داری ($p\leq$۰/۰۱) بر راندمان جذب، مصرف و بهره‌وری آب داشت. در بین تیمارهای چندکشتی، چندکشتی تأخیری دومرحله‌ای بیشترین راندمان جذب (۰/۴۳)، چندکشتی تأخیری سه‌مرحله‌ای بیشترین راندمان مصرف و بهره‌وری بر اساس عملکرد بیولوژیک (به‌ترتیب با ۱/۸۲ و ۰/۷۳ گرم بر مترمربع در میلی‌متر) و چندکشتی دوگانه بیشترین راندمان مصرف و بهره‌وری بر اساس عملکرد دانه (به‌ترتیب با ۰/۴۳ و ۰/۱۷ گرم بر مترمربع در میلی‌متر) را نشان دادند. در بین تیمارهای تک‌کشتی کلزا بیشترین راندمان جذب (۰/۲۶) و بیشترین راندمان مصرف و بهره‌وری بر اساس عملکرد بیولوژیک (به‌ترتیب با ۶/۸۲ و ۱/۷۵ گرم بر مترمربع در میلی‌متر) و ذرت بیشترین راندمان مصرف و بهره‌وری بر اساس عملکرد دانه (به‌ترتیب با ۱/۵ و ۰/۳۵ گرم بر مترمربع در میلی‌متر) را داشتند. در مجموع، تیمار چندکشتی تأخیری دومرحله‌ای از نظر راندمان جذب، تک‌کشتی کلزا از نظر راندمان مصرف و بهره‌وری بر اساس عملکرد بیولوژیک و تک‌کشتی ذرت از نظر راندمان مصرف و بهره‌وری بر اساس عملکرد دانه، برتر بودند. با توجه به نتایج این آزمایش به‌نظر می‌رسد چنین ترکیب‌هایی از کشت به علل مختلف از جمله سایه‌اندازی کلزا روی گیاهچه‌های جوان لوبیا و ذرت نتیجه مطلوب حاصل ننماید و لذا لازم است آزمایش‌های بعدی به نحوی طراحی گردند که تلاقی دوره رشد گیاهان همراه با کلزا بسیار کمتر از آنچه در این آزمایش بود، تنظیم شود و تاریخ‌های کاشت به نحو دیگری تنظیم گردند.

واژه‌های کلیدی: چندکشتی تأخیری، چندکشتی دوگانه، عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه

مقدمه

آب به‌طور مداوم از میان پیکر گیاهان در حال جریان است به‌این‌صورت که از طریق ریشه وارد گیاه شده و طی فرآیند تعرق از طریق روزنه‌ها خارج می‌شود. به‌این‌ترتیب، گیاهان به عرضه مقدار معینی آب از خاک به ریشه‌های خود نیاز دارند و بدون وجود رطوبت کافی در خاک به‌سرعت پژمرده شده و از بین می‌روند (۶). عرضه آب و نگهداری آن در خاک تحت تأثیر عوامل متعدد محیطی، گیاهی و مدیریتی قرار دارد (۲). عوامل مدیریتی مانند استفاده از تاریخ کاشت مناسب، تراکم مطلوب و سیستم‌های چندکشتی و بِه‌نژادی از طریق تأثیر بر عملکرد یا تبخیر و تعرق و یا هر دو، بر راندمان مصرف آب تأثیر می‌گذارند (۲۰، ۲۱ و ۲۶).

به‌طور کلی عواملی مانند اقلیم، آب، دی‌اکسیدکربن، دمای هوا، رطوبت هوا، خصوصیات خاک، مسیر فتوسنتزی گیاه، گونه گیاهی، رقم، طول دوره رشد، رفتار روزنه‌ای گیاه، اندازه، ساختمان و آرایش برگ‌های گیاهان بر راندمان مصرف آب در آنها تأثیر می‌گذارند (۱، ۹، ۲۳ و ۲۵). آب، مواد غذایی محلول را حمل کرده و بر تهویه و درجه‌حرارت خاک مؤثر بوده و فرایندهای بیولوژیک خاک را تحت

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری و استادان گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول: Email: samanehnajibnia@yahoo.com)
۴- مربی گروه پژوهشی بقولات، پژوهشکدهٔ علوم گیاهی، دانشگاه فردوسی مشهد

تأثیر قرار می‌دهد (۶). اگرچه تأمین آب برای کسب عملکرد کافی ضروری است ولی ویژگی‌هایی از قبیل راندمان جذب (تسخیر)[1]، راندمان مصرف (تبدیل) آب (WUE)[2] و بهره‌وری آب[3] (حاصلضرب راندمان جذب و مصرف)، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند (۱۶، ۱۷، ۱۸ و۲۲). کاویگلیا و همکاران (۱۰) راندمان جذب آب را بر اساس نسبت بین تبخیر و تعرق (ET)[4] فصلی و میزان آب قابل دسترس در طول فصل یا سال تعریف کرده‌اند. نامبردگان، مقدار راندمان جذب آب را در مورد سویا از ۰/۴۷ تا ۰/۶۵ بر اساس محاسبات فصلی و از ۰/۲۸ تا ۰/۵۱ بر اساس محاسبات سالانه و برای گندم از ۰/۴۱ تا ۰/۶۵ و از ۰/۲۶ تا ۰/۳۶، به‌ترتیب بر اساس محاسبات فصلی و سالانه برآورد نمودند.

به اعتقاد پاسیورا (۱۹)، اغلب فیزیولوژیست‌ها و بیوشیمیست‌های گیاهی راندمان مصرف آب را مربوط به تبادل گازی یک برگ می‌دانند ولی برای فیزیولوژیست‌های گیاهان زراعی و هواشناس‌ها این مفهوم تا سطح تبادل گازی یک کانوپی، تعمیم داده می‌شود. برخی محققان، راندمان مصرف آب فیزیولوژیک (WUE_p)[5] یا راندمان تعرق (TE)[6] را تعریف کرده‌اند (۲). در این حالت، راندمان تعرق به صورت مقدار ماده خشک تولید شده توسط گیاه به‌ازای مقدار آب مصرف شده در جریان تعرق گیاه تعریف می‌شود. راندمان تعرق نشان می‌دهد که گیاه به ازای هر واحد آب مصرف کرده در تعرق، چه مقدار ماده خشک تولید کرده است:

$$WUE_p = TE = A/T = K/VPD \quad (۱)$$

در این معادله، A مقدار ماده خشک تولید شده یا عملکرد بیولوژیک[7] (BY)، T تعرق گیاه، K ضریب گیاهی و VPD کمبود فشار بخار اتمسفر می‌باشند. هاول (۱۴)، راندمان مصرف آب را با مفهوم نسبت ماده خشک تولید شده در گیاه به تبخیر و تعرق تعریف کرد که معمولاً بر حسب گرم ماده خشک به کیلوگرم یا سانتی‌متر آب بیان می‌شود. کاویگلیا و همکاران (۱۰)، راندمان مصرف آب را بر اساس میزان ماده خشک تولید شده در بخش هوایی گیاه به ازای هر واحد تبخیر و تعرق، محاسبه کرده‌اند. این محققان در مورد سویا[8]، مقدار راندمان مصرف آب را از ۱/۶۴ تا ۴/۰۸ گرم بر مترمربع در میلی‌متر بر اساس ماده خشک و از ۰/۷۳ تا ۰/۹۲ گرم بر مترمربع در میلی‌متر بر اساس عملکرد دانه، برآورد کردند. آنها این مقادیر را در مورد گندم از ۴/۲۷ تا ۴/۳۸ گرم بر مترمربع در میلی‌متر و از ۱/۱۸ تا ۱/۳۴ گرم بر مترمربع در میلی‌متر به‌ترتیب بر اساس ماده خشک و عملکرد دانه برآورد کردند (۱۰).

