



Water Use Efficiency Evaluation in Deficit Irrigation and Partial Root Zone Drying in Potato (*Solanum tuberosum* L.)

A. Asadi¹, H.R. Khazaie^{2*}, J. Nabati³

Received: 07-02-2022

Revised: 07-11-2022

Accepted: 29-11-2022

Available Online: 27-02-2023

How to cite this article:

Asadi, A., Khazaie, H.R., & Nabati, J. (2023). Water Use Efficiency Evaluation in Deficit Irrigation and Partial Root Zone Drying in Potato (*Solanum tuberosum* L.). *Journal of Water and Soil* 36(6): 645-659. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/jsw.2022.75179.1141](https://doi.org/10.22067/jsw.2022.75179.1141)

Introduction

Due to climate change, one of the limiting factors of crop production is environmental stress which, by disrupting the natural metabolism of the plant, limit plant growth and finally reduce crop production. Drought stress causes the greatest reduction in crop productivity compared to other environmental stresses. Therefore, the use of methods to reduce water consumption in agriculture is more important due to the lack of freshwater resources. Increasing water use efficiency and maintaining plant yield by reducing water consumption has a particular importance for crop production and should be paid special attention. Drought stress reduces photosynthesis, stomatal conductance, biomass, growth and consequently plant yield. The effects of drought stress on the yield of plants such as potatoes (*Solanum tuberosum* L.), wheat (*Triticum aestivum* L.), rice (*Oryza sativa* L.) etc., which play an important role in the nutrition and food of the world, has a great importance. Achieving the desired soil moisture range is one of the most important approaches to increase water use efficiency and not significantly reduce yield. For this goal, a factorial experiment was conducted in a completely randomized design with five replications in the research greenhouse of Ferdowsi University of Mashhad.

Materials and Methods

Factors studied in this experiment included three levels of irrigation 1- full irrigation (100% of field capacity), 2- *medium drought stress* (70% of field capacity), 3- partial root-zone drying (70% of field capacity), time of induction of water stress (two weeks after planting and 50% at flowering time) and two levels of phosphate ($\text{CaH}_4[\text{PO}_4]_2 \text{H}_2\text{O}$) fertilizer (based on soil analysis (25 mg.kg^{-1}) and adding 25% more than recommended (31 mg.kg^{-1})) at the beginning of the period phosphate was mixed with soil inside the pot in greenhouse condition. Fontane potato cultivar was used in this study. In irrigation treatments, one part of the pots was stressed two weeks after planting and the second part of the pots were fully irrigated until the beginning of flowering and irrigation treatments were applied at 50% flowering stage. From the prepared samples, membrane stability index, osmotic potential, and relative water content were measured in the laboratory and at the end of experiment, plant height, tuber weight, biomass and plant water use efficiency were measured. Minitab 18 software was used to analyze the data.

Results and Discussion

The results showed that with increasing phosphate fertilizer from 25 mg.kg^{-1} to 31 mg.kg^{-1} , plant biomass increased significantly and in all treatments biomass increased between 2 to 28%. Partial root-zone drying treatment showed a 17.4% increase in biomass. In the *medium drought stress* treatment, the total growth period and

1 and 2- Ph.D. Student in Crop Physiology and Professor, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: h.khazaie@um.ac.ir)

3- Assistant Professor, Research Center for Plant Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

phosphorus level of 31 mg.kg^{-1} , the lowest water use efficiency was observed, and there was no significant difference in the *medium* drought *stress* treatment of the total growth period and the phosphorus level of 25 mg.kg^{-1} . Partial root-zone drying treatment of roots from flowering time and $31 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ P}$, with full irrigation treatment $25 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ P}$ have the same water use efficiency, but the performance of this treatment compared to full irrigation treatment was reduced by 28%. Water use efficiency in partial root-zone drying (intermittent irrigation) has increased compared to traditional irrigation, which indicates a more optimum use of water in the *medium* drought *stress* method. Full irrigation treatment had the highest tuber weight per plant and partial root-zone drying during the growing season treatment had the lowest tuber weight per plant (65%) compared to full irrigation. The partial root-zone drying treatment after flowering, ranked second after full irrigation treatment, for tuber weight per plant and more tuber weight per plant compared to other drought treatments. Using 31 mg.kg^{-1} phosphate, tuber weight per plant in full irrigation treatment reached 332 g.plant^{-1} which increased by 13% and was significantly different from all treatments. With increasing phosphate level from 25 mg.kg^{-1} to 31 mg.kg^{-1} , in the partial root-zone drying treatment from flowering time, tuber weight per plant increased by 28% to 207 g.plant^{-1} . Tuber weight per plant in other drought treatments decreased with increasing phosphate level from 25 mg.kg^{-1} to 31 mg.kg^{-1} , although this decrease was not statistically significant.

Conclusion

Compared to deficit irrigated methods, partial root-zone drying from the beginning of growth and full irrigation has the ability to use available nitrogen at the end of the growing season and has more greenery than other drought treatments. This effect probably explains the filling of the gland tubers at the end of the growing season and thus the keeping of yield production. The best methods for saving water consumption and maintaining the yield, the partial root-zone drying methods is better than the medium drought stress method.

Keywords: Membrane stability, Relative humidity, Water use efficiency

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۱، ص. ۶۴۵-۶۵۹

ارزیابی کارایی مصرف آب و عملکرد سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) با فراهمی کود فسفر در شرایط کم‌آبیاری و خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه

اعظم اسدی^۱ - حمید خزاعی^{۲*} - جعفر نباتی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۸

چکیده

امروزه باتوجه به کمبود منابع آب، توجه بیشتری به استفاده از روش‌های کاهش مصرف آب در کشاورزی می‌شود. این پژوهش در سال ۱۳۹۵ به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با پنج تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، روی گیاه سیب‌زمینی رقم فوتانه، اجرا شد. عوامل مورد بررسی شامل سه سطح آبیاری: آبیاری کامل (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی)، کم‌آبیاری (۷۰ درصد ظرفیت زراعی)، خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه (۷۰ درصد ظرفیت زراعی)، دو زمان اعمال تنش (دو هفته پس از کاشت و ۵۰ درصد گلدهی) و دو سطح کود فسفات (براساس آزمایش خاک (25mg.Kg^{-1}) و افزودن ۲۵ درصد بیشتر از میزان توصیه‌شده (31mg.Kg^{-1}) بودند. تیمارهای آبیاری یک قسمت از گلدها دو هفته بعد از کاشت، تحت تنش قرار گرفت و قسمت دوم گلدها تا شروع گلدهی به‌طور کامل آبیاری شدند و در مرحله ۵۰ درصد گلدهی تیمارهای آبیاری روی آن‌ها اعمال شد. با افزایش کود فسفات از ۲۵ به 31mg.Kg^{-1} میزان زیست‌توده گیاه افزایش یافت. تیمار آبیاری کامل و خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه، به ترتیب ۲۸ و ۱۷/۴ درصد افزایش زیست‌توده نشان دادند. در تیمار کم‌آبیاری کل دوره رشد و سطح فسفر 31mg.Kg^{-1} کمترین کارایی مصرف آب مشاهده شد. کارایی مصرف آب تیمار خشک‌کردن جزئی ریشه از زمان گلدهی و 31mg.Kg^{-1} فسفر، با تیمار آبیاری کامل در 25mg.Kg^{-1} فسفر کارایی مصرف آب مشابه داشتند ولی در این تیمار عملکرد ۲۸ درصد کاهش یافت در صورتی که در تیمار کم‌آبیاری نسبت به تیمار آبیاری کامل، کارایی مصرف آب ۵۰ درصد کاهش عملکرد غده در تک بوته نشان داد؛ به‌طور کلی روش خشک‌کردن جزئی ریشه روش مناسب‌تری نسبت به روش کم‌آبیاری از نظر صرفه‌جویی در مصرف آب و حفظ عملکرد است.

واژه‌های کلیدی: آبیاری، زیست‌توده، ظرفیت زراعی، غده، فسفر

مقدمه

ازجمله عوامل محدودکننده تولیدات زراعی، تنش‌های محیطی می‌باشند که با ایجاد اختلال در متابولیسم طبیعی گیاه، رشد گیاه را

محدود و درنهایت باعث کاهش تولید محصول می‌شوند (Chai, et al., 2016). گیاهان زراعی در معرض چندین تنش محیطی قرار دارند که همه آن‌ها بر رشد و تکامل گیاه تأثیر می‌گذارند و مانع حداکثر بهره‌وری گیاهان زراعی می‌شوند (Farooq et al., 2012). تنش خشکی، بیشترین کاهش بهره‌وری محصول را در مقایسه با دیگر تنش‌های محیطی ایجاد می‌کند. تنش خشکی، از طریق ایجاد تغییرات آناتومیک، مورفولوژیک، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی بر جنبه‌های مختلف رشد و نمو گیاه تأثیر می‌گذارد. شدت خسارت خشکی بستگی به طول مدت تنش و مرحله رشد گیاه متفاوت است. تنش خشکی باعث کاهش فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، زیست‌توده، رشد و درنهایت عملکرد گیاه می‌شود (Kasman and

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشجوی دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی و استاد گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*) نویسنده مسئول: (Email: h.khazaie@um.ac.ir)
۳- استادیار گروه بقولات، پژوهشکده علوم گیاهی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

ریشه و نگهداری آماس و پتانسیل آب در قسمت هوایی گیاه رخ دهد، باید ننگه‌داشته شود (Shi et al., 2015). روش آبیاری جزئی منطقه ریشه به دلیل کاهش آب آبیاری، در صرفه‌جویی مصرف آب و بهبود کارایی مصرف آب مفید است. اساس فیزیولوژیکی برای بهبود کارایی مصرف آب در هر دو روش کم آبیاری و خشک کردن جزئی ریشه، مبتنی بر استفاده سیستم پیام‌رسانی آبسزیک اسید ریشه به ساقه است که باعث می‌شود در طول خشک شدن متوسط خاک، هدایت روزنه‌ای کاهش یافته و سرعت تعرق کم شود (Chai, et al., 2016). یکی دیگر از مهم‌ترین عوامل در تولید و رشد گیاهان زراعی، آب است که می‌تواند به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار گیرد و تولیدات گیاهان زراعی را با مشکل مواجه کند.

