

تأثیر تنش خشکی ناشی از آبیاری جزئی ریشه بر کارایی مصرف آب و عملکرد دانه ذرت (Zea mays L.) و ماش (Vigna radiata L.) در الگوهای مختلف کشت مخلوط

حمداالله اسکندری^۱، اشرف عالی‌زاده امرایی^۲، کامیار کاظمی^۳

۱. دانشیار گروه علمی کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۲. مربی گروه علمی کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۳. استادیار گروه علمی کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۸/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۰/۰۲

چکیده

به منظور بررسی اثر الگوی کاشت و روش آبیاری بر عملکرد دانه و کارایی مصرف آب ذرت و ماش، آزمایشی به صورت فاکتوریل دو عاملی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ در استان لرستان اجرا شد. عامل اول شامل دو روش آبیاری (آبیاری کامل (I1) و آبیاری جزئی (I2)) ریشه و عامل دوم الگوی کشت (کشت خالص ذرت و ماش و کشت مخلوط ذرت و ماش روی ردیف‌های جداگانه و روی یک ردیف) بود. تجزیه واریانس داده‌ها با نرم‌افزار MSTATC انجام گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که عملکرد دانه ذرت و ماش با اعمال آبیاری جزئی ریشه کاهش یافت. به طوری که عملکرد دانه ذرت در شرایط آبیاری جزئی ریشه در کشت خالص ۴۵٪، در کشت مخلوط روی ردیف‌های جداگانه ۲۹٪ و در کشت مخلوط روی یک ردیف ۲۶٪ نسبت به آبیاری کامل کمتر بود. عملکرد دانه ماش نیز با اعمال آبیاری جزئی ریشه در تیمارهای کشت خالص، کشت مخلوط روی ردیف‌های جداگانه و کشت مخلوط روی یک ردیف به ترتیب ۲۹، ۲۲ و ۲۱ درصد نسبت به آبیاری کامل کاهش یافت. بیشترین کارایی مصرف آب (۲/۷۷ کیلوگرم در مترمکعب) در کشت مخلوط ذرت و ماش روی یک ردیف در شرایط آبیاری جزئی ریشه به دست آمد. در شرایط آبیاری معمولی بیشترین کارایی مصرف آب به کشت مخلوط ذرت و ماش روی یک ردیف اختصاص داشت که از کشت خالص ذرت، کشت مخلوط روی ردیف‌های جداگانه و کشت خالص ماش به ترتیب ۲۳، ۵۰ و ۷۶ درصد بیشتر بود؛ بنابراین، کشت مخلوط ذرت و ماش روی یک ردیف در شرایط آبیاری جزئی ریشه می‌تواند ضمن تولید مطلوب دانه، باعث افزایش کارایی مصرف آب شود. نسبت برابری زمین در کشت مخلوط ذرت و ماش روی یک ردیف و در شرایط آبیاری جزئی ریشه (۲/۲۵) مزیت این الگوی کشت را تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آبیاری محدود، کارایی مصرف آب، نسبت برابری زمین

مقدمه

تنوع زیستی در مکان و زمان است (Raseduzzaman and Jensen, 2017). کشت مخلوط مهم‌ترین و مستقیم‌ترین راه برای افزایش تنوع زیستی در سیستم‌های زراعی است (Eskandari and Ghanbari, 2010).

کشت مخلوط که به صورت کشت هم‌زمان دو یا چند گونه گیاهی در یک مکان و در یک فصل رشد تعریف می‌شود (Jensen, 2015)، یک عملیات زراعی است که بر اساس اصول اکولوژیک، مزیت‌های مهمی مانند بهبود کارایی مصرف

یکی از دلایل اصلی عدم امنیت غذایی در کشورهای در حال توسعه عدم پایداری تولید در سامانه‌های تک‌کشتی است، چراکه این سامانه‌های تولیدی، انعطاف‌پذیری پایینی در برابر اختلالات زیست‌محیطی و تنش‌های زیستی از خود نشان می‌دهند (Beddington et al., 2012). این در حالی است که پایداری تولید در تأمین امنیت غذایی، به‌ویژه برای کشاورزان خرده‌پا، از اهمیت زیادی برخوردار است. یکی از راه‌های افزایش پایداری تولید در سیستم‌های زراعی، افزایش

باعث کاهش ۱۸ الی ۲۴ درصد در مصرف آب در مقایسه با کشت خالص شد (Wang et al., 2015).

از آنجاکه اطلاعات کافی در مورد اثرات کاهش فراهمی آب در سیستم کشت مخلوط ذرت و ماش وجود ندارد، این پژوهش با هدف بررسی اثر آبیاری محدود ناشی از آبیاری جزئی ریشه بر رشد و عملکرد دانه ذرت و ماش در کشت خالص و مخلوط انجام گرفت تا امکان کاهش مصرف آب در این سیستم تولیدی مورد ارزیابی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به صورت مزرعه‌ای و در طول سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ در شهرستان سلسله در استان لرستان اجرا شد. عرض جغرافیایی منطقه ۴۸ درجه و ۱۵ دقیقه، طول جغرافیایی ۳۳ درجه و ۵۵ دقیقه و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۶۲۰ متر است. خاک محل اجرای آزمایش غیر آلوده به فلزات سنگین (غلظت فلزات سنگین نیکل، روی و کادمیوم در خاک به ترتیب ۰/۱۴، ۰/۶۵ و ۰/۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم بود) بود که خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول یک درج شده است.

محصول قبلی مزرعه، گندم بود که بعد از برداشت آن، مزرعه آبیاری و سپس در مرحله گاورو و با استفاده از گاواهن بشقابی شخم زده شد. قبل از کاشت برای جمع‌آوری بقایای گندم از دندانه استفاده شد. در ادامه جوی و پشته‌ها با استفاده از فارور ایجاد و کرت‌ها به صورت دستی آماده شدند. کشت ذرت (رقم سینگل کراس ۳۰۰ که یک رقم با طول دوره رشد کوتاه و متحمل به گرما است) و ماش (رقم پرتو که یک رقم با فرم رویشی خوابیده، زودرس و مقاوم به آفات است) به صورت هم‌زمان در ۱۸ خرداد در کرت‌هایی شامل ۶ ردیف کاشت با فاصله ۷۵ سانتی‌متر و طول ۴ متر، انجام شد. کاشت با تراکم بالا انجام گرفت تا از سبز شدن بذرها اطمینان حاصل شود.

