مقاله پژوهشی

اثر محلول‌پاشی بور و پتاسیم بر واکنش‌های مورفوفیزیولوژیک و عملکرد ریشه چغندرقند تحت تیمارهای تنش خشکی

نیما یداللهی فارسانی، محمودرضا تدین*، مجتبی کریمی

گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۲۱، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۹/۱۰/۰۹)

چکیده

تنش خشکی عامل اصلی کاهش عملکرد چغندرقند است. از این رو به‌کار بردن راهکارهایی جهت کاهش آثار سوء آن ضروری است؛ بنابراین به‌منظور بررسی اثر تیمارهای محلول‌پاشی بر برخی صفات کیفی، مورفوفیزیولوژیک و عملکرد ریشه چغندرقند تحت شرایط تنش خشکی، آزمایشی به‌صورت کرت‌های یکبار خردشده در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۱۳۹۸ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شهرکرد انجام شد. تیمارهای آبیاری شامل: آبیاری پس از ۷۰، ۱۰۰ و ۱۳۰ (به‌ترتیب I_3, I_2, I_1) میلی‌متر تبخیر تجمعی از تشتک تبخیر کلاس A در کرت‌های اصلی و تیمارهای کودی به‌صورت محلول‌پاشی شامل: شاهد (بدون مصرف کود)، پتاسیم (K)، بور (B) و تلفیق بور + پتاسیم (B + K) در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. نتایج نشان داد؛ اثر تیمارهای آبیاری، محلول‌پاشی و برهمکنش آبیاری × محلول‌پاشی بر شاخص سطح برگ، محتوای پرولین برگ، محتوای نسبی آب برگ، درصد قند قابل استحصال، محتوای سدیم و پتاسیم ریشه چغندرقند معنی‌دار شد. بیشترین شاخص سطح برگ و محتوای نسبی آب برگ مربوط به محلول‌پاشی بور + پتاسیم و تیمار آبیاری I_1 بود. بالاترین محتوای پرولین برگ از محلول‌پاشی پتاسیم و تیمار آبیاری I_3 به‌دست آمد. بیشترین درصد قند قابل استحصال از محلول‌پاشی بور و تیمار آبیاری I_2 حاصل شد. کمترین محتوای پتاسیم و سدیم ریشه نیز به محلول‌پاشی بور + پتاسیم و آبیاری I_1 اختصاص داشت. هم‌چنین اثر تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی بر وزن خشک کل بوته، شاخص سبزینگی برگ، ضریب استحصال شکر، عملکرد قند ناخالص و عملکرد ریشه معنی‌دار شد. به‌طوری‌که بیشترین مقادیر صفات ذکرشده از محلول‌پاشی بور + پتاسیم و تیمار آبیاری I_1 به‌دست آمد. برهمکنش آبیاری × محلول‌پاشی اثر معنی‌دار بر این صفات نداشت. به‌طورکلی محلول‌پاشی عناصر بور و پتاسیم اثر معنی‌داری بر صفات مورفوفیزیولوژیک، کمی و کیفی چغندرقند داشت و آثار نامطلوب تنش خشکی را می‌کاهد که احتمالاً به‌واسطه نقش مهم این عناصر در فرایند تنظیم اسمزی و سایر واکنش‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان است؛ بنابراین در زراعت چغندرقند محلول‌پاشی عناصر بور و پتاسیم، خصوصاً در شرایط تنش خشکی، توصیه می‌شود.

کلمات کلیدی: آبیاری، پرولین، تنظیم اسمزی، قند قابل استحصال

مقدمه

چغندرقند به‌عنوان اصلی‌ترین منابع تولید شکر در ایران و جهان از دیرباز مورد توجه بوده است. سطح زیرکشت چغندرقند در جهان در سال ۲۰۱۷ بیش از ۴/۸ میلیون هکتار

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: mrtadayon@yahoo.com

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.42.5.7]

بوده است (Studnicki *et al*., 2019). پتانسیل عملکرد ریشه چغندرقند به عواملی همچون: میزان دما در مراحل حساس رشد، رطوبت خاک، دسترسی به عناصر غذایی ضروری و میزان تابش خورشیدی دریافت شده توسط کانوپی بستگی دارد (Zaki, 2018). چغندرقند به خشکی نسبتاً متحمل بوده و می‌تواند دوره‌های کوتاه مدت کم‌آبی را به‌خوبی تحمل کند. ویژگی‌هایی که موجب تحمل این گیاه به خشکی می‌شوند عبارتند از: طولانی‌بودن مرحله رشد رویشی بدون داشتن یک دوره حساس گلدهی، دارابودن سیستم ریشه‌ای عمیق و داشتن قابلیت تنظیم اسمزی (Cooke and Scott, 1993). با این وجود گزارش شده است که تنش خشکی عامل اصلی کاهش عملکرد چغندرقند است (Ober, 2001). به‌دست آوردن عملکردهای زیاد مستلزم تأمین رطوبت کافی طی دوره رشد فعال گیاه است، به‌ویژه اینکه تولید چغندرقند پرهزینه است و هرگونه کاهش عملکرد می‌تواند بازده اقتصادی گیاه را به‌شدت تحت تأثیر قرار داده و کشت آن را غیر اقتصادی سازد. مشاهده است که با افزایش تنش رطوبتی در چغندرقند عملکرد ریشه و محتوای قند کاهش و درصد قند ملاس افزایش می‌یابد (اسماعیلی و تدین، ۱۳۹۸). اگرچه غلظت قند در ریشه چغندرقند ممکن است به‌علت اعمال تنش رطوبتی ملایم، مقداری افزایش یابد؛ ولی بایستی دقت نمود که کل شکر تولیدی ممکن است به‌دلیل کاهش عملکرد ریشه، کاهش یابد (خواجه‌پور، ۱۳۹۱). بنابراین باتوجه به تأثیر تنش خشکی بر رشد و تولید چغندرقند، لازم است اثرات این تنش و راهکارهای مقابله با آن بیشتر مورد بررسی قرار گیرد.

تنش خشکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی است که باتوجه به موضوع گرمایش جهانی اهمیت بیشتری یافته است. خشکی بر مورفولوژی و فیزیولوژی گیاهان اثر گذاشته و موجب کاهش رشد و عملکرد آن‌ها می‌شود. تنش خشکی در گیاه همراه با به‌هم‌خورن شیب پتانسیل آب، از دست‌رفتن فشار آماس، شکست تمامیت غشا و درنهایت تغییر شکل طبیعی پروتئین‌ها است (کافی و همکاران، ۱۳۹۷). خشکی سبب سقط جنین در گل‌ها، عدم تعادل روابط مبدأ و مقصد و تأثیر بر مسیرهای متابولیکی گیاهان می‌شود (Farouk and Amany, 2012; Malekpoor *et al*., 2016). خشکی با تغییراتی که در فرایندهای بیوشیمیایی گیاهان ایجاد می‌کند سبب تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) می‌شود که به لیپیدها، اسیدهای نوکلئیک، پروتئین‌های قابل‌حل و رنگدانه‌های فتوسنتزی خسارت می‌زنند. هم‌چنین گونه‌های فعال اکسیژن منجر به نشت الکترولیت‌ها، توقف جریان الکترون در زنجیره انتقال الکترون و درنهایت کاهش تثبیت کربن توسط گیاه می‌شوند (Shabbir *et al*., 2016; Lang *et al*., 2018; Wada *et al*., 2019). گیاهان به‌منظور جلوگیری از آسیب‌های اکسیداتیو طی فرایند تنظیم اسمزی، غلظت مواد اسمولیت نظیر پرولین، سوربیتول، فنل و اسید آسکوربیک را افزایش می‌دهند (Zivcak *et al*., 2016).

روش‌های مختلفی به‌منظور کاهش آثار سوء تنش خشکی بر گیاهان از جمله: استفاده از ارقام مقاوم، تکنیک‌های بیوتکنولوژی و تغذیه کودی مناسب گیاه به‌کار برده می‌شود (Miransari, 2011). در حال حاضر کاربرد خارجی عناصر غذایی جهت کاستن از آسیب‌های ناشی از تنش خشکی مورد توجه قرار گرفته است. کاربرد پتاسیم (K) از طریق تنظیم اسمزی نقش مهمی در توسعه مکانیسم‌های مقاومت به تنش خشکی در گیاهان دارد و سبب حفظ فعالیت آنزیم‌ها، جذب آب و آماس سلولی می‌شود (Adams and Shin, 2014; Shafiq *et al*., 2015). هم‌چنین عنصر پتاسیم برای سنتز پروتئین‌ها، فتوسنتز، انتقال مواد در آوند آبکش و ایجاد تعادل بین کاتیون‌ها و آنیون‌ها لازم است (Draycott, 2008). تأمین پتاسیم کافی با حفظ فرایند تنظیم اسمزی و فشار تورگر منجر به رشد سلول‌ها و درنهایت رشد گیاه در شرایط خشکی می‌شود (Grzebisz *et al*., 2013). پتاسیم به‌عنوان یک اسمولیت نقش مهمی در تنظیم باز و بسته‌شدن روزنه‌ها و بنابراین کنترل اتلاف آب دارد. پتاسیم از طریق فراهم‌آوردن نیروی محرکه اسمزی باعث جریان آب به داخل واکوئل سلول‌های محافظ روزنه و بنابراین بازشدن روزنه‌ها می‌شود (Peiter, 2011). درنتیجه پتاسیم با کاهش مقاومت روزنه‌ای،

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.42.5.7]

سبب افزایش آسیمیلاسیون CO_2 می‌شود. پتاسیم همان‌طور که در بازشدن روزنه‌ها نقش دارد، در بسته‌شدن آن‌ها نیز بسیار مهم است. به این ترتیب که کاهش فشار آماس در سلول‌های اپیدرم ناشی از کمبود پتاسیم مانع از بسته‌شدن کامل روزنه‌ها می‌شود. هم‌چنین کمبود پتاسیم سبب افزایش تولید هورمون اتیلن می‌شود (Shin and Schachtman, 2004; Wang *et al*., 2013) که این هورمون آثار منفی بر پیام‌رسانی اسید آبسیزیک در هنگام بسته‌شدن روزنه‌ها دارد (Tanaka *et al*., 2005). علاوه بر این پتاسیم از طریق افزایش انتقال مواد فتوسنتزی و توسعه ریشه در شرایط تنش خشکی، آثار سوء تنش را کاهش داده و سبب افزایش کارایی مصرف آب در شرایط تنش خشکی می‌شود (ولدآبادی و علی‌آبادی فراهانی، ۱۳۸۷).

به‌طورکلی در اثر تنش خشکی میزان جذب پتاسیم در گیاه افزایش می‌یابد، اما در مواردی هم مشاهده شده که درصد پتاسیم در گیاهان تحت تنش خشکی کم‌تر بوده که به‌دلیل کاهش قابلیت دسترسی به این عنصر در شرایط کمبود رطوبت است. زیرا معمولاً پتاسیم در خاک توسط کانی‌های رسی مانند میکا، ورمیکولیت و... تثبیت می‌شود که میزان آن بستگی به نوع کانی‌های رسی، شرایط رطوبتی خاک، اسیدیته و... دارد (Zorb *et al*., 2014). به‌تدریج که خاک خشک می‌شود، کلوئیدهای رس با قدرت بیشتری یون یک‌ظرفیتی پتاسیم را به سطح خود جذب می‌کنند و مانع از آزادشدن آن به محلول خاک می‌شوند. هم‌چنین ازآنجا که در اثر تنش خشکی رشد کلی گیاه از جمله فعالیت جذبی ریشه‌ها کاهش می‌یابد، ریشه‌های گیاه توانایی جذب پتاسیم را از سطح کلوئیدهای رس نخواهند داشت و در نتیجه میزان جذب این عناصر در گیاه کاهش می‌یابد (Radin and Eidenbock, 1984). بنابراین به‌نظر می‌رسد در شرایط خشکی محلول‌پاشی پتاسیم از کاربرد خاکی آن مؤثرتر باشد.

