Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

Water use efficiency of maize-mung bean in intercropping systems under different water stress conditions

Somaye Miri [1], Hamzeh Ali Alizadeh[2], Yaser Alizadeh [3], Ekhlas Amini [4]

[1] M.Sc. Student, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran
[2] Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran
[3] Assistant Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran
[4] Former Ph.D. Student, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran

Extended Abstract

Introduction

The limitation of water resources, increase in water demand for food supply, land use changes, climate change, and reduction of soil fertility are the most important challenges facing the world's food security. Various approaches have been used to reduce water demand and increase production per unit area of agricultural products, including modifying cropping patterns and planting methods, using scheduled deficit irrigation, and implementing new policies and laws in water resources management. Among these approaches, some researchers suggest that intercropping is the most sustainable method to improve the use of production resources. The intercropping system is the simultaneous growth of two or more crops in one part of the land. Intercropping has potential benefits such as higher crop yields, more efficient use of resources (sunlight, water, and fertilizers), reduced disease and pests, and improved environmental conditions. The intercropping farming can be an efficient solution to improve the productivity of water resources, especially in areas with limited water resources such as Iran. So far, no study has been conducted on the efficiency of water and land use in the maize-mung bean cropping system. So, the purpose of this study was to investigate the effect of maize-mung bean intercropping in different cropping patterns and different water stress conditions on water productivity.

Materials and Methods

The field experiment was a split plot experiment based on a randomized complete block design with three replications in the research farm, Faculty of Agriculture, Ilam University during the 2020-2021 growing season. Treatments included four levels of irrigation including 40, 60, 80, and 100 % of crop water requirement as main plots, and four planting pattern levels including additive intercropping series (100 % corn + 50 % mung bean), replacement intercropping series (50 % corn + 50 % mung bean) and monocultures of mung bean and corn, as subplots. The application of drought stress started after the establishment stage of the plant and continued until the harvest. The irrigation requirement was determined based on the TDR method and was applied using the drip irrigation method. At the end of the growth period, some parameters of both plants were measured, including plant height, thousand seed weight, grain yield, biological yield, and harvest index. Moreover, water use efficiency (WUE), land equality ratio (LER), and water equality ratio (WER) indicators were used to check the effectiveness of the intercropping system. Finally, analysis of variance (ANOVA) was performed using Minitab 17 software, and the means were compared by Duncan's test at a 5 % probability level ($p \leq 0.05$).

Results and Discussion

The results showed that the water use efficiency of mung bean was significantly lower than that of mung bean monoculture in two patterns of mixed and incremental cultivation. The highest mung bean water use efficiency occurred at the irrigation level of 80% of the water requirement and single crop (0.51 kg m^{-3}). Maize water productivity in all cropping patterns decreases with increasing irrigation water consumption. There was no significant difference between the water productivity of the additive intercropping and the monoculture of maize, but the water productivity of the replacement intercropping had a significant difference with the other two cropping patterns. The highest value of LER was obtained in the additive intercropping as 1.56 and 1.52 in 80 and 100% of water requirement, respectively, which was equivalent to a 56 and 52% increase in profitability compared to a monoculture of the two species. WER was greater than 1 in all water levels and two intercropping

Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

patterns, which indicated the superiority of intercropping with less water than monoculture. Also, the results showed that the highest WER value was 1.46 in the additive intercropping treatment with an 80% water consumption level. Additionally, the comparison of LER and WER indices showed that intercropping makes more efficient use of water and land resources. Also, the results indicated that the highest LER and WER occurred in the additive intercropping and the irrigation level was 80%. Therefore, additive intercropping and the use of an 80% irrigation level make the most efficient use of water and land resources.

Conclusion

The higher WER and LER indexes in this study suggest that an intercropping system may save 45%–56% of water and farmland, achieving similar yields in comparison to sole maize and sole mung bean. Thus, the intercropping system would be an advantageous cropping system for sustaining crop productivity and improving water and land use efficiency. However, additional research is required to comprehend the resource capture mechanism of intercrop species in intercropping systems under the changing climate. Especially, a series of comprehensive studies to develop the best management approaches regarding fertilization, irrigation, and pest control would support the sustainability of intercropping systems and farmer adoption. The successful adoption of the intercropping system will play an important role in meeting the food requirements of the increasing population, especially in arid and semiarid countries such as Iran which are facing challenges in resource limitation. The results of this study showed that by using intercropping system and optimal management of water consumption, it is possible to achieve performance similar to single crop cultivation with 45% less water and 56% less land use. However, more research is needed to understand the mechanism of how resources are absorbed by mixed species in intercropping systems, especially under different climatic conditions.

Keywords: Additive intercropping, Land equality ratio, Water equality ratio, Water use efficiency

Article Type: Research Article

Acknowledgment

We would like to express our sincere gratitude to the University of Ilam for the financial and logistical supports who significantly contributed during the research project.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement:

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Somaye Miri: Writing-original draft preparation; **Hamzeh Ali Alizadeh**: Conceptualization, methodology, Resources, Software, Manuscript editing; **Yaser Alizadeh**: Formal analysis and investigation; **Ekhlas Amini**: Visualization, Supervision.

*Corresponding Author, E-mail: h.alizadeh@ilam.ac.ir

Citation: Miri, S., Alizadeh, H.A., Alizadeh, Y., & Amini, E. (2024). Water use efficiency of maize-mung bean in intercropping systems under different water stress conditions. *Water and Soil Management and Modeling*, *4*(1), 233-247. DOI: 10.22098/mmws.2023.12317.1224

Received: 09 February 2023, Received in revised form: 21 February 2023, Accepted: 22 February 2023, Published online: 22 February 2023

Water and Soil Management and Modeling, Year 2024, Vol. 4, No. 1, pp. 233-247

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک

شاپا الکترونیکی: ۲۵٤٦-۲۷۸۳

کارایی مصرف آب در کشت مخلوط ذرت–ماش تحت شرایط مختلف تنش آبی

سمیه میری[۱]، حمزه‌علی علیزاده[۲]، یاسر علی‌زاده[۳]، اخلاص امینی[۴]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

[۲] استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

[۳] استادیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

[۴] دانش‌آموختهٔ دکتری، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

چکیده

به‌منظور بررسی تنش آب و الگوهای کشت بر بهره‌وری آب در کشت مخلوط ماش و ذرت تحت شرایط تنش خشکی، آزمایشی به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایهٔ بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعهٔ تحقیقاتی دانشگاه ایلام طی سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ انجام شد. کرت‌های اصلی شامل آبیاری در چهار سطح (۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه) و کرت‌های فرعی شامل الگوی کشت در چهار سطح (کشت مخلوط افزایشی ۱۰۰ درصد ذرت+ ۵۰ درصد ماش، کشت مخلوط جایگزینی ۵۰ درصد ذرت+ ۵۰ درصد ماش و کشت خالص ماش و ذرت) بودند. برای بررسی کارایی کشت مخلوط از دو شاخص نسبت برابری زمین (LER) و نسبت برابری آب (WER) استفاده شد. نتایج نشان داد که کارایی مصرف آب محصول ماش در دو الگوی کشت مخلوط افزایشی و مخلوط جایگزینی به‌طور معناداری کم‌تر از کشت تکی ماش بود. بهره‌وری آب ماش در کشت مخلوط جایگزینی به‌طور متوسط ۲۳ درصد بیش‌تر از کشت مخلوط افزایشی بود. بیش‌ترین بهره‌وری آب ماش در سطح آبیاری ۸۰ درصد نیاز آبی و کشت تکی (۰/۵۱ کیلوگرم بر مترمکعب) اتفاق افتاد. بهره‌وری آب ذرت در همهٔ الگوهای کشت با افزایش مقدار مصرف آب آبیاری کاهش پیدا کرد. بین بهره‌وری آب کشت مخلوط افزایشی و کشت تکی ذرت اختلاف معناداری وجود نداشت. بنابراین، بهره‌وری آب کشت مخلوط جایگزینی دارای تفاوت معنادار با دو الگوی کشت دیگر بود. بیش‌ترین مقدار LER به‌میزان ۱/۵۶ و ۱/۵۲ به‌ترتیب در کشت مخلوط افزایشی در ۸۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی به‌دست آمد که معادل ۵۶ و ۵۲ درصد افزایش سودمندی زراعی نسبت به کشت خالص دو گونه به‌صورت تکی بود. WER در همهٔ سطوح آبی و دو الگوی کشت مخلوط بیش‌تر از یک بود که بیان‌گر برتری کشت مخلوط با مقدار آب کم‌تر نسبت به کشت تکی است. مقدار WER کشت مخلوط افزایشی در همهٔ سطوح آبیاری بیش‌تر از کشت جایگزینی بود. هم‌چنین، نتایج نشان داد که بیش‌ترین WER به مقدار ۱/۴۶ مربوط به تیمار کشت مخلوط افزایشی با سطح آب مصرفی ۸۰ درصد است. مقایسهٔ دو شاخص LER و WER نشان داد که به‌طور کلی کشت مخلوط باعث استفاده کاراتر از آب و زمین می‌شود. هم‌چنین، نتایج بیش‌ترین LER و WER در کشت مخلوط افزایشی و سطح آبیاری ۸۰ درصد اتفاق افتاده است. بنابراین، کشت مخلوط افزایشی و استفاده از سطح آبیاری ۸۰ درصد باعث کارآمدترین استفاده از منابع آب و زمین می‌شود.

واژه‌های کلیدی: کارایی مصرف آب، کشت مخلوط افزایشی، نسبت برابری آب، نسبت برابری زمین

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: h.alizadeh@ilam.ac.ir

استناد: میری، سمیه، علیزاده، حمزه‌علی، علی‌زاده، یاسر و امینی، اخلاص (۱۴۰۳). کارایی مصرف آب در کشت مخلوط ذرت–ماش تحت شرایط مختلف تنش آبی. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۱)، ۲۲۹- ۲۴۷.

