مدیریت آب و آبیاری
دوره ۱۲ ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۴۰۱
صفحه‌های ۶۵۷-۶۴۵
DOI: 10.22059/jwim.2022.342246.988

مقاله پژوهشی:

اثر متقابل کم‌آبیاری و مالچ بر روی عملکرد و بهره‌وری آب محصول ریحان با استفاده از تئوری الاستیسته

شهلا عباس بیگی[۱]، محمود مشعل[۲*]، علی رحیمی خوب[۳]
۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران
۲. دانشیار، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران
۳. استاد، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۱۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۳۰

چکیده
یکی از روش‌های کاهش مصرف و افزایش بهره‌وری آب استفاده هم‌زمان از مالچ و کم‌آبیاری می‌باشد. بررسی اثر مالچ و سطوح مختلف آبیاری بر روی بهره‌وری آب گیاه ریحان، آزمایشی در قالب کرت‌های خردشده اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل چهار سطح مختلف آبیاری و دو عامل خاک در دو فصل کشت بود. برای تعیین حداکثر عملکرد محصول و بهره‌وری آب از تئوری الاستیسته استفاده شد. در تئوری الاستیسته با مشتق‌گیری از تابع تولید شاخص بازده مصرف آب حاشیه‌ای و شاخص الاستیسته تعیین می‌شود. نتایج در فصل اول کشت نشان داد که در شرایط حداکثر عملکرد محصول، عملکرد محصول در خاک مالچ‌دار حدود ۱۹ درصد بیش‌تر از خاک معمولی می‌باشد، در حالی‌که مصرف آب نیز حدود ۲۸ درصد در خاک مالچ‌دار کم‌تر شد و در کل حدود ۵۰ درصد بهره‌وری آب افزایش پیدا کرد. در شرایط کم‌آبیاری بهترین عملکرد ماده خشک به میزان ۱۱۸ گرم بر مترمربع، نیاز آبی به مقدار ۶۷ میلی‌متر و بهره‌وری آب ۱/۶۷ گرم بر لیتر در پوشش خاک با مالچ به‌دست آمد. این در حالی است که این مقادیر برای خاک معمولی به‌ترتیب ۹۶/۷ گرم بر مترمربع، ۸۰/۲ میلی‌متر و ۱/۲۱ گرم بر لیتر به‌دست آمد. نتایج در فصل دوم کشت نیز مشابه کشت اول بود و نشان داد عملکرد محصول، نیاز آبی و بهره‌وری آب در خاک مالچ‌دار ارتقا پیدا کرده است. نتایج این آزمایش نشان داد استفاده از پوشش مالچ بر روی خاک و کم‌آبیاری موجب افزایش بهره‌وری آب و عملکرد محصول ریحان شد.

کلیدواژه‌ها: بهره‌وری مصرف آب، ریحان، کم‌آبیاری، مالچ.

Interaction of water deficit and mulch on the yield and water use efficiency in basil using elasticity theory

Shahla Abbasbeigi[1], Mahmoud Mashal[2*], Ali Rahimikhoob[3]
1. Ph. D. Student, Department of Water Engineering, Aburaihan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran
2. Associate Professor, Department of Water Engineering, Aburaihan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran.
3. Professor, Department of Water Engineering, Aburaihan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran
Received: May 05, 2022 Accepted: August 21, 2022

Abstract
One of the ways to reduce water consumption and increase water productivity is to simultaneous use mulch and deficit irrigation. For studying the effect of mulch and different levels of irrigation on water use efficiency of Basil, a split plot experiment based on randomized complete block design was conducted. The experimental treatments consisted of four different irrigation levels; and two soil factors in two seasons of cultivation. The elasticity theory was used to determine the maximum product yield and water productivity. In the theory of elasticity, marginal water consumption efficiency index and elasticity index are determined by deriving from the production function. The results of the first season showed that in the conditions of maximum yield, the yield of the product in mulched soil was about 19% higher than the normal soil, while water consumption was reduced by 28% in the mulch, and in total about 50% of water productivity has increased. In deficit irrigation condition, the best dry matter yield, water requirement and water productivity were 118 gr/m^2, 67 mm and 67.1 gr/lit in soil covered with mulch respectively; while these values for uncovered soil were 96.7 gr/ m^2, 80.2 mm and 21.1 gr /lit respectively. The results in the second season of cultivation were similar to those of the first cultivar and indicated that the yield of the product, water requirement and water productivity in the mulch was increased. The results of the experiment showed by applying mulch on the soil surface and using deficit irrigation strategy, water use efficiency and yield productivity of basil increased.

Keywords: Basil, Deficit irrigation, Mulch, Water productivity.

* نویسنده مسئول
Email: mmashal@ut.ac.ir

مقدمه

کشت آبی در حال حاضر و در آینده در شرایط کمبود آب انجام خواهد شد. ناکافی‌بودن منابع آب برای آبیاری به یک اصل تبدیل شده و مدیریت آبیاری از تأکید بر روی افزایش عملکرد در واحد سطح به بیشینه‌سازی محصول در واحد آب مصرفی که همان بهره‌وری آب[1] است تغییر یافته است (Fereres & Soriano, 2006). بهره‌وری آب از حاصل تقسیم محصول گیاه به آب مصرف‌شده در گیاه به‌دست می‌آید و یک شاخص فراگیر است که معرف کل راندمان مصرف آب در گیاه است (Liu *et al*., 2010). این شاخص معمولاً برای ارزیابی و بهبود مدیریت آب برای اطمینان از حداکثر استفاده از منابع آب استفاده می‌شود (Liu *et al*., 2010). لذا هرگونه فعالیتی که منجر به افزایش عملکرد محصول در واحد آب مصرفی شود، باعث بهبود بهره‌وری آب می‌شود. یک استراتژی مهم برای افزایش بهره‌وری آب، استفاده از تکنیک کم‌آبیاری[2] است که با هدف کاهش آب مصرفی اعمال می‌شود (Fereres & Soriano, 2006). بسیاری از پژوهش‌گران پی بردند که کاهش عملکرد محصول که درنتیجه اعمال کم‌آبیاری اتفاق می‌افتد به‌واسطه مزایای کاهش آب مصرفی جبران می‌شود (English & Raja, 1996; Karam *et al*., 2006; Karam *et al*., 2003). در کم‌آبیاری، آب کم‌تر از آبیاری کامل در طی دوره رشد به زمین داده می‌شود، اما در یک سطحی بهینه از کم‌آبیاری، بیش‌ترین عملکرد محصول به‌ازای آب مصرفی برداشت می‌شود و بهره‌وری آب در این سطح بیش‌ترین مقدار را دارد (Geerts & Raes, 2009). استفاده بهینه از آب یکی از محورهای اصلی کشاورزی پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک است (Ahmadi Saraeilani *et al*., 2020). در پژوهشی نشان داده شد که در شرایط کاهش ۱۰ درصدی در مصرف آب نسبت به آبیاری کامل بیش‌ترین درآمد خالص نصیب کشاورز می‌شود (Mashal *et al*., 2009). در پژوهشی دیگر نشان داده شد تیمار کم‌آبیاری در سطح ۷۵ درصد اثر مخرب بر روی گیاه شب‌بو نداشته و باعث افزایش معنی‌دار کارایی مصرف آب در سطح یک درصد شد (Azadegan *et al*., 2022).

