h.w. s., 35 (3):67-80 (2025)

Journal of
Hydraulics and Water Science

Online ISSN: 3092-6114
Journal homepage: https://hws.tabrizu.ac.ir/

Original Article

Effects of Drip-Tape Spacing, Discharge and Irrigation Duration on Wheat Germination, Root Development, Yield and Water Productivity during Establishment Irrigation

Amir Eslami[1*], Sirous Tahmasebi[2], Mohammadali Rostami[3], Hadi Afshar[4]

1- Associate professor of Agricultural Engineering Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Fars, Iran.
2- Associate professor of Field and Horticultural Crops Science Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Fars, Iran.
3- Associate professor of Agricultural Engineering Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Fars, Iran.
4- Research Assistant of Agricultural Engineering Research Department, Razavi Khorasan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran.

Received: June 21, 2025
Revised: August 22, 2025
Accepted: August 26, 2025
Published online: September

* **Corresponding Author's Email**: amireslami.50@gmail.com

ARTICLE INFO

Keywords:

Establishment irrigation,
Discharge rate,
Drip-tape irrigation,
Lateral spacing,
Water productivity,
Wheat,
Yield.

ABSTRACT

Introduction

Water scarcity and successive droughts are the major challenges facing agricultural sector in Iran. Given the country's limited water resources, efficient irrigation management is essential in both surface and pressurized irrigation systems. The development of pressurized irrigation methods plays a key role in improving water productivity, and approximately three million hectares of Iran's agricultural land have so far been equipped with modern irrigation systems. Among these, drip-tape irrigation has gained considerable importance for wheat production owing to its high application efficiency and adaptability to row crops. Most previous studies on drip-tape systems for wheat have focused on economic aspects, cost-reduction strategies, and the effect of lateral spacing on initial investment costs. Although wheat is the most strategic crop for food security in Iran, and research interest in drip-tape irrigation of wheat has increased due to water shortages, no study has yet specifically addressed the management of the first (establishment) irrigation and its effects on germination, stand establishment, grain yield, and water productivity. Proper management of this initial irrigation is critical for uniform seed germination and early crop establishment; poor management of this stage can cause substantial water loss and reduced yield. The present study was therefore conducted to investigate the combined effects of lateral spacing, drip discharge rate, and duration of the first irrigation on germination, root development, grain yield, and water productivity of wheat under drip-tape irrigation.

Materials and Methods

How to cite:
Eslami,A. Tahmasebi,S. Rostami,M. Afshar,H. *Effects of Drip-Tape Spacing, Discharge and Irrigation Duration on Wheat Germination, Root Development, Yield and Water Productivity during Establishment Irrigation*. Journal of Hydraulics and Water Science, 35 (3):67-80. https://doi.org/ 10.22034/hws.2026.68338.1029

This is an open-access article under the CC BY NC license
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/)

A field experiment was carried out during the 2021–2022 cropping season at Zarghan Agricultural Research Station, northeast of Shiraz, Iran. The experiment was laid out as a split-split plot design based on a randomized complete block with three replications. Main plots were assigned to lateral spacing (50 cm – L1 and 75 cm – L2), subplots to dripper discharge rate (4 L/h/m – Q1 and 8 L/h/m – Q2), and sub-subplots to first irrigation duration (6 h – T1, 12 h – T2, and 18 h – T3). Each plot measured 3 m wide ×10 m long; six tape lines were installed in the 50 cm spacing treatment, and four lines in the 75 cm treatment, with 1.2 m between treatments was and 2 m between replicates. Wheat cultivar "Sirvan" was sown following standard local practices. Traits measured included number of germinated seeds, root length and volume, grain yield, and irrigation water productivity (WP). Data were statistically analyzed using ANOVA and Duncan's multiple range test at the 5% probability level, and biplot analysis was employed to examine correlations among the traits.

Results and Discussion

Results indicated that lateral spacing, discharge rate, and irrigation duration all significantly influenced the germination percentage, emergence uniformity, and root characteristics ($P \leq 0.05$ or $P \leq 0.01$). The highest germination rate, emergence uniformity, root volume, and final plant stand were obtained with treatment L1Q2T3 (50 cm lateral spacing, 8 L/h/m discharge rate, 18-hour irrigation duration). However, the highest grain yield (6.2 t/ha) was recorded in treatment L1Q2T1, which combined the same close lateral spacing (50 cm) and high discharge rate (8 L/h/m) with the shortest irrigation duration (6 hours). Among the three factors, only discharge rate had a statistically significant effect on final grain yield, while irrigation duration showed no significant effect on yield. Biplot analysis (PCA) revealed strong positive correlations between root length, final plant density, water productivity (WP), and grain yield. The highest WP (0.89 kg/m³) was achieved in treatment L1Q1T1 (50 cm spacing, 4 L/h/m discharge, and 6-hour irrigation) , demonstrating that high water-use efficiency can be attained even with a lower discharge rate when lateral spacing is minimized and irrigation duration is kept short.

Conclusion

Efficient management of first irrigation in drip-tape systems is critical for uniform wheat germination and stand establishment in arid and semi-arid regions. This study demonstrated that reducing lateral spacing and increasing emitter discharge rate had significantly greater effects on early seedling development, root growth, and soil water distribution uniformity than prolonging irrigation duration. Although extended irrigation enhanced emergence uniformity, it did not increase final grain yields. From both agronomic and water productivity standpoints, the optimal strategy involves closer lateral spacing (50 cm) combined with higher discharge rate (8 L/h/m) is recommended for wheat production under drip-tape irrigation, especially in water-scarce environments. Further research is suggested to validate and refine these findings across diverse soil textures and climatic conditions.

Acknowledgement

The authors would like to express their sincere gratitude to the Zarghan Agricultural and Natural Resources Research and Education Station, Mr. Rahman Zamani (Technician at the Agricultural Engineering Research Department), as well as the students introduced by the National Elites Foundation: Ms. Zahra Jahandideh, Mr. Behnam Davoudnia, Mr. Aref Norouzi, and Ms. Azadeh Ahmadi, for their valuable contributions.

نشریه
دانش آب وهیدرولیک
شاپا الکترونیکی: 3092-6114
درگاه نشریه: https://hws.tabrizu.ac.ir/

مقاله پژوهشی

تأثیر فاصله نوار، دبی و زمان آبیاری بر جوانه‌زنی، رشد ریشه، عملکرد و بهره‌وری آب گندم در آبیاری اول با سامانه آبیاری قطره‌ای نواری

امیر اسلامی [1*]، سیروس طهماسبی [2]، محمد علی رستمی [3]، هادی افشار [4]

۱- *دانشیار پژوهشی بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران.

۲- دانشیار پژوهشی بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران.

۳- دانشیار پژوهشی بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران.

۴- استادیار پژوهشی بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران.

چکیده

اولین آبیاری (خاک‌آب) در مناطق خشک و نیمه‌خشک نقش تعیین‌کننده‌ای در تأمین رطوبت مورد نیاز برای جوانه‌زنی و استقرار یکنواخت گندم دارد. در این پژوهش تأثیر فاصله نوار، دبی و مدت زمان آبیاری اولیه بر نرخ جوانه‌زنی، یکنواختی سبز شدن، ویژگی‌های ریشه، عملکرد دانه و شاخص بهره‌وری آب گندم بررسی شد. آزمایش در سال زراعی ۱۴۰۲–۱۴۰۱ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی زرقان به‌صورت طرح اسپلیت- اسپلیت پلات با سه تکرار اجرا گردید. بلوک‌های اصلی شامل دو فاصله نوار ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متر (L1 و L2)، بلوک‌های فرعی شامل دو دبی ۴ و ۸ لیتر بر ساعت در متر (Q1 و Q2) و بلوک فرعی-فرعی شامل سه مدت زمان آبیاری اول ۶، ۱۲ و ۱۸ ساعت (T1، T2 و T3) بودند. نتایج نشان داد که بالاترین نرخ جوانه‌زنی، یکنواختی سبز شدن، حجم ریشه و تعداد بوته در هکتار در تیمار L1Q2T3 و بیشترین عملکرد دانه (۶/۲ تن بر هکتار) در تیمار L1Q2T1 به‌دست آمد. از میان عوامل مورد بررسی، تنها دبی اثر معنادار بر عملکرد دانه داشت. تیمار L1Q1T1 با بیشترین شاخص بهره‌وری آب (۰/۸۹ کیلوگرم بر متر مکعب) به‌عنوان تیمار بهینه انتخاب شد. به‌طور کلی، کاهش فاصله نوارها و افزایش دبی روزنه‌ها به‌جای طولانی کردن مدت آبیاری اولیه، راهبرد مؤثرتری برای بهبود جوانه‌زنی، استقرار یکنواخت مزرعه و افزایش بهره‌وری آب در سامانه آبیاری قطره‌ای نواری گندم در مناطق خشک و نیمه‌خشک است.