برای کشاورزان و متخصصین زراعت که به محصول قابل برداشت توجه دارند، راندمان مصرف آب به مقدار دانه‌ای که با مصرف میزان مشخصی آب می‌تواند تولید شود، اشاره می‌کند (19). در این رابطه، اهدایی (۱۲) دو مدل را پیشنهاد کرد. مدل اول شامل سه جزء است که اجزای آن عبارتند از راندمان جذب (UE)، راندمان تعرق (TE) و شاخص برداشت (HI):

$$WUE = UE \times TE \times HI \quad (۲)$$

راندمان جذب عبارت است از نسبت کل مقدار آبی که از گیاه تعرق یافته (TWT) به کل آب مصرفی (TWU) که نشان‌دهنده توانایی گیاه برای جذب آب از خاک و کاهش تبخیر از سطح خاک می‌باشد:

$$UE = TWT/TWU \quad (۳)$$

راندمان تعرق نیز عبارت است از نسبت کل ماده خشک تولیدی (TDM) به مقدار آبی که از گیاه تعرق یافته (TWT):

$$TE = TDM/TWT \quad (۴)$$

و شاخص برداشت عبارت است از نسبت عملکرد دانه (Gy) به کل ماده خشک تولیدی:

$$HI = Gy/TDM \quad (۵)$$

در نهایت:

$$WUE = TWT/TWU \times TDM/TWT \times Gy/TDM = Gy/TWU \quad (۶)$$

مدل دوم شامل راندمان تبخیر و تعرق (ETE) به همراه شاخص برداشت می‌باشد:

$$WUE = ETE \times HI \quad (۷)$$

$$ETE = TDM/TWU \quad (۸)$$

$$WUE = TDM/TWU \times Gy/TDM = Gy/TWU \quad (۹)$$

اهدایی (۱۲) با مطالعه اثر شاخص برداشت و راندمان تبخیر و تعرق بر روی راندمان مصرف آب در واریته‌های پابلند و پاکوتاه گندم نتیجه گرفت که راندمان مصرف آب بالا در واریته‌های پاکوتاه گندم در نتیجه شاخص برداشت بالا بود در حالی که در واریته‌های پابلند راندمان مصرف آب بالا به علت بیشتر بودن راندمان تبخیر و تعرق بود. وی همچنین گزارش کرد که شاخص برداشت و راندمان تبخیر و تعرق در شرایط تنش خشکی اثر کمتری نسبت به شرایط بدون تنش روی راندمان مصرف آب دارند.

کاویگلیا و همکاران (۱۰)، مقدار بهره‌وری آب را در محدوده زمانی فصل در مورد سویا از ۱/۰۷ تا ۱/۹۰ گرم بر مترمربع در میلی-متر بر اساس ماده خشک و از ۰/۴۳ تا ۰/۴۷ گرم بر مترمربع در میلی‌متر بر اساس عملکرد دانه، بیان نمودند. در بررسی نامبردگان، این مقادیر در تک‌کشتی سویا در محدوده زمانی سال به‌ترتیب از

1 - Water Capture Efficiency
2 - Water Use Efficiency (WUE)
3 - Water Productivity
4 - Evapotranspiration (ET)
5 - Physiological Water Use Efficiency (WUEp)
6 - Transpiration Efficiency (TE)
7 - Biological Yield (BY)
8 - *Glycine max* L.

۰/۸۳ تا ۱/۱۶ گرم بر مترمربع در میلی‌متر و از ۰/۲۶ تا ۰/۳۷ گرم بر مترمربع در میلی‌متر تعیین گردید. این محققین، مقادیر فوق را برای گندم[1] در محدوده زمانی فصل از ۱/۷۹ تا ۲/۸۰ گرم بر مترمربع در میلی‌متر بر اساس ماده خشک و از ۰/۴۸ تا ۰/۸۸ گرم بر مترمربع در میلی‌متر بر اساس عملکرد دانه، بیان نمودند. در بررسی آنها، این مقادیر در مورد گندم در محدوده زمانی سال به‌ترتیب از ۱/۱۵ تا ۱/۵۷ گرم بر مترمربع در میلی‌متر و از ۰/۳۱ تا ۰/۴۹ گرم بر مترمربع در میلی‌متر تعیین گردید.

با توجه به اهمیت اکولوژیک و زراعی نظام‌های چندکشتی و نیز با توجه به لزوم ارزیابی دقیق این نظام‌ها از حیث شاخص‌های علمی، این آزمایش با هدف بررسی نظام‌های تک‌کشتی و چندکشتی سه محصول مهم کلزا[2]، لوبیا[3] و ذرت[4] از نظر راندمان جذب آب، راندمان مصرف آب و نیز میزان بهره‌وری آن، انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال زراعی ۸۷-۱۳۸۶ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۶ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۳۸ دقیقه شرقی و ارتفاع ۹۸۵ متر از سطح دریا به مرحله اجرا درآمد. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با شش تیمار و سه تکرار انجام شد.

تیمارهای این آزمایش شامل تک‌کشتی[5] هر یک از گیاهان کلزا در اول مهر ماه، ذرت و لوبیا در ۱۰ اردیبهشت بودند. چندکشتی دوگانه[6] شامل کشت همزمان ذرت و لوبیا در ۱۰ اردیبهشت، چندکشتی تأخیری[7] دومرحله‌ای شامل کشت کلزا در اول مهرماه و لوبیا و ذرت در ۱۰ اردیبهشت و چندکشتی تأخیری سه‌مرحله‌ای شامل کشت کلزا در اول مهر ماه، لوبیا در ۲۰ فروردین و ذرت در ۱۰ اردیبشت ماه بودند. عملیات آماده‌سازی بستر بذر مطابق معمول منطقه انجام شد و تیمارها در کرت‌هایی به ابعاد ۵×۳ متر قرار گرفتند. بین کرت‌ها یک متر فاصله وجود داشت. در داخل هر کرت، ۶ ردیف با فاصله ۵۰ سانتی‌متر از یکدیگر ایجاد شدند. در تیمارهای چندکشتی، گیاهان مختلف به‌طور یک‌درمیان بر روی ردیف‌ها کشت شدند. ارقام مورد استفاده در این آزمایش عبارت بودند از رقم دیررس ذرت ۷۰۴، رقم لوبیای معمولی ایستاده درخشان و رقم کلزای مدنا[8] که به ترتیب با تراکم مطلوب ۷، ۱۴ و ۲۰ بوته در مترمربع کشت شدند.

