



Investigating the Effect of Different Levels of Conventional Deficit Irrigation Compared to Partial Root Drying Technique on Yield and Water Use Efficiency in Potato

Mahdi Malekpour¹ | Farhad Mirzaei² | Masood Parsi Nejad³

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: mahdi.malekpour@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: fmirzaei@ut.ac.ir
3. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: parsinejad@ut.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received 16 January 2025 Received in revised form 14 May 2025 Accepted 26 June 2025 Published online 11 October 2025 Keywords: Deficit Drip Irrigation Partial Productivity	The increasing demand for water due to population growth and climate change has caused a decrease in agricultural water resources in areas that are facing water shortages. Therefore, a field experiment was conducted in an arid region of Iran (Medicinal research center of Islamic Azad University of Shahr-e-Qods branch) to evaluate the effects of two irrigation systems [conventional drip irrigation (DI) and partial root drying (PRD)] and three irrigation levels [100%, 75%, and 55% of crop evapotranspiration (I_{100}, I_{75}, and I_{55}, respectively)] on the growth traits, tuber yield, and water productivity (WP) of potato (<i>Solanum tuberosum</i> L.) during the 2023 and 2024 growing seasons. Soil moisture (θ_v) was lower under the DI system than under the PRD system. The fresh and dry tuber yields were higher under the PRD system than under the DI system. By contrast, WP was highest with the I_{55} treatment (6.60 and 7.55 kg m⁻³) and lowest with the I_{100} treatment (5.53 and 6.23 kg m⁻³) under the DI and PRD systems, respectively. These findings indicate that full irrigation (I_{100}) with the PRD system maximizes potato yield but decreases water productivity, whereas integration of the PRD system with deficit irrigation is effective in improving water productivity due to less water being consumed, allowing these practices to be used under scarce water conditions

Cite this article: Malekpour, M., Mirzaei, F., & Parsi Nejad, M. (2025). Investigating the Effect of Different Levels of Conventional Deficit Irrigation Compared to Partial Root Drying Technique on Yield and Water Use Efficiency in Potato. *Journal of Water and Irrigation Management*, 15 (2), 411-430. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.385011.1204>





بررسی تأثیر سطوح مختلف کم آبیاری متعارف در مقایسه با آبیاری بخشی ریشه بر عملکرد و بهره‌وری آب در سیب‌زمینی

مهدی ملک‌پور^۱ | فرهاد میرزایی^۲ | مسعود پارسی‌نژاد^۳

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: mahdi.malekpour@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: fmirzaei@ut.ac.ir

۳. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: parsinejad@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	تغییرات آب‌وهوایی و افزایش جمعیت و به‌دنبال آن نیاز به غذا و محصولات کشاورزی بیش‌تر، موجب تقاضای بیش‌تر آب در بخش کشاورزی شده است. یکی از راه‌کارهای مدیریتی برای غلبه بر این مشکل، کم‌آبیاری کنترل‌شده با توجه به عملکرد اقتصادی و معقول است. آبیاری قطره‌ای سطحی و آبیاری بخشی ریشه از جمله این راه‌کارها محسوب می‌شود. لذا، یک طرح تحقیقاتی در یک منطقه نیمه‌خشک ایران (مزرعه تحقیقات گیاهان داروئی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر قدس) برای ارزیابی اثرات دو سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی متعارف و روش آبیاری بخشی ریشه و سه سطح آبیاری (۱۰۰ درصد نیاز آبی I_{100} ، ۷۵ درصد نیاز آبی I_{75} و ۵۵ درصد نیاز آبی I_{55}) بر ویژگی‌های رشد، عملکرد و بهره‌وری آب آبیاری در دو سال زراعی ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ انجام شد. نتایج نشان داد رطوبت خاک در سیستم آبیاری قطره‌ای نسبت به روش آبیاری بخشی ریشه کم‌تر بود. عملکرد تر و خشک سیب‌زمینی در روش آبیاری بخشی ریشه نسبت به سیستم آبیاری قطره‌ای بالاتر بود. در مقابل راندمان مصرف آب آبیاری در تیمار I_{55} بیش‌ترین مقدار (۶/۶۰ و ۷/۵۵ کیلوگرم بر مترمکعب) و در تیمار I_{100} کم‌ترین مقدار (۵/۵۳ و ۶/۲۳ کیلوگرم بر مترمکعب) را به‌ترتیب در سیستم آبیاری قطره‌ای و روش آبیاری بخشی ریشه داشت. این نتایج نشان می‌دهد که با آبیاری کامل (I_{100}) و روش آبیاری بخشی ریشه حداکثر عملکرد سیب‌زمینی حاصل شده اما راندمان مصرف آب آبیاری کاهش می‌یابد، درحالی‌که ادغام روش آبیاری بخشی ریشه با کم‌آبیاری به‌دلیل مصرف آب کم‌تر در بهره‌وری آب موثر بوده و اجازه می‌دهد از این شیوه‌ها در شرایط کم‌آبی استفاده شود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۷	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۴	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۵	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۱۹	
کلیدواژه‌ها:	
آبیاری	
بخشی	
بهره‌وری	
ریشه	
قطره‌ای	
کم‌آبیاری	

استناد: ملک‌پور، مهدی؛ میرزایی، فرهاد و پارسی‌نژاد، مسعود (۱۴۰۴). بررسی تأثیر سطوح مختلف کم‌آبیاری متعارف در مقایسه با آبیاری بخشی ریشه بر عملکرد و بهره‌وری آب در سیب‌زمینی. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۵ (۲)، ۴۱۱-۴۳۰. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.385011.1204>



۱. مقدمه

بیش از ۴۰ درصد تولید جهانی غذا از اراضی آبی حاصل می‌شود و بخش کشاورزی با استفاده از ۷۰ درصد از منابع آب شیرین موجود بیش‌ترین مصرف آب را دارد (Mancosu *et al.*, 2015). با پیش‌بینی هشت میلیارد نفری که تا سال ۲۰۲۵ نیاز به تغذیه دارند امنیت غذایی تنها در صورتی تضمین می‌شود که سطح اراضی آبی و عملکرد محصول به‌ترتیب بیش از ۲۰ و ۴۰ درصد افزایش یابد (Lascano and Sojka, 2007). بنابراین بهره‌وری مصرف آب باید با حداقل ورودی آب به اراضی کشاورزی حداکثر شود. بهبود مدیریت آب کشاورزی روش مناسبی برای دستیابی به این هدف است، زیرا علاوه بر حفظ منابع آب انرژی و خاک اجازه می‌دهد نیازهای رو به رشد برای محصولات و گیاهان زراعی برآورده شود (Unver *et al.*, 2017). سیستم‌های آبیاری غرقابی اغلب با تلفات زیاد آب و راندمان پایین آبیاری و همچنین شرایط نامطلوب شوری و زهکشی خاک همراه هستند که این مسئله سبب استفاده روزافزون سیستم‌های آبیاری قطره‌ای شده است. آبیاری قطره‌ای، نیاز آبی عمده محصولات زراعی را با توزیع یکنواخت و مکرر آب با استفاده از قطره‌چکان‌های کم فشار تأمین و برای انواع مختلف خاک و شرایط توپوگرافی مناسب است (Liu *et al.*, 2017). سایر روش‌های مدیریت آب، شامل کم‌آبیاری است که به اراضی کشاورزی بزرگ اجازه می‌دهد تحت منابع آبی محدود آبیاری شوند. این روش به‌شدت بر برنامه‌ریزی آبیاری تأثیر می‌گذارد، زیرا گیاهان زراعی در مراحل مختلف رشد خود به طرق مختلف به تنش آبی پاسخ می‌دهند. نکته قابل توجه در هنگام اعمال کم‌آبیاری، زمان و میزان تنش آبی، تبخیر و تعرق محصول (ET_c) و پاسخ گیاه به تنش آبی می‌باشد. در سیستم کم‌آبیاری قطره‌ای، گیاهان ریشه‌های عمیقی ایجاد می‌کنند که به آن‌ها اجازه می‌دهد به آب خاک برسند، که سبب صرفه‌جویی قابل توجهی در آب آبیاری بدون کاهش عملکرد محصول می‌شود. به عبارتی، کارایی مصرف آب آبیاری^۱ افزایش و در نهایت سود کشاورزان افزایش می‌یابد (Chai *et al.*, 2016). این هدف (افزایش IWUE) یا با کاهش کفایت آبیاری و یا با حذف آبیاری‌های با تأثیر کم‌تر (آبیاری در مراحل غیرحساس گیاه به تنش آبی) حاصل می‌شود. روش‌های کم‌آبیاری به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند که شامل کم‌آبیاری سنتی^۲ (با افزایش فاصله بین آبیاری‌ها و یا تغییر عمق آب آبیاری)، کم‌آبیاری تنظیم‌شده^۳ (کم‌آبیاری در مراحل غیرحساس رشد) و آبیاری بخشی ریشه^۴ (فرم اصلاح‌شده کم‌آبیاری) می‌باشد. تکنیک آبیاری بخشی ریشه (PRD) ناحیه ریشه گیاه را به دو قسمت تقسیم می‌کند. در این روش یک نیمه از سیستم ریشه آبیاری می‌شود درحالی‌که نیمه دیگر آن را خشک می‌باشد و قسمت خشک سیستم ریشه در آبیاری بعدی آبیاری می‌شود، درحالی‌که در قسمت آبیاری‌شده قبلی آبیاری صورت نمی‌گیرد (English *et al.*, 1990). روش‌های کم‌آبیاری مانند روش آبیاری بخشی ریشه از طریق تنظیم اسمزی تحمل به خشکی گیاه را افزایش می‌دهد (English *et al.*, 1990). برخی پژوهش‌ها نشان داده است که روش آبیاری بخشی ریشه از سیستم آبیاری قطره‌ای عملکرد بهتری داشته و ثابت شده است که بهره‌وری محصول و تحمل به خشکی هر دو با تولید آنتی‌اکسیدان‌ها و تنظیم اسمزی در روش آبیاری بخشی ریشه افزایش می‌یابد (Raza *et al.*, 2017). تکنیک‌های صرفه‌جویی در آب آبیاری مانند سیستم آبیاری قطره‌ای و روش آبیاری بخشی ریشه نیازهای آبیاری کشاورزی را بدون کاهش قابل توجه بهره‌وری کاهش می‌دهد (Ahmadi *et al.*, 2014). فرایند خیس و خشک‌شدن متناوب در روش آبیاری بخشی ریشه منجر به بسته‌شدن نسبی روزنه‌ها می‌شود که سبب کاهش تلفات آب توسط تعرق و در عین حال دی‌اکسیدکربن کافی را برای فتوسنتز و رشد گیاه فراهم می‌کند (Iqbal *et al.*, 2019). مشخص شده است که کم‌آبیاری باعث رشد گیاه و افزایش راندمان مصرف آب آبیاری برای انواع محصولات در کشورهای مختلف می‌شود. به‌عنوان مثال، زمانی که تنش آبی در مراحل حساس به خشکی ایجاد شود، سبب افزایش راندمان مصرف آب آبیاری محصولات بدون کاهش عملکرد آن‌ها می‌شود (Geerts and Raes, 2009). درحالی‌که در پژوهشی روی گوجه‌فرنگی در جنوب ایالات

میشیگان مشخص شد، تا زمانی که رطوبت آب خاک در زمان نشا کافی باشد، می‌توان با عدم آبیاری در چند هفته اول پس از نشا عملکرد را افزایش داد (Ngouajio *et al.*, 2007). به‌طور مشابه اعمال کم‌آبیاری در اقلیم‌های خشک ایالات متحده سبب کاهش متوسط عملکرد خربزه (*Cucumis melo* L.) شد (Sharma *et al.*, 2014)، اما کاهش کیفیت میوه مشاهده نشد. مولر و همکاران (۲۰۱۶) گزارش کردند که پتانسیل ماتریک بهینه خاک در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی (DI) برای بادمجان (*Solanum melongena* L.) در بورکینافاسو در مراحل اولیه رشد و میوه‌دهی به‌ترتیب ۱۵- و ۴۰- کیلوپاسکال بود. پژوهش‌ها نشان داد که فلفل دلمه‌ای (*Capsicum annum* L.) در اردن بیش‌ترین عملکرد را در آبیاری با ۸۰ درصد نیاز آبی دارد و تفاوت معنی‌داری در راندمان مصرف آب آبیاری بین ۸۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی وجود نداشت (Shammout *et al.*, 2018)، درحالی‌که آبیاری با ۷۰ درصد نیاز آبی، عملکرد، کیفیت میوه و راندمان مصرف آب آبیاری را در گوجه‌فرنگی در مقایسه با ۱۰۰ درصد نیاز آبی در عربستان سعودی افزایش داد (Mattar *et al.*, 2020).

سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) یکی از محصولات مهم اقتصادی در سطح جهان است که از نظر ارزش غذایی در رتبه چهارم جهان قرار دارد (Fabeiro *et al.*, 2001). با این‌حال، به شرایط خشکی حساس و مدیریت آن دشوار می‌باشد (Nagaz *et al.*, 2016). آبیاری قطره‌ای می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی رشد سیب‌زمینی را در اقلیم‌های خشک بهبود بخشد (Erdem *et al.*, 2006; Zin El-Abedient *et al.*, 2017) و چندین مطالعه واکنش محصول سیب‌زمینی به کم‌آبیاری را برای افزایش بیش‌تر راندمان مصرف آب آبیاری مورد ارزیابی قرار داده‌اند. از این میان شاه‌نظری و همکاران (۲۰۰۷) نشان دادند که تفاوت معنی‌داری در عملکرد سیب‌زمینی در شرایط کم‌آبیاری و آبیاری کامل وجود ندارد، اما راندمان مصرف آب آبیاری در شرایط کم‌آبیاری ۱/۶ برابر بیش‌تر بود (تقریباً ۳۰ درصد صرفه‌جویی در آب)، درحالی‌که صرفه‌جویی در آب آبیاری به میزان ۳۸ درصد می‌تواند بدون تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد سیب‌زمینی انجام شود (Jovanovic *et al.*, 2010). در پژوهشی روی سیب‌زمینی، تیمار ۷۰ درصد نیاز آبی بهترین عملکرد و راندمان مصرف آب آبیاری و تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی بیش‌ترین مقدار راندمان مصرف آب آبیاری را داشت (Nagaz *et al.*, 2016). در نهایت الهانی و همکاران (۲۰۱۹) گزارش دادند کم‌آبیاری رشد رویشی کیفیت سیب‌زمینی و راندمان مصرف آب آبیاری را در شرایط گلخانه‌ای در مقایسه با آبیاری کامل افزایش داد.

اهداف این مطالعه ۱- بررسی اثرات سطوح مختلف آب، بر وضعیت آب خاک تحت سیستم آبیاری قطره‌ای و روش آبیاری بخشی ریشه و ۲- ارزیابی عملکرد سیستم آبیاری قطره‌ای و روش آبیاری بخشی ریشه با کم‌آبیاری از نظر رشد رویشی، عملکرد و راندمان مصرف آب آبیاری در سیب‌زمینی بود.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

آزمایش‌های صحرایی در مزرعه تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر قدس (۳۵/۶۸۹۲ درجه شمالی و ۵۱/۱۱۳۳ درجه شرقی) واقع در غرب استان تهران، در طول فصول رشد سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ (بهمن‌ماه تا خردادماه) انجام شد. یک ایستگاه هواشناسی در نزدیکی مزرعه آزمایشی برای پایش و ثبت داده‌های هواشناسی نصب شد. منطقه دارای آب‌وهوای خشک و تابستان‌های گرم و خشک است. در فصول رشد سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ میانگین دمای هوا ۲۱/۸۵ و ۲۰/۹۳ درجه سانتی‌گراد، میانگین رطوبت نسبی ۳۵/۲ و ۳۸/۷۳ درصد و کل بارندگی به‌ترتیب ۹ و ۱۱/۵ میلی‌متر بوده است (شکل ۱). تبخیر و تعرق مرجع (ET_0) داده‌های ثبت‌شده هواشناسی با استفاده از معادله پنمن مانیتث فائو (Allen *et al.*, 1998) و از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$ET_0 = \frac{0/408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0/34u_2)} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع - دما در دمای میانگین (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد)، R_n تشعشع خالص (مگاژول بر مترمربع بر روز)، T میانگین دمای هوا در ارتفاع ۲ متری (درجه سانتی‌گراد)، u_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری متر بر ثانیه، γ ثابت سایکرومتریک (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد)، G شار گرمای زمین (مگاژول بر مترمربع بر روز) و e_s و e_a به ترتیب فشار بخار اشباع و فشار بخار واقعی (کیلوپاسکال) می‌باشد. تبخیر و تعرق مرجع بین ۳/۱ و ۸/۷ میلی‌متر در روز در طول فصل رشد ۱۴۰۱ و بین ۳/۱ و ۷/۵ میلی‌متر در روز در طول فصل رشد ۱۴۰۲ بود (شکل ۱).

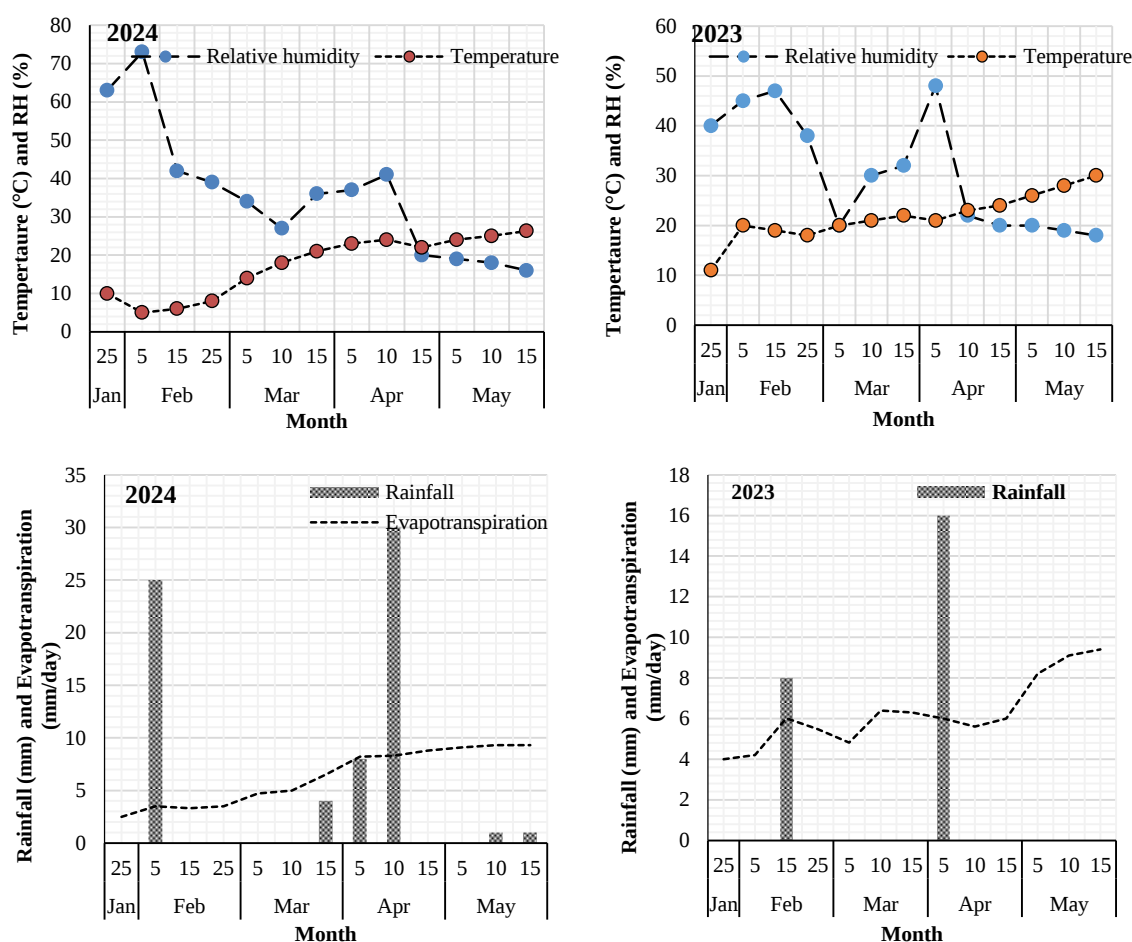


Figure 1. Ten-day averages of temperature, relative humidity, reference evapotranspiration, and precipitation during the 2023 and 2024 growing seasons

قبل از شروع آزمایش نمونه‌های خاک تا عمق ۶۰ سانتی‌متری جمع‌آوری و ویژگی‌های فیزیکی خاک در عمق‌های ۲۰ سانتی‌متری ثبت شد (جدول ۱). مطابق این جدول خاک مزرعه دارای بافت لومی شنی با میانگین چگالی ظاهری ۱/۵۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب و محتوای آب خاک ۱۳۳/۸ میلی‌متر در حد ظرفیت زراعی (FC) و ۷۵/۸ میلی‌متر در نقطه پژمردگی دائم (PWP) است، که بیانگر ۵۸ میلی‌متر آب در پروفیل خاک می‌باشد. برای اندازه‌گیری این حدود از دستگاه صفحات فشاری استفاده شد (Klute, 1986) که نتایج آن در جدول (۱) نشان داده شده است.

Table 1. Soil physical properties at the experimental site

Depth (cm)	Particle size (%)			Soil texture	FC (%)	PWP (%)	K_s (mm/hr)	ρ_b (kg/m ³)
	Clay	Silt	Sand					
0-20	10.2	21.5	68.3	Sandy loam	20.3	10.7	34.5	1.55
20-40	14.2	18.1	67.6	Sandy loam	22.2	12.3	22.4	1.55
40-60	13.1	18.3	68.6	Sandy loam	24.4	14.9	16.1	1.55

FC, PWP, K_s and ρ_b are Field capacity, Permanent Wilting Point, saturated hydraulic conductivity and bulk density, respectively.

۲.۲. طرح آزمایش

آزمایش با استفاده از طرح بلوک‌های کامل تصادفی با شش تیمار (دو روش آبیاری و سه سطح آبیاری) و سه تکرار در هر تیمار انجام شد. سیستم آبیاری قطره‌ای و روش آبیاری بخشی ریشه در سطح بلوک و سه سطح آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی (I_{100})، ۷۵ درصد نیاز آبی (I_{75}) و ۵۵ درصد نیاز آبی (I_{55}) به ترتیب اعمال شدند. منطقه آزمایش به سه مزرعه (یکی برای هر تکرار) تقسیم که با فواصل ۲ متری از یکدیگر جدا شدند (شکل ۲).

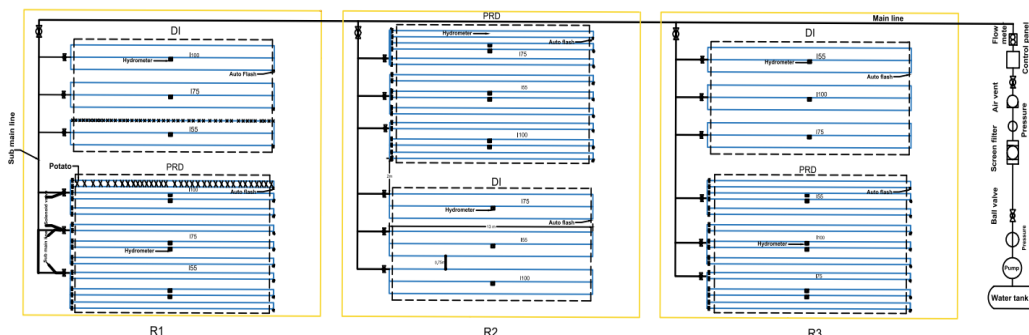


Figure 2. Schematic diagram of the experimental fields. DI surface drip irrigation, PRD Partial Root Drying technique, I_{100} 100% of crop evapotranspiration (ETc), I_{75} 75% ETc, I_{55} 55% ETc

آماده‌سازی مقدماتی مزرعه برای بستر بذر سیب‌زمینی شامل شخم و تسطیح بود. خاک مزرعه به فواصل ۷۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر برای ایجاد شیارها پشته‌بندی و در ادامه سیستم آبیاری قطره‌ای و روش آبیاری بخشی ریشه راه‌اندازی شد. سیستم شامل مخزن آب، واحد تنظیم‌کننده فشار، واحد کوددهی، فیلتر توری، شیر تخلیه هوا، دی‌سنج، شیرهای دستی و برقی و شیر شست‌وشو بود (شکل ۲). خطوط اصلی در زیر سطح خاک و خطوط نیمه اصلی روی سطح خاک قرار گرفتند. خطوط لاترال شامل قطره‌چکان‌های روی خط با دبی ۸ لیتر در ساعت و فشار کاری ۱۰۰ کیلوپاسکال بود که در سیستم آبیاری قطره‌ای روی سطح زمین و در روش آبیاری بخشی ریشه روی سطح زمین و دو طرف غده قرار گرفتند. فاصله لاترال‌ها از یکدیگر ۷۰ سانتی‌متر و فواصل بین قطره‌چکان‌ها ۵۰ سانتی‌متر بود. در این مطالعه سیستم‌های آبیاری به صورت اتوماتیک کنترل شدند.