افزایش کارایی مصرف آب و حفظ عملکرد گیاه با کاهش مصرف آب، برای تولید گیاهان زراعی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و باید به این مهم توجه ویژه‌ای شود. دست یافتن به دامنه‌های پاسخ رطوبتی برای افزایش کارایی مصرف آب و عدم کاهش چشمگیر عملکرد، یکی از مهم‌ترین رویکردها است؛ با توجه به حساسیت گیاه سیب‌زمینی به تنش خشکی و دست یافتن به روشی به منظور کاهش مصرف آب با حداقل خسارت، این مطالعه با هدف بررسی روش کم آبیاری و مقایسه با آبیاری کامل در فراهمی فسفر، میزان کاهش عملکرد سیب‌زمینی، بهترین کارایی مصرف آب روی فرایندها و کارکردهای گیاه انجام شد.

مواد و روش‌ها

پژوهش به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با پنج تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. عوامل مورد مطالعه شامل سه سطح آبیاری (آبیاری کامل که در آن رطوبت گلدان‌ها همیشه در حالت ظرفیت زراعی نگهداری شد، تنش کم (رطوبت گلدان‌ها حدود ۷۰ درصد ظرفیت زراعی نگهداری شدند) و خشک کردن جزئی منطقه ریشه (یک قسمت گلدان در حدود ۷۰ درصد ظرفیت زراعی آبیاری شدند و قسمت مقابل آن اجازه داده شد تا ۶۰-۷۰ درصد رطوبت از دست دهد سپس مکان آبیاری در گلدان جابجا شد). زمان اعمال تنش آبی (دو هفته پس از کاشت و زمان ۵۰ درصد گلدهی) و کاربرد کود فسفات (سوپر فسفات تریپل $(CaH_4[PO_4]_2 \cdot H_2O)$ در دو سطح (فسفر به میزان مورد نیاز بر اساس آزمایش خاک $(25 mg \cdot Kg^{-1})$ و $(31 mg \cdot Kg^{-1})$) که در ابتدای دوره با خاک داخل گلدان مخلوط شد (جدول ۱). رقم سیب‌زمینی فونتانه در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت.

(Duman, 2015). بررسی اثرات تنش خشکی بر عملکرد گیاهانی مانند سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.)، گندم (*Triticum aestivum* L.) و برنج (*Oryza sativa* L.) و غیره که نقش مهمی در تغذیه و سبب غذایی مردم جهان دارند، از اهمیت بالایی برخوردار است.

سیب‌زمینی رتبه چهارم را بعد از گندم، برنج و ذرت (*Zea mays*) در سبب غذایی مردم جهان به خود اختصاص داده است (Gültekin and Ertek, 2018). سیب‌زمینی یک محصول بسیار حساس به کمبود آب خاک است (Gültekin and Ertek, 2018). ریشه‌های کم‌پشت و کم‌عمق سیب‌زمینی باعث می‌شود این گیاه به کمبود آب آسیب‌پذیر باشد. شدت خشکی، مدت و زمان تنش خشکی در طول دوره‌های مختلف رشد سیب‌زمینی، بر عملکرد گیاه تأثیر می‌گذارد (Chai et al., 2016). سیب‌زمینی از حساسیت بالایی نسبت به تنش خشکی در تمام مراحل نمو به‌ویژه مرحله تشکیل غده برخوردار می‌باشد (Shock et al., 2013). اعمال هرگونه تنش، محتوای نسبی آب، کارایی مصرف آب، تعداد غده در بوته، درصد ماده خشک و عملکرد گیاه را کاهش می‌دهد (Quandahor et al., 2019).

فسفر یکی از عوامل مهم محدود کننده بهره‌وری محصول است و در سیستم‌های تولید سیب‌زمینی مدیریت کود فسفر یک بخش حیاتی است. فسفر رشد و توسعه شاخساره، تقسیم سلولی در ریشه و غده و سنتز نشاسته را تحت تأثیر قرار می‌دهد. میزان فسفر کافی در گیاه برای بهینه‌سازی عملکرد، محتوای ماده خشک، کیفیت غذایی و مقاومت در برابر خشکی و بیماری‌ها ضروری است (Liu et al., 2015).

در دهه‌های اخیر، یکی از گزینه‌های مدیریت برای غلبه بر تنش خشکی در کشاورزی استفاده از روش خشک کردن جزئی منطقه ریشه بوده است. روش خشک کردن جزئی منطقه ریشه (PRD) یک راه کار کم آبیاری است که برای نگهداری نیمی از سیستم ریشه در خشکی طراحی شده است، یا خشک کردن نیمی از ریشه در حالی که نیمه دیگر آن به منظور حفظ آب برگ آبیاری می‌شود سپس برعکس شده و اجازه می‌دهد قسمتی از ریشه که در حال خشک شدن بود آب جذب کند در حالی که قسمتی که آبیاری کامل انجام می‌گرفت در خشکی قرار می‌گیرد؛ بنابراین، به‌طور متناوب بخشی از ریشه در حال خشک شدن و بخشی در حال آبیاری کامل قرار می‌گیرد. این باعث آقاء پیام هورمونی از جمله آبسزیک اسید (ABA) شده و روزنه‌ها تا حدی بسته می‌شوند و بهبود کارایی مصرف آب را به همراه دارد. موفقیت کاربرد روش خشک کردن جزئی منطقه ریشه متکی بر جابجایی منظم سمت خشک و آبیاری شده ریشه است و تا زمانی که پیام شیمیایی تحمل

جدول ۱- مشخصات فیزیکوشیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش

Table 1- Physico-chemical characteristics of the soil used in the test

pH	EC (dS.m ⁻¹)	Bulk Density (g.cm ³)	OC%	Clay%	Sand%	Silt%	N%	P (mg.Kg ⁻¹)	K (mg.Kg ⁻¹)
اسیدیته	هدایت الکتریکی	وزن مخصوص ظاهری	کربن آلی	رس	شن	سیلت	نیتروژن	فسفر	پتاسیم
7.9	1.15	1.4	0.17	12	59	29	0.026	1.5	80

درصد کنترل گردید. پس از یک هفته و در شرایطی که ۶۰-۷۰ درصد رطوبت موجود در بخش خشک ریشه کاهش یافت، آبیاری بین دو قسمت، جابه‌جا و این تناوب تا انتهای دوره رشد تکرار شد.

محتوای رطوبت نسبی برگ

محتوای رطوبت نسبی برگ، در دو مرحله آزمایش (زمان ۵۰ درصد گلدهی و انتهای آزمایش) اندازه‌گیری شد. به این منظور، یک برگ در دمای آزمایشگاه وزن شد، سپس به مدت ۲۴ ساعت داخل پتری دیش به صورت غوطه‌ور در آب قرار گرفت. برای به دست آوردن وزن نمونه در حالت آماس، بعد از خروج نمونه از پتری دیش آب اضافی آن با دستمال کاغذی گرفته شده و وزن گردید، سپس برای ۲۴ ساعت نمونه داخل یک فویل با وزن مشخص، داخل آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. پس از خروج نمونه از آون، نمونه‌ها وزن شدند تا وزن خشک نمونه مشخص شود و مقدار رطوبت نسبی برگ هر نمونه از معادله (۲) به دست آمد.

$$(2) \quad 100 \times \frac{(\text{وزن خشک-وزن تر})}{(\text{وزن خشک-وزن تورزاس})} = \text{محتوای نسبی آب برگ}$$

پتانسیل اسمزی

در دو مرحله آزمایش (زمان ۵۰ درصد گلدهی و انتهای آزمایش)، پتانسیل اسمزی نمونه برگ با استفاده از دستگاه اسمومتر مدل (OM802.D) شرکت Wogel بر پایه روش نقطه انجماد تعیین شد. ابتدا نمونه‌های برگ و ریشه در ریزلوله‌های (میکروتیوب) ۰/۵ میلی‌لیتری همگن (هموژنیزه) و عصاره‌گیری شد. دستگاه اسمومتر توسط محلول استاندارد گلوکز واسنجی شد سپس پتانسیل اسمزی عصاره به دست آمده توسط دستگاه، تعیین کمیت شد.

پایداری غشاه

میزان پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی بر اساس تشکیل کمپلکس مالون دی‌آلدئید (MDA; Malondialdehyde) با تیوباربتوریک اسید (TBA) سنجش شد و غلظت MDA با استفاده از ضریب تصحیح $1 \times 10^{-5} \times M^{-1} \times Cm^{-1}$ با طول موج ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (Heath and Packer, 1968).