به‌منظور برآورد سهم هر گیاه در جذب آب ورودی، وزن خشک هر گونه گیاه با جمع‌آوری از هر کرت در انتهای فصل اندازه‌گیری شد. برای این منظور اندام‌های گیاه چند روز پس از برداشت توزین شدند و از مجموع آنها وزن خشک کل حاصل شد. میزان تبخیر و تعرق (ET) از حاصل‌ضرب تبخیر و تعرق گیاه مرجع در منطقه مشهد و ضریب گیاهی در مراحل مختلف رشد با استفاده از نرم‌افزار OPTIWAT تعیین گردید (۳). مقدار کل آب مصرفی (TWU) با استفاده از آب‌شمار حجمی با دقت ۰/۰۰۰۱ متر مکعب به‌طور مستقل برای هر تیمار در مجموع مراحل آبیاری ثبت گردید.

راندمان جذب آب (C_{WAT}) بر اساس نسبت میزان کل تبخیر و تعرق (ET) و کل آب مصرفی (TWU) محاسبه شد:

$$C_{WAT}= ET/TWU \qquad (۱۰)$$

راندمان مصرف آب بر اساس عملکرد بیولوژیک (WUE_{DM}) نیز بر اساس نسبت کل ماده خشک تولیدی (TDM) بر میزان کل تبخیر و تعرق (ET) به‌دست آمد:

$$WUE_{DM}= TDM/ET \qquad (۱۱)$$

محاسبه راندمان مصرف آب بر اساس عملکرد دانه (WUE_{SY}) از تقسیم عملکرد دانه (SY) بر میزان کل تبخیر و تعرق (ET) حاصل شد:

$$WUE_{SY} = SY/ET \qquad (۱۲)$$

میزان بهره‌وری آب بر اساس عملکرد بیولوژیک (WP_{DM}) از حاصل‌ضرب مقدار راندمان جذب (C_{WAT}) و راندمان مصرف آب بر اساس عملکرد بیولوژیک (WUE_{DM}) محاسبه گردید (۱۰):

$$WP_{DM} = C_{WAT} \times WUE_{DM}= ET/TWU \times TDM/ET= TDM/TWU \qquad (۱۳)$$

و میزان بهره‌وری آب بر اساس عملکرد دانه (WP_{SY}) از حاصل‌ضرب مقدار راندمان جذب (C_{WAT}) و راندمان مصرف آب بر اساس عملکرد دانه (WUE_{SY}) به‌دست آمد:

$$WP_{SY} = C_{WAT} \times WUE_{SY} = ET/TWU \times SY/ET= SY/TWU \qquad (۱۴)$$

محاسبه راندمان جذب، مصرف و بهره‌وری آب برای هر گونه از گیاهان در ترکیب‌های کشت و نیز هر نوع ترکیب کشت (انواع تک-کشتی و چندکشتی) انجام شد. محاسبات آماری و رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزارهای Excel و MSTAT-C انجام گرفت. برای مقایسه میانگین‌ها نیز از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال یک درصد استفاده گردید.

1 - *Triticum aestivum* L.
2 - *Brassica napus* L.
3 - *Phasaeolus vulgaris* L.
4 - *Zea mays* L.
5- Monoculture
6- Double cropping
7- Relay Cropping
8- Modena

جدول ۱- راندمان جذب آب گونه‌های گیاهی (میلی‌متر بر میلی‌متر) در ترکیب‌های کشت در آزمایش سیستم‌های تک‌کشتی و چندکشتی کلزا، لوبیا و ذرت در مشهد، سال زراعی ۸۷-۱۳۸۶

ترکیب کشت	نوع گیاه		
	کلزا	لوبیا	ذرت
تک‌کشتی	۰/۲۵۷c	۰/۱۹۳a	۰/۲۳۷a
چندکشتی دوگانه	–	۰/۱۷۰c	۰/۲۲۳c
چندکشتی تأخیری دومرحله‌ای	۰/۲۶۳b	۰/۱۷۳b	۰/۲۳۰b
چندکشتی تأخیری سه‌مرحله‌ای	۰/۲۸۰a	۰/۱۵۷d	۰/۲۱۳d

در هر ستون، میانگین‌های دارای حرف متفاوت، از نظر آماری تفاوت معنی‌دار ($p\leq$۰/۰۱) دارند.

نتایج و بحث

راندمان جذب آب گونه‌های گیاهی در ترکیب‌های کشت

نتایج به‌دست‌آمده در رابطه با میزان راندمان جذب آب گونه‌های گیاهی در ترکیب‌های مختلف کشت نشان داد که کلزا در چندکشتی تأخیری سه‌مرحله‌ای (۰/۲۸۰) و لوبیا و ذرت در تک‌کشتی (به‌ترتیب با ۰/۱۹۳ و ۰/۲۳۷) بیشترین مقادیر راندمان جذب آب را دارا بودند به‌طوری‌که مقدار آن نسبت به سایر انواع کشت دارای تفاوت معنی‌دار ($p\leq$۰/۰۱) بود (جدول ۱).

میزان برتری راندمان جذب آب در کلزا در تیمارهای چندکشتی تأخیری سه مرحله‌ای نسبت به تک‌کشتی و چندکشتی تأخیری دومرحله‌ای، به ترتیب ۸/۹ و ۶/۵ درصد بود. مقدار برتری این شاخص در لوبیا در تک‌کشتی نسبت به چندکشتی‌های دوگانه و تأخیری دومرحله‌ای و سه مرحله‌ای به‌ترتیب ۱۳/۵، ۱۱/۶و ۲۲/۹ درصد بود. ذرت نیز در در تک‌کشتی نسبت به چندکشتی‌های دوگانه و تأخیری دومرحله‌ای و سه مرحله‌ای به ترتیب ۶/۳، ۳/۰ و ۱۱/۳ درصد، برتری نشان داد (جدول۱).

به‌نظر می‌رسد بیشتر بودن راندمان جذب آب ذرت در تمامی تیمارها نسبت به لوبیا، به‌دلیل بیشتر بودن عمق ریشه ذرت باشد (۲۷). در لوبیا نیز دلیل پایین بودن راندمان جذب آب در چندکشتی تأخیری سه‌مرحله‌ای نسبت به سایر ترکیب‌های کشت، استقرار دیرهنگام این گیاه به علت پایین بودن دما و در نتیجه نامناسب بودن شرایط برای جوانه‌زنی بوده است. لازم به یادآوری است که لوبیا در چندکشتی تأخیری سه‌مرحله‌ای در ۲۰ فروردین و در سایر ترکیب‌های کشت در ۱۰ اردیبهشت کشت شد.

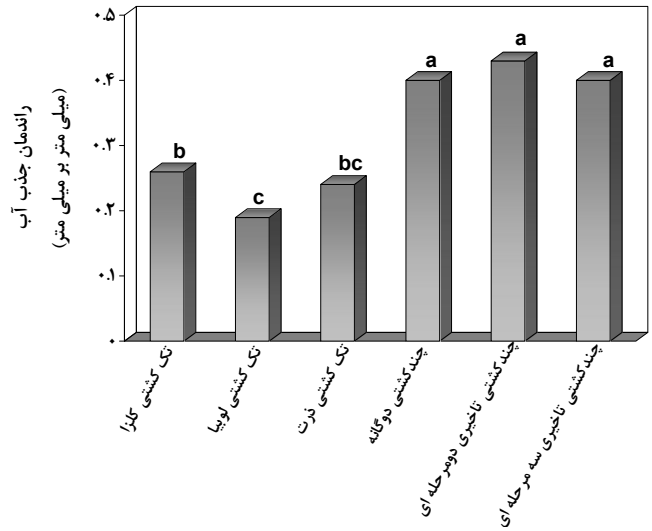
راندمان جذب آب در ترکیب‌های کشت

در این بررسی تمامی ترکیب‌های چندکشتی به‌طور معنی‌داری ($p\leq$۰/۰۱) راندمان جذب آب بیشتری نسبت به تک‌کشتی‌ها داشتند (شکل ۱). در بین تیمارهای تک‌کشتی، کلزا بیشترین راندمان جذب (۰/۲۶) را نشان داد و از این نظر تفاوت معنی‌داری با تک‌کشتی لوبیا داشت. در بین تیمارهای چندکشتی نیز چندکشتی تأخیری دومرحله‌ای بیشترین راندمان جذب آب (۰/۴۳) را دارا بود هرچند از این نظر تفاوت معنی‌داری بین چندکشتی‌ها مشاهده نشد (شکل ۱).

