Evaluating the Effect of Regulated Deficit Irrigation and Partial Root-Zone Irrigation on Water Use Efficiency Based on Forage Production and Quality of Pearl Millet

A. Moghbeli Mehni Dareroodi, M. Delbari *, A. Rezaei Estakhroeih, and G. Mohammadi-Nejad

Ph.D. student of Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Iran. **Asma.moghbeli@gmail.com**

Associate Prof., Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Iran. **masoomeh.delbari@uoz.ac.ir**

Assistant Prof., Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran. **Rezaei@mail.uk.ac.ir**

Professor, Research and Technology Institute of Plant Production (RTIPP), Shahid Bahonar University of Kerman, Iran. **Mohammadinejad@uk.ac.ir**

Received: October 2024 and Accepted: December 2024

Abstract

Water scarcity in arid and semi-arid regions is a serious challenge for fodder production. Therefore, optimizing irrigation techniques and selecting drought-resistant cultivars, such as millet, is essential. This study investigated the effects of two irrigation methods, namely, regulated deficit irrigation and partial root-zone irrigation, at four irrigation levels (100%, 80%, 60%, and 40% of the plant's water requirement, WR) on forage yield, irrigation water use efficiency, forage protein percentage, and yield of hybrid pearl millet (Nutrifeed variety). The research was conducted using a split-block (strip-split-plot) design based on a randomized complete block design (RCBD) with three replications, utilizing the drip irrigation method with tape strips at the research farm of Shahid Bahonar University of Kerman, during the 2017 and 2018 growing seasons. The results demonstrated that the partial root-zone irrigation treatment, by supplying 100% WR resulted in the highest fresh and dry forage yields, with 80.20 and 16.27 t/ha, respectively. The 80% WR in the same method, in addition to being ranked second, with fresh and dry forage yields of 71.71 and 15.47 t ha^{-1}, respectively, yielded the highest dry forage protein yield (1418.7 kg/ha) and water use efficiency based on fresh and dry forage yields (13.74 and 2.97 t/m^3, respectively). Additionally, the highest protein percentage (11.41%) was observed in the partial root-zone irrigation treatment by supplying 60% WR. Overall, partial root-zone irrigation, by providing 80% WR, is recommended as a suitable strategy to improve irrigation water use efficiency and maintain the quality and quantity of forage under water-limited conditions.

Keywords: Drought stress, optimal irrigation methods, Millet Nutrifeed variety, Forage production stability

* - Corresponding author's email**: masoomeh.delbari@uoz.ac.ir**

https://doi.org/10.22092/jwra.2025.367441.1061

مقاله پژوهشی نشریه پژوهش آب در کشاورزی / ب / جلد ۳۸ / شماره ۴/ ۱۴۰۳.ص۳۹۷-۴۲۲
https://doi.org/10.22092/jwra.2025.367441.1061

ارزیابی تأثیر کم‌آبیاری تنظیم‌شده و آبیاری ناقص ریشه بر کارایی مصرف آب بر مبنای تولید و کیفیت علوفه ارزن مرواریدی

اسماء مقبلی مهنی درودی، معصومه دلبری*، عباس رضایی استخروئیه و قاسم محمدی‌نژاد

دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
Asma.moghbeli@gmail.com
دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
masoomeh.delbari@uoz.ac.ir
استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.
Rezaei@mail.uk.ac.ir
استاد، پژوهشکده فناوری تولیدات گیاهی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.
Mohammadinejad@uk.ac.ir

دریافت: آبان ۱۴۰۳ و پذیرش: آذر ۱۴۰۳

چکیده

کمبود آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، چالشی جدی برای تولید علوفه است، بنابراین، بهینه‌سازی آبیاری و انتخاب ارقام مقاوم به خشکی مانند ارزن ضروری است. در این پژوهش تأثیر دو روش کم‌آبیاری تنظیم‌شده و آبیاری ناقص ریشه در چهار سطح رژیم آبیاری (۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد نیاز آبی گیاه) بر عملکرد علوفه، کارایی مصرف آب، درصد و عملکرد پروتئین ارزن مرواریدی هیبرید (رقم نوتریفید) بررسی شد. پژوهش به‌صورت کرت‌های خرد شده نواری در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و با استفاده از روش آبیاری قطره‌ای با نوار تیپ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شهید باهنر کرمان طی دو فصل زراعی ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ انجام شد. نتایج نشان داد که تیمار آبیاری ناقص ریشه با تأمین ۱۰۰٪ نیاز آبی گیاه، بیشترین عملکرد علوفه تر و خشک را به‌ترتیب با ۸۰/۲۰ و ۱۶/۲۷ تن در هکتار داشت. تیمار ۸۰٪ نیاز آبی در همین روش، علاوه بر قرار گرفتن در رتبه دوم با عملکرد علوفه تر و خشک به‌ترتیب ۷۱/۷۱ و ۱۵/۴۷ تن در هکتار، بالاترین عملکرد پروتئین علوفه خشک (۱۴۱۸/۷۰ کیلوگرم در هکتار) و کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه تر و خشک (به‌ترتیب ۱۳/۷۴ و ۲/۹۷ تن بر مترمکعب) را داد. همچنین، بیشترین درصد پروتئین (۱۱/۴۱) در تیمار آبیاری ناقص ریشه با تأمین ۶۰٪ نیاز آبی مشاهده شد. به‌طورکلی، آبیاری ناقص ریشه با تأمین ۸۰٪ نیاز آبی گیاه به‌عنوان یک راهکار مناسب برای بهبود کارایی مصرف آب آبیاری و حفظ کیفیت و کمیت علوفه در شرایط کم‌آبی توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تنش خشکی، روش‌های بهینه آبیاری، ارزن رقم نوتریفید، پایداری تولید علوفه

* – آدرس ایمیل نویسنده مسئول: **masoomeh.delbari@uoz.ac.ir**

مقدمه

در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، کمبود منابع آب یکی از عوامل اصلی محدودکننده تولید محصولات کشاورزی است. تنش خشکی، به‌عنوان عامل کلیدی محدودکننده رشد گیاهان، اثرات منفی بیشتری نسبت به سایر تنش‌های محیطی دارد. در کشورهایی مانند ایران با میانگین بارندگی سالانه تنها ۲۴۰ میلی‌متر، ضرورت بهبود بهره‌وری آب و استفاده از روش‌های مدیریت نوین آبیاری بیش از پیش احساس می‌شود (مریدی، ۲۰۱۷؛ سیواساکتی و همکاران، ۲۰۲۴؛ جیائو و همکاران، ۲۰۲۴). با توجه به رشد نمایی جمعیت و تغییرات اقلیمی که فشار بیشتری بر منابع آب شیرین، کشاورزی و صنعت وارد می‌کند، مدیریت آب به یک چالش پیچیده تبدیل شده است (الهانی و همکاران، ۲۰۱۹؛ جیائو و همکاران، ۲۰۲۴).

ارزن مرواریدی (*Pennisetum glaucum* L.) یکی از مهم‌ترین غلات گرمسیری چهارکربنه (C4) است که در شرایط نیمه‌خشک و خاک‌های فقیر از نظر مواد مغذی قابلیت رشد و نمو دارد. این گیاه به‌دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود، نقش مهمی در تأمین امنیت غذایی و تولید علوفه دارد و به‌عنوان گزینه‌ای کلیدی برای کشاورزی پایدار در مناطقی با منابع آبی محدود شناخته می‌شود. ارزن مرواریدی به‌ویژه در آفریقا و جنوب آسیا، به‌خصوص هند، به‌عنوان منبع اصلی غلات برای مصرف انسانی و علوفه دام استفاده می‌شود (میسون و همکاران، ۲۰۱۵؛ کروکستون و همکاران، ۲۰۲۰؛ آسوینی و همکاران، ۲۰۲۳). این گیاه در سامانه‌های کشاورزی دیم، همراه با گیاهانی مانند سورگوم و ذرت یا در ترکیب با لگوم‌هایی مانند لوبیا چشم‌بلبلی کشت می‌شود که به بهبود تناوب زراعی کمک می‌کند (ساماکه و همکاران، ۲۰۰۶؛ میسون و همکاران، ۲۰۱۵). تولید جهانی ارزن مرواریدی در سال ۲۰۲۲ به حدود ۳۱ میلیون تن رسید که از این میزان، آفریقا و آسیا به‌ترتیب ۵۱ و ۴۶ درصد از کل تولید را به خود اختصاص داده‌اند (فائو، ۲۰۲۲). ارزن مرواریدی به‌دلیل ارزش غذایی بالا و تناسب با چرخه‌های زراعی کوتاه‌مدت و منابع آب محدود، به‌عنوان خوراک دام در مناطق نیمه‌خشک رایج است (اسماعیل، ۲۰۱۲؛ بهاتارای و همکاران، ۲۰۱۹؛ ماچیسِک و همکاران، ۲۰۱۹).

در ایران، ارزن مرواریدی به‌دلیل مقاومت بالا در برابر خشکی و توانایی تحمل شرایط نامساعد خاک، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند استان کرمان کشت می شود. این گیاه به‌ویژه رقم نوتریفید که با اقلیم‌های گرم و خشک سازگار است، به‌عنوان گزینه‌ای پایدار برای کشاورزی در مناطق کم‌آب شناخته شده است (مهرپویان و همکاران، ۱۳۹۰؛ صفائی طرقبه و همکاران، ۱۳۹۶؛ نگارستانی، ۲۰۱۹؛ فاطمی، ۲۰۲۱).

از نظر تغذیه‌ای، ارزن مرواریدی حاوی پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها، اسیدهای آمینه ضروری، آنتی اکسیدان‌ها و ویتامین‌هایی مانند تیامین، ریبوفلاوین، اسید فولیک، نیاسین، بتاکاروتن است. همچنین مواد معدنی مانند آهن، فسفر، منیزیم و روی و ترکیبات شیمیایی نظیر پلی فنول‌ها و فلاونوئیدها را در خود دارد که نقش مهمی در تأمین امنیت غذایی و بهبود تعادل تغذیه‌ای در کشورهای درحال‌توسعه ایفا می‌کند (کومار و کومار، ۲۰۲۱؛ ساچان و شاه، ۲۰۲۳). علاوه بر این، ارزن مرواریدی به‌دلیل ارزش علوفه‌ای خود نیز شناخته شده و این ویژگی دو منظوره بودن، باعث افزایش ارزش اقتصادی آن می‌شود (تلاسیا و همکاران، ۲۰۱۹).

بر اساس پیش‌بینی‌ها، نیاز آبی محصولات کشاورزی تا سال ۲۰۸۰ حدود ۲۵ درصد افزایش خواهد یافت. همچنین، تغییرات اقلیمی باعث افزایش تبخیر–تعرق (ETo) خواهد شد، که این امر از ظرفیت محصولات کشاورزی برای مقابله با آن فراتر می‌رود و ممکن است به کاهش بهره‌وری آن‌ها منجر شود (نیکولائو و همکاران، ۲۰۲۰). بنابراین، به‌روزرسانی روش‌های تأمین آب آبیاری و بهبود عملکرد کشاورزی در شرایط کم‌آبی برای دست‌یابی به امنیت پایدار آب و غذا، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (الومران و لوکی، ۲۰۲۴). در این راستا، با توجه به چالش‌های فزاینده ناشی از تغییرات اقلیمی، مانند

کاهش بارش و افزایش دما، اهمیت کاشت محصولات مقاوم مانند ارزن مرواریدی به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. توانایی این محصول در مقاومت در برابر شرایط نامساعد، آن را به گزینه‌ای امیدوارکننده برای تضمین شیوه‌های کشاورزی پایدار و تأمین امنیت غذایی در مواجهه با تغییرات اقلیمی تبدیل می‌کند. بااین‌حال، تولید ارزن مرواریدی همچنان تحت تأثیر محدودیت‌های آبی قرار دارد. مهرپویان و فرامرزی (۱۳۹۰) گزارش کردند که تنش آبی منجر به کاهش عملکرد علوفه و کارایی مصرف آب آبیاری[1] (IWUE) در ارزن نوتریفید شد. به‌گونه‌ای که بیشترین عملکرد در شرایط بدون تنش و کمترین عملکرد در تیمار با ۳۰ درصد کاهش نیاز آبی مشاهده گردید. با این‌حال، ارزن نوتریفید در مقایسه با سایر گونه‌های علوفه‌ای تحت شرایط تنش آبی، افت عملکرد کمتری داشت و توانایی بالاتری در حفظ تولید نسبی خود نشان داد. این ویژگی، به همراه سیستم فتوسنتزی C4 و توانایی تنظیم تعرق، ارزن نوتریفید را به‌عنوان گونه‌ای مقاوم به خشکی معرفی کرده است (شرستا و همکاران، ۲۰۲۳). ارزن به‌طورکلی به‌عنوان گیاهی مقاوم به خشکی شناخته می‌شود، اما مقاومت آن نسبی است و به ویژگی‌های فیزیولوژیکی و ژنتیکی خاص آن بستگی دارد. ارزن مرواریدی، در مقایسه با غلاتی مانند گندم و ذرت، توانایی بیشتری در حفظ عملکرد نسبی خود تحت تنش آبی دارد. این مقاومت به ویژگی‌هایی همچون کاهش مصرف آب از طریق بسته شدن روزنه‌ها، افزایش تولید ترکیبات تنظیم‌کننده اسمزی مانند پرولین و قندهای محلول، و توسعه ریشه‌های عمیق‌تر برای جذب آب بیشتر از خاک مربوط می‌شود (مارویا و واخاریا، ۲۰۱۶؛ راغب بخیط الوافی و همکاران، ۲۰۲۱؛ شرستا و همکاران، ۲۰۲۳). با این‌حال، مقاومت به خشکی به این معنا نیست که ارزن تحت تنش شدید آبی هیچ کاهش عملکردی نشان نمی‌دهد. بلکه منظور آن است که این گیاه در مقایسه با سایر غلات در شرایط مشابه، عملکرد بهتری ارائه می دهد و کارایی مصرف آب بیشتری دارد. به‌عنوان مثال، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که تحت شرایط کم‌آبی، ارزن می تواند تولید ترکیبات پروتئینی و سایر متابولیت‌های سازگار با تنش را افزایش دهد که به بقای گیاه در شرایط خشک کمک می‌کند (قاتک و همکاران، ۲۰۱۶). بنابراین، به‌کارگیری راهکارهای مدیریتی بهینه آبیاری می‌تواند نقش مهمی در بهبود بهره‌وری و کاهش اثرات منفی تنش آبی در این محصول ایفا کند (کروکستون و همکاران، ۲۰۲۰؛ آگیلار و همکاران، ۲۰۲۳؛ سیواساکتی و همکاران، ۲۰۲۴).