DOI: 10.22098/mmws.2023.12317.1224

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۰، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۰۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۳، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۲/۰۳

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۱، صفحه ۲۳۳ تا ۲۴۷

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

© نویسندگان

۱- مقدمه

محدودیت منابع آب، افزایش تقاضا برای غذا، تغییر کاربری اراضی، تغییرات آب و هوایی، کاهش حاصل‌خیزی خاک و بهره‌وری پایین محصولات از جمله مهم‌ترین چالش‌های پیش‌روی تأمین امنیت غذایی جهان است. رویکردهای مختلفی برای کاهش تقاضای آب و افزایش تولید در واحد سطح محصولات کشاورزی از جمله اصلاح الگوی کشت، اصلاح روش‌های کاشت، استفاده از کم آبیاری برنامه‌ریزی شده و اجرای سیاست‌ها و قوانین جدید در مدیریت منابع آب به‌کار گرفته شده است (Chen et al., 2018; Yin et al., 2015). در میان این رویکردها، در برخی مطالعات پیشنهاد کرده‌اند که کشت مخلوط پایدارترین و ساده‌ترین روش برای بهبود استفاده از منابع تولید است (Ren et al., 2019). کشت مخلوط عبارت از کشت همزمان دو یا چند محصول در یک قسمت از مزرعه است (Morris and Garrity, 1993). کشت مخلوط دارای مزایایی مانند عملکرد محصول بالاتر، راندمان استفاده از منابع بیش‌تر (نور خورشید، آب و کودها)، کاهش آفات و بیماری‌ها، و بهبود شرایط محیط زیستی است (Liu et al., 2018; Raza et al., 2019). کشت مخلوط به‌دلیل بهره‌وری بالا و پایدار و استفادهٔ بهینه از منابع، به‌طور گسترده در مناطق خشک و نیمه‌خشک کاربرد داشته است.

رقابت و مکمل بودن دو نوع اصلی از تعاملات بین گونه‌ای هستند (Yin et al., 2017). محصولات زراعی با ویژگی‌های مختلف تقاضای منابع، زمینه را برای تمایز خاص در استفاده از زمان و مکان فراهم می‌کنند و استفاده کارآمد از منابع مرتبط را با مکمل‌سازی بین گونه‌ای ارتقاء می‌دهند (Yin et al., 2020)، یا یک محصول مستقیماً منابع را برای محصول دیگر فراهم می‌کند (Takim, 2012). در رقابت بین گونه‌ای، گیاهان از یک منبع خاص بر اساس تفاوت‌های مکانی زمانی استفاده می‌کنند. ولی مکمل بودن بین‌گونه‌ای به معنی تولید یا تثبیت منبع توسط یک محصول است که، باعث رشد محصول دیگر می‌شود (Yin et al., 2019a). در بین الگوهای مختلف چندکشتی، از جمله قدیمی‌ترین و معمول‌ترین بوم‌نظام‌های کشاورزی در نقاط مختلف جهان به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه ترکیب غلات با گیاهان تثبیت کنندهٔ نیتروژن است (Amani Machiani et al., 2018). با توجه به توانایی خانواده حبوبات در تثبیت نیتروژن، بهبود کیفیت خاک و ترسیب کربن آلی خاک، کشت مخلوط با پایهٔ حبوبات می‌تواند باعث افزایش عملکرد و بهره‌وری این منابع شود (Kumawat et al. 2022). گنجاندن حبوبات در سیستم زراعی چندکشتی به بازیابی خواص فیزیکی، شیمیایی و زیستیی خاک مزرعه کمک می‌کند (Kumawat et al., 2022).

کشت مخلوط از طریق شکستن چرخهٔ زندگی مداوم آفات و بیماری و کاهش زیست تودهٔ علف‌های هرز می‌تواند تولید غلات را ۱۵ تا ۲۵ درصد افزایش دهد. به‌عنوان مثال، در تحقیقی Temesgen et al. (2015) اثر سطوح مختلف آب و نیتروژن را در سه سیستم کشت شامل کشت مخلوط ذرت و لوبیا، کشت ذرت به تنهایی و کشت لوبیا به تنهایی مورد ارزیابی قرار دادند. شاخص‌های مورد ارزیابی عبارت بودند از: نسبت برابری زمین (LER)[1]، عملکرد کل دانه و بهره‌وری آب و نیتروژن. نتایج نشان داد کشت مخلوط بدون توجه به سطح مصرف آب و نیتروژن اثر معناداری بر عملکرد ذرت نداشت ولی عملکرد لوبیا را کاهش داد. با افزایش سطح تأمین آب و نیتروژن مزیت کشت مخلوط از نظر LER، کاهش یافت. بنابراین، کشت مخلوط از نظر LER در شرایط محدودیت آب و نیتروژن نسبت به شرایط عدم محدودیت کارآمدتر بود. LER به‌طور مستقیم با بهبود جذب نیتروژن و راندمان مصرف آب بیش‌تر مرتبط بود. نتایج تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که به‌طورکلی، محصولات مخلوط دارای مقادیر LER بالاتر در شرایط محدودیت آب هستند (Belay et al., 2009; Echarte et al., 2011). علاوه‌بر این، کشت مخلوط باعث افزایش محتوای آب خاک، افزایش بهره‌وری آب و در نتیجه افزایش عملکرد محصولات کشاورزی می‌شود (Gitari et al., 2018; Hu et al., 2017). مصرف آب کشت مخلوط در کل دورهٔ رشد کمی بیش‌تر از کشت به‌صورت تکی است، اما این تفاوت کم‌تر از میانگین وزنی مصرف آب متناظر در کشت خالص است (Morris and Garrity, 1993).

نتایج مطالعات مختلف نشان می‌دهد که هر چند ممکن است تبخیر خاک در کل دورهٔ رشد کشت مخلوط به‌دلیل طولانی‌تر بودن دورهٔ رشد بیش‌تر از کشت خالص باشد، اما تبخیر روزانهٔ خاک کشت مخلوط کم‌تر از کشت خالص است (Yin et al., 2019b). این مسأله نشان‌دهندهٔ اهمیت کشت مخلوط در مدیریت مصرف آب است. در این راستا، Kanton and Dennett (2004) نشان دادند که مصرف آب در محصولات کشت مخلوط دارای راندمان مصرف آب بیش‌تری نسبت به گیاهان منفرد است. هم‌چنین، Willey (1990) تفاوت در جذب آب را در سیستم توزیع مختلف ریشه‌های دو محصول که عمق و حجم‌های متفاوتی از خاک را درگیر می‌کنند توجیه می‌کند.

تنش خشکی باعث تشدید رقابت بین‌گونه‌ای می‌شود و محدویت رطوبت خاک می‌تواند اثرات مکملی را در کشت مخلوط افزایش دهد (Wang et al., 2016). یکی از علت‌های

[1] Land equality ratio

بهبود عملکرد در چنین نظام‌هایی این است که گیاهان کشت شده در کشت مخلوط در یک آشیان اکولوژیک[1] از منابع یکسانی استفاده نمی‌کنند و در نتیجه منابع قابل دسترس مانند تشعشع خورشیدی، عناصر غذایی و آب را به‌صورت مکمل جذب می‌کنند (Brooker et al., 2015). علت افزایش بهره‌وری آب در کشت مخلوط به‌خصوص کشت بقولات با غلات چهار کربنه نسبت به تک‌کشتی را می‌توان به تبخیر کم‌تر رطوبت از سطح خاک نسبت داد. در تحقیقی، Teng et al. (2016) اثر سطوح مختلف کود نیتروژن بر مصرف آب کشت مخلوط ذرت و نخود را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که کود نیتروژن اثر معناداری بر مصرف آب کشت مخلوط ذرت-نخود نداشت. مصرف آب کشت مخلوط به‌طور معناداری بیش‌تر از مصرف آب نخود فرنگی بود، اما با مصرف ذرت تفاوتی نداشت. هم‌چنین، نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از کشت مخلوط ذرت با نخود با افزایش کارایی مصرف کود، مصرف کودهای شیمیایی را ۱۵ تا ۳۰ درصد کاهش می‌دهد. در ادامه، Raza et al. (2021) در یک مطالعهٔ سه ساله اثر کشت مخلوط ذرت و سویا را مورد ارزیابی قرار دادند. تیمارها شامل کشت جایگزینی ذرت و سویا (۵۰ درصد ذرت، ۵۰ درصد سویا)، کشت افزایشی سویا-ذرت (۷۰ درصد سویا و ۳۰ درصد ذرت)، کشت خالص ذرت و کشت خالص سویا بود. نتایج آن‌ها نشان داد که کشت افزایشی باعث افزایش وزن خشک اندام هوایی (۱۵ درصد بیش‌تر)، شاخص سطح برگ (۱۹ درصد بیش‌تر) و عملکرد محصول سویا (۲۱ درصد بیش‌تر) شده است. آن‌ها نتیجه گرفتند که در مناطق گرم سایه‌اندازی ذرت باعث افزایش عملکرد و اجزای عملکرد محصول شده است. هم‌چنین، سیستم کشت افزایشی باعث کاهش وزن خشک اندام هوایی (چهار درصد کم‌تر)، شاخص سطح برگ (هشت درصد کم‌تر) و عملکرد محصول ذرت (پنج درصد کم‌تر) شده است. به‌طور متوسط کشت مخلوط ذرت-سویا در الگوی افزایشی منجر به عملکرد ۶۳ درصد برای ذرت (۶۳ درصد عملکرد ذرت به‌صورت تکی) و ۷۶ درصد برای سویا (۷۶ درصد عملکرد سویا به‌صورت تکی) و در الگوی جایگزینی منجر به عملکرد۸۰ درصد برای ذرت و ۵۲ درصد برای سویا شده است. این مسأله نشان‌دهندهٔ غالب بودن ذرت در رقابت با سویاست. به‌طور مشابه، ذرت رقیب قوی‌تری برای آب نسبت به سویا بود، با نسبت معادل جزئی آب[2] ۰/۸۱ در کشت جایگزینی و ۰/۷۸ در کشت افزایشی، و سویا دارای نسبت معادل جزئی آب ۰/۵۴ در کشت جایگزینی و ۰/۶۶ در کشت افزایشی بود.