مطالعات انجام‌شده توسط مهراندیش و همکاران (۱۳۹۷) نشان داد؛ استفاده از مقادیر بالای پتاسیم، به‌ویژه به شکل کلرید پتاسیم، جهت بهبود ویژگی‌های کیفی چغندرقند تحت شرایط آبیاری کامل و محدود قابل توصیه است. به‌طور مشابه طی پژوهشی مشخص شد؛ مصرف ۲۲۸/۵ کیلوگرم K_2O در هکتار سبب افزایش عملکرد ریشه و اندام هوایی چغندرقند شد (Ibrahim *et al*., 2002).

محلول‌پاشی عناصر پرمصرف نیتروژن، فسفر و پتاسیم عملکرد و کیفیت گیاهان زراعی مختلفی را افزایش می‌دهد (Ling and Silberbush, 2002). محلول‌پاشی سبب جذب سریع عناصر معدنی می‌شود که می‌تواند در طول فصل رشد انجام گیرد. در شرایط محلول‌پاشی محدودیت‌های مربوط به آبشویی، جذب توسط ذرات خاک و از دست‌رفتن به‌وسیله فرسایش وجود ندارد (Fernandez and Brown, 2013). در گیاه توتون (*Nicotiana rustica*) مشاهده شد در شرایط تنش خشکی کاربرد برگی یا محلول‌پاشی پتاسیم نسبت به کاربرد خاکی آن در بهبود تولید بیوماس ریشه، فتوسنتز برگ‌ها و پتانسیل آب در گیاه نقش مؤثرتری داشت (Bahrami-Rad and Hajiboland, 2017). در گندم محلول‌پاشی پتاسیم سبب بهبود تحمل به خشکی و رشد گیاه شد (Aown *et al*., 2012). در سیب‌زمینی نیز محلول‌پاشی پتاسیم عملکرد را افزایش داد (Tisdale *et al*., 1985). در گیاه آفتابگردان تحت تنش شوری محلول‌پاشی پتاسیم از منبع هیدروکسید پتاسیم (KOH) رشد و عملکرد گیاه را بهبود بخشید (Akram *et al*., 2007). در گوجه‌فرنگی محلول‌پاشی تکمیلی فسفر و پتاسیم منجر به افزایش غلظت کلروفیل و تولید ماده خشک در شرایط شوری شد (Kaya *et al*., 2001). بنابراین محلول‌پاشی پتاسیم به‌ویژه در شرایط محدودیت رطوبت خاک نقش مؤثری در تحمل گیاه به خشکی دارد. جذب پتاسیم از خاک به‌صورت فعال و به شکل یون پتاسیم (K^+) انجام می‌شود. چناچه پتاسیم به‌وسیله محلول‌پاشی در اختیار گیاه قرار گیرد، انرژی کمتری توسط گیاه برای جذب و انتقال آن مصرف می‌شود.

در تأمین نیاز کودی گیاهان علاوه بر عناصر پرمصرف همچون نیتروژن، فسفر، پتاسیم و... به عناصر کم‌مصرف مثل آهن، مس، روی، بور و... نیز بایستی توجه کافی شود. دسترسی پایین به عناصر ریزمغذی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مشکلی بزرگ به‌شمار می‌آید. بور مهم‌ترین عنصر کم‌مصرف مورد نیاز چغندرقند است؛ زیرا بدون مقدار کافی آن عملکرد و

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.42.5.7]

کیفیت ریشه‌ها به‌شدت کاهش می‌یابد. کمبود بور نه تنها علائم مشخصی در برگ چغندرقند ایجاد می‌کند، بلکه در دمبرگ، طوقه و ریشه نیز علائم کمبود مشاهده می‌شود (Cooke and Scott, 1993). در چغندرقند با به‌کار بردن بور عملکرد ریشه، اندام هوایی و عملکرد شکر سفید افزایش می‌یابد (Allison, 1996). مریستم‌های انتهایی ساقه، برگ‌های جوان و کامبیوم‌های تازه توسعه‌یافته حساس‌ترین قسمت‌های گیاه نسبت به کمبود بور هستند (Rowe, 1936).

بور نقش مهمی در طویل‌شدن و تقسیم‌شدن سلول‌ها (رشد)، تمایز بافت‌ها، متابولیسم کربوهیدرات‌ها و پروتئین‌ها، نفوذپذیری غشا و متابولیسم اکسین و فنول‌ها دارد. سنتز همی‌سلولز و لیگنین نیز نیازمند بور است (Draycott, 2008). کمبود بور در سطح وسیعی از مناطق چغندرکاری جهان وجود دارد و به‌ویژه در خاک‌های قلیایی و با بافت شنی و خشک دیده می‌شود (Cooke and Scott, 1993). گزارش شده است آثار مفید کاربرد بور به‌واسطه نقش آن در افزایش متابولیسم، رشدونمو گیاه است (Abido, 2012). طی پژوهشی مشاهده شد؛ با افزایش تدریجی غلظت بور از ۱۰۵ به ۲۱۰ پی‌پی‌ام (ppm) قطر و طول ریشه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (El-Geddawy and Makhlouf, 2015). گزارش شده است محلول‌پاشی بور به میزان یک کیلوگرم در هکتار عملکرد ریشه و قند را به‌ترتیب ۱۹/٤ و ۳۹/۵ درصد افزایش داد (Kristek *et al*., 2006).

در مجموع اگرچه چغندرقند گیاهی نسبتاً متحمل به خشکی است؛ اما به‌کارگیری روش‌هایی که بتوانند اثرات تنش خشکی را تعدیل نماید جهت دست‌یابی به عملکرد بالا بسیار مورد توجه است. بنابراین هدف از این مطالعه بررسی اثر محلول‌پاشی بور و پتاسیم، بر واکنش‌های مورفوفیزیولوژیک و عملکرد ریشه چغندرقند تحت تیمارهای تنش خشکی است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال زراعی ۱۳۹۸ در مزرعه پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد با عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۱ درجه شرقی، ارتفاع از سطح دریا ۲۰۵۰ متر، میانگین درجه حرارت ۱۱/۸ درجه سانتی‌گراد و میانگین سالانه بارندگی ۳۱۹ میلی‌متر و متوسط رطوبت نسبی ٤٦ درصد، اجرا شد.

این آزمایش به‌صورت کرت‌های یکبار خردشده (اسپیلیت پلات) در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی با سه تکرار مورد ارزیابی قرار گرفت. سه تیمار آبیاری شامل: آبیاری پس از ۷۰، ۱۰۰ و ۱۳۰ (به‌ترتیب I_1, I_2, I_3) میلی‌متر تبخیر تجمعی از تشتک تبخیر کلاس A در کرت‌های اصلی و چهار تیمار کودی به‌صورت محلول‌پاشی شامل: ۱ – شاهد (بدون مصرف کود)، ۲ – پتاسیم (K) از منبع ترست اکسید پتاسیم (TRUST K_2O) با غلظت ۸ در هزار، ۳ – بور (B) از منبع ترست بور (TRUST BORON) با غلظت ۱ در هزار و ٤ – تلفیق بور + پتاسیم (B + K) در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. کاربرد تیمارهای آبیاری پس از مرحله ۸ برگی و تا دو هفته قبل از برداشت محصول انجام شد. محلول‌پاشی عناصر بور و پتاسیم با حفظ غلظت مورد نظر بر روی اندام‌های هوایی طی سه مرحله ٦ – ۸، ۱۲ – ۱٦ و ۲۰ – ۲٤ برگی صورت گرفت. محلول‌پاشی بوته‌ها تا زمان جاری‌شدن قطره‌های محلول مورد استفاده از روی برگ گیاه ادامه پیدا کرد. قبل از آماده‌سازی زمین نمونه‌ای مرکب از خاک مزرعه از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری به‌صورت زیگزاکی تهیه شد و در آزمایشگاه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن مشخص شد. عملیات تهیه زمین، کاشت و داشت مطابق روش معمول منطقه صورت گرفت. مساحت هر کرت فرعی ۱۲ مترمربع (۳ × ٤) بود.

بذر مورد استفاده در این پژوهش رقم کاستیل (Castile) تک‌جوانه هلندی بود. با مساعدشدن دما کشت در اول خرداد ماه انجام شد. بذرکاری به‌صورت ردیفی با فاصله بین ردیف ۵۰ سانتی‌متر و فاصله روی ردیف ۲۰ سانتی‌متر در عمق ۲ سانتی‌متری خاک صورت گرفت تا تراکم صد هزار بوته در هکتار به‌دست آید. عملیات مبارزه با علف‌های هرز و سله‌شکنی با دست انجام شد. آبیاری کرت‌های آزمایشی تا قبل از کاربرد تیمارهای آبیاری براساس ۷۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.42.5.7]

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

عمق خاک (سانتی‌متر)	اسیدیته	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	کربن آلی	نیتروژن کل (درصد)	فسفر قابل جذب	پتاسیم قابل جذب	بور	بافت
					(میلی‌گرم بر کیلوگرم)			
۰-۳۰	۷/۸	۰/٤٦	۰/۸	۰/۱۱	۱۷/۵	۳۹۵	۱/۹۱	سیلتی-شنی

از تشتک تبخیر کلاس A صورت گرفت. نیاز کودی مزرعه بر اساس نتایج آزمون خاک (جدول ۱) و توصیه کودی تأمین شد (نیتروژن از منبع اوره به میزان ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار که یک نوبت قبل از کاشت و چهار نوبت پس از کاشت به‌صورت سرک به خاک اضافه شد، فسفر از منبع سوپرفسفات تریپل به میزان ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار قبل از کاشت به‌صورت خاکی به‌کار برده شد). برای تعیین حجم آب مصرفی در هر آبیاری، قبل از آبیاری نمونه‌برداری ازخاک کرت موردنظر تا عمق توسعه ریشه انجام و درصد رطوبت وزنی خاک تعیین شد. حجم آب آبیاری در هر نوبت با استفاده از معادله‌های (۱) و (۲) تعیین و مقدار آب مصرفی در هر کرت با استفاده از کنتور حجمی کنترل شد (ماهرخ و خواجه‌پور، ۱۳۸۹).

$$1)\ H = \rho b\ (\theta_{F.C} - \theta_m) \times D$$
$$2)\ V = H \times A$$

در معادله‌های (۱) و (۲)، H نشان‌دهنده ارتفاع آب داخل کرت، ρb جرم مخصوص ظاهری خاک، $\theta_{F.C}$ رطوبت در حد ظرفیت مزرعه، θ_m رطوبت جرمی کرت موردنظر در زمان آبیاری، D عمق توسعه ریشه، V حجم آب آبیاری در کرت و A مساحت کرت است.