گلدان‌هایی با ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر و قطر دهانه ۳۲ سانتی‌متر انتخاب شدند. برای اعمال روش خشک کردن جزئی ریشه و کنترل رطوبت خاک در دو طرف ریشه، گلدان با استفاده از صفحات پلاستیکی به دو بخش مساوی تقسیم و صفحه جداکننده با بدنه گلدان کاملاً آب‌بندی شد تا از نفوذ رطوبت به دو طرف جلوگیری شود. سپس از وسط لبه بالایی صفحه جداکننده به عمق ۱۰ سانتی‌متر قطعه‌ای جدا شد و گیاهچه به صورتی در این قسمت قرار گرفت که ریشه گیاه در طرفین صفحه جداکننده قرار بگیرد و رشد کند. بافت خاک داخل گلدان‌ها بر اساس آزمایش هیدرومتری خاک، شنی-لومی تعیین شد. روش خشک کردن جزئی منطقه ریشه به این صورت بود که یک قسمت از گلدان‌ها دو هفته بعد از کاشت تحت تنش خشکی قرار گرفتند و قسمت دوم گلدان‌ها تا مرحله گلدهی به صورت کامل آبیاری شدند و بعد از اینکه ۵۰ درصد گیاهان وارد مرحله گلدهی شدند تنش خشکی روی آن‌ها اعمال شد. سطح رطوبت در هر گلدان با نصب حسگر دستگاه رطوبت‌سنج خاک (Soil Moisture Meter) مدل (M0750) در گلدان‌ها تحت نظر قرار گرفت. همچنین حسگرهای رطوبتی (TDR) به طول ۱۶ سانتی‌متر در عمق ۲۵ سانتی‌متری گلدان، در دو تکرار اندازه‌گیری شد. ابتدا حسگرها بر اساس شرایط رطوبتی خاک گلدان‌ها واسنجی شدند و رابطه بین رطوبت حجمی خاک و عدد قرائت‌شده از حسگر استخراج شد. برای تعیین میزان آب لازم برای اعمال تیمار آبیاری، رطوبت خاک در ساعت ۸ الی ۹ صبح به صورت روزانه با استفاده از حسگر رطوبتی قرائت‌شده و حجم آب لازم با استفاده از معادله (۱) محاسبه گردید. و به هر گلدان داده شد.

$$(1) \quad V = (\theta_1 - \theta_2) \times Z \times A$$

در رابطه فوق: V، حجم آب موردنیاز برحسب مترمکعب، θ_1 ، رطوبت حجمی خاک در سطح تنش موردنظر، θ_2 ، رطوبت حجمی قرائت‌شده خاک توسط دستگاه، Z، عمق ریشه گیاه که در این مطالعه برابر با نیم متر لحاظ شد و A، متوسط سطح مقطع گلدان برحسب متر مربع بود. در تیمار آبیاری کامل رطوبت خاک همواره در حد ظرفیت زراعی ± 5 درصد نگهداری شد و در تیمارهای کم‌آبیاری سنتی، رطوبت خاک همواره (۷۰ درصد ظرفیت زراعی) ± 5 درصد نگهداری شد. در تیمارهای خشک کردن جزئی منطقه ریشه، آبیاری در یک سمت ریشه انجام شد و رطوبت آن در سطح تنش موردنظر ± 5

ارتفاع بوته و زیست توده

ارتفاع بوته از سطح خاک، وزن تر اندام هوایی، وزن تر غده در انتهای دوره رشد اندازه گیری شد. سپس اندام هوایی و غده ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد داخل آون قرار داده شدند و پس از آن وزن خشک اندام هوایی و غده ها اندازه گیری شد.

کارایی مصرف آب

با تقسیم عملکرد غده و زیست توده گیاه در هر گلدان بر میزان آب مصرفی همان گلدان، راندمان مصرف آب محاسبه شد.

تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل داده ها در قالب طرح کاملاً تصادفی و با استفاده از آزمون LSD انجام شد. اگر تیمارها در سطح پنج درصد معنی دار شده بودند مقایسه میانگین ها صورت گرفت. برای آنالیز داده ها از نرم افزار Minitab 18 و برای رسم نمودارها از نرم افزار Excel 16 استفاده شد.

نتایج و بحث

محتوای رطوبت نسبی برگ

در مرحله گلدهی و مرحله ۲۱ روز پس از گلدهی محتوای نسبی آب برگ، بین تیمارهای مختلف تفاوت آماری معنی داری وجود داشت (جدول ۲). در مرحله گلدهی، تیمار آبیاری کامل بیشترین محتوای نسبی آب برگ را به خود اختصاص داد و بین تیمارهای خشکی تفاوت معنی دار آماری وجود نداشت. در مرحله ۲۱ روز پس از گلدهی نیز در تیمار آبیاری کامل بیشترین محتوای نسبی آب برگ مشاهده شد، میزان نسبی آب برگ در تیمار کم آبیاری در کل دوره رشد با تیمار آبیاری کامل تفاوت آماری معنی دار نداشت؛ و محتوای نسبی آب برگ در تیمارهای خشکی با یکدیگر تفاوت آماری معنی دار نداشت (جدول ۲).

کاربرد کود فسفر، در هر دو مرحله گلدهی و ۲۱ روز پس از گلدهی، تأثیر معنی داری بر محتوای نسبی آب برگ نشان نداد و افزایش ۲۵ درصدی کود فسفر بر محتوای آب برگ تأثیری نداشت (جدول ۲).

جدول ۲- اثر کم آبیاری و خشک کردن جزئی منطقه ریشه بر محتوای نسبی آب برگ، شاخص پایداری غشاء و پتانسیل اسمزی در سبب زمینی در مراحل مختلف رشد

Table 2- Effect of deficit irrigation and partial root zone drying on, relative water content, membrane stability index and osmotic potential of potato at different growth stages

Stages مرحله	Irrigation آبیاری	Relative water content محتوای نسبی آب (%)	Membrane stability index پایداری غشاء (%)	Osmotic potential پتانسیل اسمزی (MPa)
Flowering گلدهی	Control کنترل	845 ^a	37.5 ^a	1.4 ^b
	Deficit irrigation 1 کم آبیاری ۱	932 ^a	34.4 ^a	1.3 ^b
	Partial root drying 1 خشک کردن جزئی ریشه ۱	864 ^a	37.5 ^a	1.5 ^a
21 days after flowering ۲۱ روز پس از گلدهی	Control کنترل	937 ^a	26.1 ^a	1.4 ^d
	Deficit irrigation 1 کم آبیاری ۱	834 ^{ab}	22.6 ^a	1.6 ^c
	Deficit irrigation 2 کم آبیاری ۲	732 ^{bc}	17.2 ^a	2.1 ^a
	Partial root drying 1 خشک کردن جزئی ریشه ۱	646 ^c	19.2 ^a	1.7 ^c
	Partial root drying 2 خشک کردن جزئی ریشه ۲	751 ^{bc}	26.4 ^a	1.9 ^b

در هر ستون، میانگین های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، با یکدیگر تفاوت معنی داری ندارند. تیمارهایی که از ابتدای دوره رشد اعمال شدند با عدد ۱ و تیمارهایی که بیست و یک روز پس از گلدهی اعمال شدند با عدد ۲ نشان داده شدند.

In each column means followed by the same letters are not significantly different ($p \leq 0.05$), at 5% probability level based on LSD. Treatments that were applied from the beginning of the growth period with the number 1 and the treatments that were applied twenty one days after flowering were indicated by the number 2.

تفاوت میان ویژگی‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک متفاوت نظیر تغییر اندازه برگ، زاویه برگ وجود یا عدم وجود موم و بازتاب برگ و روزه‌ها باعث تفاوت بین ارقام از لحاظ محتوای نسبی آب برگ در بین ارقام متحمل و حساس متفاوت است (Quandahor et al., 2019). با گذشت زمان از ابتدای تنش میزان رطوبت نسبی برگ کاهش یافته است. همان‌گونه که در جدول ۴ نشان داده شده در تیمار آبیاری خشک کردن جزئی ریشه با افزایش فسفر، محتوای نسبی آب برگ با تیمار آبیاری کامل تفاوت آماری معنی‌داری ندارد چون همیشه نیمی از ریشه در حالت هیدراته قرار دارد و رطوبت نسبی برگ حفظ می‌شود ولی در تیمار کم‌آبیاری رطوبت نسبی برگ کاهش می‌یابد.

شاخص پایداری غشاء

در زمان گلدهی و همچنین در ۲۱ روز پس از گلدهی بین تیمارهای آبیاری تفاوت معنی‌دار از نظر شاخص پایداری غشاء وجود نداشت (جدول ۲).

شاخص پایداری غشاء تحت تأثیر کود فسفاته قرار نگرفت. در زمان گلدهی و همچنین مرحله ۲۱ روز پس از گلدهی، افزایش کود فسفاته از ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم به ۳۱ میلی‌گرم در کیلوگرم باعث کاهش شاخص پایداری غشاء شد ولی این کاهش معنی‌دار نبود.

برهمکنش تیمارهای آبیاری و کاربرد کود فسفاته بر شاخص پایداری غشاء برگ‌های سیب‌زمینی، حاکی از تفاوت معنی‌داری بین تیمارها بود (جدول ۳). در مرحله گلدهی و کاربرد 25 mg.Kg^{-1} فسفر، تیمار آبیاری کامل با $44/2$ درصد، بیشترین شاخص پایداری غشاء مشاهده شد و بین تیمار خشک کردن جزئی ریشه در کل دوره رشد با آبیاری کامل از نظر شاخص پایداری غشاء تفاوت معنی‌دار وجود نداشت. با افزایش کاربرد کود فسفر به 31 mg.Kg^{-1} شاخص پایداری غشاء در تیمار خشک کردن جزئی ریشه کل دوره رشد $10/7$ درصد افزایش یافت و در دو تیمار دیگر حدود دو درصد کاهش شاخص پایداری غشاء مشاهده شد (جدول ۳).