بعضی از محققین عقیده دارند بوم‌نظام‌هایی که دارای تنوع بیشتری هستند از منابع محیطی مانند آب با راندمان بهتری استفاده می‌کنند (۵، ۱۵ و ۲۹). در آزمایشی که بر روی چندکشتی ذرت و لپه‌هندی[1] انجام شد، مشاهده گردید که ریشه‌های عمیق لپه‌هندی، آب را از اعماق خاک بالا آورده و در اختیار ذرت قرار داد (۲۴). تسوبو و همکاران (۲۶) بیان کردند که چندکشتی غلات-بقولات در مناطق کم‌آب در تولید غذا موفق‌تر از تک‌کشتی آنها بوده است (۲۶). زوگمور و همکاران (۳۰)، در طی تحقیقات خود نشان دادند که چندکشتی سورگوم و لوبیا چشم بلبلی، هرز آب را به میزان ۲۰ تا ۳۰ درصد در مقایسه با تک‌کشتی سورگوم و ۴۵ تا ۵۵ درصد در مقایسه با تک-کشتی لوبیا چشم بلبلی کاهش داد (۳۰).

در اغلب چندکشتی‌های بقولات و غلات، غلات دارای ارتفاع کانوپی بیشتری بوده و ریشه‌های آن نیز در عمق پایین‌تری در مقایسه با بقولات گسترش می‌یابد. در نتیجه چندکشتی‌ها ممکن است با ایجاد تنوع مکانی و زمانی در استفاده از منابع توسط اجزا، کارآتر از تک‌کشتی‌ها عمل کنند (۲۷). چندکشتی گیاهان شامل کشت چند گیاه به‌صورت همزمان یا متوالی می‌تواند میزان تسخیر منابع و تولید کل را افزایش دهد (۱۰و ۱۳). والکر و اگیندو (۲۹) گزارش کردند که در چندکشتی، کانوپی متراکم‌تر و سایه آن بیشتر است، بنابراین تبخیر از سطح خاک در چندکشتی کمتر است لذا در چندکشتی آب با راندمان بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در چندکشتی، ساختار ریشه و فنولوژی گیاهان می‌تواند منجر به ایجاد حالت مکملی در گرفتن منابع شود (۲۸).

1- *Cajanus cajan*



شکل ۱- راندمان جذب آب در ترکیب‌های کشت در آزمایش سیستم‌های تک‌کشتی و چندکشتی کلزا، لوبیا و ذرت در مشهد، سال زراعی ۸۷-۱۳۸۶. ستون های دارای حداقل یک حرف مشترک تفاوت معنی داری در سطح احتمال یک درصد ندارند.

در بررسی کاویگلیا و همکاران (۱۰) تأثیر چندکشتی دوگانه بر تسخیر و جذب آب در مقایسه با تشعشع بسیار بیشتر بود. در بررسی نامبردگان بخشی از بارندگی سالانه که توسط گیاهان دریافت گردید از ۰/۲۶ تا ۰/۵۱ در تک‌کشتی به ۰/۵۳ تا ۰/۷۱ در چندکشتی دوگانه افزایش یافت.

راندمان مصرف آب بر اساس عملکرد بیولوژیک گونه‌های گیاهی در ترکیب‌های کشت

بر اساس نتایج حاصل از بررسی راندمان مصرف آب بر اساس عملکرد بیولوژیک در میان تیمارهای مختلف، کلزا، لوبیا و ذرت در تک‌کشتی (به‌ترتیب با ۶/۸۲، ۱/۰۴ و ۴/۱۴ گرم بر مترمربع در میلی-متر)، بیشترین مقادیر را دارا بودند (جدول ۲)، به‌طوری‌که میزان آن در کلزا نسبت به چندکشتی تأخیری دومرحله‌ای و در ذرت نسبت به سایر ترکیب‌های کشت این گیاهان دارای تفاوت معنی‌دار ($p\leq$۰/۰۱) بود.

به‌این‌ترتیب، میزان برتری راندمان مصرف آب بر اساس عملکرد بیولوژیک کلزا در تک‌کشتی نسبت به چندکشتی‌های تأخیری دومرحله‌ای و سه‌مرحله‌ای به‌ترتیب ۴۸/۳ و ۱۴/۶ درصد بود. ذرت نیز در تک‌کشتی نسبت به چندکشتی‌های دوگانه و تأخیری دومرحله‌ای و سه‌مرحله‌ای به‌ترتیب ۵۷/۴، ۲۳۹/۳ و ۲۶۹/۶ درصد برتری نشان داد (جدول ۲).

علت این‌که کلزا در تمامی تیمارها راندمان مصرف آب بر اساس عملکرد بیولوژیک بیشتری را نسبت به لوبیا و ذرت داشته است، می‌توان به همزمانی دوره رشد آن با وقوع دماهای پایین‌تر نسبت به دو گیاه دیگر مربوط دانست. شواهدی دال بر تأثیر دما بر فتوسنتز و سایر فرایندهای فیزیولوژیک گیاه و در نتیجه عملکرد دانه (۲) بر راندمان مصرف آب وجود دارد (۲۲). البته دما از طریق تأثیر مستقیم بر میزان تبخیر و تعرق (۲) نیز بر میزان راندمان مصرف آب، مؤثر می‌باشد (۲۲).

جدول ۲- راندمان مصرف آب بر اساس عملکرد بیولوژیک گونه‌های گیاهی (گرم بر مترمربع در میلی‌متر) در ترکیب‌های کشت در آزمایش سیستم‌های تک‌کشتی و چندکشتی کلزا، لوبیا و ذرت در مشهد، سال زراعی ۸۷-۱۳۸۶

ترکیب کشت	نوع گیاه		
	کلزا	لوبیا	ذرت
تک‌کشتی	۶/۸۲a	۱/۰۴a	۴/۱۴a
چندکشتی دوگانه	-	۰/۵۴a	۲/۶۳b
چندکشتی تأخیری دومرحله‌ای	۴/۶۰b	۰/۲۲a	۱/۲۲c
چندکشتی تأخیری سه‌مرحله‌ای	۵/۹۵a	۰/۱۳a	۱/۱۲c

در هر ستون، میانگین‌های دارای حرف متفاوت، از نظر آماری تفاوت معنی‌دار ($p\leq$۰/۰۱) دارند