کلمات کلیدی: آبیاری اولیه، آبیاری قطره‌ای نواری، بهره‌وری آب، دبی، عملکرد، فاصله نوار، گندم

استناد: امیر اسلامی، سیروس طهماسبی، محمد علی رستمی، هادی افشار. تأثیر فاصله نوار، دبی و زمان آبیاری بر جوانه‌زنی، رشد ریشه، عملکرد و بهره‌وری آب گندم در آبیاری اول با سامانه آبیاری قطره‌ای . نشریه دانش آب و هیدرولیک، دانشگاه تبریز/ جلد ۳۵ شماره ۳ صفحه‌های ۶۷ تا ۸۰/ سال ۱۴۰۴

This is an open-access article under the CC BY NC license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/)

۱- مقدمه

کم‌آبی و خشکی‌های پی‌درپی مهم‌ترین چالش بخش کشاورزی ایران به‌شمار می‌روند. با توجه به محدودیت شدید منابع آبی کشور، مدیریت صحیح آبیاری هم در روش‌های سطحی و هم در سامانه‌های تحت فشار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. توسعه سامانه‌های آبیاری تحت فشار با هدف افزایش بهره‌وری آب در اولویت قرار دارد و تاکنون حدود ۳ میلیون هکتار از اراضی کشور به انواع سامانه‌های نوین آبیاری مجهز شده‌اند (Anonymous, 2023).

گندم به‌عنوان مهم‌ترین گیاه زراعی، نقش اساسی در تأمین امنیت غذایی کشور ایفا می‌کند. در سال‌های اخیر به‌دلیل کمبود منابع آب و ضرورت بهره‌برداری صحیح از آن، پژوهش در زمینه آبیاری گندم به روش آبیاری قطره‌ای (نوار تیپ) اهمیت ویژه‌ای یافته است. در سال‌های اخیر، سامانه‌های آبیاری قطره‌ای نواری (نوار تیپ) به‌دلیل راندمان کاربرد بالا، امکان کنترل دقیق‌تر عملیات آبیاری و محدودیت منابع آب به‌سرعت برای آبیاری محصولات زراعی ردیفی به‌کار گرفته شده است. هریک از سامانه‌های آبیاری تحت فشار در صورت رعایت اصول فنی خاص خود در مراحل طراحی، اجرا و بهره‌برداری، می‌توانند بهره‌وری آب را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش داده و برداشت از منابع آب زیرزمینی را کاهش دهند. با این حال، بررسی‌ها نشان می‌دهد که گسترش سامانه‌های آبیاری تحت فشار بدون توجه کافی به مسائل فنی و ویژگی‌های زراعی و باغی محصولات، در برخی موارد در برخی موارد به افزایش مورد انتظار بهره‌وری آب منجر نشده است (Abbasi et al., 2016).

بیشتر پژوهش‌های انجام شده در زمینه سامانه‌های آبیاری قطره‌ای نواری و افزایش بهره‌وری آب در این سامانه‌ها عمدتاً به بررسی‌های اقتصادی و پارامترهای موثر بر کاهش هزینه‌های اولیه اختصاص یافته است. در سامانه آبیاری قطره‌ای نواری، فاصله نوارها یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده هزینه سرمایه‌گذاری اولیه به‌شمار می‌رود. بافت خاک، نوع محصول و میزان بارندگی مؤثر در طول فصل رشد، تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر انتخاب بهینه فاصله نوارها دارند (Lamm, 2002). Turknejad et al. (2006) نشان دادند که بهره‌وری آب گندم در روش آبیاری قطره‌ای نواری تقریباً دو برابر روش آبیاری سطحی است. Shafiei-Rad (2010) در پژوهشی تأثیر فاصله قطره‌چکان‌ها و نوارهای آبیاری قطره‌ای را بر عملکرد گندم بررسی کرد. نتایج نشان داد که بیشترین عملکرد دانه و بهره‌وری آب در تیمار فاصله نوار ۰/۴ متر و فاصله قطره‌چکان ۰/۱ متر به‌دست آمد؛ در حالی که از نظر اقتصادی، تیمار فاصله نوار ۰/۶ متر و فاصله قطره‌چکان ۰/۱ متر به‌عنوان مناسب‌ترین گزینه شناسایی شد. Delavarpour et al. (2019) نیز تأثیر فواصل مختلف نوارهای آبیاری قطره‌ای را بر عملکرد و بهره‌وری آب گندم مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که اثر فاصله نوار بر اجزای عملکرد، عملکرد دانه و بهره‌وری آب در سطح یک درصد معنی‌دار است. فاصله نوار ۰/۵ متر با آبیاری پیوسته، بالاترین عملکرد دانه را به همراه داشت اما کمترین میزان بهره‌وری آب را ثبت کرد؛ در مقابل، بیشترین بهره‌وری آب در همان فاصله نوار ۰/۵ متر ولی با رژیم آبیاری متناوب به‌دست آمد.

Chuhan et al. (2015) در هند بر روی خاک‌های لوم رسی نشان دادند که در سامانه آبیاری قطره‌ای نواری، فاصله نوار ۶۰ سانتی‌متری در مقایسه با ۸۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر بیشترین بهره‌وری آب گندم را به همراه داشت. همچنین Rao et al. (2016) در پژوهش دیگری در هند تأثیر سه فاصله قطره‌چکان ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متری را در سامانه قطره‌ای بررسی کردند. نتایج حاکی از آن بود که کوتاه‌ترین فاصله قطره‌چکان (۲۰ سانتی‌متر) بیشترین ارتفاع بوته، تعداد پنجه در مترمربع، تعداد پنجه مؤثر، محتوای کلروفیل، طول ریشه، عملکرد دانه و عملکرد کاه را به‌دست داد؛ با این حال، تفاوت عملکرد دانه بین فواصل ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر معنی‌دار نبود. بنابراین، با توجه به هدف کاهش هزینه اولیه سامانه، فاصله قطره‌چکان ۳۰ سانتی‌متر به‌عنوان گزینه بهینه توصیه شد. موفقیت استفاده از آبیاری قطره‌ای نواری برای گندم در منطقه شین‌جیانگ چین (Lv et al. 2019) در یافتن الگوهای جدید آبیاری گندم با نوار آبیاری در جهت کاهش هزینه‌ها و همچنین پژوهش‌های جدیدتر (Banik eta l. 2024؛ Suradkar et al. 2020؛ Al-Asadi et al. 2023) همگی گواه بر پتانسیل این سیستم در افزایش بهره‌وری آب هستند.

با وجود پیشرفت‌های یادشده، یک چالش مهم در آبیاری قطره‌ای نواری گندم، مدیریت آبیاری اول است. چنانچه آبیاری نخست (خاک‌آب) به‌درستی انجام شود، جوانه‌زنی یکنواخت و سبزینگی مطلوب در مزرعه حاصل خواهد شد. خاک‌آب زمانی صورت می‌گیرد که خاک مزرعه در اثر عملیات آماده‌سازی و کاشت دست خورده شده و پیوستگی بین خاک‌دانه‌ها کاهش یافته است. در این شرایط، نشت افقی جریان آب در آبیاری قطره‌ای به کندی انجام می‌شود و برای ایجاد سطح مرطوب یکنواخت، مدت زمان آبیاری افزایش می‌یابد که این امر موجب نفوذ عمقی بیش از حد آب و در نتیجه افزایش تلفات می‌گردد. این مشکل در آبیاری‌های بعدی، به‌دلیل ایجاد پیوستگی مجدد بین خاک‌دانه‌ها کاهش می‌یابد. کشاورزان برای اطمینان از کفایت آبیاری نخست، معمولاً بدون اطلاع دقیق از نیاز واقعی گیاه بر اساس مشاهدات مزرعه‌ای اقدام به آبیاری می‌کنند که اغلب بیش از مقدار مورد نیاز است. تاکنون تحقیقات مزرعه‌ای جامع در خصوص تأثیر هم‌زمان فاصله نوار، دبی و مدت زمان آبیاری بر جوانه‌زنی در آبیاری خاک‌آب و همچنین اثر آن بر عملکرد محصول و بهره‌وری آب انجام نشده است. از این‌رو، با توجه به محدودیت منابع آب کشور، بررسی پارامترهای مختلف سامانه آبیاری نوارتیپ به‌منظور بهینه‌سازی آبیاری نخست و دستیابی به عملکرد بالاتر محصول و افزایش بهره‌وری آب ضروری به‌نظر می‌رسد. هدف این پژوهش، ارزیابی اثر فاصله نوار، دبی نوار و مدت زمان آبیاری بر نرخ جوانه‌زنی، رشد ریشه، شاخص بهره‌وری آب

آبیاری و عملکرد نهایی گندم در آبیاری نخست، به‌منظور مدیریت صحیح آبیاری خاک‌آب بوده است

۲- مواد و روش ها

این بررسی در ایستگاه تحقیقات کشاورزی زرقان، واقع در ۲۵ کیلومتری شمال شرقی شهر شیراز، در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ اجرا گردید. آزمایش در قالب طرح آماری اسپلیت-اسپلیت پلات بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. سطوح تیمارها شامل دو فاصله نوار ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متری (به ترتیب L1 و L2) به‌عنوان بلوک اصلی، دو سطح دبی روزنه نوار ۴ و ۸ لیتر بر ساعت در متر (به‌ترتیب Q1 و Q2) به‌عنوان بلوک فرعی و سه مدت زمان آبیاری اولیه ۶، ۱۲ و ۱۸ ساعت (به‌ترتیب T1، T2 و T3) به‌عنوان بلوک فرعی- فرعی بود. نوار تیپ از نوع پلاک‌دار با فشار کاری یک بار، فاصله قطره‌چکان ۳۰ سانتی‌متری و دبی ۵ و ۸ لیتر در ساعت در هر متر طول نوار انتخاب شد. عرض هر کرت ۳ متر و طول آن۱۰ متر در نظر گرفته شد. در تیمار فاصله نوار ۵۰ سانتی‌متر، ۶ ردیف نوار تیپ و در تیمار ۷۵ سانتی‌متر، ۴ ردیف نوار تیپ در هر کرت نصب گردید. فاصله بین تیمارها ۱/۲ متر و فاصله بین تکرارها ۲ متر لحاظ شد.