آزمایش به صورت فاکتوریل دو عاملی بر پایه طرح بلوک-های تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. عامل اول روش آبیاری بود که بعد از استقرار گیاهچه‌ها اعمال گردید. در تیمار آبیاری، آب مورد نیاز گیاهان به دو شیوه تأمین شد که شامل دو روش آبیاری کامل سیستم ریشه‌ای (I1) و آبیاری جزئی سیستم ریشه‌ای (I2) بود. در تیمار آبیاری کامل، جوی و پشته‌ها به صورت کامل آبیاری شدند، به طوری که هر دو طرف سیستم ریشه‌ای گیاهان در معرض خاک مرطوب قرار گرفت. در روش آبیاری جزئی سیستم ریشه‌ای، جوی و پشته‌های

آب (Zhao et al., 2009)، افزایش کارایی بهره‌برداری از زمین (Dhima et al., 2007) و افزایش عملکرد (Hauggard-Nielsen et al., 2008) در مقایسه با سامانه‌های تک‌کشتی دارد. یکی از معمول‌ترین سامانه‌های کشت مخلوط، کشت مخلوط غلات-لگوم است که در آن وجود لگوم در سیستم کشت مخلوط به دلیل اثرات مکملی در مصرف منابع محیطی، باعث بهبود رشد غیرلگوم می‌شود (Eskandari and Javanmard, 2013). از جمله سامانه‌های کشت مخلوط غلات-لگوم، کشت مخلوط ذرت و ماش است. ذرت در دنیا از نظر تولید بعد از گندم و برنج، سومین محصول غله‌ای محسوب می‌شود که به علت سازگاری بالا، در محدوده‌ی وسیعی از شرایط محیطی قابل کشت است (Eskandari and Ghanbari, 2011). ماش نیز به دلیل دوره رشد کوتاه، از معمول‌ترین گیاهانی است که در کشت دوم مورد استفاده قرار می‌گیرد. به علاوه، به دلیل داشتن قابلیت تثبیت بیولوژیکی ازت نقش مهمی در بهبود حاصلخیزی خاک ایفا می‌کند و دانه‌ی آن نیز منبع مهم تأمین‌کننده پروتئین گیاهی برای انسان است (Fathi, 2010).

به دلیل کاهش منابع آب در دسترس برای فعالیت‌های زراعی، تلاش‌های زیادی برای حفاظت از آب در سیستم‌های زراعی انجام گرفته است که بر اساس روش‌های آبیاری استوار است. در این زمینه، الگوهای مناسبی مانند آبیاری محدود (Kang et al., 2002) و افزایش سرعت آبیاری (Horst et al., 2007) نیز معرفی شده است. با این حال، در سال‌های اخیر مفاهیم خشکی جزئی منطقه ریشه در برنامه‌های آبیاری مورد توجه قرار گرفته است (Kang and Zhang, 2004). در این روش، نیمی از سیستم ریشه‌ای آبیاری می‌شود و نیمی دیگر در معرض خاک خشک قرار دارد. خشکی جزئی سیستم ریشه‌ای در گیاهان مختلف از جمله گوجه‌فرنگی (Gu et al., 2000) و پنبه (Tang et al., 2007) و ذرت (Hu et al., 2010) مورد بررسی قرار گرفته است که در بیشتر موارد، این سیستم به افزایش کارایی مصرف آب منجر شده است. در کشت مخلوط گندم و ذرت گزارش شده است که می‌توان با اعمال آبیاری به روش خشکی جزئی سیستم ریشه‌ای، کارایی مصرف آب را در مقایسه با سیستم‌های کشت مخلوطی که به روش معمول آبیاری شدند بهبود بخشید (Yang et al., 2011). در کشت مخلوط نواری ذرت و گندم، آبیاری محدود

خالص ذرت (*Zea mays L.*), کشت خالص ماش (*Vigna radiata L.*), کشت مخلوط ذرت و ماش روی یک ردیف و کشت مخلوط ذرت و ماش روی ردیف‌های جداگانه بود.

به صورت یک‌درمیان ثابت (بدون تغییر در جوی و پشته‌هایی که آبیاری شدند) آبیاری شدند و در نتیجه نیمی از سیستم ریشه در معرض خاک خشک و نیمی دیگر در معرض خاک مرطوب قرار گرفت. عامل دوم، الگوهای کشت شامل کشت

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

Table 1. Physical and chemical properties of the soil of the experimental site

عمق Depth (cm)	بافت texture	درصد ذرات Soil particles (%)			وزن مخصوص ظاهری Soil bulk density (g cm ⁻³)	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)	مواد آلی Organic matter (%)	N (g kg ⁻¹)	P ₂ O ₅ (ppm)	K (ppm)
		رس Clay	سیلت Silt	شن Sand							
0-30	لوم رسی Loamy clay	35	38	27	1.43	7.97	1.4	0.45	0.85	18	285

در کشت‌های خالص ذرت و ماش بر اساس تراکم مطلوب خود (به ترتیب با تراکم ۸ و ۴۰ بوته در مترمربع) کشت شدند. در کشت مخلوط روی ردیف‌های جداگانه، ردیف‌ها به صورت یک‌درمیان به ذرت و ماش اختصاص یافت، به طوری که هر کرت شامل ۳ ردیف ذرت و ۳ ردیف ماش بود. کشت هر گیاه در ردیف‌های مربوط به خود بر اساس تراکم مطلوب هر گیاه انجام گرفت. در کشت مخلوط روی یک ردیف که به صورت افزایشی اجرا شد، ردیف‌های کشت بر اساس تراکم مطلوب ذرت (۸ بوته در مترمربع) کشت شدند و سپس بذور ماش (بر اساس تراکم مطلوب و ۴۰ بوته در مترمربع) در بین دانه‌های ذرت کشت گردید.

در کشت‌های خالص ذرت و ماش بر اساس تراکم مطلوب خود (به ترتیب با تراکم ۸ و ۴۰ بوته در مترمربع) کشت شدند. در کشت مخلوط روی ردیف‌های جداگانه، ردیف‌ها به صورت یک‌درمیان به ذرت و ماش اختصاص یافت، به طوری که هر کرت شامل ۳ ردیف ذرت و ۳ ردیف ماش بود. کشت هر گیاه در ردیف‌های مربوط به خود بر اساس تراکم مطلوب هر گیاه انجام گرفت. در کشت مخلوط روی یک ردیف که به صورت افزایشی اجرا شد، ردیف‌های کشت بر اساس تراکم مطلوب ذرت (۸ بوته در مترمربع) کشت شدند و سپس بذور ماش (بر اساس تراکم مطلوب و ۴۰ بوته در مترمربع) در بین دانه‌های ذرت کشت گردید.

در مرحله برداشت (ماش و ذرت به ترتیب در نیمه دوم شهریور و نیمه دوم مهر برداشت شدند)، پس از حذف اثرات حاشیه‌ای، بقیه کرت‌ها برداشت و عملکرد و اجزای عملکرد دانه دو گیاه ثبت گردید. با تقسیم عملکرد دانه بر حجم آب مصرفی، کارایی مصرف آب اندازه‌گیری شد:

$$WUE^1 = [GY / WU] \quad [1]$$

که در آن WUE کارایی مصرف آب برحسب کیلوگرم بر مترمکعب، GY عملکرد دانه برحسب کیلوگرم در هکتار و WU مصرف آب برحسب مترمکعب در هکتار است.