راندمان مصرف آب در مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری دارای فصل خنک در مقایسه با مناطق گرمسیری گرم‌تر، حتی در شرایطی که رژیم بارندگی یکسان است، ۳۰ تا ۶۰ درصد بیشتر می‌باشد. این مسئله بدین علت است که در مناطق گرمسیری دارای فصل خنک، میزان تبخیر و تعرق کمتر است و در نتیجه سرعت فتوسنتز خالص بیشتر می‌باشد (۲). هرچه اقلیم خشک‌تر باشد، نیاز اتمسفری تبخیر و تعرق بیشتر بوده و برای تولید یک واحد ماده خشک، گیاه آب بیشتری را از دست می‌دهد (۹). برخی مشاهدات نشان داده است که رابطه معکوسی بین راندمان مصرف آب و سرعت تبخیر وجود دارد. به‌عنوان مثال، راندمان مصرف آب یونجه در داکوتای شمالی با سرعت تبخیر متوسط روزانه ۳/۹۸ میلی‌متر، حدود دو برابر تگزاس با سرعت تبخیر متوسط روزانه ۷/۶۵ میلی‌متر گزارش شده است (۲). دمای کم خاک نیز می‌تواند جذب آب را محدود کرده و بنابراین تعرق را کاهش دهد (۴).

از جمله دلایل دیگر در رابطه با بالاتر بودن راندمان مصرف آب بر اساس عملکرد بیولوژیک کلزا نسبت به لوبیا و ذرت در این آزمایش، می‌توان به واقع شدن دوره رشد آن همزمان با کاهش شدت تشعشع و در نتیجه کاسته‌شدن از سرعت تعرق در آن (۲) اشاره نمود که افزایش راندمان مصرف آب کلزا را به‌دنبال دارد.

به‌نظر می‌رسد دلیل بیشتر بودن راندمان مصرف آب بر اساس عملکرد بیولوژیک در کلزا، لوبیا و ذرت در تک‌کشتی نسبت به چندکشتی، تراکم بیشتر در تک‌کشتی باشد (۲۲). از آنجا که در بررسی حاضر، تراکم گیاه بالاتری از کلزا در تیمار تک‌کشتی نسبت به چندکشتی (به‌دلیل عدم حضور گیاه دیگر طی دوره طولانی از حضور کلزا در زمین در تیمار چندکشتی) وجود داشت، لذا راندمان مصرف آب بر اساس عملکرد بیولوژیک در سیستم تک‌کشتی آن افزایش یافت. ریچی و باسو (۲۲) معتقدند بِه‌نژادی گیاهی منجر به ایجاد ارقامی می‌شود که قادرند تراکم‌های بالاتر را تحمل نموده و ضمن افزایش عملکرد، راندمان مصرف آب بیشتری نیز داشته باشند.

در رابطه با دلیل بیشتر بودن راندمان مصرف آب بر اساس عملکرد بیولوژیک لوبیا و ذرت در تک‌کشتی نسبت به چندکشتی‌های تأخیری، می‌توان به کاشت و سبز شدن بذور آنها در چندکشتی‌های تأخیری در سایه کلزا و در نتیجه تأخیر در جوانه‌زنی آنها به‌علت سایه-اندازی کلزا اشاره نمود. در برخی گزارش‌ها برای دیر سبز شدن گیاهچه‌های زنده، تبعاتی مانند ایجاد غیریکنواختی در اندازه گیاه و مراحل نمو و نیز ناتوانی گیاه در رقابت با گیاهانی که زودتر مستقر شده‌اند، ذکر شده است (۲۲).

در مورد ذرت، بیشتر بودن راندمان مصرف آب بر اساس عملکرد بیولوژیکِ آن را در همه تیمارها نسبت به لوبیا، می‌توان به مسیر فتوسنتزی متفاوت آن (چهارکربنه) مربوط دانست (۲۵). یکی از مهم‌ترین و باثبات‌ترین فرایندهای متابولیک مؤثر در تفاوت‌های راندمان مصرف آب، مسیر فتوسنتزی گیاهان است. گیاهان چهارکربنه به‌دلیل مکانیسم کارآمدتر تثبیت دی‌اکسیدکربن و توانایی استفاده از تشعشع بالا، قادر به حفظ توان فتوسنتزی در مقادیر پایین‌تری از هدایت روزنه‌ای می‌باشند. به‌همین دلیل راندمان مصرف آب در آنها تقریبا دو برابر گیاهان سه‌کربنه است (۸). مسیر فتوسنتزی چهارکربنه در شرایط تابش خورشیدی زیاد و دمای بالا، کارآمدتر از مسیر فتوسنتزی سه‌کربنه می‌باشد (۲). مقادیر راندمان مصرف آب گیاهان زراعی سه‌کربنه و چهارکربنه به‌ترتیب ۱ تا ۳ و ۲ تا ۵ گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم آب مصرفی است (۱۱). از نظر مقدار آب لازم برای تولید یک واحد ماده خشک بین گونه‌های گیاهی، اختلاف قابل توجهی وجود دارد (۲). گونه‌های گیاهی که کربوهیدرات بیشتری در اندام‌های ذخیره‌ای خود جمع می‌کنند، قادرند به ازای هر واحد آب مصرفی در تعرق، میزان ماده خشک بیشتری نسبت به گیاهانی تولید کنند که میزان پروتئین بیشتری در اندام‌های خود دارند. زیرا میزان آب و مواد فتوسنتزی مورد نیاز برای ساخت هر گرم پروتئین به‌طور قابل توجهی بیشتر از هر گرم کربوهیدرات است (۲).

دلیل احتمالی دیگر در رابطه با نتایج مربوط به ذرت و لوبیا در این آزمایش، دیرتر رسیدن لوبیا نسبت به ذرت می‌باشد زیرا متفاوت بودن طول دوره رشد در گونه‌های مختلف گیاهان زراعی، از عوامل مؤثر بر تفاوت راندمان مصرف آب در بین آنها است (۲۳). از آنجا که گونه‌های زراعی با سرعت‌های متفاوتی کانوپی خود را توسعه می‌دهند، مقادیر راندمان مصرف آب در بین آنها با توجه به شرایط و زمان‌های مختلف، متفاوت است (۲). برای مثال ارقام دیررس کلزا، آب بیشتری نسبت به ارقام زودرس مصرف کرده و راندمان مصرف آب پایین‌تری دارند، هرچند که ماده خشک بیشتری هم در آنها تجمع یافته باشد ولی میزان از دست رفتن آب نقش بیشتری پیدا می‌کند (۲۳). در میان گیاهان زراعی ذرت، سورگوم و چغندر علوفه‌ای، دارای بالاترین راندمان مصرف آب هستند (۲). همچنین مشاهده شده است زمانی که دو گیاه زراعی یونجه و ذرت تحت شرایط یکسان برای تولید علوفه کشت شدند، یونجه به چهار تا شش برابر آب بیشتر نسبت به ذرت برای تولید یک کیلوگرم ماده خشک نیازمند بود (۲). در رابطه با نتایج حاصله، می‌توان به عمق ریشه بیشتر ذرت نسبت به لوبیا نیز اشاره نمود. تفاوت‌های ژنتیکی در عمق ریشه موجب افزایش تبخیر و تعرق و نیز عملکرد در ارقام با ریشه عمیق‌تر شده و افزایش راندمان مصرف آب در این ارقام را موجب می‌شود (۲۲).