آب مصرفی گیاه طی دو فرایند اصلی شکل می‌گیرد؛ یکی تلفات تبخیر از خاک و گیاه که تبخیر- تعرق (ET) نامیده می‌شود و دیگری شامل تلفات ناشی از توزیع آب در زمین است (Fereres & Soriano, 2006). کاهش تبخیر- تعرق بدون کاهش عملکرد محصول اتفاق نمی‌افتد، زیرا که تعرق از سطح پوشش گیاه با جذب کربن ارتباط دارد (Steduto *et al*., 2007). نتایج پژوهش‌ها در سال‌های اخیر نشان داده که بیش‌ترین بهره‌وری آب در کم‌آبیاری در سطح ۶۰ تا ۸۰ درصد نیاز آبی کامل گیاه اتفاق می‌افتد (Enchlew *et al*., 2016; Mila *et al*., 2017).

علاوه بر کم‌آبیاری برخی اقدامات مدیریتی که در مزرعه بر روی خاک و گیاه انجام می‌شود، باعث افزایش بهره‌وری آب نیز می‌شود (Huang *et al*., 2005, Fang *et al*., 2010; Liu *et al*., 2010). خاکپوش‌کردن[3] یا مالچ‌پاشی از عملیات‌های مدیریت خاک است که در مناطق مختلف جهان استفاده می‌شود (Liu *et al*., 2010). خاکپوش‌کردن سطح خاک اثرات مطلوبی بر روی رژیم آب خاک با کنترل تبخیر از سطح خاک (Raeini-Sarjaz & Barthakur, 1997; Wang *et al*., 2009; Liu *et al*., 2010)، اصلاح نفوذپذیری و نگهداشت آب در خاک، کاهش چگالی ظاهری خاک و چگالش‌سازی هوای مرطوب خاک در طول شب به‌علت کاهش دمای خاک می‌گذارد (Liu *et al*., 2010). خاکپوش هم‌چنین بر میکروکلیمای خاک اثر مطلوبی بر جوانه‌زنی (Albright *et al*., 1989) و ریشه‌دوانی گیاه (Osuji, 1990) دارد. گزارش‌های متعددی

در مورد افزایش محصول و راندمان مصرف آب در اثر خاکپوش‌کردن سطح خاک ارائه شده است (Li *et al*., 2001; Li & Gong, 2002). اثر استفاده از خاکپوش بر روی راندمان مصرف آب و عملکرد محصول در فلات لوس چین طی دو دوره کشت ذرت بهاره موردبررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی پژوهش آن‌ها نشان داد استفاده از خاکپوش باعث افزایش عملکرد و بهره‌وری آب شده است (Liu *et al*., 2010). مقایسه‌ای در کشور فرانسه بین دو کشت با خاکپوش و خاک معمولی بر روی محصولات ذرت، سورگم و گندم انجام گرفت و نشان داده شد که خاکپوش‌کردن خاک باعث بهبود فیزیک و حاصلخیزی خاک می‌شود و درنتیجه عملکرد و بهره‌وری آب افزایش می‌یابد (Khaledian *et al*., 2011).

کم‌آبیاری همراه با خاکپوش‌کردن خاک برای کاهش اثرات کم‌آبی می‌تواند یکی از عملیات‌های آبی و زارعی باشد که باعث افزایش بیش‌تر بهره‌وری آب شود (Yang *et al*., 2018). در این نوع عملیات‌ها از برآیند کاهش مصرف آب در اثر کم‌آبیاری و بهبود فیزیک خاک و کاهش تبخیر از سطح خاک در اثر خاکپوش‌کردن خاک استفاده بهینه می‌شود. به‌منظور بررسی اثرات خاکپوش و کم‌آبیاری بر روی گندم بهاره پژوهشی به‌مدت دو سال زارعی در منطقه‌ای با آب‌وهوای نیمه‌خشک در کشور چین انجام گرفت (Yang *et al*., 2018). این پژوهش شامل ۱۰ تیمار با دو تکرار بود، که تیمارها شامل دو تیمار خاک (خاکپوش و خاک معمولی) و پنج تیمار آبیاری (یک تیمار آبیاری کامل و چهار تیمار کم‌آبیاری) بود. نتایج نشان داد دمای خاک در دو عمق ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متری خاک در تیمار خاکپوش حدود ۵/۵ تا ۹/۳ درصد بیش از خاک معمولی در طی دوره رشد بود. خاکپوش باعث کاهش تبخیر از سطح خاک و ذخیره آب در خاک در مرحله اولیه رشد شده و گیاه در مرحله میانی رشد تمایل داشت آب بیش‌تری از خاک جذب کند. بیش‌ترین بهره‌وری آب از تیمار خاکپوش و کم‌آبیاری به‌دست آمد، به‌طوری‌که بهره‌وری آب در سال اول ۱/۴۸ کیلوگرم بر مترمکعب و در سال دوم ۱/۴۳ کیلوگرم بر مترمکعب به‌دست آمد. درمجموع آن‌ها نتیجه گرفتند که خاکپوش‌کردن خاک باعث بهبود بهره‌وری آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌شود. در یک مزرعه تحقیقاتی در سوریه اثر هم‌زمان کم‌آبیاری و خاکپوش‌کردن خاک بر روی محصول زارعی پیاز طی دو دوره کشت در سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ موردبررسی قرار گرفت. این آزمایش‌ها شامل دو تیمار اصلی خاک معمولی و خاک پوشیده‌شده با خاکپوش در سه سطح آبیاری ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه انجام گرفت (Mubarak & Hamdan, 2018). نتایج این بررسی نشان داد خاکپوش‌کردن خاک باعث افزایش عملکرد محصول، زیست‌توده و بهره‌وری آب برای هر سطح آبیاری شده و حدود ۳۳ درصد از کل نیاز آبی گیاه در طول فصل رشد کاهش می‌یابد. هم‌چنین نتایج نشان داد عملکرد محصول و بهره‌وری آب با آبیاری کامل در مقایسه باکم‌آبیاری بیش‌تر است، اما در کم‌آبیاری که خاک با خاکپوش پوشیده شود، بهره‌وری و کیفیت و کمیت محصول بهبود معنی‌دار زیادی پیدا می‌کند. پژوهشی طی دو سال ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ در مرکز تحقیقات کشاورزی نیجریه بر روی ۱۶ تیمار مختلف از ترکیب چهار سطح آبیاری و چهار سطح خاکپوش انجام شد (Igbadun *et al*., 2012). نتایج این پژوهش نشان داد کم‌آبیاری و خاکپوش‌کردن خاک اثر زیادی بر روی عملکرد محصول می‌گذارد. سطوح آبیاری ۵۰ و ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه بیش‌ترین بهره‌وری آب را ایجاد می‌کند و خاکپوش‌کردن خاک باعث بهبود بهره‌وری آب می‌شود. پژوهشی مشابه دیگری در دانشگاه آمریکایی بیروت بر روی محصول خیار به‌مدت دو سال انجام شد و نتایج نشان داد که عملیات هم‌زمان کم‌آبیاری و خاکپوش‌کردن خاک باعث افزایش عملکرد و بهره‌وری آب شده است (Nimah, 2005).