هدف اصلی فرایندهای تخریبی القاء شده با خشکی، غشاءها هستند و مشخص شده است که تحت تنش خشکی محتوای لیپید غشاء به دلیل ممانعت از بیوسنتز لیپیدها و تحرک لیپولیتیک و فعالیت‌های پراکسیداتیو، کاهش پیدا می‌کند (Chaki et al., 2020). بر اساس نتایج به دست آمده توسط پژوهشگران، در پاسخ به تنش خشکی شاخص پایداری غشاء در گیاه نخود (*Cicer arietinum*) (L.) به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (Yactayo et al., 2013). در گیاه خیار (*Cucumis sativus* L.)، میزان نشت یونی تأثیر تنش خشکی افزایش یافت. تنش خشکی با شروع یک تنش اکسیداتیو همراه است؛ بنابراین در طی تنش خشکی تولید و ذخیره گروه‌های

برهمکنش تیمار آبیاری و کود فسفر حاکی از تفاوت معنی‌دار بین تیمارها بود (جدول ۳). با افزایش فسفر خاک در مرحله گلدهی، در تیمار آبیاری کامل چهار درصد و خشک کردن جزئی ریشه ۱۵ درصد محتوای نسبی آب برگ افزایش یافت و تیمار آبیاری کامل و 31 mg.Kg^{-1} کود فسفر با $74/5$ درصد، بیشترین محتوای آب برگ را داشت و سایر تیمارهای خشکی با یکدیگر تفاوت معنی‌دار آماری نداشتند (جدول ۳). کاربرد 31 mg.Kg^{-1} فسفر در تیمار کم‌آبیاری از زمان گلدهی با 57 درصد کمترین درصد محتوای نسبی آب را در بین تمام تیمارها به خود اختصاص داد که $17/5$ درصد نسبت به آبیاری کامل کاهش داشت و تفاوت معنی‌داری بین دیگر تیمارهای خشکی با تیمار آبیاری کامل وجود نداشت (جدول ۳).

محتوای نسبی آب برگ، یکی از ویژگی‌های اصلی روابط آب گیاهان به شمار می‌رود (Chai et al., 2016) که به دلیل کاهش آب در شرایط تنش تحت تأثیر کمبود آب قرار می‌گیرد. در شرایط تنش خشکی محتوای نسبی آب برگ در گیاه گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) کاهش یافت؛ درحالی‌که پتانسیل آب ریشه خیلی زودتر از برگ و غلاف کاهش یافت (Thalman and Santelia, 2017). محتوای نسبی آب برگ، پتانسیل آب برگ و پتانسیل اسمزی در آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) تحت تأثیر تنش خشکی قرار گرفتند (Farooq et al., 2012). با این حال، در مواجهه با تنش خشکی ژنوتیپ‌های مختلف رفتار متفاوت نشان می‌دهند، پتانسیل آب برگ در ژنوتیپ‌های متحمل در برابر خشکی نسبت به ژنوتیپ‌های حساس پس از مواجهه با خشکی، برای مدت طولانی بالاتر می‌ماند (Chai et al., 2016). با توجه به شدت و مدت خشکی اثرات خشکی متفاوت است. با کاهش شدید خشکی، محتوای نسبی آب برگ به‌طور خطی کاهش می‌یابد. برخی پژوهش‌ها نشان می‌دهد در گیاه آنیسون (*Pimpinella anisum* L.) با اعمال تنش خشکی محتوای نسبی آب برگ در هر دو مرحله گلدهی و پر شدن دانه کاهش می‌یابد. بدین معنی که در اوایل دوره تنش تفاوت معنی‌داری بین محتوای نسبی آب برگ تیمار شاهد تیمار تحت تنش وجود نداشت، ولی با افزایش شدت تنش، پس از گذشت یک هفته محتوای آب نسبی در هر دو مرحله گلدهی و پر شدن دانه به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. تغییر جزئی محتوای نسبی آب برگ احتمالاً بیانگر پیام‌های ارسالی از ریشه در شرایط تنش خشکی که عامل بسته شدن روزنه‌ها و کاهش فتوسنتز می‌باشد این پیام‌های شیمیایی همان اسید آسزیک می‌باشد. بالا بودن محتوای نسبی آب برگ در شرایط کم‌آبی می‌تواند با رفتار روزنه‌ها و سیستم ریشه‌ای گیاه در ارتباط باشد، زیرا یک گیاه برای حفظ محتوای رطوبتی درونی نیاز به داشتن ریشه عمیق به منظور جذب آب دارد (Heidari et al., 2014).

پتانسیل اسمزی

در زمان گلدهی، پتانسیل اسمزی در برگ سیبزمینی در تیمار خشک کردن جزئی ریشه با ۱۰ درصد افزایش نسبت به آبیاری کامل تفاوت معنی‌داری داشت و بین تیمار آبیاری کامل و تیمار کم آبیاری از زمان گلدهی تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۲). تیمار کم آبیاری از زمان گلدهی در مرحله ۲۱ روز پس از گلدهی بیشترین میزان پتانسیل اسمزی را نشان داد و تیمار آبیاری کامل کمترین میزان پتانسیل اسمزی را نشان داد، تیمار خشک کردن جزئی ریشه از زمان گلدهی با ۱۰ درصد کاهش در رتبه دوم و تیمارهای خشک کردن جزئی ریشه کل دوره و کم آبیاری کل دوره رشد با ۲۳ درصد کاهش پتانسیل اسمزی در رتبه سوم قرار گرفتند و تمام تیمارهای خشکی با تیمار آبیاری کامل تفاوت معنی‌دار داشتند (جدول ۲).

سمی و مخرب اکسیژن آزاد افزایش یابد. در نتیجه تحت شرایط تنش خشکی به سرعت چربی‌های غشاء پراکسید گردیده و پایداری غشاء یاخته از بین می‌رود (Bayat et al., 2013). نتایج به دست آمده از این آزمایش در ۲۱ روز پس گلدهی با این مطالب مطابقت دارد. پژوهشگران بیان کردند با افزایش شدت تنش خشکی میزان پایداری غشاء سلولی کاسته شده است و چنانچه تنش خشکی در مراحل انتهایی تر رشد رخ دهد شدت نشت از دیواره سلولی افزایش یافته و پایداری غشاء کمتر می‌شود (Quandahor et al., 2019). در ارزیابی خسارت سلولی شاخص پایداری غشاء به عنوان نفوذپذیری غشاء مورد استفاده قرار گرفت، نتایج نشان داد که تخلیه رطوبت خاک تأثیر معنی‌داری بر کاهش پایداری غشاء سلولی دارد (Dashti et al., 2014). با توجه به شاخص‌های فیزیولوژیکی و مکانیسم‌های مورد مطالعه در این پژوهش، به احتمال زیاد افزایش کربوهیدرات‌های محلول باعث افزایش پتانسیل اسمزی شده و باعث حفظ آب درون سلول در نتیجه حفاظت از ساختار غشاء و جلوگیری از پراکسیداسیون غشاء شده است.

جدول ۳- اثر تیمارهای آبیاری و کود فسفات در مراحل مختلف رشد بر محتوای نسبی آب برگ، پایداری غشاء و پتانسیل اسمزی در سیبزمینی
Table 3- Effect of irrigation and phosphate fertilizer treatments at different growth stages on relative water content, membrane stability index and osmotic potential in potato

Stages مرحله	Irrigation آبیاری	Relative water content محتوای نسبی آب (%)		Membrane stability index شاخص پایداری غشاء (%)		Osmotic potential پتانسیل اسمزی (MPa)	
		25	31	25	31	25	31
Flowering گلدهی	Control کنترل	71.9 ^{ab}	77.0 ^a	44.2 ^a	30.7 ^b	1.4 ^b	1.4 ^{bc}
	Deficit irrigation ₁ کم آبیاری ۱	69.2 ^b	67.9 ^b	31.0 ^b	37.6 ^{ab}	1.4 ^{bc}	1.3 ^c
	Partial root drying ₁ خشک کردن جزئی ریشه ۱	66.6 ^b	69.2 ^b	42.4 ^a	32.5 ^b	1.6 ^a	1.5 ^{ab}
21 days after flowering ۲۱ روز پس از گلدهی	Control کنترل	72.0 ^a	74.5 ^a	34.3 ^a	17.9 ^c	1.4 ^c	1.4 ^c
	Deficit irrigation ₁ کم آبیاری ۱	69.8 ^{ab}	67.7 ^{ab}	23.7 ^{bc}	21.6 ^c	1.6 ^b	1.6 ^b
	Deficit irrigation ₂ کم آبیاری ۲	67.2 ^{ab}	57.1 ^c	16.3 ^c	18.0 ^c	2.0 ^a	2.1 ^a
	Partial root drying ₁ خشک کردن جزئی ریشه ۱	66.6 ^{a-c}	65.7 ^{a-c}	20.2 ^c	18.2 ^c	1.7 ^b	1.7 ^b
	Partial root drying ₂ خشک کردن جزئی ریشه ۲	60.2 ^{bc}	70.5 ^a	20.0 ^c	30.7 ^b	2.0 ^a	1.7 ^b

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند. تیمارهایی که از ابتدای دوره رشد تنش خشکی اعمال شدند با عدد ۱ و تیمارهایی که بیست و یک روز پس از گلدهی تیمار خشکی اعمال شدند با عدد ۲ نشان داده شدند.