هر مزرعه شامل دو بلوک بود که هر کدام به سه کرت مساوی تقسیم و فاصله بین کرت‌ها جهت جلوگیری از نشت جانبی ناشی از تیمار آبیاری شده به کرت‌های مجاور ۰/۷۵ متر در نظر گرفته شد. نیاز آبی گیاه (میلی‌متر بر روز) در سطوح مختلف آبیاری (I_{100} ، I_{70} و I_{50}) و در بلوک‌های سیستم آبیاری قطره‌ای و روش آبیاری بخشی ریشه به صورت روزانه براساس رابطه (۲) محاسبه شد (Allen et al., 1998).

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن، K_c ضریب گیاهی در هر مرحله رشد گیاه است.

طول مراحل رشد، ضریب گیاهی و مقدار کل آب مصرفی برای هر تیمار در طول فصول رشد ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ در

جدول (۲) ارائه شده است. تا ۳۰ روز بعد از کاشت کم‌آبیاری اعمال نشد و تمام تیمارها به اندازه یکسان (I_{100}) در دو سیستم آبیاری قطره‌ای و روش آبیاری بخشی ریشه آبیاری شدند.

Table 2. Dates and crop-coefficient (K_c) values for each potato growth stage and the total irrigation water applied during the study period

Growth stage	Date		Irrigation water ³ (mm)						$(K_c)_{adj}^2$	K_c^1
	(number of days at that stage)		1401			1402				
	2023	2024	I ₁₀₀	I ₇₅	I ₅₅	I ₁₀₀	I ₇₅	I ₅₅		
Planting	28 January	25 January								
Initial stage (until the beginning of stem elongation)	21 February (25)	18 February (25)	18	18	18	17	17	17	0.20	0.50
Growth and development stage (until tuber formation)	25 March (33)	22 March (33)	123	92	71	122	91	71		
Intermediate stage (until tuber enlargement)	24 April (30)	27 April (30)	226	169	130	225	167	131	1.25	1.15
Final stage (maturity)	24 May (30)	20 May (30)	235	175	136	234	174	136	0.87	0.75
Total	(118)	(118)	602	454	355	598	448	354		

I_{100} 100% of crop evapotranspiration (ETc), I_{75} 75% ETc, I_{55} 55% ETc

1. Extracted from FAO-56 table (Allen *et al.*, 1988)

2. Adjusted from the FAO-56 (Allen *et al.* 1998) based on the percentage of soil surface wetted, wind speed at 2-m height and minimum relative humidity

3. Irrigation plus rainfall

غده‌های سیب‌زمینی رقم خاوران به‌صورت دستی با تراکم پنج بوته در مترمربع در ۷ بهمن‌ماه ۱۴۰۱ و ۴ بهمن‌ماه ۱۴۰۲ کاشته شدند. ترکیبی با غلظت یکسان به تمام کرت‌ها از طریق سیستم‌های آبیاری براساس برنامه زمان‌بندی‌شده به‌صورت هفت روز بعد از کاشت شامل $N-P_2O_5-K_2O$ (۲۰:۲۰:۲۰) به‌ترتیب در مقادیر ۱۸۰، ۲۵۰ و ۲۷۰ کیلوگرم در هکتار و ۳۷، ۶۸ و ۸۸ روز بعد از کاشت شامل $N-P_2O_5-K_2O$ (۱۰:۱۰:۴۳) به‌ترتیب در مقادیر ۱۵۰، ۲۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار اعمال شد. غده‌های سیب‌زمینی در ۳ خردادماه ۱۴۰۱ و ۳۱ اردیبهشت‌ماه ۱۴۰۲ برداشت شدند.

۳.۲. اندازه‌گیری آب خاک

رطوبت حجمی آب خاک (θ_v) در فواصل ۱۰ سانتی‌متری تا عمق ۵۰ سانتی‌متری با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج (EnviroSCAN) شرکت Sentek ساخت (استرالیا) اندازه‌گیری شد. این دستگاه ابتدا با روش Sentek (2001) و Jabro *et al.* (2005) در شرایط مزرعه کالیبره و در ادامه به‌صورت مستمر مقدار رطوبت حجمی در اعماق ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ سانتی‌متری اندازه‌گیری شد.

۴.۲. اندازه‌گیری‌های زراعی

در هر فصل رشد، ۹۰ روز بعد از کاشت سه گیاه به‌طور تصادفی از هر کرت (تیمار) انتخاب و برای تجزیه و تحلیل وزن تر قسمت‌های رویشی (برگ و ساقه)، ارتفاع بوته، تعداد شاخه و شاخص سطح برگ (LAI) با استفاده از دستگاه LI-3100، اندازه‌گیری شد. در ادامه، نمونه‌های جمع‌آوری‌شده در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۴۸ ساعت (Ahmadi *et al.*, 2014) در آون برای تعیین وزن خشک قرار گرفتند. سطح برداشت سیب‌زمینی در هر تیمار آزمایشی شامل سه ردیف کشت و هر ردیف به طول ۱۳ متر صورت گرفت. پس از برداشت، عملکرد کل سیب‌زمینی تازه، وزن تر، میانگین وزن و تعداد سیب‌زمینی در هر بوته اندازه‌گیری شد. سپس سیب‌زمینی‌ها به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد در آون خشک (Liu *et al.*, 2006) گردید و پس از خارج‌کردن از آون توزین شدند.

۵.۲. راندمان مصرف آب آبیاری و ضریب واکنش عملکرد

راندمان مصرف آب آبیاری (IWUE) از تقسیم وزن کل سیب‌زمینی تازه بر مقدار کل آب مصرفی (آبیاری به‌علاوه

بارندگی) در طول هر فصل رشد محاسبه و ضریب واکنش عملکرد (K_y) سیبزمینی تازه از رابطه (۳) محاسبه شد (Doorenbos and Kasam, 1979).

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_x}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_x}\right) \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن، Y_a عملکرد سیبزمینی (تن بر هکتار) به دست آمده از تیمار I_{75} یا I_{55} ، Y_x عملکرد سیبزمینی (تن بر هکتار) به دست آمده از تیمار I_{100} ، ET_a مقدار آب مصرفی (مترمکعب بر هکتار) در تیمار I_{75} یا I_{55} و ET_x مقدار آب مصرفی (مترمکعب بر هکتار) در تیمار I_{100} می باشد.

افزایش راندمان مصرف آب آبیاری در گیاهان در معرض تنش آبی، توسط فرایندهای فیزیولوژیکی که گردان CO₂ و H₂O بین برگ های گیاه و هوای اطراف برگ ها را کنترل می کنند، بیان می شود. غلظت بالای دی اکسید کربن در اطراف برگ ها در گیاهان تحت تنش آبی مفید است، زیرا بسته شدن جزئی روزنه، میزان تعرق را کاهش و فتوسنتز را افزایش می دهد، درحالی که تأثیر کمی در گیاهان با آبیاری کامل دارد. با این حال، تنش شدید آب ممکن است منجر به بسته شدن کامل روزنه و کاهش راندمان مصرف آب آبیاری و عملکرد غده سیبزمینی شود (Zin El-Abedin et al., 2019).

به طور مشابه، ضریب واکنش بیوماس (K_{SS}) از عملکرد بیوماس خشک (وزن سیبزمینی و بخش های رویشی) از رابطه (۴) محاسبه شد.

$$\left(1 - \frac{SS_a}{SS_x}\right) = K_{SS} \left(1 - \frac{ET_a}{ET_x}\right) \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن، SS_a و SS_x به ترتیب عملکرد بیوماس خشک (تن بر هکتار) در حالت کم آبیاری و آبیاری کامل می باشد. K_y و K_{SS} رابطه بین عملکرد نسبی و مصرف نسبی آب محصول را نشان می دهند. اگر K_y و K_{SS} بزرگ تر از یک باشند، یعنی محصول به تنش آبی بسیار حساس و اگر کوچک تر از یک باشند محصول نسبت به تنش آبی مقاوم و اگر این مقادیر برابر یک باشند یعنی کاهش عملکرد نسبی برابر با کاهش مصرف نسبی آب است. از آنجایی که مقدار K_y یک شاخص مهم برای حساسیت محصول به خشکی است ممکن است علاوه بر کمبود آب، تحت تأثیر عواملی مانند شرایط مدیریت خاک و آب شرایط اقلیمی طول فصل رشد و روش آبیاری قرار گیرد (Greaves and Wang 2017).

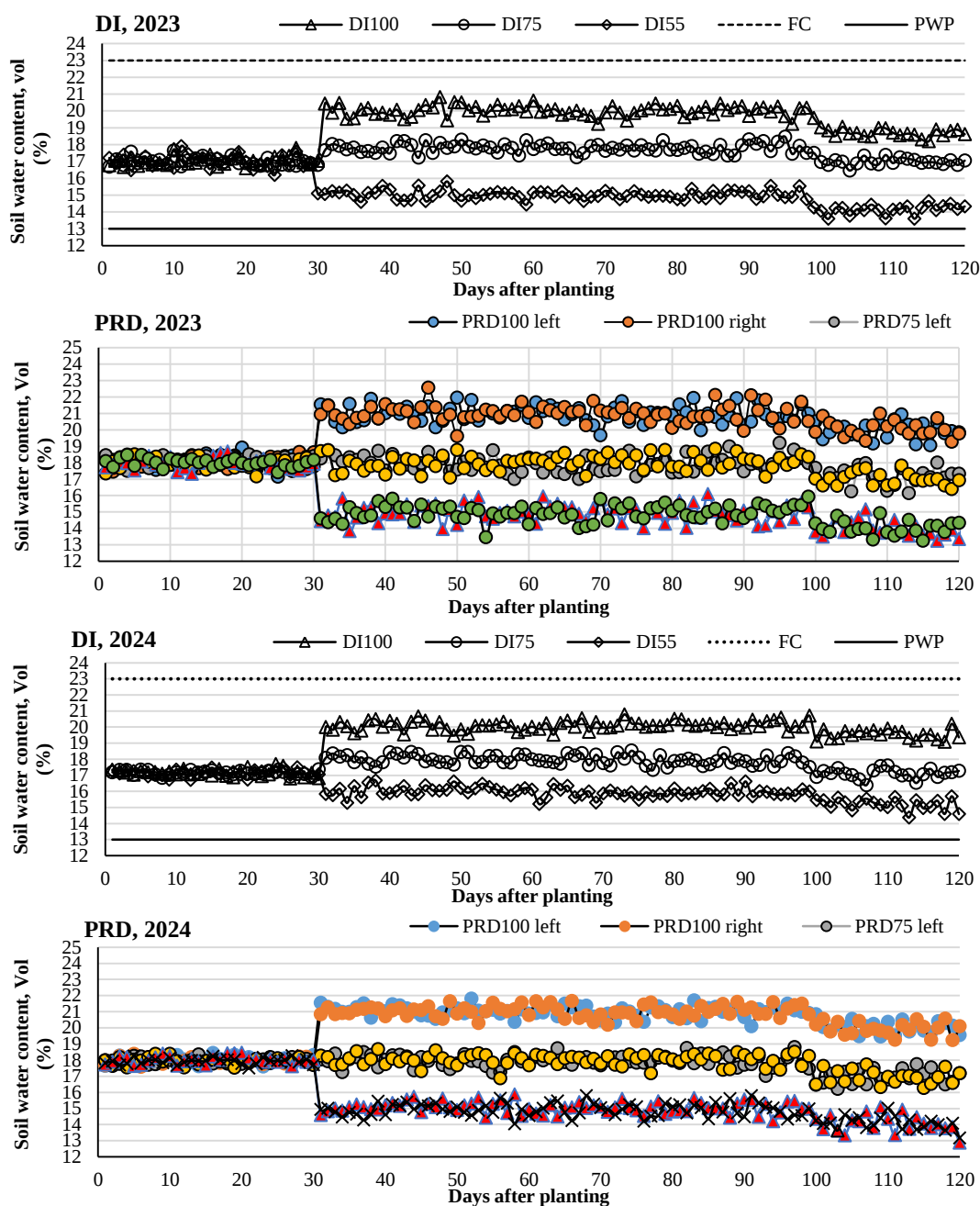
۲.۶. تجزیه و تحلیل آماری

تفاوت در صفات رشد رویشی، عملکرد سیبزمینی، اجزای عملکرد و راندمان مصرف آب آبیاری در بین تیمارها با استفاده از آنالیز واریانس دو طرفه (ANOVA) (سیستم آبیاری × سطح آبیاری) برای هر سال آزمایشی با سه تکرار در هر تیمار با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۲ مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت (IBM SPSS Inc., USA). علاوه بر این آنالیز واریانس سه طرفه (سال × سیستم آبیاری × سطح آبیاری) به منظور ارزیابی اهمیت آماری تغییرات سالانه انجام شد. مقایسه بین میانگین ها با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی داری (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد ($P \leq 0.05$) ارزیابی شد. داده ها به صورت میانگین $\pm$ خطای استاندارد (SE) از سه تکرار ارائه شده است. در نهایت، روابط بین عملکرد سیبزمینی تازه، تعداد و میانگین وزن زمینی در هر بوته با استفاده از تحلیل رگرسیون مورد بررسی قرار گرفت.