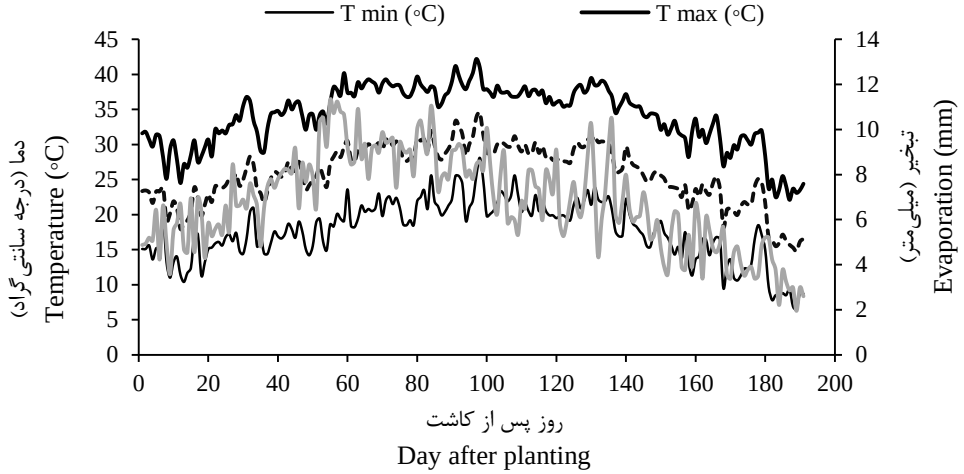
در سیستم‌های کشت مخلوط، نسبت معادل زمین از ۱/۳۱ تا ۱/۴۵ و نسبت معادل آب[3] از ۱/۳۲ تا ۱/۴۹ متغیر بود، که نشان‌دهندهٔ بهره‌وری بالاتر آب و زمین در کشت مخلوط است. گزارش‌های دیگری هم بیان‌گر بهبود جذب نیتروژن توسط سیستم‌های کشت مخلوط غلات-حبوبات در مقایسه با کشت منفرد غلات است (Musa et al, 2010; Lithourgidis et al., 2011)، این مسأله احتمالاً در نتیجهٔ استفاده از نیتروژن تثبیت شده توسط حبوبات است (Bedoussac and Justes, 2010). تاکنون تحقیقات کمی در زمینهٔ اثر کشت مخلوط بر بهره‌وری آب انجام شده است. نتایج تحقیقات Salama et al. (2016) و Tanwar et al. (2014) بیان‌گر تأثیر کشت مخلوط بر بهره‌وری منابع آب است. هم‌چنین، Khajeh Khezri (2018) اثر سطوح مختلف آب آبیاری بر عملکرد و بهره‌وری آب کشت مخلوط سورگوم-لوبیای قرمز را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که کشت مخلوط سورگوم و لوبیای قرمز کارایی مصرف آب را در مقایسه با کشت خالص لوبیای قرمز و سورگوم به‌ترتیب ۱۲/۲ و ۲۹/۴ درصد افزایش داده است. نتایج مطالعات مختلف نشان می‌دهد که کشت مخلوط می‌تواند یک راه‌کار کارآمد برای ارتقاء بهره‌وری منابع آب به‌ویژه در مناطق با محدودیت منابع آب مثل ایران باشد. تاکنون، مطالعه‌ای در رابطه با بهره‌وری استفاده از آب و زمین در سیستم کشت مخلوط ذرت-ماش انجام نشده است. بنابراین، در این مطالعه سیستم‌های کشت مخلوط ذرت-ماش تحت شرایط مختلف مقدار آب مصرفی مورد مطالعه قرار گرفت. هدف از این مطالعه ارزیابی عملکرد و اجزای عملکرد ذرت و ماش و تعیین بهره‌وری استفاده از آب و زمین در الگوی کشت‌های مخلوط ذرت-ماش در مقایسه با کشت تکی این محصولات بود.

۲- مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ و در مزرعهٔ تحقیقاتی دانشکدهٔ کشاورزی دانشگاه ایلام با عرض جغرافیایی ′۳۹ °۳۳ شمالی و با طول جغرافیایی ′۲۲ °۴۶ شرقی با ارتفاع ۱۱۷۴ متر از سطح دریا اجرا شد. آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایهٔ بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. در کرت‌های اصلی، آبیاری در چهار سطح ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه و در کرت‌های فرعی، چهار الگوی کشت شامل کشت خالص ذرت، کشت مخلوط افزایشی ۱۰۰ درصد ذرت و ۵۰ درصد ماش، کشت مخلوط جایگزینی ۵۰ درصد ذرت و ۵۰ درصد ماش و کشت خالص ماش قرار گرفتند. در طول

[1] Ecological niche
[2] Partial land equivalent ratio
[3] Water equality ratio

فصل رشد مجموع تبخیر پتانسیل (۱۳۰۰ میلی‌متر)، میانگین دمای حداقل و حداکثر در طول دورهٔ رشد، به‌ترتیب ۱۷/۷ و ۳۴/۱ درجهٔ سانتی‌گراد بود (شکل ۱). در جدول ۱ نیز مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعهٔ مورد مطالعه ارائه شده است.



شکل ۱- حداقل، حداکثر و متوسط دمای روزانه و میزان تبخیر در طول دورهٔ رشد ذرت و ماش در سال زراعی ۱٤۰۱-۱٤۰۰

Figure 1- Minimum, maximum, and average daily temperature and evaporation rate during the growing period of maize and mung bean in the crop year 2020-2021

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش (عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک)

Table 1- Physical and chemical characteristics of experimental field soil (soil depth 0-30 cm)

بافت خاک	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	pH	ماده آلی (درصد)	فسفر (میلی‌گرم بر لیتر)	پتاسیم (میلی‌گرم بر لیتر)	نیتروژن (درصد)
لومی رسی	0.15	7.06	1.2	8.5	370.3	0.125

برای کشت ذرت از رقم سینگل کراس کنسور و برای کاشت ماش از رقم پرتو استفاده شد. آماده‌سازی زمین شامل شخم پاییزه و شخم مجدد در بهار با گاو آهن قلمی و عملیات تکمیلی تهیهٔ زمین به‌وسیلهٔ دیسک انجام شد. کاشت بذور در تاریخ ۳۰ اردیبهشت ماه در کرت‌هایی به ابعاد ۲/۵ × ۳ مترمربع به‌صورت ردیفی گرفت. فاصلهٔ ردیف‌ها در کشت خالص ذرت، کشت خالص ماش و کشت مخلوط جایگزینی ۵۰ سانتی‌متر و در کشت مخلوط افزایشی ۲۵ سانتی‌متر بود و فاصلهٔ روی ردیف برای ذرت ۲۰ سانتی‌متر و برای ماش در کشت خالص و کشت مخلوط جایگزینی ۱۰ سانتی‌متر و در کشت مخلوط افزایشی ۲۰ سانتی‌متر بود. به‌منظور اعمال صحیح و یکنواخت آبیاری واحدهای آزمایشی، آبیاری مزرعه با استفاده از نوار تیپ انجام شد و میزان آب مصرفی توسط کنتور اندازه‌گیری شد (شکل ۲). تا زمان استقرار کامل گیاهان، همهٔ کرت‌ها به‌میزان یکسان آبیاری شدند و پس از آن اعمال سطوح مختلف آبیاری آغاز شد. در هر مرحله از آبیاری به‌منظور تعیین میزان آب مصرفی، پیش از آبیاری از دستگاه TDR مدل R2V/6 ساخت شرکت Delta T– با رابطهٔ (۱) برای اندازه‌گیری رطوبت خاک استفاده شد.

$$\theta_O=1.087\times\theta_{TDR}- 0.03 \qquad (۱)$$

در رابطهٔ بالا، θ_O رطوبت اندازه‌گیری شده و θ_{TDR} رطوبت قرائت شده با دستگاه TDR است. سپس حجم آب آبیاری برای سطح ۱۰۰ درصد نیاز آبی هر یک از تیمارها از رابطهٔ (۲) محاسبه شد. برای سایر سطوح حجم آب آبیاری از حاصل‌ضرب ضریب تنش آبی در رابطهٔ (۲) محاسبه شد.