برای ارزیابی سودمندی کشت مخلوط، از شاخص نسبت برابری زمین (LER) استفاده گردید (Eskandari and Ghanbari, 2010).

$$LER^2 = [(YW / YWW) + (YC / YCC)] \quad [2]$$

در این رابطه LER، نسبت برابری زمین، YW عملکرد ذرت در کشت مخلوط، YWW عملکرد ذرت در کشت خالص، YC عملکرد ماش در کشت مخلوط و YCC عملکرد ماش در کشت خالص می‌باشند.

اولین آبیاری بلافاصله بعد از کاشت و به صورت یکسان برای همه کرت‌ها صورت پذیرفت. بعد از استقرار گیاهچه‌ها در مزرعه، بوته‌ها تا تراکم‌های موردنظر (ذرت و ماش به ترتیب بر اساس ۸ و ۴۰ بوته در مترمربع) تنک و سپس کرت‌ها آبیاری شدند. آبیاری‌های بعدی بر اساس تیمارهای آزمایش انجام شدند. آبیاری به‌طور معمول و زمانی انجام گرفت که هر دو گیاه نیاز به آب داشتند. چراکه برداشت آب توسط غلات و لگوم در کشت مخلوط، تقریباً مشابه است (Eskandari and Alizadeh-Amraie, 2016). روش آبیاری به صورت جوی و پشته (نشت آب از داخل جوی به سمت محل قرارگیری بذر روی پشته) بود. ذرت و ماش در طول دوره رشد به ترتیب در ۱۵ و ۱۰ مرحله آبیاری شدند. میزان آب ورودی

¹ Water Use Efficiency

² Land Equivalent Ratio

تغییرات شاخص سطح برگ در ذرت در هر دو روش آبیاری (آبیاری معمولی و آبیاری جزئی ریشه) از یک منحنی سیگموئیدی تبعیت کرد که با افزایش رشد ذرت، بیشتر شد (شکل ۲). در کلیه مراحل رشد، شاخص سطح برگ ذرت در شرایط آبیاری جزئی ریشه کمتر از تیمار آبیاری کامل بود که این اختلاف با گذشت زمان، نمود بیشتری پیدا کرد (شکل ۲). در یک پژوهش اثر تنش خشکی بر شاخص سطح برگ شش هیبرید ذرت بررسی و نتیجه گرفته شد که شاخص سطح برگ در شرایط آبیاری کامل حدود ۴/۵ و در شرایط تنش خشکی حدود ۳/۵ به دست آمد (Fallahi et al., 2013) که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد. در یک مطالعه دیگر گزارش شد که شاخص سطح برگ ذرت در شرایط بدون تنش ۴/۵۱ بود که بعد از اعمال تنش خشکی به ۳/۸۹ کاهش یافت (Nouriazhar and Ehsanzadeh, 2007). این نتایج با نتایج پژوهش حاضر هماهنگی دارد.

تأثیر تیمار آبیاری بر سایر اجزای عملکرد دانه ذرت شامل، تعداد ردیف دانه در بلال، تعداد دانه در هر ردیف و وزن هزار دانه معنی‌دار بود (جدول ۱ و شکل ۳). با این حال، اثر کاهش فراهمی آب بر وزن هزار دانه بیشتر از سایر اجزای عملکرد دانه بود به طوری که در شرایط آبیاری جزئی ریشه نسبت به شرایط آبیاری کامل وزن هزار دانه، تعداد دانه در ردیف و تعداد ردیف دانه در هر بلال به ترتیب ۱۳، ۹/۵ و ۵ درصد کاهش پیدا کردند (شکل ۳).

تجزیه واریانس داده‌ها بر اساس آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با استفاده از نرم‌افزار MSTATC انجام گرفت. جهت مقایسه میانگین‌ها، آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح معنی‌داری صفت بکار رفت.

نتایج و بحث

عملکرد دانه ذرت

نتایج ارائه شده در جدول ۲ نشان می‌دهد که عملکرد و اجزای عملکرد دانه ذرت به طور معنی‌داری (عملکرد دانه و وزن هزار دانه در سطح احتمال یک درصد و تعداد دانه در ردیف و تعداد ردیف دانه در سطح احتمال پنج درصد) تحت تأثیر روش آبیاری قرار گرفت (جدول ۲). الگوی کاشت بر صفات تعداد دانه در ردیف، تعداد ردیف دانه در بلال و ارتفاع بوته اثر معنی‌داری نداشت ولی بر عملکرد دانه به طور معنی‌داری ($P \leq 0.05$) مؤثر بود (جدول ۲). اثر متقابل الگوی کاشت × روش آبیاری تنها در مورد عملکرد دانه ($P \leq 0.05$) معنی‌دار بود.

ذرت بیشترین عملکرد دانه را در کشت خالص و تحت شرایط آبیاری معمولی به میزان ۸۱۵۰ کیلوگرم در هکتار و کشت مخلوط ذرت و ماش روی یک ردیف در شرایط آبیاری معمولی (۷۴۹۹ کیلوگرم در هکتار) داشت. در حالی که کمترین عملکرد دانه ذرت (۲۹۵۰ کیلوگرم در هکتار) در تیمار کشت مخلوط روی ردیف‌های جداگانه و در شرایط آبیاری جزئی ریشه ثبت شد (شکل ۱).

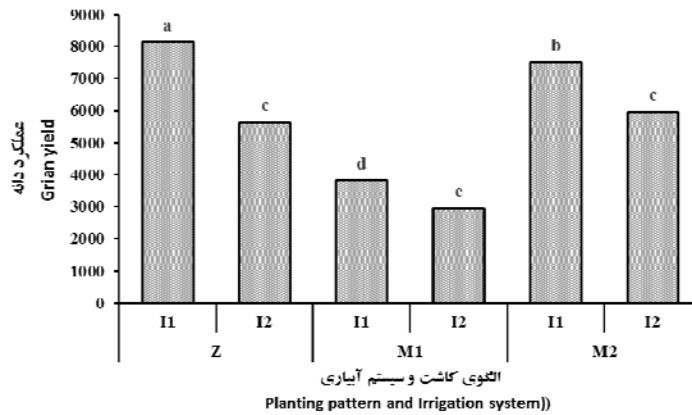
جدول ۲. میانگین مربعات واریانس عملکرد و اجزای عملکرد دانه ذرت در الگوهای مختلف کاشت در شرایط مختلف آبیاری ریشه

Table 2. Mean Square of variance for grain yield and yield components of maize in different planting patterns under different root irrigation conditions

منبع تغییر	درجه آزادی	عملکرد دانه	وزن هزار دانه	ارتفاع بوته	تعداد ردیف دانه	تعداد دانه در ردیف
Source of variation	df	Grain yield	1000-grain weight	Plant height	Number of grain row	Number of grain per row
تکرار	2	401963*	6.07 ^{ns}	1.52 ^{ns}	6.02*	7.97 ^{ns}
Replication						
الگوی کاشت (C)	2	43000*	51.05 ^{ns}	7.14 ^{ns}	0.078 ^{ns}	0.747 ^{ns}
Planting pattern (C)						
آبیاری (I)	1	16849012**	8051.8**	138.3 ^{ns}	2.07*	78.5*
Irrigation (I)						
C×I	2	406114*	26.46 ^{ns}	21.42 ^{ns}	0.096 ^{ns}	5.31 ^{ns}
Error	خطا	61940	27.18	27.18	0.832	9.13
ضریب تغییرات (%)		3.66	1.66	1.66	6.08	7.50
CV (%)						