۳. نتایج

۳.۱. مقایسه رطوبت حجمی نیمرخ خاک در روش آبیاری قطره ای و آبیاری بخشی ریشه در سطوح مختلف

رطوبت خاک در دو سیستم آبیاری قطره ای و روش آبیاری بخشی ریشه در سه سطح آبیاری (I_{100} ، I_{75} و I_{55}) در اعماق مختلف (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ سانتی متر) در دو فصل زراعی ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ تعیین شد (شکل ۳).



Continued figure 3. Volumetric soil water content (%) of the average of five points at depths of 10, 20, 30, 40, and 50 cm under different irrigation systems and with different irrigation levels in the 2023 and 2024 growing seasons.

(DI drip irrigation, PRD partial root drying, I_{100} 100% of crop evapotranspiration (ETc), I_{75} 75% ETc, I_{55} 55% ETc, FC field capacity, PWP permanent wilting point)

در همه تیمارها هیچ تفاوتی در پروفیل رطوبتی خاک بین سطوح مختلف آبیاری تا ۳۰ روز بعد از کشت در هر دو فصل وجود نداشت، زیرا تا این تاریخ از مقدار آب آبیاری (۱۰۰ درصد نیاز آبی) استفاده شد. با این حال، میانگین مقادیر رطوبت حجمی خاک در روش آبیاری بخشی ریشه (به ترتیب ۱۸/۶۶ و ۱۸/۶۳ درصد برای سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲) نسبت به سیستم آبیاری قطره‌ای (به ترتیب ۱۶/۹۸ و ۱۷/۰۴ درصد برای سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲) بیش‌تر بود.

اعمال تیمارها، مقادیر رطوبت حجمی برای تیمار I_{100} بالای ۵۰ درصد آب موجود خاک باقی ماند (یعنی میانگین مقدار رطوبت حجمی بین نقطه ظرفیت زراعی و رطوبت حجمی ۱۸ درصد) و نزدیک به نقطه ظرفیت زراعی بود. این میزان به طور متوسط ۲۰/۱۴ و ۲۱/۳۹ درصد به ترتیب در سیستم آبیاری قطره‌ای و روش آبیاری بخشی ریشه، در هر دو فصل رشد بود. در مقابل، استفاده از تیمارهای کم‌آبیاری از روز ۳۱ به بعد، منجر کاهش رطوبت خاک در هر دو سیستم آبیاری به دلیل کاهش تدریجی میزان آب خاک تا پایان رشد گیاه هر دو فصل زراعی شد. درحالی‌که مقادیر رطوبت حجمی برای تیمار I_{75} به زیر ۵۰ درصد آب موجود در خاک در سیستم آبیاری قطره‌ای کاهش یافت (میانگین ۱۷/۳۹ و ۱۷/۳۵ درصد به ترتیب برای سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲)، این مقادیر در روش آبیاری بخشی ریشه اگرچه کم‌تر از مقادیر به دست آمده در تیمار I_{100} بود ولیکن بالای ۵۰ درصد آب خاک (رطوبت ۱۸ درصد) موجود باقی ماندند (میانگین ۱۸/۸۶ و ۱۸/۸۴ درصد به ترتیب برای سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲). مقادیر رطوبت حجمی برای تیمار I_{55} بین ۵۰ درصد از آب موجود خاک و نقطه پژمردگی دائم باقی ماند و کم‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده برای تیمارهای I_{100} و I_{75} بود. این مقادیر در سیستم آبیاری قطره‌ای از ۱۲/۹۱ تا ۱۶/۵۳ درصد در سال ۱۴۰۱ و ۱۲/۷۷ تا ۱۷/۲۱ درصد در سال ۱۴۰۲ و از ۱۴/۷۱ تا ۱۷/۷۴ درصد در سال ۱۴۰۱ تا ۱۴/۶۹ تا ۱۷/۹۲ درصد در سال ۱۴۰۲ در روش آبیاری بخشی ریشه متغیر بود.

۲.۳. بررسی صفات رویشی سیب‌زمینی در دو روش آبیاری و در سطوح مختلف آبیاری

نتایج نشان می‌دهد روش آبیاری به طور قابل توجهی بر وزن تر و خشک قسمت‌های رویشی گیاه اثر دارد، به طوری که در روش آبیاری بخشی ریشه در فصل زراعی ۱۴۰۱ به ترتیب ۲۹/۴۳ و ۴۴/۵۳ درصد وزن بیش‌تر و در فصل ۱۴۰۲ به ترتیب ۳۲/۸۱ و ۳۵ درصد وزن بیش‌تری نسبت به سیستم آبیاری قطره‌ای داشت. همچنین تفاوت قابل توجهی در وزن تر و خشک قسمت‌های رویشی بین فصول رشد وجود داشت. صرف نظر از سیستم آبیاری مورد استفاده، وزن تر و خشک قسمت‌های رویشی در تیمار I_{75} و I_{55} به طور قابل توجهی کم‌تر از تیمار I_{100} در هر دو فصل رشد بود. وزن تازه در تیمار I_{75} و I_{55} به ترتیب ۳۳/۱۹ و ۳۴/۴۵ درصد و وزن خشک به ترتیب ۲۹/۹۴ و ۳۴/۵۱ درصد نسبت به تیمار I_{100} کاهش یافت. تفاوت معنی‌داری بین سیستم آبیاری و سطح آبیاری در وزن تازه یا خشک قسمت‌های رویشی در هر دو فصل زراعی ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ وجود نداشت (جدول ۳).

Table 3. Fresh and dry weights of potato vegetative parts under different irrigation systems and irrigation levels during the 2023 and 2024 growing seasons

Factor	Vegetative parts fresh weight (ton/ha)			Vegetative parts dry weight (ton/ha)		
	2023 ^A	2024 ^B	Mean	2023 ^A	2024 ^B	Mean
Irrigation system						
DI	10.568 ^b	11.670 ^b	11.120 ^b	1.19 ^b	1.4 ^b	1.29 ^b
PRD	13.679 ^a	15.500 ^a	14.600 ^a	1.72 ^a	1.89 ^a	1.8 ^a
p-value	0.007 ^{***}	0.003 ^{**}	<0.001 ^{***}	0.006 ^{***}	0.009 ^{**}	<0.001 ^{***}
LSD 0.05	2.18	2.20	1.45	0.34	0.35	
Irrigation Level						
I_{100}	14.89 ^a	18.32 ^a	16.6 ^a	1.86 ^a	2.09 ^a	1.97 ^a
I_{75}	10.70 ^b	11.48 ^b	11.09 ^b	1.28 ^b	1.48 ^b	1.38 ^b
I_{55}	10.79 ^b	10.67 ^b	10.88 ^b	1.21 ^b	1.36 ^b	1.29 ^b
p-value	<0.004 ^{**}	<0.001 ^{***}	<0.001 ^{***}	0.014 [*]	<0.007 ^{**}	<0.001 ^{***}
LSD0.05	2.67	2.7	1.76	0.34	0.43	0.33
Irrigation system × Irrigation level						
DI						
I_{100}	13.18±0.04	16.14±0.06	14.66±1.62	1.54±0.09	1.90±0.02	1.72±0.21
I_{75}	8.79±0.27	9.64±0.09	9.21±0.49	0.98±0.02	1.08±0.1	1.03±0.08
I_{55}	9.72±0.45	9.24±0.13	9.48±0.40	1.00±0.13	1.21±0.05	1.13±0.21
PRD						
I_{100}	16.18±1.16	20.51±0.23	18.55±2.26	2.19±0.13	2.27±0.06	2.23±0.10
I_{75}	12.79±0.18	13.33±0.07	12.97±0.41	1.58±0.04	1.87±0.11	1.73±0.17
I_{55}	11.72±0.37	12.68±0.05	12.27±0.50	1.38±0.04	1.52±0.10	1.45±0.10
p-value	0.652 ^{ns}	0.987 ^{ns}	0.688 ^{ns}	0.637 ^{ns}	0.343 ^{ns}	0.425 ^{ns}
LSD0.05	--	--	--	--	--	--

Different lower-case letters within each column and different upper-case letters within the header row for planting season for each characteristic indicate significant differences at the 0.05 level. Values are presented as means (±SE)

تفاوت معنی‌داری در ارتفاع بوته بین تیمارها در فصل ۱۴۰۱ وجود نداشت (جدول ۴). با این حال، در سال ۱۴۰۲ گیاهان رشد یافته در روش آبیاری بخشی ریشه به‌طور قابل‌توجهی بلندتر از گیاهانی بودند که تحت سیستم آبیاری قطره‌ای رشد کردند ($P < 0.05$)، و گیاهانی که در تیمار I_{100} قرار گرفتند به‌طور قابل‌توجهی بلندتر از گیاهانی بودند که در معرض تیمارهای I_{55} و I_{75} آبیاری شدند ($P < 0.05$). بدون توجه به سیستم آبیاری مورد استفاده تفاوت قابل‌توجهی در ارتفاع گیاه بین تیمارهای I_{55} و I_{75} در سال ۱۴۰۱ وجود نداشت. در سال ۱۴۰۲، کوتاه‌ترین گیاهان با تیمار I_{75} در هر دو سیستم آبیاری قطره‌ای ($35/50$ سانتی‌متر) و روش آبیاری بخشی ریشه ($41/70$ سانتی‌متر) و بلندترین گیاهان در سیستم آبیاری قطره‌ای در تیمار I_{100} ($46/1$ سانتی‌متر) و در روش آبیاری بخشی ریشه در تیمار I_{55} ($43/4$ سانتی‌متر) به‌دست آمدند.

تفاوت معنی‌داری در تعداد شاخه در بوته در بین تیمارهای سطح آبیاری و سیستم آبیاری $\times$ سطح آبیاری در هر دو فصل وجود نداشت (جدول ۴). با این حال، گیاهانی که با روش آبیاری بخشی ریشه آبیاری می‌شوند بدون در نظر گرفتن سطح آبیاری به‌ترتیب $3/12$ و $3/00$ نسبت به گیاهان تیمار I_{100} ($3/53$) داشتند. در دو سیستم آبیاری قطره‌ای و روش آبیاری بخشی ریشه تیمارهای I_{55} و I_{75} دارای شاخص سطح برگ کم‌تری نسبت به تیمار I_{100} در هر دو فصل بودند (جدول ۴)، اما این تفاوت معنی‌دار نبود ($P > 0.05$).

در مقابل، سیستم آبیاری اثر قابل‌توجهی بر شاخص سطح برگ نداشت، اما گیاهان در تیمارهای I_{75} و I_{55} شاخص سطح برگ کم‌تری (به‌ترتیب $3/12$ و $3/00$) نسبت به گیاهان تیمار I_{100} ($3/53$) داشتند. در دو سیستم آبیاری قطره‌ای و روش آبیاری بخشی ریشه تیمارهای I_{55} و I_{75} دارای شاخص سطح برگ کم‌تری نسبت به تیمار I_{100} در هر دو فصل بودند (جدول ۴)، اما این تفاوت معنی‌دار نبود ($P > 0.05$).