پس از آماده‌سازی زمین مطابق عرف منطقه، عملیات کاشت با دستگاه ردیف‌کار غلات در تاریخ ۲۹ آذر ۱۴۰۱ انجام شد. رقم گندم مورد استفاده، رقم تجاری سیروان بود. عمق کاشت ۳ تا ۵ سانتی‌متر و میزان بذر مصرفی ۱۹۵ کیلوگرم در هکتار تعیین گردید. کودهای مصرفی براساس توصیه کودی بخش تحقیقاتی خاک و آب، نیز به‌ترتیب سوپر فسفات تریپل ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار، اوره ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار و سولفات پتاسیم ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار بود.

با اتمام کاشت، سامانه آبیاری قطره‌ای نواری در مزرعه نصب و اجرا شد. در ابتدای هر کرت، یک شیر کنترل جریان آب نصب گردید و حجم آب مصرفی در هر آبیاری با کنتورهای حجم‌سنج واسنجی‌شده (که پیش از شروع آزمایش با روش حجمی استاندارد واسنجی شده بودند) اندازه‌گیری شد. آبیاری دوم ۱۰ روز پس از آبیاری اول انجام گرفت. این بازه زمانی با در نظر گرفتن دوره بحرانی جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه جهت ایجاد فرصت کافی برای بروز تفاوت‌های کیفی بین تیمارهای آبیاری اول در نظر گرفته شد. پس از استقرار بوته‌ها، تعداد بوته در واحد سطح (متر مربع) برای هر کرت شمارش و ثبت شد.

در آبیاری‌های بعدی، مقدار آب مورد نیاز برای تمام کرت‌ها به‌طور یکسان و براساس رطوبت خاک قبل از آبیاری محاسبه شد. برای اعمال تیمارهای مختلف، با توجه به طول نوار تیپ، فاصله نوارها و دبی روزنه، نرخ جریان ورودی آب به کرت (لیتر بر ساعت) تعیین گردید. (رابطه ۱). همچنین در روز قبل از آبیاری مقدار رطوبت خاک اندازه‌گیری شده و مقدار کمبود رطوبت خاک با توجه به مقدار ظرفیت زراعی بدست آمد (رابطه ۲). همچنین با توجه به عمق ریشه، مقدار حجم آب مورد نیاز هر کرت محاسبه (رابطه ۳) و در نهایت مدت آبیاری هر کرت از رابطه (۴) حاصل شد. در پایان آبیاری هر تیمار و بر اساس مدت زمان بدست آمده، میزان حجم آب توسط کنتور قرائت گردید. آبیاری کامل تا انتهای فصل به‌همین ترتیب برای تمامی کرت‌ها بصورت یکسان انجام شد.

$$V_{in}=L*n*q \quad (۱)$$

$$SMD= FC-\theta \quad (۲)$$

$$V_d=SMD*Dr*10 \quad (۳)$$

$$T=V_d/V_{in} \quad (۴)$$

که در آن‌ها، V_{in} حجم آب ورودی به هر کرت (لیتر در ساعت)، L طول نوار (متر)، n تعداد نوار در هر کرت، q دبی هر متر نوار (لیتر در ساعت در متر)، SMD کمبود رطوبت خاک (درصد حجمی)، FC رطوبت خاک در ظرفیت زراعی (درصد حجمی)، θ درصد رطوبت خاک قبل از آبیاری (درصد حجمی)، V_d حجم آب مورد نیاز هر کرت (لیتر)، Dr عمق مؤثر ریشه (سانتی‌متر)، T مدت زمان آبیاری (ساعت).

مقدار FC خاک بر اساس نمونه‌برداری از اعماق ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متری خاک در آزمایشگاه توسط دستگاه سلول فشاری اندازه‌گیری و میانگین آن در رابطه (۲) استفاده گردید. عمق ریشه در مراحل اولیه رشد۴۰ سانتی‌متر و در مراحل بعدی ۵۰ سانتی‌متر فرض گردید. برای اندازه‌گیری طول و حجم ریشه، در پایان فصل رشد از هر کرت سه نمونه سیلندری خاک (با قطر ۱۰ سانتی‌متر و عمق ۵۰ سانتی‌متر) برداشت شد؛ ریشه‌ها با روش شست‌وشوی ملایم جدا گردیدند، طول ریشه با روش خطی اندازه‌گیری و حجم ریشه با روش جابجایی آب تعیین شد.

پس از برداشت محصول و تعیین عملکرد دانه و کل آب مصرفی در دوره رشد، شاخص بهره‌وری آب آبیاری با استفاده از معادله (۵) محاسبه شد:

$$WP_i = \frac{Y}{W_i} \quad (۵)$$

که در آن، WPi بهره‌وری آب آبیاری دانه گندم (کیلوگرم بر متر مکعب)، Y عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) و Wi حجم کل آب آبیاری در طول فصل رشد (متر مکعب در هکتار) می‌باشد.

برای ثبت تاریخ شروع جوانه‌زنی و تعداد بوته‌های سبز شده در واحد سطح، پس از شروع سبز شدن، شمارش بذرهای جوانه زده (سبز شده) در چند نوبت و با فواصل زمانی ۳ روزه انجام گرفت. بدین منظور، در هر کرت دو نقطه تصادفی با استفاده از کادر فلزی به ابعاد ۰/۵ × ۰/۵ متر (مساحت ۰/۲۵ متر مربع) انتخاب و تعداد بذرهای سبز شده در هر کادر با فواصل زمانی سه روزه به ترتیب ۶، ۹ و ۱۲ روز پس از شروع سبز شدن و همچنین در مرحله سبز شدگی کامل (۱۵ روز پس از شروع سبز شدن) شمارش شد. لازم به ذکر است که این نقاط با استفاده از اسپری رنگ نشانه‌گذاری گردیدند تا در نوبت‌های بعدی، اندازه‌گیری دقیقاً در همان مکان‌های قبلی انجام شود. تمام شمارش‌ها در سه تکرار آزمایش انجام گرفت و در نهایت، میانگین مقادیر دو نقطه برای هر کرت به‌عنوان داده نهایی ثبت شد.

در انتهای مرحله ساقه‌رفتن گندم، برداشت ریشه از هر کرت انجام شد. بدین منظور، از هر کرت سه نمونه سیلندری خاک (با قطر ۱۰ سانتی‌متر و عمق ۶۰ سانتی‌متر) به‌صورت تصادفی برداشت گردید. ریشه‌ها پس از شست‌وشوی ملایم با آب جدا شدند؛ حداکثر طول ریشه با خط‌کش به سانتی‌متر و حجم ریشه با روش جابجایی آب در استوانه مدرج به سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شد. به این صورت که تغییرات حجم آب در استوانه مدرج قبل و بعد از قرار دادن ریشه‌ها ثبت و این تغییرات به‌عنوان حجم ریشه محسوب گردید. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها و مقایسه میانگین صفات مورد مطالعه با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد و نرم‌افزار SAS نسخه ۹.۳ انجام گرفت. برای آزمون معناداری اثرات اصلی و متقابل، در تجزیه واریانس بر پایه مدل اسپلیت-اسپلیت پلات، برای آزمون اثر فاکتور اصلی (فاصله نوار) از میانگین مربعات خطای بلوک اصلی استفاده شد. برای آزمون اثر بلوک فرعی (دبی) و اثر متقابل آن با فاصله نوار تیپ از میانگین مربعات خطای بلوک فرعی و برای اثر بلوک فرعی- فرعی و کلیه اثرات متقابل شامل آن، از میانگین مربعات خطای باقیمانده استفاده گردید.