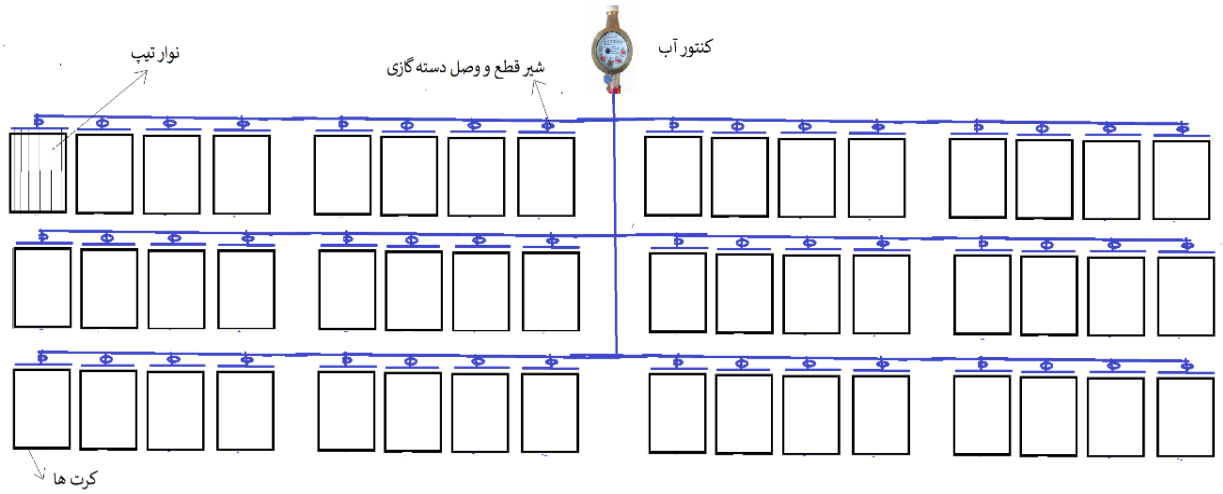
$$V = (\theta_{FC} - \theta_W) \times \rho_b \times D_r \times A \qquad (۲)$$

در این رابطه، V حجم آب ورودی بر حسب مترمکعب، θ_{FC} درصد رطوبت وزنی در حد ظرفیت مزرعه، θ_w درصد رطوبت وزنی قبل از آبیاری، ρb وزن مخصوص ظاهری خاک بر حسب گرم بر سانتی‌مترمکعب، D_r عمق توسعهٔ ریشه بر حسب متر و A مساحت آبیاری شده بر حسب مترمربع است. در جدول ۲ حجم آب مصرفی هر یک از تیمارها بر حسب لیتر طی فصل رشد گیاه ارائه شده است. هم‌چنین، در شکل ۲ نحوهٔ اجرای طرح و چینش تیمارها در قالب طرح کرت خرد شده با پایهٔ بلوک کامل تصادفی ارائه شده است.

جدول ۲- حجم آب مصرفی هر یک از تیمارها طی فصل رشد (لیتر)

Table 2- Volume of water consumed by treatments during the growing season (liter)

الگوی کشت	سطح آبیاری			
	40 درصد نیاز آبی	60 درصد نیاز آبی	80 درصد نیاز آبی	100 درصد نیاز آبی
100 درصد ذرت	2297	3296	4294	5293
100 درصد ماش	1785	2528	3270	4013
100 درصد ذرت+ 50 درصد ماش	2297	3296	4294	5293
50 درصد ذرت+ 50 درصد ماش	2085	2978	3870	4763



شکل ۲- نحوهٔ اجرای سیستم آبیاری قطره‌ای (تیپ) و چینش تیمارهای طرح

Figure 2- Micro irrigation system layout and arrangement of treatments

برای محاسبهٔ نسبت معادل زمین (LER) از رابطهٔ (۳) استفاده شد (Mead and Willey, 1980).

$$LER = \frac{Yi_{Ma}}{Ys_{Ma}} + \frac{Yi_{Mu}}{Ys_{Mu}} \quad (۳)$$

در رابطهٔ بالا، Yi_{Ma} عملکرد ذرت در شرایط کشت مخلوط، Ys_{Ma} عملکرد ذرت به‌صورت کشت تکی، Yi_{Mu} عملکرد ماش به‌صورت کشت مخلوط و Ys_{Mu} عملکرد ماش به‌صورت کشت تکی است. LER یک شاخص رایج برای ارزیابی عملکرد کشت مخلوط در مقایسه با محصولات منفرد است که بیان‌گر مزیت کاربری زمین است. وقتی LER بیش‌تر از ۱/۰ باشد، مزیت کاربری زمین در کشت مخلوط وجود دارد. این مزیت کاربری بر حسب مساحت نسبی زمین مورد نیاز بیان می‌شود. این معیار مشخص می‌کند که برای به‌دست آوردن مقدار عملکردی که از یک هکتار کشت مخلوط حاصل می‌شود، چه مقدار زمین برای زراعت منفرد مورد نیاز است (Mead and Willey, 1980). هم‌چنین، برای محاسبهٔ کارایی مصرف آب (WUE) از رابطهٔ (۴) استفاده شد.

$$WUE = \frac{Y}{WU} \quad (۴)$$

در رابطهٔ (۴)، WUE کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب)، Y عملکرد محصول (کیلوگرم) و WU حجم آب مصرفی (مترمکعب) است. هم‌چنین، مزیت مصرف آب کشت مخلوط با شاخص WER (نسبت معادل آب) بیان شد. برای محاسبهٔ نرخ برابری آب (WER) از رابطهٔ (۵) استفاده شد (Bai et al., 2016).

$$WER = \frac{\frac{Yi_{Ma}}{WUi}}{\frac{Ys_{Ma}}{WU_{Ma}}} + \frac{\frac{Yi_{Mu}}{WUi}}{\frac{Ys_{Mu}}{WU_{Mu}}} = \frac{WUEi_{Ma}}{WUEs_{Ma}} + \frac{WUEi_{Mu}}{WUEs_{Mu}} \quad (۵)$$

در رابطهٔ بالا، WUi کل حجم آب مصرفی در شرایط کشت مخلوط، WU_{Ma} حجم آب مصرفی ذرت در شرایط کشت تکی، WU_{Mu} حجم آب مصرفی ماش در شرایط کشت تکی، $WUEi_{Ma}$ کارایی مصرف جزئی آب ذرت در شرایط کشت مخلوط (عملکرد ذرت در شرایط کشت مخلوط به کل آب مصرفی در تیمار کشت مخلوط)، $WUEs_{Ma}$ کارایی مصرف آب ذرت به‌صورت کشت تکی، $WUEi_{Mu}$ کارایی مصرف جزئی آب ماش به‌صورت کشت مخلوط و $WUEs_{Ma}$ کارایی مصرف آب ماش به‌صورت کشت تکی است.

WER عبارت است از مقدار آب مورد نیاز یک تک محصول برای تولید همان عملکردی که با یک واحد آب در کشت مخلوط تولید می‌شود. WER بیش‌تر از یک نشان‌دهندهٔ مزیت مصرف آب در کشت مخلوط و WER کم‌تر نشان‌دهندهٔ ضرر مصرف آب است (یعنی عملکرد کم‌تر در واحد آب

مصرفی). اگر WER بزرگ‌تر از یک باشد، تولید هر واحد آب در سیستم مختلط بیش‌تر از سیستم‌های منفرد است. WER برای ارزیابی این‌که آیا آب در کشت مخلوط به‌طور مؤثرتری نسبت به کشت تک محصولی استفاده می‌شود، به‌کار می‌رود. WER و LER نیازی به برابری ندارند. اگر LER بیش‌تر از یک، اما WER≈1 باشد، آن‌گاه یک سیستم مختلط از نظر مساحت زمین مورد نیاز کارآمد است، اما از نظر مصرف آب کارآمد نیست. اگر یک سیستم دارای LER و WER بیش‌تر از یک باشد، کشت مخلوط به زمین کم‌تر و آب کم‌تر نیاز دارد (Bai et al., 2016).

لازم به ذکر است که تجزیهٔ داده‌های حاصل از این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار Minitab 17 و مقایسهٔ میانگین‌ها به روش آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- عملکرد و اجزای عملکرد

در جدول‌های ۳ و ۴ به‌ترتیب تجزیهٔ واریانس اثرات آبیاری و الگوی کشت بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت و ماش ارائه شده است. نتایج نشان داد که اثر آبیاری بر صفات زراعی ارتفاع بوته، عملکرد دانه و عملکرد زیستی ذرت و ماش در سطح یک درصد و بر تعداد دانه در بلال ذرت، تعداد دانه در غلاف ماش و وزن صد دانهٔ ذرت در سطح پنج درصد معنادار بود. هم‌چنین، اثر الگوی کشت بر صفات زراعی تعداد ردیف در بلال، تعداد دانه در بلال، وزن صد دانه، عملکرد و عملکرد زیستی ذرت و عملکرد زیستی ماش در سطح یک درصد و بر صفات زراعی تعداد غلاف در بوته و عملکرد دانه ماش در سطح پنج درصد معنادار بود. اثر متقابل آبیاری و الگوی کشت بر هیچ یک از صفات زراعی ذرت معنادار نبود ولی بر عملکرد دانه و عملکرد زیستی ماش معنادار بود.

جدول ۳- تجزیهٔ واریانس اثرات آبیاری و الگوی کشت بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت

Table 3- Variance analysis of the effects of irrigation and cropping pattern on corn yield and yield components

منابع تغییرات	درجهٔ آزادی	میانگین مربعات						
		ارتفاعبوته	تعداد ردیف در بلال	تعداد دانه در بلال	وزن صد دانه	عملکرد دانه	عملکرد زیستی	شاخص برداشت
بلوک	2	52.1^{ns}	0.86^{ns}	1978ns	17.58^{*}	659968ns	6413118^{**}	58.31^{ns}
آبیاری	3	2348.1^{**}	6.77**	8252*	18.91^{*}	9609068^{**}	21840001^{**}	305.15^{**}
اشتباه اصلی	6	169	0.82	3685	8.15	250531	1066271	14.86
الگوی کشت	2	184.5^{ns}	3.53^{**}	15015^{**}	33.52^{**}	5875422^{**}	40150867^{**}	40.53^{ns}
آبیاری× الگوی کشت	6	182.9^{ns}	0.71^{ns}	1509ns	3.48^{ns}	128267^{ns}	1352016^{ns}	14.16^{ns}
اشتباه فرعی	16	206.8	0.96	1768	3.65	182560	821451	17.44
CV (درصد)	-	10.59	9.13	21.92	14.48	27.08	24.62	18.14

* و ** به‌ترتیب معناداری در سطح احتمال پنج و یک درصد، ns غیرمعناداری است.