Table 4. Physical characteristics of potato plants under different irrigation systems and irrigation levels during the 2023 and 2024 growing seasons

Factor	Plant height (cm)			Number of branches			LAI		
	2023	2024	Mean	2023	2024	Mean	2023 ^A	2024 ^B	Mean
Irrigation system									
DI	42.4	38.68 ^b	40.54 ^b	5.68 ^b	5.11 ^b	5.22 ^b	3.15	3.37	3.26
PRD	44.5	42.71 ^a	42.71 ^a	7.71 ^a	6.55 ^a	7.00 ^a	3.12	3.23	3.18
p-value	0.47 ns	0.021 [*]	0.041 [*]	0.018 [*]	0.043 [*]	0.001 ^{**}	0.30 ^{ns}	0.26 ^{ns}	0.135 ^{ns}
LSD 0.05	--	3.19	2.33	1.77	1.33	0.87	--	--	--
Irrigation Level									
I_{100}	42.4	42.58a	44.71a	6.5	8.4	6.16	3.46 ^a	3.61 ^a	3.53 ^a
I_{75}	42.4	37.60b	39.72ab	6.16	6.4	6.08	3.03 ^b	3.20 ^b	3.12 ^b
I_{55}	44.5	39.91b	42.10b	6.50	5.5	6.08	2.93 ^b	3.08 ^b	3.00 ^b
p-value	0.67ns	0.007 ^{**}	0.027 [*]	0.92 ^{ns}	0.42 ^{ns}	0.93 ^{ns}	<0.001 ^{***}	0.014 [*]	<0.001 ^{***}
LSD0.05	--	3.91	3.11	--	--	--	0.13	0.34	0.11
Irrigation system $\times$ Irrigation level									
DI									
I_{100}	45.18 $\pm$ 0.70	46.10 $\pm$ 0.06 ^a	45.70 $\pm$ 0.80 ^a	6.00 $\pm$ 0.57	5.00 $\pm$ 0.61	5.00 $\pm$ 0.54	3.40 $\pm$ 0.03	3.60 $\pm$ 0.04	3.50 $\pm$ 0.11
I_{75}	39.60 $\pm$ 3.00	35.50 $\pm$ 0.80 ^c	36.50 $\pm$ 3.9 ^c	4.00 $\pm$ 1.00	5.00 $\pm$ 0.91	5.00 $\pm$ 0.63	3.00 $\pm$ 0.08	3.20 $\pm$ 0.05	3.10 $\pm$ 0.11
I_{55}	42.10 $\pm$ 0.55	36.40 $\pm$ 0.65 ^{bc}	39.20 $\pm$ 3.10 ^b	6.00 $\pm$ 1.30	5.00 $\pm$ 0.43	5.00 $\pm$ 0.75	2.90 $\pm$ 0.03	3.20 $\pm$ 0.05	3.00 $\pm$ 0.14
PRD									
I_{100}	42.30 $\pm$ 1.58	43.00 $\pm$ 0.45 ^a	43.00 $\pm$ 1.04 ^a	7.00 $\pm$ 1.20	6.00 $\pm$ 0.60	6.00 $\pm$ 0.32	3.40 $\pm$ 0.10	3.50 $\pm$ 0.16	3.50 $\pm$ 0.13
I_{75}	44.60 $\pm$ 0.45	41.70 $\pm$ 0.90 ^{ab}	42.70 $\pm$ 1.44 ^{ab}	8.00 $\pm$ 0.57	7.00 $\pm$ 0.85	8.00 $\pm$ 0.26	3.00 $\pm$ 0.05	3.10 $\pm$ 0.08	3.00 $\pm$ 0.10
I_{55}	46.50 $\pm$ 1.80	43.40 $\pm$ 1.11 ^a	44.90 $\pm$ 2.16 ^a	7.00 $\pm$ 0.63	6.00 $\pm$ 0.33	7.00 $\pm$ 0.64	2.90 $\pm$ 0.02	2.96 $\pm$ 0.14	2.90 $\pm$ 0.09
p-value	0.437 ^{ns}	0.023 ^{**}	0.018 [*]	0.230 ^{ns}	0.860 ^{ns}	0.830 ^{ns}	0.93 ^{ns}	0.730 ^{ns}	0.730 ^{ns}
LSD _{0.05}	--	5.53	4.11	--	--	--	--	--	--

Different lower-case letters within each column and different upper-case letters within the header row for planting season for each characteristic indicate significant differences at the 0.05 level. Values are presented as means ($\pm$ SE)

۳.۳. بررسی عملکرد سیستم در دو روش آبیاری قطره‌ای و آبیاری بخشی ریشه در سطوح مختلف آبیاری

عملکرد سیب‌زمینی تر به‌طور قابل‌توجهی بین سیستم‌های آبیاری و در بین سطوح آبیاری در هر دو فصل رشد ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ متفاوت بود، درحالی‌که فقط عملکرد سیب‌زمینی خشک به‌طور قابل‌توجهی در بین سطوح آبیاری در هر دو فصل متفاوت بود (جدول ۵). هم‌چنین تفاوت معنی‌داری در عملکرد سیب‌زمینی تازه بین سال ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ وجود داشت و این تفاوت برای عملکرد سیب‌زمینی خشک وجود نداشت. عملکرد سیب‌زمینی تر در روش آبیاری بخشی ریشه نسبت به

سیستم آبیاری قطره‌ای در سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ به ترتیب ۸/۴ و ۶/۵۵ درصد بیش‌تر بود. عملکرد سیب‌زمینی تر و خشک در I_{100} به ترتیب ۳۲/۴۰ و ۶/۶۶ تن در هکتار در سال ۱۴۰۱ و ۳۶/۴۶ و ۶/۸۱ تن در هکتار در سال ۱۴۰۲ بود. کاهش ۲۵ درصدی آب آبیاری (I_{75}) منجر به کاهش عملکرد سیب‌زمینی تر و خشک به ترتیب ۱۷/۲۸ و ۲۲/۳۷ درصد در سال ۱۴۰۱ و ۱۶/۷۳ و ۳۰/۸۳ درصد در سال ۱۴۰۲ و کاهش ۴۵ درصدی در میزان آب آبیاری (I_{55}) این عملکردها را به ترتیب ۳۰/۸۶ و ۳۵/۷۳ درصد در سال ۱۴۰۱ و ۲۹/۲۹ و ۴۹/۴۸ درصد در سال ۱۴۰۲ نسبت به مقادیر به‌دست‌آمده با I_{100} کاهش داد. اثر متقابل معنی‌داری بین سیستم آبیاری و سطح آبیاری بر عملکرد سیب‌زمینی تر و خشک در هر دو فصل رشد وجود نداشت.

Table 5. Fresh and dry tuber yields of potato under different irrigation systems and irrigation levels during the 2023 and 2024 growing seasons

Factor	Fresh tuber yield (ton/ha)			Dry tuber yield (ton/ha)		
	2023 ^A	2024 ^B	Mean	2023	2024	Mean
Irrigation system						
DI	26.12 ^b	29.89 ^b	28.00 ^b	5.19	4.93	5.07
PRD	28.32 ^a	31.85 ^a	30.08 ^a	5.72	5.05	5.27
p-value	0.004 ^{***}	0.002 ^{**}	<0.01 ^{***}	0.255 ^{ns}	0.781 ^{ns}	0.361 ^{ns}
LSD 0.05	1.32	0.93	0.73	---	---	---
Irrigation Level						
I_{100}	32.4 ^a	36.46 ^a	34.4 ^a	6.60 ^a	6.81 ^a	6.75 ^a
I_{75}	26.8 ^b	30.36 ^b	28.8 ^b	5.17 ^b	4.71 ^b	4.95 ^b
I_{55}	22.4 ^c	25.78 ^c	24.09 ^c	4.28 ^c	3.44 ^b	3.86 ^c
p-value	<0.001 ^{***}	<0.001 ^{***}	<0.001 ^{***}	<0.001 ^{***}	<0.001 ^{***}	<0.001 ^{***}
LSD0.05	1.53	1.11	0.86	0.71	1.36	0.76
Irrigation system × Irrigation level						
DI						
I_{100}	31.50±0.69	35.50±0.61	33.55±0.96	6.46±0.41	6.62±0.76	6.54±0.53
I_{75}	25.60±0.73	29.50±0.34	27.35±0.91	4.92±0.21	4.75±0.46	4.83±0.20
I_{55}	21.30±0.73	24.50±0.31	23.08±0.87	4.22±0.16	3.44±0.31	3.44±0.27
PRD						
I_{100}	33.30±0.68	37.50±0.52	35.20±0.87	6.73±0.36	6.99±0.52	6.86±0.31
I_{75}	28.20±0.76	31.50±0.23	29.87±0.73	5.41±0.41	4.73±0.63	4.07±0.42
I_{55}	23.40±0.53	26.50±0.71	25.10±0.64	4.34±0.26	3.44±0.26	3.89±0.36
p-value	0.811 ^{ns}	0.726 ^{ns}	0.623 ^{ns}	0.761 ^{ns}	0.876 ^{ns}	0.911 ^{ns}
LSD _{0.05}	--	--	--	--	--	--

Different lower-case letters within each column and different upper-case letters within the header row for planting season for each characteristic indicate significant differences at the 0.05 level. Values are presented as means ($\pm$ SE).

۴.۳. بررسی اجزای عملکرد سیب‌زمینی در دو روش آبیاری قطره‌ای سطحی و آبیاری بخشی ریشه در سطوح مختلف آبیاری

وزن سیب‌زمینی تر در هر بوته به‌طور قابل‌توجهی بین سیستم‌های آبیاری و در بین سطوح آبیاری در هر دو فصل رشد ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ متفاوت بود و در گیاهانی که با روش آبیاری بخشی ریشه و با تیمار I_{100} رشد کرده‌اند بیش‌ترین مقدار را داشت. وزن سیب‌زمینی تازه در هر بوته در تیمار I_{55} به‌طور متوسط ۱۰/۳۹ و ۳۵/۱۶ درصد در سیستم DI و ۲۷/۶۵ و ۳۵/۵۵ درصد در روش آبیاری بخشی ریشه نسبت به تیمارهای I_{75} و I_{100} کمتر بود ($P < 0.05$). میانگین وزن سیب‌زمینی در روش آبیاری بخشی ریشه به‌طور متوسط ۱۱/۶۲ درصد کمتر از سیستم آبیاری قطره‌ای بود. میانگین وزن سیب‌زمینی در تیمار I_{55} به‌طور قابل‌توجهی کمتر از تیمارهای I_{100} و I_{75} تحت هر دو سیستم آبیاری بود ($P < 0.001$)، درحالی‌که اختلاف معنی‌داری در میانگین وزن سیب‌زمینی بین تیمارهای I_{100} و I_{75} وجود نداشت. در هر دو فصل رشد تعداد غده در هر بوته در تیمار I_{100} بالاترین بود. تعداد سیب‌زمینی در هر بوته در سیستم آبیاری قطره‌ای و روش آبیاری بخشی ریشه به‌ترتیب به‌طور متوسط ۱۱ و ۱۵ عدد برای تیمار I_{100} ، ۹ و ۱۵ عدد برای تیمار I_{75} و ۱۰ و ۱۱ عدد برای تیمار I_{55} بود (جدول ۶).

Table 6. Fresh tuber weight per plant, mean tuber weight, and number of tubers per plant in potato under different irrigation systems and irrigation levels during the 2023 and 2024 growing seasons

Factor	Fresh tuber weight (g/plant)			Mean tuber weight (g)			Number of tubers		
	2023	2024	Mean	2023 ^B	2024 ^A	Mean	2023 ^B	2024 ^A	Mean
Irrigation system									
DI	653.89 ^b	696.01 ^b	674.91 ^b	62.21 ^a	66.60	64.41 ^a	10 ^b	11 ^b	10 ^b
PRD	756.87 ^a	797.97 ^a	771.42 ^a	50.62 ^b	63.23	56.92 ^b	15 ^a	13 ^a	14 ^a
p-value	0.0016 ^{***}	0.024 ^{**}	<0.001 ^{***}	0.004 ^{**}	0.116 ^{ns}	<0.001 ^{***}	<0.001 ^{***}	<0.001 ^{***}	<0.001 ^{***}
LSD 0.05	53.64	81.16	61.72	7.36	--	7.33	1.73	0.71	1.01
Irrigation Level									
I ₁₀₀	910.49 ^a	836.60 ^a	887.04 ^a	65.66 ^a	71.40 ^a	68.53 ^a	14 ^a	12 ^a	13 ^a
I ₇₅	685.00 ^b	753.50 ^b	719.25 ^b	54.65 ^b	70.33 ^a	62.49 ^a	13 ^a	11 ^b	12 ^b
I ₅₅	520.55 ^c	628.88 ^c	572.21 ^c	48.93 ^b	53.05 ^b	50.99 ^b	11 ^b	11 ^b	11 ^c
p-value	<0.001 ^{***}	0.0024 ^{***}	<0.001 ^{***}	0.006 ^{***}	0.026 [*]	<0.001 ^{***}	0.008 ^{**}	0.008 ^{**}	<0.001 ^{***}
LSD0.05	68.23	110.73	64.19	9.43	11.73	7.32	2.31	1.32	1.18
Irrigation system × Irrigation level									
DI									
I ₁₀₀	882.40±70.1 ^{ab}	825.10±31.3	853.80±28.3 ^{ab}	74.10±5.1	76.10±4.1	75.60±28.3 ^a	12±0.93 ^b	11±0.34 ^b	11±0.61 ^b
I ₇₅	564.30±83.6 ^c	671.40±44.1	617.80±41.7 ^c	62.20±4.7	76.30±5.1	69.20±37.7 ^a	9±0.58 ^c	9±0.57 ^c	9±0.33 ^c
I ₅₅	514.70±67.2 ^c	591.40±34.2	553.70±36.7 ^c	49.50±2.7	47.20±3.1	48.30±31.7 ^b	10±0.83 ^{bc}	10±0.52 ^b	10±0.42 ^{bc}
PRD									
I ₁₀₀	938.50±47.5 ^a	902.00±26.8	920.50±26.3 ^{ab}	56.40±1.1	66.50±3.9	61.40±2.7 ^b	17±0.53 ^a	14±0.63 ^a	15±0.75 ^a
I ₇₅	805.70±50.2 ^b	835.50±24.1	820.70±24.1 ^c	47.10±1.6	64.30±3.4	55.70±3.1 ^b	17±0.46 ^a	13±0.47 ^a	15±1.21 ^a
I ₅₅	526.40±23.3 ^c	656.30±41.3	591.40±33.7 ^c	48.30±1.1	58.80±3.8	53.40±2.9 ^b	11±0.72 ^{bc}	11±0.36 ^b	11±0.24 ^b
p-value	0.003 ^{**}	0.671 ^{ns}	0.031 [*]	0.263 ^{ns}	0.411 ^{ns}	0.041 [*]	0.009 ^{**}	0.016 [*]	<0.001 ^{***}
LSD _{0.05}	81.46	--	91.16	--	--	9.53	2.89	1.73	1.63

Different lower-case letters within each column and different upper-case letters within the header row for planting season for each characteristic indicate significant differences at the 0.05 level. Values are presented as means (±SE).