با توجه به شرایط کم‌آبی در ایران ضرورت دارد که بهره‌وری آب محصولات کشاورزی بهبود یابد. در پژوهش‌های گذشته با وجود این‌که بهترین تیمار از بین تیمارهای موردبررسی انتخاب شده است، اما خلأ توابعی که بهترین نقطه کم‌آبیاری با استفاده از این توابع در صورت استفاده از خاکپوش به‌دست آید، وجود دارد. در این پژوهش برای تعیین حد بهینه کم‌آبیاری از تئوری الاستیسته استفاده شده است (Liu & Zhang, 2007; Fathi & Soltani, 2013; Shoariazad *et al*., 2017). این تئوری در علم اقتصاد توسعه‌یافته که براساس آن تغییرات متغیر وابسته به تغییرات متغیر مستقل توسط توابعی بررسی می‌شود و در آن مقدار متغیر مستقل که بیش‌ترین بهره‌وری را تولید کند، یافته می‌شود. هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر متقابل کم‌آبیاری و خاکپوش بر روی عملکرد و بهره‌وری آب و تعیین بهترین مقدار کم‌آبیاری با استفاده از تئوری الاستیسته می‌باشد. گیاه موردمطالعه این پژوهش ریحان می‌باشد. این گیاه به‌دلیل خواص درمانی از قدیمی‌ترین و پرمصرف‌ترین سبزیجات است و در اکثر نقاط دنیا کاشته می‌شود. بررسی منابع نشان می‌دهد تاکنون اثر هم‌زمان مالچ و سطوح مختلف آبیاری بر روی بهره‌وری مصرف آب محصول ریحان تاکنون تعیین نشده است. لذا در این پژوهش موردبررسی قرارگرفته است.

مواد و روش‌ها

مشخصات محل آزمایش

این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی کشاورزی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران در منطقه پاکدشت واقع در جنوب‌شرق شهر تهران، بر روی محصول ریحان رقم معمولی در تابستان سال ۱۳۹۷ طی دو دوره کشت انجام شد. این منطقه دارای میانگین بارندگی سالانه ۱۴۱ میلی‌متر، دمای متوسط سالانه ۱۵/۶ درجه سانتی‌گراد و تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_0) سالانه ۱۳۹۰ میلی‌متر است. پردیس ابوریحان در طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۰ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲۹ دقیقه شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۱۰۲۷ متر واقع است. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و آب محل آزمایش در جدول‌های (۱) و (۲) ارائه شده است.

مشخصات تیمارها و اندازه‌گیری‌ها

خاکپوش به معنی پوشش سبک و نرم سطح خاک است که باعث حذف یا کاهش رقابت گیاهان علفی رقیب، مهاجم و ناخواسته می‌شود استفاده از مالچ به‌عنوان یک نوع پوشش مناسب برای خاک اطراف درختان یا فضای سبز باعث جلوگیری از تبخیر آب می‌شود. کُلَش، به پوش‌برگ خشک و محافظ فلس‌مانند در بذرهای غلات و قسمت‌هایی از گل‌ها یا کاه بسیار ریزشده گفته می‌شود. در کشاورزی از آن معمولاً به‌عنوان علوفه دام استفاده می‌شود.

Table 1. Physical and chemical characteristics of soil

Layer thickness (m)	Soil texture	Field capacity water content (cm^3/cm^3)	Wilting point water content (cm^3/cm^3)	Specific gravity of dry soil (gr/cm^3)	Saturated water content (percentage)
0.2	Silt loam	18.12	8.37	1.36	44.64

Table 2. Chemical properties of water

Parameter	Ca+Mg (meq/lit)	Na (meq/lit)	PH	EC (ds/m)
Amount	16	2.9	7.2	1.1

از کلش غلات به‌عنوان خاکپوش نیز استفاده می‌شود. در این پژوهش ازخاکپوش کاه و کلش جو استفاده شد. به‌منظور بررسی اثر خاکپوش و کم‌آبیاری بر روی مصرف و بهره‌وری آب، محصول ریحان در قالب طرح کرت‌های خردشده به‌صورت بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. کرت‌های اصلی برای دو خاک معمولی و خاک مالچ‌دار و کرت‌های فرعی برای مقادیر مختلف آبیاری اجرا شدند. بذرهای ریحان در ابتدا در سینی‌های مخصوص با بستر کشت (شامل خاک یکنواخت و حاوی کوکوپت و پرلیت) در گلخانه کشت شدند. سپس نشاها پس از چهاربرگی‌شدن به کرت‌ها منتقل شدند. یک هفته بعد از استقرار نشاها در تیمارهای خاکپوش پخش شد. در شکل (۱) دو کرت با خاک معمولی و خاک با پوشش خاکپوش ارائه شده است. کرت‌های اصلی با چهار مقدار آب آبیاری عبارت بودند از ۱- آبیاری کامل با ۱۰۰ درصد نیاز آبی (I100)، ۲- آبیاری با ۱۲۰ درصد نیاز آبی (I120)، ۳- آبیاری با ۹۰ درصد نیاز آبی (I90) و ٤- آبیاری با ۷۰ درصد نیاز آبی (I70). برای کرت‌های فرعی دو عامل خاک با پوشش مالچ و بدون مالچ در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها طی دو فصل در تابستان ۱۳۹۷ انجام شد. تقویم و دوره رشد تیمارها در جدول (۳) ارائه شده است. نحوه چیدمان کلی تیمارها در شکل (۱) نشان داده شده است. ابعاد کرت‌های آزمایشی ۱×۱ متر بود و برای جلوگیری از تأثیر کرت‌ها روی نتایج یکدیگر بین آن‌ها از هر طرف حاشیه ۳۵ سانتی‌متری لحاظ شد. فاصله بین هر گیاه در ردیف کاشت و فواصل ردیف‌ها به‌ترتیب ۱۰ و ۱۰ سانتی‌متر بود. در این پژوهش عمق توسعه ریشه ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