برداشت محصول پس از آغاز فعالیت کارخانه قند چهارمحال و بختیاری و در اول آبان‌ماه انجام شد.

اندازه‌گیری صفات، شاخص سطح برگ: به‌منظور بررسی چگونگی اثر تیمارها بر شاخص سطح برگ حدود ۹۰ روز پس از کاشت (٤۵ روز پس از اعمال تنش)، با در نظرگرفتن اثر حاشیه، پنج بوته از هر کرت جهت اندازه‌گیری شاخص سطح برگ انتخاب شد. سطح برگ توسط عکس‌برداری و محاسبه با نرم‌افزار Digimizer اندازه‌گیری شد. شاخص سطح برگ از نسبت سطح برگ هر بوته (LA) به سطح زمینی که توسط آن اشغال شده بود (P) محاسبه شد:

$$LAI = LA/P$$

در رابطه فوق LA: سطح برگ و P: واحد سطح زمین است (امام و نیک‌نژاد، ۱۳۹۰).

وزن خشک کل بوته: در انتهای فصل رشد (اول آبان‌ماه) به‌منظور تعیین وزن خشک بوته‌ها؛ پس از حذف دو ردیف کناری و نیم متر از ابتدا و انتهای هر خط کاشت، به‌طور تصادفی تعداد پنج بوته از هر کرت انتخاب شد. اندام‌های هوایی به‌مدت ٤۸ ساعت در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد درون آون قرار گرفتند و وزن خشک آن‌ها اندازه‌گیری شد. ریشه‌ها نیز تمیز و شسته شده و توسط چاقو ریز و در آون در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۷۲ ساعت قرار گرفتند و سپس توزین شدند. میانگین وزن خشک پنج بوته به‌عنوان وزن خشک بوته‌ها در نظر گرفته شد.

محتوای پرولین برگ: اندازه‌گیری محتوای پرولین مطابق روش Bates و همکاران (۱۹۷۳) حدود دو ماه پس از اعمال تنش انجام شد. بدین ترتیب که ابتدا ۰/۵ گرم از نمونه گیاهی وزن کرده و همراه نیتروژن مایع در هاون چینی کاملاً پودر گردید. سپس پودر به‌دست آمده را درون لوله آزمایش ریخته و ۱۰ میلی‌لیتر اسید سولفوسالیسیلیک ۳ درصد به آن اضافه شد. لوله در دستگاه سانتریفیوژ با دور ٦۰۰۰ به‌مدت ۱۰ دقیقه در دمای ٤ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. سپس ۲ میلی‌لیتر از عصاره صاف‌شده را برداشته و در یک لوله آزمایش جدید ریخته شد. به هر لوله ۲ میلی‌لیتر معرف نین‌هیدرین و ۲ میلی‌لیتر اسید استیک گلاسیال اضافه و به‌خوبی به‌هم زده شد. همزمان مقدار ۲ میلی‌لیتر از محلول‌های استاندارد صفر، ٤، ۸، ۱٦ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر پرولین خالص را درون لوله‌های جدید ریخته و ۲ میلی‌لیتر اسید نین‌هیدرین و ۲ میلی‌لیتر اسید استیک‌گلاسیال به آن‌ها افزوده و سپس به‌خوبی مخلوط شد. لوله‌های آزمایش در بن‌ماری با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.42.5.7]

به‌مدت یک ساعت قرار داده شدند. پس از یک ساعت لوله‌ها جهت خاتمه واکنش داخل حمام یخ قرار گرفتند. پس از سرد شدن لوله‌ها، به آن‌ها ٤ میلی‌لیتر تولوئن افزوده و به‌مدت ۲۰ ثانیه در دستگاه ورتکس به‌هم زده شدند. استانداردهای پرولین محلول در فاز تولوئن به اندازه لازم در کووت دستگاه اسپکتروفتومتر (U–1800, Hitachi Corporation, Japon) ریخته شد و مقدار پرولین در طول‌موج ۵۲۰ نانومتر خوانده و منحنی استاندارد رسم شد. سپس میزان جذب در نمونه‌های گیاهی را خوانده و با قراردادن آن‌ها در معادله مربوطه مقدار پرولین محاسبه شد.

محتوای نسبی آب برگ (RWC): اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ حدود دوماه پس از اعمال تنش انجام شد. نمونه‌برداری با استفاده از قیچی از آخرین برگ توسعه‌یافته تمام تیمارهای آزمایشی صورت گرفت. نمونه‌ها بلافاصله درون یخ قرار گرفته و در آزمایشگاه وزن‌تر آن‌ها با ترازوی دقیق اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها در آب‌مقطر قرار گرفته و به‌مدت ٢٤ ساعت در یخچال در دمای ٤ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. بعد از ٢٤ ساعت وزن اشباع نمونه‌ها اندازه‌گیری و به‌مدت ٢٤ ساعت دیگر در آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. سپس وزن خشک هر کدام اندازه‌گیری شد. با قرار دادن اعداد حاصل از توزین با ترازوی دقیق در فرمول زیر RWC به‌دست می‌آید:

$$\text{Relative Water Content (RWC)} = \frac{F_w - D_w}{S_w - D_w} \times 100$$

در رابطه بالا، RWC محتوای نسبی آب برگ، F_w وزن تر برگ بلافاصله بعد از نمونه‌برداری، D_w وزن خشک برگ بعد از قرارگرفتن در آون و S_w وزن اشباع برگ بعد از قرارگرفتن در آب‌مقطر است (Ritchie *et al.*, 1990).

شاخص سبزینگی برگ: جهت اندازه‌گیری شاخص سبزینگی حدود دوماه پس از اعمال تنش با استفاده از دستگاه کلروفیل‌متر (مدل CL – 01 Hansatech) از هر کرت از بالاترین برگ که معمولاً بیش‌ترین میزان نیتروژن را دارد سه قرائت صورت گرفت و میانگین آن‌ها به‌عنوان شاخص سبزینگی برگ ثبت شد.

عملکرد ریشه: به‌منظور اندازه‌گیری عملکرد و صفات کیفی ریشه؛ در انتهای فصل رشد (اول آبان‌ماه) با در نظر گرفتن اثر حاشیه، به‌طور تصادفی از سطحی معادل ۲ مترمربع اقدام به برداشت شد. پس از سرزنی ریشه‌ها، وزن آن‌ها با ترازوی دقیق اندازه‌گیری و عملکرد ریشه بر حسب تن در هکتار محاسبه شد.

صفات کیفی چغندرقند: به‌منظور تعیین صفات کیفی ریشه چغندرقند؛ ریشه‌های برداشت‌شده پس از توزین ابتدا در کارخانه قند شهرکرد تبدیل به خمیر شده، سپس از هر تیمار نمونه‌های ۳۰ گرمی تهیه و جهت اندازه‌گیری صفات کیفی به آزمایشگاه عیارسنجی کارخانه قند اصفهان منتقل شدند. عیارقند به روش پلاریمتری توسط دستگاه ساکاریمتر، غلظت سدیم و پتاسیم به روش فیلم فتومتری و نیتروژن مضره به روش عدد آبی و با استفاده از دستگاه بتاآنالیزر (Beta Analyzer) اندازه‌گیری شد. برخی صفات کیفی ریشه چغندرقند از روابط زیر محاسبه شدند (عبداللهیان نوقابی و همکاران، ١٣٨٤):

درصد قند ملاس (MS) = 0.343 (K+Na) + 0.094 (a- amino -N) – 0.31

که در آن K، Na و a- amino-N به‌ترتیب پتاسیم، سدیم و نیتروژن مضره برحسب میلی‌اکی والان در صد گرم خمیر ریشه چغندرقند هستند.

درصد قند قابل استحصال (WSC) = عیارقند – (ملاس + ۰/٦)

ضریب استحصال شکر (ECS) = (عیارقند/ ۱۰۰ ×

عملکرد شکر ناخالص یا عملکرد قند قابل استحصال (SY) = عملکرد ریشه ×

آلکالیته یا ضریب قلیائیت (ALC) = K + Na / a- amino-N

داده‌های حاصل از صفات اندازه‌گیری‌شده با نرم‌افزارهای آماری SAS و MSTAT-C آنالیز و میانگین‌های معنی‌دارشده توسط آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد ارزیابی شدند. نمودارها و جداول مربوطه با استفاده از نرم‌افزار اکسل (Excel) ترسیم شدند.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.42.5.7]

نتایج و بحث

شاخص سطح برگ: اثر تیمارهای آبیاری، محلول‌پاشی و برهمکنش آبیاری × محلول‌پاشی بر شاخص سطح برگ چغندرقند در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین شاخص سطح برگ (٤/١٥) مربوط به تیمار آبیاری I_1 و محلول‌پاشی بور + پتاسیم بود که با تیمار شاهد (عدم محلول‌پاشی) اختلاف معنی‌دار داشت ولی با محلول‌پاشی پتاسیم تفاوت معنی‌دار نداشت. کم‌ترین شاخص سطح برگ (۲/۹۱) به تیمار آبیاری I_3 و عدم محلول‌پاشی اختصاص داشت که با محلول‌پاشی بور در این سطح آبیاری اختلاف معنی‌دار نداشت ولی با محلول‌پاشی پتاسیم و بور + پتاسیم تفاوت معنی‌دار نشان می‌داد. در شرایط تنش خشکی شدید (تیمار I_3) محلول‌پاشی بور + پتاسیم، پتاسیم و بور به‌ترتیب شاخص سطح برگ را حدود ١٨/٦، ١٧/٥ و ٣/٤ درصد نسبت به تیمار شاهد (عدم محلول‌پاشی) افزایش دادند. در شرایط خشکی ملایم (تیمار I_2) نیز بیشترین شاخص سطح برگ (٤) از محلول‌پاشی بور + پتاسیم به‌دست آمد که با تیمار شاهد و محلول‌پاشی بور در همین سطح آبیاری تفاوت معنی‌دار داشت ولی با محلول‌پاشی پتاسیم از لحاظ آماری اختلاف معنی‌دار نشان نمی‌داد (جدول ٤). در تیمار آبیاری I_2 محلول‌پاشی‌پاشی بور + پتاسیم، پتاسیم و بور به‌ترتیب شاخص سطح برگ را حدود ١٢/٧، ٩/٦ و ٣/٤ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش دادند. در شرایط تنش خشکی فشار آماس کاهش می‌یابد که منجر به کاهش توسعه سلول‌ها می‌شود. درنتیجه اندازه و سطح برگ‌ها کوچک می‌شود (Neseim *et al*., 2014). تنش سبب تأخیر در ظهور برگ، توسعه کندتر آن و کاهش تولید مواد فتوسنتزی و تسریع پیری می‌شود (Clover *et al*., 1998). با توجه به مشاهدات غفاری و تدین (١٣٩٦) شاخص سطح برگ چغندرقند با کم‌شدن میزان آب آبیاری کاهش یافت. به‌طور مشابه طی پژوهشی مشخص شد با افزایش تنش رطوبتی شاخص سطح برگ چغندرقند کاهش یافت (ماهرخ و خواجه‌پور، ١٣٨٩).