گیاهانی که در معرض تیمار I₅₅ قرار گرفتند قطر غده کم‌تری در هر دو سیستم DI و PRD داشتند. در دو سیستم DI و PRD به‌ترتیب ۳۹/۶ و ۳۳/۵ درصد سیب‌زمینی‌ها دارای قطر کمتر از ۵۰ میلی‌متر و ۲۴/۲ و ۲۷/۵ درصد دارای قطر بیش‌تر از ۸۰ میلی‌متر در فصل رشد ۱۴۰۲ بودند. چنین روندی در تیمار I₁₀₀ مشاهده نشد و اختلاف معنی‌داری هم مشاهده نشد (شکل ۴).

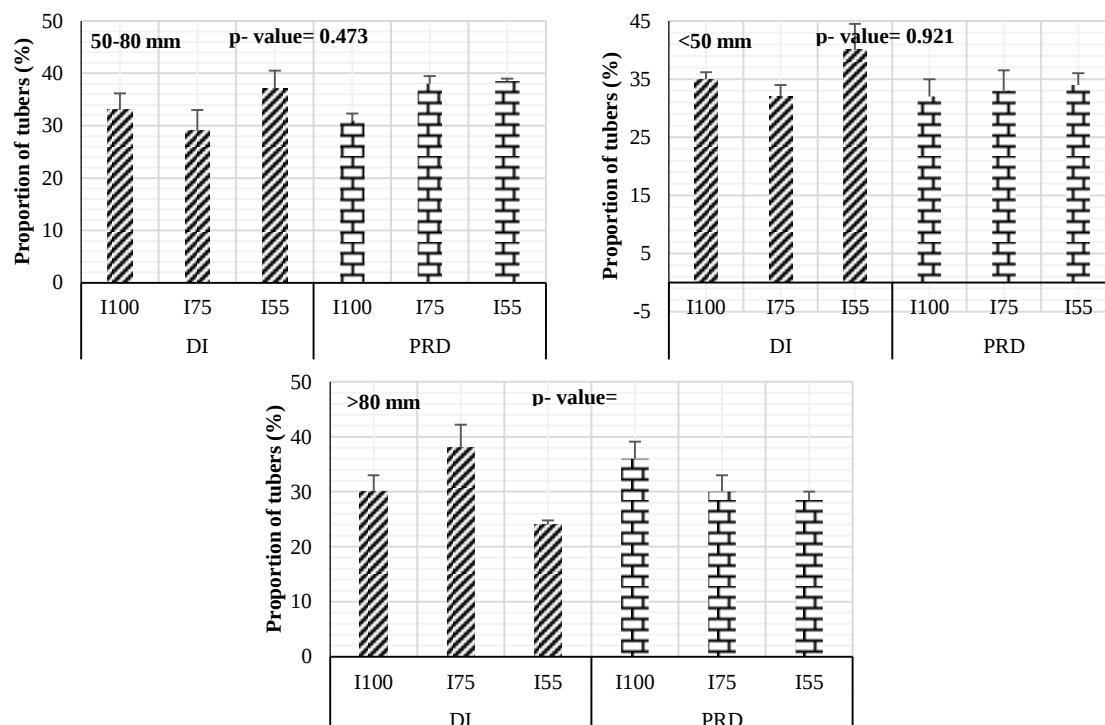


Figure 4. Proportion of tubers in different diameter classes (<50 mm, 50–80 mm, and > 80 mm) under different irrigation systems and irrigation levels in the 2024 growing season.

DI surface drip irrigation, PRD partial root drying, I₁₀₀100% of crop evapotranspiration (ETc), I₇₅ 75% ETc, I₅₅ 55% ETc. Bars represent means± S (n= 3)

۵.۳. بررسی راندمان مصرف آب آبیاری در دو روش آبیاری قطره‌ای سطحی و آبیاری بخشی ریشه در سطوح مختلف آبیاری

راندمان مصرف آب آبیاری (IWUE) به‌طور قابل‌توجهی در دو فصل رشد متفاوت بود و به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای تحت تأثیر سیستم آبیاری در هر دو فصل قرار داشت ($P < 0.01$). راندمان مصرف آب آبیاری در گیاهانی که دارای روش آبیاری بخشی ریشه بودند ۸/۶۵ درصد در سال ۱۴۰۱ و ۶/۷۷ درصد بیش‌تر در سال ۱۴۰۲ در مقایسه با سیستم آبیاری قطره‌ای بیش‌تر بود (جدول ۷ و شکل ۶). به‌استثنای آبیاری قطره‌ای در سال ۱۴۰۱ ($P = 0.083$)، تفاوت قابل‌توجهی در راندمان مصرف آب آبیاری بین سه سطح آبیاری در هر دو سیستم آبیاری در هر دو فصل وجود داشت ($P < 0.01$). در سیستم آبیاری قطره‌ای در سال ۱۴۰۲، راندمان مصرف آب آبیاری در تیمار I_{55} (۷/۰۰ کیلوگرم در مترمکعب) نسبت به تیمارهای I_{75} و I_{100} به‌طور قابل‌توجهی (به‌ترتیب با اختلاف ۷/۵۰ و ۱۷/۴۴ درصد) بالاتر بود. در روش آبیاری بخشی ریشه راندمان مصرف آب آبیاری در تیمار I_{55} در سال ۱۴۰۱، ۶/۷۴ و ۱۴/۹۱ درصد و در سال ۱۴۰۲ در مقایسه با تیمارهای I_{75} و I_{100} به‌ترتیب ۷/۷۰ و ۲۱/۱۸ درصد بیش‌تر بود. در سال ۱۴۰۱، مقدار عملکرد سیب‌زمینی صرف‌نظر از سیستم آبیاری، در تیمار I_{100} در مقایسه با تیمار I_{75} و I_{55} به‌ترتیب ۱۶/۹۷ و ۳۰/۸۶ درصد کاهش یافت. این مقادیر در سال ۱۴۰۲، به‌ترتیب ۱۶/۷۴ و ۲۹/۳۰ درصد بود. این مقادیر نشان می‌دهد با وجود کاهش ۲۵ و ۴۵ درصدی میزان آب آبیاری در تیمارهای I_{75} و I_{55} نسبت به تیمار I_{100} مقدار کاهش عملکرد گیاه سیب‌زمینی کم‌تر از مقادیر بیان شده می‌باشد. در سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲، راندمان مصرف آب آبیاری به‌طور میانگین در تیمارهای DI_{55} و DI_{75} در مقایسه با تیمار DI_{100} به‌ترتیب ۸/۴ و ۱۶/۲ درصد و در تیمارهای PRD_{100} ، PRD_{75} و PRD_{55} در مقایسه با تیمار DI_{100} به‌ترتیب ۵/۰۹، ۱۸/۱۴ و ۲۶/۴۵ درصد افزایش نشان داد.

Table 7. Irrigation water use efficiency (IWUE) of potato plants under different irrigation systems and irrigation levels during 2023 and 2024 growing seasons

Factor	Yield (ton/ha)			Water applied (m ³ /ha)			Water use efficiency (kg/m ³)		
	2023	2024	Mean	2023	2024	Mean	2023	2024	Mean
DI									
I_{100}	31.50	35.67	33.58	6020	5980	6000	5.23	5.96	5.59
I_{75}	25.60	29.20	27.40	4540	4480	4510	5.63	6.51	6.07
I_{55}	21.37	24.80	23.08	3550	3540	3545	6.01	7.00	6.51
PRD									
I_{100}	33.30	37.26	35.28	6020	5980	6000	5.53	6.23	5.88
I_{75}	28.20	31.52	29.86	4540	4480	4510	6.21	7.03	6.62
I_{55}	23.43	26.76	25.09	3550	3540	3545	6.60	7.55	7.07
p-value	0.811 ^{ns}	0.726 ^{ns}	0.623 ^{ns}	--	--	--	<0.01 ^{***}	<0.01 ^{***}	<0.01 ^{***}
LSD _{0.05}	--	--	--	--	--	--	0.185	0.278	0.263

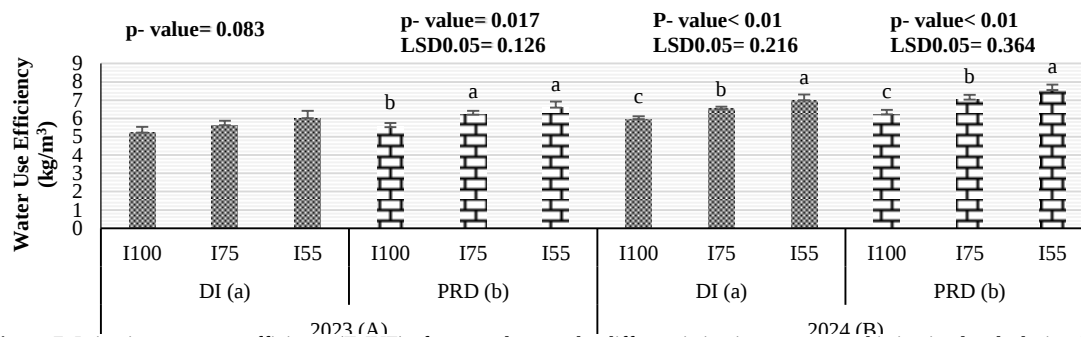


Figure 7. Irrigation water use efficiency (IWUE) of potato plants under different irrigation systems and irrigation levels during 2023 and 2024 growing seasons.

Bars represent means $\pm$ SE (n = 3). Different lower-case letters directly above the bars for each irrigation system and season represent significant differences among irrigation levels, while different lower-case letters in parentheses for each season represent significant differences between the irrigation systems and different upper-case letters in parentheses represent significant differences between the seasons (LSD test, $p < 0.05$).

۶.۳. بررسی فاکتور واکنش عملکرد (k_y) و زیست‌توده (k_{ss}) سیب‌زمینی در دو روش آبیاری قطره‌ای و آبیاری بخشی ریشه در سطوح مختلف آبیاری

به‌منظور نشان‌دادن سطح تحمل گیاه به تنش آبی، k_y و k_{ss} در روش‌های آبیاری قطره‌ای و روش آبیاری بخشی ریشه به روش رگرسیون با استفاده از داده‌های تلفیقی دو فصل رشد محاسبه شدند (شکل ۷). به‌استثنای k_{ss} در سیستم آبیاری قطره‌ای که کمی بیش‌تر از یک بود هر دو عامل در هر دو سیستم آبیاری کم‌تر از یک بودند. k_y و k_{ss} در سیستم آبیاری قطره‌ای بیش‌تر از روش آبیاری بخشی ریشه، به‌ترتیب با مقادیر ۰/۷۷ و ۱/۰۷ در سیستم آبیاری قطره‌ای و ۰/۶۶ و ۰/۹۷ در روش آبیاری بخشی ریشه بودند که نشان‌دهنده این است که کاهش عملکرد در سیستم آبیاری قطره‌ای بیش‌تر از روش آبیاری بخشی ریشه می‌باشد.