همچنین، به‌منظور بررسی همزمان روابط متقابل صفات مورد مطالعه و عملکرد دانه، از روش تجزیه بای‌پلات (Yan & kang, 2002) استفاده شد. در این روش، کسینوس زاویهٔ بین بردارهای دو صفت ضریب نشان‌دهنده میزان همبستگی بین آن‌ها است. در شکل بای‌پلات زاویه منفرجه بین بردارها بیانگر همبستگی منفی صفات، زاویه قائمه نشانه مستقل بودن دو صفت و زاویه حاده بیانگر همبستگی مثبت آن‌ها است (یان و کلنگ، ۲۰۰۲). طول بردارها نیز میزان تنوع صفات را نشان می‌دهد به طوری که هرچه طول بردار یک صفت بیشتر باشد نشان دهندهٔ تنوع بیشتر در آن صفت است. برای تجزیه مولفه‌های اصلی و رسم بای‌پلات از نرم‌افزار GenStat v.15 استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

آبیاری اول (خاک‌آب) و آبیاری دوم (پی آب) به ترتیب در تاریخ‌های ۵ آذر ۱۴۰۱ و ۱۵ آذر ۱۴۰۱ انجام شد. سومین آبیاری نیز در تاریخ ۱۶ فروردین ۱۴۰۲ انجام و از آن به بعد در ماه‌های فروردین و اردیبهشت هر ۱۰ روز یکبار و در ماه خرداد هر هفته آبیاری صورت گرفت. در مجموع تعداد ۹ نوبت آبیاری در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ برای محصول گندم به مزرعه داده شد. در جدول (۱) میانگین‌های حجم کل آب مصرف شده در طی سال زراعی (متر مکعب در هکتار)، عملکرد دانه گندم (کیلوگرم در هکتار) و بهره‌وری آب آبیاری دانه گندم (کیلوگرم بر متر مکعب) در تیمارهای مختلف آورده شده است. با مشاهده این جدول مشخص می‌شود که بیشترین و کمترین حجم آب به ترتیب در تیمارهای L1Q2T3 و L2Q1T1 حاصل شده است. این در حالی است که با توجه به مقادیر عملکردها، بیشترین و کمترین بهره‌وری آب آبیاری در تیمارهای L1Q1T1 و L1Q2T3 بدست آمده که در قسمت تجزیه و تحلیل آماری با جزییات بیشتری به تفاوت‌ها اشاره شده است.

جدول۱ – میانگین‌های کل آب آبیاری، عملکرد دانه گندم و بهره‌وری آب آبیاری دانه گندم در تیمارهای مختلف در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱

Table 1 – Means of total irrigation water , grain yield of wheat, and irrigation water productivity of wheat grain under different treatments in the 2023-2024 crop year.

ردیف No.	تیمار Treatment	کل آب آبیاری total irrigation water (m^3/ha)	عملکرد دانه grain yield (kg/ha)	بهره‌وری آب آبیاری irrigation water productivity (kg/m^3)
۱	**L1Q2T3**	۱۰۲۱۰	۵۷۶۵	۰/۵۶
۲	**L1Q2T2**	۸۹۸۰	۵۸۰۲	۰/۶۵
۳	**L1Q2T1**	۷۸۵۵	۶۲۰۲	۰/۷۹
۴	**L1Q1T1**	۶۷۴۴	۵۹۸۳	۰/۸۹
۵	**L1Q1T3**	۸۱۵۷	۵۷۳۹	۰/۷۰
۶	**L1Q1T2**	۷۴۱۹	۵۴۸۶	۰/۷۴

۷	L2Q1T2	۶۵۲۷	۵۰۵۹	۰/۷۸	
۸	L2Q1T3	۷۰۱۹	۵۲۳۴	۰/۷۵	
۹	L2Q1T1	۶۰۷۷	۴۶۸۴	۰/۷۷	
۱۰	L2Q2T2	۷۷۳۰	۶۱۹۴	۰/۸۰	
۱۱	L2Q2T1	۶۹۷۹	۵۳۸۴	۰/۷۷	
۱۲	L2Q2T3	۸۵۴۹	۶۰۰۳	۰/۷۰	

۳-۱-روند جوانه زنی (تعداد بوته‌های سبز شده در واحد سطح)

تاریخ شروع جوانه زنی (سبز شدن) و پایان آن به‌ترتیب حدود ۱۸ و ۳۰ روز پس از کاشت بود. تعداد بذرهای جوانه‌زده در ۰/۵ متر مربع در سه مرحله (۲۱، ۲۴ و ۲۷ روز پس از کاشت) اندازه‌گیری شد. همچنین، ۳۰ و ۴۵ روز پس از کاشت، شمارش تعداد بوته‌ها به‌همین روش انجام گرفت؛ با توجه به اینکه از مرحله ۳۰ روز پس از کاشت افزایش تعداد بذرهای سبز شده مشاهده نشد، تعداد شمارش شده در مرحله چهارم به‌عنوان تعداد بوته نهایی در نظر گرفته شد. نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد که فاصله نوار تیپ، دبی نوار و مدت زمان آبیاری خاک‌آب اثر معنادار بر تعداد بذرهای سبز شده در هر سه مرحله شمارش داشتند. اثرات متقابل معنادار دبی و فاصله نوار همچنین اثرات متقابل سه‌گانه معنادار دبی، فاصله نوار و زمان آبیاری بیانگر آن است که بهینه‌سازی ترکیبی این سه عامل می‌تواند فرآیند جوانه‌زنی گندم را بهبود بخشد. با وجود معناداری اثر فاصله نوار تیپ در هر سه مرحله شمارش تعداد جوانه‌ها، این عامل بر تعداد نهایی جوانه‌ها معنادار نبود؛ اما اثر دبی، زمان و اثر متقابل این دو عامل بر تعداد نهایی جوانه‌ها (مرحله چهارم شمارش) معنادار بود. این نتایج بر اهمیت زمان‌بندی دقیق و حجم مناسب آب آبیاری در مراحل اولیه رشد گندم تأکید دارند.

جدول۲ – تجزیه واریانس اثرات فاصله نوار تیپ (L)، دبی نوار (Q)، مدت زمان آبیاری اولیه (T) و برهمکنش‌های آن‌ها بر صفات مورد مطالعه در گندم

Analysis of variance of the effects of type strip spacing (L), lateral discharge (Q), initial irrigation duration (T) and their interactions on the studied traits in wheat

منابع تغییر S.V	درجه آزادی DF	میانگین مربعات صفات مورد بررسی Mean squares of the traits under study						
		روند جوانه زنی (تعداد بوته سبز شده در واحد سطح) Germination process				طول ریشه Root length (cm)	حجم ریشه Root volume (cm^3)	بهره‌وری آب آبیاری Irrigation water productivity (kg/m^3)	عملکرد دانه Grain yield (t/ha)
		مرحله ۱ Step 1	مرحله ۲ Step 2	مرحله ۳ Step 3	تعداد بوته نهایی Final number of plants				
تکرار Repetition	۱	۱۸/۷	۴۶/۷	۶۹/۹۴	۱۱۲/۸	۲/۵	۰/۶	۰/۰۰۲	۰/۰۷
فاصله نوار Tape distance	۱	۳۷۹۲ *	۴۲۲۵ *	۳۸۷۵ *	۳۱۲۶ ns	۱۵/۶ ns	۲/۹**	۰/۰۱۴ ns	۱/۵ ns
خطای فاصله Distance error	۲	۶۵/۶	۷۸/۹	۲۰۵/۱۴	۲۷۹/۵	۲۸/۰	۰/۰۰۳	۰/۰۰۹	۰/۲
دبی Discharge	۱	۹۸۷**	۵۲۱/۴ **	۷۰۶/۶۷ **	۵۶۴/۱ **	۳/۳ ns	۲/۳*	۰/۰۳*	۲/۶**
دبی*فاصله Discharge*Distance	۱	۲۶۴/۱*	۲۷۷/۸**	۴۵/۵۶ *	۲۹/۳ ns	۷۴/۷**	۰/۲ ns	۰/۰۲*	۱/۰ *
خطای دبی Discharge error	۴	۱۵/۹	۸/۱	۳/۱۴	۱۸/۲	۲/۴	۰/۱	۰/۰۰۲	۰/۱
زمان Time	۲	۶۰۱/۷**	۷۷۸/۳ **	۳۳۵/۵۸**	۲۲۴/۴ *	۴/۵ ns	۱/۶*	۰/۰۵**	۰/۰۴ns
فاصله*زمان Distance*Time	۲	۱۲۳/۶**	۲۱۱/۷**	۲۲۶/۳۳ *	۱۷۲/۹ *	۲۰/۶ ns	۵/۹ **	۰/۰۳**	۰/۹۶**
دبی*زمان Discharge*Time	۲	۸۸/۱**	۴۷/۳ ns	۴۶/۸۶ ns	۶۴/۳ ns	۷/۸ ns	۱/۸**	۰/۰۰۳ ns	۰/۱۱ ns
فاصله*دبی*زمان Distance*Discharge*Time	۲	۵۳/۵ *	۷۶/۳ ns	۱۳۸/۵۸ *	۹۶/۹ ns	۱۳/۲ ns	۰/۶ ns	۰/۰۰۰۱ ns	۰/۰۲ ns
خطای کل Total error	۱۶	۱۰/۰	۲۷/۰	۳۸/۵۰	۳۷/۸	۷/۲	۰/۳	۰/۰۰۳	۰/۰۹