پتاسیم با کاهش از دست‌دادن آب، پژمردگی و حفظ وضعیت آماس و کمک به جذب عناصر غذایی به افزایش رشد گیاه و شاخص سطح برگ کمک می‌کند (Neseim *et al*., 2014). نیتروژن نقش مهمی در رشد رویشی گیاه و بنابراین افزایش شاخص سطح برگ دارد. در شرایط خشکی فعالیت آنزیم‌های درگیر در متابولیسم نیتروژن (نیترات ردوکتاز، گلوتامین سینتتاز و گلوتامات سینتاز) کاهش می‌یابد. به‌کار بردن پتاسیم تا حدی این کاهش را جبران می‌کند (Zahoor *et al*., 2017). گزارش شده است که در پنبه (*Gossypium hirsutum* L.) کمبود پتاسیم منجر به کاهش فتوسنتز و سطح برگ گیاه می‌شود (Zhao *et al*., 2001). کمبود پتاسیم در گیاه به‌واسطه کاهش پتاسیم خاک یا کاهش دسترسی به آن به‌دلیل خشکی سبب توقف توسعه برگ‌ها و کاهش چشمگیر تبادل کربن می‌شود. افزایش شاخص سطح برگ با کاربرد پتاسیم می‌تواند به افزایش سطح ریشه و افزایش دسترسی گیاه به عناصر ضروری مربوط باشد. به هر حال پتاسیم نقش مهمی در فتوسنتز، تقسیم سلولی، رشد و تنظیم وضعیت آب در گیاه دارد. به‌طور مشابه طی پژوهشی در لوبیا چشم بلبلی (*Vigna unguiculata* L.) مصرف کود پتاسیم سبب افزایش شاخص سطح برگ شد (Motaghi and Saki Nejad, 2014) .

افزایش شاخص سطح برگ با به‌کار بردن عنصر بور احتمالاً به‌واسطه افزایش تارهای کشنده ریشه و درنتیجه افزایش جذب آب از خاک است. بنابراین از طریق افزایش فشار آماس و توسعه کامل برگ‌ها، هدایت روزنه‌ای و آسیمیلاسیون کربن بهبود می‌یابد (Gustav *et al*., 2008). از این‌رو محلول‌پاشی بور در شرایط تنش خشکی آثار مثبتی بر کارایی فتوسنتز و رشد گیاه دارد و منجر به بهبود شاخص سطح برگ می‌شود. طی پژوهشی مشخص شد تنش خشکی در گیاه آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) سبب کاهش شاخص سطح برگ شد. ولی در این شرایط کاربرد خارجی بور شاخص سطح برگ را بهبود بخشید (Shehzad *et al*., 2018). مشاهده شده است که برگ‌های گیاهان دچار کمبود بور کوچک‌تر، سفت‌تر و ضخیم‌تر هستند (Mekdad, 2015).

وزن خشک کل بوته: براساس نتایج تجزیه واریانس، اثر

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.42.5.7]

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی بر برخی صفات مرفوفیزیولوژیک، کیفی و عملکردی ریشه چغندرقند

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		شاخص سطح برگ	وزن خشک کل بوته	محتوای پرولین برگ	محتوای نسبی آب برگ	شاخص سبزینگی برگ	درصد قند قابل استحصال
تکرار	۲	۰/۰۰۱^{ns}	۹۷/۳۸^{ns}	۰/٦^{ns}	۱/۹۹^{ns}	۷/۵^{ns}	۰/۰٤^{ns}
آبیاری	۲	۲/۲۱**	۱۲۰۷/۸٦**	۵۱/۰۸**	۲۸٦/۸۵**	۳۸۰/۸۳**	۱٤/۳۲**
خطا اصلی	٤	۰/۰۱	٦۲/۰۳	۰/۳۵	۳/۵٦	۳/٤۹	۰/۰۷
محلول‌پاشی	۳	۰/۳۳**	۳۹۲/۰۳**	٦/۸**	۱۱۸/٦۳**	۹٦/٦۸**	۵/۰۳**
آبیاری × محلول‌پاشی	٦	۰/۰۳**	۲۹/۲۲^{ns}	۲/۳۸*	۱۱/۹۱*	۱/۹^{ns}	۱/۱۲**
خطا فرعی	۱۸	۰/۰۰۵	۵۸/۲٦	۰/۷۲	۳/۸۵	٤/۲۹	۰/۲۵
ضریب تغییرات (٪)	-	۱/۹	۵/۲٦	۱۳/٤	۲/٤۳	٤/۹۹	۳/۱۷
		محتوای سدیم ریشه	محتوای پتاسیم ریشه	آلکالیته یا ضریب قلیائیت	ضریب استحصال شکر	عملکرد ریشه	عملکرد قند ناخالص
تکرار	۲	۰/۰۲^{ns}	۰/۰۰۰۰۵^{ns}	۰/۰٤^{ns}	۰/۱۲^{ns}	۲/۳۷^{ns}	۰/۰٤^{ns}
آبیاری	۲	۰/۷۹**	۰/۵٦**	۰/۱۵^{ns}	۳۱/۷۹**	۲۸۰۷/۸۳**	۱۱٤/۰۷**
خطا اصلی	٤	۰/۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰٦	۰/۰۹	۳/۸۲	۰/۱
محلول‌پاشی	۳	۰/۸**	۰/۵۲**	۰/۳۲**	۱۷/۹۲**	۱۰۵/۰٤**	۵/۹۳**
آبیاری × محلول‌پاشی	٦	۰/۰٤*	۰/۰۰۹*	۰/۰۲^{ns}	۰/٤^{ns}	۵/۲^{ns}	۰/۲۵^{ns}
خطا فرعی	۱۸	۰/۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۳	۰/۲۲	٤/۳٤	۰/۱۹
ضریب تغییرات (٪)	-	۷/۰۷	۱/۱۲	۵/٦٦	۰/۵۵	۵/۲	۵/۷٤

^{ns}، * و ** به‌ترتیب: غیر معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی بر وزن خشک کل بوته چغندرقند در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد. اما برهمکنش آبیاری × محلول‌پاشی تأثیر معنی‌دار بر وزن خشک کل بوته چغندرقند نداشت (جدول ۲). از لحاظ آبیاری بیشترین وزن خشک بوته (۱۵٦/۲۸ گرم) مربوط به تیمار I_1 بود که با تیمارهای I_2 و I_3 اختلاف معنی‌دار داشت. کم‌ترین وزن خشک بوته (۱۳٦/۷۵ گرم) نیز از تیمار آبیاری I_3 به‌دست آمد. بین تیمارهای I_2 و I_3 تفاوت معنی‌دار دیده نشد (جدول ۳). بدین ترتیب تیمارهای کم‌آبیاری I_2 و I_3 به‌ترتیب وزن خشک کل بوته را حدود ۹ و ۱۲/۵ درصد نسبت به شرایط آبیاری کامل کاهش دادند. تنش خشکی با کاهش هدایت روزنه‌ای و فتوسنتز سبب کاهش تولید آسیمیلات‌ها می‌شود. بنابراین تجمع ماده خشک در گیاه کاهش می‌یابد. مطالعات انجام‌شده توسط غفاری و تدین (۱۳۹٦) نیز نشان داد تنش خشکی منجر به کاهش وزن خشک اندام هوایی و ریشه چغندرقند شد.

در بین تیمارهای محلول‌پاشی بیشترین وزن خشک بوته (۱۵۲/٤۳ گرم) مربوط به محلول‌پاشی بور + پتاسیم بود که با تیمار عدم محلول‌پاشی اختلاف معنی‌دار داشت ولی با محلول‌پاشی پتاسیم تفاوت معنی‌دار نداشت. نتایج نشان می‌دهد محلول‌پاشی بور + پتاسیم وزن خشک بوته را حدود ۱۱ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داده است و از این لحاظ بر سایر تیمارهای محلول‌پاشی برتری دارد. کم‌ترین وزن خشک بوته (۱۳۷ گرم) نیز از تیمار شاهد (عدم محلول‌پاشی) به‌دست آمد (جدول ۳). محلول‌پاشی بور اگرچه سبب افزایش حدود ٤/٦ درصدی وزن خشک بوته شد ولی با عدم

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.42.5.7]

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی بر برخی صفات کیفی، مورفوفیزیولوژیک و عملکرد ریشه چغندرقند

تیمارها	وزن خشک کل بوته (گرم)	شاخص سبزینگی برگ	آلکالیته یا ضریب قلیائیت	ضریب استحصال شکر (٪)	عملکرد قند ناخالص (تن در هکتار)	عملکرد ریشه
سطوح آبیاری						
I_1	۱۵۶/۲۸^{a}	٤٥/۸۹^{a}	۲/۹٤^{b}	۸٦/۲۳^{a}	۱۰/۵۷^{a}	۵۵/٦۲^{a}
I_2	۱٤۲/۵۳^{b}	٤۳/٤۲^{b}	۲/۷۹^{b}	۸٦/۱۹^{a}	۷/٦٦^{b}	۳۹/۵^{b}
I_3	۱۳٦/۷۵^{b}	۳۵/۱۳^{c}	۲/۷۲^{b}	۸۳/۳۹^{b}	٤/٤^{c}	۲۵/۰۵^{c}
LSD 5 %	٦/۵۵	۱/۷۸	۰/۱٤	۰/٤	۰/۳۷	۱/۷۹
سطوح محلول‌پاشی						
شاهد	۱۳۷^{c}	۳۸^{c}	۲/٦۸^{b}	۸۳/۳۷^{c}	٦/۵۲^{c}	۳٦/۵۱^{c}
بور	۱٤۳/۳٤^{bc}	۳۹/۸۳^{c}	۲/٦۳^{b}	۸۵/۰٤^{b}	۷/٤۹^{b}	۳۸/۳۷^{c}
پتاسیم	۱٤۷/۹۸^{ab}	٤۲/۵۷^{b}	۳/۰۲^{a}	۸٦/۱۳^{a}	۷/۷^{b}	٤۰/۹٦^{b}
بور + پتاسیم	۱۵۲/٤۳^{a}	٤۵/۵۱^{a}	۲/۹۳^{a}	۸٦/۵۲^{a}	۸/٤۹^{a}	٤٤/۳۹^{a}
LSD 5 %	۷/۵٦	۲/۰۵	۰/۱٦	۰/٤۷	۰/٤۳	۲/۰٦

میانگین‌های هر عامل آزمایشی در هر ستون که حداقل در یک حرف مشترک هستند، براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند (I_1، I_2 و I_3 به‌ترتیب آبیاری پس از ۷۰، ۱۰۰ و ۱۳۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A).

محلول‌پاشی اختلاف معنی‌دار نداشت. بنابراین با توجه به نتایج به‌دست آمده؛ تیمارهای محلول‌پاشی به‌ویژه محلول‌پاشی پتاسیم و بور + پتاسیم سبب بهبود تجع ماده خشک در چغندرقند می‌شود. این نکته خصوصاً در شرایط تنش خشکی که میزان تولید ماده خشک کاهش می‌یابد اهمیت بیشتری دارد.