جدول ٤- تجزیهٔ واریانس اثرات آبیاری و الگوی کشت بر اجزای عملکرد دانه ماش

Table 4- Variance analysis of the effects of irrigation and cultivation pattern on the components of mung bean yield

منابع تغییرات	درجهٔ آزادی	میانگین مربعات						
		ارتفاع بوته	تعداد غلاف در بوته	تعداد دانه در غلاف	وزن هزار دانه	عملکرد دانه	عملکرد زیستی	شاخص برداشت
بلوک	2	228.6^{ns}	6038.1^{**}	3.59^{ns}	33.82^{ns}	969^{ns}	40906^{ns}	11.14^{ns}
آبیاری	3	5363.4^{**}	2732.3^{*}	2.82^{*}	11.40^{ns}	1246713^{**}	11432374^{**}	20.39^{ns}
اشتباه اصلی	6	35.7	1282.8	2.17	7.42	12266	110013	8.58
الگوی کشت	2	35.6^{ns}	3563^{*}	0.05ns	19.67^{ns}	1295009^{*}	15859388^{**}	19.38^{ns}
آبیاری× الگوی کشت	6	357.5^{ns}	323.5^{ns}	0.90ns	1.60^{ns}	55891^{**}	548607^{*}	20.70
اشتباه فرعی	16	319.4	633	1.16	11.40	4790	231720	11.39
CV (درصد)	-	28.93	24.09	20.53	7.92	18.53	22.42	12.40

* و **: به‌ترتیب معناداری در سطح احتمال پنج و یک درصد، ns: غیرمعناداری است.

در جدول ۵ مقایسهٔ میانگین صفات زراعی معنادار ذرت (صفاتی که تجزیهٔ واریانس معنادار بودند) در تیمارهای مختلف بر اساس آزمون دامنه‌ای دانکن در سطح پنج درصد ارائه شده است. نتایج نشان داد که بین همهٔ صفات زراعی ذرت از جمله عملکرد دانه، عملکرد زیستی و شاخص برداشت در سطوح آبیاری ۱۰۰ و ۸۰ درصد نیاز آبیاری تفاوت معناداری وجود نداشت. مشابه این نتایج، غیرمعنادار بودن اثر تنش ملایم بر عملکرد و اجزای عملکرد محصولات ذرت و کنجد گزارش شده

است (Sezen et al., 2011; Liu et al., 2022). بین عملکرد و عملکرد زیستی ذرت در کشت خالص ذرت و کشت مخلوط افزایشی اختلاف معناداری وجود نداشت. به‌عبارت دیگر در کشت افزایشی از یک واحد سطح ثابت علاوه‌بر برداشت ۹۱۴ کیلوگرم ماش (۵۱ درصد عملکرد ماش در حالت کشت تکی) عملکرد ذرت تغییر محسوسی نسبت به کشت ذرت تکی نکرده است (۹۸ درصد عملکرد ذرت تکی). حتی به‌علت استفاده از نیتروژن ماش عملکرد علوفه ذرت در کشت مخلوط افزایشی حدود هشت درصد بیش‌تر از کشت ذرت تکی بود. کم‌ترین عملکرد و عملکرد زیستی از کشت مخلوط جایگزینی حاصل شد. در این تیمار از ۵۰ درصد زمین ۲۷۰۰ کیلوگرم عملکرد ذرت (۶۸ درصد عملکرد ذرت تکی) و ۱۰۵۸ کیلوگرم ماش (۵۹ درصد عملکرد ماش تکی) حاصل شده است. این مسأله بیان‌گر غالب بودن ذرت بر ماش در رقابت بر سر آب است. در تحقیقی مشابه Raza et al. (2021) گزارش کردند که الگوی کشت جایگزینی منجر به عملکرد ۸۰ درصد برای ذرت و ۵۲ درصد برای سویا شده است.

جدول ۵- مقایسهٔ میانگین عملکرد و اجزای عملکرد ذرت در تیمارهای مختلف بر اساس آزمون دانکن در سطح پنج درصد

Table 5- Mean comparison of yield and yield components of maize in different treatments based on Duncan's test at the 5% level

	تیمارها	ارتفاع بوته (سانتی‌متر)	تعداد ردیف در بلال	تعداد دانه در بلال	وزن صد دانه (گرم)	عملکرد دانه (کیلوگرم بر هکتار)	عملکرد زیستی (کیلوگرم بر هکتار)	شاخص برداشت
سطوح آبیاری (درصد نیاز رطوبتی)	40	160.4b	12.1b	223.6b	17.7b	2097.3c	7253.3c	28.6b
	60	177.2ab	13.2ab	261.8ab	20.7a	3404.8b	9263.7b	37.1a
	80	195.3a	14a	287.2a	20.8a	4086.4a	10104.4ab	40.6a
	100	192.9a	13.9a	288a	19.9ab	4439.5a	10869.6a	41.2a
الگوی کشت	100 درصد ذرت	ns	13.1b	238.1b	19.9ab	3945.8a	9980a	ns
	100 درصد ذرت+ 50 درصد ماش	ns	13.2b	252.2b	18.1b	3875.1a	10821.1a	ns
	50 درصد ذرت+ 50 درصد ماش	ns	14a	305.2a	21.4a	2700b	7317.2b	ns

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون، بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد، اختلاف معناداری ندارند.

در جدول ۶ مقایسهٔ میانگین صفات زراعی معنادار ماش (صفاتی که تجزیهٔ واریانس معنادار بودند) در تیمارهای مختلف بر اساس آزمون دامنه‌ای دانکن در سطح پنج درصد ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که بین صفات زراعی ارتفاع بوته، تعداد غلاف در بوته و تعداد دانه در غلاف ماش در سطوح آبیاری ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبیاری تفاوت معناداری وجود نداشت. اثر الگوی کشت‌های مختلف فقط روی تعداد غلاف بر بوته معنادار بود.

جدول ٦- مقایسهٔ میانگین عملکرد و اجزای عملکرد ماش در تیمارهای مختلف بر اساس آزمون دانکن در سطح پنج درصد

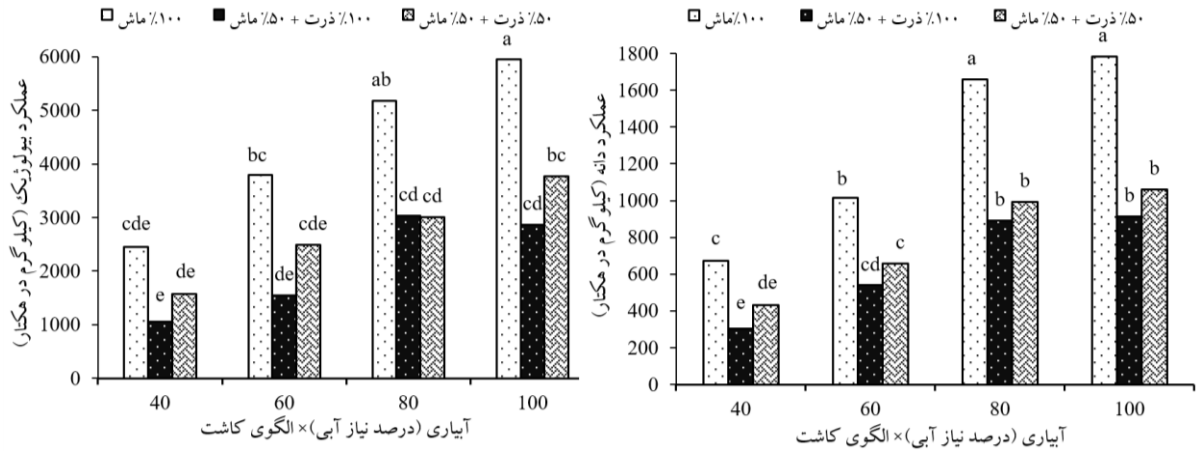
Table 6- Mean comparison of yield and yield components of mung beans in different treatments based on Duncan's test at the 5% level

تیمارها		ارتفاع بوته (سانتی‌متر)	تعداد غلاف در بوته	تعداد دانه در غلاف
سطوح آبیاری (درصد نیاز رطوبتی)	40	56.33b	36.89b	5.28b
	60	90.11a	48.67ab	5.80ab
	80	107.89a	71.33a	6.24a
	100	108.33a	72.22a	6.57a
الگوی کشت	100 درصد ماش	ns	76.75a	ns
	100 درصد ذرت+ 50 درصد ماش	ns	44b	ns
	50 درصد ذرت+ 50 درصد ماش	ns	51.08ab	ns

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون، بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد، اختلاف معناداری ندارند.

همان‌طورکه پیش‌تر بیان شد (جدول ۴) اثر متقابل آبیاری در الگوی کشت روی پارامترهای عملکرد دانه و عملکرد زیستی معنادار بود. در شکل ۳ مقایسهٔ میانگین اثرات متقابل الگوی کشت و آب آبیاری بر عملکرد و عملکرد زیستی ماش بر اساس آزمون دانکن در سطح پنج درصد ارائه شده است. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار آب آبیاری، عملکرد و عملکرد زیستی افزایش پیدا می‌کند، ولی بین سطوح ۱۰۰ و ۸۰ درصد نیاز آبیاری تفاوت معناداری وجود نداشت. در همهٔ سطوح آبیاری عملکرد و عملکرد زیستی کشت خالص ماش به‌طور معناداری بیش‌تر از کشت مخلوط بود. در سطوح آبیاری ۱۰۰ و ۸۰ درصد نیاز آبی بین عملکرد و عملکرد زیستی ماش در کشت مخلوط افزایشی و جایگزینی تفاوت معنادار وجود نداشت، ولی در سطوح ۶۰ و ۴۰ درصد، عملکرد و عملکرد زیستی ماش در کشت جایگزینی (۵۰ درصد ذرت + ۵۰ درصد ماش) به‌طور معناداری

بیش‌تر از کشت مخلوط افزایشی (۱۰۰ درصد ذرت + ۵۰ درصد ماش) بود. این مسأله بیان‌گر غالب بودن ذرت در کم آبیاری‌ها و رقابت شدید برای آب در تنش‌های خشکی است.