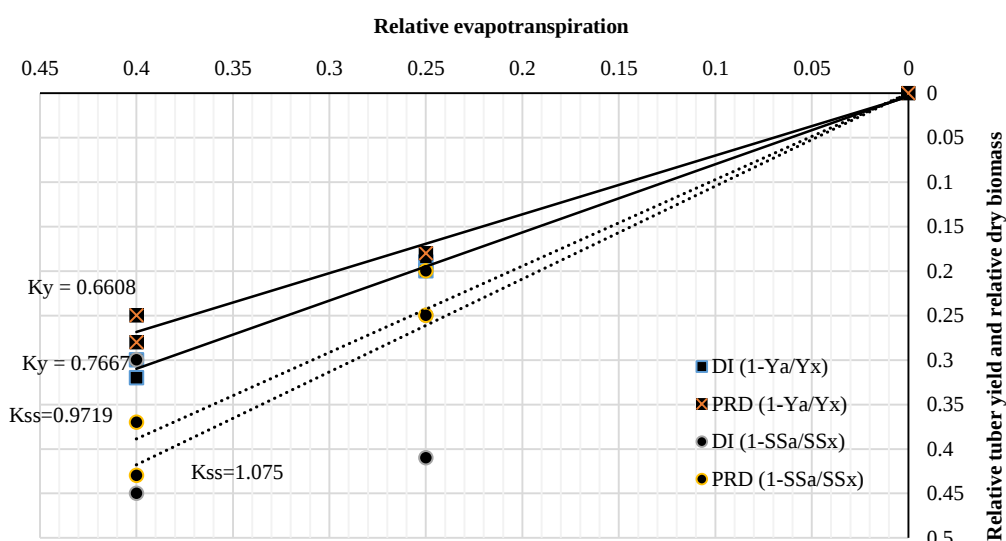


Figure 7. Relationship between relative evapotranspiration and both the relative tuber yield and relative dry biomass for potato under surface drip irrigation (DI) and partial root drying (PRD) based on pooled data collected during the 2023 and 2024 growing seasons

۴. بحث

مقدار رطوبت حجمی در ناحیه ریشه گیاه سیب‌زمینی با اعمال تیمارهای I_{75} و I_{55} در سیستم آبیاری قطره‌ای نسبت به تیمار I_{100} در روش آبیاری بخشی ریشه در هر دو فصل رشد کم‌تر بود، که با یافته‌های متر و همکاران (۲۰۲۰) که برای گیاهانی که با کم‌آبیاری مدیریت می‌شوند به‌طور قابل‌توجهی کم‌تر از گیاهانی است که با آبیاری کامل مدیریت می‌شوند همخوانی دارد. همچنین، گزارش شده است که رطوبت حجمی بالا در روش آبیاری بخشی ریشه انتقال آب به ناحیه اطراف ریشه را تسهیل می‌کند (Vyrtas *et al.*, 2014) که ناشی از جریان محدود کاپیلاری به سطح در ترکیب با کاهش تلفات تبخیر است.

تجزیه و تحلیل صفات زراعی بوته‌های سیب‌زمینی نشان داد که هم وزن تازه و هم وزن خشک قسمت‌های رویشی در روش آبیاری بخشی ریشه نسبت به سیستم آبیاری قطره‌ای بیش‌تر است. وزن تازه و خشک قسمت‌های رویشی نیز با کاهش سطح آبیاری کاهش یافت که با اثرات نامطلوب تنش آبی بر رشد گیاه مطابقت دارد. بسیاری از مطالعات کاهش وزن اندام رویشی در اثر کم‌آبیاری را گزارش کرده‌اند (Eid *et al.*, 2020) که نشان می‌دهد قدرت جذب میوه بیش‌تر از بقیه اندام‌های گیاه

است. این تفاوت به احتمال زیاد به دلیل کاهش قابل توجه سطح تماس خاک و ریشه است که در اثر کاهش آب خاک به وجود می آید (Jensen *et al.*, 1993) که ممکن است به عنوان یک عامل محدودکننده برای رشد ریشی اثر کند. کرم و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که کمبود آب، سبب کاهش رشد ریشی محصول، کوتاه شدن چرخه سالانه محصول و تسریع پیری برگ می شود. گیاهان در سیستم آبیاری قطره ای و در تیمارهای I₇₅ و I₅₅ کمترین ارتفاع را داشتند در حالی که گیاهان در سیستم آبیاری قطره ای تعداد شاخه کمتری نسبت به روش آبیاری بخشی ریشه داشتند که با نتایج به دست آمده برای گوجه فرنگی (Al-Ghobari and Dewidar, 2018) و ملیگی و همکاران (۲۰۲۰) برای سیب زمینی همخوانی دارد. با این حال، الهانی و همکاران (۲۰۱۹) هیچ تفاوت آماری معنی داری در ارتفاع بوته یا تعداد شاخه ها بین سطوح مختلف آبیاری مشاهده نکردند.

شاخص سطح برگ به طور قابل توجهی تحت تأثیر سیستم آبیاری در هر دو فصل قرار نگرفت که با نتایج به دست آمده روی بادمجان همخوانی دارد (Colak *et al.*, 2015). با این حال، تفاوت قابل توجهی در شاخص سطح برگ بین تیمارهای کم آبیاری و تیمار آبیاری کامل در مطالعه حاضر وجود داشت که با نتایج لیو و همکاران (۲۰۰۶)، زین العابدین و همکاران (۲۰۱۷) روی سیب زمینی و هم چنین کرم و همکاران (۲۰۱۱) روی بادمجان همخوانی دارد. دشی و همکاران (۲۰۱۵) گزارش دادند که شاخص سطح برگ بزرگتر از سه، (همان طور که در این مطالعه مشاهده شد) برای به حداکثر رساندن سرعت رشد و دریافت نور در سیب زمینی بهینه است.

از نظر سطح آبیاری، عملکرد سیب زمینی تازه در تیمار I₁₀₀ و سپس تیمارهای I₇₅ و I₅₅ به ترتیب بالاترین بود که با یافته های احمدی و همکاران (۲۰۱۴) همخوانی دارد. هم چنین Colak *et al.* (2017) با پژوهش روی بادمجان و ملیگی و همکاران (۲۰۲۰) با پژوهش روی سیب زمینی، ثابت کردند عملکرد محصول با مقدار آب آبیاری مصرفی و رشد ریشی همبستگی مثبت دارد. اقبال و همکاران (۱۹۹۹) بیان کردند که کم آبیاری در مراحل اولیه رشد سیب زمینی ممکن است باعث کاهش شدید عملکرد تازه محصول نهایی شود که به همین دلیل در این پژوهش تیمارها ۳۰ روز بعد از کشت اعمال شدند. در مقابل، پتل و راجپوت (۲۰۰۷) گزارش کردند که عملکرد سیب زمینی به طور قابل توجهی تحت تأثیر کاهش ۲۰ درصدی آب آبیاری قرار نگرفت و در پژوهشی مشخص شد سطوح آبیاری به طور قابل توجهی بر عملکرد غده سیب زمینی اثر می گذارد و سیستم آبیاری هیچ اثر قابل توجهی ندارد (Onder *et al.*, 2005).

عملکرد غده خشک گیاهان در تیمار I₁₀₀ بیش تر از تیمارهای I₇₅ و I₅₅ بود که با نتایج احمدی و همکاران (۲۰۱۴) روی گیاه سیب زمینی و شائو و همکاران (۲۰۰۸) روی فلفل دلمه ای همخوانی دارد. به همین ترتیب، الهانی و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که عملکرد غده خشک سیب زمینی به طور قابل توجهی تحت تیمارهای تنش آبی در مقایسه با تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی کاهش یافت. با این حال، احمد و همکاران (۲۰۱۷) و پتروپولوس (۲۰۲۰) دریافتند که عملکرد غده خشک نیز به نوع محصول بستگی دارد که عامل مهمی در سازگاری سیب زمینی با شرایط کم آبی است. پژوهش گران پیشنهاد کردند که افزایش سطح آب آبیاری منجر به افزایش وزن ماده خشک در تمام مراحل رشد سیب زمینی می شود (Ierna and Mauromicale, 2018). یک دلیل احتمالی برای این افزایش ممکن است این باشد که سیب زمینی یک محصول با ریشه کم عمق است، بنابراین هرگونه تفاوت در رطوبت آب خاک در لایه بالایی (۱۰ تا ۳۰ سانتی متری) خاک می تواند تأثیر زیادی بر عملکرد داشته باشد، در حالی که تفاوت در میزان رطوبت خاک در لایه های پایین (۳۰ تا ۵۰ سانتی متری) می تواند به دلیل تراکم کم ریشه گیاه تأثیر بسیار کمتری داشته باشد (Zin El-Abidin *et al.*, 2017).

وزن غده تازه، میانگین وزن غده و تعداد غده در هر بوته رشد کرده در روش آبیاری بخشی ریشه با تیمار I₁₀₀ به طور قابل توجهی بیش تر از تیمارهای دیگر در هر دو فصل و کمترین آن در سیستم آبیاری قطره ای با تیمار I₅₅ بود که با نتایج الهانی و همکاران (۲۰۱۹) همخوانی دارد. شارما و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که مقادیر کاهش یافته آب آبیاری (۵۰ درصد

نیاز آبی) به‌ترتیب باعث کاهش وزن میوه در بادمجان و خربزه شد. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که تنش آبی ناشی از مراحل مختلف رشد، تعداد غده‌ها در هر بوته را کاهش می‌دهد (Nagaz et al., 2016). به‌طور مشابه، در پژوهشی مشخص شد تعداد میوه‌های گوجه‌فرنگی در هر بوته با افزایش مکش آب خاک در طول فصل رشد کاهش می‌یابد (Marouelli and Silva, 2007) و زین‌العابدین و همکاران (۲۰۱۷) دریافتند که وقتی کدو (*Cucurbita pepo* L.) و گیاه سیب‌زمینی به‌ترتیب در معرض ۵۰ و ۷۵ درصد نیاز آبی تحت سیستم آبیاری قطره‌ای قرار گرفتند، میوه کم‌تری تولید شد. احمدی و همکاران (۲۰۱۴) گزارش دادند که تعداد غده‌های سیب‌زمینی در اندازه بیش از ۸۰ میلی‌متر در ۱۰۰ درصد نیاز آبی بیش‌ترین بود، درحالی‌که اردم و همکاران (۲۰۰۶) بیش‌ترین تعداد غده در بوته را در تیمار کم‌آبیاری به‌دست آوردند. همچنین، آلو و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که کاهش تعداد، وزن و اندازه غده در هر بوته در اثر آبیاری ناکافی منجر به عملکرد کم‌تر گیاه سیب‌زمینی شد.

گیاهانی که با روش آبیاری بخشی ریشه مدیریت و تحت تیمار I_{55} قرار گرفتند، بالاترین راندمان مصرف آب آبیاری (IWUE) را داشتند. به‌طور مشابه، الموخ و همکاران (۲۰۱۴) توصیه کردند که راندمان مصرف آب آبیاری بالاتری را می‌توان با اعمال روش آبیاری بخشی ریشه به‌دست آورد و لئو و همکاران (۲۰۰۶)، احمدی و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که راندمان مصرف آب آبیاری سیب‌زمینی در شرایط کم‌آبیاری (DI) بیش‌تر از آبیاری کامل (FI) بود. افزایش راندمان مصرف آب آبیاری تحت کم‌آبیاری نیز برای گوجه‌فرنگی (Al-Qerem et al., 2012) و بادمجان (Colak et al., 2017) مشاهده شده است. درحالی‌که پژوهش‌گران تأیید کردند که کم‌آبیاری با موفقیت راندمان مصرف آب آبیاری محصولات مختلف را بدون کاهش عملکرد محصول در مناطق خشک افزایش داد (Geerts and Raes, 2009).

در مقابل K_y و K_{ss} در گیاهانی که با روش آبیاری بخشی ریشه رشد کرده‌اند نسبت به گیاهانی که با سیستم آبیاری قطره‌ای رشد کرده‌اند، کم‌تر بودند که نشان می‌دهد گیاه سیب‌زمینی در سیستم آبیاری قطره‌ای نسبت به تنش آبی حساس‌تر می‌باشد. اولنو و همکاران (۲۰۰۶) به‌طور مشابه دریافتند که به‌نظر می‌رسد روش‌های مختلف آبیاری بر مقادیر K_y سیب‌زمینی تأثیر می‌گذارد (۰/۶۸ برای سیستم آبیاری قطره‌ای و ۱/۰۵ برای سیستم آبیاری بارانی).