بور و پتاسیم نقش مهمی در متابولیسم کربوهیدرات‌ها دارند. هم‌چنین به‌عنوان فعال‌کننده بسیاری از آنزیم‌هایی که در تحریک رشد و تولید نقش دارند؛ عمل می‌کنند (Nofal *et al.*, 2014). پتاسیم سبب تحریک رشد ریشه‌ها می‌شود. بنابراین سطح تماس ریشه با خاک افزایش می‌یابد که منجر به افزایش جذب آب و مواد غذایی از خاک می‌شود (Romheld and Kirkby, 2010). به‌کار بردن پتاسیم کارایی فتوسنتز را افزایش می‌دهد. زیرا سبب افزایش محتوای کلروفیل می‌شود. بنابراین رشد چغندرقند افزایش می‌یابد (Mubarak *et al.*, 2016). پتاسیم برای بازشدن روزنه‌ها ضروری است. بنابراین سبب کاهش مقاومت روزنه‌ای و افزایش آسیمیلاسیون کربن دی‌اکسید و تولید ماده خشک می‌شود (Kwak *et al.*, 2001). به‌طور مشابه گزارش شده است به‌کار بردن پتاسیم سبب افزایش وزن خشک ریشه و اندام هوایی چغندرقند شد (Mubarak *et al.*, 2016).

بور نیز سبب افزایش متابولیسم، رشدونمو گیاه می‌شود (Abido, 2012). بور برای فعالیت آنزیم‌های درگیر در سیستم‌های فتوسنتزی و تنفسی ضروری است. هم‌چنین نقش مهمی در تشکیل برگ‌های جدید دارد. بور سبب افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی و بنابراین افزایش فتوسنتز می‌شود (Dewdar *et al.*, 2015). این عنصر هم‌چنین برای تقسیم سلولی و متابولیسم نیتروژن ضروری است (Nofal *et al.*, 2014). مطالعات انجام‌شده توسط Abbas و همکاران (۲۰۱٤) نیز نشان داد؛ محلول‌پاشی بور وزن خشک ریشه و اندام هوایی چغندرقند را افزایش داد.

محتوای پرولین برگ: باتوجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی بر محتوای پرولین

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.42.5.7]

برگ در سطح احتمال ۱ درصد و برهمکنش آبیاری × محلول‌پاشی در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار شد (جدول ۲). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد، بیشترین میزان پرولین (۱۰/۰۲٦ میکرومول بر وزن تازه برگ) مربوط به تیمار آبیاری I_3 (خشکی شدید) و محلول‌پاشی پتاسیم بود که با محلول‌پاشی بور + پتاسیم در همین سطح از آبیاری تفاوت معنی‌دار نداشت. در این سطح آبیاری محلول‌پاشی پتاسیم سبب افزایش حدوداً ۲۹ درصدی پرولین نسبت به تیمار شاهد (عدم محلول‌پاشی) شد. کم‌ترین میزان پرولین برگ (۰٦/ ٤ میکرومول بر وزن تازه برگ) به تیمار آبیاری I_1 (آبیاری کامل) و محلول‌پاشی بور اختصاص داشت که از لحاظ آماری با سایر تیمارهای محلول‌پاشی در این سطح آبیاری اختلاف معنی‌دار نشان نمی‌داد (جدول ٤). هم‌چنین در سطح آبیاری I_2 نیز محلول‌پاشی پتاسیم سبب افزایش حدود ۲۵ درصدی پرولین نسبت به تیمار شاهد شد که از لحاظ آماری با هم اختلاف معنی‌دار نداشتند. یکی از پیامدهای متابولیکی تنش خشکی در گیاه تجمع ترکیبات آلی با وزن مولکولی کم مثل اسیدهای آمینه آزاد به‌ویژه پرولین و قندهای محلول است (Krasensky and Jonak, 2012). طی این فرایند که تنظیم اسمزی نامیده می‌شود، مواد اسمولیت (پرولین، سوربیتول، فنول، اسید آسکوربیک و...) سبب حفظ ساختارهای سلولی مختلف، فرایندهای فیزیولوژیکی و پتانسیل اکسیداسیون – احیا (redox potential) می‌شوند. مواد اسمولیت آماس سلولی را نیز حفظ و آسیب‌های ناشی از پسابیدگی را به تأخیر می‌اندازند (Anjum *et al*., 2017). از این‌رو تنظیم اسمزی مهم‌ترین نابود کننده گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) در شرایط تنش خشکی محسوب می‌شود (Shehzad *et al*., 2020). بنابراین پرولین به‌عنوان یک ماده محلول سبب تنظیم فشار اسمزی، کاهش هدر رفت آب از سلول، کاهش تأثیر بازدارندگی یون‌ها بر روی فعالیت آنزیم‌ها، جلوگیری از تجزیه پروتئین‌های مختلف (احتمالاً از طریق کنترل pH سلولی)، افزایش پایداری برخی آنزیم‌های سیتوپلاسمی و میتوکندریایی، پایداری شکل طبیعی پروتئین‌ها و درنتیجه حفاظت سامانه‌های غشایی می‌شود (Barker *et al*., 1993; Blum and Ebercon, 1976; Morgan, 1984).

پتاسیم فراوان‌ترین کاتیون در گیاهان است که نقش مهمی در تنظیم اسمزی دارد. زمانی که طی تنش خشکی پتانسیل آب گیاه کاهش پیدا می‌کند، پتاسیم سبب تجمع اسمولیت‌ها از جمله پرولین شده و باعث کاهش پتانسیل اسمزی و درنتیجه افزایش جریان آب به‌منظور حفظ پتانسیل آماس می‌شود (Oosterhuis and Wullschleger, 1987).

کمبود پتاسیم در تنباکو سبب کاهش محتوای پرولین برگ در شرایط تنش آبی و آبیاری کامل و به‌کار بردن پتاسیم باعث افزایش تجمع پرولین می‌شود. نقش پتاسیم در سنتز پرولین به‌خوبی شناخته نشده است، اما احتمالاً کمبود پتاسیم بر متابولیسم اسیدهای آمینه یا مسیر متابولیکی سنتز پرولین اثر می‌گذارد و سبب کاهش سنتز پرولین می‌شود. (Bahrami-Rad and Hajiboland, 2017). مشاهده شده است در ارزن انگشتی (*Eleusine coracana*) تحت شرایط تنش خشکی پتاسیم سبب بهبود فعالیت آنزیم آرژیناز (arginase) و درنتیجه افزایش تبدیل آرژنین (arginine) به پرولین می‌شود (Rao *et al*., 1981). طی پژوهشی مشاهده شد، به‌کار بردن پتاسیم با افزایش تولید پرولین سبب بهبود تحمل آفتابگردان به خشکی شد (Zamani *et al*., 2020).

محلول‌پاشی بور در شرایط تنش خشکی سبب کاهش غلظت پرولین در گندم (*Triticum aestivum*) شد که احتمالاً به‌واسطه نقش این عنصر در کاهش شدت تنش خشکی است (Abdel-Motagally and El-Zohri, 2016).

محتوای نسبی آب برگ: اثر تیمارهای آبیاری، محلول‌پاشی و برهمکنش آبیاری × محلول‌پاشی بر محتوای نسبی آب برگ (RWC) چغندرقند به‌ترتیب در سطح احتمال ۱ درصد و ۵ درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). بیشترین محتوای نسبی آب برگ (۸۷/٦ ٪) مربوط به تیمار آبیاری I_1 و محلول‌پاشی بور + پتاسیم بود که از لحاظ آماری با تیمار شاهد (عدم محلول‌پاشی) و سایر تیمارهای محلول‌پاشی در سطح آبیاری I_1 اختلاف معنی‌دار نشان نمی‌داد. کم‌ترین محتوای نسبی آب

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.42.5.7]

جدول ٤- مقایسه میانگین برهمکنش تیمارهای محلول‌پاشی در سطوح مختلف آبیاری بر برخی صفات کیفی و مورفوفیزیولوژیک چغندرقند

ترکیب تیماری		شاخص سطح برگ	محتوای پرولین برگ (میکرومول بر وزن تازه برگ)	محتوای نسبی آب برگ (٪)	قند قابل استحصال (٪)	محتوای سدیم ریشه	محتوای پتاسیم ریشه
						(میلی‌اکی‌والان در صد گرم ریشه)	
I_1	شاهد	۳/۹٤^{c}	٤/٤٤^{ef}	۸٤/۳۳^{ab}	۱٤/۷۲^{fg}	۱/۵۲^{cd}	۵/۰٤^{c}
	بور	۳/۹۷^{bc}	٤/۰٦^{f}	۸٤/۷۳^{ab}	۱٦/٤۸^{cd}	۱/۳۳^{ef}	۵/۰٤^{c}
	پتاسیم	٤/۰۸^{ab}	٤/۷٦^{def}	۸٦/۷۳^{a}	۱٦/۸٦^{bc}	۱/۱۸^{fg}	٤/٦٦^{de}
	بور + پتاسیم	٤/۱۵^{a}	٤/٤۵^{ef}	۸۷/٦^{a}	۱۷/٤۵^{ab}	۱/۰٦^{g}	٤/٦۱^{e}
I_2	شاهد	۳/۵۵^{de}	۵/۵۵^{cde}	۷٤/۹^{fg}	۱۵/۸۵^{de}	۱/۷۱^{b}	۵/۲٤^{b}
	بور	۳/٦۷^{d}	۵/٦۲^{cde}	۷۵/۹۷^{ef}	۱۷/۹۸^{a}	۱/٦۸^{bc}	٤/۹۹^{c}
	پتاسیم	۳/۸۹^{c}	٦/۹٤^{bc}	۸۲/۹۳^{bc}	۱٦/٤^{cd}	۱/۱۸^{fg}	٤/۷۲^{d}
	بور + پتاسیم	٤^{bc}	٦/۰۱^{cd}	۸٦/۳۷^{a}	۱٦/٦۹^{bcd}	۱/۰۹^{g}	٤/۷۳^{d}
I_3	شاهد	۲/۹۱^{g}	۷/۷٦^{b}	۷۲/۲۳^{g}	۱۳/۹۸^{g}	۲/۱۱^{a}	۵/۵^{a}
	بور	۳/۰۱^{g}	٦/۲۹^{c}	۷۳/٦^{fg}	۱۵/۰۵^{ef}	۲/۰۹^{a}	۵/٤۱^{a}
	پتاسیم	۳/٤۲^{f}	۱۰/۰۲^{a}	۷۸/۵۳^{de}	۱٤/۸۳^{fg}	۱/۵۲^{cd}	۵/۰۲^{c}
	بور + پتاسیم	۳/٤۵^{ef}	۱۰/۰۲^{a}	۸۰/۱۷^{cd}	۱٤/۸۸^{f}	۱/۳۷^{de}	۵/۰٤^{c}
LSD 5 %		۰/۱۲	۱/٤۵	۳/۳۷	۰/۸٦	۰/۱۸	۰/۰۹

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند (I_1، I_2 و I_3 به‌ترتیب آبیاری پس از ۷۰، ۱۰۰ و ۱۳۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A).

برگ (۷۲/۲۳ ٪) نیز به تیمار آبیاری I_3 و عدم محلول‌پاشی اختصاص داشت که با تیمار محلول‌پاشی بور در همین سطح از آبیاری تفاوت معنی‌دار نداشت. در سطح آبیاری I_3 بیشترین محتوای نسبی آب برگ (۸۰/۱۷ ٪) از محلول‌پاشی بور + پتاسیم به‌دست آمد که با تیمار محلول‌پاشی پتاسیم اختلاف معنی‌دار نداشت (جدول ٤). در شرایط خشکی شدید (تیمار آبیاری I_3)، محلول‌پاشی بور + پتاسیم سبب افزایش حدود ۱۱ درصدی محتوای نسبی آب برگ نسبت به تیمار شاهد شد. در شرایط خشکی ملایم (تیماری آبیاری I_2) نیز محلول‌پاشی بور + پتاسیم، محتوای نسبی آب برگ را حدود ۱۵/۳ درصد در مقایسه با تیمار شاهد افزایش داد.