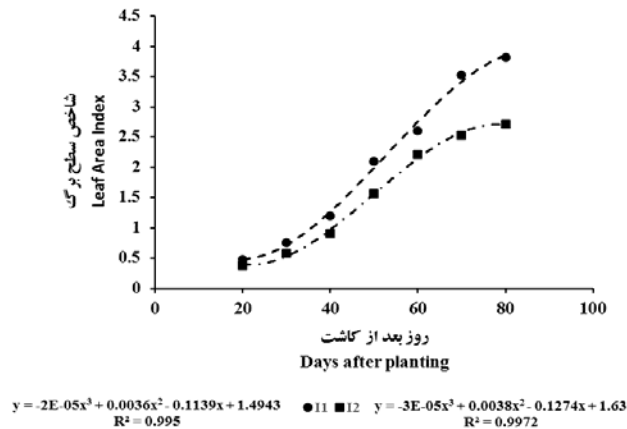
* و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد؛ ns: غیر معنی‌دار

* and ** indicate significant at $P \leq 0.05$, respectively. ns: not significant



شکل ۱. تأثیر روش آبیاری بر عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) ذرت در الگوهای مختلف کاشت. Z: کشت خالص ذرت؛ M1: کشت مخلوط روی ردیف‌های جداگانه؛ M2: کشت مخلوط روی یک ردیف؛ I1: آبیاری معمول؛ I2: آبیاری جزئی ریشه. حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون دانکن است.

Fig. 1. Effect of irrigation system on grain yield (kg ha^{-1}) of maize in different planting patterns. Z: Sole maize; M1: between-row intercropping; M2: within-row intercropping; I1: conventional irrigation; I2: Partial root zone irrigation. Different letters indicate significant difference at $P \leq 0.05$ according to Duncan's multiple range test.



شکل ۲. تأثیر روش آبیاری بر روند تغییرات شاخص سطح برگ ذرت در طول دوره رشد. I1: آبیاری معمولی؛ I2: آبیاری جزئی ریشه

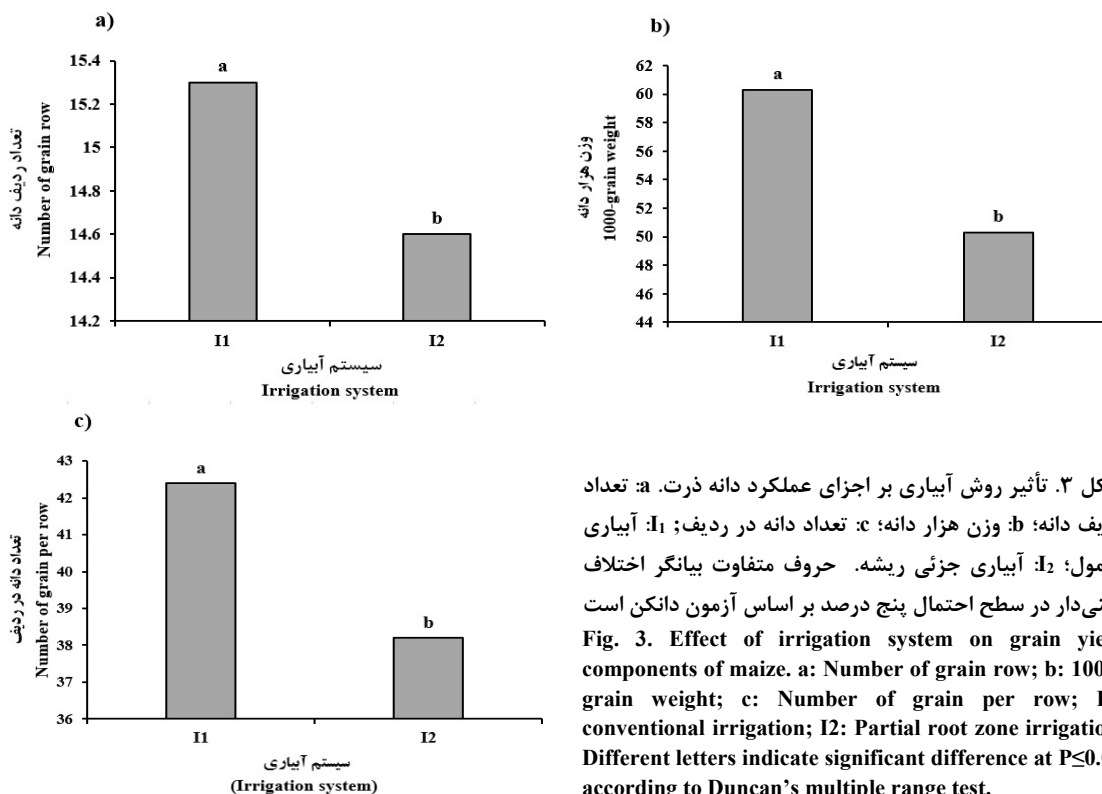
Fig. 2. Effect of irrigation system on leaf area index of maize over the growing period. I1: conventional irrigation; I2: Partial root zone irrigation

عملکرد دانه ذرت مورد بررسی قرار گرفته است که در بیشتر این تحقیقات کاهش عملکرد دانه ذرت در شرایط آبیاری محدود به دلیل کاهش کلیه اجزای عملکرد دانه (شامل وزن دانه و تعداد دانه) بود که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد (Paknezhad et al., 2010; Mojadam and Modhej, 2016; Miri et al., 2012). از طرف دیگر، کاهش شاخص سطح برگ در شرایط آبیاری جزئی ریشه (شکل ۲) به معنی

کمتر بودن عملکرد دانه ذرت در کشت مخلوط روی ردیف‌های جداگانه در مقایسه با سایر الگوهای کاشت (شکل ۱) را می‌توان به کم بودن تعداد بوته در واحد سطح در این الگوی کاشت نسبت داد. در واقع در کشت مخلوط روی ردیف‌های جداگانه، تعداد بوته‌های ذرت در واحد سطح نصف تعداد بوته‌ها در سایر الگوهای کشت مخلوط بود که به تولید کمتر انجامید. در مطالعات مختلف، اثر کاهش فراهمی آب بر

تولید ذرت از طریق کاهش شاخص سطح برگ می‌شود (Nouriazhar and Ehsanzadeh, 2007) که با یافته‌های پژوهش حاضر مطابقت دارد.