هدف اصلی مدیریت آبیاری در مزرعه، به حداکثر رساندن عملکرد محصول از طریق شناسایی دوره‌های حساس به کمبود آب است. علاوه بر این، مدیریت رطوبت خاک در ناحیه ریشه و پیش‌بینی سناریوهای خشکسالی برای بهبود عملکرد گیاهان ضروری است (گرکچ، ۲۰۱۹). در این زمینه، استراتژی‌هایی مانند کم‌آبیاری[2] (DI) که به‌منظور کاهش مصرف آب آبیاری و افزایش بهره‌وری آب طراحی شده‌اند، به‌عنوان راهکارهایی نویدبخش برای دست‌یابی به عملکرد قابل قبول و اقتصادی در مناطق خشک و نیمه‌خشک شناخته می‌شوند (استگنو و همکاران، ۲۰۲۴؛ جیائو و همکاران، ۲۰۲۴). کم‌آبیاری علی‌رغم کاهش عملکرد در واحد سطح، با کاهش مصرف آب و هزینه‌های مرتبط با استحصال، انتقال و توزیع آن، منجر به سودآوری بیشتر می‌شود (یازار و همکاران، ۲۰۰۹). در این راستا، روش‌های پیشرفته کم‌آبیاری مانند کم‌آبیاری تنظیم‌شده[3] (RDI) و آبیاری ناقص ریشه به‌طور متغیر[4] (PRD) به‌عنوان تکنیک‌های کلیدی در مدیریت آبیاری و افزایش بهره‌وری گیاهان تحت شرایط کم‌آبی شناخته شده‌اند. این روش‌ها به کشاورزان کمک می‌کنند تا با مصرف کمتر آب، محصولاتی با کیفیت بالا تولید کنند و به این ترتیب به راهکارهایی پایدار برای کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک تبدیل شوند (هوشمند و همکاران، ۲۰۱۹؛ الغامدی و همکاران، ۲۰۲۳؛ چن و همکاران، ۲۰۲۳؛ استگنو و همکاران، ۲۰۲۴؛ جیائو و همکاران، ۲۰۲۴). روش RDI به کاهش میزان آبیاری کمتر

1- Irrigation water use efficiency
2- Deficit irrigation
3- Regulated deficit irrigation
4- Partial root-zone drying

از نیاز تبخیر-تعرق کامل گیاه در مراحل خاص رشد اشاره دارد. این روش مصرف آب را کاهش داده و در عین حال، عملکرد محصول را حفظ یا بهبود می‌بخشد. روش RDI برای بهینه‌سازی IWUE طراحی شده است و در محصولات مختلف از جمله ارزن مرواریدی، سورگوم علوفه‌ای، ذرت و گندم به اثبات رسیده است (بهاتارای و همکاران، ۲۰۲۰ الف؛ وو و همکاران، ۲۰۲۰؛ الحمد و همکاران، ۲۰۲۳؛ الغامدی و همکاران، ۲۰۲۳؛ چن و همکاران، ۲۰۲۳؛ جیائو و همکاران، ۲۰۲۴). در این روش، لازم است که وضعیت آب گیاه به‌طور مداوم مورد بررسی قرار گیرد تا تنش آبی در سطحی نگه‌داشته شود که به عملکرد گیاه آسیب نرساند. روش PRD یک مدیریت کم آبیاری به شیوه خشکی موضعی ریشه است که از روش RDI توسعه یافته است. در این روش، تنها بخشی از منطقه ریشه در هر نوبت آبیاری مرطوب می‌شود و بخش دیگر به حال خود رها می‌شود. زمانی که میزان آب خاک به حد ظرفیت زراعی می‌رسد، آبیاری به بخش خشک ریشه منتقل می‌شود. این تکنیک IWUE را بدون کاهش قابل توجه در عملکرد گیاه بهبود می‌بخشد و به‌ویژه برای افزایش غلظت شیره آوندی و کاهش هدایت روزنه‌ها مؤثر است که به نوبه خود تلفات آب را کاهش می‌دهد. همچنین، PRD کیفیت محصول را از طریق افزایش میزان قند بهبود می‌بخشد و در مقایسه با RDI، بهبود قابل توجهی در عملکرد محصول ارائه می‌دهد (لیو و همکاران، ۲۰۰۶؛ لیما و همکاران، ۲۰۱۵؛ اسماعیل و همکاران، ۲۰۱۸؛ الحمد و همکاران، ۲۰۲۳؛ الغامدی و همکاران، ۲۰۲۳). تفاوت‌های کلیدی میان PRD و RDI در نحوه اعمال کم‌آبیاری است. درحالی که PRD به‌طور متناوب بخش‌های مختلف ریشه را آبیاری می‌کند، RDI سطحی از کمبود رطوبت را در کل سیستم ریشه ایجاد می‌کند (واکریم و همکاران، ۲۰۰۵). هر دو روش می‌توانند به افزایش بهره‌وری مصرف آب کمک کنند، اما PRD به‌دلیل ایجاد سیگنال‌های شیمیایی اسید آبسزیک (ABA) در ریشه‌های خشک، در کاهش تعرق و بهبود کارایی جذب آب مؤثرتر است (مارتین ورتدر و داد، ۲۰۱۱). بسیاری از محققان این روش را به‌عنوان یکی از موفق‌ترین سناریوها در بهبود عملکرد محصول و بهره‌وری مصرف آب معرفی کرده‌اند (الهانی و همکاران، ۲۰۱۹؛ خالقی و همکاران، ۲۰۲۰). تحقیقات متعددی در زمینه تأثیر تکنیک‌های آبیاری مانند PRD و RDI بر روی محصولات مختلف انجام شده است. مطالعه‌ای بر روی گوجه‌فرنگی نشان داد که استفاده از روش PRD با تأمین ۸۵ درصد نیاز آبی گیاه، بهترین نتیجه را از نظر IWUE (۱۶ کیلوگرم بر مترمکعب) و وزن خشک زیست‌توده (۱۱۳/۷۵ گرم) به همراه داشت. این روش موجب افزایش ۲۲ درصدی IWUE نسبت به آبیاری کامل شد، درحالی‌که فقط کاهش هفت درصدی غیرمعنی‌دار در وزن خشک زیست‌توده نسبت به آبیاری کامل مشاهده گردید (هوشمند و همکاران، ۲۰۱۹). چنگ و همکاران (۲۰۲۱) نیز گزارش کردند که اجرای روش PRD در مراحل اولیه رشد ذرت، اثرات منفی کمبود آب بر رشد گیاه را تا ۸۱/۸۹ درصد کاهش داد و موجب کاهش ۱۷/۷ درصدی عملکرد دانه در مقایسه با آبیاری کامل شد، اما IWUE را تا ۴۱ درصد افزایش داده است. اقبال و همکاران (۲۰۱۹ الف) بیان کردند که روش PRD در گندم، با حفظ آب و افزایش IWUE، عملکردی نزدیک به آبیاری کامل ارائه می‌دهد. آن‌ها مشاهده کردند که در آبیاری کامل، بالاترین عملکرد دانه و وزن زیست‌توده شاخساره به‌ترتیب ۲۷ و ۵۰/۹ گرم بود، درحالی‌که این مقادیر در تیمار PRD به ۲۴/۷ و ۴۶/۸ گرم و در RDI به ۱۴/۴ و ۳۶/۲ گرم کاهش یافت. باوجود این، کاهش عملکرد دانه و زیست‌توده شاخساره در PRD فقط هشت درصد نسبت به آبیاری کامل بود، درحالی‌که شاخص برداشت در هر دو روش برابر ۵۳ درصد بود. روش PRD همچنین با ایجاد تغییرات فیزیولوژیکی مطلوب، مانند افزایش ABA و تغییرات اسمزی، نسبت به RDI عملکرد بهتری نشان داد و به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای مناطق کم‌آب معرفی شد. جهان‌سوز و همکاران (۲۰۱۴) نیز گزارش کردند که کاهش ۲۵ درصدی در میزان آب آبیاری باعث کاهش عملکرد ذرت، سورگوم و ارزن به‌ترتیب به

میزان ۲۸، ۱۳ و ۲۴ درصد می‌شود. با این‌حال، کم‌آبیاری منجر به افزایش پروتئین خام در هر سه گونه گیاهی شد. با توجه به بحران‌های فزاینده کم‌آبی و تغییرات اقلیمی در استان کرمان، نیاز به بهبود مدیریت منابع آب و ارتقاء بهره‌وری کشاورزی به‌طور جدی احساس می‌شود. ارزن مرواریدی با ویژگی‌های مقاومت به خشکی و توانایی بالا در تأمین علوفه و غذای انسان و دام، می‌تواند نقش مهمی در کشاورزی این منطقه ایفا کند. استفاده از تکنیک‌های پیشرفته آبیاری مانند RDI و PRD فرصت بی‌نظیری برای بازنگری در شیوه‌های سنتی و ایجاد تحول در کشاورزی استان فراهم می‌آورد. با این حال، تاکنون تحقیقی جامع و سامانمند در خصوص تأثیر هم‌زمان این روش‌های کم‌آبیاری بر صفات کمی و کیفی ارزن مرواریدی در استان کرمان انجام نشده است. این تحقیق نوآورانه، برای نخستین بار به‌طور دقیق و مقایسه‌ای به بررسی تأثیر شیوه‌های کم‌آبیاری RDI و PRD در رژیم‌های مختلف آبیاری بر ارزن مرواریدی هیبرید (رقم نوتریفید) می‌پردازد و بدین ترتیب امکان شناسایی راهکارهای جدید و بهینه برای بهبود عملکرد و بهره‌وری آب در این منطقه خشک را فراهم می آورد.

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های اقلیمی محل اجرای آزمایش

این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شهید باهنر کرمان، واقع در طول جغرافیایی ۳۰ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۵۷ درجه و ۱۰ دقیقه شمالی، طی دو فصل زراعی ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ انجام شد. بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی آمبرژه، منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم خشک با تابستان‌های گرم و زمستان‌های معتدل است (مزیدی و همکاران، ۱۴۰۰). میانگین دمای سالانه این منطقه حدود ۱۷/۴ درجه سلسیوس است و بیشینه و کمینه دما به‌ترتیب ۲۶/۲ و ۸/۶ درجه سلسیوس ثبت شده است. این منطقه در ارتفاع ۱۷۵۴ متری از سطح دریا قرار دارد. متوسط رطوبت نسبی سالانه ۳۱/۵ درصد، متوسط بارندگی سالانه حدود ۱۲۴/۳ میلی‌متر و میانگین تبخیر سالانه ۲۷۹۲/۳ میلی‌متر گزارش شده است.

مشخصات طرح آماری و تیمارهای آزمایش

این پژوهش به‌صورت کرت‌های خرد شده نواری در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و هشت تیمار اجرا شد. عامل اصلی افقی شامل دو سناریوی مدیریتی کم‌آبیاری، یعنی آبیاری ناقص ریشه به‌طور متغیر (PRD) و کم‌آبیاری تنظیم شده (RDI) بود. عامل اصلی عمودی نیز شامل چهار سطح آبیاری به میزان ۴۰ درصد (I40)، ۶۰ درصد (I60)، ۸۰ درصد (I80) و ۱۰۰ درصد (I100) نیاز آبی گیاه بود.

آزمون خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

برای ارزیابی دقیق وضعیت خاک پیش از عملیات آماده‌سازی زمین و اجرای نقشه آزمایش، نمونه‌برداری از عمق صفر تا ۸۰ سانتی‌متری خاک در ۱۰ نقطه مختلف از مزرعه انجام شد. این نمونه‌برداری‌ها به‌منظور تعیین بافت خاک، بررسی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و ارزیابی وضعیت عناصر غذایی موجود در خاک صورت گرفت. نتایج آزمون خاک بر روی نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش قبل از کشت

عمق خاک (cm)	FC	PWP	EC (dS/m)	pH	Na	Ca	Mg	ESP	شن	سیلت	رس	بافت
	(درصد وزنی)				(meq/L)				(%)			
0-20	12	5	3.30	7.89	4.62	3.80	4.28	8.32	68	17	15	شن لومی
20-40	20	8	1.80	8.09	5.81	2.50	3.00	4.04	14	62	24	سیلتی لوم
40-60	16	8	0.90	8.09	5.12	2.10	1.70	3.52	34	55	11	سیلتی لوم
60-80	15	7	0.80	8.06	4.25	2.00	2.00	3.86	20	71	9	سیلتی لوم

عملیات آماده‌سازی زمین و کاشت

عملیات آماده‌سازی زمین و کاشت بر اساس روش معمول منطقه انجام شد. بر اساس نتایج آزمون خاک، کودهای مصرفی شامل ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره بودند. همه کود فسفاته به همراه نیمی از کود ازته در مرحله آماده‌سازی مزرعه و پیش از کاشت به خاک افزوده شدند. نیمه باقی مانده کود ازته به‌صورت سرک در مرحله ساقه‌دهی به مزرعه اضافه شد. سپس، کاشت بذرهای ارزن مرواریدی هیبرید (رقم نوتریفید) به‌صورت دستی و با روش خشکه کاری در دو سال متوالی در اواسط خرداد ماه انجام گرفت. بذرها در کرت‌های چهار ردیفی به طول پنج متر، با فاصله ۲۰ سانتی‌متر روی ردیف‌ها و فاصله بین خطوط ۷۵ سانتی متر، در عمق سه تا الی سانتی‌متری کاشته شدند. فاصله بین کرت‌ها ۱/۵ متر و فاصله بین تکرارها دو متر در نظر گرفته شد. در طول فصل زراعی در هر دو سال، تمامی مراقبت‌های لازم از مزرعه شامل مصرف کود سرک، واکاری، تنک کردن، وجین علف‌های هرز، و کنترل آفات و بیماری‌ها انجام شد. آبیاری به روش قطره‌ای نوار (تیپ) انجام گرفت، به‌گونه‌ای که نوارهای آبیاری قطره‌ای دو طرف ردیف‌های کشت قرار داده شدند (شکل ۱). سیستم آبیاری تحت‌فشار به‌گونه‌ای طراحی شد که دو لوله لاترال در دو طرف هر ردیف کشت نصب شد. فاصله قطره‌چکان‌ها ۲۰ سانتی‌متر و دبی خروجی هر قطره‌چکان ۱/۳ لیتر بر ساعت بود.