یکی از مهم‌ترین تغییرات ناشی از تنش خشکی، کاهش محتوای نسبی آب برگ است. این شاخص می‌تواند توانمندی گیاهان را در تحمل تنش خشکی نشان دهد. محتوای نسبی آب برگ بالاتر به معنی توانایی برگ در حفظ مقادیر بیشتری آب در شرایط تنش است. بر این اساس مدیریت آبیاری در مزرعه باید براساس محتوای نسبی آب برگ و نه آب خاک باشد (کافی و همکاران، ۱۳۹۷).

با توجه به مطالعات Castrillo و Trujillo (۱۹۹٤) همبستگی مثبتی بین محتوای نسبی آب برگ و غلظت کلروفیل، پروتئین و فعالیت رابیسکو وجود داشت. با توجه به نقش کلروفیل و پروتئین در حفظ فتوسنتز و مقاومت به خشکی می‌توان از محتوای نسبی آب برگ به‌عنوان یک شاخص مهم جهت بررسی وضعیت گیاه در شرایط تنش خشکی استفاده کرد.

حفظ وضعیت مطلوب آب در گیاه نقش مهمی در بقاء گیاه

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.42.5.7]

در شرایط تنش خشکی دارد. تنظیم اسمزی مهم‌ترین ویژگی است که باعث نگهداری آب و حفظ وضعیت آماس سلول‌ها در شرایط خشکی می‌شود. پتاسیم یکی از مهم‌ترین اسمولیت‌های غیرآلی در گیاهان است که نقش کلیدی در ایجاد تنظیم اسمزی در پاسخ به تنش خشکی در گیاهان دارد. بنابراین تأمین پتاسیم کافی سبب تجمع اسمولیت‌ها و درنتیجه کاهش پتاسیل اسمزی و درنهایت افزایش جذب آب و فشار آماس، افزایش محتوای نسبی آب برگ و بهبود توانایی گیاه برای تحمل تنش خشکی می‌شود (Egilla *et al*., 2005; Kant and Kafkafi, 2002). طی پژوهشی مشاهده شد در شرایط دیم مصرف ۹۰ کیلوگرم در هکتار پتاسیم سبب افزایش محتوای نسبی آب برگ در نخود شد (عباسی‌مقدم و همکاران، ۱۳۹۳).

بور نیز با تغییراتی که در فرایندهای متابولیکی ایجاد می‌کند؛ نقش مهمی در کاستن از اثرات سوء تنش خشکی دارد (Waraich *et al*., 2011). در گیاهانی که کمبود بور وجود دارد، هدایت هیدرولیکی ریشه به علت جلوگیری از رشد ریشه‌های جدید کاهش می‌یابد؛ بنابراین جذب آب دچار اختلال می‌شود. کمبود بور به‌طور مستقیم بر جذب عناصر معدنی همانند پتاسیم و سایر اسمولیت‌ها به داخل سلول اثر می‌گذارد؛ زیرا بور برای فعالیت و عملکرد مناسب پمپ H^+-ATP_{ase} و بیان ژن مربوط به آن ضروری است (Ahanger *et al*., 2016). کاهش جذب اسمولیت‌ها به داخل سلول‌ها سبب کاهش ورود آب به آن‌ها و درنتیجه کاهش محتوای نسبی آب برگ می‌شود. گزارش شده است که کمبود بور بر جذب آب توسط ریشه‌ها، انتقال آب در اندام هوایی و از دست‌دادن آب توسط برگ‌های گیاه اثر می‌گذارد (Wimmer and Eichert, 2013). هم‌چنین بور به‌واسطه اثرات اسمزی، سبب بهبود وضعیت آب در گیاه و کاهش اثرات تنش خشکی می‌شود (Smith *et al*., 2010). بنابراین، محلول‌پاشی بور با بهبود جذب و نگه‌داری آب در گیاه، سبب افزایش محتوای نسبی آب برگ، بهبود وضعیت آماس و گسترش برگ‌ها می‌شود. مشاهده شده است کمبود بور سبب کاهش محتوای نسبی آب برگ می‌شود. این کاهش، نشان‌دهنده کاهش آماس سلول‌ها به‌واسطه کاهش جذب آب در گیاه است (Mukhopadhyay and Mondal, 2015). با توجه به مطالعات Shehzad و همکاران (۲۰۱۸) در شرایط تنش خشکی محلول‌پاشی بور با افزایش توسعه ریشه‌ها و درنتیجه افزایش جذب آب از خاک؛ هم‌چنین به‌وسیله تنظیم عملکرد روزنه‌ها باعث بهبود تحمل برگ‌های آفتابگردان (*Helianthus annuus*) در خشکی شد.

شاخص سبزینگی برگ (عدد کلروفیل‌متر): براساس نتایج تجزیه واریانس، اثر تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی بر شاخص سبزینگی برگ چغندرقند در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد؛ ولی برهمکنش آبیاری × محلول‌پاشی تأثیر معنی‌داری بر شاخص سبزینگی برگ نداشت (جدول ۲). با توجه به مقایسه میانگین داده‌ها، در بین تیمارهای آبیاری بیش‌ترین میزان شاخص سبزینگی برگ (٤٥/۸۹) به تیمار I_1 اختصاص داشت که با تیمارهای I_2 و I_3 اختلاف معنی‌دار داشت. کم‌ترین شاخص سبزینگی برگ (۳۵/۱۳) نیز در تیمار آبیاری I_3 مشاهده شد (جدول ۳). به‌عبارتی تیمارهای کم‌آبیاری I_2 و I_3 به‌ترتیب سبب کاهش حدود ۵/۳۹ و ۲۳/٤ درصدی سبزینگی برگ نسبت به شرایط آبیاری کامل شدند که با یافته‌های تدین و غفاری (۱۳۹۷) مطابقت دارد. شاخص سبزینگی معیاری از محتوای کلروفیل برگ است و با افزایش میزان کلروفیل شاخص سبزینگی برگ نیز افزایش می‌یابد. کاهش سبزینگی برگ در شرایط تنش خشکی احتمالاً به‌واسطه کاهش چشمگیر میزان کلروفیل است. در شرایط تنش خشکی تخریب و از هم گسیختگی غشا کلروپلاست و تیلاکوئیدها، کاهش ساخت ترکیبات تشکیل‌دهنده کلروفیل، آسیب اکسیداتیو به لیپیدهای کلروپلاست، پروتئین و رنگدانه‌ها باعث کاهش محتوای کلروفیل می‌شود (Allakhverdiev *et al*., 2000; Kaiser *et al*., 1981; Tambussi *et al*., 2000). کاهش متابولیسم نیتروژن در شرایط تنش خشکی نیز احتمالاً اثر قابل‌توجهی در کاهش محتوای کلروفیل برگ نقش دارد (Zahoor *et al*., 2017). علاوه بر این در شرایط تنش خشکی متابولیسم نیتروژن در زمینه ساخت ترکیب‌هایی همچون پرولین که در تنظیم اسمزی به‌کار می‌روند، تغییر می‌کند (سیدان‌جاسبی و همکاران، ۱۳۹۲).

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.42.5.7]

بنابراین، کاهش سبزینگی برگ در شرایط تنش خشکی طولانی مدت ممکن است تا حدودی به‌دلیل کاهش جریان نیتروژن به بافت‌ها و فعالیت نیترات ردوکتاز باشد. در شرایط خشکی آنزیم‌های کلروفیلاز و پراکسیداز نیز از عوامل مؤثر در کاهش میزان کلروفیل هستند (احمدی و همکاران، ۱۳۷۹).

در بین تیمارهای محلول‌پاشی نیز بیش‌ترین شاخص سبزینگی برگ (٤٥/٥١) از محلول‌پاشی بور + پتاسیم به‌دست آمد که با سایر تیمارهای محلول‌پاشی تفاوت معنی‌دار داشت. محلول‌پاشی پتاسیم و بور + پتاسیم به‌ترتیب سبزینگی برگ را حدود ۱۲ و ۱۹/۷۵ درصد افزایش دادند. کم‌ترین شاخص سبزینگی برگ (۳۸) نیز مربوط به تیمار شاهد بود (جدول ۳). محلول‌پاشی بور اگرچه موجب افزایش حدود ۵ درصدی سبزینگی برگ شد؛ ولی با تیمار شاهد از لحاظ آماری اختلاف معنی‌دار نداشت.

در شرایط تنش خشکی گیاهان دچار کمبود پتاسیم به‌دلیل مختل‌شدن دستگاه فتوسنتزی و تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) محتوای کلروفیل کم‌تری دارند (Shehzad *et al.*, 2018). نیتروژن از بخش‌های مهم و جدایی‌ناپذیر کلروفیل است. در شرایط تنش خشکی، پتاسیم از طریق حفظ فعالیت آنزیم‌های دخیل در متابولیسم نیتروژن سبب تنظیم این فرایند می‌شود. بنابراین با تأمین پتاسیم کافی، محتوای نیتروژن برگ بهبود می‌یابد و غلظت کلروفیل و درنتیجه سبزینگی افزایش می‌یابد (Zahoor *et al.*, 2017). به‌طور مشابه طی پژوهشی گزارش شد که در گیاه استویا (*Stevia rebaudiana*) پتاسیم با بهبود فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز سبب افزایش میزان کلروفیل و فتوسنتز شد (Ma and Shi, 2011). هم‌چنین پتاسیم سبب افزایش تولید گرانا و تیلاکوئیدها می‌شود (Le Pabic *et al.*, 1983). با توجه به اینکه رنگدانه‌های فتوسنتزی از جمله کلروفیل در غشاء تیلاکوئیدها قرار دارند، احتمالاً افزایش تیلاکوئیدها به افزایش غلظت کلروفیل کمک می‌کند.

به‌کار بردن عنصر بور دارای اثر هم‌افزایی با جذب نیتروژن است. نیتروژن نیز به‌طور مستقیم در سنتز آمینواسیدها، RNA و پروتئین‌ها نقش دارد و درنهایت سبب افزایش تولید کلروفیل و بنابراین افزایش سبزینگی برگ می‌شود (Shehzad *et al.*, 2018). به‌طور مشابه در چغندرقند نیز مشاهده شد محلول‌پاشی بور سبب افزایش شاخص سبزینگی برگ شد (Abido, 2012).