کوچک‌تر شدن و یا کاهش تعداد برگ‌ها بوده (Fallahi et al., 2013) که به کاهش دریافت تشعشعات خورشیدی و در نهایت کاهش تولید مواد فتوسنتزی و پتانسیل تولید گیاه می‌انجامد. بین شاخص سطح برگ و عملکرد دانه ذرت همبستگی مثبت وجود دارد و تنش خشکی باعث کاهش



شکل ۳. تأثیر روش آبیاری بر اجزای عملکرد دانه ذرت. a: تعداد ردیف دانه؛ b: وزن هزار دانه؛ c: تعداد دانه در ردیف؛ I1: آبیاری معمول؛ I2: آبیاری جزئی ریشه. حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون دانکن است
 Fig. 3. Effect of irrigation system on grain yield components of maize. a: Number of grain row; b: 1000-grain weight; c: Number of grain per row; I1: conventional irrigation; I2: Partial root zone irrigation. Different letters indicate significant difference at $P \leq 0.05$ according to Duncan's multiple range test.

کیلوگرم در هکتار به دست آمد که با عملکرد دانه در تیمار کشت مخلوط روی یک ردیف تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۴). کمترین (۶۱۷ کیلوگرم در هکتار) عملکرد دانه ثبت شده ماش به تیمار کشت مخلوط روی ردیف‌های جداگانه و تحت شرایط آبیاری جزئی ریشه و به میزان ۶۱۷ کیلوگرم در هکتار ثبت گردید. به‌طور کلی، آبیاری جزئی ریشه در تمامی تیمارها، باعث کاهش معنی‌دار عملکرد دانه ماش شد که مقدار این کاهش در تیمارهای کشت خالص، کشت مخلوط روی ردیف‌های جداگانه و کشت مخلوط روی یک ردیف به ترتیب ۲۹، ۲۲ و ۲۱ درصد بود (جدول ۴).

عملکرد دانه ماش

تأثیر الگوی کاشت، روش آبیاری در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل الگوی کاشت و روش آبیاری در سطح احتمال پنج درصد بر عملکرد دانه ماش معنی‌داری بود (جدول ۳). وزن هزار دانه ماش تحت تأثیر روش آبیاری قرار گرفت ولی الگوی کاشت و اثر متقابل الگوی کاشت و روش آبیاری بر آن تأثیر معنی‌داری نداشت. اثر تیمارهای آزمایشی بر تعداد دانه در غلاف و تعداد غلاف در بوته معنی‌دار نبود (جدول ۳). بیشترین عملکرد دانه ماش در کشت خالص ماش تحت شرایط آبیاری کامل سیستم ریشه‌ای و به میزان ۱۶۸۹

جدول ۳. میانگین مربعات عملکرد و اجزای عملکرد دانه ماش در الگوهای مختلف کاشت در شرایط مختلف آبیاری ریشه

Table 3. Means square for grain yield and yield components of mung bean in different planting patterns under different root irrigation conditions.

منبع تغییر	درجه آزادی	عملکرد دانه	وزن هزار دانه	تعداد غلاف در بوته	تعداد دانه در غلاف
Source of variation	df	Grain yield	1000-grain weight	Number of pods per plant	Number of grain per pod
تکرار	2	690.7 ^{ns}	55.9 ^{ns}	63.8 ^{ns}	0.517 ^{ns}
Replication					
الگوی کاشت (C)	2	1062010.1**	4.435 ^{ns}	1.7 ^{ns}	0.016 ^{ns}
Planting pattern (C)					
آبیاری (I)	1	495676.1**	455.01**	67.28 ^{ns}	0.036 ^{ns}
Irrigation (I)					
C×I	2	39935.1*	22.7 ^{ns}	2.55 ^{ns}	0.376 ^{ns}
Error	10	5658.9	15.9	22.7 ^{ns}	0.219
خطا					
ضریب تغییرات (%)		6.35	7.20	25.79	2.55
CV (%)					

* و ** به ترتیب معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد؛ ns: غیر معنی دار

* and ** indicate significant at $P \leq 0.05$ and $P \leq 0.01$, respectively. ns: not significant

جدول ۴. تأثیر روش آبیاری بر عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) ماش در الگوهای مختلف کاشت

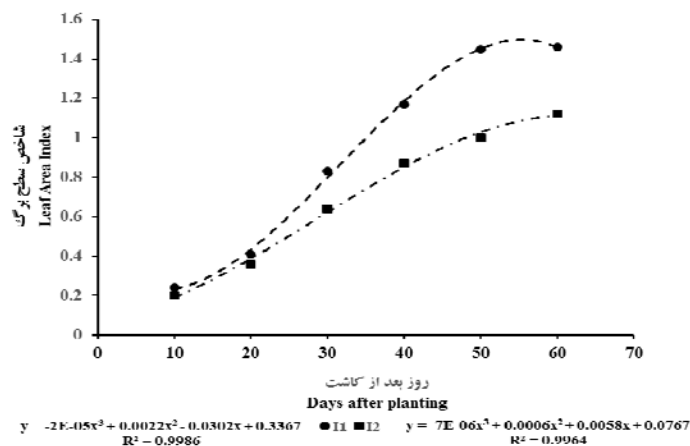
Table 4. Effect of irrigation system on grain yield (kg ha^{-1}) of mung bean in different planting patterns.

الگوی کشت مخلوط	روش آبیاری	عملکرد دانه
Intercropping pattern	Irrigation system	Grain yield
MB	I ₁	1689a
	I ₂	1194b
M ₁	I ₁	786c
	I ₂	617d
M ₂	I ₁	1584a
	I ₂	1252b

MB: کشت خالص ماش؛ M₁: کشت مخلوط روی ردیف‌های جداگانه؛ M: کشت مخلوط روی یک ردیف؛ I₁: آبیاری معمول؛ I₂: آبیاری جزئی ریشه. حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون دانکن است.
MB: Sole mung bean; M₁: between-row intercropping; M₂: within-row intercropping; I₁: conventional irrigation; I₂: Partial root zone irrigation. Different letters indicate significant difference at $P \leq 0.05$ according to Duncan's multiple range test.

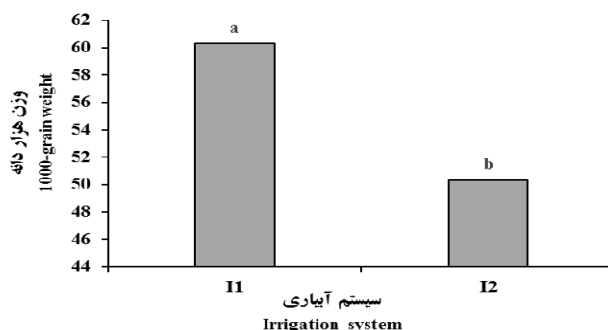
تنش کمبود آب، عملکرد دانه ماش را از طریق کاهش تولید مواد فتوسنتزی با کاهش مواجه می‌کند (Shokoohfar and Abufetileh, 2013) که اثر آن در این آزمایش در کاهش وزن دانه‌ها در شرایط آبیاری جزئی ریشه مشاهده شده است (شکل ۵). در این پژوهش، آبیاری جزئی ریشه حدود ۱۷ درصد وزن دانه ماش را نسبت به آبیاری کامل ریشه کاهش داد. علت کاهش وزن دانه ماش در اثر تنش کمبود آب، کاهش طول دوره پر شدن دانه و کاهش تولید و انتقال مواد فتوسنتزی به دانه است (Noryani, 2013).