شکل ۳- مقایسهٔ میانگین اثر متقابل الگوی کشت و آب آبیاری بر عملکرد و عملکرد زیستی ماش بر اساس آزمون دانکن در سطح پنج درصد

Figure 3- Mean comparison of the interaction effect of cropping pattern and irrigation water on mung bean yield and biomass based on Duncan's test at 5% level

۳-۲- نسبت برابری زمین

برای بررسی کارایی کشت مخلوط، نسبت برابری زمین به‌عنوان یک معیار مهم استفاده می‌شود. نتایج این آزمایش نشان داد که در الگوهای کشت مخلوط افزایشی و جایگزینی ذرت و ماش در همهٔ سطوح آبیاری، مقدار این شاخص بیش‌تر از یک بود که این امر نشان‌دهندهٔ سودمندی اجرای الگوهای کشت مخلوط در افزایش بهره‌وری از منابع است (جدول ۷). بیش‌ترین مقدار نسبت برابری زمین به‌میزان ۱/۵۶ و ۱/۵۲ به‌ترتیب در کشت مخلوط افزایشی در ۸۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی به‌دست آمد که معادل ۵۶ و ۵۲ درصد افزایش سودمندی زراعی نسبت به کشت خالص دو گونه بود (جدول ۷). تفاوت در ریشه‌دهی و ساختار کانوپی ذرت با ماش و در نتیجه ایجاد لایه‌های مختلف و استفادهٔ بهتر از منابع از جمله نور و مواد غذایی در عمق‌های مختلف خاک، می‌تواند دلیل نسبت برابری زمین بیش‌تر باشد که نشان می‌دهد در کشت مخلوط، ذرت و ماش مکمل هم بوده‌اند. اختلافات مورفولوژیکی غلات و بقولات و در نتیجه ایجاد اشکوب‌های مختلف و استفادهٔ مکملی از منابع، بهره‌برداری بهتر از نور و یا افق‌های مختلف خاک می‌تواند دلیل نسبت برابری زمین بیش‌تر از یک باشد. افزایش نسبت برابری زمین در کشت مخلوط جو و نخود (Chapagain and Riseman, 2014)، ارزن دم‌روباهی و ماش (Khatamipour et al., 2014)، کشت مخلوط ذرت و لوبیا (Nassary et al., 2020) و کشت مخلوط ذرت و سویا (Wang et al., 2022) نیز گزارش شده است.

جدول ۷- نسبت برابری زمین تحت شرایط مختلف آبیاری در الگوی کشت‌های مخلوط ذرت و ماش

Table 7- Land equivalent ratio under different irrigation conditions and intercropping patterns of maize and mung beans

الگوی کشت	مخلوط افزایشی (100 درصد ذرت + 50 درصد ماش)				مخلوط جایگزینی (50 درصد ذرت + 50 درصد ماش)			
آبیاری (درصد نیاز آبی)	40	60	80	100	40	60	80	100
LER جزیی ذرت	0.81b	0.99a	1.04a	1.01a	0.56d	0.67cd	0.75bc	0.7bc
LER جزیی ماش	0.45c	0.5bc	0.52bc	0.51bc	0.64a	0.64a	0.6ab	0.59ab
LER کل	1.26c	1.49ab	1.56a	1.52a	1.2c	1.31c	1.35bc	1.29c

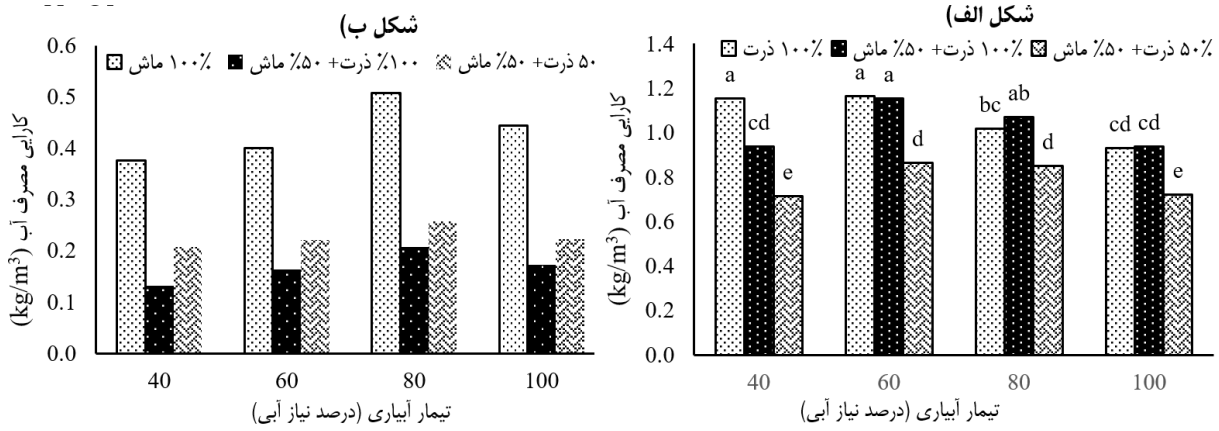
میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ردیف، بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد، اختلاف معناداری ندارند.

۳-۳- کارایی مصرف آب و نسبت برابری آب

در شکل ۴ کارایی مصرف آب در تیمارهای مختلف کشت مخلوط بر حسب نسبت عملکرد دانه به آب مصرفی ارائه شده است. نتایج نشان داد که کارایی مصرف آب کشت ماش در دو الگوی کشت مخلوط افزایشی و مخلوط جایگزینی به‌طور معناداری کم‌تر از کشت تکی ماش است (شکل ۴-ب). بهره‌وری آب ماش در کشت مخلوط جایگزینی به‌طور متوسط ۲۳ درصد بیش‌تر از کشت مخلوط افزایشی است. بیش‌ترین بهره‌وری آب ماش در سطح آبیاری ۸۰ درصد نیاز آبی و کشت تکی (۰/۵۱ کیلوگرم بر مترمکعب) اتفاق افتاد. بهره‌وری آب

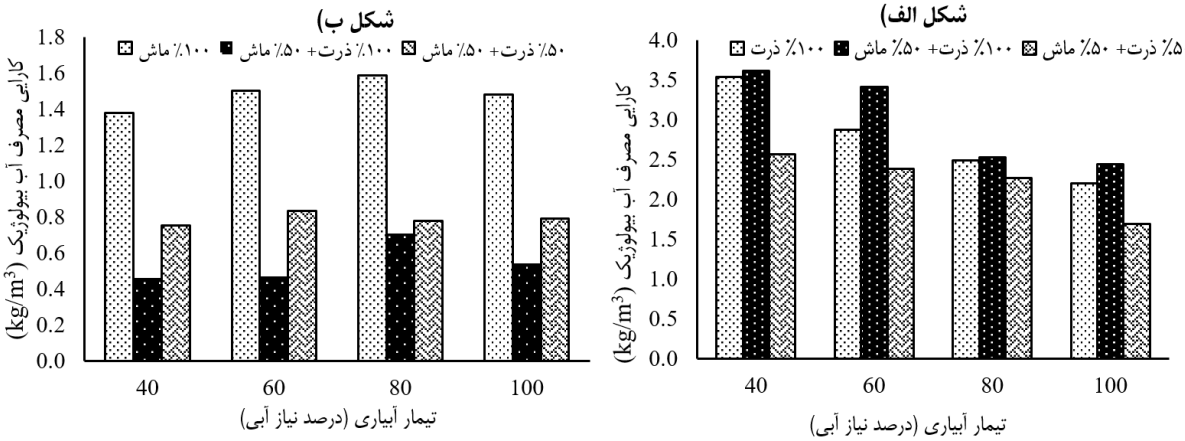
ماش در سطح آبی ۸۰ درصد به‌طور معناداری از سایر سطوح آبی بیش‌تر بود. Raza et al. (2021) نشان دادند که بهره‌وری آب سویا در کشت مخلوط ذرت و سویا به‌طور معناداری از بهره‌وری آب کشت تکی سویا کم‌تر است، که از این نظر مشابه مطالعهٔ حاضر است. هم‌چنین، نتایج نشان داد که بهره‌وری آب ذرت در همهٔ الگوهای کشت با افزایش مقدار مصرف آب آبیاری کاهش پیدا می‌کند. بین بهره‌وری آب کشت مخلوط افزایشی و کشت تکی ذرت اختلاف معناداری وجود نداشت، اما بهره‌وری آب کشت مخلوط جایگزینی دارای تفاوت معنادار با دو الگوی کشت دیگر بود. در تحقیقی مشابه Wang et al. (2022) نشان دادند که کشت مخلوط ذرت با سویا باعث افزایش بهره‌وری آب ذرت در کشت مخلوط افزایشی می‌شود.