In each column means followed by the same letters are not significantly different ($p \leq 0.05$), at 5% probability level based on LSD. Treatments that were applied from the beginning of the growth period with the number 1 and the treatments that were applied twenty one days after flowering were indicated by the number 2.

خشک کردن جزئی ریشه نیمی از ریشه در حالت خشکی قرار دارد تا با لقا اسیدآسیزیک باعث افزایش مواد محلول سلول و افزایش قدرمطلق پتانسیل اسمزی و تحمل بهتر تنش شود. به همین دلیل در آخر فصل گیاهان این تیمار آبیاری و تیمار آبیاری کامل سبز بودند ولی تیمار کم‌آبیاری خشک شده بودند.

ارتفاع بوته

در مرحله ۲۱ روز پس از گلدهی، بیشترین ارتفاع بوته در تیمار آبیاری خشک کردن جزئی منطقه ریشه از زمان گلدهی به ثبت رسید. تیمار کم‌آبیاری کل دوره رشد و تیمار خشک کردن جزئی منطقه ریشه کل دوره رشد در رده دوم قرار گرفتند (جدول ۴).

تأثیر افزایش کود فسفات بر ارتفاع بوته معنی‌دار بود (جدول ۵). با افزایش مقدار فسفر از 25mg.Kg^{-1} به 31mg.Kg^{-1} ارتفاع بوته شش سانتی‌متر افزایش یافته است (جدول ۵). برهمکنش کود فسفات و تیمارهای آبیاری بر ارتفاع بوته حاکی از تفاوت معنی‌دار بین تیمارها بود (جدول ۶). تیمار آبیاری کامل و کاربرد 31mg.Kg^{-1} فسفات در زمان گلدهی بیشترین ارتفاع بوته را به ثبت رساند و با تمام تیمارهای خشکی تفاوت معنی‌دار داشت؛ و تیمار آبیاری کامل و سطح کاربرد 25mg.Kg^{-1} فسفات در رده دوم قرار گرفته است و با تیمار کم‌آبیاری کل دوره رشد تفاوت معنی‌دار داشت. با کاربرد 31mg.Kg^{-1} فسفات، ارتفاع بوته در تمام تیمارها افزایش پیدا کرد و تیمار کم‌آبیاری کل دوره رشد پایین‌ترین ارتفاع بوته را دارا بود.

در مرحله ۲۱ روز پس از گلدهی، در سطوح مختلف کود فسفات بین تیمارهای مختلف آبیاری تفاوت معنی‌دار وجود داشت (جدول ۶). تیمار خشک کردن جزئی منطقه ریشه کل دوره رشد و کاربرد 31mg.Kg^{-1} فسفات با بیشترین ارتفاع بوته در رده اول و تیمار کم‌آبیاری کل دوره رشد تیمار خشک کردن جزئی منطقه ریشه و کاربرد 25mg.Kg^{-1} فسفات با کاربرد 31mg.Kg^{-1} فسفات، کمترین ارتفاع بوته را دارا بود (جدول ۶). با افزایش سطح فسفر خاک، ارتفاع بوته در تمام تیمارهای آبیاری به‌طور معنی‌دار افزایش پیدا کرد.

در روش آبیاری خشک کردن جزئی ریشه ارتفاع بوته سیب‌زمینی بیشتر از آبیاری کامل بود (Roosta et al., 2010) که این نتایج با مرحله پس از گلدهی در این آزمایش مطابقت دارد. تنش خشکی بر ارتفاع، وزن خشک ریشه و زیست‌توده خیار تأثیر معنی‌داری نداشت (Bayat et al., 2013). افزایش میزان فسفر خاک باعث افزایش ارتفاع و رشد گیاه سیب‌زمینی شد و ارتفاع بوته در رژیم‌های آبیاری کم‌آبیاری و خشک کردن جزئی ریشه مشابه یکدیگر بود (Sun et al., 2015).

با افزایش کاربرد کود فسفات از 25mg.Kg^{-1} به 31mg.Kg^{-1} در مرحله گلدهی میزان پتانسیل اسمزی کاهش یافت؛ درحالی‌که در مرحله ۲۱ روز پس از گلدهی با کاربرد 31mg.Kg^{-1} فسفر، پتانسیل اسمزی کاهش معنی‌داری نشان نداد (جدول ۳).

برهمکنش کاربرد کود فسفات و تیمارهای آبیاری نشان داده است در مرحله گلدهی با کاربرد 25mg.Kg^{-1} فسفر میزان پتانسیل اسمزی در تیمار خشک کردن جزئی ریشه با $1/6$ مگاپاسگال، بیشترین مقدار و $12/5$ درصد از تیمار شاهد بیشتر بود و با آن تفاوت معنی‌دار داشت. با افزایش کود فسفات به 31mg.Kg^{-1} میزان پتانسیل اسمزی کاهش یافت و اختلاف بین تیمار خشک کردن جزئی ریشه در کل دوره رشد و تیمار آبیاری کامل معنی‌دار نبود، ولی با تیمار کم‌آبیاری در کل دوره رشد تفاوت معنی‌دار داشت (جدول ۳).

در مرحله ۲۱ روز پس از گلدهی در سطح 25mg.Kg^{-1} کود فسفات بیشترین مقدار پتانسیل اسمزی با دو مگا پاسگال به تیمار خشک کردن جزئی ریشه از زمان گلدهی و تیمار کم‌آبیاری از زمان گلدهی اختصاص یافت و با دیگر تیمارهای آبیاری تفاوت معنی‌دار داشتند و تیمارهای خشک کردن جزئی ریشه در کل دوره رشد و تیمار کم‌آبیاری در کل دوره رشد با ثبت پتانسیل اسمزی $1/7$ مگاپاسگال و 15 درصد کمتر نسبت به آن‌ها، در رده دوم قرار گرفتند. میزان پتانسیل اسمزی در تیمار آبیاری کامل در کمترین مقدار بود. با افزایش کود فسفات، تیمار کم‌آبیاری از زمان گلدهی بیشترین میزان پتانسیل اسمزی را به خود اختصاص داد. تفاوت بین تیمار خشک کردن جزئی ریشه از زمان گلدهی با دو تیمار دیگر خشکی معنی‌دار نبود و همچنان کمترین میزان پتانسیل اسمزی به تیمار آبیاری کامل تعلق گرفت (جدول ۳).

افزایش غلظت مواد محلول سلول و حفظ فشار آماس را تنظیم اسمزی گویند؛ و مهم‌ترین مکانیسم در حفظ فعالیت‌های فیزیولوژیکی از جمله پتانسیل آب برگ است و در بسیاری از گیاهان حفظ تورژانس توسط تنظیم اسمزی موجب بهبود عملکرد و زنده‌مانی گیاه در شرایط تنش خشکی است (Chai et al., 2016). نتایج پژوهشگران در گیاه نخود نشان داد در تیمارهای تحت تنش خشکی رطوبت آب برگ به‌طور معنی‌داری کاهش یافت و به دنبال آن با غلیظ شدن مواد درون یاخته‌ای، میزان قدر مطلق پتانسیل اسمزی برگ در تیمارهای تحت تنش نسبت به شاهد به‌طور معنی‌دار افزایش پیدا کرد (Zare Mehrjerdi et al., 2016). فرض بر این است که تنظیم اسمزی در برگ‌ها و ایجاد مکش منفی به درون یاخته‌ها باعث افزایش توانایی گیاه برای جذب آب از خاک و در نتیجه بهبود توانایی گیاه برای تحمل به خشکی می‌شود (Yactayo et al., 2013). در این پژوهش با اعمال تنش خشکی قدرمطلق پتانسیل اسمزی افزایش یافته و این به دلیل افزایش مواد محلول داخل سلول است در تیمار

جدول ۴- اثر کم‌آبیاری و خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه بر ارتفاع بوته، زیست‌توده، وزن غده و کارایی مصرف آب در سبب‌زمینی در مراحل مختلف رشد

Table 4- Effect of deficit irrigation and partial root zone drying on, plant height, biomass, tuber weight and water use efficiency of potato at different growth stages

Stages مرحله	Irrigation آبیاری	Plant height ارتفاع بوته (cm)	Biomass زیست‌توده (g.plant ⁻¹)	Tuber weight وزن غده (g.plant ⁻¹)	Water use efficiency کارایی مصرف آب
Flowering گلدهی	Control کنترل	67.16 ^a	-	-	-
	Deficit irrigation 1 کم آبیاری ۱	58.39 ^b	-	-	-
	Partial root drying 1 خشک کردن جزئی ریشه ۱	58.90 ^b	-	-	-
21 days after flowering ۲۱ روز پس از گلدهی	Control کنترل	67.2 ^a	14.6 ^a	311 ^a	5.39 ^a
	Deficit irrigation 1 کم آبیاری ۱	58.4 ^b	9.90 ^b	145 ^{cd}	5.01 ^{ab}
	Deficit irrigation 2 کم آبیاری ۲	66.7 ^a	10.60 ^b	156 ^{bc}	3.46 ^c
	Partial root drying 1 خشک کردن جزئی ریشه ۱	57.7 ^b	9.73 ^b	122 ^d	4.84 ^{ab}
	Partial root drying 2 خشک کردن جزئی ۲	71.4 ^a	13.7 ^a	178 ^b	4.57 ^b

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، با یکدیگر تفاوت معنی‌داری ندارند. تیمارهایی که از ابتدای دوره رشد اعمال شدند با عدد ۱ و تیمارهایی که بیست‌ویک روز پس از گلدهی اعمال شدند با عدد ۲ نشان داده شدند.