شکل ۱- نمای کلی از مزرعه تحقیقاتی و سیستم آبیاری قطره‌ای نواری مورد استفاده در پژوهش

در روش‌های آبیاری کامل و RDI، گیاهان از هر دو طرف آبیاری شدند. اما در روش PRD، آبیاری به‌صورت تناوبی انجام شد؛ به‌گونه‌ای که در هر نوبت آبیاری، تنها یکی از لوله‌های آبده فعال بود تا نیمی از سیستم ریشه خشک بماند. بنابراین، پس از هر دو نوبت آبیاری، محل جریان آب از سمت مرطوب به سمت خشک تغییر می‌کرد. حجم آب مورد نیاز برای آبیاری هر کرت با استفاده از کنتور حجمی دقیق اندازه‌گیری گردید. تا زمان استقرار کامل گیاهان، همه کرت‌ها به میزان یکسان آبیاری شدند و پس از آن، تیمارهای آبیاری اعمال شد. آبیاری برای همه تیمارها با دور ثابت سه روز انجام شد و تعداد دفعات آبیاری در تمامی تیمارها یکسان بود، اما حجم آب مصرفی تفاوت داشت. در سال اول، ۳۰ نوبت و در سال دوم، ۳۱ نوبت آبیاری انجام شد. کیفیت آب آبیاری (آب چاه) مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲، و حجم آب مصرفی تیمارهای مختلف رژیم آبیاری در روش‌های PRD و RDI (بر حسب مترمکعب در هکتار) طی فصل رشد در دو سال زراعی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲- ویژگی‌های شیمیایی آب آبیاری مورد استفاده در پژوهش

Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	SO_4^{2-}	Cl^-	HCO_3^-	CO_3^{2-}	EC (dS/m)	pH
(meq/L)								
6.2	1.2	7.2	12.60	1.80	0.20	0.00	1.18	7.30

جدول ۳- حجم آب مصرفی تیمارهای مختلف رژیم آبیاری در روش‌های کم‌آبیاری تنظیم‌شده (RDI) و آبیاری ناقص ریشه به‌طور متغیر (PRD) طی دو سال زراعی

رژیم آبیاری	۴۰ درصد نیاز آبی گیاه		۶۰ درصد نیاز آبی گیاه		۸۰ درصد نیاز آبی گیاه		۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه	
سال زراعی	اول	دوم	اول	دوم	اول	دوم	اول	دوم
میانگین مقدار آب مصرفی (m^3/ha)	2522.67	2677.76	3784.00	4016.64	5045.33	5355.53	6306.67	6694.41

نیاز آبی گیاهان در هر دوره آبیاری با استفاده از لایسیمتر بیلان آبی (زهکش‌دار) استوانه‌ای با قطر ۱/۶ متر و ارتفاع یک متر تعیین شد. برای نصب لایسیمتر در مزرعه، گودالی بزرگ‌تر از ابعاد آن حفر شد و لایسیمتر به نحوی در آن قرار گرفت که لبه آن ۱۰ سانتی‌متر بالاتر از سطح خاک باشد تا از ورود آب آبیاری حاشیه به داخل لایسیمتر جلوگیری شود (شکل ۲). کف لایسیمتر به‌صورت شیب‌دار طراحی‌شده و انتهای آن به‌وسیله لوله‌ای به خارج متصل گردید تا زه‌آب به محل اندازه‌گیری هدایت شود. در کف لایسیمتر، لایه‌ای به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر از شن قرار داده شد و روی آن توری فلزی نصب گردید تا از شسته‌شدن ذرات خاک جلوگیری شود. سپس لایسیمتر با خاک محل حفر گودال، با در نظر گرفتن ترتیب لایه‌های پروفیل خاک، پر شد. برای فشرده‌سازی خاک، خاک داخل لایسیمتر طی چند مرحله فشرده و چند نوبت آبیاری شد. پس از نشست کامل خاک، لایسیمتر مجدداً تا سطح موردنظر با خاک پر شد. در زمان کشت و پس از آن، شرایط استاندارد استفاده از لایسیمتر رعایت شد. آب اضافی از طریق لوله زهکش تعبیه‌شده در انتهای لایسیمتر به ظرف مدرج منتقل شد و حجم آن اندازه‌گیری گردید. برای اندازه‌گیری رطوبت خاک داخل لایسیمتر از تانسیومتر استفاده شد. در طول فصل زراعی، نیاز آبی ارزن مرواریدی در هر نوبت آبیاری با استفاده از لایسیمتر زهکش‌دار و معادله بیلان آبی خاک (رابطه ۱) محاسبه شد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸):

$$ET_c = I+P-D\pm\Delta S \quad (1)$$

در این معادله، ETc: نیاز آبی یا میزان تبخیر- تعرق گیاه (میلی‌متر)، I: میزان آب آبیاری (میلی‌متر)، P: میزان بارندگی (میلی‌متر)، D: میزان آب زهکشی شده (میلی‌متر) و ΔS: تغییرات رطوبت خاک یا تغییر در عمق آب موجود در پروفیل خاک (میلی‌متر) است.

شکل ۲- لایسیمتر مورد استفاده در محل اجرای آزمایش

ارزیابی خصوصیات مختلف در مرحله پایانی رشد

در پایان دوره رشد ارزن مرواریدی در اواسط شهریور ماه، به‌منظور حذف اثرات حاشیه‌ای، ردیف‌های کناری و نیم متر از ابتدا و انتهای هر ردیف حذف شدند. سپس از دو ردیف مرکزی هر تکرار و تیمار، ۱۰ بوته به‌طور تصادفی انتخاب و نمونه‌برداری شد. نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شدند و ویژگی‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفتند. ابتدا، عملکرد علوفه تر (ساقه و برگ) با استفاده از ترازوی دیجیتالی اندازه‌گیری شد. سپس، نمونه‌ها به مدت سه هفته در دمای ۲۵ درجه سلسیوس خشک شدند و عملکرد علوفه خشک (ساقه و برگ) تعیین گردید (اسدی و همکاران، ۱۳۹۷). همچنین، درصد پروتئین علوفه خشک

و عملکرد پروتئین علوفه خشک نیز اندازه‌گیری شد. در این مطالعه، کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه تر و خشک طبق رابطه ۲ محاسبه شد:

$$IWUE = Y_T/V_T \quad (۲)$$

که در آن: IWUE: کارایی مصرف آب آبیاری (t/m^3)، Y_T: عملکرد علوفه (t/ha) و V_T: میزان کل حجم آب آبیاری مصرفی در طول فصل (m^3/ha) است.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

پس از مرتب‌سازی داده‌ها، تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از روش‌های مختلف انجام شد. نرمال بودن داده‌های آزمایشی با استفاده از آزمون شاپیرو–ویلک و رویه Proc Univariate بررسی شد. برای ارزیابی همگنی واریانس خطا، از آزمون بارتلت استفاده شد. تجزیه واریانس مرکب با استفاده از رویه Proc GLM و مقایسه میانگین‌ها بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام گرفت. همچنین، همبستگی بین متغیرها با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون بررسی شد. محاسبات آماری با استفاده از نرم‌افزارهای SAS نسخه ۹/۴، SPSS نسخه ۲۴ و برنامه Excel انجام شدند.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس مرکب صفات مختلف گیاه ارزن مرواریدی هیبرید

نتایج تجزیه واریانس مرکب (جدول ۴) مربوط به صفات گیاه ارزن مرواریدی هیبرید (رقم نوتریفید) نشان داد که اثر سال بر عملکرد پروتئین علوفه خشک در سطح احتمال پنج درصد و بر سایر صفات در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است. این نتایج نشان می‌دهد که تغییرات سالیانه، از جمله تفاوت در شرایط اقلیمی مانند بارندگی، دما و دیگر عوامل محیطی، می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر این صفات داشته باشند. اثرات ساده کم‌آبیاری و رژیم آبیاری بر همه صفات مورد مطالعه معنی‌دار بود. اثر متقابل سال × کم‌آبیاری فقط بر درصد و عملکرد پروتئین علوفه خشک ($P < 0.01$) و اثر متقابل سال × رژیم آبیاری بر کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه خشک در سطح احتمال پنج درصد و بر سایر صفات در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. علاوه بر این، اثر متقابل کم‌آبیاری × رژیم آبیاری بر عملکرد علوفه خشک، کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه خشک و عملکرد پروتئین علوفه خشک ($P < 0.05$) و نیز بر عملکرد علوفه تر و درصد پروتئین علوفه خشک ($P < 0.01$) معنی‌دار بود. با این‌حال، اثر متقابل سال × کم‌آبیاری × رژیم آبیاری فقط بر درصد پروتئین علوفه خشک ($P < 0.01$) معنی‌دار بود. این نتایج نشان می‌دهد که شرایط محیطی مختلف، از جمله سال‌های متفاوت، کم‌آبیاری و رژیم‌های آبیاری و تعامل آن با عوامل ژنتیکی بر صفات ارزن مرواریدی هیبرید تأثیرگذار بوده و در مدیریت بهینه تولید علوفه و منابع آبی اهمیت دارند.

مقایسه میانگین اثرات ساده کم‌آبیاری

نتایج مقایسه میانگین اثرات ساده کم‌آبیاری بر صفات مختلف گیاه ارزن مرواریدی هیبرید (رقم نوتریفید) در دو سال زراعی در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج نشان داد که روش PRD به‌طور معنی‌داری باعث افزایش همه صفات مورد مطالعه در مقایسه با RDI شد. این افزایش شامل عملکرد علوفه تر (۱۴/۶۴ درصد)، عملکرد علوفه خشک (۱۰/۵۸ درصد)، کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه تر (۱۴/۷۱ درصد)، کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه خشک (۱۱/۴۳ درصد)، درصد پروتئین علوفه خشک (۲۶/۸۷ درصد) و عملکرد پروتئین علوفه خشک (۳۵/۸۵ درصد) بود. به‌طورکلی، با توجه به یافته‌های موجود، PRD به‌دلیل بهبود توزیع آب در گیاه و حفظ بهتر رطوبت برگ‌ها، می‌تواند به‌عنوان یک روش مؤثر در افزایش عملکرد و کیفیت گیاهان مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، PRD می‌تواند باعث افزایش IWUE در گیاهان علوفه‌ای بدون کاهش

بیوماس و بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیکی مانند مقاومت به اکسیداسیون، تنظیم سازگاری اسمزی، فتوسنتز و محتوای کلروفیل در برگ‌ها شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹). با توجه به نتایج به‌دست آمده، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که روش PRD در مقایسه با روش RDI برتر است، به‌ویژه زمانی که هدف افزایش عملکرد و بهبود کیفیت علوفه است. علوفه تولید شده با روش PRD از نظر کمیت و کیفیت در سطح بالاتری قرار دارد و می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر در بهبود تولیدات کشاورزی و کیفیت محصولات مورد استفاده قرار گیرد. در پنبه، روش PRD با افزایش غلظت ABA در شیره زایلم (بافت چوبی) و کاهش هدایت روزنه‌ها، منجر به کاهش تعرق و افزایش بهره‌وری آب شد (لی و همکاران، ۲۰۱۷). مطالعه‌ای روی ذرت نیز نشان داد که IWUE در روش PRD بیشتر از روش RDI بود و این روش با افزایش نسبت سطح ریشه به برگ و هدایت هیدرولیکی ریشه، به بهبود بهره‌وری آب و حفظ عملکرد فتوسنتز کمک کرد (ژنچانگ و همکاران، ۲۰۱۶). این مطالعات با نتایج ما همخوانی داشت. احمد و همکاران (۲۰۲۰) نیز گزارش کردند که ویژگی‌های عملکرد گندم در آبیاری معمولی بیشتر از PRD بود، درحالی‌که مقدار نیتروژن، فسفر، و پتاسیم (NPK) دانه و بهره‌وری آب در تیمار PRD بالاتر بود.