درصد قند قابل استحصال: اثر تیمارهای آبیاری، محلول‌پاشی و برهمکنش آبیاری × محلول‌پاشی بر درصد قند قابل استحصال ریشه چغندرقند در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). با توجه به مقایسه میانگین داده‌ها؛ بیشترین درصد قند قابل استحصال (۱۷/۹۸ ٪) مربوط به تیمار آبیاری I_2 و محلول‌پاشی بور بود که با تیمار شاهد (عدم محلول‌پاشی) و سایر تیمارهای محلول‌پاشی در همین سطح آبیاری اختلاف معنی‌دار داشت. کم‌ترین درصد قند قابل استحصال (۱۳/۹۸ ٪) نیز به تیمار آبیاری I_3 و عدم محلول‌پاشی اختصاص داشت. در سطح آبیاری I_3 بین تیمارهای محلول‌پاشی بور + پتاسیم، پتاسیم و بور اختلاف معنی‌دار وجود نداشت (جدول ٤). نتایج نشان داد که تنش خشکی ملایم (تیمار آبیاری I_2) اندکی درصد قند قابل استحصال را افزایش داد که با آبیاری کامل (تیمار I_1) تفاوت معنی‌دار ندارد. محلول‌پاشی بور + پتاسیم درصد قند قابل استحصال را در سطوح آبیاری I_1، I_2 و I_3 به‌ترتیب حدود ۱۸/۵۵، ۵/۳، ٦/٤٤ درصد نسبت به تیمارهای شاهد افزایش داد. درصد قند قابل استحصال مهم‌ترین بخش عملکرد اقتصادی چغندرقند به‌شمار می‌رود (نوشاد و همکاران، ۱۳۹۱). یکی از واکنش‌های درونی چغندرقند به کمبود آب افزایش غلظت قند در ریشه است. در چغندرقند ساکارز نیز در کنار پرولین، گلیسین‌بتائین و یون‌هایی همچون سدیم جزء اسمولیت‌های مهم به‌شمار می‌رود (Draycott, 2008). هم‌چنین بالاتربودن عیارقند در شرایط تنش خشکی ممکن است به‌علت از دست‌رفتن آب ریشه‌ها و کوچک‌بودن آن‌ها در این شرایط باشد (Ober, 2001). به‌طور مشابه ماهرخ و خواجه‌پور (۱۳۸۹) نیز نشان دادند؛ افزایش تنش رطوبتی از طریق افزایش عیارقند باعث افزایش درصد شکر قابل استحصال شد. اما تنش خشکی شدید (تیمار آبیاری I_3) درصد قند قابل استحصال را حدود ۱۰

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.42.5.7]

درصد نسبت به شرایط آبیاری کامل کاهش داد. در شرایط خشکی شدید هدایت روزنه‌ای کاهش می‌یابد. درنتیجه با کاهش جذب دی‌اکسید کربن و محدودشدن فتوسنتز، تولید آسیمیلات‌ها نیز کم می‌شود. درنهایت این عوامل منجر به کاهش رشد ریشه و ذخیره قند در ریشه خواهند شد (Draycott, 2008). از طرفی در شرایط تنش خشکی ناخالصی‌های ریشه مثل سدیم، پتاسیم و نیتروژن مضره افزایش می‌یابد که باعث کاهش درصد قند قابل استحصال و افزایش قند ملاس می‌شوند (مهراندیش و همکاران، ۱۳۹۷).

پتاسیم سبب افزایش درصد قند قابل استحصال می‌شود. این عنصر باعث جذب مقدار متعادلی از عناصر غذایی می‌شود که درنهایت به افزایش تولید کربوهیدرات‌ها می‌انجامد (Milford *et al.*, 2000). پتاسیم نقش مهمی در انتقال آسیمیلات‌ها از مبدأ به مقصد دارد (Hermans *et al.*, 2006). بنابراین باعث بهبود انتقال قند از برگ‌ها به ریشه‌های چغندرقند می‌شود. درنتیجه عیارقند و درصد قند قابل استحصال افزایش می‌یابد. از طرفی پتاسیم در کاهش میزان ناخالصی‌های ریشه مثل سدیم نقش دارد. بنابراین میزان قند ورودی به ملاس را کاهش می‌دهد. به‌طور مشابه گزارش شده است افزایش غلظت پتاسیم سبب افزایش شکر قابل استحصال می‌شود (Mubarak *et al.*, 2016).

با توجه به مشاهدات Barker و Pilbeam (۲۰۰۷) بور نیز سبب افزایش میزان انتقال قند از مبدأ به مقصد می‌شود. هم‌چنین گزارش شده است افزایش غلظت بور منجر به افزایش درصد قند قابل استحصال می‌شود که احتمالاً به‌واسطه افزایش عیارقند و کاهش ناخالصی‌های ریشه (سدیم، پتاسیم و نیتروژن مضره) است (Abbas *et al.*, 2014). بنابراین افزایش قند قابل استحصال با به‌کار بردن بور و پتاسیم احتمالاً به‌واسطه نقش مهم این عناصر در انتقال قند و ذخیره و تجمع آن در ریشه چغندرقند است (El-hady *et al.*, 2017). با توجه به نتایج به‌دست آمده در این پژوهش؛ در شرایط آبیاری کامل (I_1) بیشترین درصد قند قابل استحصال از محلول‌پاشی بور + پتاسیم به‌دست آمد. اما در تیمارهای تنش خشکی ملایم و شدید (I_2 و I_3) بیشترین درصد قند قابل استحصال مربوط به محلول‌پاشی بور بود. این نتیجه احتمالاً ناشی از این است که در شرایط تنش خشکی با حضور پتاسیم گیاه نیاز کمتری به تجمع ساکارز به‌عنوان یک اسمولیت جهت تنظیم اسمزی دارد؛ بنابراین درصد قند قابل استحصال در تیمار محلول‌پاشی بور نسبت به تیمارهایی که در آن‌ها پتاسیم حضور داشته افزایش یافته است.

محتوای سدیم ریشه: اثر تیمارهای آبیاری، محلول‌پاشی و برهمکنش آبیاری × محلول‌پاشی بر محتوای سدیم ریشه چغندرقند به‌ترتیب در سطح احتمال ۱ درصد و ۵ درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). بیشترین میزان سدیم ریشه (۲/۱۱ میلی‌اکی‌والان در صد گرم ریشه) به تیمار آبیاری I_3 و عدم محلول‌پاشی اختصاص داشت که با محلول‌پاشی بور در همین سطح از آبیاری اختلاف معنی‌دار نداشت. کم‌ترین محتوای سدیم ریشه (۱/۰٦ میلی‌اکی‌والان در صد گرم ریشه) نیز مربوط به تیمار آبیاری I_1 و محلول‌پاشی بور + پتاسیم بود که با محلول‌پاشی پتاسیم در همین سطح از آبیاری اختلاف معنی‌دار نداشت (جدول ٤). نتایج نشان داد که تنش خشکی سبب افزایش محتوای سدیم ریشه چغندرقند شد. به‌طوری‌که تیمارهای کم‌آبیاری I_2 و I_3 میزان سدیم ریشه را به‌ترتیب حدود ۱۲ و ۳۹ درصد نسبت به شرایط آبیاری کامل افزایش دادند. تیمارهای محلول‌پاشی سبب کاهش میزان سدیم ریشه در همه سطوح آبیاری شدند. محلول‌پاشی بور + پتاسیم در سطح آبیاری I_1، I_2 و I_3 محتوای سدیم ریشه را به‌ترتیب حدود ۳۰، ۳٦ و ۳۵ درصد نسبت به تیمارهای شاهد کاهش داد.

افزایش کیفیت محصول چغندرقند از طریق بالابردن درصد قند و کاهش مواد غیرقندی به‌ویژه نیتروژن، سدیم و پتاسیم انجام می‌گیرد. افزایش این ناخالصی‌ها با جلوگیری از کریستالیزه شدن ساکارز، قابلیت استحصال قند را کاهش داده و موجب افزایش میزان قند ملاس می‌شوند (Kerr and Leaman, 1997). به‌طوری‌که برای هر اتم سدیم یا پتاسیم یک مولکول قند به‌صورت ضایعات وارد ملاس می‌شود (Giroux and Tran, 1989). کاهش عملکرد ریشه چغندرقند در اثر تنش

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.42.5.7]

خشکی، عامل اصلی افزایش محتوای سدیم ریشه در تیمارهای کم‌آبیاری است (مهراندیش و همکاران، ۱۳۹۷). بنابراین تیمارهای محلول‌پاشی با بهبود عملکرد ریشه چغندرقند در کاهش میزان سدیم ریشه مؤثر هستند. از طرفی عناصر سدیم، پتاسیم و کربوهیدرات‌های محلول نقش مهمی در فرایند تنظیم اسمزی در چغندرقند بر عهده دارند (Lindhauer *et al.*, 1990). به همین دلیل گیاه در مواجهه با تنش خشکی، احتمالاً با هدف ایجاد تنظیم اسمزی، اقدام به افزایش جذب سدیم کرده است و غلظت را آن در ریشه افزایش داده است. با توجه به اینکه سدیم و پتاسیم در چغندرقند قابلیت جانشینی برای یکدیگر دارند؛ با انجام محلول‌پاشی و افزایش دسترسی گیاه به پتاسیم از میزان جذب سدیم کاسته شده است. به‌طور مشابه طی پژوهشی گزارش شد به‌کاربردن ۲۹۶ کیلوگرم در هکتار پتاسیم سبب کاهش میزان سدیم ریشه و اندام هوایی چغندرقند شد (Mubarak *et al.*, 2016).

بور نیز در کاهش اثرات سوء تنش خشکی نقش دارد. زیرا علاوه بر داشتن اثرات اسمزی، در افزایش طول ریشه چغندرقند نیز مؤثر است (Abbas *et al.*, 2014). بنابراین بور باعث بهبود وضعیت آب در گیاه می‌شود. در نتیجه گیاه نیاز کمتری به تجمع اسمولیت‌هایی همچون سدیم جهت کاهش پتانسیل اسمزی دارد. با توجه به مشاهدات Dewdar و همکاران (۲۰۱۵) محلول‌پاشی بور به شکل اسید بوریک سبب کاهش محتوای سدیم ریشه چغندرقند شد.

محتوای پتاسیم ریشه: اثر تیمارهای آبیاری، محلول‌پاشی و برهمکنش آبیاری × محلول‌پاشی بر محتوای پتاسیم ریشه چغندرقند به‌ترتیب در سطح احتمال ۱ درصد و ۵ درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). بیش‌ترین محتوای پتاسیم ریشه (۵/۵ میلی‌اکی‌والان در صد گرم ریشه) به تیمار آبیاری I_3 و عدم محلول‌پاشی اختصاص داشت که با محلول‌پاشی بور در همین سطح از آبیاری اختلاف معنی‌دار نداشت. کمترین محتوای پتاسیم ریشه (٤/٦١ میلی‌اکی‌والان در صد گرم ریشه) نیز مربوط به تیمار آبیاری I_1 و محلول‌پاشی بور + پتاسیم بود که با محلول‌پاشی پتاسیم در این سطح آبیاری تفاوت معنی‌دار نداشت (جدول ٤). نتایج نشان داد تیمارهای کم‌آبیاری سبب افزایش محتوای پتاسیم ریشه چغندرقند شد. به‌طوری‌که تیمارهای کم‌آبیاری I_2 و I_3 به‌ترتیب میزان پتاسیم ریشه را حدود ۱/٦٥ و ۸/۲٦ درصد نسبت به شرایط آبیاری کامل افزایش دادند. تیمارهای محلول‌پاشی میزان پتاسیم ریشه را در همه سطوح آبیاری کاهش دادند. محلول‌پاشی بور + پتاسیم در سطوح آبیاری I_1، I_2 و I_3 به‌ترتیب محتوای پتاسیم ریشه را ۸/٤۸، ۹/۷۳ و ۸/٤۷ درصد نسبت به تیمارهای شاهد کاهش داد. پتاسیم یکی از مهم‌ترین اسمولیت‌های غیرآلی در گیاهان است که نقش مهمی در فرایند تنظیم اسمزی هنگام مواجهه گیاه با تنش خشکی دارد (Marschner, 2012). بنابراین طبیعی است که گیاه در مقابله با خشکی اقدام به افزایش جذب پتاسیم نماید. طی پژوهشی میرزایی و رضوانی (۱۳۸٦) گزارش کردند تنش خشکی سبب افزایش معنی‌دار سدیم و پتاسیم ریشه چغندرقند و تجمع این عناصر به‌صورت ذخیره و مصرف نشده در ریشه شد. بنابراین محلول‌پاشی بور + پتاسیم احتمالاً با تنظیم عملکرد روزنه‌ها و بهبود وضعیت آب در گیاه سبب کاهش اثرات تنش خشکی شد. در نتیجه جذب و ذخیره پتاسیم در ریشه چغندرقند کاهش یافت. از طرفی محلول‌پاشی برگی موجب شد تا پتاسیم به سهولت و با سرعت بیشتری در اختیار گیاه قرار گیرد؛ بنابراین جذب پتاسیم توسط ریشه و در نتیجه غلظت آن در ریشه کاهش یافت. به‌طور مشابه مهراندیش و همکاران (۱۳۹۷) مشاهده کردند با افزایش میزان مصرف پتاسیم، غلظت پتاسیم ریشه به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافت. همچنین گزارش شده است به‌کاربردن بور نیز با کاهش محتوای پتاسیم ریشه سبب افزایش کیفیت عصاره ریشه چغندرقند شد. در شرایط کمبود بور رشد گیاه محدود می‌شود؛ در نتیجه غلظت سدیم و پتاسیم افزایش می‌یابد. بنابراین به‌کاربردن بور سبب افزایش رشد گیاه و کاهش غلظت سدیم و پتاسیم می‌شود (Narayan *et al.*, 1989).