بین عملکرد دانه و شاخص برداشت ماش یک همبستگی مثبت وجود دارد، به طوری که کاهش شاخص سطح برگ، به‌ویژه در مرحله رشد زایشی، اثر منفی بر عملکرد دانه ماش دارد (Moradi et al., 2008). در پژوهش حاضر نیز نتایج مشابهی به دست آمد به طوری که آبیاری جزئی ریشه باعث کاهش شاخص سطح برگ ماش شد (شکل ۴). همچنین، با گذشت زمان و افزایش سن گیاه، اختلاف بین آبیاری کامل و آبیاری جزئی ریشه از نظر شاخص سطح برگ بیشتر شد؛ به عبارت دیگر، اثر آبیاری جزئی ریشه بر شاخص سطح برگ ماش در مرحله رشد زایشی، نمود بیشتری داشت (شکل ۴).



شکل ۴. تأثیر روش آبیاری بر روند تغییرات شاخص سطح برگ ماش در طول دوره رشد. I1: آبیاری معمول؛ I2: آبیاری جزئی ریشه.

Fig. 4. Effect of irrigation system on leaf area index of mung bean over the growing period. I1: conventional irrigation; I2: Partial root zone irrigation



شکل ۵. تأثیر روش آبیاری بر وزن هزار دانه ماش (گرم). I1: آبیاری معمول؛ I2: آبیاری جزئی ریشه. حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون دانکن است.

Fig. 5. Effect of irrigation system on 1000-grain weight (gr) of mung bean. I1: conventional irrigation; I2: Partial root zone irrigation. Different letters indicate significant difference at $P \leq 0.05$ according to Duncan's multiple range test.

آمد ولی کارایی مصرف آب در این تیمار از کشت خالص ذرت در شرایط آبیاری جزئی ریشه و کشت مخلوط ذرت و ماش در شرایط آبیاری معمولی و جزئی ریشه کمتر بود. به‌طور کلی، در کلیه تیمارها، کارایی مصرف آب با اعمال آبیاری جزئی ریشه نسبت به آبیاری کامل افزایش یافت که بالاترین مقدار آن به ترتیب به تیمارهای کشت مخلوط ذرت و ماش (۴۳ درصد) و کشت خالص ماش (۳۹ درصد) تعلق داشت. کمترین میزان افزایش کارایی مصرف آب در کشت خالص ذرت در

کارایی مصرف آب و سودمندی کشت مخلوط

نتایج نشان داد که اثر الگوی کاشت، روش آبیاری و اثر متقابل الگوی کاشت × روش آبیاری بر کارایی مصرف آب معنی‌دار ($P \leq 0.01$) بود (جدول ۵). بیشترین کارایی مصرف آب (۲/۷۷ کیلوگرم دانه به ازای مصرف یک مترمکعب آب) در کشت مخلوط ذرت و ماش روی یک ردیف و در شرایط آبیاری جزئی ریشه به دست آمد (شکل ۶). علی‌رغم اینکه بیشترین عملکرد دانه از کشت خالص ذرت و در شرایط آبیاری معمول به دست

اختصاص داشت که از کشت خالص ذرت، کشت مخلوط روی ردیف‌های جداگانه و کشت خالص ماش به ترتیب ۲۳، ۵۰ و ۷۶ درصد بیشتر بود (شکل ۶).

شرایط آبیاری کامل مشاهده شد که با اعمال آبیاری جزئی ریشه ۲۰ درصد افزایش یافت (شکل ۶). در شرایط آبیاری معمول نیز بیشترین کارایی مصرف آب (۲/۷۷ کیلوگرم بر مترمکعب) به کشت مخلوط ذرت و ماش روی یک ردیف

جدول ۵. میانگین مربعات کارایی مصرف آب ذرت و ماش و کارایی نسبت برابری زمین در الگوهای مختلف کاشت در شرایط مختلف آبیاری ریشه

Table 5. Mean square for water use efficiency of maize and mung bean and for land equivalent ratio (LER in different planting patterns under different root irrigation conditions)

منبع تغییر S.O.V	کارایی مصرف آب Water use efficiency		نسبت برابری زمین land equivalent ratio (LER)	
	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares
تکرار Replication	2	0.005 ^{ns}	2	0.016 ^{ns}
الگوی کاشت Planting pattern (C)	3	3.56 ^{**}	1	3.45 ^{**}
آبیاری Irrigation (I)	1	1.12 ^{**}	1	0.066 ^{**}
C×I	3	0.113 ^{**}	1	0.002 ^{**}
خطا Error	14	0.009	6	0.004
ضریب تغییرات (%) CV (%)		6.53		3.85

** معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد؛ ns: غیر معنی‌دار

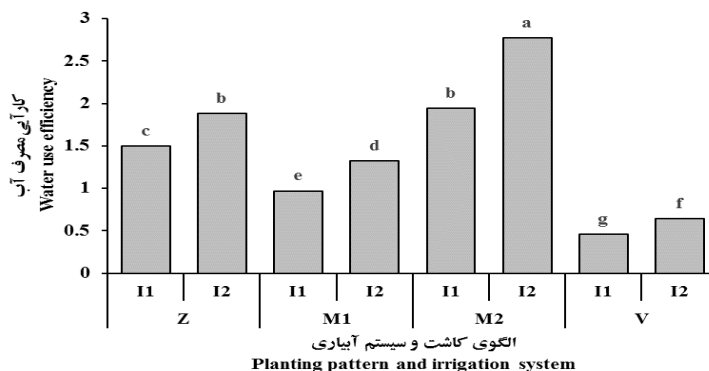
** indicate significant at $P \leq 0.01$. ns: not significant

استفاده مکملی اجزای کشت مخلوط در مصرف آب مؤثر باشد (Taie et al., 2008)؛ به عبارت دیگر، در این مطالعه کشت مخلوط (کشت مخلوط ذرت و ماش روی یک ردیف) در صورتی به افزایش کارایی مصرف آب منجر شد که به دلیل تراکم بالاتر، سطح بیشتری از خاک پوشانده شد و همچنین آشیان‌های اکولوژیک بیشتری توسط ریشه ذرت و ماش اشغال شد. در این مورد در کشت مخلوط ذرت و لوبیا چشم‌بلبلی مشاهده شد که پوشش بیشتر سطح خاک در کشت مخلوط و تفاوت توسعه ریشه (اشغال آشیان‌های اکولوژیک متفاوت) منجر به افزایش جذب آب توسط گیاهان و کاهش تبخیر از سطح خاک شد (Eskandari and Javanmard, 2013). آبیاری یک‌درمیان جوی و پشته آبیاری است که می‌تواند علاوه بر حفظ عملکرد گیاهان زراعی، به کاهش قابل توجه آب مصرف‌شده برای آبیاری نیز کمک کند (Due et al., 2006). در این پژوهش آبیاری یک‌درمیان