Table 3. Growth calendar

Crop season	Planting time in the main land	Fully growth time (days)	Length of growth period
First	1397/5/27	1397/6/17	16
Second	1397/7/11	1397/7/30	19

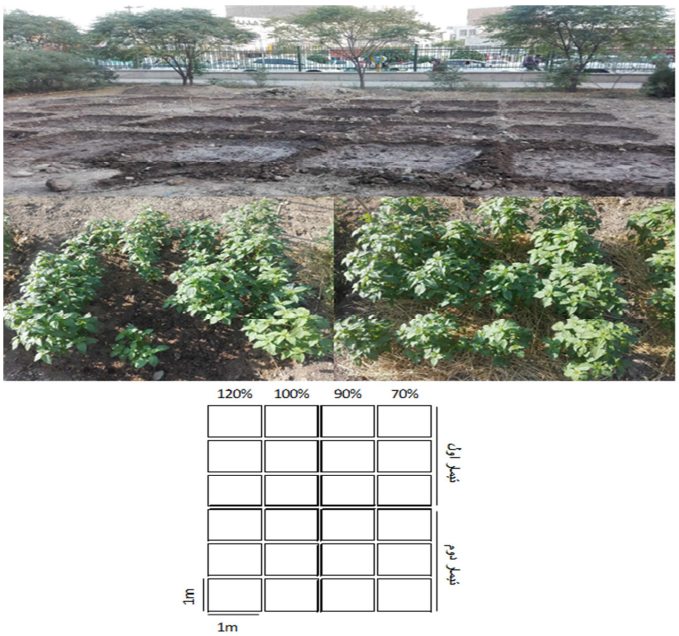

Figure 1. The experimental field and arrangement of treatments (First treatment: mulched soil, second treatment: unmulched soil)

جهت اندازه‌گیری رطوبت برای محاسبه کمبود رطوبت، دو روش انعکاس‌سنجی زمانی[5] (TDR) و نمونه‌برداری خاک در نظر گرفته شد. در روش اول بعد از آماده‌سازی زمین، لوله مخصوص (Prob) دستگاه TDR در یکی از کرت‌های تیمار آبیاری کامل (I100) نصب شد و در طول فصل کشت و قبل از هر آبیاری رطوبت خاک در عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری با استفاده از روش انعکاس‌سنجی زمانی اندازه‌گیری می‌شد. جهت واسنجی این دستگاه، نمونه خاک از عمق موردنظر تهیه‌شده و درون ظرف نمونه‌گیری قرار داده شده و رطوبت آن‌ها در آزمایشگاه تعیین می‌شد. نمودار واسنجی دستگاه، از برازش منحنی بین اعداد خوانده‌شده دستگاه در مقابل رطوبت نمونه خاک برداشت‌شده از محل در نرم‌افزار Excel 2013 به‌دست آمد. در روش دوم در برای هر تیمار یک گلدان قرار داده شد که همانند کرت آن تیمار آبیاری می‌شد و جهت نمونه‌برداری و تعیین رطوبت از آن استفاده می‌شد. در آزمایشگاه نمونه‌ها وزن می‌شد، سپس به‌مدت ٢٤ ساعت نمونه داخل آون قرار گرفت تا خشک‌شده و دوباره توزین شد و بدین‌صورت رطوبت وزنی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. با به‌دست‌آمدن رطوبت قبل از آبیاری مقدار کمبود رطوبت خاک (مقدار خالص آب آبیاری) از رابطه زیر محاسبه شد:

$$d = (\theta_{fc} - \theta_{0-20}) \times 200 \qquad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه فوق، d عمق خالص آب آبیاری (میلی‌متر)، θ_{fc} رطوبت ظرفیت مزرعه (حجمی) و θ_{0-20} رطوبت خاک در عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری خاک می‌باشند.

حجم آب آبیاری تیمار آبیاری کامل براساس کمبود رطوبت خاک و مساحت کرت و عمق توسعه ریشه ۲۰ سانتی‌متر محاسبه شد. حجم آب سایر تیمارهای آبیاری براساس درصدی از آب موردنیاز تیمار آبیاری کامل برآورد شد. با استفاده از ظرف مدرج حجم برآوردشده تهیه و با آبپاش دستی به کرت‌ها آب داده می‌شد. دور آبیاری سه روز در نظر گرفته شد و تمامی تیمارها در یک روز آبیاری می‌شدند. در این پژوهش فرض بر این بود، به‌علت کوچک و محصوربودن کرت‌های آبیاری، تلفات آبیاری ناچیز و لذا آب ذخیره‌شده در خاک صرف تبخیر- تعرق و آب مصرفی گیاه می‌شود. مقادیر آب کاربردی هر تیمار در جدول (٤) ارائه شده است.

نیتروژن موردنیاز با استفاده از کود اوره تأمین شد و مقدار و زمان کوددهی به‌قدر کفایت به مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار به کرت‌ها داده شد. عملیات کود دهی به‌صورت سرک و طی دو نوبت در زمان‌های شش و ۱۲ روز بعد از کشت انجام شد. پس از رسیدگی محصول، کل قسمت اندام هوایی محصول هر کرت از سطح خاک برداشت شد و در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از آون خشک شد. فرایند خشک‌شدن در آون تا ثابت‌شدن وزن نمونه‌ها ادامه داشت. داده‌های اندازه‌گیری‌شده با استفاده از SAS (نسخه ۹,۰) تحلیل آماری شدند. برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن[4] استفاده شد و نمودارها با محیط Excel رسم شد.

Table 4. The amount of applied water of the treatments in the first and second planting in the summer (mm)

First planting			Second planting		
Irrigation treatment	Soil treatment		Irrigation treatment	Soil treatment	
	Unmulched soil	Mulched soil		Unmulched soil	Mulched soil
I120	118	91	I120	79	52
I100	98	76	I100	66	43
I90	88	69	I90	59	39
I70	69	53	I70	46	30