*: وجود اختلاف معنی‌دار در سطح ۱٪ **: وجود اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ ns: عدم وجود اختلاف معنی‌دار

۳-۱- مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارها

مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارها (جدول ۳) نشان می‌دهد که تفاوت سطوح فاصله نوار تیپ، دبی نوار و مدت زمان آبیاری در هر سه مرحله شمارش اولیه جوانه‌ها و همچنین تعداد نهایی بوته‌های سبز شده (به‌جز برای فاصله نوار تیپ) معنادار است؛ به‌گونه‌ای که فاصله کمتر (L1) و دبی بیشتر (Q2) سبب افزایش تعداد بوته‌های سبز شده گردید. بالاترین میانگین تعداد بوته‌های سبز شده در تیمار T3 (۱۸ ساعت) مشاهده شد، در حالی که میانگین تیمارهای T1 و T2 تفاوت معناداری در هیچ یک از مراحل شمارش و تعداد نهایی بوته‌های سبز شده نداشتند. شکل ۱ روند سبز شدن گندم در روزهای مختلف اندازه‌گیری را در سه مرحله شمارش اولیه و تعداد بذرهای سبز شده نهایی نشان می‌دهد. بیشترین تعداد بذرهای سبز شده در هر مرحله اندازه‌گیری مربوط به تیمار L1Q2T3 است که دارای فاصله نوار ۵۰ سانتی‌متر، دبی نوار ۸ لیتر بر ساعت در متر و مدت زمان آبیاری ۱۸ ساعت بوده است. همچنین، با وجود عدم معناداری اثرات متقابل سه‌گانه، بیشترین تعداد بوته سبز شده نهایی نیز مربوط به همین تیمار بود. نتایج بیانگر آن است که در تیمار L1Q2T3، به‌دلیل فراهم شدن رطوبت مورد نیاز برای سبز شدن در فاصله زمانی کوتاه‌تر، تعداد بیشتری از بذرها در مقایسه با سایر تیمارها سریع‌تر جوانه زده و سبز شدند. کمترین تعداد بذر سبز شده نیز مربوط به تیمار L2Q1T1 بود. مقایسه این تیمارها نشان می‌دهد که تفاوت تعداد بذر سبز شده بین مرحله اول و آخر در تیمار L1Q2T3 کمترین مقدار (۶ عدد) را داشت که بیانگر سرعت بیشتر جوانه‌زنی و یکنواختی بالاتر سبز شدن در این تیمار است. با این حال، باید توجه داشت که اثر فاصله نوار تیپ بر تعداد نهایی بوته‌ها غیرمعنادار بود و تأکید بر فاصله کمتر بیشتر در مراحل اولیه رشد قابل مشاهده است. نتایج این پژوهش نشان داد که هر سه عامل فاصله نوارتیپ، دبی نوار و مدت زمان آبیاری اولیه به‌عنوان عوامل کلیدی، تأثیر مثبتی بر روند سبز شدن گندم در آبیاری خاک‌آب دارند. این عوامل موجب توزیع یکنواخت آب در خاک و فراهم کردن شرایط مناسب برای جوانه‌زنی گیاه می‌شود. این یافته‌ها با نتایج Chen et al. (2015) که نشان داده‌اند افزایش دبی آبیاری می‌تواند رشد بهتر گندم را در مراحل اولیه تسهیل کند، همخوانی دارد.

جدول ۳ – مقایسه میانگین صفات مورد مطالعه تحت تأثیر اثرات اصلی تیمارها در مرحله خاک‌آب گندم

Table 3 - Comparison of the average of the studied traits under the influence of the main effects of the treatments in the first irrigation stage of wheat

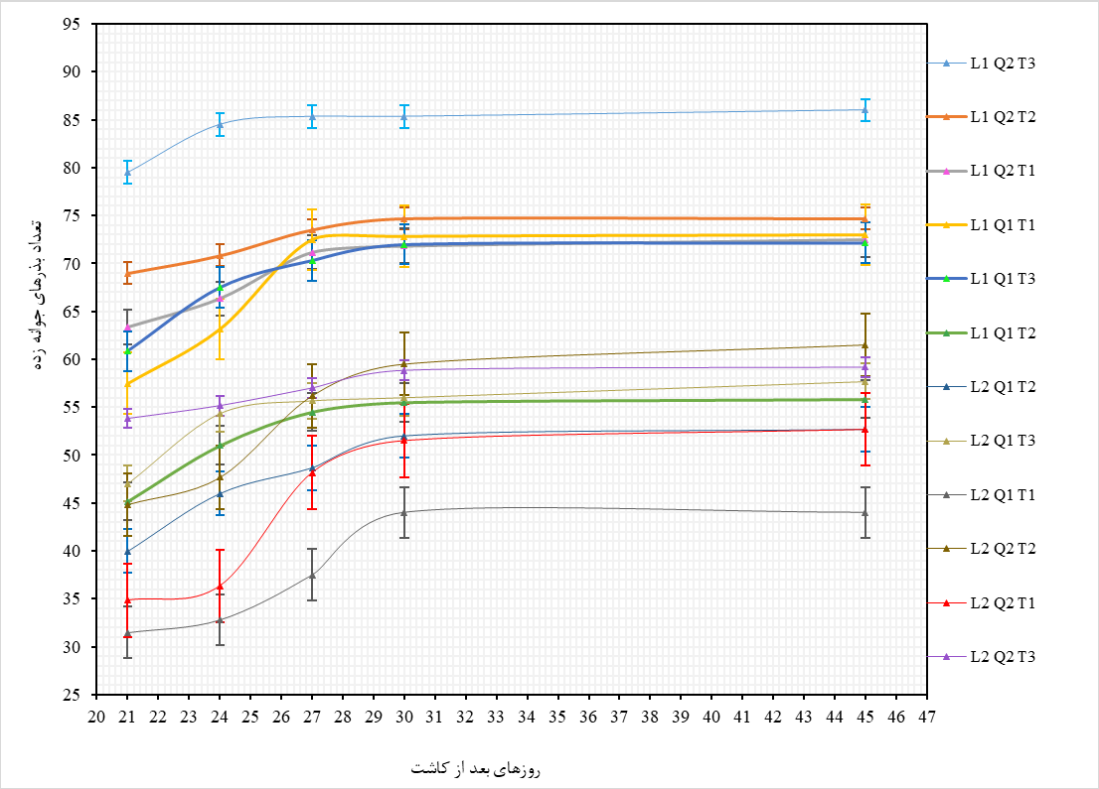
تیمار Treatment	سطوح تیمار Treatment levels	روند جوانه زنی (تعداد بوته سبز شده در واحد سطح) Germination process (number of sprouted plants per unit area)				طول ریشه Root length (cm)	حجم ریشه Root volume (cm^3)	بهره‌وری آب آبیاری irrigation water productivity (kg/m^3)	عملکرد دانه grain yield (t/ha)
		مرحله ۱ Step 1	مرحله ۲ Step 2	مرحله ۳ Step 3	تعداد بوته نهایی Final number of plants	میانگین صفات مورد بررسی Average of the traits studied			
فاصله نوار Tape distance	L1	٦٢/٦ a	٦٧/٢ a	٧١/٢ a	٧٢/٠ a	٣٦/٠ a	٣/٢ a	٠/٧٢ a	٥/٨ a
	L2	٤٢/٠ b	٤٥/٤ b	٥٠/٥ b	٥٣/٦ a	٣٧/٣ a	٢/٦ b	٠/٧٦ a	٥/٤ a
دبی Discharge	Q1	٤٧/٠ b	٥٢/٥ b	٥٦/٥ b	٥٨/٧ b	٣٦/٣ a	٢/٧ a	٠/٧٧ a	٥/٤ a
	Q2	٥٧/٦ a	٦٠/١ a	٦٥/٢ a	٦٦/٩ a	٤٠/٦ a	٣/٢ b	٠/٧١ b	٥/٩ b
زمان Time	T3	٦٠/٣ a	٦٥/٤ a	٦٧/١ a	٦٨/٠ a	٣٧/١ a	٣/٣ a	٠/٨٠ a	٥/٧ a
	T2	٤٩/٨ b	٥٣/٩ b	٥٨/٢ b	٦٠/٤ b	٣٦/٩ a	٢/٧ b	٠/٧٤ b	٥/٦ a
	T1	٤٦/٨ b	٤٩/٧ b	٥٧/٣ b	٦٠/٠ b	٣٥/٩ a	٢/٦ b	٠/٦٨ c	٥/٦ a

برای اثر هر تیمار در هر ستون میانگین هایی که حداقل در یک حرف مشترک هستند، براساس آزمون دانکن فاقد تفاوت آماری در سطح احتمال ۵ درصد می باشند