جدول ۴- تجزیه واریانس مرکب صفات کارایی مصرف آب، عملکرد و کیفیت علوفه ارزن مرواریدی هیبرید (رقم نوتریفید) در تیمارهای مختلف کم‌آبیاری و رژیم آبیاری در دو سال زراعی

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		عملکرد علوفه تر	عملکرد علوفه خشک	درصد پروتئین علوفه خشک	عملکرد پروتئین علوفه خشک	کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه تر	کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه خشک
سال	1	2626.85^{**}	54.85^{**}	74.68^{**}	222704^{*}	108.96^{**}	1.85^{**}
تکرار (سال)	4	7.34	0.51	0.56	12334	0.24	0.02
کم‌آبیاری (a)	1	662.38^{**}	16.91^{*}	54.34^{**}	1449167^{**}	31.88^{**}	0.93^{*}
سال × کم‌آبیاری	1	$11.18^{n.s}$	$0.34^{n.s}$	14.16^{**}	208510^{**}	$0.55^{n.s}$	$0.01^{n.s}$
خطا (Ea)	4	13.25	1.73	0.43	8478	0.85	0.10
رژیم آبیاری (b)	3	4924.23^{**}	199.35^{**}	14.40^{**}	812173^{**}	9.22^{**}	0.37^{*}
سال × رژیم آبیاری	3	196.16^{**}	$4.67^{n.s}$	5.43^{**}	310852^{**}	12.22^{**}	0.29^{*}
خطا (Eb)	12	16.21	1.46	0.64	21155	0.96	0.07
کم‌آبیاری × رژیم آبیاری (ab)	3	62.32^{**}	2.14^{*}	10.12^{**}	49777^{*}	$1.19^{n.s}$	0.15^{*}
سال × کم‌آبیاری × رژیم آبیاری	3	$9.50^{n.s}$	$0.45^{n.s}$	2.11^{**}	$36016^{n.s}$	$0.41^{n.s}$	$0.01^{n.s}$
خطا (Eab)	12	8.16	0.63	0.25	13105	0.43	0.03
ضریب تغییرات (CV, %)	-	5.24	6.74	5.62	11.33	5.54	6.62
ضریب تبیین (R^2, %)	-	99.49	98.96	98.80	97.38	97.75	94.92

*، ** و ns: به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد و غیر معنی‌دار

مقایسه میانگین اثرات ساده رژیم آبیاری

نتایج مقایسه میانگین اثرات ساده رژیم آبیاری بر صفات مختلف گیاه ارزن مرواریدی هیبرید (رقم نوتریفید) در دو سال زراعی (جدول ۶) نشان داد که بالاترین میزان عملکرد علوفه تر (۷۳/۱۴ $t\ ha^{-1}$) متعلق به تیمار I100 بود. کاهش میزان آب آبیاری به‌طور معنی‌داری باعث کاهش عملکرد علوفه تر، به‌ویژه در تیمارهای I40 و I60 به‌ترتیب با کاهش ۵۹/۵۵ و ۳۶/۳۵ درصدی شد. کاهش محتوای آب خاک جذب عناصر ضروری مانند نیتروژن و فسفر را مختل کرده و عملکرد گیاه را کاهش می‌دهد، زیرا ریشه‌ها در شرایط خشکی توانایی جذب کافی مواد مغذی را ندارند (جهان‌زاد و همکاران، ۲۰۱۳). با این حال، تیمار I80 با کاهش کمتر و معنی‌دار عملکرد، به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای مدیریت مصرف آب معرفی شد. این نتایج نشان می‌دهد که آبیاری با ۸۰ درصد نیاز آبی، ضمن کاهش مصرف آب، می‌تواند سطح قابل قبولی از عملکرد محصول را در شرایط کم‌آبی حفظ کند.

بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌ها، تیمار I100 با عملکرد علوفه خشک ۱۵/۴۳ $t\ ha^{-1}$ بالاترین میزان را داشت و تفاوت معنی‌داری با I80 نشان نداد. تیمارهای I40 و I60 به‌ترتیب با کاهش ۵۷/۰۰ و ۳۳/۲۳ درصدی نسبت به I100، کمترین عملکرد را داشتند. در شرایط تنش آبی، کاهش ماده خشک به کاهش فشار آماس سلول‌ها و سطح برگ مرتبط است که منجر به کاهش نرخ فتوسنتز می‌شود. این کاهش ناشی از محدودیت‌های بیوشیمیایی و آسیب به رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی، به‌ویژه کلروفیل‌ها است (لاولر و کرنیک، ۲۰۰۲). واسایا و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که حفظ پتانسیل اسمزی می‌تواند اثرات نامطلوب خشکی را کاهش دهد، اما افزایش تنش خشکی موجب کاهش وزن و ماده خشک اندام‌های هوایی ذرت شد.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثرات ساده کم‌آبیاری بر صفات کارایی مصرف آب، عملکرد و کیفیت علوفه ارزن مرواریدی هیبرید (رقم نوتریفید) در دو سال زراعی

کم‌آبیاری (a)	عملکرد علوفه تر ($t\ ha^{-1}$)	عملکرد علوفه خشک ($t\ ha^{-1}$)	درصد پروتئین علوفه خشک	عملکرد پروتئین علوفه خشک ($kg\ ha^{-1}$)	کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه تر (t/m^3)	کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه خشک (t/m^3)
آبیاری ناقص ریشه به طور متغیر (PRD)	58.19[a]	12.33[a]	10.01[a]	1167.16[a]	12.71[a]	2.73[a]
کم آبیاری تنظیم شده (RDI)	50.76[b]	11.15[b]	7.89[b]	859.16[b]	11.08[b]	2.45[b]

میانگین‌ها با آزمون دانکن مقایسه شده‌اند (α=٪۵) و تفاوت میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک معنی‌دار نیست

بر اساس نتایج مقایسه میانگین تیمارها، I80 با مقدار ۱۳/۱۴ t/m^3 بالاترین کارایی مصرف آب بر اساس عملکرد علوفه تر را داشت و در مقایسه با I100 افزایش ۱۶/۸۰ درصدی نشان داد. اگرچه تیمارهای I40 و I60، IWUE کمتری نسبت به I80 داشتند، اما تفاوت معنی‌داری با I100 نداشتند. برای کارایی مصرف آب بر اساس عملکرد علوفه خشک، تیمار I80 بالاترین کارایی را نشان داد و با تیمار I60 اختلاف معنی‌داری نداشت، اما نسبت به I100 افزایش ۱۷/۶۵ درصدی نشان داد. این نتایج نشان می‌دهند که تأمین کامل نیاز آبی گیاه لزوماً بهینه‌ترین IWUE را به همراه ندارد. به‌طور کلی، نتایج بیانگر این است که در شرایط کم‌آبی، کاهش آبیاری تا ۸۰ درصد می‌تواند IWUE و عملکرد علوفه تر را بهبود بخشد، ولی کاهش بیشتر از آن تأثیر منفی خواهد داشت.

مطالعات اخیر روی سورگوم نیز تأثیر مثبت آبیاری محدود و تنش خشکی بر بهبود IWUE را تأیید کرده‌اند. این تأثیر احتمالاً به‌دلیل کاهش تبخیر و بسته شدن یا کاهش تعداد روزنه‌های برگ است و با نتایج مطالعه ما همخوانی دارد (فرهادی و همکاران، ۲۰۲۲؛ قالخانی و همکاران، ۲۰۲۳). علاوه بر این، ساناتاوای و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند که آبیاری بیش از حد (۱۰۴ درصد تبخیر و تعرق) به‌طور معنی‌داری IWUE ذرت را کاهش

می‌دهد. خشائی و همکاران (۱۳۹۸) بیان کردند که کاهش ۲۸ درصدی آبیاری با افزایش بهره‌وری آب می‌تواند در مناطق کم‌آب راهکاری مناسب برای بازدهی بیشتر باشد. آن‌ها گزارش کردند که بیشترین IWUE (۲/۹۸ کیلوگرم بر هکتار) با کم‌آبیاری ۷۵ درصد نیاز آبی خالص گیاه حاصل شد.

بر اساس نتایج مقایسه میانگین، بیشترین درصد پروتئین علوفه خشک (۱۰/۳۸ درصد) در تیمار I40 مشاهده شد که نسبت به تیمار I100، با ۷/۷۴ درصد، ۳۴/۱۱ درصد فزایش داشت. این افزایش احتمالاً به تأثیرات مثبت محدودیت آبی در تحریک تولید پروتئین به‌عنوان مکانیسم دفاعی گیاه در برابر تنش آبی مرتبط است. تیمار I60 نیز باعث کاهش معنی‌دار ۱۳ درصدی پروتئین علوفه خشک نسبت به تیمار I40 شد، اما اختلاف معنی‌داری با تیمار I80 نداشت. کمترین درصد پروتئین مربوط به تیمار I100 بود که احتمالاً به‌دلیل فراهم بودن آب کافی و عدم وجود تنش آبی یا فشارهای محیطی رخ داده است که برای تحریک تولید پروتئین‌های دفاعی ضروری هستند.

تیمار I40 با کمترین میزان عملکرد پروتئین علوفه خشک، حدود ۴۳ درصد کمتر از تیمار I100 بود. عملکرد پروتئین در تیمار I60 نیز نسبت به I100، ۲۲/۸۴ درصد کاهش یافت. تیمار I100 بالاترین عملکرد پروتئین را داشت و با I80 تفاوت معنی‌داری نشان نداد. این نتایج نشان می‌دهند که کاهش آبیاری از ۱۰۰ درصد به ۸۰ درصد نیاز آبی، عملکرد مطلوب پروتئین علوفه خشک را حفظ می‌کند، اما کاهش بیشتر به ۴۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی، موجب افت عملکرد پروتئین می‌شود. بنابراین، آبیاری در سطح ۸۰ درصد نیاز آبی، تعادلی بهینه بین بهره‌وری آب و عملکرد پروتئین ایجاد می‌کند.

تحقیقات نشان داده است که سطوح آبیاری تأثیر چشمگیری بر عملکرد و کیفیت علوفه ارزن مرواریدی دارد. آبیاری کامل بالاترین عملکرد و کیفیت را، شامل افزایش محتوای پروتئین خام و ماده خشک، فراهم می‌کند. با این حال، در شرایط آبیاری محدود نیز می‌توان به عملکردی قابل قبول همراه با راندمان مصرف آب بالاتر دست یافت. علاوه بر این، اثر متقابل آبیاری و نیتروژن می‌تواند به بهبود بیشتر عملکرد و کیفیت علوفه منجر شود (راوال و همکاران، ۲۰۱۴؛ پاریک و همکاران، ۲۰۱۵؛ کروکستون و همکاران، ۲۰۲۰). پژوهش‌های پیشین نتایجی مشابه با یافته‌های این مطالعه ارائه کرده‌اند. کاهش آبیاری از I100 به I40 در ارزن مرواریدی باعث کاهش ماده خشک کل و شاخص سطح برگ شده است، درحالی‌که IWUE و درصد پروتئین خام به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته‌اند، که احتمالاً به تجمع کربوهیدرات‌ها و افزایش محتوای نیتروژن در گیاه تحت تنش آبی مرتبط است (رستم‌زا و همکاران، ۲۰۱۱). علاوه بر این، بررسی‌های اخیر نشان داده‌اند که کاهش آبیاری نسبت به آبیاری معمولی، به کاهش ۲۰/۳ درصدی عملکرد علوفه خشک و ۱۲/۶ درصدی عملکرد پروتئین در ارزن مرواریدی منجر می‌شود (راغب بخیط الوافی و همکاران، ۲۰۲۱). مطالعات مشابه روی گیاهانی مانند سورگوم نشان داده‌اند که کاهش مصرف آب در مراحل رشد به تغییرات عملکرد و کیفیت علوفه منجر می‌شود. تنش آبی متوسط و شدید، عملکرد علوفه خشک و پروتئین را ۲۰ تا ۳۴ درصد کاهش داده است، اما برخی شاخص‌های کیفی مانند پروتئین خام و قابلیت هضم ماده خشک بهبود یافته‌اند (جهان‌زاد و همکاران، ۲۰۱۳). این نتایج که با یافته‌های ما همسو هستند، بر اهمیت تأثیر سطوح آبیاری در عملکرد و کیفیت علوفه تأکید می‌کنند.

مقایسه میانگین اثرات متقابل کم‌آبیاری در رژیم آبیاری

نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل کم‌آبیاری × رژیم آبیاری بر صفات ارزن مرواریدی هیبرید (جدول ۷) نشان داد که بالاترین میانگین عملکرد علوفه تر ($t\ ha^{-1}$ ۸۰/۲۰) در تیمار PRD100 مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها داشت. در سطح مشابه تأمین آب، عملکرد علوفه تر در روش RDI معادل ۶۶/۰۹ تن در هکتار بود. این نتایج نشان می‌دهد که افزایش رژیم آبیاری

تا ۱۰۰ درصد، به‌ویژه در روشPRD، تأثیر مثبتی بر عملکرد علوفه تر دارد، درحالی‌که در روش RDI حتی با تأمین کامل آب، عملکرد کمتری حاصل شد. همچنین، عملکرد علوفه تر در تیمار PRD80 بیشتر از تیمار RDI80 بود و کمترین میانگین عملکرد (۲۶/۷۹ $t\ ha^{-1}$) نیز در تیمار RDI40 ثبت شد. به‌طورکلی، کاهش آب آبیاری باعث کاهش عملکرد علوفه تر در هر دو روش شد، اما روش PRD تحت شرایط مختلف تأمین آب نسبت به RDI عملکرد بهتری نشان داد. حاجی‌راد و همکاران (۱۴۰۰) گزارش کردند که در سیستم آبیاری قطره‌ای، بالاترین عملکرد علوفه تر ذرت (۸۶/۶۷ تن در هکتار) در تیمار آبیاری پالسی با ۱۲۰ درصد نیاز آبی و کمترین آن (۲۳/۳۸ تن در هکتار) در تیمار آبیاری پالسی با ۶۰ درصد نیاز آبی مشاهده شد.

بیشترین عملکرد علوفه خشک (۱۶/۲۷ تن در هکتار) در تیمار PRD100 و کمترین عملکرد (۵/۹۶ تن در هکتار) در تیمار RDI40 مشاهده شد. افزایش تأمین نیاز آبی در هر دو روش کم‌آبیاری عملکرد علوفه خشک را به‌طور معنی‌داری بهبود بخشید. در روش PRD، با تأمین ۸۰ درصد نیاز آبی، عملکرد به ۱۵/۴۷ تن در هکتار رسید که تفاوت معنی‌داری با حداکثر عملکرد نداشت. در مقابل، در روش RDI، بیشترین عملکرد (۱۴/۶۰ تن در هکتار) در آبیاری کامل به‌دست آمد که کمی کمتر از PRD80 بود اما این تفاوت معنی‌دار نبود. این نتایج نشان‌دهنده کارآمدی بیشتر روش PRD در شرایط تأمین آب کامل و حساسیت بیشتر RDI به محدودیت‌های آبی است. تیمار PRD80 به‌عنوان بهترین گزینه اقتصادی و بهره‌وری مطرح می‌شود، زیرا با ۲۰ درصد کاهش مصرف آب، عملکردی مشابه آبیاری کامل ارائه می‌دهد. این تیمار با صرفه‌جویی در مصرف آب و حفظ عملکرد مطلوب، گزینه‌ای کارآمد و مقرون‌به‌صرفه برای بهبود عملکرد علوفه خشک در شرایط کم‌آبی است و به‌عنوان روشی پایدار در مدیریت منابع آب پیشنهاد می‌شود. بر اساس مطالعه ژانگ و همکاران (۲۰۲۳)، روش PRD با ۷۰ و ۸۵ درصد نیاز آبی گیاه بررسی شد. نتایج نشان داد که این روش با کاهش مصرف آب، باعث افزایش جذب فسفر در گیاه یونجه و حفظ عملکرد علوفه شد. این یافته‌ها بر کارایی بالای PRD در حفظ عملکرد با مصرف کمتر آب تأکید دارد و با نتایج مطالعه حاضر هم‌سو است. همچنین، مطالعات روی ذرت نشان داده‌اند که افزایش کمبود آب در روش RDI به کاهش تدریجی و قابل‌توجه عملکرد منجر می‌شود. به‌ویژه، کمبود شدید آب در مرحله رشد رویشی باعث کاهش ارتفاع، سطح برگ و رشد گیاه می‌شود، که با یافته‌های پژوهش ما مطابقت دارند (چی و همکاران، ۲۰۲۰؛ جیائو و همکاران، ۲۰۲۴).