تئوری الاستیسیته

در تئوری الاستیسیته با مشتق‌گیری از تابع تولید دو شاخص بازده مصرف آب حاشیه‌ای[6] (MWUE) و الاستیسیته[7] (EI) تعریف می‌شود و با استفاده از این شاخص‌ها حداکثر عملکرد و بهترین نقطه بازده مصرف آب تعیین می‌شود. این تئوری برای بهینه‌سازی عملکردمحصول در شرایط کم‌آبیاری استفاده شده است (Liu *et al*., 2002). با فرض این‌که عملکرد محصول (Y) فقط تابع آب مصرفی (CU) باشد، بازده مصرف آب عبارت است از (Liu & Zhang, 2007):

$$WUE = \frac{Y}{CU} \quad (۲)$$

بازده مصرف آب حاشیه‌ای نسبت تغییرات عملکرد محصول به تغییرات آب مصرفی می‌باشد:

$$MWUE = \frac{dY}{dCU} \quad (۳)$$

شاخص الاستیسیته نسبت درصد تغییرات عملکرد محصول به درصد تغییرات آب مصرفی است:

$$EI = \frac{dY/Y}{dCU/CU} \quad (٤)$$

با فرض این‌که عملکرد محصول فقط تابع آب مصرفی است و از یک معادله درجه دو پیروی کند، در این صورت عملکرد محصول در دامنه‌های پایین مصرف آب روند افزایشی داشته و شاخص EI با توجه به رابطه (٤)، بزرگ‌تر از صفر خواهد بود. شاخص EI در نقطه عطف رابطه (٤)، (dY= 0) که بیش‌ترین عملکرد محصول پیش می‌آید برابر صفر می‌شود. پس از نقطه عطف با افزایش آب مصرفی، عملکرد محصول کاهش‌یافته و شاخص EI منفی می‌شود. رابطه (٤) با استفاده از روابط (۲) و (۳) به‌صورت زیر درخواهد آمد:

$$EI = \frac{MWUE}{WUE} \quad (۵)$$

در رابطه (۲)، با مشتق‌گیری WUE نسبت به CU و جایگذاری روابط (۲) تا (۵)، رابطه زیر به‌دست می‌آید (Liu & Zhang, 2007):

$$\frac{dWUE}{dCU} = (EI - 1)\left(\frac{WUE}{CU}\right) \quad (٦)$$

رابطه (٦) نشان می‌دهد، تغییر بازده مصرف آب وقتی شاخص EI بزرگ‌تر از یک باشد روند افزایشی دارد و برعکس وقتی EI کم‌تر از یک باشد، روند کاهشی پیدا می‌کند. اگر EI برابر یک شود، بازده مصرف آب به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در صورتی‌که عملکرد محصول برای هر تیمار اصلی (خاک پوشیده‌شده با خاکپوش و خاک معمولی) از تابع درجه دو زیر پیروی کند:

$$Y = aCU^2 + b\,CU + c \quad (۷)$$

توابع WUE، MWUE و EI (روابط ۲، ۳ و ۵) به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

$$WUE = a\,Cu + b + \frac{c}{CU} \quad (۸)$$

$$MWUE = 2a\,CU + b \quad (۹)$$

$$EI = \frac{2a\,CU+b}{a\,Cu+b+\frac{c}{CU}} \quad (۱۰)$$

با توجه به مطالب پیش‌گفته که حداکثر عملکرد محصول در نقطه MWUE=0 به‌دست می‌آید، لذا با استفاده از معادله (۹) مقدار آب مصرفی برابر b/2a– خواهد بود. هم‌چنین حداکثر بازده مصرف آب در شرایطی به‌دست می‌آید که شاخص EI برابر یک شود، در این صورت با توجه به رابطه (٦) خواهیم داشت:

$$\frac{dWUE}{dCU} = 0 \quad (۱۱)$$

با مشتق‌گیری از رابطه (۸) و قراردادن آن برابر صفر، مقدار آب مصرفی که در آن بازده مصرف آب به حداکثر خود می‌رسد، برابر $(c/a)^{0.5}$ خواهد بود. در این پژوهش با استفاده از معادلات تئوری الاستیسیته حداکثر عملکرد و حداکثر بازده مصرف آب برای هر دو تیمار خاک پوشیده‌شده با خاکپوش و خاک معمولی تعیین و مورد مقایسه تحلیل قرار می‌گیرد.

نتایج و بحث

نتایج میانگین عملکرد زیست‌توده در تیمارهای مختلف

در جدول (۵) و نتایج تجزیه واریانس عملکرد برای تعیین اثر سطوح مختلف آبیاری دو خاک معمولی و مالچ‌دار در دو فصل کشت به‌ترتیب در جدول‌های (٦) و (۷) ارائه شده است. همان‌طورکه در جدول (۵) مشخص است، عملکرد کشت اول به‌مراتب بیش‌تر از کشت دوم است و علت آن است که کشت دوم در مهرماه که دما کم‌تر از تابستان است صورت گرفته و ازآنجاکه ریحان در شرایط گرم و خشک بهتر رشد می‌کند و به سرما حساس است، لذا زیست‌توده کم‌تری تولید کرده است. همان‌طورکه نتایج نشان می‌دهد عملکرد محصول در خاک مالچ‌دار در هر دو کشت و در سطوح مختلف آبیاری بیش از عملکرد محصول در خاک معمولی است و این نتیجه با پژوهش‌های Li *et al.* (2001)، Li & Gong (2002) و Liu *et al.* (2010) همخوانی دارد که عملکرد محصول در خاک‌های مالچ‌دار بیش‌تر از خاک‌های معمولی است. در جدول‌های (٦) و (۷) این اختلافات از نظر آماری موردبررسی قرار گرفت و نتایج نشان می‌دهد که بین تکرارها تفاوت آماری دیده نمی‌شود، اما اختلاف بین خاک مالچ‌دار و خاک معمولی در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار شده است.

Table 5. Results of the average biomass yield in different treatments in the first and second crops in the summer of 1397 (g/m^2)

Second planting			First planting		
Soil treatment		Irrigation treatment	Soil treatment		Irrigation treatment
Mulched soil	Unmulched soil		Mulched soil	Unmulched soil	
45.3	40.4	I120	131.0	111.0	I120
45.3	40.5	I100	131.0	112.0	I100
43.3	37.0	I90	119.7	104.0	I90
30.0	25.08	I70	84.0	79.9	I70

Table 6. The results of analysis of variance (mean square) of dry weight of basil under the influence of different irrigation regimes and straw mulch (first planting)

Sources of variance (SOV)	Degrees of freedom (DF)	Mean square (MS)
Block	2	0.009
Irrigation	3	1.408^{*}
mulch	1	0.231^{**}
Irrigation × mulch	3	0.537^{**}
Error	14	0.898
%CV	-	28.02

ns, **, *: non-significant and significant at 1% and 5% probability level, respectively.

Table 7. The results of analysis of variance (mean square) of dry weight of basil under the influence of different irrigation regimes and straw mulch (second planting)

Sources of variance (SOV)	Degrees of freedom (DF)	Mean square (MS)
Block	2	0.00087^{ns}
Irrigation	3	0.665^{**}
mulch	1	0.087^{**}
Irrigation × mulch	3	0.0177^{**}
Error	14	0.012
%CV	-	8.37

ns, **, *: non-significant and significant at 1% and 5% probability level, respectively.