طول و حجم ریشه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که طول ریشه تحت تأثیر معنادار هیچ یک از عوامل فاصله نوار تیپ، دبی نوار و مدت زمان آبیاری اولیه قرار نگرفت، اما حجم ریشه به طور معنادار تحت تأثیر فاصله نوار تیپ (در سطح احتمال ۱ درصد)، دبی نوار (در سطح احتمال ۵ درصد) و مدت زمان آبیاری اولیه (در سطح احتمال ۵ درصد) بود. همچنین، برهمکنش‌های فاصله × زمان و دبی ×زمان نیز تأثیر معنادار بر حجم

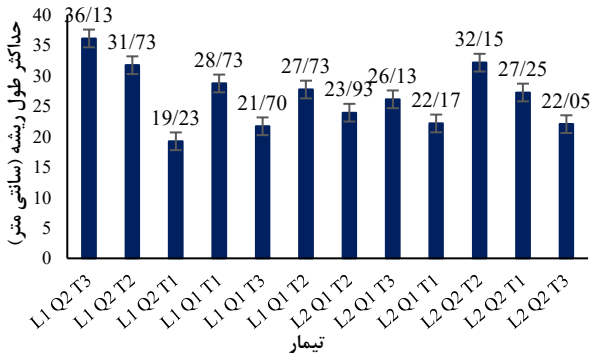
ریشـــه داشـــتند که بیانگر اهمیت تنظیم هماهنگ این عوامل برای توسعه ریشه است. مقایسه میانگین‌ها (جدول ۳) نشان داد که کاهش فاصله نوارها، افزایش دبی و طولانی‌تر کردن زمان آبیاری حجم ریشه را افزایش می‌دهد. با این حال، عدم معناداری برهمکنش‌های سـه‌گانه (فاصـــله× دبی× زمان) حاکی از آن اســـت که تغییرات همزمان این عوامل تأثیر توأمی بر طول ریشه نداشت.



شکل ۱ – روند جوانه‌زنی بذر گندم در روزهای مختلف پس از کاشت در تیمارهای مختلف

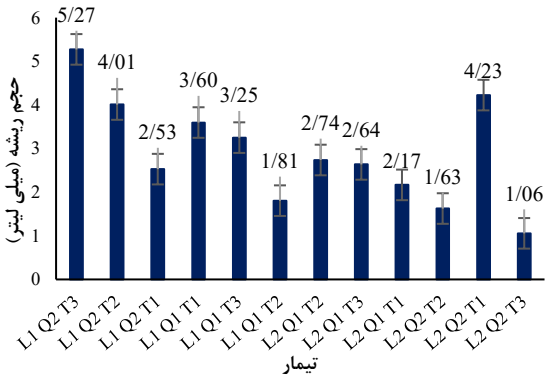
Fig 1. Wheat seed germination process at different days after sowing in different treatments

افزایش حجم ریشـــه توان گیاه را برای جذب آب و مواد غذایی بیشتر از خاک تقویت می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهند که دبی بالاتر رطوبت بیشتری در ناحیه ریشه فراهم می‌آورد و رشد ریشه را تسهیل می‌کند، که این امر مستقیماً بر جذب آب و مواد مغذی تأثیر مثبت دارد. همچنین، افزایش مدت زمان آبیاری اولیه حجم و تعداد ریشـه‌های افشـان را بیشـتر می‌کند و نقش مســـتقیم حجم و زمان آب آبیاری را در توســـعه ریشـــه تأیید می‌نماید. بالاترین طول و حجم ریشـــه (بدون تفاوت معنادار با سایر تیمارها) در تیمار L1Q2T3 مشاهده شد (شکل ۲ و ۳). ترکیب مناســـب فاصـــله نوار تیپ با دبی و زمان آبیاری می‌تواند توزیع یکنواخت رطوبت را در خاک تضـــمین کند و در نتیجه حجم ریشه را افزایش دهد. این نتایج با یافته‌های Chen et al. (2021) همخوانی دارد که نشـــان دادند افزایش میزان و دفعات آبیاری قطره‌ای طول و وزن ریشـــه را بهبود می‌بخشـــد. افزایش حجم و تراکم ریشه در ناحیه مرطوب خاک به عنوان یک راهبرد برای افزایش جذب آب و مواد غذایی عمل می‌کند. با مدیریت صـحیح فواصـل و حجم آبیاری در آبیاری تیپ، می‌توان توسـعه ریشـه را در لایه‌های سـطحی خاک به حداکثر رسـاند و از این طریق، کارایی جذب آب، فتوسـنتز و در نهایت عملکرد محصـول را بهبود بخشـید. بسـیاری از پژوهش‌ها بر اهمیت افزایش طول و حجم ریشـه بخصـوص در شـرایط محدودیت آب و آب و هوای خشک و نیمه خشک در گیاهان مختلف تاکید دارند (Chen et al., 2015؛ Li et al., 2010؛ Lopes & Reynoldds, 2010؛ Payero et al., 2008)



شکل ۲ - طول ریشه گندم در تیمارهای مختلف

Fig 2. Wheat root length in different treatments

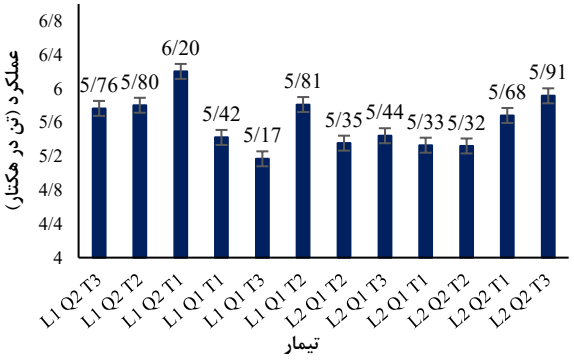


شکل ۳ – حجم ریشه گندم در تیمارهای مختلف

Fig 3. Wheat root volume in different treatments

عملکرد نهایی دانه گندم

نتایج تجزیه واریانس عملکرد نهایی دانه گندم نشان داد که تنها دبی نوارتیپ (Q) در سطح احتمال ۱ درصد تأثیر معنادار داشت، در حالی که فاصله نوار تیپ (L) و مدت زمان آبیاری اولیه (T) تأثیر معناداری بر عملکرد نداشتند. این یافته بیانگر آن است که در شرایط آبیاری مناسب، دبی بالاتر (۸ لیتر بر ساعت در متر) در مرحله خاک‌آب می‌تواند عملکرد نهایی گندم را افزایش دهد. نتایج مشابهی در پژوهش‌های پیشین گزارش شده که نقش کلیدی دبی و زمان آبیاری را در سامانه نواری تیپ بر افزایش عملکرد گندم تأیید می‌کنند (Chen et al., 2021؛ Li et al., 2019). میانگین عملکرد گندم در تیمارهای مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. بالاترین عملکردها مربوط به تیمارهای L1Q2T1 (۶/۲ تن در هکتار) و L2Q2T3 (۵/۹۱ تن در هکتار) بود که تفاوت آن‌ها غیرمعنادار بود؛ این امر بر اهمیت دبی بالاتر (Q2) در افزایش عملکرد گندم تأکید دارد.

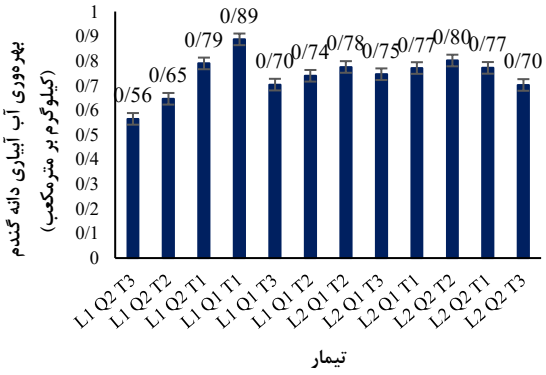


شکل ۴ - عملکرد دانه گندم در تیمارهای مختلف

Fig 4. Wheat grain yield in different treatments

شاخص بهره‌وری آب آبیاری

شاخص بهره‌وری آب آبیاری تحت تأثیر معنادار دبی نوار (Q) و مدت زمان آبیاری (T) قرار گرفت. همچنین، برهمکنش‌های دبی × فاصله نوار و فاصله نوار × زمان آبیاری نیز معنادار بود. این نتایج بیانگر آن است که بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی نیازمند مدیریت هماهنگ این عوامل است؛ به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که تأمین رطوبت کافی برای رشد گیاه بدون هدررفت آب به چالشی عمده تبدیل شده است (Farzamnia & Miranzadeh, 2022). معناداری برهمکنش‌های دبی × فاصله و فاصله × زمان نشان می‌دهد که دستیابی بالاترین بهره‌وری آب مستلزم تنظیم همزمان این سه عامل است؛ به گونه‌ای که فاصله نوار تیپ توزیع یکنواخت رطوبت را تضمین کند و با دبی و زمان مناسب ترکیب شود تا بهترین شرایط رشد و عملکرد گندم فراهم آید. مقایسه میانگین‌های شاخص بهره‌وری آب آبیاری در تیمارهای مختلف (شکل ۵) نشان می‌دهد که با وجود عدم معناداری تفاوت کلی تیمارها در این صفت، بالاترین مقدار شاخص بهره‌وری آب (۰/۸۹ کیلوگرم بر متر مکعب) مربوط به تیمار L1Q1T1 بود که حتی با دبی پایین‌تر (Q1) کارایی بالایی در مصرف آب داشت. این یافته‌ها با نتایج تحقیقات پیشین همخوانی دارد که بر اهمیت بهینه‌سازی فاصله نوار، دبی و زمان آبیاری در افزایش بهره‌وری آب تأکید کرده‌اند (Farzamnia & Miranzadeh, 2022؛ Lv et al., 2019؛ Firouzabadi et al., 2021).