In each column means followed by the same letters are not significantly different ($p \leq 0.05$), at 5% probability level based on LSD. Treatments that were applied from the beginning of the growth period with the number 1 and the treatments that were applied twenty one days after flowering were indicated by the number 2.

جدول ۵- اثر کود فسفات بر ارتفاع بوته، زیست‌توده، وزن غده و کارایی مصرف آب سبب‌زمینی در مراحل مختلف رشد

Table 5- Effect of phosphate fertilizer on plant height, biomass, tuber weight and water use efficiency potato leaves at different growth stages

Stages مرحله	Plant height ارتفاع بوته (cm)		Biomass زیست‌توده (g.plant ⁻¹)		Tuber weight وزن غده (g.plant ⁻¹)		Water use efficiency کارایی مصرف آب	
	Triple superphosphate (mg.Kg ⁻¹) سوپرفسفات تریپل							
	25	31	25	31	25	31	25	31
Flowering گلدهی	59.43 ^b	63.53 ^a	-	-	-	-	-	-
21 days after flowering ۲۱ روز پس از گلدهی	61.71 ^b	67.5 ^a	10.8 ^b	12.6 ^a	175 ^a	189 ^a	4.58 ^a	4.74 ^a

در هر صفت، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

In each treat means followed by the same letters are not significantly different ($p \leq 0.05$), at 5% probability level based on LSD.

استفاده بهتر از نیتروژن خاک، ارتفاع بوته از آبیاری کامل نیز بیشتر بود.

زیست‌توده

میزان زیست‌توده گیاه سبب‌زمینی در تیمارهای مختلف آبیاری

با اعمال روش‌های کم‌آبیاری و خشک کردن جزئی ریشه از ابتدای رشد، گیاه از ابتدا تحت شرایط تنش قرار گرفته و ارتفاع بوته کاهش یافته ولی در روش خشک کردن جزئی ریشه بعد از گلدهی، چون همیشه نیمی از ریشه در حالت هیدراته قرار دارد گیاه کاهش ارتفاع چندانی نداشته و با افزایش کود فسفر و رشد ریشه بیشتر و

با توجه به نوع محصول و زمان وقوع کمبود آب حساسیت گیاه به کمبود آب متفاوت است. در گیاه برنج تیمار کم‌آبیاری در مرحله پنجه‌زنی فعال تعداد پنجه، ساقه، خوشه و تعداد سنبلچه را به‌طور قابل توجهی کاهش داد و در نهایت منجر به کاهش عملکرد دانه شد (Hussain et al., 2018). طی مراحل تاسل‌دهی ذرت مدت‌زمان کوتاه کمبود آب، ۳۰ درصد تولید زیست‌توده و ۴۰ درصد عملکرد دانه را کاهش داد (Chai et al., 2016). تنش آب در سویا (*Glycine max*) هنگامی که کم‌آبیاری در زمان اوایل گلدهی و در مرحله پایان گلدهی اعمال شد به میزان ۹ تا ۱۳ درصد، در زمان توسعه غلاف ۴۵ درصد و در هنگام انتهای غلاف دهی ۴۶ درصد کاهش عملکرد را موجب گردید (Chai et al., 2016). نتایج مطالعه دیگر میان سه رژیم آبیاری، نشان داد در گیاه سیب‌زمینی گیاهانی که تحت شرایط آبیاری کامل رشد می‌کنند، ماده خشک اندام هوایی و گیاهانی که تحت تنش خشکی جزئی منطقه ریشه رشد کرده بودند، ماده خشک ریشه به‌طور قابل توجهی بالاتر بود و پس از آن گیاهان تحت شرایط کم‌آبیاری پایین‌ترین ماده خشک را تولید کردند (Sun et al., 2015).

تفاوت معنی‌داری با یکدیگر داشتند (جدول ۴). در مرحله ۲۱ روز پس از گلدهی تیمار خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه با تیمار آبیاری کامل تفاوت آماری نداشت. تیمارهای کم‌آبیاری، کم‌آبیاری کل دوره رشد و خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه کل دوره رشد با یکدیگر تفاوت معنی‌داری نداشتند و در یک گروه آماری قرار گرفتند (جدول ۴). با افزایش کود فسفات میزان زیست‌توده گیاه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت و در کل تیمارها بین ۲ تا ۲۸ درصد افزایش زیست‌توده مشاهده شد (جدول ۵). برهمکنش تیمارهای آبیاری و کاربرد کود فسفات بر میزان زیست‌توده سیب‌زمینی رقم فونتانه نشان داد باوجوداین که در تیمار آبیاری کامل با افزایش کود فسفات میزان زیست‌توده نیز افزایش یافت ولی در تیمارهای خشکی کاربرد کود فسفات اثر معنی‌داری بر زیست‌توده گیاه نداشت (جدول ۶). با افزایش کود فسفات از 25 mg.Kg^{-1} به مقدار 31 mg.Kg^{-1} مقدار زیست‌توده، در تیمار آبیاری کامل و خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه، به ترتیب ۲۸ و ۱۷/۴ درصد افزایش یافت و بقیه تیمارهای خشکی با یکدیگر تفاوت آماری معنی‌داری نداشتند (جدول ۶).

جدول ۶- اثر تیمارهای آبیاری و کود فسفات در مراحل مختلف رشدی بر ارتفاع بوته، زیست‌توده، وزن غده و کارایی مصرف آب در سیب‌زمینی

Table 6- Effect of irrigation and phosphate fertilizer treatments at different growth stages on plant height, biomass, tuber weight and water use efficiency in potato

Stages مرحله	Irrigation آبیاری	Plant height ارتفاع گیاه (cm)		Biomass زیست‌توده (g.plant ⁻¹)		Tuber weight وزن غده (g.plant ⁻¹)		Water use efficiency کارایی مصرف آب	
		Triple superphosphate (mg.Kg ⁻¹) سوپرفسفات تریپل							
		25	31	25	31	25	31	25	31
Flowering گلدهی	Control کنترل	64.3 ^{ab}	70.0 ^a	-	-	-	-	-	-
	Deficit irrigation ₁ کم آبیاری ۱	56.2 ^c	60.6 ^{bc}	-	-	-	-	-	-
	Partial root drying ₁ خشک کردن جزئی ریشه ۱	57.8 ^{bc}	60.0 ^{bc}	-	-	-	-	-	-
21 days after flowering ۲۱ روز پس از گلدهی	Control کنترل	64.3 ^{c-e}	70.0 ^{a-c}	12.3 ^c	17.1 ^a	289 ^b	332 ^a	4.82 ^{bc}	5.97 ^a
	Deficit irrigation ₁ کم آبیاری ۱	56.2 ^f	60.0 ^{ef}	10.2 ^{de}	9.6 ^e	147 ^{de}	143 ^{de}	5.41 ^{ab}	4.63 ^{bc}
	Deficit irrigation ₂ کم آبیاری ۲	62.0 ^{d-f}	71.5 ^{ab}	9.7 ^e	11.6 ^{cd}	165 ^d	147 ^{de}	3.60 ^{de}	3.34 ^e
	Partial root drying ₁ خشک کردن جزئی ریشه ۱	55.4 ^f	60.0 ^{ef}	9.7 ^e	9.8 ^e	129 ^e	116 ^e	4.82 ^{bc}	4.87 ^{bc}
	Partial root drying ₂ خشک کردن جزئی ریشه ۲	67.4 ^b	75.4 ^a	12.4 ^c	15.0 ^b	148 ^d	207 ^c	4.25 ^{cd}	4.89 ^{bc}

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند. تیمارهایی که از ابتدای دوره رشد تنش خشکی اعمال شدند با عدد ۱ و تیمارهایی که بیست‌ویک روز پس از گلدهی تیمار خشکی اعمال شدند با عدد ۲ نشان داده شدند.

In each column means followed by the same letters are not significantly different ($p < 0.05$), at 5% probability level based on LSD. Treatments that were applied from the beginning of the growth period with the number 1 and the treatments that were applied twenty one days after flowering were indicated by the number 2

سطح فسفات، در تیمار خشک کردن جزئی ریشه از زمان گلدهی وزن غده در بوته با ۲۸ درصد افزایش به ۲۰۷ گرم در بوته رسید. وزن غده در بوته در سایر تیمارهای خشکی با افزایش میزان فسفات، کاهش یافت هرچند این کاهش از لحاظ آماری معنی دار نبود (جدول ۶).

به طور کلی کمبود رطوبت خاک از طریق افزایش مقاومت روزه‌ای برگ، کاهش میزان فتوسنتز برگ، زیست توده اندام هوایی، رشد غده باعث کاهش عملکرد غده می‌گردد (Obidiegwu et al., 2015). سیب‌زمینی به کمبود رطوبت خاک حساس بوده و کاهش حجم آبیاری به خصوص در زمان آغازش غده و غده بندی، باعث افت عملکرد غده این گیاه می‌گردد (Eskandari et al., 2011). در مطالعه‌ای تعداد غده بالا و عملکرد بالا در تیمارهای آبیاری کامل و خشک کردن جزئی ریشه مشاهده شد. یک رابطه خطی بین کاهش عملکرد غده و میزان آبیاری مشاهده کردند. با کاهش میزان آبیاری و اعمال تنش خشکی، درصد ماده خشک اندام‌های هوایی و غده‌ها در سیب‌زمینی افزایش می‌یابد ولی کاهش عملکرد را به دنبال دارد (Yactayo et al., 2013). کاهش پتانسیل آب اطراف ریشه و کمبود آب در دسترس گیاه باعث می‌شود آب کمتری به بافت‌های زنده گیاه هدایت و درصد ماده خشک غده‌ها افزایش می‌یابد (Gültekin and Eskandari et al., 2011; Ertek, 2018). با وجود اینکه با کاهش آب میزان عملکرد غده کاهش می‌یابد ولی در تیمار خشک کردن جزئی ریشه و فسفر بالا افت عملکرد غده نسبت به بقیه تیمارها کمتر است و این به دلیل آبیاری نیمی از ریشه و هیدراته نگه داشتن گیاه به طوری که محتوای آب برگ با تیمار آبیاری کامل تفاوت معنی‌داری ندارد و از طرفی استفاده بیشتر فسفر باعث رشد زیست‌توده بهتر نسبت به بقیه تیمارهای کم‌آبی بود. در نتیجه عملکرد غده نسبت به تیمار آبیاری کامل کمتر و از بقیه تیمارهای آبیاری بیشتر است.