Table 8. The results of water productivity in normal soil and mulched soil in the first and second plantings in the summer of 1397 (g/lit)

First planting			Second planting		
Irrigation treatment	Soil treatment		Irrigation treatment	Soil treatment	
	Unmulched soil	Mulched soil		Unmulched soil	Mulched soil
I120	0.94	1.43	I120	0.51	0.88
I100	1.14	1.72	I100	0.62	1.05
I90	1.18	1.75	I90	0.62	1.12
I70	1.17	1.58	I70	0.54	0.99

بهره‌وری آب با توجه به جدول‌های (٤) و (٥) برآورد و نتایج در جدول (٨) ارائه شده است. بهره‌وری آب در خاک مالچ‌دار در هر دو فصل کشت به‌مراتب بیش‌تر از خاک معمولی شده است. علت افزایش بهره‌وری آب در خاک مالچ‌دار این است که هم مصرف آب در خاک مالچ‌دار کم‌تر از خاک معمولی است و هم عملکرد محصول افزایش‌یافته است و این نتیجه با نتایج Liu *et al.* (2010) و Khaledian *et al.* (2011) همخوانی دارد. برای یافتن بهترین بهره‌وری آب، پراکنش نقاط و معادله درجه دو برازش‌شده به داده‌های آب مصرفی و عملکرد محصول برای دو خاک مالچ‌دار و خاک معمولی در دو فصل کشت در شکل (٢) ارائه شده است. همان‌طورکه نتایج نشان می‌دهد منحنی درجه دو برازش‌شده به نقاط برای هر دو نوع خاک و در هر دو فصل کشت از ضریب تعیین بالایی (R^2 >٠/٩٨) برخوردار بوده و می‌توان نتیجه گرفت، وقتی سایر عوامل مؤثر بر عملکرد به‌غیر از آب مصرفی گیاه ثابت باشد، عملکرد محصول تا بیش از ٩٨ درصد تابع آب مصرفی است و از معادله درجه دو پیروی می‌کند. توابع عملکرد و ضرایب آن در جدول (٩) ارائه شده‌اند.

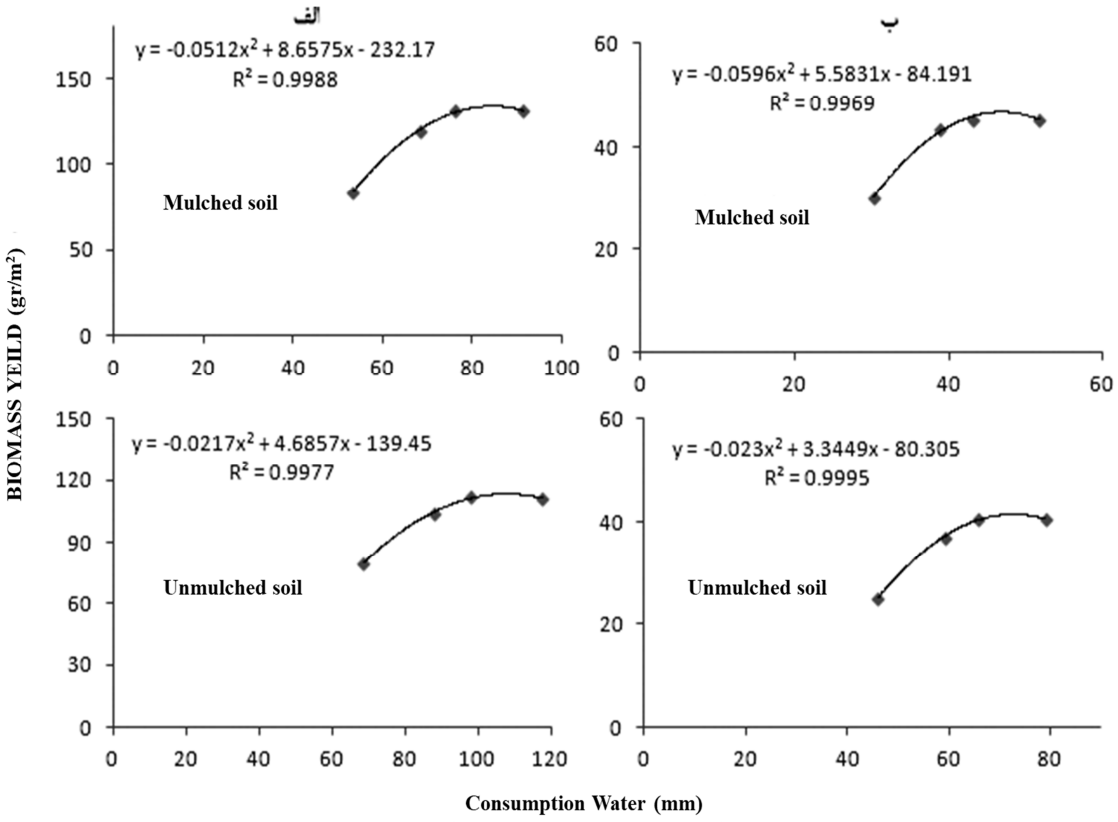

Figure 2. Data scattering of water consumption and crop yield in two planting seasons; a) first planting and b) second planting

Table 9. Crop yield functions in two types of soil cover and two planting seasons

Soil treatment	Planting season	Function
Mulched soil	First	$Y=-0.0512CU^2+8.6575CU-232.17$
Unmulched soil	First	$Y=-0.0217CU^2+4.6857CU-139.45$
Mulched soil	Second	$Y=-0.0596CU^2+5.5831CU-84.19$
Unmulched soil	Second	$Y=-0.023CU^2+3.3449CU-80.305$

تغییرات بازده مصرف آب (WUE)، بازده مصرف آب حاشیه‌ای (MWUE) و شاخص الاستیسیته (EI) نسبت به آب مصرفی (CU) با استفاده از روابط (۸) تا (۱۰) به‌همراه توابع عملکرد مندرج در جدول (۹)، برای فصل اول و فصل دوم کشت به‌ترتیب در شکل‌های (۳) و (٤) ارائه شده است.

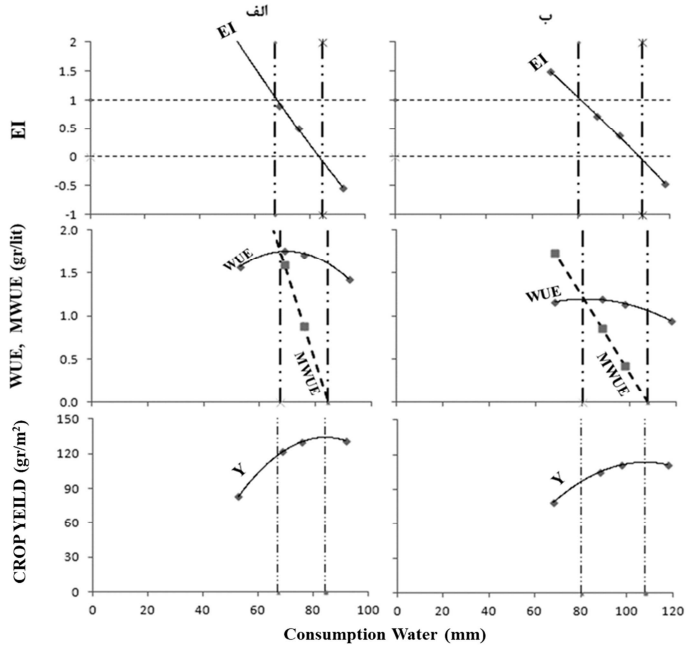

Figure 3. The curve of changes in Y, WUE, MWUE and EI in two types of soil cover in the first planting season; a) mulched soil and b) unmulched soil