شکل ۵- شاخص بهره‌وری آب آبیاری در تیمارهای مختلف

Fig 5. Irrigation water productivity index in different treatments

روابط و همبستگی بین صفات

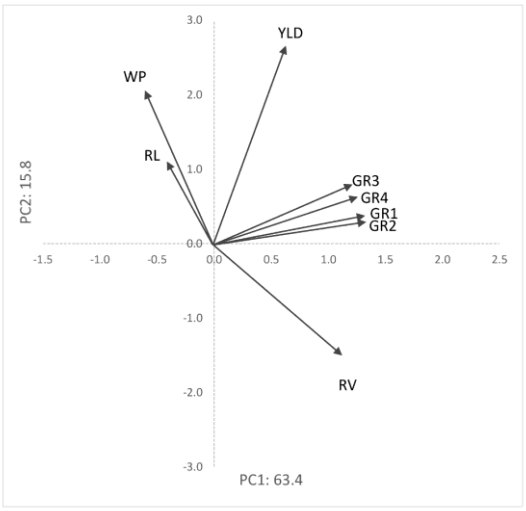
به‌منظور بررسی همزمان روابط متقابل صفات مورد مطالعه و عملکرد دانه، از روش تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) و رسم بای‌پلات و همچنین محایبه همبستگی پیرسون استفاده شد.

مؤلفه اصلی اول و دوم به‌ترتیب ۶۳/۴ و ۱۵/۸ درصد از تنوع داده‌های استاندارد شده را توجیه کردند و در مجموع ۷۹/۲ درصد کل تغییرات را توضیح دادند (شکل ۶). روش بای‌پلات ابزاری قدرتمند برای کاوش داده‌های چندمتغیره و نمایش گرافیکی روابط بین صفات است (Tahmasebi et al., 2018). در این روش، کسینوس زاویهٔ بین بردارهای دو صفت، ضریب همبستگی میان آن‌ها را نشان می‌دهد؛ زاویه حاده بیانگر همبستگی مثبت، زاویه قائمه نشانه استقلال صفات و زاویه منفرجه حاکی از همبستگی منفی است (Yan & Kang, 2002). همچنین، طول بردارها میزان تنوع هر صفت را نمایان می‌سازد؛ به‌گونه‌ای که بردار بلندتر بیانگر تنوع بیشتر در آن صفت است.

زوایای حاده میان بردارهای WP، RL، GR3 و GR4 با بردار YLD نشان‌دهنده بالاترین همبستگی مثبت این صفات با عملکرد دانه گندم است. همچنین، عملکرد دانه با بلندترین بردار بیشترین تنوع و طول ریشه با کوتاه‌ترین بردار کمترین تنوع را در میان صفات داشت. همبستگی ساده بین صفات (جدول ۴) نیز نشان داد که بالاترین همبستگی مثبت و معنی دار بین تعداد بوته شمارش شده در مراحل مختلف با حجم ریشه و همچنین شاخص بهره‌وری آب با طول ریشه وجود دارد. همبستگی عملکرد دانه با تعداد بوته شمارش شده در مراحل مختلف در سطح احتمال ۱ درصد و با طول ریشه و همچنین شاخص بهره‌وری آب در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود. این یافته‌ها حاکی از آن است که دبی نوار تیپ (با تأثیر مثبت و معنادار بر عملکرد) احتمالاً از طریق افزایش تعداد بوته‌های سبز شده و توسعه اولیه ریشه، عملکرد دانه را بهبود بخشیده است. همچنین، همبستگی بالای طول ریشه با شاخص بهره‌وری آب و همچنین همبستگی مثبت طول ریشه با عملکرد دلنه نقش مثبت صفات مرتبط با رشد ریشه را در ارتقای کارایی مصرف آب و عملکرد گندم تأیید می‌کند. نتایج حاضر با یافته‌های سایر محققین (Chen et al., 2021؛ Chen et al., 2015؛ Li et al., 2010؛ Payero et al., 2008) همخوانی دارد که نشان دادند افزایش میزان و دفعات آبیاری قطره‌ای می‌تواند طول و وزن ریشه، تجمع زیست‌توده هوایی و در نهایت عملکرد دانه و کارایی مصرف آب گندم را افزایش دهد.

نتیجه‌گیری

در حالی که اکثر پژوهش‌های پیشین در حوزه مدیریت سامانه‌های آبیاری قطره‌ای نواری بر بهره‌وری آب، بهره‌برداری از سامانه‌های تحت فشار و افزایش راندمان آن‌ها تمرکز داشته‌اند، این پژوهش به بررسی مدیریت آبیاری اولیه (خاک‌آب) و تأثیر فاصله نوار، دبی روزنه نوار و مدت زمان آبیاری بر نرخ جوانه‌زنی و عملکرد نهایی گندم پرداخته است. نتایج نشان داد که تیمار L1Q2T3 (فاصله نوار ۵۰ سانتی‌متر، دبی ۸ لیتر بر ساعت در متر و مدت آبیاری ۱۸ ساعت) بالاترین نرخ جوانه‌زنی، یکنواختی سبز شدن، تعداد بوته نهایی و حداکثر طول و حجم ریشه را به همراه داشت.



شکل ۶- بای‌پلات همبستگی صفات جوانه‌زنی، رشد ریشه، بهره‌وری آب و عملکرد دانه در تیمارهای خاک‌آب. GR1: تعداد بوته در مرحله اول شمارش، GR2: تعداد بوته در مرحله دوم شمارش، GR3: تعداد بوته در مرحله سوم شمارش، GR4: تعداد بوته در مرحله چهارم شمارش (تعداد نهایی)، RL: طول ریشه، RV: حجم ریشه، WP: شاخص بهره‌وری آب آبیاری و YLD: عملکرد دانه.

Fig 6. Biplot of correlation of germination traits, root growth, water productivity and grain yield in the first irrigation treatments. GR1: number of plants in the first counting stage, GR2: number of plants in the second counting stage, GR3: number of plants in the third counting stage, GR4: number of plants in the fourth counting stage (final number), RL: root length, RV: root volume, WP: irrigation water productivity index and YLD: grain yield.

این یافته از این جهت حائز اهمیت است که استقرار مطلوب بوته و سیستم ریشه‌ای قوی، پایه و اساس عملکرد بالا است. در مقابل، بالاترین عملکرد دانه برابر (۶/۲ تن در هکتار) در تیمار L1Q2T1 (با مدت آبیاری کوتاه‌تر ۶ ساعت) به‌دست‌آمد. همچنین، شاخص بهره‌وری آب آبیاری در تیمار L1Q1T1 به حداکثر مقدار ۰/۸۹ کیلوگرم بر متر مکعب رسید که نشان‌دهنده کارایی بالای مصرف آب حتی با دبی پایین‌تر است. تحلیل همبستگی‌ها نیز بالاترین روابط مثبت را میان شاخص بهره‌وری آب، طول ریشه، تعداد بوته در مرحله سوم و تعداد بوته نهایی با عملکرد دانه آشکار ساخت. یافته‌های این پژوهش مبنی بر تأثیر مثبت کاهش فاصله نوار بر بهبود جوانه‌زنی و صفات ریشه، در

پژوهش‌های دیگری نیز گزارش شده است (Chouhan et al., 2015؛ Delavarpour et al., 2019). به طور کلی، کاهش فاصله نوارها و افزایش دبی روزنه بیش از طولانی کردن مدت آبیاری اولیه در بهبود توزیع رطوبت خاک، تسهیل جوانه‌زنی و توسعه ریشه مؤثر است، هرچند مدت آبیاری طولانی‌تر مستقیماً عملکرد نهایی را افزایش نمی‌دهد. بنابراین در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای نواری گندم، توصیه می‌شود فاصله نوارها را به ۵۰ سانتی‌متر کاهش داد و دبی را به ۸ لیتر بر ساعت در متر افزایش داد (با فاصله روزنه‌های ۳۰ سانتی‌متر) تا جایگزین مناسبی برای آبیاری طولانی‌تر شود؛ این تنظیمات نه تنها رشد اولیه گیاه را تقویت می‌کند، بلکه با کاهش زمان آبیاری، هزینه‌های انرژی را پایین می‌آورد و بهره‌وری آب را تا حدود ۰/۸۹ کیلوگرم بر متر مکعب ارتقا می‌دهد که با نتایج Rao et al. (2016) و Shafiei-Rad (2010) همخوانی دارد.