کارایی مصرف آب

بررسی اثر تیمارهای آبیاری بر میزان کارایی مصرف آب گیاه سیب‌زمینی نشان داد بین تیمارهای آبیاری تفاوت معنی‌دار وجود دارد (جدول ۴). تیمار آبیاری کامل بیشترین مقدار زیست‌توده و در نتیجه بیشترین کارایی مصرف آب را به ثبت رساند (جدول ۵). کارایی مصرف آب در تیمار کم‌آبیاری کل دوره رشد و تیمار خشک کردن جزئی ریشه کل دوره رشد با تیمار آبیاری کامل تفاوت معنی‌دار نداشت (جدول ۴)؛ و کمترین کارایی مصرف آب با ۳۶ درصد کاهش نسبت به تیمار آبیاری کامل، در تیمار کم‌آبیاری از زمان گلدهی مشاهده شد.

برهمکنش تیمار آبیاری و کود فسفات نشان داد بیشترین کارایی مصرف آب در تیمار آبیاری کامل و کاربرد 31mg.Kg^{-1} کود فسفات است و با تیمار کم‌آبیاری کل دوره رشد و کاربرد 25mg.Kg^{-1} فسفات

پژوهشگران گزارش کردند وزن زیست‌توده سیب‌زمینی در دو روش کم‌آبیاری سنتی و خشک کردن جزئی ریشه حدود ۲۴ درصد کمتر از تیمارهای آبیاری کامل بوده است و مشابه بوده است (Liu et al., 2015). بیشترین مقدار وزن خشک اندام هوایی گیاه سیب‌زمینی مربوط به تیمار آبیاری کامل است (Golestani-Kermani et al., 2013). نتایج حاصل از اعمال تیمارهای مختلف آبیاری نشان داد که روش خشک کردن جزئی منطقه ریشه باعث کاهش کمتر وزن خشک سیب‌زمینی نسبت به کم‌آبیاری شد (Golestani-Kermani et al., 2013). اهمیت تغذیه فسفر برای تولید غده به خوبی اثبات شده است و کود فسفات به طور معنی‌داری باعث افزایش مقدار فسفر قابل دسترس گیاه در خاک و تأثیر مثبت روی زیست‌توده و افزایش کارایی مصرف آب در گیاه سیب‌زمینی شد. (Rosen et al., 2014). نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر نیز با این یافته‌ها مطابقت دارد و با توجه به افزایش ارتفاع بوته در تیمار خشک کردن جزئی ریشه و 31mg.Kg^{-1} کود فسفر، این تیمار آبیاری توانایی استفاده از نیتروژن قابل دسترس در انتهای فصل رشد را دارد و نسبت به دیگر تیمارهای خشکی بیشتر سبز می‌ماند و بعد از آبیاری کامل بیشترین زیست‌توده را دارد.

وزن غده در بوته

اثر تیمارهای مختلف آبیاری بر وزن غده در بوته حاکی از تفاوت معنی‌داری بین تیمارها بود (جدول ۴). در تیمار آبیاری کامل بیشترین وزن غده در بوته و تیمار خشک کردن جزئی ریشه کل دوره رشد با ۶۵ درصد کاهش نسبت به آبیاری کامل، کمترین وزن غده در بوته را به ثبت رساند. در رده دوم، تیمار خشک کردن جزئی ریشه از زمان گلدهی قرار گرفت و از سایر تیمارهای خشکی وزن غده در بوته بیشتری داشت و با تیمار آبیاری کامل تفاوت معنی‌دار داشت (جدول ۴).

افزایش کود فسفات از ۲۵ به 31mg.Kg^{-1} افزایش ۱۴ گرمی وزن غده در بوته را به دنبال داشت. ولی این افزایش وزن از لحاظ آماری معنی‌دار نبود (جدول ۵).

برهمکنش تیمار آبیاری و کود فسفات بر وزن غده در بوته حاکی از اختلاف معنی‌دار بین تیمارهای مختلف بود (جدول ۶). با کاربرد 25mg.Kg^{-1} کود فسفات تیمار آبیاری کامل بیشترین مقدار وزن غده در بوته را نشان داد و با تیمارهای خشکی در آن سطح فسفات تفاوت معنی‌دار داشت. تیمار خشک کردن جزئی ریشه کمترین مقدار وزن غده در بوته را دارا بود و با تیمار کم‌آبیاری از زمان گلدهی تفاوت معنی‌دار داشت (جدول ۶). با کاربرد 31mg.Kg^{-1} فسفات، وزن غده در بوته در تیمار آبیاری کامل به ۳۳۲ گرم در بوته رسید که ۱۳ درصد افزایش داشت و با تمام تیمارها تفاوت معنی‌دار داشت. با افزایش

می‌شود (Yactayo et al., 2013). تیمار خشک کردن جزئی ریشه در زمان بلوغ اعمال شود در مقایسه با روش‌های کم آبیاری، خشک کردن جزئی ریشه از ابتدای رشد و آبیاری کامل توانایی استفاده از نیتروژن قابل دسترس در انتهای فصل رشد دارد و نسبت به دیگر تیمارهای خشکی بیشتر سبز می‌ماند. این اثر احتمالاً پر شدن غده که در اواخر فصل رشد و در نتیجه نگهداری عملکرد انجام می‌شود را توضیح می‌دهد.

نتیجه گیری

با توجه به شاخص‌های فیزیولوژیکی و مکانیسم‌های مورد مطالعه در این پژوهش، با اعمال تنش خشکی قدرمطلق پتانسیل اسمزی ۳۰ درصد افزایش یافته که به دلیل افزایش مواد محلول درون سلول است. در تیمار خشک کردن جزئی ریشه نیمی از ریشه در حالت خشکی قرار دارد تا با القاء اسیدآسزیک باعث افزایش مواد محلول سلول و افزایش قدرمطلق پتانسیل اسمزی و تحمل بهتر تنش شود. به همین دلیل در آخر فصل گیاهان این تیمار آبیاری و تیمار آبیاری کامل سبز بودند ولی تیمار کم آبیاری خشک شده بودند.

در روش خشک کردن جزئی ریشه بعد از گلدهی، با افزایش کود فسفر، سبب رشد بیشتر ریشه و استفاده بهتر از نیتروژن خاک شده به طوری که ارتفاع بوته شش درصد از آبیاری کامل نیز بیشتر بود. با وجود اینکه با کاهش آب میزان عملکرد غده کاهش می‌یابد ولی در تیمار خشک کردن جزئی ریشه و فسفر بالا افت عملکرد غده نسبت به سایر تیمارهای خشکی ۲۰ درصد کمتر است و این به دلیل آبیاری نیمی از ریشه و هیدراته نگه داشتن گیاه می‌باشد، به طوری که محتوای آب برگ با تیمار آبیاری کامل تفاوت معنی‌داری ندارد و از طرفی استفاده بیشتر فسفر باعث رشد زیست‌توده بهتر نسبت به سایر تیمارهای کم آبی بود. در نتیجه عملکرد غده نسبت به تیمار آبیاری کامل کمتر و از بقیه تیمارهای آبیاری ۳۰ درصد بیشتر است. بدلیل فراهمی فسفر در ۲۵ میلی گرم در کیلوگرم با افزایش فسفر پایداری غشاء، پتانسیل اسمزی و وزن غده تحت تاثیر افزایش فسفر قرار گرفتند ولی این تاثیر معنی‌دار نبود. اگر تیمار خشک کردن جزئی ریشه در زمان بلوغ اعمال شود در مقایسه با روش‌های کم آبیاری، خشک کردن جزئی ریشه از ابتدای رشد و آبیاری کامل توانایی استفاده از نیتروژن قابل دسترس در انتهای فصل رشد را دارد و نسبت به دیگر تیمارهای خشکی سبزمانی بیشتری دارد. این اثر احتمالاً پر شدن غده در اواخر فصل رشد و در نتیجه نگهداری عملکرد را توضیح می‌دهد. روش خشک کردن جزئی ریشه روش مناسب‌تری نسبت به روش کم آبیاری از نظر صرفه‌جویی در مصرف آب و حفظ عملکرد است.

تفاوت آماری معنی‌داری نداشت (جدول ۶). کمترین کارایی مصرف آب در تیمار کم آبیاری کل دوره رشد و کاربرد 31mg.Kg^{-1} فسفات مشاهده شد و با تیمار کم آبیاری کل دوره رشد و کاربرد 25mg.Kg^{-1} فسفات تفاوت معنی‌دار نداشت (جدول ۶).