از آن‌جایی‌که یکی از اهداف تولید ذرت بحث علوفه و سیلو است، بهره‌وری آب کشت مخلوط بر حسب عملکرد زیستی نسبت به آب مصرفی هم مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۵). نتایج نشان داد که با افزایش مقدار آب مصرفی بهره‌وری آب بر حسب وزن اندام هوایی به‌طور معنادار کاهش پیدا می‌کند. در همهٔ سطوح آبیاری کشت مخلوط افزایشی دارای بهره‌وری آب بیش‌تری است. علت افزایش بهره‌وری آب در کشت مخلوط افزایشی نسبت به کشت تکی را می‌توان در تأثیر نیتروژن تثبیت شده توسط ماش بر وزن اندام هوایی ذرت (علوفه) دانست (Bai et al., 2016). در مورد ماش به‌علت رقابت بر سر آب بهره‌وری آب در کشت مخلوط افزایشی (۱۰۰ درصد ذرت + ۵۰ درصد ماش) به‌طور معنادار کاهش پیدا کرده است.



شکل ٤- کارایی مصرف آب دانه ذرت (شکل الف) و ماش (شکل ب) در شرایط مختلف آبیاری و الگوی کشت

Figure 4- water use efficiency of maize (A figure) and mung bean (B figure) under different irrigation conditions and cropping pattern



شکل ٥- کارایی مصرف آب زیستی ذرت (شکل الف) و ماش (شکل ب) تحت شرایط مختلف آبیاری و الگوی کشت

Figure 5- Biological water use efficiency of maize (A figure) and mung bean (B figure) under different irrigation conditions and cropping pattern

برای بررسی اثر کشت مخلوط بر کارایی مصرف آب معمولاً از شاخص نرخ برابری آب (WER) استفاده می‌شود. شاخص WER مشخص می‌کند که آیا عملکرد کشت مخلوط ذرت و ماش با آب بیش‌تر (WER<1) یا کم‌تر (WER>1) از کشت تکی ذرت و ماش تولید می‌شود. در جدول ۸ مقادیر نسبت برابری آب در کشت مخلوط ذرت و ماش تحت شرایط مختلف آبیاری بر اساس عملکرد ارائه شده است. نتایج نشان داد که نسبت برابری آب در همهٔ سطوح آبی و دو الگوی کشت مخلوط بیش‌تر از یک بود که بیان‌گر برتری کشت مخلوط با مقدار آب کم‌تر نسبت به کشت تکی است. مقدار WER کشت مخلوط افزایشی در همهٔ سطوح آبیاری بیش‌تر از کشت جایگزینی بود. هم‌چنین، نتایج نشان داد که بیش‌ترین WER به مقدار ۱/۴۶ مربوط به تیمار کشت مخلوط افزایشی با سطح آب مصرفی ۸۰ درصد است. مقایسهٔ دو شاخص LER (جدول ۷) و WER نشان داد که به‌طورکلی کشت مخلوط باعث استفاده کاراتر از آب و زمین می‌شود. هم‌چنین، نتایج نشان داد که بیش‌ترین LER و WER در کشت مخلوط افزایشی و سطح آبیاری ۸۰ درصد اتفاق افتاده است. بنابراین، کشت مخلوط افزایشی و استفاده از سطح آبیاری ۸۰ درصد باعث کارآمدترین استفاده از منابع آب و زمین می‌شود.

جدول ۸- نسبت برابری آب در کشت مخلوط ذرت و ماش تحت شرایط مختلف آبیاری بر اساس عملکرد

Table 8- Water equivalent ratio under different irrigation conditions and intercropping patterns of maize and mung beans

الگوی کشت	مخلوط افزایشی (100 درصد ذرت + 50 درصد ماش)				مخلوط جایگزینی (50 درصد ذرت + 50 درصد ماش)			
آبیاری (درصد نیاز آبی)	40	60	80	100	40	60	80	100
WER جزیی ذرت	0.81b	1.00a	1.05a	1.01a	0.62c	0.74bc	0.84b	0.78b
WER جزیی ماش	0.35c	0.41bc	0.41bc	0.39c	0.41bc	0.55a	0.51ab	0.50ab
WER کل	1.16cd	1.41ab	1.46a	1.40ab	1.03d	1.29bc	1.34ab	1.28bc

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ردیف، بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد، اختلاف معناداری ندارند.

۴- نتیجه‌گیری

استفادهٔ بهینه از منابع آب و زمین یکی از مهم‌ترین راه‌کارهای دست‌یابی به امنیت پایدار غذایی به‌ویژه در شرایط محدودیت منابع آب و خاک کشور است. در این راستا، کشت مخلوط غلات–حبوبات یکی از راه‌کارهای کارا و پایدار برای استفاده بهینه از منابع آب و خاک است. در این مطالعه اثر الگوی کشت‌های مختلف کشت مخلوط ذرت–ماش در شرایط مختلف تنش آبی بر عملکرد، اجزای عملکرد و بهره‌وری آب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد کشت مخلوط در همهٔ الگوهای کشت و شرایط تنشی دارای WER و LER بیش‌تر از کشت تکی ذرت و ماش بود که بیان‌گر مصرف آب کم‌تر و استفاده از زمین کم‌تر برای تولید عملکرد مشابه است. نتایج این مطالعه نشان داد که با به‌کارگیری کشت مخلوط و مدیریت بهینهٔ مصرف آب می‌توان با ۴۵ درصد آب کم‌تر و ۵۶ درصد زمین کم‌تر به عملکردی مشابه کشت تک محصولی دست یافت. بنابراین، سیستم کشت مخلوط یک سیستم کشت سودمند برای پایداری تولید و بهبود بهره‌وری آب و استفاده از زمین است. با این حال، تحقیقات بیش‌تری برای درک مکانیسم چگونگی جذب منابع توسط گونه‌های مخلوط در سیستم‌های کشت مخلوط به‌ویژه در شرایط اقلیمی مختلف مورد نیاز است. هم‌چنین، پیشنهاد می‌شود در زمینهٔ مدیریت کوددهی، آبیاری و کنترل آفات و پذیرش کشاورزان مطالعات جامعی انجام شود.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از همکاری و مساعدت دانشگاه ایلام در انجام مراحل مختلف پژوهش از جمله در اختیار قرار دادن زمین، آب، سیستم آبیاری و تجهیزات آزمایشگاهی قدردانی می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

مشارکت نویسندگان

سمیه میری: نگارش–تهیه پیش‌نویس اصلی؛ **حمزه‌علی علیزاده:** مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، منابع، نرم‌افزار، ویرایش مقاله؛ **یاسر علی‌زاده:** تحلیل و بررسی؛ **اخلاص امینی:** بررسی و نظارت.

منابع

خاتمی‌پور، موسی، اصغری پور، محمدرضا و سیروس مهر، علیرضا (۱۳۹۳). سودمندی کشت مخلوط ارزن دم روباهی (Setaria italica) و ماش (Vigna radiata) در شرایط مصرف سطوح مختلف کود دامی. *دانش کشاورزی و تولید پایدار*، ۲۴(۳)، ۷۵–۸۶. https://journals.tabrizu.ac.ir/article_2731.html

خواجه خضری، عطیه، رضایی استخرویه، عباس و گلستانی کرمانی، سودابه (۱۳۹۷). ارزیابی اثرات کم آبیاری متناوب و منظم بر

عملکرد و برخی از اجزای آن در کشت مخلوط (سورگوم–لوبیا قرمز). *علوم و مهندسی آبیاری*، ۴۱(۲)،۷۷-۹۲. doi: 10.22055/jise.2018.13614

References

Amani Machiani, M., Javanmard, A., Morshedloo, M.R. & Maggi, F. (2018). Evaluation of competition, essential oil quality and quantity of peppermint intercropped with soybean. *Industrial Crops and Products, 111*, 743-754. doi: 10.1016/j.indcrop.2017.11.052.

Bai, W., Sun, Z., Zheng, J., Du, G., Feng, L., Cai, Q., Yang, N., Feng, C., & Zhang, L. (2016). Mixing trees and crops increases land and water use efficiencies in a semi-arid area. *Agricultural Water Management*, *178*, 281-290. doi:10.1016/j.agwat.2016.10.007.

Bedoussac, L., & Justes, E. (2010). Dynamic analysis of competition and complementarity for light and N use to understand the yield and the protein content of a durum wheat–winter pea intercrop. *Plant and Soil*, *330*, 37-54. doi: 10.1007/s11104-010-0303-8.

Belay, D., Schulthess, F., & Omwega, C. (2009). The profitability of maize–haricot bean intercropping techniques to control maize stem borers under low pest densities in Ethiopia. *Phytoparasitica*, *37*, 43-50. doi: 10.1007/s12600-008-0002-7.

Brooker, R.W., Bennett, A.E., Cong, W.F., Daniell, T.J., George, T.S., Hallett, P.D., Hawes, C., Iannetta, P.P., Jones, H.G., Karley, A.J. & Li, L. (2015). Improving intercropping: a synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology. *New Phytologist, 206*(1), 107-117. doi: 10.1111/nph.13132.

Chapagain, T., & Riseman, A. (2014). Barley–pea intercropping: Effects on land productivity, carbon and nitrogen transformations. *Field Crops Research*, *166*, 18-25. doi:10.1016/ j.fcr.2014.06.014.

Chen, G., Kong, X., Gan, Y., Zhang, R., Feng, F., Yu, A., Zhao, C., Wan, S., & Chai, Q. (2018). Enhancing the systems productivity and water use efficiency through coordinated soil water sharing and compensation in strip-intercropping. *Scientific Reports*, *8*(1), *1-11*. doi:10.1038/s41598-018-28612-6.

Echarte, L., Della Maggiora, A., Cerrudo, D., Gonzalez, V.H., Abbate, P., Cerrudo, A., Gonzalez, V.H., Abbate, P., Sadras, V.O., & Calvino, P. (2011). Yield response to plant density of maize and sunflower intercropped with soybean. *Field Crops Research*, *121*(3), 423-429. doi: 10.1016/j.fcr.2011.01.011.