کارآیی استفاده از آب آبیاری می‌تواند با استفاده از مدیریت خاک، پرورش گیاه، مدیریت آب، انتخاب ژنتیکی و مدیریت رقابت گیاهان بهبود یابد (فاروق و همکاران، ۲۰۱۹). نتایج نشان داد که بالاترین کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه تر، معادل ۱۳/۷۴ تن بر مترمکعب، متعلق به تیمار PRD80 بود. پس از آن، تیمار RDI80 با کارایی مصرف آب ۱۲/۵۴ تن بر مترمکعب در رتبه بعدی قرار گرفت که تفاوت معنی‌داری با تیمارهای PRD40، PRD60 و PRD100 نداشت. در مقابل، کمترین IWUE در تیمارهای RDI40 و RDI100 مشاهده شد.

جدول ۶- مقایسه میانگین اثرات ساده رژیم آبیاری بر صفات کارایی مصرف آب، عملکرد و کیفیت علوفه ارزن مرواریدی هیبرید (رقم نوتریفید) در دو سال زراعی

رژیم آبیاری (b)	عملکرد علوفه تر ($t\ ha^{-1}$)	عملکرد علوفه خشک ($t\ ha^{-1}$)	درصد پروتئین علوفه خشک	عملکرد پروتئین علوفه خشک ($kg\ ha^{-1}$)	کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه تر (t/m^3)	کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه خشک (t/m^3)
آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی گیاه	29.58^{d}	6.64^{c}	10.38^{a}	682.07^{c}	11.31^{b}	2.54^{bc}
آبیاری بر اساس ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه	46.56^{c}	10.31^{b}	9.03^{b}	923.77^{b}	11.88^{b}	2.64^{ab}
آبیاری بر اساس ۸۰ درصد نیاز آبی گیاه	68.63^{b}	14.58^{a}	8.65^{b}	1240.33^{a}	13.14^{a}	2.80^{a}
آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه	73.14^{a}	15.43^{a}	7.74^{c}	1197.14^{a}	11.25^{b}	2.38^{c}

میانگین‌ها با آزمون دانکن مقایسه شده‌اند (α=٪۵) و تفاوت میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک معنی‌دار نیست

جدول ۷- مقایسه میانگین اثرات متقابل کم‌آبیاری × رژیم آبیاری بر صفات صفات کارایی مصرف آب، عملکرد و کیفیت علوفه ارزن مرواریدی هیبرید (رقم نوتریفید) در دو سال زراعی

کم‌آبیاری (a)	رژیم آبیاری (b)	عملکرد علوفه تر ($t\ ha^{-1}$)	عملکرد علوفه خشک ($t\ ha^{-1}$)	درصد پروتئین علوفه خشک	عملکرد پروتئین علوفه خشک ($kg\ ha^{-1}$)	کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه تر (t/m^3)	کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه خشک (t/m^3)
آبیاری ناقص ریشه به‌طور متغیر (PRD)	آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی گیاه	32.38^{f}	7.32^{e}	10.62^{b}	764.86^{d}	12.39^{b}	2.81^{ab}
	آبیاری بر اساس ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه	48.48^{d}	10.28^{d}	11.41^{a}	1155.20^{b}	12.37^{b}	2.63^{bc}
	آبیاری بر اساس ۸۰ درصد نیاز آبی گیاه	71.71^{b}	15.47^{ab}	9.45^{c}	1418.70^{a}	13.74^{a}	2.97^{a}
	آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه	80.20^{a}	16.27^{a}	8.59^{d}	1399.57^{a}	12.34^{b}	2.51^{c}
کم آبیاری تنظیم شده (RDI)	آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی گیاه	26.79^{g}	5.96^{f}	10.14^{b}	599.28^{e}	10.23^{d}	2.28^{d}
	آبیاری بر اساس ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه	44.63^{e}	10.33^{d}	6.65^{f}	692.33^{de}	11.39^{c}	2.64^{bc}
	آبیاری بر اساس ۸۰ درصد نیاز آبی گیاه	65.54^{c}	13.70^{c}	7.85^{e}	1061.96^{bc}	12.54^{b}	2.63^{bc}
	آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه	66.09^{c}	14.60^{bc}	6.90^{f}	994.71^{c}	10.16^{d}	2.25^{d}

میانگین‌ها با آزمون دانکن مقایسه شده‌اند (α=٪۵) و تفاوت میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک معنی‌دار نیست

به‌طوری‌که IWUE در تیمار RDI80، ۲۳/۴۲ درصد بیشتر از تیمار RDI100 بود. همچنین، تیمارهای PRD40 و PRD60 اختلاف معنی‌داری با تیمار PRD100 نشان ندادند، که بیانگر پایداری کارایی مصرف آب در شرایط مختلف آبیاری ناقص ریشه است.

بیشترین کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه خشک (۲/۹۷ تن بر مترمکعب) مربوط به تیمار PRD80 بود و تیمار PRD40 بدون اختلاف معنی دار با PRD80، در رتبه دوم قرار گرفت. در مقابل، تیمارهای RDI100 و RDI40 به‌ترتیب با کارایی مصرف آب ۲/۲۵ و ۲/۲۸ تن بر مترمکعب، پایین‌ترین مقادیر را داشتند. IWUE در PRD80 حدود ۳۲ درصد بیشتر از کمترین مقدار در RDI100 بود. در شرایط آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی، کمترین IWUE در روش RDI و بیشترین مقدار در روش PRD مشاهده شد، که نشان‌دهنده تأثیر مثبت PRD در شرایط تنش خشکی شدید است. در شرایط آبیاری بر اساس ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه، اختلاف معنی‌داری بین دو روش PRD و RDI مشاهده نشد، که نشان می‌دهد در شرایط تنش متوسط، تفاوت چندانی در بهره‌وری آب بین این دو روش وجود ندارد. به‌طورکلی، روش PRD80، به‌ویژه در شرایط کم‌آبی، موجب افزایش قابل توجه IWUE و بهبود بهره‌وری آب می‌شود و به‌عنوان یک استراتژی مؤثر برای مدیریت منابع آب و بهبود کشاورزی پایدار پیشنهاد می‌شود. این نتایج با تحقیقات قبلی در مورد ارزن مرواریدی هم‌خوانی دارد (مهرپویان و همکاران، ۱۳۹۰؛ کروکستون و همکاران، ۲۰۲۰). افزایش IWUE احتمالاً به‌دلیل تحریک بهتر ریشه‌ها برای جذب آب و مواد مغذی و همچنین کاهش تبخیر و تعرق است (الهانی و همکاران، ۲۰۱۹). مطالعات مختلف نشان داده‌اند که ارزن مرواریدی در شرایط تنش خشکی، بهره‌وری آب بالاتری نسبت به سایر گیاهان علوفه‌ای دارد (مهرپویان و همکاران، ۱۳۹۰؛ بهاتارای و همکاران، ۲۰۲۰ ب). همچنین، پژوهش‌ها روی مرکبات تحت شرایط کم‌آبیاری نشان داده‌اند که کارایی مصرف آب با کاهش میزان آب افزایش می‌یابد، که با نتایج مطالعه ما همسو است (استگنو و همکاران، ۲۰۲۴). چن و همکاران (۲۰۲۳) گزارش کردند که تیمار RDI در شرایط ۷۵٪ ظرفیت زراعی (FC) باعث افزایش معنی‌دار ارتفاع گیاه، وزن تر و خشک بلال و وزن خشک کل ذرت نسبت به شاهد (آبیاری کامل) شد. همچنین، تیمار PRD به‌طور معنی‌داری عملکرد اقتصادی، کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد و کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس زیست‌توده را نسبت به تیمار RDI افزایش داد. علاوه بر این، تیمار PRD با ۵۰٪ FC باعث کاهش ۷۲ درصدی مصرف آب نسبت به شاهد شد. مطالعات حاجی‌راد و همکاران (۱۴۰۰) نشان داد که در شرایط کمبود آب، استفاده از مدیریت آبیاری پالسی در سیستم آبیاری قطره‌ای و کم‌آبیاری با ۸۰ درصد نیاز آبی گیاه، به بهینه‌سازی مصرف آب و افزایش بهره‌وری در زراعت ذرت علوفه‌ای کمک می‌کند. همچنین، در مطالعه موسوی و همکاران (۱۴۰۱) روی عملکرد، اجزای عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گلرنگ، گزارش شد که برای کاهش ۲۰ درصدی مصرف آب، روش RDI80 و برای صرفه‌جویی ۴۰ درصدی در مصرف آب، روش PRD60 مناسب است.

نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل نشان داد که بالاترین درصد پروتئین (۱۱/۴۱) در تیمار PRD60 به دست آمد، درحالی‌که تیمارهای PRD40 و RDI60 نیز درصد پروتئین قابل توجهی داشتند اما تفاوت معنی‌داری بین آن‌ها مشاهده نشد. کمترین درصد پروتئین در تیمارهای RDI60 و RDI100 ثبت شد که اختلاف معنی داری با یکدیگر نداشتند. در روشPRD، افزایش نیاز آبی از ۴۰ به ۶۰ درصد موجب افزایش معنی‌دار درصد پروتئین شد، اما با افزایش نیاز آبی به ۸۰ و ۱۰۰ درصد، کاهش معنی داری در درصد پروتئین مشاهده شد. به‌طور مشابه، در روش RDI نیز درصد پروتئین در آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی بیشترین مقدار بود، اما با افزایش نیاز آبی به ۶۰ درصد، به کمترین مقدار کاهش یافت و تفاوتی با آبیاری کامل نداشت. به‌طورکلی، در هر دو روش، افزایش نیاز آبی

از ۴۰ به ۶۰ درصد منجر به تغییرات متفاوتی در درصد پروتئین شد، اما افزایش بیش از این مقدار تأثیر منفی داشت. بر این اساس، آبیاری بر اساس ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه بهینه‌ترین روش برای افزایش درصد پروتئین علوفه خشک است. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که کاهش نیاز آبی می‌تواند کیفیت محصولات کشاورزی را بهبود بخشد. تحقیقی روی گوجه‌فرنگی نشان داد که روش RDI با کاهش مصرف آب، کیفیت میوه را از طریق افزایش مواد جامد محلول و ویتامین C افزایش می‌دهد. با این حال، کاهش بیش از حد آب ممکن است به افت عملکرد محصول منجر شود (لو و همکاران، ۲۰۱۹). این یافته‌ها بر اهمیت مدیریت متعادل آب تأکید دارند تا ضمن افزایش بهره‌وری، کیفیت محصول نیز حفظ شود.

افزایش درصد پروتئین در گیاه ارزن تحت تنش خشکی، برخلاف بسیاری از غلات مانند گندم، به مجموعه‌ای از تغییرات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی، ژنتیکی و متابولیکی مرتبط است که در پاسخ به کمبود آب رخ می دهد و باعث سازگاری گیاه با شرایط کم‌آبی می‌شود (چاکرابورتی و همکاران، ۲۰۲۲). یکی از دلایل اصلی این پدیده، تغییر در تخصیص منابع متابولیکی است. در شرایط کم‌آبی، رشد سلولی و میزان فتوسنتز کاهش می‌یابد که این امر موجب کاهش سنتز کربوهیدرات‌ها و نشاسته می‌شود. در نتیجه، گیاه ارزن منابع نیتروژنی خود را به‌جای ذخیره در نشاسته، به مسیرهای سنتز پروتئین اختصاص می‌دهد. این تغییر باعث افزایش نسبت پروتئین به سایر ترکیبات در بافت گیاه می‌شود (قاتک و همکاران، ۲۲۰۱۶؛ شو و همکاران، ۲۰۲۰؛ راغب بخیط الوافی و همکاران، ۲۰۲۱؛ گائو و همکاران، ۲۰۲۳). در مقایسه با گندم، ارزن از نظر سازوکارهای تنظیمی تنش تفاوت‌های قابل‌توجهی دارد. گندم به دلیل حساسیت بیشتر به کم‌آبی، در شرایط خشکی معمولاً با کاهش کارایی جذب نیتروژن مواجه شده و در نتیجه، میزان پروتئین آن کاهش می‌یابد در مقابل، در ارزن ترکیبات فیتوشیمیایی و مسیرهای بیوشیمیایی به‌گونه‌ای تنظیم‌شده‌اند که تنش خشکی منجر به فعال‌سازی آنزیم‌های متابولیکی مرتبط با پروتئین‌سازی می‌شود. این سازوکار، گیاه را قادر می‌سازد تا در شرایط کم‌آبی، از منابع نیتروژنی خود بیشترین بهره را ببرد (قاتک و همکاران، ۲۰۲۱). این تفاوت را می‌توان به ساختار ژنتیکی و تنظیمات فیزیولوژیکی ارزن نسبت داد. در شرایط کم‌آبی، افزایش فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده کربوهیدرات‌ها، از جمله آمیلاز، و اختصاص بیشتر مواد آلی به مسیرهای پروتئین‌سازی گزارش شده است. این تغییرات باعث کاهش فعالیت آنزیم‌های سنتزکننده نشاسته می‌شود که در نهایت منجر به افزایش تجمع ترکیبات نیتروژنی در گیاه و بالا رفتن نسبت پروتئین به کربوهیدرات می‌گردد (ژو و همکاران، ۲۰۲۱؛ یانگ و همکاران، ۲۰۲۳). علاوه بر این، مطالعات نشان داده‌اند که تحت تنش خشکی، بیان ژن‌های مسئول سنتز آنزیم‌های متابولیکی و پروتئین‌های ذخیره‌ای در اندام‌های هوایی افزایش می‌یابد. این افزایش فعالیت ژنی منجر به بهبود سنتز پروتئین‌های سازگار با تنش مانند آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و تنظیم‌کننده‌های اسمزی (پرولین و آمینواسیدهای آزاد) می‌شود. این ترکیبات علاوه بر تنظیم اسمزی، در شرایط کمبود آب به‌عنوان اجزای مهم پروتئین‌های سلولی ذخیره می‌شوند و می‌توانند باعث افزایش درصد پروتئین در کل گیاه شوند (مارویا و واخاریا، ۲۰۱۶؛ ژو و همکاران، ۲۰۲۱؛ چاکرابورتی و همکاران، ۲۰۲۲). تحقیقات جدید نیز نشان می‌دهند که پروتئین‌های خاص مرتبط با پاسخ به تنش، به‌ویژه در ریشه و برگ‌ها، نقش کلیدی در حفظ تعادل هیدرولیکی و افزایش مقاومت گیاه دارند (قاتک و همکاران، ۲۰۱۶). از سوی دیگر، در تنش خشکی، فعالیت آنزیم‌هایی که در مسیرهای مرتبط با جذب و استفاده از نیتروژن نقش دارند، مانند نیترات ردوکتاز و گلوتامین سنتتاز، افزایش می‌یابد. این امر نه فقط سنتز پروتئین را تقویت می‌کند، بلکه از ذخیره نیتروژن در قالب ترکیبات غیرپروتئینی جلوگیری کرده و باعث افزایش درصد پروتئین در گیاه می‌شود (ماچادو و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین، مطالعات پروتئومیک نشان داده‌اند که در ارزن، تحت شرایط خشکی، بیان پروتئین‌های ذخیره‌ای و