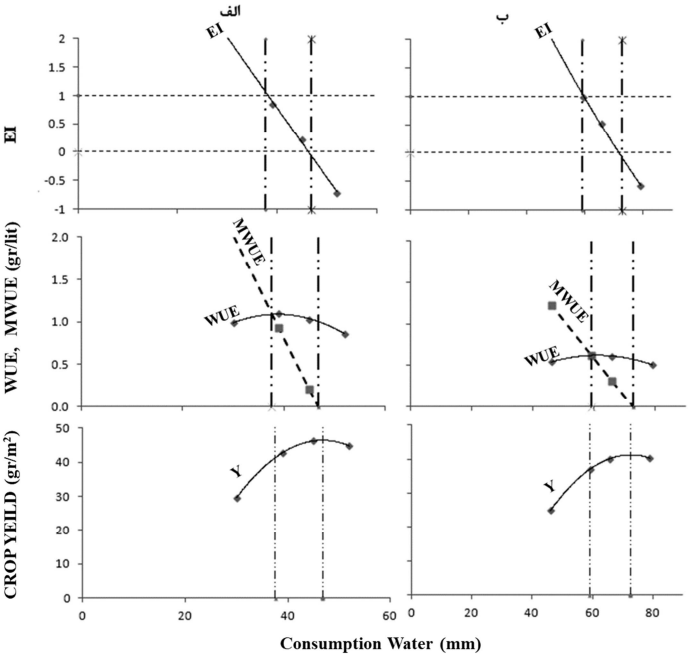

Figure 4. The curve of Y, WUE, MWUE and EI changes in two types of soil cover in the second planting season; a) mulched soil and b) unmulched soil

Table 10. The results of maximum crop yield and maximum water productivity in mulched soil and unmulched soil in two planting seasons

Soil treatment	Planting season	Maximum crop yield			Maximum water productivity		
		Crop yield ($gr\ m^{-2}$)	Consumption water (mm)	Water productivity ($gr\ lit^{-1}$)	Crop yield ($gr\ m^{-2}$)	Consumption water (mm)	Water productivity ($gr\ lit^{-1}$)
Mulched soil	First	134.0	84.6	1.58	118.0	67.3	1.76
Unmulched soil	First	113.5	108.0	1.05	96.7	80.2	1.21
Mulched soil	Second	46.4	46.8	0.99	41.3	37.6	1.10
Unmulched soil	Second	41.2	72.7	0.57	37.0	59.1	0.63

همان‌طورکه مشخص است بیش‌ترین عملکرد محصول برای هر چهار تیمار اصلی، در شرایطی به‌دست‌آمده که شاخص الاستیسیته برابر صفر شده است. ملاحظه می‌شود بیش‌ترین عملکرد محصول در دو فصل کشت در خاک مالچ‌دار اتفاق افتاده است. هم‌چنین زمانی که شاخص الاستیسیته برابر یک شود، بیش‌ترین بهره‌وری آب به‌دست می‌آید و بیش‌ترین بهره‌وری آب در محل تلاقی دو منحنی WUE و MWUE است.

با داشتن ضرایب معادله درجه دوم تابع عملکرد، میزان آب مصرفی لازم برای حداکثر عملکرد و حداکثر بهره‌وری آب به‌ترتیب با استفاده از روابط b/2c- و $(a/c)^{0.5}$ برای توابع مندرج در جدول (۹) برآورد شد و با جایگذاری آن‌ها در این توابع عملکرد محصول به‌دست آمد. بهره‌وری آب نیز با تقسیم عملکرد بر مقدار آب مصرفی تعیین شد و خلاصه نتایج حداکثر عملکرد و حداکثر بهره‌وری آب در جدول (۱۰) ارائه شده است.

این نتایج نشان می‌دهد حداکثر عملکرد محصول که بدون تنش آبی به‌دست‌آمده در هر دو فصل کشت در خاک مالچ‌دار بیش از خاک معمولی است. به‌طوری‌که حداکثر عملکرد محصول درکشت اول در خاک مالچ‌دار حدود ۱۳٤/۰ گرم بر مترمربع اما در خاک معمولی حدود ۱۱۳/۵ گرم بر مترمربع شده است، به‌عبارتی در شرایط آبیاری کامل پوشش مالچ باعث افزایش حدود ۱۸ درصد عملکرد شده است. از طرف دیگر، آب مصرفی در خاک مالچ‌دار ۸٤/٦ میلی‌متر و در خاک معمولی ۱۰۸/۰ میلی‌متر برآورد شده، یعنی پوشش مالچ‌دار خاک سبب کاهش ۲۱ درصد مصرف آب می‌شود. افزایش عملکرد و کاهش آب مصرفی در شرایط حداکثر عملکرد محصول روی‌هم‌رفته باعث افزایش چشم‌گیر بهره‌وری آب در خاک مالچ‌دار نسبت به خاک معمولی شده، به‌طوری‌که بهره‌وری آب از ۱/۲۱ گرم در لیتر به ۱/۷٦ گرم در لیتر افزایش یافته است، به‌عبارتی بهره‌وری بیش از ٤۵ درصد افزایش یافته است. این نتایج برای کشت دوم نیز صادق است و بهره‌وری آب حدود ۷۵ درصد افزایش‌یافته است، هرچند که عملکرد محصول درکشت دوم به‌علت شروع سرما کاهش داشته است. ازآنجاکه ریحان به سرما حساس است و در شرایط گرم و خشک بهترین رشد را دارد، چون کشت دوم در مهرماه و فصل پاییز صورت گرفته به‌علت خنک‌شدن هوا کاهش عملکرد صورت گرفته است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر هم‌زمان پوشش خاک با خاکپوش کاه و کلش جو و کم‌آبیاری و بر روی عملکرد محصول ریحان بررسی شده و نتایج آن با خاک معمولی بدون خاکپوش موردمقایسه قرار گرفت. برای تعیین بهترین عملکرد محصول و حداکثر بهره‌وری آب از تئوری آنالیز حاشیه‌ای و شاخص الاستیسیته استفاده شد. نتایجی که در دو فصل کشت براساس این شاخص به‌دست آمد نشان داد که پوشش خاک با خاکپوش از یک طرف مصرف آب را کاهش می‌دهد و از طرف دیگر عملکرد محصول را افزایش می‌دهد. اثر هم‌زمان این دو افزایش قابل‌توجهی بر

بهره‌وری آب در تولید محصول دارد. لذا با توجه به محدودیت منابع آب کشاورزی می‌توان توصیه کرد از بهترین درصد کم‌آبیاری و پوشش خاکپوش برای مدیریت بهینه از آب‌وخاک مزرعه استفاده شود.