Gitari, H.I., Gachene, C.K., Karanja, N.N., Kamau, S., Nyawade, S., Sharma, K., & Schulte-Geldermann, E. (2018). Optimizing yield and economic returns of rain-fed potato (Solanum tuberosum L.) through water conservation under potato-legume intercropping systems. *Agricultural Water Management*, *208*, 59-66. doi:10.1016/j.agwat.2018.06.005.

Hu, F., Feng, F., Zhao, C., Chai, Q., Yu, A., Yin, W., & Gan, Y. (2017). Integration of wheat-maize intercropping with conservation practices reduces CO_2 emissions and enhances water use in dry areas. *Soil and Tillage Research*, *169*, 44-53. doi:10.1016 /j.still.2017.01.005.

Khajeh Khezri , A., Estakhroeih, A.R., & Kermani, S.G. (2018). Evaluating the effects of alternative and regulated deficit irrigation on yield and some components in intercropping (Sorghum–Red bean). *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, *41*(2), 77-92. doi: 10.22055/jise.2018.13614 .[In Persian]

Khatamipour, M., Asgharipour, M.R., & Sirousmehr, A.R. (2014). Intercropping benefits of foxtail millet with mung bean as influenced by application of different manure levels. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*. *24*(3), 75-86. https://journals.tabrizu.ac.ir/article_2731.html .[In Persian]

Kanton, R.A.L., & Dennett, M.D. (2004). Water uptake and use by morphologically contrasting maize/pea cultivars in sole and intercrops in temperate conditions. *Experimental Agriculture*, *40*(2), 201-214. doi:10.1017/S0014479703001571.

Kumawat, A., Bamboriya, S.D., Meena, R.S., Yadav, D., Kumar, A., Kumar, S., Raj, A., & Pradhan, G. (2022). Legume-based inter-cropping to achieve the crop, soil, and environmental health security. *Advances in Legumes for Sustainable Intensification*, *307-328*. doi: 10.1016/B978-0-323-85797-0.00005-7.

Lithourgidis, A.S., Vlachostergios, D.N., Dordas, C. A., & Damalas, C.A. (2011). Dry matter yield, nitrogen content, and competition in pea–cereal intercropping systems. *European Journal of* Agronomy, *34*(4), 287-294. doi:10.1016/j.eja.2011.02.007.

Liu, M., Wang, G., Liang, F., Li, Q., Tian, Y., & Jia, H. (2022). Optimal irrigation levels can improve maize growth, yield, and water use efficiency under drip irrigation in northwest China. *Water*, *14*(23*), 3822*. doi:10.3390/ w14233822.

Liu, X., Rahman, T., Song, C., Yang, F., Su, B., Cui, L., Bu, W., & Yang, W. (2018). Relationships among light distribution, radiation use efficiency and land equivalent ratio in maize-soybean strip

intercropping. *Field Crops Research*, *224*, 91-101. doi:10.1016/j.fcr.2018.05.010.

Mead, R., & Willey, R. (1980). The concept of a land equivalent ratio'and advantages in yields from intercropping. *Experimental Agriculture 16*(3), 217-228. doi:10.1017/S0014479 700010978.

Morris, R.A., & Garrity, D.P. (1993). Resource capture and utilization in intercropping: water. *Field Crops Research*, *34*(3-4), 303-317. doi:10.1016/0378-4290(93)90119-8.

Musa, M., Leitch, M.H., Mazher, I., & Fayyaz-ul-Hassan, S. (2010). Spatial arrangement affects growth characteristics of barley-pea intercrops. *International Journal of Agriculture and Biology*, *12*(5), 685-690. doi: 1814–9596 09–440/MFA/2010/12–5–685–690.

Nassary, E.K., Baijukya, F., & Ndakidemi, P.A. (2020). Productivity of intercropping with maize and common bean over five cropping seasons on smallholder farms of Tanzania. *European Journal of Agronomy*, *113*, 125964. doi:10.1016/j.eja.2019.125964.

Raza, M.A., Bin Khalid, M.H., Zhang, X., Feng, L. Y., Khan, I., Hassan, M.J., Ahmed, M., Ansar, M., Chen, Y.K., Fan, Y.F., & Yang, W. (2019). Effect of planting patterns on yield, nutrient accumulation and distribution in maize and soybean under relay intercropping systems. *Scientific Reports*, *9*(1), 4947. doi:10.1038/s41598-019-41364-1.

Raza, M.A., Gul, H., Wang, J., Shehryar Yasin, H., Qin, R., Hayder Bin Khalid, M., Muhammd Naeem, M., Feng, L.Y., Iqbal, N., Gitari, H., Ahmad, S., (2021). Land productivity and water use efficiency of maize-soybean strip intercropping systems in semi-arid areas: A case study in Punjab Province, Pakistan. *Journal of Cleaner Production*, *308*, 127282. doi:10.1016/j.jclepro.2021.127282.

Ren, J., Zhang, L., Duan, Y., Zhang, J., Evers, J.B., Zhang, Y., Su, Z., & Van Der Werf, W. (2019). Intercropping potato (Solanum tuberosum L.) with hairy vetch (Vicia villosa) increases water use efficiency in dry conditions. *Field Crops Research*, *240*, 168-176. doi:10.1016/j.fcr.2018.12.002.

Salama, H., El-Karamity, D.E.S., & Nawar, A.I. (2016). Additive intercropping of wheat, barley, and faba bean with sugar beet: Impact on yield, quality and land use efficiency. *Egyptian Journal of Agronomy*, *38*(3), 413-430. doi: 10.21608/AGRO.2016.1277.

Sezen, S.M., Yazar, A., & Tekin, S. (2011). Effects of partial root zone drying and deficit irrigation on yield and oil quality of sunflower in a Mediterranean environment. *Irrigation and Drainage*, *60*(4), 499-508. doi:10.1002/ird.607.

Takim, F.O. (2012). Advantages of maize-cowpea intercropping over sole cropping through competition indices. *Journal of Agriculture and Biodiversity Research*, *1*(4), 53-59. http://www.onlineresearchjournals.org/JABR.

Tanwar, S.P.S., Rao, S.S., Regar, P.L., Datt, S., Kumar, P., Jodha, B.S., Santra, P., Kumar, R., & Ram, R. (2014). Improving water and land use efficiency of fallow-wheat system in shallow Lithic Calciorthid soils of arid region: Introduction of bed planting and rainy season sorghum–legume intercropping. *Soil and Tillage Research*, *138*, 44-55. doi:10.1016/j.still.2013.12.005.

Temesgen, A., Fukai, S., & Rodriguez, D. (2015). As the level of crop productivity increases: Is there a role for intercropping in smallholder agriculture. *Field Crops Research*, *180*, 155-166. doi: 10.1016/j.fcr.2015.06.003.

Teng, Y.Y., Zhao, C., Chai, Q., Hu, F.L., & Feng, F.X. (2016). Effects of postponing nitrogen topdressing on water use characteristics of maize-pea intercropping system. *Acta Agronomica Sinica*, *42*(3), 446-455. doi: 10.3724/SP.J.1006.2016.00446.

Wang, J.Y., Mo, F., Nguluu, S.N., Zhou, H., Ren, H.X., Zhang, J., Kariuki, C.W., Gicheru, P., Kavaji, L., Xiong, Y.C., & Li, F.M. (2016). Exploring micro-field water-harvesting farming system in dryland wheat (Triticum aestivum L.): An innovative management for semiarid Kenya. *Field Crops Research*, *196*, 207-218. doi.org/10.1016/j.fcr.2016.07.001

Wang, W., Li, M.Y., Gong, D.S., Zhou, R., Khan, A., Zhu, Y., Zhu, H., Abrar, M., Zhu, S.G., Wang, B.Z. & Song, C. (2022). Water use of intercropped species: maize-soybean, soybean-wheat and wheat-maize. *Agricultural Water Management*, *269*, 107690. doi:10.1016/j.agwat.2022.107690.

Willey, R.W. (1990). Resource use in intercropping systems. *Agricultural Water Management*, *17*(1-3), 215-231. doi:10.1016/0378-3774(90)90069.

Yin, W., Chai, Q., Zhao, C., Yu, A., Fan, Z., Hu, F., Fan, H., Guo, Y. & Coulter, J.A., (2020). Water utilization in intercropping: A review. *Agricultural Water Management*, *241*, 106335. doi:10.1016/j.agwat.2020.106335.

Yin, W., Chen, G.P., Feng, F.X., Guo, Y., Hu, F.L., Chen, G.D., Zhao, C., Yu, A.Z., & Chai, Q. (2017). Straw retention combined with plastic mulching improves compensation of intercropped maize in arid environment. *Field Crops Research*, *204*, 42–51. doi:10.1016/j.fcr.2017.01.005.

Yin, W., Fan, Z.L., Hu, F.L., Fan, H., Yu, A.Z., Zhao, C., & Chai, Q. (2019a). Straw and plastic mulching enhances crop productivity via optimizing interspecific interactions of wheat–maize intercropping in arid areas. *Crop Science*, *59*(5), 2201-2213. doi:10.2135/ cropsci2019.02.0082.

Yin, W., Yu, A., Chai, Q., Hu, F., Feng, F., & Gan, Y. (2015). Wheat and maize relay-planting with straw covering increases water use efficiency up to 46%. *Agronomy for Sustainable Developmen*t, *35*(2), 815-825. doi: 10.1007/s13593-015-0286-1.

Yin, W., Fan, Z.L., Hu, F.L., Yu, A.Z., Zhao, C., Chai, Q., & Coulter, J.A. (2019b). Innovation in alternate mulch with straw and plastic management bolsters yield and water use efficiency in wheat-maize intercropping in arid conditions. *Scientific Reports*, *9*(1), 6364. doi: 10.1038/s41598-019-42790.