راندمان مصرف آب بر اساس عملکرد دانه گونه‌های گیاهی در ترکیب‌های کشت

در میان تیمارهای مختلف برای هر گونه گیاهی، راندمان مصرف

آب بر اساس عملکرد دانه در تک‌کشتی کلزا، لوبیا و ذرت (به‌ترتیب با ۱/۲۱، ۰/۲۸ و ۱/۵ گرم بر مترمربع در میلی‌متر) بیشترین مقادیر را به خود اختصاص داد و میزان آن در ذرت نسبت به سایر ترکیب‌های کشت این گیاه دارای تفاوت معنی‌دار ($p\leq$۰/۰۱) بود. به این ترتیب، میزان برتری راندمان مصرف آب بر اساس عملکرد دانه ذرت در تک-کشتی نسبت به چندکشتی‌های دوگانه، تأخیری دومرحله‌ای و سه‌مرحله‌ای به‌ترتیب ۲/۲، ۵/۲ و ۷/۵ برابر بود (جدول ۳).

راندمان مصرف آب بر اساس عملکرد بیولوژیک در ترکیب‌های کشت

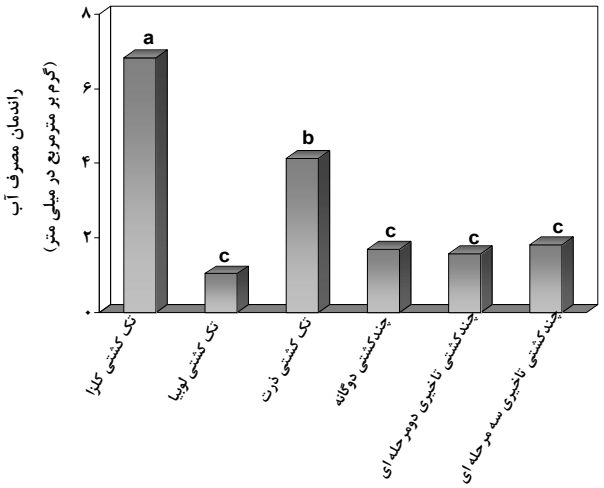
در بین تیمارهای تک‌کشتی، کلزا با ۶/۸۲ گرم بر مترمربع در میلی‌متر بیشترین راندمان مصرف آب بر اساس عملکرد بیولوژیک را نشان داد، به‌طوری‌که تفاوت معنی‌داری ($p\leq$۰/۰۱) با سایر تک-کشتی‌ها داشت. در بین تیمارهای چندکشتی نیز، چندکشتی تأخیری سه‌مرحله‌ای با ۱/۸۲ گرم بر مترمربع در میلی‌متر بیشترین راندمان مصرف آب بر اساس عملکرد بیولوژیک را دارا بود هرچند تفاوت معنی‌داری از این نظر بین چندکشتی‌ها مشاهده نشد (شکل۲).

در بررسی وفابخش (۷) که بر روی جنبه‌های اکوفیزیولوژیک کلزا در شرایط تنش خشکی انجام گرفت، میانگین راندمان مصرف آب در ارقام مورد بررسی در شرایط شاهد ۲/۷۸ گرم ماده خشک بر کیلوگرم آب و در شرایط تنش شدید (۵۰ درصد تأمین آب) به میزان ۶/۱۳ گرم بر کیلوگرم آب به‌دست آمد.

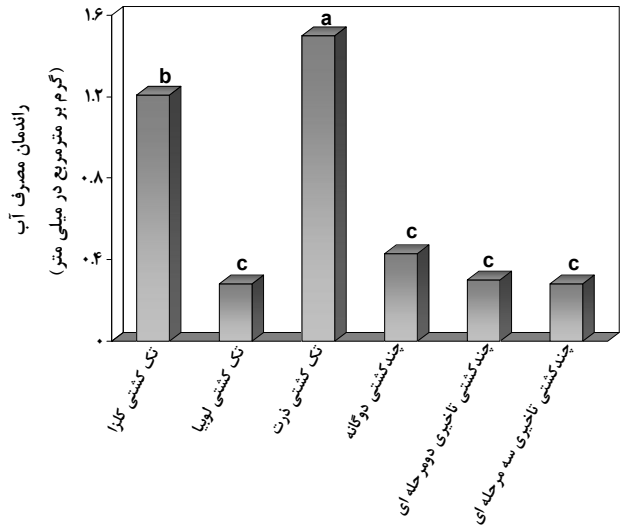
جدول ۳- راندمان مصرف آب بر اساس عملکرد دانه گونه‌های گیاهی (گرم بر مترمربع در میلی‌متر) در ترکیب‌های کشت در آزمایش سیستم‌های تک‌کشتی و چندکشتی کلزا، لوبیا و ذرت در مشهد، سال زراعی ۸۷-۱۳۸۶

ترکیب کشت	نوع گیاه		
	کلزا	لوبیا	ذرت
تک‌کشتی	۱/۲۱a	۰/۲۸a	۱/۵۰a
چندکشتی دوگانه	–	۰/۱۱a	۰/۶۹b
چندکشتی تأخیری دومرحله‌ای	۰/۸۹a	۰/۰۵a	۰/۲۹c
چندکشتی تأخیری سه‌مرحله‌ای	۰/۸۷a	۰/۰۲a	۰/۲۰c

در هر ستون، میانگین‌های دارای حرف متفاوت، از نظر آماری تفاوت معنی‌دار ($p\leq$۰/۰۱) دارند



شکل ۲- راندمان مصرف آب بر اساس عملکرد بیولوژیک در ترکیب‌های کشت در آزمایش سیستم‌های تک‌کشتی و چندکشتی کلزا، لوبیا و ذرت در مشهد، سال زراعی ۸۷-۱۳۸۶. ستون های دارای حداقل یک حرف مشترک تفاوت معنی داری در سطح احتمال یک درصد ندارند.



شکل ۳- راندمان مصرف آب بر اساس عملکرد دانه در ترکیب‌های کشت در آزمایش سیستم‌های تک‌کشتی و چندکشتی کلزا، لوبیا و ذرت در مشهد، سال زراعی ۸۷-۱۳۸۶. ستون های دارای حداقل یک حرف مشترک تفاوت معنی داری در سطح احتمال یک درصد ندارند.

راندمان مصرف آب بر اساس عملکرد دانه در ترکیب‌های کشت

در بین تیمارهای تک‌کشتی، ذرت بیشترین راندمان مصرف آب بر اساس عملکرد دانه (۱/۵ گرم بر مترمربع در میلی‌متر) را نشان داد و تفاوت معنی‌داری ($p\leq$۰/۰۱) با سایر تک‌کشتی‌ها داشت. در بین تیمارهای چندکشتی نیز چندکشتی دوگانه بیشترین راندمان مصرف آب بر اساس عملکرد دانه (۰/۴۳ گرم بر مترمربع در میلی‌متر) را دارا بود و از این نظر تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای چندکشتی مشاهده نشد (شکل ۳).

بهره‌وری آب بر اساس عملکرد بیولوژیک گونه‌های گیاهی در ترکیب‌های کشت

بر اساس نتایج، در میان تیمارهای مختلف ترکیب کشت برای هر گیاه، کلزا، لوبیا و ذرت در تک‌کشتی بیشترین مقادیر میزان بهره‌وری آب بر اساس عملکرد بیولوژیک را دارا بودند (جدول ۴)، به‌طوری‌که میزان آن در کلزا نسبت به چندکشتی تأخیری دومرحله‌ای و در ذرت نسبت به سایر ترکیب‌های کشت دارای تفاوت معنی‌دار ($p\leq$۰/۰۱) بود.