پروتئین‌های پاسخ‌دهنده به تنش افزایش می‌یابد. این پروتئین‌ها در حفظ تعادل هیدرولیکی سلول و افزایش مقاومت گیاه به تنش نقش کلیدی دارند (قاتک و همکاران، ۲۰۱۶؛ چاکرابورتی و همکاران، ۲۰۲۲). علاوه بر این، تنش خشکی می‌تواند باعث کاهش فعالیت آنزیم‌های پروتئاز (آنزیم‌های تجزیه‌کننده پروتئین) و افزایش فعالیت آنزیم‌های سنتزکننده پروتئین شود که این نیز به افزایش درصد پروتئین منجر می‌شود (مولوی و نگرا، ۲۰۲۳). مطالعات نشان داده‌اند که تحت شرایط تنش کم‌آبی، میزان برخی اسیدهای آمینه ضروری مانند لوسین و ایزولوسین در برخی گونه‌های ارزن افزایش می‌یابد که می‌تواند یکی از دلایل افزایش پروتئین گیاه باشد و درعین‌حال، به بهبود کیفیت تغذیه‌ای علوفه نیز کمک کند (هو و همکاران، ۲۰۲۲؛ رن و همکاران، ۲۰۲۴). در نهایت، ارزن با استفاده از سازوکارهایی مانند افزایش سنتز ترکیبات محافظتی (پرولین و پروتئین‌های LEA)، تغییر در الگوی تخصیص نیتروژن و تنظیم فعالیت آنزیم‌های مرتبط با متابولیسم نیتروژن، می‌تواند در شرایط خشکی پروتئین بیشتری تولید کند (پان و همکاران، ۲۰۱۸؛ شو و همکاران، ۲۰۲۰؛ چاکرابورتی و همکاران، ۲۰۲۲).

اگرچه درصد پروتئین ویژگی مهمی در ارزیابی کیفیت علوفه است، اما عملکرد کل پروتئین در هر واحد سطح اهمیت بیشتری دارد، زیرا این شاخص ترکیبی از عملکرد علوفه خشک و محتوای پروتئین را نشان می‌دهد (جهان‌زاد و همکاران، ۲۰۱۳). بر اساس نتایج مطالعه حاضر، بیشترین عملکرد پروتئین علوفه خشک (۱۴۱۸٫۷۰ کیلوگرم در هکتار) در تیمارPRD80 به دست آمد که تفاوت معنی‌داری با PRD100 نداشت. در مقابل، کمترین عملکرد پروتئین (۵۹۹٫۲۸ کیلوگرم در هکتار) مربوط به تیمار RDI40 بود که با RDI60 تفاوت معنی‌داری نداشت، اما هر دو به‌طور قابل توجهی کمتر از تیمارهای PRD بودند. همچنین، در آبیاری بر اساس ۸۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه، روش PRD عملکرد پروتئین بیشتری نسبت به RDIنشان داد. این نتایج نشان می‌دهد که آبیاری به روش PRDبا ۸۰ درصد نیاز آبی گیاه، بهترین ترکیب برای حداکثر عملکرد پروتئین علوفه خشک است، درحالی‌که آبیاری RDI با ۴۰ درصد نیاز آبی، کمترین بازده را دارد. روش آبیاری PRD علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف آب، می‌تواند کیفیت محصول را از جمله محتوای پروتئین و سایر شاخص‌های کیفی بهبود بخشد. به گزارش اقبال و همکاران (۲۰۱۹ ب)، اگرچه رشد و نرخ فتوسنتز در پنبه تحت آبیاری کامل (FI) بهتر بود، اما محتوای پروتئین، قندها، و غلظت آنتی‌اکسیدان‌ها در روش PRD به‌طور قابل‌توجهی بالاتر بود. شاه‌نظری و همکاران (۲۰۰۷) نیز در بررسی سیب‌زمینی نشان دادند که استفاده از PRD با ۷۰ درصد آب مورد نیاز FI، عملکرد بیولوژیکی و اقتصادی مشابهی ارائه داده و تولید غده‌های با اندازه ۴۰ تا ۵۰ میلی‌متر را تا ۲۰ درصد افزایش داده است. همچنین، روش PRDتوانست با کاهش ۳۰ درصدی مصرف آب، بهره‌وری آبیاری را ۶۱ درصد افزایش دهد و تولید غده‌ها را حفظ کند. این نتایج نشان‌دهنده اثربخشی PRD در بهبود بهره‌وری و کیفیت محصولات کشاورزی است. مطالعه‌ای تأثیر هفت رژیم آبیاری، شامل آبیاری غرقابی معمولی (CFI)و شش تیمار کم‌آبیاری (RDI و PRD در سه سطح مختلف پتانسیل آب خاک ۰/۱-، ۰/۳- و ۰/۶- بار)، بر عملکرد و کیفیت برنج را بررسی کرد. تیمارهای RDI1 و PRD1عملکردی مشابه CFI داشتند، اما IWUE در این تیمارها به‌ترتیب ۲۲/۹ و ۴۵/۷ درصد بیشتر بود. به‌طورکلی، تیمارهای PRD در مقایسه با RDI به‌طور میانگین ۱۶ درصد بهره‌وری آب بالاتری نشان دادند. علاوه بر این، تنش شدید آبی در تیمارهای RDI6 و PRD6 باعث افزایش محتوای آمیلوز و ارزش پخش قلیایی شد که نشان‌دهنده بهبود کیفیت پخت برنج بود (ماچکپشتی و همکاران، ۲۰۲۳).

از نظر اقتصادی نیز بررسی منابع نشان می‌دهد که سیستم PRD نسبت به روش‌های مرسوم، علی‌رغم داشتن هزینه‌های اولیه‌ی بیشتر، در بلندمدت مقرون‌به‌صرفه است. این سیستم مصرف آب را ۲۵ تا ۵۰ درصد کاهش داده و

بهره‌وری مصرف آب را بهبود می‌بخشد (سپاس‌خواه و احمدی، ۲۰۱۰؛ بدر و همکاران، ۲۰۱۸). اگرچه عملکرد محصول ۷ تا ۱۰ درصد کاهش می‌یابد، اما این کاهش با صرفه‌جویی در منابع آبی و کاهش هزینه‌های عملیاتی جبران می‌شود (سادراس، ۲۰۰۹). مزیت اصلی سیستم PRD کاهش تعداد دفعات آبیاری و حجم آب مصرفی است که منجر به کاهش قابل‌توجه هزینه‌های عملیاتی می‌شود. این ویژگی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک با منابع آبی محدود اهمیت دارد (بدر و همکاران، ۲۰۱۸). در آبیاری قطره‌ای با استفاده از نوار تیپ، مشکل گرفتگی قطره‌چکان‌ها که در لوله‌های قطره‌ای سنتی دیده می‌شود، به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. نوار تیپ‌ها دارای منافذ یکنواخت و ساده‌تری هستند که نسبت به قطره‌چکان‌های معمولی کمتر مستعد گرفتگی ناشی از رسوبات، املاح و مواد آلی موجود در آب هستند. علاوه بر این، نوار تیپ معمولاً برای یک فصل کشت استفاده شده و در پایان هر دوره تعویض می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که سامانه‌های نوار تیپ در مقایسه با روش‌های مرسوم، نه‌تنها هزینه‌های نگهداری و تعمیرات کمتری دارند، بلکه توزیع آب را نیز یکنواخت‌تر انجام می‌دهند (حسینیان و همکاران، ۲۰۱۶).

همبستگی فنوتیپی بین صفات مختلف

ضرایب همبستگی پیرسون بین صفات کارایی مصرف آب، عملکرد و کیفیت علوفه ارزن مرواریدی هیبرید (رقم نوتریفید) در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸- ضرایب همبستگی فنوتیپی بین صفات کارایی مصرف آب، عملکرد و کیفیت علوفه ارزن مرواریدی هیبرید (رقم نوتریفید) در دو سال زراعی

صفات	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
عملکرد علوفه تر ($t\ ha^{-1}$, X_1)	1					
عملکرد علوفه خشک ($t\ ha^{-1}$, X_2)	0.994^{**}	1				
کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه تر (t/m^3, X_3)	0.408	0.383	1			
کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه خشک (t/m^3, X_4)	0.128	0.137	0.910^{**}	1		
درصد پروتئین علوفه خشک (X_5)	-0.419	-0.477	0.318	0.281	1	
عملکرد پروتئین علوفه خشک ($kg\ ha^{-1}$, X_6)	0.872^{**}	0.844^{**}	0.669	0.374	0.059	1

* و ** به‌ترتیب معنی‌داری در سطوح احتمال پنج و یک درصد

بالاترین همبستگی مثبت و معنی‌دار ($P < 0.01$)، بین عملکرد علوفه تر و خشک مشاهده شد. عملکرد پروتئین علوفه خشک نیز همبستگی مثبت و بسیار معنی‌داری با عملکرد علوفه تر و خشک نشان داد. کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه تر، همبستگی مثبت و بسیار معنی‌داری با کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه خشک داشت. این نتایج با مطالعات پیشین روی گیاه علوفه‌ای ارزن دم روباهی مطابقت دارد که در آن، همبستگی مثبت و بسیار معنی‌داری بین عملکرد علوفه خشک و تر و همچنین عملکرد خشک برگ با عملکرد علوفه خشک و تر مشاهده شد. علاوه بر این، عدم وجود همبستگی معنی‌دار بین IWUE و عملکرد علوفه خشک و تر نیز تأیید شده است (زوله و همکاران، ۲۰۱۱). پژوهشی روی ارزن مرواریدی در هند نشان داد که بین عملکرد علوفه تر و صفاتی مانند پروتئین خام، درصد ماده خشک و عملکرد علوفه خشک، همبستگی مثبت قوی وجود دارد که این نتایج با مطالعه حاضر همسو است (آسوینی و همکاران، ۲۰۲۳).

نتیجه‌گیری

ارزن مرواریدی به‌عنوان یکی از غلات مقاوم به خشکی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نقش مهمی در تولید علوفه و تولیدات دامی ایفا می‌کند. در این پژوهش، تأثیر روش‌های مختلف کم‌آبیاری بر عملکرد، کیفیت علوفه و بهره‌وری مصرف آب در ارزن مرواریدی هیبرید بررسی شد. نتایج نشان داد که روش PRD، به‌ویژه در سطح ۸۰

درصد نیاز آبی (PRD80)، با بهینه‌سازی توزیع آب در منطقه ریشه و کاهش تبخیر، باعث افزایش عملکرد علوفه تر و خشک و پروتئین و کاهش مصرف آب می‌شود. علاوه بر این، سیستم PRD در مقایسه با روش‌های مرسوم آبیاری، از نظر اقتصادی در بلندمدت مقرون‌به‌صرفه است و موجب افزایش پایداری تولید نیز می‌شود. در مقایسه با روش RDI که در شرایط کمبود آب شدید منجر به کاهش عملکرد علوفه و پروتئین شد، روش PRD80 توانست عملکرد را حفظ کرده و از کاهش کیفیت جلوگیری کند. اگرچه روشPRD100 عملکرد بالاتری ارائه داد، اما نیاز به مصرف آب بیشتری داشت که در شرایط کم‌آبیاری از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نیست. بنابراین، روش PRD80 به‌عنوان گزینه‌ای کارآمد و اقتصادی در مدیریت منابع آبی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک توصیه می شود. همبستگی‌های معنی‌دار مثبت بین صفات مختلف نیز می‌تواند به‌عنوان شاخص‌هایی برای پیش‌بینی تغییرات کیفیت و عملکرد گیاهان علوفه‌ای استفاده شود. این تحقیق بر اهمیت تطبیق استراتژی‌های آبیاری با شرایط محیطی تأکید دارد و نتایج آن می‌تواند مبنای توسعه استراتژی‌های پایدار در مدیریت منابع آب و کشاورزی باشد. پیشنهاد می‌شود که در آینده اثرات کم‌آبیاری در شرایط محیطی مختلف، تأثیرات طولانی‌مدت آن بر کیفیت خاک و پایداری محصولات و ادغام آن با استراتژی‌های مدیریت پایدار آب بررسی شود تا به توسعه راهکارهای جامع‌تر و مؤثرتر کمک کند.