۵. نتیجه‌گیری

مقدار رطوبت خاک ناحیه ریشه در تیمارهای کم‌آبیاری در روش آبیاری قطره‌ای سطحی کم‌تر از آبیاری بخشی ریشه به‌دست آمد. همچنین تجزیه و تحلیل صفات زراعی نشان داد که وزن قسمت رویشی گیاه رشد یافته با آبیاری بخشی ریشه بیش‌تر از آبیاری قطره‌ای است. نتیجه دیگر این‌که تفاوت قابل‌توجهی بین شاخص سطح برگ تیمارهای کم‌آبیاری با آبیاری کامل مشاهده شد. عملکرد سیب‌زمینی در تیمارهای کامل آبیاری نسبت به تیمارهای کم‌آبیاری ۵۵ و ۷۵ درصد بیش‌تر به‌دست آمد. بیش‌ترین راندمان مصرف آب آبیاری در آبیاری بخشی ریشه و با تیمار کم‌آبیاری ۵۵ درصد نیاز آبی در سیستم آبیاری قطره‌ای و آبیاری بخشی ریشه به‌دست آمد، اما با کاهش ۴۵ درصدی نیاز آبی گیاه عملکرد سیب‌زمینی کاهش یافت. علاوه بر این، ضریب پاسخ عملکرد گیاه کم‌تر از یک بود که نشان می‌دهد سیب‌زمینی می‌تواند مقداری کمبود آب را تحمل کند، که سبب حفظ عملکرد و در عین حال کاهش اتلاف آب در مناطق خشک می‌شود.

بنابراین پیشنهاد می‌شود، اگر هدف به‌دست‌آوردن بالاترین عملکرد سیب‌زمینی بدون توجه به راندمان مصرف آب آبیاری باشد باید آبیاری کامل با سیستم آبیاری قطره‌ای اعمال شود. اگر هدف افزایش راندمان مصرف آب آبیاری داشته باشیم و بخواهیم کاهش عملکرد معنی‌داری نداشته باشیم بهتر است از روش آبیاری بخشی ریشه با ۷۵ درصد نیاز آبی استفاده نمود. بنابراین، اثرات سودمند یک استراتژی مشخص آبیاری، هم به‌روش آبیاری مورد استفاده و هم به مقدار آبی که برای پاسخ به نیاز گیاه داده می‌شود بستگی دارد.

۶. پی‌نوشت‌ها

1. Irrigation Water Use Efficiency
2. Conventional Deficit Irrigation
3. Regulated Deficit Irrigation
4. Partial Root Drying

۷. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۸. منابع

- Ahmadi, S. H., Agharezaee, M., Kamgar-Haghighi, A. A., & Sepaskhah, A. R. (2014). Effects of dynamic and static deficit and partial root zone drying irrigation strategies on yield, tuber sizes distribution, and water productivity of two field grown potato cultivars. *Agricultural Water Management*, 134, 126-136.
- Ahmed, B., Sultana, M., Chowdhury, M. A. H., Akhter, S., & Alam, M. J. (2017). Growth and yield performance of potato varieties under different planting dates. *Bangladesh Agronomy Journal*, 20(1), 25-29.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome*, 300(9), D05109.
- Al-Qerem, R., Suleiman, A., & Shatanawi, M. (2012). Assessing tomato yield and water saving under deficit irrigation in Jordan Valley. *Jordan Journal of Agricultural Sciences*, 8(2).
- Alva, A. K., Moore, A. D., & Collins, H. P. (2012). Impact of deficit irrigation on tuber yield and quality of potato cultivars. *Journal of Crop Improvement*, 26(2), 211-227.
- Chai, Q., Gan, Y., Zhao, C., Xu, H. L., Waskom, R. M., Niu, Y., & Siddique, K. H. (2016). Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. *Agronomy for sustainable development*, 36(1), 3.
- Çolak, Y. B., Yazar, A., Çolak, İ., Akça, H., & Duraktekin, G. (2015). Evaluation of crop water stress index (CWSI) for eggplant under varying irrigation regimes using surface and subsurface drip systems. *Agriculture and agricultural science procedia*, 4, 372-382.
- Çolak, Y. B., Yazar, A., Sesveren, S., & Çolak, İ. (2017). Evaluation of yield and leaf water potential (LWP) for eggplant under varying irrigation regimes using surface and subsurface drip systems. *Scientia horticulturae*, 219, 10-21.
- Deshi, K. E., Obasi, M. O., Odiaka, N. I., Kalu, B. A., & Ifenkwe, O. P. (2015). Leaf area index values of potato (*Solanum tuberosum* L.) stored for different periods in different kinds of stores. *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 8(1), 9-19.
- Eid, M. A., Abdel-Salam, A. A., Salem, H. M., Mahrous, S. E., Seleiman, M. F., Alsadon, A. A., ... & Ibrahim, A. A. (2020). Interaction effects of nitrogen source and irrigation regime on tuber quality, yield, and water Use efficiency of *Solanum tuberosum* L. *Plants*, 9(1), 110.
- Elhani, S., Haddadi, M., Csákvári, E., Zantar, S., Hamim, A., Villányi, V., Douaik, A., & 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, 105745.
- El Mokh, F., Nagaz, K., Masmoudi, M., & Mechlia, N. B. (2014). Effects of surface and subsurface drip irrigation regimes with saline water on yield and water use efficiency of potato in arid conditions of Tunisia. *Journal of Agriculture and Environment for International Development (JAEID)*, 108(2), 227-246.
- English, M.J., Musick, J.T., & Murty, V.V.N. (1990). Deficit irrigation. In: Management of farm irrigation systems (Hoffman, G.J., Howell, T.A., and Solomon, K.H., Editors). ASAE Monograph no. 9. American Society of Agricultural Engineers publisher, 1020p.

- Erdem, T., Erdem, Y., Orta, H., & Okursoy, H. (2006). Water-yield relationships of potato under different irrigation methods and regimens. *Scientia Agricola*, 63, 226-231.
- Fabeiro, C. M. D. S. O. F., de Santa Olalla, F. M., & De Juan, J. A. (2001). Yield and size of deficit irrigated potatoes. *Agricultural Water Management*, 48(3), 255-266.
- Ferreira, T. C., & Gonçalves, D. A. (2007). Crop-yield/water-use production functions of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) grown under differential nitrogen and irrigation treatments in a hot, dry climate. *Agricultural water management*, 90(1-2), 45-55.
- Geerts, S., & Raes, D. (2009). Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural water management*, 96(9), 1275-1284.
- Greaves, G. E., & Wang, Y. M. (2017). Yield response, water productivity, and seasonal water production functions for maize under deficit irrigation water management in southern Taiwan. *Plant Production Science*, 20(4), 353-365.
- Iqbal, R., Raza, M.A., Saleem, M.F., Khan, I.H., Ahmad, S., Zaheer, M.S., Aslam, M.U., & Haider, I. (2019). Physiological and biochemical appraisal for mulching and partial rhizosphere drying of cotton. *Journal of Arid Land*, 11(5), 785-794.
- Jabro, J. D., Leib, B. G., & Jabro, A. D. (2005). Estimating soil water content using site-specific calibration of capacitance measurements from Sentek EnviroSCAN systems. *Applied engineering in agriculture*, 21(3), 393-399.
- Jensen, C. R., Svendsen, H., Andersen, M. N., & Lösch, R. (1993). Use of the root contact concept, an empirical leaf conductance model and pressure-volume curves in simulating crop water relations. *Plant and Soil*, 149(1), 1-26.
- Jovanovic, Z., Stikic, R., Vucelic-Radovic, B., Paukovic, M., Brocic, Z., Matovic, G., Rovcanin, S., & Mojevic, M. (2010). Partial root-zone drying increases WUE, N and antioxidant content in field potatoes. *European Journal of Agronomy*, 33(2), 124-131.
- Karam, F., Masaad, R., Bachour, R., Rhayem, C., & Roupheal, Y. (2009). Water and radiation use efficiencies in drip-irrigated pepper (*Capsicum annuum* L.): response to full and deficit irrigation regimes. *European Journal of Horticultural Science*, 74(2), 79.
- Karam, F., Saliba, R., Skaf, S., Breidy, J., Roupheal, Y., & Balendonck, J. (2011). Yield and water use of eggplants (*Solanum melongena* L.) under full and deficit irrigation regimes. *Agricultural Water Management*, 98(8), 1307-1316.
- Klute, A. (1986). Water retention: laboratory methods. *Methods of soil analysis: part 1 physical and mineralogical methods*, 5, 635-662.
- Lascano RJ, Sojka RE (2007). Preface. In: Lascano RJ, Sojka RE (Eds.). *Irrigation of agricultural crops*, Agronomy Monograph no. 30, 2nd edition, ASACSSA-SSSA Publishing, 664p.
- Liu, F., Shahnazari, A., Andersen, M. N., Jacobsen, S. E., & Jensen, C. R. (2006). Effects of deficit irrigation (DI) and partial root drying (PRD) on gas exchange, biomass partitioning, and water use efficiency in potato. *Scientia horticulturae*, 109(2), 113-117.
- Liu, H., Gao, Y., Sun, J., Wu, X., Jha, S. K., Zhang, H., ... & Li, Y. (2017). Responses of yield, water use efficiency and quality of short-season cotton to irrigation management: interactive effects of irrigation methods and deficit irrigation. *Irrigation science*, 35(2), 125-139.
- Loveys, B. R., Stoll, M., & Davies, W. J. (2004). Physiological approaches to enhance water use efficiency in agriculture: exploiting plant signalling in novel irrigation practice. *Water use efficiency in plant biology*, 113-141.
- Mancosu, N., Snyder, R. L., Kyriakakis, G., & Spano, D. (2015). Water scarcity and future challenges for food production. *Water*, 7(3), 975-992.
- Marouelli, W. A., & Silva, W. L. (2007). Water tension thresholds for processing tomatoes under drip irrigation in Central Brazil. *Irrigation Science*, 25(4), 411-418.
- Mattar, M. A., Zin El-Abedin, T. K., Alazba, A. A., & Al-Ghobari, H. M. (2020). Soil water status and growth of tomato with partial root-zone drying and deficit drip irrigation techniques. *Irrigation Science*, 38(2), 163-176.
- Meligy, M. M., Abou-Hadid, A., El-Shinawy, M. Z., & El-Behairy, U. (2020). Impact of climate change on water requirements and the productivity on potato crop. *Egyptian Journal of Horticulture*, 47(1), 57-68.

- Müller, T., Bouleau, C. R., & Perona, P. (2016). Optimizing drip irrigation for eggplant crops in semi-arid zones using evolving thresholds. *Agricultural Water Management*, 177, 54-65.
- Nagaz, K., El Mokh, F., Alva, A. K., Masmoudi, M. M., & Ben Mechlia, N. (2016). Potato response to different irrigation regimes using saline water. *Irrigation and drainage*, 65(5), 654-663.
- Ngouajio, M., Wang, G., & Goldy, R. (2007). Withholding of drip irrigation between transplanting and flowering increases the yield of field-grown tomato under plastic mulch. *Agricultural water management*, 87(3), 285-291.
- Petropoulos, S. A., Fernandes, Â., Polyzos, N., Antoniadis, V., Barros, L., & CFR Ferreira, I. (2020). The impact of fertilization regime on the crop performance and chemical composition of potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivated in central Greece. *Agronomy*, 10(4), 474.
- Sentek (2001). Calibration of sentek pty ltd soil moisture sensors. A report published by Sentek Pty Ltd, Stepney, p 60.
- Shammout, M. A. W., Qtaishat, T., Rawabdeh, H., & Shatanawi, M. (2018). Improving water use efficiency under deficit irrigation in the Jordan Valley. *Sustainability*, 10(11), 4317.
- Shao, H. B., Chu, L. Y., Jaleel, C. A., & Zhao, C. X. (2008). Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. *Comptes rendus biologiques*, 331(3), 215-225.
- Sharma, S. P., Leskovar, D. I., Crosby, K. M., Volder, A., & Ibrahim, A. M. H. (2014). Root growth, yield, and fruit quality responses of reticulatus and inodorus melons (*Cucumis melo* L.) to deficit subsurface drip irrigation. *Agricultural water management*, 136, 75-85.
- Ünlü, M., Kanber, R., Şenyigit, U., Onaran, H., & Diker, K. (2006). Trickle and sprinkler irrigation of potato (*Solanum tuberosum* L.) in the Middle Anatolian Region in Turkey. *Agricultural water management*, 79(1), 43-71.
- Unver, O., Bhaduri, A., & Hoogeveen, J. (2017). Water-use efficiency and productivity improvements towards a sustainable pathway for meeting future water demand. *Water Security*, 1, 21-27.
- Vyrlas, P., Sakellariou-Makrantonaki, M., & Kalfountzos, D. (2014). Aerogation: crop root-zone aeration through subsurface drip irrigation system. *WSEAS Trans. Environ. Dev*, 10(2014), 446-451.
- Wilkinson, S. (1999). pH as a stress signal. *Plant growth regulation*, 29(1), 87-99.
- Zin El-Abedin, T. K., Mattar, M. A., Alazba, A. A., & Al-Ghobari, H. M. (2017). Comparative effects of two water-saving irrigation techniques on soil water status, yield, and water use efficiency in potato. *Scientia Horticulturae*, 225, 525-532.