میزان برتری بهره‌وری آب بر اساس عملکرد بیولوژیک در کلزا در تک‌کشتی نسبت به چندکشتی تأخیری دومرحله‌ای و سه‌مرحله‌ای به‌ترتیب ۴۴/۶ و ۵/۴ درصد بود و در مورد ذرت، مقدار برتری این شاخص در تک‌کشتی نسبت به چندکشتی دوگانه، تأخیری دومرحله‌ای و سه‌مرحله‌ای به‌ترتیب به ۱/۶، ۳/۴ و ۴ برابر بالغ گردید (جدول ۴).

جدول ٤- بهره‌وری آب بر اساس عملکرد بیولوژیک گونه‌های گیاهی (گرم بر مترمربع در میلی‌متر) در ترکیب‌های کشت در آزمایش سیستم‌های تک‌کشتی و چندکشتی کلزا، لوبیا و ذرت در مشهد، سال زراعی ۸۷-۱۳۸۶

ترکیب کشت	نوع گیاه		
	کلزا	لوبیا	ذرت
تک‌کشتی	۱/۷۵ a	۰/۲۰a	۰/۹۶a
چندکشتی دوگانه	–	۰/۰۹a	۰/۵۹b
چندکشتی تأخیری دومرحله‌ای	۱/ ۲۱b	۰/۰۴a	۰/۲۸c
چندکشتی تأخیری سه‌مرحله‌ای	۱/۶۶a	۰/۰۲a	۰/۲۴c

در هر ستون، میانگین‌های دارای حرف متفاوت، از نظر آماری تفاوت معنی‌دار ($p\leq$۰/۰۱) دارند.

بهره‌وری آب بر اساس عملکرد دانه گونه‌های گیاهی در ترکیب‌های کشت

بیشترین مقادیر میزان بهره‌وری آب بر اساس عملکرد دانه در میان تیمارهای مختلف ترکیب کشت کلزا، لوبیا و ذرت برای هر گونه گیاهی، در تک‌کشتی مشاهده شد به طوری که میزان آن در تک‌کشتی ذرت نسبت به سایر ترکیب‌های کشت، دارای تفاوت معنی‌دار ($p\leq$۰/۰۱) بود (جدول ۵). مقدار برتری این شاخص در ذرت در تک‌کشتی نسبت به چندکشتی‌های دوگانه، تأخیری دومرحله‌ای و سه‌مرحله‌ای به‌ترتیب ۲/۳، ۶ و ۹ برابر بود.

بهره‌وری آب بر اساس عملکرد بیولوژیک در ترکیب‌های کشت

در بین تیمارهای تک‌کشتی، کلزا با ۱/۷۵ گرم بر مترمربع در میلی‌متر، بیشترین بهره‌وری آب بر اساس عملکرد بیولوژیک را دارا بوده و از این نظر تفاوت معنی‌داری ($p\leq$۰/۰۱) با سایر تک‌کشتی‌ها داشت در بین تیمارهای چندکشتی نیز، چندکشتی تأخیری سه-مرحله‌ای با ۰/۷۳ گرم بر مترمربع در میلی‌متر، بیشترین بهره‌وری آب بر اساس عملکرد بیولوژیک را دارا بود ولی از این نظر تفاوت معنی-داری بین چندکشتی‌ها مشاهده نشد (شکل ۴).

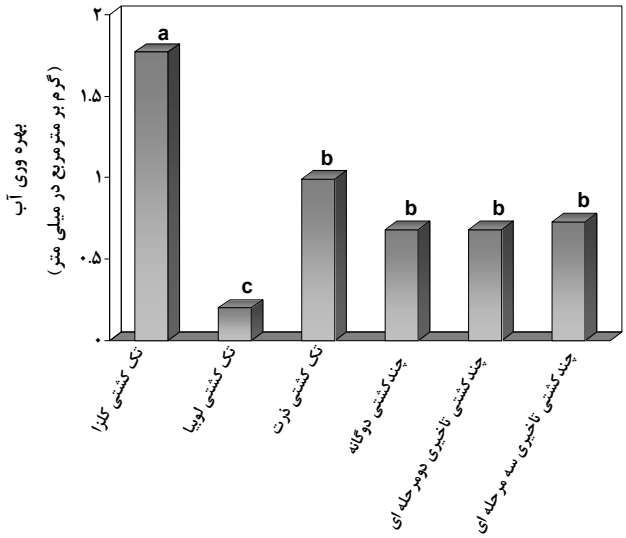
بهره‌وری آب بر اساس عملکرد دانه در ترکیب‌های کشت

در بین تیمارهای تک‌کشتی، ذرت بیشترین بهره‌وری آب بر اساس عملکرد دانه (۰/۳۵ گرم بر مترمربع در میلی‌متر) را نشان داد و از این نظر تفاوت معنی‌داری ($p\leq$۰/۰۱) با تک‌کشتی لوبیا داشت. در بین تیمارهای چندکشتی نیز، چندکشتی دوگانه بیشترین بهره‌وری آب بر اساس عملکرد دانه (۰/۱۷گرم بر مترمربع در میلی‌متر) را دارا بوده و از این نظر تفاوت معنی‌داری با سایر چندکشتی‌ها نداشت (شکل ۵).

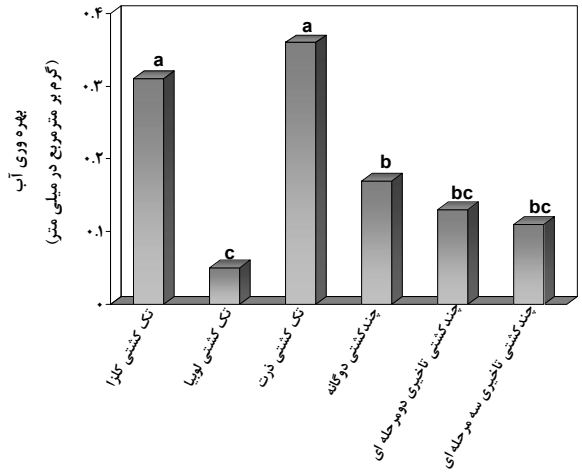
جدول ۵- بهروری آب بر اساس عملکرد دانه گونه‌های گیاهی (گرم بر متر مربع در میلی‌متر) در ترکیب‌های کشت در آزمایش سیستم‌های تک‌کشتی و چندکشتی کلزا، لوبیا و ذرت در مشهد، سال زراعی ۸۷-۱۳۸۶

ترکیب کشت	نوع گیاه		
	کلزا	لوبیا	ذرت
تک‌کشتی	۰/۳۱a	۰/۰۶a	۰/۳۶a
چندکشتی دوگانه	–	۰/۰۲a	۰/۱۶b
چندکشتی تأخیری دومرحله‌ای	۰/۲۳a	۰/۰۱a	۰/۰۶c
چندکشتی تأخیری سه‌مرحله‌ای	۰/۲۴a	۰a	۰/۰۴c

در هر ستون، میانگین‌های دارای حرف متفاوت، از نظر آماری تفاوت معنی‌دار دارند ($p\leq$۰/۰۱).