تشکر و قدردانی

از دانشگاه زابل (کد پژوهانه UOZ-GR-6621) و پژوهشکده فناوری تولیدات گیاهی دانشگاه شهید باهنر کرمان برای تأمین اعتبار مالی این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافعی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

فهرست منابع

۱. اسدی، رسول، حسن‌پور، فرزاد، مهربانی، میترا، باقی‌زاده، امین، و کاراندیش، فاطمه. ۱۳۹۸. تأثیر کم‌آبیاری تنظیم‌شده و آبیاری ناقص ریشه بر ویژگی‌های کمی رزماری. *مجله آب و خاک*، ۳۳(۵)، ۶۵۹-۶۷۰.
DOI: https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.70053

۲. حاجی‌راد، ایمان، میرلطیفی، سید مجید، دهقانی سانیج، حسین، و محمدی، ساناز. ۱۴۰۰. بررسی تأثیر کم‌آبیاری بر عملکرد و بهره‌وری آب ذرت علوفه‌ای در استفاده از دو نوع مدیریت مختلف در سیستم آبیاری قطره‌ای. *مجله پژوهش آب ایران*، ۱۵، ۱۵-۲۳.

۳. خشائی، فرشاد، بهمنش، جواد، رضاوردی‌نژاد، وحید، و آزاد، نسرین. ۱۳۹۸. تأثیر مقدار آبیاری و تقسیط کود نیتروژن بر عملکرد، اجزای عملکرد و بهره‌وری آب ذرت دانه‌ای در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی. *مجله پژوهش آب در کشاورزی*، ۳۳، ۶۰۱-۶۱۲. **DOI: https://doi.org/10.22092/jwra.2020.121241**

۴. صفائی طرقبه، محمد، آذری، آرمان، دشتی، حسین، و مداح حسینی، شهاب. ۱۳۹۶. اثر تنش آبی بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک ارزن نوتریفید و سورگوم اسپیدفید در چین‌های مختلف. *نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی*، ۷، ۶۹-۸۲. **URL: http://jcpp.iut.ac.ir/article-1-2675-fa.html**

۵. مزیدی، احمد، عنایت‌پور، مهدیه، و حسینی، سید سلام. ۱۴۰۰. تعیین اقلیم استان کرمان با استفاده از روش‌های منحنی آمبروترمیک، ضریب خشکی دومارتن، اقلیم‌نمای آمبرژه. جغرافیا و روابط انسانی، ۴، ۳۵-۴۳.
DOI: https://doi.org/10.22034/gahr.2021.287987.1565

۶. موسوی، سید محمدسعید، الباجی، محمد، ناصری، عبدعلی، گلابی، منا، و مرادی تلاوت، محمدرضا. ۱۴۰۱. تأثیر کم‌آبیاری به روش تنظیم‌شده و خشکی موضعی ریشه بر عملکرد، اجزاء عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گلرنگ در شرایط اقلیمی خوزستان. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۴، ۱۵۵-۱۷۱.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.354250.669435

۷. مهرپویان، مهدی، و فرامرزی، علی. ۱۳۹۰. تاثیر سطوح مختلف کم آبیاری بر عملکرد کمی و راندمان مصرف آب در ارزن نوتریفید و سورگوم اسپید فید. گیاه و زیست بوم (ویژه نامه تنش خشکی و شوری)، ۷، ۶۰-۷۱.
Available from: https://sid.ir/paper/145317/fa

8. Aguilar, J., Moghbel, F. and Fazel, F., 2023. Evaluation of novel deficit irrigation techniques in western Kansas. Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports.
DOI: https://doi.org/10.4148/2378-5977.8492
9. Ahmad, S., Raza, M.A.S., Saleem, M.F., Zaheer, M.S., Iqbal, R., Haider, I., Aslam, M.U., Ali, M. and Khan, I.H., 2020. Significance of partial root zone drying and mulches for water saving and weed suppression in wheat. Journal of Animal and Plant Sciences, 30, pp.154-162. **DOI: https://doi.org/10.36899/japs.2020.1.0018**
10. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, Italy, 300(9), p.D05109.
11. Alghamdi, A., Aly, A., Al-Omran, A., Louki, I. and Alkhasha, A., 2023. Tomato yield responses to deficit irrigation and partial root zone drying methods using biochar: A greenhouse experiment in a loamy sand soil using fresh and saline irrigation water. Water, 15(15), p.2797. **DOI: https://doi.org/10.3390/w15152797**
12. Alhammad, B.A., Zaheer, M.S., Ali, H.H., Hameed, A., Ghanem, K.Z. and Seleiman, M.F., 2023. Effect of co-application of Azospirillum brasilense and Rhizobium pisi on wheat performance and soil nutrient status under deficit and partial root drying stress. Plants, 12(17), p.3141. **DOI: https://doi.org/10.3390/plants12173141**
13. Alomran, A.M. and Louki, I.I., 2024. Impact of irrigation systems on water saving and yield of greenhouse and open field cucumber production in Saudi Arabia. Agricultural Water Management, 302, p.108974.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108974
14. Aswini, M., Ganesan, K. and Ezhilarasi, T., 2023. The correlation between green fodder yield and fodder quality traits in hybrids of pearl millet [Pennisetum glaucum (L.) R. Br.]. International Journal of Plant & Soil Science, 35, pp.1975-1983.
DOI: https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i193749
15. Badr, M., El-Tohamy, W., Abou-Hussein, S., and Gruda, N. 2018. Tomato yield, physiological response, water and nitrogen use efficiency under deficit and partial root zone drying irrigation in an arid region. Journal of Applied Botany and Food Quality, 91, pp.332-340. **DOI: https://doi.org/10.5073/JABFQ.2018.091.042**
16. Bhattarai, B., Singh, S., West, C.P., Ritchie, G.L. and Trostle, C.L., 2020a. Effect of deficit irrigation on physiology and forage yield of forage sorghum, pearl millet, and corn. Crop Science, 60(4), pp.2167-2179. **DOI: https://doi.org/10.1002/csc2.20171**
17. Bhattarai, B., Singh, S., West, C.P., Ritchie, G.L., Trostle, C.L. and Trostle, C.L., 2020b. Water depletion pattern and water use efficiency of forage sorghum, pearl millet, and corn under water limiting condition. Agricultural Water Management, 238, p.106206.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106206
18. Bhattarai, B., Singh, S., West, C.P. and Saini, R., 2019. Forage potential of pearl millet and forage sorghum alternatives to corn under the water-limiting conditions of the Texas high plains: A review. Crop, Forage & Turfgrass Management, 5, pp.1-12.

DOI: https://doi.org/10.2134/cftm2019.08.0058

19. Chakraborty, A., Viswanath, A., Malipatil, R., Semalaiyappan, J., Shah, P., Ronanki, S., Rathore, A., Singh, S.P., Govindaraj, M., Tonapi, V.A. and Thirunavukkarasu, N., 2022. Identification of candidate genes regulating drought tolerance in pearl millet. International Journal of Molecular Sciences, 23(13), p.6907. **DOI: https://doi.org/10.3390/ijms23136907**
20. Chen, C.H., Lin, K.H., Chang, Y.S. and Chang, Y.J., 2023. Application of water-saving irrigation and biostimulants on the agronomic performance of maize (Zea mays). Process Safety and Environmental Protection, 177, pp.1377-1386. **DOI: https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.08.008**
21. Cheng, M., Wang, H., Fan, J., Zhang, F. and Wang, X., 2021. Effects of soil water deficit at different growth stages on maize growth, yield, and water use efficiency under alternate partial root-zone irrigation. Water, 13, p.148. **DOI: https://doi.org/10.3390/w13020148**
22. Crookston, B., Blaser, B., Darapuneni, M. and Rhoades, M., 2020. Pearl millet forage water use efficiency. Agronomy, 10, p.1672. **DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy10111672**
23. Elhani, S., Haddadi, M., Csákvári, E., Zantar, S., Hamim, A., Villányi, V., Douaik, A. and Bánfalvi, Z., 2019. Effects of partial root-zone drying and deficit irrigation on yield, irrigation water-use efficiency and some potato (Solanum tuberosum L.) quality traits under glasshouse conditions. Agricultural Water Management, 224, p.105745. **DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105745**
24. Farhadi, A., Paknejad, F., Golzardi, F., Ilkaee, M.N. and Aghayari, F., 2022. Effects of limited irrigation and nitrogen rate on the herbage yield, water productivity, and nutritive value of sorghum silage. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 53, pp.576-589. **DOI: https://doi.org/10.1080/00103624.2021.2017959**
25. Faroq, M., Hauuain, M., Ul-Allah, S. and Siddique, K.H.M., 2019. Physiological and agronomic approaches for improving water-use efficiency in crop plants. Agricultural Water Management, 219, pp.95-108. **DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.04.010**
26. Fatemi, S.N., Maghsoodi Mood, A.A. and Mohammadi Nejad, G., 2021. Agro-physiological responses of different pearl millet (Pennisetum glaucum L.) cultivars to water deficit in Kerman climatic conditions. Journal of Crop Ecophysiology, 14(4), pp.465-478. **DOI: https://doi.org/10.30495/jcep.2021.679975**
27. FAO. Production Quantities of Millet by Country. FAOSTAT, Crops. 2020. Available online: http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize (accessed on 22 October 2020).
28. Gao, H., Ge, W., Bai, L., Zhang, T., Zhao, L., Li, J., Shen, J., Xu, N., Zhang, H., Wang, G. and Lin, X., 2023. Proteomic analysis of leaves and roots during drought stress and recovery in Setaria italica L. Frontiers in Plant Science, 14, p.1240164. **DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1240164**
29. Ghalkhani, A., Golzardi, F., Khazaei, A., Mahrokh, A., Illés, Á., Bojtor, C., Mousavi, S.M.N. and Széles, A., 2023. Irrigation management strategies to enhance forage yield, feed value, and water-use efficiency of sorghum cultivars. Plants, 12, p.2154. **DOI: https://doi.org/10.3390/plants12112154**
30. Ghatak, A., Chaturvedi, P., Bachmann, G., Valledor, L., Ramšak, Ž., Bazargani, M.M., Bajaj, P., Jegadeesan, S., Li, W., Sun, X. and Gruden, K., 2021. Physiological and proteomic signatures reveal mechanisms of superior drought resilience in pearl millet compared to wheat. Frontiers in Plant Science, 11, p.600278. **DOI:https://doi.org/10.3389/fpls.2020.600278**

31. Ghatak, A., Chaturvedi, P., Nagler, M., Roustan, V., Lyon, D., Bachmann, G., Postl, W., Schröfl, A., Desai, N., Varshney, R. and Weckwerth, W., 2016. Comprehensive tissue-specific proteome analysis of drought stress responses in Pennisetum glaucum (L.) R. Br. (Pearl millet). Journal of proteomics, 143, pp.122-135. **DOI: https://doi.org/10.1016/j.jprot.2016.02.032**
32. Grecksch, K., 2019. Scenarios for resilient drought and water scarcity management in England and Wales. International Journal of River Basin Management, 17(2), pp.219-227. **DOI: https://doi.org/10.1080/15715124.2018.1461106**
33. Hooshmand, M., Albaji, M., Nasab, S. and Ansari, N., 2019. The effect of deficit irrigation on yield and yield components of greenhouse tomato (Solanum lycopersicum) in hydroponic culture in Ahvaz region, Iran. Scientia Horticulturae, 254, pp.84-90. **DOI: https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2019.04.084**
34. Hosseinian, S., Khaledian, M., Biglouei, M., and Shahinrokhsar, P. 2016. Technical and economical evaluation of tape drip and drip line irrigation systems in a strawberry greenhouse. Acta Agriculturae Slovenica, 107, pp.55-64. **DOI: https://doi.org/10.14720/AAS.2016.107.1.06**
35. Hou, S., Men, Y., Wei, M., Zhang, Y., Li, H., Sun, Z. and Han, Y., 2022. Total protein content, amino acid composition and eating-quality evaluation of foxtail millet (Setaria italica (L.) P. Beauv). Foods, 12(1), p.31. **DOI: https://doi.org/10.3390/foods12010031**
36. Iqbal, R., Andersen, M.N., Raza, M.A.S., Rashid, M.A. and Ahmad, S., 2019a. Physiological manipulation and yield response of wheat grown with split root system under deficit irrigation. Pakistan Journal of Agricultural Research, 32, pp.514-526 **DOI: http://dx.doi.org/10.17582/journal.pjar/2019/32.3.514.526**
37. Iqbal, R., Muhammad, A.S.R., Muhammad, F.S., Imran, H.K., Salman, A., Muhammad, S.Z., Muhammad, U. and Imran, H., 2019b. Physiological and biochemical appraisal for mulching and partial rhizosphere drying of cotton. Journal of Arid Land, 11, pp.785-794. **DOI: https://doi.org/10.1007/s40333-019-0014-9**
38. Ismail, S., El-Nakhlawy, F. and Basahi, J., 2018. Sudan grass and pearl millet productivity under different irrigation methods with fully irrigation and stresses in arid regions. Grassland Science, 64, pp.29-39. **DOI: https://doi.org/10.1111/GRS.12179**
39. Ismail, S.M., 2012. Optimizing productivity and irrigation water use efficiency of pearl millet as a forage crop in arid regions under different irrigation methods and stress. African Journal of Agricultural Research, 7, pp.2509-2518.
40. Jahanzad, E., Jorat, M., Moghadam, H., Sadeghpour, A., Chaichi, M.-R. and Dashtaki, M., 2013. Response of a new and a commonly grown forage sorghum cultivar to limited irrigation and planting density. Agricultural Water Management, 117, pp.62-69. **DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.001**
41. Jahansouz, M.R., Keshavarz Afshar, R., Heidari, H. and Hashemi, M., 2014. Evaluation of yield and quality of sorghum and millet as alternative forage crops to corn under normal and deficit irrigation regimes. Jordan Journal of Agricultural Sciences, 10(4), pp.699-715. **DOI: http://dx.doi.org/10.12816/0031747**
42. Jiao, F., Ding, R., Du, T., Kang, J., Tong, L., Gao, J. and Shao, J., 2024. Multi-growth stage regulated deficit irrigation improves maize water productivity in an arid region of China. Agricultural Water Management, 297, p.108827. **DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108827**
43. Khaleghi, M., Hassanpour, F., Karandish, F. and Shahnazari, A., 2020. Integrating partial root-zone drying and saline water irrigation to sustain sunflower production in freshwater-scarce regions. Agricultural Water Management, 234, p.106094.

DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106094

44. Kumar, P. and Kumar, A., 2021. Water management for improving pearl millet production under irrigated environment: A review. Agricultural Reviews, 42, pp.225-229. **DOI: https://doi.org/10.18805/AG.R-1990**
45. Lawlor, D.W. and Cornic, G., 2002. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. Plant, Cell & Environment, 25, pp.275-294. **DOI: https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00814.x**
46. Li, W., Jia, L. and Wang, L., 2017. Chemical signals and their regulations on the plant growth and water use efficiency of cotton seedlings under partial root-zone drying and different nitrogen applications. Saudi Journal of Biological Sciences, 24, pp.477-487. **DOI: https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.01.015**
47. Lima, R.S.N., Assis Figueiredo, F.A.M.M., Martins, A.O., Deus, B.C.S., Ferraz, T.M., Assis Gomes, M.M., Sousa, E.F., Glenn, D.M. and Campostrini, E., 2015. Partial rootzone drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) effects on stomatal conductance, growth, photosynthetic capacity and water-use efficiency of papaya. Scientia Horticulturae, 183, pp.13-22. **DOI: https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.12.005**
48. Liu, F., Shahnazari, A., Andersen, M.N., Jacobsen, S.E. and Jensen, C.R., 2006. Physiological responses of potato (Solanum tuberosum L.) to partial root-zone drying: ABA signaling, leaf gas exchange, and water use efficiency. Journal of Experimental Botany, 57, pp.3727-3735. **DOI: https://doi.org/10.9755/EJFA.2018.V30.I5.1678**
49. Lu, J., Shao, G., Cui, J., Xiaojun, W. and Keabetswe, L., 2019. Yield, fruit quality and water use efficiency of tomato for processing under regulated deficit irrigation: A meta-analysis. Agricultural Water Management, 222, pp.301-312. **DOI: https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2019.06.008**
50. Machado, J., Vasconcelos, M.W., Soares, C., Fidalgo, F., Heuvelink, E. and Carvalho, S.M., 2023. Young tomato plants respond differently under single or combined mild nitrogen and water deficit: an insight into morphophysiological responses and primary metabolism. Plants, 12(5), p.1181. **DOI: https://doi.org/10.3390/plants12051181**
51. Machekposhti, M.F., Shahnazari, A., Yousefian, M., Ahmadi, M.Z., Sarjaz, M.R., Arabzadeh, B., Akbarzadeh, A. and Leib, B.G., 2023. The effect of alternate partial root-zone drying and deficit irrigation on the yield, quality, and physiochemical parameters of milled rice. Agricultural Water Management, 289, p.108546. **DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108546**
52. Machicek, J.A., Blaser, B.C., Darapuneni, M. and Rhoades, M.B., 2019. Harvesting regimes affect brown midrib sorghum-sudangrass and brown midrib pearl millet forage production and quality. Agronomy, 9, p.416. **DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy9080416**
53. Marviya, G.V. and Vakharia, D.N., 2016. Effect of terminal water stress and benzyl adenine on osmoregulants in pearl millet [Pennisetum glaucum (L.) R. Br.] genotypes. Indian Journal of Agricultural Biochemistry, 29(1), pp.9-16. **DOI: https://doi.org/10.5958/0974-4479.2016.00002.2**
54. Martin-Vertedor, A.I. and Dodd, I.C., 2011. Root-to-shoot signalling when soil moisture is heterogeneous: Increasing the proportion of root biomass in drying soil inhibits leaf growth and increases leaf abscisic acid concentration. Plant, Cell & Environment, 34, pp.1164-1175. **DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2011.02315.x**
55. Mason, S.C., Maman, N. and Pale, S., 2015. Pearl millet production practices in semi-arid West Africa: A review. Experimental Agriculture, 51, pp.501-521. **DOI: https://doi.org/10.1017/S0014479714000441**

56. Moloi, S.J. and Ngara, R., 2023. The roles of plant proteases and protease inhibitors in drought response: a review. Frontiers in Plant Science, 14, p.1165845. **DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1165845**
57. Moridi, A., 2017. State of water resources in Iran. International Journal of Hydrology, 1(4), pp.111-114. **DOI: https://doi.org/10.15406/IJH.2017.01.00021**
58. Negarestani, M., Tohidi-Nejad, E., Khajoei-Nejad, G., Nakhoda, B. and Mohammadi-Nejad, G., 2019. Comparison of different multivariate statistical methods for screening the drought tolerant genotypes of pearl millet (Pennisetum americanum L.) and sorghum (Sorghum bicolor L.). Agronomy, 9, p.645. **DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy9100645**
59. Nikolaou, G., Neocleous, D., Christou, A., Kitta, E. and Katsoulas, N., 2020. Implementing sustainable irrigation in water-scarce regions under the impact of climate change. Agronomy, 10(8), p.1120. **DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy10081120**
60. Pan, J., Li, Z., Wang, Q., Garrell, A.K., Liu, M., Guan, Y., Zhou, W. and Liu, W., 2018. Comparative proteomic investigation of drought responses in foxtail millet. BMC Plant Biology, 18, pp.1-19. **DOI: https://doi.org/10.1186/s12870-018-1533-9**
61. Pareek, P., Patel, M., Patel, H. and Patel, P., 2015. Effect of irrigation and nitrogen levels on forage yield and quality of pearl millet [Pennisetum glaucum (L.) R.Br.]. International Journal of Agricultural Sciences, 11, pp.264-267. **DOI: https://doi.org/10.15740/HAS/IJAS/11.2/264-267**
62. Qi, D.L., Hu, T.T. and Song, X., 2020. Effects of nitrogen application rates and irrigation regimes on grain yield and water use efficiency of maize under alternate partial rootzone irrigation. Journal of Integrative Agriculture, 19, pp.2792–2806. **DOI: https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63205-1**
63. Raghib Bakheit Alwafy, B., Ali, M.B., Elsaid Mahdy, R. and Kandeel, M.N., 2021. Performance of pearl millet (Pennisetum glaucum) genotypes for forage yield and its components under normal and water stress irrigation. Assiut Journal of Agricultural Sciences, 52, pp.45-63. **DOI: http://dx.doi.org/10.21608/ajas.2022.113072.1076**
64. Raval, C., Patel, A., Rathore, B., Vyas, K. and Bedse, R., 2014. Productivity, quality and soil fertility status as well as economics of multi-cut summer forage pearl millet as influenced by varying levels of irrigation and nitrogen. Research on Crops, 15, pp.785-789. **DOI: https://doi.org/10.5958/2348-7542.2014.01412.0**
65. Ren, J., Liu, Y., Mao, J., Xu, Y., Wang, M., Hu, Y., Wang, S., Liu, S., Qiao, Z. and Cao, X., 2024. Metabolomics and physiological methods revealed the effects of drought stress on the quality of broomcorn millet during the flowering stage. Agronomy, 14(2), p.236. **DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy14020236**
66. Rostamza, M., Chaichi, M.-R., Jahansouz, M.-R. and Alimadadi, A., 2011. Forage quality, water use and nitrogen utilization efficiencies of pearl millet (Pennisetum americanum L.) grown under different soil moisture and nitrogen levels. Agricultural Water Management, 98, pp.1607-1614. **DOI: https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2011.05.014**
67. Sachan, N. and Shah, P., 2023. Nutritional health benefits of pearl millet. International Journal of Plant Sciences, 18(2), pp.167-176. **DOI: https://doi.org/10.15740/has/ijps/18.2/167-176**
68. Sadras, V. 2009. Does partial root-zone drying improve irrigation water productivity in the field? A meta-analysis. Irrigation Science, 27, pp.183-190. **DOI: https://doi.org/10.1007/s00271-008-0141-0**

69. Samake, O., Stomph, T., Kropff, M. and Smaling, E., 2006. Integrated pearl millet management in the Sahel: Effects of legume rotation and fallow management on productivity and Striga hermonthica infestation. Plant and Soil, 286, pp.245-257. **DOI: https://doi.org/10.1007/s11104-006-9041-3**

70. Sanatawy, E.A.M., Ash-Shormillesy, S.M.A.I., Qabil, N., Awad, M.F., Mansour, E. and Seed, H., 2021. Priming improves seedling vigor, grain yield, and water use efficiency of maize under varying irrigation regimes. Water, 13, p.2115. **DOI: https://doi.org/10.3390/w13152115**

71. Sepaskhah, A., and Ahmadi, S. 2010. A review on partial root-zone drying irrigation. International Journal of Plant Production, 4, pp.241-258. **DOI: https://doi.org/10.22069/IJPP.2012.708**

72. Shahnazari, A., Liu, F., Andersen, M.N., Jacobsen, S.E. and Jensen, C.R., 2007. Effects of partial root-zone drying on yield, tuber size and water use efficiency in potato under field conditions. Field Crops Research, 100, pp.117-124. **DOI: https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.05.010**

73. Shrestha, N., Hu, H., Shrestha, K. and Doust, A.N., 2023. Pearl millet response to drought: A review. Frontiers in Plant Science, 14, p.1059574. **DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1059574**

74. Sivasakthi, K., Tharanya, M., Choudhary, S., Garin, V., Vadez, V., and Kholová, J., 2024. Drought adaptation in pearl millet (Pennisetum glaucum (L.) R. Br.): Physiological, molecular and genetic approaches. p. 69-83. In R.K. Srivastava, C.T. Satyavathi, and R.K. Varshney (eds.) The Pearl Millet Genome. Compendium of Plant Genomes. Springer, Cham. **DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-56976-0_5**

75. Stagno, F., Brambilla, M., Roccuzzo, G. and Assirelli, A., 2024. Water Use Efficiency in a deficit-irrigated orange orchard. Horticulturae, 10, p.498. **DOI: https://doi.org/10.3390/horticulturae10050498**

76. Talasila, V., Singh, R., Kishore, C. and Singh, A., 2019. Effect of planting density and nitrogen levels on growth and yield of fodder pearlmillet (Pennisetum glaucum L.). International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 8(7), pp.312-318. **DOI: https://doi.org/10.20546/IJCMAS.2019.807.038**

77. Wakrim, R., Wahbi, S., Tahi, H., Aganchich, B. and Serraj, R., 2005. Comparative effects of partial root drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) on water relations and water use efficiency in common bean (Phaseolus vulgaris L.). Agriculture, Ecosystems & Environment, 106(2-3), pp.275-287. **DOI: https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.10.019**

78. Wasaya, A., Affan, M., Yasir, T.A., ur-Rehman, A., Mubeen, K., ur-Rehman, H., Ali, M., Nawaz, F., Galal, A., Iqbal, M.A., Sohidul Islam, M., El-Sharnouby, M., ur Rahman, M.H. and El Sabagh, A., 2021. Foliar potassium sulfate application improved photosynthetic characteristics, water relations and seedling growth of drought-stressed maize. Atmosphere, 12, p.663. **DOI: https://doi.org/10.3390/ atmos12060663**

79. Wu, Y., Zhao, Z., Liu, S., Huang, X. and Wang, W., 2020. Does partial root-zone drying have advantages over regulated deficit irrigation in pear orchard under desert climates? Scientia Horticulturae, 262, p.109099. **DOI: https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109099**

80. Xu, B., Gao, X., Dong, K., Li, X., Yang, P., Yang, T. and Feng, B., 2020. Grain protein content comparison and proteomic analysis of foxtail millet (Setaria italica L.) seed response to different drought stress levels. Acta physiologiae plantarum, 42(2), p.20. **DOI: https://doi.org/10.1007/s11738-019-2999-2**

81. Yang, X., Liu, R., Jing, M., Zhang, N., Liu, C. and Yan, J., 2023. Variation of root soluble sugar and starch response to drought stress in foxtail millet. Agronomy, 13(2), p.359. **DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy13020359**

82. Yazar, A., Gokcel, F. and Sezen, M., 2009. Corn yield response to partial root zone drying and deficit irrigation strategies applied with drip system. Plant, Soil & Environment, 55(11), pp.494-503. **DOI: http://dx.doi.org/10.17221/96/2009-PSE**

83. Zhang, J., Liu, H.X., Pang, X.P., Yu, C., Wang, Q., Zhou, Y.P., Lin, L.G. and Guo, Z.G., 2019. Effect of partial root-zone drying irrigation (PRD) on the gas exchange and antioxidant enzymatic activities in alfalfa. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 19, pp.127-136. **DOI: https://doi.org/10.1007/s42729-019-0018-8**

84. Zhang, J., Liu, H.X., Wei, X.X. and Guo, Z.G., 2023. Effect of partial root-zone drying irrigation (PRDI) on alfalfa available soil P. Archives of Agronomy and Soil Science, 69, pp.2631-2644. **DOI: https://doi.org/10.1080/03650340.2023.2169915**

85. Zhenchang, W., Xiaofei, Y., Liang, F. and Jianbin, Z., 2016. Partial rootzone drying irrigation increases root surface area, root hydraulic conductivity and water use efficiency in maize. International Journal of Environmental Monitoring and Analysis, 4, p.146. **DOI: https://doi.org/10.11648/J.IJEMA.20160406.12**

86. Zhou, L., Tian, X., Cui, B. and Hussain, A., 2021. Physiological and biochemical responses of invasive species Cenchrus pauciflorus benth to drought stress. Sustainability, 13(11), p.5976. **DOI: https://doi.org/10.3390/SU13115976**

87. Zooleh, H.H., Jahansooz, M.R., Yunusa, I., Hosseini, S.M., Chaichi, M.R. and Jafari, A.A., 2011. Effect of alternate irrigation on root-divided foxtail millet (Setaria italica). Australian Journal of Crop Science, 5(2), pp.205-213. ISSN: 1835-2707. **DOI: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:59380346**