یکی از راهکارهای کلیدی در افزایش کارایی مصرف آب گیاهان، افزایش سهم آب مصرفی در تعرق از کل آب تلف‌شده در طول دوره رشد است (Gholinezhad et al., 2010). در کشت مخلوط ذرت و ماش روی یک ردیف، از آنجاکه بوته‌ی بیشتری در واحد سطح نسبت به سایر الگوهای کشت وجود داشت، به نظر می‌رسد پوشش بیشتر سطح خاک باعث کاهش سهم تبخیر از سطح خاک و افزایش سهم تعرق در مصرف آب گردید که به بیشتر شدن کارایی مصرف آب منجر شد. با این حال، در برخی مطالعات مانند کشت مخلوط گندم و نخود (Jahansooz et al., 2007) و کدوی تخمه کاغذی با نخود و عدس (Khoramivafa et al., 2011) گزارش شد که کشت مخلوط تأثیری بر کارایی مصرف آب نداشت. در این پژوهش نیز تفاوت معنی‌داری بین کشت مخلوط ذرت و ماش روی ردیف‌های جداگانه و کشت خالص ذرت مشاهده نشد که در این زمینه به نظر می‌رسد نقش پوشش سطح خاک و

هورمون اسید آبسزیک) به برگ‌ها و کنترل هدایت روزنه‌ای است که باعث سودمندی گیاه از این پاسخ فیزیولوژیکی برای کاهش مصرف آب می‌شود (Yang et al., 2011).

جوی و پشته‌ها باعث شد که کاهش مصرف آب بیش از کاهش عملکرد دانه ناشی از کم‌آبیاری باشد که در نتیجه‌ی آن، کارایی مصرف آب بهبود یافت. علت این امر ارسال پیام‌هایی از ریشه



شکل ۶. تأثیر روش آبیاری بر کارایی مصرف آب (کیلوگرم در مترمکعب) ذرت و ماش در الگوهای مختلف کاشت. Z: کشت خالص ذرت؛ M1: کشت مخلوط روی ردیف‌های جداگانه؛ M2: کشت مخلوط روی یک ردیف؛ I1: آبیاری معمول؛ I2: آبیاری جزئی ریشه. حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد بر اساس آزمون دانکن است.

Fig. 6. Effect of irrigation system on water use efficiency (kg m⁻³) of maize and mung bean in different planting patterns. Z: Sole maize; M1: between-row intercropping; M2: within-row intercropping; I1: conventional irrigation; I2: Partial root zone irrigation. Different letters indicate significant difference at P≤0.01 according to Duncan's multiple range test.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج پژوهش حاضر این فرضیه را که کاهش مصرف آب از طریق آبیاری نیمی از سیستم ریشه‌ای باعث بهبود کارایی مصرف آب می‌شود را مورد تأیید قرار داد. به طوری که بیشترین کارایی مصرف آب (۲/۷۷ کیلوگرم دانه به ازای مصرف یک مترمکعب آب) در کشت مخلوط ذرت و ماش روی یک ردیف و در شرایط آبیاری جزئی ریشه به دست آمد. در کلیه تیمارها، کارایی مصرف آب در شرایط آبیاری جزئی ریشه افزایش یافت که بالاترین و کمترین مقدار آن به ترتیب به تیمارهای کشت مخلوط ذرت و ماش (۴۳ درصد) و کشت خالص ذرت (۲۰ درصد) تعلق داشت. به طوری کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که کشت مخلوط ذرت و ماش روی یک ردیف و در شرایط آبیاری جزئی ریشه می‌تواند ضمن حفظ تولید دانه در سطح مطلوب (ذرت ۵۹۵۰ کیلوگرم در هکتار و ماش ۱۲۵۲ کیلوگرم در هکتار)، به افزایش کارایی مصرف آب نیز کمک کند. نسبت برابری زمین در کشت مخلوط ذرت و ماش روی یک ردیف و در شرایط آبیاری جزئی ریشه (۲/۲۵) نیز مزیت این الگوی کشت را تأیید می‌کند.

نسبت برابری زمین به طور معنی‌داری ($P \leq 0.01$) تحت تأثیر الگوی کشت، روش آبیاری و اثر متقابل الگوی کشت و روش آبیاری قرار گرفت (جدول ۵). نسبت برابری زمین (LER) برای هر دو الگوی کشت مخلوط در هر دو شرایط آبیاری (آبیاری معمول و آبیاری جزئی ریشه) بالاتر از یک به دست آمد که نشان‌دهنده‌ی مزیت کشت مخلوط نسبت به کشت خالص است (جدول ۶). باین حال، بین دو الگوی کشت مخلوط از نظر LER تفاوت معنی‌داری ($P \leq 0.01$) وجود داشت به طوری که میانگین مزیت کشت مخلوط روی ردیف‌های جداگانه در شرایط آبیاری معمول تنها ۳ درصد و در شرایط آبیاری جزئی ریشه ۱۵ درصد بود در حالی که کشت مخلوط روی یک ردیف در هر دو شرایط آبیاری بیش از دو برابر نسبت به کشت خالص مزیت داشت (جدول ۶). یافته‌های LER در کشت مخلوط روی یک ردیف نشان می‌دهد که ۱۰۶ درصد در شرایط آبیاری کامل و ۱۲۵ درصد در شرایط آبیاری جزئی ریشه زمین بیشتری در کشت خالص نیاز است تا عملکردی مشابه با کشت مخلوط به دست آید (Javanmard and Eskandari, 2014).

جدول ۶. نسب برابری زمین در الگوهای مختلف کشت مخلوط در شرایط متفاوت آبیاری

Table 6. Land equivalent ratio (LER) of different intercropping planting patterns under different irrigation conditions

الگوی کشت مخلوط Intercropping pattern	روش آبیاری Irrigation system	نسبت برابری زمین LER
M ₁	I ₁	1.03 b
	I ₂	1.15 b
M ₂	I ₁	2.06 a
	I ₂	2.25 a

M₁: کشت مخلوط روی ردیف‌های جداگانه؛ M₂: کشت مخلوط روی یک ردیف؛ I₁: آبیاری معمول؛ I₂: آبیاری جزئی ریشه. حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد بر اساس آزمون دانکن است.

M₁: between-row intercropping; M₂: within-row intercropping; I₁: conventional irrigation; I₂: Partial root zone irrigation. Different letters indicate significant difference at P≤0.01 according to Duncan's multiple range test.