شکل ٤- بهره‌وری آب بر اساس عملکرد بیولوژیک در ترکیب‌های کشت در آزمایش سیستم‌های تک‌کشتی و چندکشتی کلزا، لوبیا و ذرت در مشهد، سال زراعی ۸۷-۱۳۸٦. ستون های دارای حداقل یک حرف مشترک تفاوت معنی داری در سطح احتمال یک درصد ندارند.



شکل ۵-بهره‌وری آب بر اساس عملکرد دانه در ترکیب‌های کشت در آزمایش سیستم‌های تک‌کشتی و چندکشتی کلزا، لوبیا و ذرت در مشهد، سال زراعی ۸۷-۱۳۸۶. ستون های دارای حداقل یک حرف مشترک تفاوت معنی داری در سطح احتمال یک درصد ندارند.

در این آزمایش در مجموع، تیمار چندکشتی تأخیری دومرحله‌ای از نظر راندمان جذب، تک‌کشتی کلزا از نظر راندمان مصرف و بهره-وری بر اساس عملکرد بیولوژیک و تک‌کشتی ذرت از نظر راندمان مصرف و بهره‌وری بر اساس عملکرد دانه برتر بودند. زیاد دوره رشد گیاهان همراه با کلزا و در نتیجه سایه‌اندازی کلزا روی گیاهچه‌های جوان لوبیا و ذرت، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، ترکیبات گیاهی و نیز تاریخ‌های کشت در تیمارهای چندکشتی‌ها به‌نحوی طراحی و انتخاب گردند تا تلاقی کمتری میان آنها پدید آمده و از تأثیرات منفی متقابل کاسته گردد.

نتیجه گیری

با توجه به نتایج این آزمایش و بروز وقایع نامطلوبی مانند تلاقی

منابع

۱- اهدایی، ب. ۱۳۷۳. بازدهی مصرف آب و اجزای آن در گندم بهاره. چکیده مقالات دومین کنگره علوم زراعت واصلاح نباتات ایران، تهران.

۲- سلطانی، ا.، و ا. فرجی. ۱۳۸۶. رابطه آب خاک و گیاه (چاپ اول). جهاد دانشگاهی مشهد، مشهد.

۳- علیزاده، ا. و غ. کمالی. ۱۳۸۶. نیاز آبی گیاهان در ایران. انتشارات آستان قدس رضوی.

۴- کوچکی، ع. و ا. سلطانی. ۱۳۷۷. اصول و عملیات کشاورزی در مناطق خشک (ترجمه). انتشارات نشر آموزش کشاورزی، مشهد.

۵- مظاهری، د. ۱۳۷۳. زراعت مخلوط. چاپ اول. انتشارات دانشگاه تهران، تهران.

۶- نصیری محلاتی، م.، ع. کوچکی، پ. رضوانی مقدم و ع. بهشتی. ۱۳۸۳. اگرواکولوژی. چاپ دوم. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.

۷- وفابخش، ج. ۱۳۸۶. مطالعه جنبه‌های اکوفیزیولوژیک گیاه زراعی کلزا (*Brassica napus* L.) در شرایط تنش خشکی. پایان‌نامه دوره دکتری، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد.

8- Araus, J. L., G. A. Salfer, M. P. Reynold, and C. Royo. 2002. Plant breeding and drought in C3 cereals: What should we breed for? Annuals of Botany 89: 925-940.

9- Boyer, J. S. 1982. Plant productivity and environment. Science 218: 443-448.

10- Caviglia, O. P., V.O. Sadras, and F. H. Andrade. 2004. Intensification of agriculture in the south-eastern Pampas I. Capture and efficiency in the use of water and radiation in double-cropped wheat–soybean. Field Crop Research. 87: 117-129.

11- Condon, A. G., R. A. Richards, G. J. Rebetzek, and G. D. Farquhar. 2004. Breeding for high water use efficiency. Journal of Experimental Botany 55: 2447-2460.

12- Ehdaie, B. 1995. Variation in water use efficiency and its components in wheat II, Pot and field experiments. Crop Science 35: 1617-1629.

13- Fukai, S. 1993. Intercropping-bases of productivity. Field Crop Research. 34: 239–245.

14- Howell, T. A. 2001. Enhancing water use efficiency in irrigated Agriculture. Agronomy Journal. 93: 281-289.

15- Hulugalle, N. R., and R. Lal. 1986. Soil water balance of intercropped maize and cowpea grown in tropical

hydromorphic soil Western Nigeria. Agronomy Journal 74:86-90.
16- Lal, R. 2000. Soil management in the developing countries. Soil Science 105: 57-72.
17- Molden, D., T. Oweis, P. Steduto, J. W. Kijne, M. A. Hanjra, and P. S. Bindraban. 2007. Pathways for increasing agricultural water productivity. In: Chapter 7 in Water for Food, Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture, International Water Management Institute, London, Earthscan, Colombo.
18- Nangia, V., C. De Fraiture, and H. Turral. 2008. Water quality implications of raising crop water productivity. Agricultural Water Management 95 (7): 825-835.
19- Passioura, J. B. 2006. Increasing crop productivity when water is scarce-from breeding to field management. Agricultural Water Management 80: 176-196.
20- Payne, W. A. 1997. Managing yield and water use of pearl millet in the Sahel. Agronomy Journal 89: 481-490.
21- Richards, R. A., G. J. Rebetzke, A. G. Condon, and A. F. Van Herwaarden. 2002. Breeding opportunities for increasing the efficiency of water use and crop yield in temperate cereals. Crop Science 42: 111-121.
22- Ritchie, J. T., and B. Basso. 2007. Water use efficiency is not constant when crop water supply is adequate or fixed: the role of agronomic management. European Journal of Agronomy 28 (3):273-281.
23- Schott, J. J., A. Bar-Hen, H. Monod, and F. Blout. 1994. Competition between winter rape cultivars under experimental conditions. Cahiers d'Etudes Rech. France. Agric. 3: 377-383.
24- Sekiya, N., and K. Yano. 2004. Do pigeonpea and sesbania supply ground water to intercropped maize through hydraulic lift? Hydrogen stable isotope investigation of xylem waters. Field Crop Research 86: 167-173.
25- Stanhill, G. 1986. Water use efficiency. Adv. in Agron. 39: 53-85.
26- Tsubo, M., S. Walker, and E. Mukhala. 2001. Comparisons of radiation use efficiency of mono/intercropping system with different row orientation. Field Crop Research 71: 17-29.
27- Tsubo, M., S. Walker, and H. O. Ogindo. 2005. A simulation model of cereal- legume intercropping systems for semi-arid regions I. model development. Field Crop Research 93: 10-22.
28- Vandermeer, J., M. Van Noordwijk, J. Anderson, C. Ong, and I. Perfecto. 1998. Global change and multi-species agroecosystems: concepts and issues. Agriculture, Ecosystems and Environment 67: 1–22.
29- Walker, S., and H. O. Ogindo. 2003. The water budget of rainfed maize and bean intercrop. Physics and Chemistry of the Earth 28: 919-926.
30- Zougmor, R., F. N. Kambou, K. Ouattara, and S. Guillobez. 2000. Sorghum-Cowpea intercropping; an effective technique against run off and soil erosion in the Sahel (saria, Burkina Faso). Arid Land Research and Management 14: 329-342.