کارایی مصرف آب، ماده خشک تولید شده در واحد مصرف آب می‌باشد. ژنوتیپ‌ها و محصولات مختلف تحت خشکی کارایی مصرف آب متفاوت دارند (Fahad et al., 2017). پژوهشگران گزارش دادند کارایی مصرف آب بالاتر در گندم و گوجه‌فرنگی تحت خشکی نسبت به شاهد عمدتاً به دلیل کاهش میزان تعرق در خشکی بود (Nadeem et al., 2014).

کارایی مصرف آب در روش خشک کردن جزئی ریشه (کم آبیاری متناوب) نسبت به کم آبیاری سنتی افزایش یافته است که این امر نشان‌دهنده استفاده مناسب‌تر از آب در روش کم آبیاری متناوب است (Golestani-Kermani et al., 2013). در کم آبیاری متناوب افزایش کارایی مصرف آب به دلیل است که کاهش هدایت روزنه‌ها، تعرق را بیشتر از فتوسنتز کاهش می‌دهد. درحالی‌که در تنش‌های شدید و طولانی مدت روزنه‌ها کاملاً بسته شده و فتوسنتز پایین آمده و باعث کاهش کارایی مصرف آب و در نهایت کاهش عملکرد گیاه می‌شود (۱۳). پژوهشگران حداکثر راندمان مصرف آب را از کم آبیاری متناوب (خشک کردن جزئی ریشه) به دست آورده‌اند (Yactayo et al., 2013). درحالی‌که برخی پژوهشگران، بیشترین مقدار راندمان مصرف آب را از آبیاری کامل گزارش کرده‌اند. تفاوت در شرایط اقلیمی و محیطی، بافت خاک، شدت تنش وارد شده و نوع رقم مورد استفاده در این گزارش‌ها و اینکه همگی در مزرعه انجام شده‌اند، تفاوت‌های ارائه شده را توجیه می‌کند. در مجموع، مطالب ذکر شده روش کم آبیاری متناوب (خشک کردن جزئی ریشه) را در استفاده از آب نسبت به آبیاری کامل و کم آبیاری سنتی کارایی بهتری را نشان می‌دهد (Golestani-Kermani et al., 2013). کارایی مصرف آب یک صفت مطلوب برای ایجاد تحمل به خشکی در گیاهان در مطالعات مدنظر می‌باشد در واقع گیاهانی که از کارایی مصرف آب بالاتری برخوردار هستند به ازای مصرف آب کمتر تولید بیشتری دارند (Zare Mehrjerdi et al., 2016). تیمار خشک کردن جزئی ریشه ممکن است از طریق ارتقاء رشد ریشه موجب بهره‌برداری بهتر از ذخایر آب خاک شود. گرچه در این مطالعه میزان ریشه اندازه‌گیری نشد اما مطالعات متعددی نشان داده‌اند که خشک کردن جزئی ریشه عمق ریشه و تراکم ریشه را افزایش می‌دهد و هدایت هیدرولیکی بالاتر ریشه با محدودیت تأمین آب یافت می‌شود (Chai et al., 2016). همچنین سایر پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که تیمار خشک کردن جزئی ریشه هنگامی که پس از شروع بلوغ اعمال شود، تنها استراتژی صرفه‌جویی در آب قادر به حفظ عملکرد است و باعث افزایش قابل توجه در کارایی مصرف آب

منابع

1. Bayat, H., Mardani, H., Arouie, H., & Salahvarzi, Y. (2011). Effects of salicylic acid on morphological and physiological characteristics of cucumber seedling (*Cucumis sativus* cv. Super Dominus) under drought stress. *Journal of Plant Production* 18(3): 63-76. (In Persian with English abstract)
2. 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): 1-21.
3. Chaki, M., Begara-Morales, J.C., & Barroso, J.B. (2020). Oxidative stress in plants. *Antioxidants* 9(6):481. <https://doi.org/10.3390/antiox9060481>.
4. Dashti, M., Kafi, M., Tavakoli, H., & Mirza, M. (2014). The effect of water deficit stress on water relations, photosynthesis and accumulation of osmolate in Nowruzak medicinal plant. *Iranian Journal of Crop Research* 12: 813-821. (In Persian with English abstract)
5. Eskandari, A., Khazaei, H.R., Nezami, A., & Kafi, M. (2011). Study of the effect of irrigation regime on yield and some qualitative characteristics of three potato cultivars (*Solanum tuberosum* L.). *Journal of Soil and Water, Agricultural Sciences and Industries* 25(2): 247-240. (In Persian with English abstract)
6. Fahad, S., Bajwa, A.A., Nazir, U., Anjum, S.A., Farooq, A., Zohaib, A., Sadia, S., Nasim, W., Adkins, S., Saud, S., & Ihsan, M.Z. (2017). Crop production under drought and heat stress: plant responses and management options. *Frontiers in Plant Science* 8: 1147. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01147>.
7. Farooq, M., Hussain, M., Wahid, A., & Siddique, K.H. (2012). Drought stress in plants: an overview. *Plant Responses to Drought Stress* 1-33. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-32653-0>.
8. Golestani-Kermani, S., Nouri-Emamzadei, M.R., Shayannejad, M., Shahnazari, A., & Mohammadkhani, A. (2013). Effects of water stress on quantitative and qualitative properties of potato crop (*Agria* c.v.) in deficit irrigation and partial root zone drying techniques. *Science and Engineering Irrigation* 37(3): 123-135. (In Persian with English abstract)
9. Gültekin, R., & Ertek, A. (2018). Effects of deficit irrigation on the potato tuber development and quality. *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences* 2(3): 93-98. <https://doi.org/10.31015/jaefs.18015>.
10. Heath, R.L., & Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics* 125(1): 189-198.
11. Heidari, N., Puryousef, M., & Tavakoli, A. (2014). The effect of drought stress on photosynthesis, its related parameters and relative water content of *Pimpinella anisum* L. *Iranian Journal of Biology* 27: 829-839. (In Persian with English abstract)
12. Hussain, H.A., Hussain, S., Khaliq, A., Ashraf, U., Anjum, S.A., Men, S., & Wang, L. (2018). Chilling and drought stresses in crop plants: implications, cross talk, and potential management opportunities. *Frontiers in Plant Science* 9: 393. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00393>.
13. Kasman, A., & Duman, Y.S. (2015). CO₂ emissions, economic growth, energy consumption, trade and urbanization in new EU member and candidate countries: a panel data analysis. *Economic Modelling* 44: 97-103. <http://doi.org/10.1016/j.econmod.2014.10.022>.
14. Liu, G., Rubaek, C.H., Liu, F., & Andersen, M.N. (2015). Effect of partial root-zone drying and deficit irrigation on nitrogen and phosphorus uptake in potato. *Agriculture Water Management* 59: 66-76.
15. Nadeem, S.M., Ahmad, M., Zahir, Z.A., Javaid, A., & Ashraf, M. (2014). The role of mycorrhizae and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in improving crop productivity under stressful environments. *Biotechnology Advances* 32(2): 429-448. <http://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.12.005>.
16. Obidiegwu, J.E., Bryan, G.J., Jones, H.G., & Prashar, A. (2015). Coping with drought: stress and adaptive responses in potato and perspectives for improvement. *Frontiers in Plant Science* 6: 542. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00542>.
17. Quandahor, P., Lin, C., Gou, Y., Coulter, J.A., & Liu, C. (2019). Leaf morphological and biochemical responses of three potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars to drought stress and aphid (*Myzus persicae* Sulzer) infestation. *Insects* 10(12): 435. <https://doi.org/10.3390/insects10120435>.
18. Roosta, H.R., Nazari F., & Shahnazari, A. (2010). Comparative effects of conventional irrigation (CI) and partial root zone drying (PRD), and various sources of nitrogen on growth and yield in potato under field condition. *Advance in Environmental Biology* 4(1): 117-124.
19. Rosen, C.J., Kelling, K.A., Stark, J.C., & Porter, G.A. (2014). Optimizing phosphorus fertilizer management in potato production. *American Journal of Potato Research* 91(2): 145-160. <https://doi.org/10.1007/s12230-014-9371-2>.
20. Shi, S., Fan, M., Iwama, K., Li, F., Zhang, Z., & Jia, L. (2015). Physiological basis of drought tolerance in potato grown under long-term water deficiency. *International Journal of Plant Production* 9(2): 305-320.

21. Shock, C.C., Wang, F.X., Flock, R., Feibert, E.B.G., Shock, C.A., & Pereira, A. (2013). Irrigation monitoring using soil water tension. file:///C:/Users/JAFARN~1/AppData/Local/Temp/em8900.pdf
22. Sun, Y., Cui, X., & Liu, F. (2015). Effect of irrigation regimes and phosphorus rates on water and phosphorus use efficiencies in potato. *Scientia Horticulturae* 190: 64-69. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.04.017>.
23. Thalmann, M., & Santelia, D. 2017. Starch as a determinant of plant fitness under abiotic stress. *New Phytologist* 214(3): 943-951. <https://doi.org/10.1111/nph.14491>.
24. Yactayo, W., Ramírez, D.A., Gutiérrez, R., Mares, V., Posadas, A., & Quiroz, R. (2013). Effect of partial root-zone drying irrigation timing on potato tuber yield and water use efficiency. *Agricultural Water Management* 123: 65-70. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.03.009>.
25. Zare Mehrjerdi, M., Bagheri, A., Bahrami, A.R., Nabati, J., & Masoumi, A. (2016). The effect of drought stress on osmotic regulation, proline variability and root and leaf soluble sugars and its relationship with drought tolerance in twelve chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes. *Iranian Crop Science* 47(3): 462-451. (In Persian)