با توجه به چالش کم‌آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی بر بررسی بیشتر این پارامترها در خاک‌های مختلف (رسی یا شنی)، با ارقام گوناگون گندم و ارزیابی تحلیل هزینه-فایده با نصب نوارها با فاصله ۵۰ سانتی‌متر تمرکز کنند تا کاربرد عملی یافته‌ها گسترش یابد.

جدول ۴- همبستگی پیرسون بین صفات جوانه‌زنی، رشد ریشه، بهره‌وری آب آبیاری و عملکرد دانه در تیمارهای خاک‌آب

Table 4- Pearson correlation between germination traits, root growth, irrigation water productivity and grain yield in the first irrigation treatments

	مرحله اول جوانه‌زنی	مرحله دوم جوانه‌زنی	مرحله سوم جوانه‌زنی	تعداد بوته نهایی	طول ریشه (cm)	حجم ریشه (cm^3)	بهره‌وری آب آبیاری (kg/m^3)	عملکرد دانه (t/ha)
مرحله اول جوانه‌زنی The first stage of germination								
مرحله دوم جوانه‌زنی The second stage of germination	۰/۹۷ **							
مرحله سوم جوانه‌زنی The third stage of germination	۰/۹۴ **	۰/۹۷ **						
تعداد بوته نهایی Final number of plants	۰/۹۰ **	۰/۹۴ **	۰/۹۹					
طول ریشه Root length	-۰/۱۶ ns	-۰/۱۸ ns	-۰/۱۳ ns	-۰/۱۲ ns				
حجم ریشه Root volume	۰/۴۹ **	۰/۴۶ **	۰/۴۷ **	۰/۵۰ **	-۰/۰۷ ns			
بهره‌وری آب آبیاری Irrigation water productivity	-۰/۵۱ **	-۰/۴۸ **	-۰/۳۹ *	-۰/۳۸ *	۰/۵۱ **	-۰/۵۰ **		
عملکرد دانه Grain yield	۰/۵۰ **	۰/۴۶ **	۰/۵۰ **	۰/۴۷ **	۰/۳۷ *	۰/۰۹ ns	۰/۳۹ *	

ns، * و ** به ترتیب نشان دهنده عدم معنی‌داری و اثر معنی‌دار در سطح ۱٪ و ۵٪ می باشند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از همکاری‌های ایستگاه تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی زرقان، تکنسین بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، آقای رحمان زمانی و همچنین دانشجویان معرفی شده از سوی بنیاد ملی نخبگان، خانم زهرا جهاندیده، آقای بهنام داوودنیا، آقای عارف نوروزی و خانم آزاده احمدی نهایت تشکر و قدردانی را می‌نمایند.

منابع مورد استفاده

Abbasi F, Sohrab F and Abbasi N, 2016. Evaluation of irrigation efficiencies in Iran. Irrigation and Drainage Structures Engineering Research, 17(67): 113-120, doi.org/10.22092/aridse.2017.109617 (In Persian with English abstract).

AI-Asadi RA, Nayyef HR and Hameed HS, 2023. Study of the effect of drainage and the distance between drippers on soil construction. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1225(1): 012003, doi.org/10.1088/1755-1315/1225/1/012003.

Anonymous, 2023. Agricultural Statistics, Volume 1: Crops of the 2021-2022 cropping year, Iran. Information and Communication Technology Center, Ministry of Agricultural Jihad, 95 pages (In Persian).

Banik B, Korav S, Guin A and Unjia D, 2024. Impact of drip irrigation on crop growth, yield, water productivity, and weed dynamics: A Review. International Journal of Environment and Climate Change, 14(4): 739-749, doi.org/10.9734/IJECC/2024/v14i44154.

Chen R, Xiong XP and Cheng WH, 2021. Root characteristics of spring wheat under drip irrigation and their relationship with aboveground biomass and yield. Scientific Reports, 11(1): 4913, doi.org/10.1038/s41598-021-84208-7.

Chen R., Cheng WH, Cui J, Liao J, Fan H and Zheng Z, 2015. Lateral spacing in drip-irrigated wheat: the effects on soil moisture, yield, and water use efficiency. Field Crops Research, 179: 52-62, doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.021. 10.1016/j.fcr.2015.03.021.

Chouhan SS, Awasthi MK, Nema RK and Koshta LD, 2015. Effect of dripper spacing on yield and water productivity of wheat under drip irrigation. Research on Crops, 16(3): 456-464, doi.org/10.5958/2348-7542.2015.00063.7.

Delavarpour A, Zakirinia M and Hessam M, 2019. Effect of different intervals tape of drip irrigation on wheat yield and water use efficiency. Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 6(12): 1563-1573 (In Persian with English abstract).

Farzamnia M and Miranzadeh M, 2022. Optimal tape spacing and water use efficiency for wheat crop on silty clay loam soil texture. Journal of Water and Soil Science, 26(4): 119-136, doi.org/10.47176/jwss.26.4.14832 (In Persian with English abstract).

Firouzabadi AG, Baghani J, Jovzi M and Albaji M. 2021. Effects of wheat row spacing layout and drip tape spacing on yield and water productivity in sandy clay loam soil in a semi-arid region. Agricultural Water Management, 251: 106868, doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106868.

Lamm FR, 2002. Advantages and disadvantages of subsurface drip irrigation. International Meeting on Advances in Drip/Micro Irrigation, Puerto da La Cruz, Tenerife, Canary Islands, December 2-5, 2002, (pp. 1-13).

Li J, Zhang Z, Liu Y, Yao C, Song W, Xu X, Zhang M, Zhou X, GaoY, Wang Z, Sun Z and Zhang Y, 2019. Effects of micro-sprinkling with different irrigation amount on grain yield and water use efficiency of winter wheat in the North China Plain. Agricultural Water Management, 224: 105736, doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105736.

Li Q, Dong B, Qiao Y, Liu M, Zhang J, 2010. Root growth, available soil water, and water-use efficiency of winter wheat under different irrigation regimes applied at different growth stages in North China. Agriculture Water Management, 97:1676-1682, doi.org/10.1016/j.agwat.2010.05.025.

Lopes MS, Reynolds MP, 2010. Partitioning of assimilates to deeper roots is associated with cooler canopies and increased yield under drought in wheat. Functional Plant Biology, 37: 147-156, doi.org/10.1071/FP09121.

Lv Z, Diao M, Li W, Cai J, Zhou Q, Wang X, Dai T, Cao W and Jiang D, 2019. Impacts of lateral spacing on the spatial variations in water use and grain yield of spring wheat plants within different rows in the drip irrigation system. Agricultural Water Management, 212: 252-261, doi.org/10.1016/j.agwat.2018.09.015.

Payero JO, Tarkalson DD, Irmak S, Davison D, Petersen JL, 2008. Effect of irrigation amounts applied with subsurface drip irrigation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency, and dry matter production in a semiarid climate. Agriculture Water Management, 95: 895-908.

Rao KVR, Bajpai A, Gangwar S, Chourasia L and Soni K, 2016. Maximizing water productivity of wheat crop by adopting drip irrigation. Research on Crops, 17(1): 163-168, doi.org/10.5958/2348-7542.2016.00029.2.

Shafiei-Rad S, 2010. The effect of surface drip space and emitter space on wheat yield in surface drip irrigation. MSc thesis, Islamic Azad University, Marvdasht Branch (In Persian with English abstract).

Suradkar NS, Parlawar, ND, Kakade SU, Deshmukh MR and Sarode SS, 2020. Response of drip fertigation and its interval on nutrient uptake, nutrient use efficiency, water use efficiency and yield of wheat (*Triticum aestivum L.*). International Journal of Chemical Studies, 8(5): 1268-1272, doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i5r.10476.

Tahmasebi S, Dastfal M, Zali H and Rajaee M, 2018. Drought tolerance evaluation of bread cultivars and promising lines in warm and dry climate of the south. Cereal Research, 8 (2): 209-225, doi.org/10.22124/c.2018.10434.1398 (In Persian with English abstract).

Turknejad A, Aghaeie-Sarbarzeh M, Jafari H, Shirvani AR, Rouintan R, Nemati A and Shahbazi Kh, 2006. Study and economic evaluation of drip (tape) irrigation method on wheat compared to surface irrigation in water limited areas. Agricultural and Food Sciences, Economics Pajouhesh and Sazandegi, 72: 36-44 (In Persian with English abstract).

Yan W and Kang MS, 2002. GGE biplot analysis: A Graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists (1st ed.), 288 pages. CRC Press, doi.org/10.1201/9781420040371.

Zain M, Si Z, Chen J, Mehmood F, Rahman SU, Shah AN, Li S, Gao Y and Duan A, 2021. Suitable nitrogen application mode and lateral spacing for drip-irrigated winter wheat in North China Plain. Plos One 16(11): e0260008, doi.org/10.1371/journal.pone.0260008.