پی نوشت‌ها

1. Water productivity
2. Deficit irrigation
3. Mulching
4. Time-Domain Reflectometer
5. Duncan
6. Marginal Water Use Efficiency
7. Elasticity Index

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

1. Ahmadi Saraeilani, A., Mashal, M., Azadegan, B., & Kamali, P. (2020). Field evaluation of the effect of two superabsorbent polymers A200 and Stakosorb on hydraulic performance in furrow irrigation. *Water and Irrigation Management*, *10*(2), 173-187.
2. Azadegan, B., Kouhestani, R., Mashal, M., (2022). Effect of low irrigation and type of culture medium on water use efficiency and some morphological and physiological characteristics of the stock plant. *Journal of Crops Improvement,* 24(1), 115-124.
3. Albright, L. D., Wolfe, D., & Novak, S. (1989). Modeling row cover effects on microclimate and yield. II. Thermal model and simulations. *Journal of the American Society for Horticultural Science (USA)*. 114, 569-578.
4. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome*, *300*(9), D05109.
5. Enchalew, B., Gebre, S. L., Rabo, M., Hindaye, B., & Kedir, M. (2016). Effect of deficit irrigation on water productivity of onion (*Allium cepal*.) under drip irrigation. *Irrigation and Drainage Systems Engineering,* 5(172), 2.
6. English, M., & Raja, S. N. (1996). Perspectives on deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 32(1), 1-14.
7. Fang, Q., Ma, L., Yu, Q., Ahuja, L. R., Malone, R. W., & Hoogenboom, G. (2010). Irrigation strategies to improve the water use efficiency of wheat–maize double cropping systems in North China Plain. *Agricultural Water Management,* 97(8), 1165-1174.
8. Fathi, P., & Soltani, M. (2013). Optimization of water use efficiency and yield in potato using marginal analysis theory. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, *2*(2), 85-93. (In Persian)
9. Fereres, E., & Soriano, M. A. (2006). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of experimental botany,* 58(2), 147-159.
10. Geerts, S., & Raes, D. (2009). Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural water management,* 96(9), 1275-1284.
11. Huang, Y., Chen, L., Fu, B., Huang, Z., & Gong, J. (2005). The wheat yields and water-use efficiency in the Loess Plateau: straw mulch and irrigation effects. *Agricultural water management,* 72(3), 209-222.
12. Igbadun, H. E., Ramalan, A. A., & Oiganji, E. (2012). Effects of regulated deficit irrigation and mulch on yield, water use and crop water productivity of onion in Samaru, Nigeria. *Agricultural water management*, 109, 162-169.
13. Karam, F., Breidy, J., Stephan, C., & Rouphael, J. (2003). Evapotranspiration, yield and water use efficiency of drip irrigated corn in the Bekaa Valley of Lebanon. *Agricultural Water Management*, 63(2), 125-137.
14. Karam, F., Lahoud, R., Masaad, R., Daccache, A., Mounzer, O., & Rouphael, Y. (2006). Water use and lint yield response of drip irrigated cotton to the length of irrigation season. *Agricultural Water Management*, 85(3), 287-295.
15. Khaledian, M. R., Mailhol, J. C., Ruelle, P., Mubarak, I., & Maraux, F. (2011). Nitrogen balance and irrigation water productivity for corn, sorghum and durum wheat under direct seeding into mulch when compared with conventional tillage in the southeastern France. Irrigation Science, 29(5), 413-422.
16. Li, X. Y., Gong, J. D., Gao, Q. Z., & Li, F. R. (2001). Incorporation of ridge and furrow method of rainfall harvesting with mulching for crop production under semiarid conditions. *Agricultural Water Management*, 50(3), 173-183.
17. Li, X. Y., & Gong, J. D. (2002). Effects of different ridge: furrow ratios and supplemental irrigation on crop production in ridge and furrow rainfall harvesting system with mulches. *Agricultural Water Management*, 54(3), 243-254.

18. Liu, Y., Li, S., Chen, F., Yang, S., & Chen, X. (2010). Soil water dynamics and water use efficiency in spring maize (*Zea mays* L.) fields subjected to different water management practices on the Loess Plateau, China. *Agricultural Water Management*, 97(5), 769-775.
19. Liu, W. Z., & Zhang, X. C. (2007). Optimizing water and fertilizer input using an elasticity index: a case study with maize in the loess plateau of china. *Field crops research*, 100(2-3), 302-310.
20. Mashal, M., Varavypour, M., Sadatnouri, S. A., & Zare Z. E. (2009), Optimizing consumptive water depth for corn by deficit-irrigation (Case study: Varamin area). *Agricultural Research*, 8(4), 123-134. (In Persian).
21. Mila, A. J., Ali, M. H., Akanda, A. R., Rashid, M. H. O., & Rahman, M. A. (2017). Effects of deficit irrigation on yield, water productivity and economic return of sunflower. *Cogent Food & Agriculture*, *3*(1), 1287619.
22. Mubarak, I., & Hamdan, A. (2018). Onion crop response to regulated deficit irrigation under mulching in dry Mediterranean region. *Journal of Horticultural Research*, 26(1), 87-94.
23. Nimah, M. N. (2005, September). Cucumber yield under regular deficit irrigation and mulching treatments. In *III International Symposium on Cucurbits 731* (pp. 189-194).
24. Osuji, G. E. (1990). Tillage and mulching effects on seed-zone soil environment and cowpea seedling growth in the humid tropics. *Soil Use and Management*, 6(3), 152-156.
25. Raeini-Sarjaz, M., & Barthakur, N. N. (1997). Water use efficiency and total dry matter production of bush bean under plastic covers. *Agricultural and forest meteorology*, 87(1),75-84.
26. Shoariazad, F., Rahimi Khoob, A., Ghorbanijavid, M., & Nazarifar, M. H. (2016). Interaction of water and nitrogen on the yield and water use efficiency in maize using elasticity theory. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *47*(4), 819-827.
27. Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2007). On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science*, 25(3), 189-207.
28. Wang, Y., Xie, Z., Malhi, S. S., Vera, C. L., Zhang, Y., & Wang, J. (2009). Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on water use efficiency and crop yield in the semi-arid Loess Plateau, China. *Agricultural water management*, 96(3), 374-382.
29. Yang, J., Mao, X., Wang, K., & Yang, W. (2018). The coupled impact of plastic film mulching and deficit irrigation on soil water/heat transfer and water use efficiency of spring wheat in Northwest China. *Agricultural water management*, 201, 232-245.