منابع

- Beddington, J.R., Asaduzzaman, M., Clark, M. E., Bremauntz, A.F., Guillou, M.D., Howlett, J.B., Jahn, M. M., Lin, E., Mamo, T., Negra, C., Nobre, A., 2012. What next for agriculture after Durban? *Science*. 335(6066), 289–290.
- Dhima, K.V., Lithourgidis, A.S., Vasilakoglou, I.B., Dordas, C.A., 2007. Competition indices of common vetch and cereal intercrops in two seeding ratio. *Field Crops Research*. 100, 249-256.
- Due, T.S., Kang, S.Z., Zhang, J.H. Li, F.S., 2006. Yield and physiological responses of cotton to partial root-zone irrigation in the oasis of northwest China. *Agricultural Water Management*. 84, 41-52.
- Eskandari, H., Alizadeh-Amraie, A., 2016. Dry matter production and weeds growth in additive series of maize and cowpea intercropping in the consumption of some environmental resources under north Khuzestan climatic conditions. *Research in Field Crops*. 2(2), 46-57. [In Persian with English Summary].
- Eskandari, H., Ghanbari, A., 2010. Influence of different intercropping pattern of corn and cowpea on light interception, forage yield and weed biomass. *Production Science*. 1(20), 49-57. [In Persian with English Summary].
- Eskandari, H., Ghanbari, A., 2011. Evaluation of competition and complementarity of corn and cowpea intercropping for nutrient consumption. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*. 2(21), 67-75. [In Persian with English Summary].
- Eskandari, H., Javanmard, A., 2013. Evaluation of forage yield and quality in intercropping patterns of maize and cowpea. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*. 4(23), 101-111. [In Persian with English Summary].
- Fallahi, G., Hatami, A., Naseri, R., 2013. Growth analysis of six corn hybrid under drought conditions in Kermanshah province, Iranian *Journal of Crop Physiology*. 7(2), 181-196. [In Persian with English Summary].
- Fathi, G., 2010. Effect of density on yield and yield component of mung bean cultivars under Khuzestan climate conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*. 1(41), 19-27. [In Persian with English Summary].
- Gholinezhad, E., Ayenehband, A., Hassanzadeh Ghourt tapeh, A., Noormohammadi, G., Bernousi, I., 2010. Effect of irrigation regime on water and nitrogen use efficiency in sunflower at various levels of n-application and plant density under Urmia climate conditions. *Journal of Soil and Water Science*. 1(20), 27-45. [In Persian with English Summary].
- Hauggaard-Nielsen, H., Ambus, P., Jensen, E.S., 2003. Interspecific competition, N use and interference with weeds in pea-barley intercropping. *Field Crops Research*. 70, 101-109.
- Horst, M.G., Shamutalov, S.S., Goncalves, J.M., Pereira, L.S., 2007. Assessing impacts of surge-flow irrigation on water saving and productivity of cotton. *Agricultural Water Management*. 87, 115-127.
- Hu, T., Yuan, L., Wang, J., Shaozhong, K., Fusheng, L., 2010. Antioxidation responses of maize roots and leaves to partial root zone

- irrigation. *Agricultural Water Management*. 98, 164-171.
- Jahansooz, M.R., Yunusa, I.A.M., Coventry, D.R., Palmer, A.R., Eamus, D., 2007. Radiation- and water-use associated with growth and yields of wheat and chickpea in sole and mixed crops. *Journal of Central European Agriculture*. 26, 275-282.
- Javanmard, A., Eskandari, H., 2014. Investigation of some competition and forage quality indices in different intercropping patterns of maize with vetch, common bean, bitter vetch and berseem clover. *Journal of Crop Production*. 7(3), 89-108. [In Persian with English Summary].
- Javanmard, A., Dabbagh Mohammadi-Nasab, A., Nasiri, Y., Shekari, F., 2014. Evaluation of forage yield and some advantage of intercropping of maize and some legumes in double cropping system. *Journal of Crop Production and Processing*. 12, 39-51. [In Persian with English Summary].
- Kang, S.Z., Zhang, J.H., 2004. Controlled alternate partial root zone irrigation: its physiological consequences and impact on water use efficiency. *Journal of Experimental Botany*. 55, 2437-2446.
- Khorammi-Vafa, M., Eftekhari-Nasab, N., Sayadan, K., Najafi, A., 2011. Water use efficiency in intercropping of pumpkin with chickpea and mung bean in different levels of nitrogen consumption. *Journal of Agroecology*. 3(2), 245-253. [In Persian with English Summary].
- Miri, H. R., Shokani, M.M., Armin, M., 2016. Reaction of yield and yield components of maize under relative drought of root and potassium fertilizer. *Journal of Agronomy*. 111, 35-43. [In Persian with English Summary].
- Mojadam, M., Modhej, A., 2012. Effect of nitrogen level on water use efficiency yield and yield component of maize in optimum and drought stress conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*. 10(3), 546-554. [In Persian with English Summary].
- Moradi, A., Ahmadi, A., Hosseinzadeh, A., 2008. Agronomical-physiological reaction of mung bean to sever and mediate drought stress during vegetative and reproductive growth stages. *Journal of Water and Soil Science*. 45, 569-671. [In Persian with English Summary].
- Noryani, H., 2013. Effect of water deficit stress on yield and yield components of mung bean in different planting densities. *Crop Physiology Journal*. 18, 35-47. [In Persian with English Summary].
- Nouriazhar, J., Ehsanzadeh, P., 2007. Evaluation of some growth indices and yield of five maize hybrid under two irrigation regime in Isfahan region. *Journal of Water and Soil Science*. 41, 261-272. [In Persian with English Summary].
- Paknezhad, F., Vazan, S., Ajeli, J., Mirakhori, M., Nasri, M., 2010. Effect of drought stress and irrigation method on yield and yield component of two maize hybrids. *Agroecology Journal*. 18, 17-26. [In Persian with English Summary].
- Raseduzzaman, M., Jensen, E.S., 2017. Does intercropping enhance yield stability in arable crop production? A meta-analysis. *European Journal of Agronomy*. 91, 25-33.
- Shokoohfar, A. R., Abufetilenezhad, S., 2013. Effect of drought stress on some physiological properties and biological yield of mung bean cultivars in Dezful. *Crop Physiology Journal*. 17, 49-59. [In Persian with English Summary].
- Taie, J., Ghanbari, A., Jokar, M., 2008. Intercropping is a way for increasing water use efficiency. *Proceeding in First International Conference in Water Crisis*. Zabol. University. Zabol. Iran.
- Tang, L.S., Li, Y., Zhang, J.H., 2007. Physiological and yield responses of cotton under partial root zone irrigation. *Field Crops Research*. 100, 117-124.
- Wang, Z., Zhao, X., Chen, X., 2015. Effects of water limitation on yield advantage and water use in wheat/maize strip intercropping. *European Journal of Agronomy*. 71, 149-159.
- Yang, C., Huang, G., Chai, Q., Luo, Z., 2011. Water use and yield of wheat/maize intercropping under alternate irrigation in the oasis field of northwest China. *Field Crops Research*. 124, 426-432.
- Zang, S. Z., Zhang, L., Liang, Y. L., Hu, X. T., Cai, H. J., Gu, J., 2002. Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the loess plateau of China. *Agricultural Water Management*. 55, 203-216.