آلکالیته یا ضریب قلیائیت: تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر تیمارهای محلول‌پاشی بر ضریب قلیائیت ریشه چغندرقند در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد ولی

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.42.5.7]

تیمارهای آبیاری و برهمکنش آبیاری × محلول‌پاشی تأثیر معنی‌دار بر ضریب قلیائیت ریشه نداشتند (جدول ۲). با توجه به مقایسه میانگین داده‌ها، بیشترین ضریب قلیائیت (۳/۰۱) مربوط به محلول‌پاشی پتاسیم بود که از لحاظ آماری با محلول‌پاشی بور + پتاسیم اختلاف معنی‌دار نداشت. کم‌ترین میزان آلکالیته (۲/۶۳) نیز از محلول‌پاشی بور به‌دست آمد که با تیمار عدم محلول‌پاشی تفاوت معنی‌دار نشان نمی‌داد (جدول ۳). با توجه به نتایج به‌دست آمده محلول‌پاشی پتاسیم آلکالیته را حدود ۱۲/۳۱ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد.

آلکالیته براساس میزان عناصر نیتروژن، سدیم و پتاسیم ریشه محاسبه می‌شود و در پیش‌بینی تغییرات اسیدیته (pH) شربت طی مرحله تبخیر مفید است. وقتی مقدار آن کم‌تر از ۲ باشد، برای نگه‌داشتن اسیدیته مواد قلیایی اضافه می‌کنند اما این مواد استخراج قند را کاهش می‌دهند (Giroux and Tran, 1989). نتایج نشان داد که محلول‌پاشی پتاسیم سبب کاهش محتوای سدیم، پتاسیم و نیتروژن مضره ریشه شد ولی تأثیر آن در کاهش میزان نیتروژن مضره بیشتر از اثر آن در کاهش محتوای سدیم و پتاسیم بود؛ بنابراین آلکالیته افزایش یافت. پتاسیم احتمالاً به سبب نقشی که در بهبود تغذیه و متابولیسم نیتروژن دارد منجر به کاهش میزان نیتروژن مضره شده است. مشاهده شده است مصرف ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار اکسیدپتاسیم (K_2O) باعث افزایش ضریب قلیائیت ریشه در مقایسه با تیمار شاهد شد (مهراندیش و همکاران، ۱۳۹۷).

ضریب استحصال شکر: اثر تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی بر ضریب استحصال شکر (ECS) ریشه چغندرقند در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد ولی برهمکنش آبیاری × محلول‌پاشی اثر معنی‌دار بر ضریب استحصال شکر نداشت (جدول ۲). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد در بین تیمارهای آبیاری بیشترین ضریب استحصال شکر (۸۶/۲۳ ٪) از تیمار آبیاری I_1 به‌دست آمد که لحاظ آماری با تیمار I_2 تفاوت معنی‌دار نداشت. کم‌ترین ضریب استحصال شکر (۸۳/۳۹ ٪) نیز به تیمار آبیاری I_3 اختصاص داشت (جدول ۳). تنش خشکی شدید (تیمار I_3) ضریب استحصال شکر را حدود ۳/۳ درصد نسبت به شرایط آبیاری کامل (تیمار I_1) کاهش داد. ضریب استحصال شکر یا راندمان استحصال شکر در واقع نسبت ساکارز قابل استحصال به کل ساکارز موجود در ریشه است و به‌صورت درصد بیان می‌شود (عروج‌نیا و همکاران، ۱۳۹۱). در شرایط خشکی احتمالاً افزایش ناخالصی‌های ریشه همچون سدیم، پتاسیم و نیتروژن مضره سبب کاهش ضریب استحصال شکر شده است.

از لحاظ محلول‌پاشی بیشترین ضریب استحصال شکر (۸۶/۵۲ ٪) از تیمار محلول‌پاشی بور + پتاسیم به‌دست آمد که با تیمار محلول‌پاشی پتاسیم اختلاف معنی‌دار نداشت. کم‌ترین ضریب استحصال شکر (۸۳/۳۷ ٪) نیز به تیمار عدم محلول‌پاشی اختصاص داشت (جدول ۳). تیمارهای محلول‌پاشی بور + پتاسیم، پتاسیم و بور به‌ترتیب ضریب استحصال شکر را حدود ۳/۸، ۳/۳ و ۲ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش دادند. تیمارهای محلول‌پاشی احتمالاً با کاهش ناخالصی‌های ریشه و افزایش درصد قند قابل استحصال منجر به افزایش ضریب استحصال شکر شده‌اند.

عملکرد ریشه: براساس نتایج تجزیه واریانس، اثر تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی بر عملکرد ریشه چغندرقند در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد؛ ولی برهمکنش آبیاری × محلول‌پاشی تأثیر معنی‌دار بر عملکرد ریشه نداشت (جدول ۲). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد، در بین تیمارهای آبیاری بیشترین عملکرد ریشه (۵۵/۶۲ تن در هکتار) به تیمار I_1 اختصاص داشت که با سایر تیمارهای آبیاری اختلاف معنی‌داری نشان داد. کم‌ترین عملکرد ریشه (۲۵/۰۵ تن در هکتار) نیز از تیمار I_3 به‌دست آمد (جدول ۳). به‌عبارتی تیمارهای کم‌آبیاری I_2 و I_3 به‌ترتیب سبب کاهش حدود ۲۸/۹۸ و ۵۴/۹۶ درصدی عملکرد ریشه نسبت به شرایط آبیاری کامل شدند که با یافته‌های ماهرخ و خواجه‌پور (۱۳۸۹) مطابقت داشت. تنش خشکی باعث کاهش هدایت روزنه‌ای می‌شود. در نتیجه میزان فتوسنتز و سطح برگ کاهش می‌یابد (Hernandez-Santana *et al*., 2017). درنهایت با کاهش تولید آسیمیلات‌ها عملکرد ریشه نیز کاهش پیدا می‌کند. Scott و Cooke (۱۹۹۳)

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.42.5.7]

اظهار داشتند در شرایط تنش خشکی دو دلیل برای کاهش رشد برگ‌ها و ریشه‌های ذخیره‌ای چغندرقند وجود دارد که عبارتند از: پتانسیل فشاری کم که موجب کندی توسعه سلول‌ها می‌شود و کاهش هدایت روزنه‌ای که باعث کم‌شدن جذب دی‌اکسید کربن برای تولید ماده خشک می‌شود.

در بین تیمارهای محلول‌پاشی بیشترین عملکرد ریشه (٤٤/٣٩ تن در هکتار) به محلول‌پاشی بور + پتاسیم اختصاص داشت که با سایر تیمارهای محلول‌پاشی اختلاف معنی‌داری داشت. به عبارتی محلول‌پاشی بور + پتاسیم عملکرد ریشه را حدود ٢١/٦ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد و از این لحاظ نسبت به سایر تیمارهای محلول‌پاشی برتری داشت. کم‌ترین عملکرد ریشه (٣٦/٥١ تن در هکتار) نیز در شرایط عدم محلول‌پاشی به‌دست آمد (جدول ٣). محلول‌پاشی بور اگر چه عملکرد ریشه را حدود ٥ درصد افزایش داد؛ اما با تیمار شاهد تفاوت معنی‌داری نداشت. در شرایط تنش خشکی رشد ریشه‌ها و میزان انتشار پتاسیم موجود در خاک به طرف ریشه‌ها محدود می‌شود؛ بنابراین با کاهش جذب پتاسیم مقاومت گیاه به خشکی کم می‌شود (Wang *et al*., 2013). تأمین پتاسیم کافی سبب بهبود تجمع ماده خشک در گیاه در شرایط تنش خشکی می‌شود که احتمالاً به‌واسطه نقش این عنصر در تنظیم عملکرد روزنه‌ها و در نتیجه افزایش میزان فتوسنتز است (Marschner, 2012). در شرایط تنش خشکی همبستگی مثبتی بین میزان فتوسنتز و مصرف پتاسیم وجود دارد (Zorb *et al*., 2014). پتاسیم هم‌چنین عنصری ضروری جهت انتقال آسیمیلات‌ها به ریشه است (Romheld and Kirkby, 2010). در نتیجه سبب افزایش رشد ریشه‌ها و افزایش عملکرد ریشه می‌شود. نقش پتاسیم در افزایش عملکرد ممکن است به اهمیت آن در متابولیسم کربوهیدرات‌ها، نیتروژن و جذب آب نسبت داده شود (Abdel-Mawly and Zanouny, 2004). در مجموع در شرایط تنش خشکی، تغذیه گیاه با پتاسیم علاوه بر افزایش سطح برگ و تولید ماده خشک سبب بهبود نگهداری آب در بافت‌های گیاهی نیز خواهد شد (Lindhauer, 1985). به‌طور مشابه گزارش شده است مصرف پتاسیم سبب افزایش عملکرد ریشه چغندرقند شد (Sarkar and Ghosh, 1989).

عنصر بور نیز نقش مهمی در رشد و تولید بسیاری از گیاهان زراعی خصوصاً چغندرقند داراست. معمولاً در خاک‌های خشک و قلیایی کمبود بور دیده می‌شود. حتی در گیاهانی که در خاک‌های غنی از عناصر غذایی رشد کرده‌اند، خشکی می‌تواند سبب بروز علائم کمبود عناصر معدنی شود (Ahanger *et al*., 2016). اثرات مثبت بور بر عملکرد ریشه چغندرقند احتمالاً به‌خاطر نقش آن در طویل‌شدن سلول‌های ریشه است (Mekdad, 2015). با توجه به مشاهدات Dewdar و همکاران (٢٠١٥) بور در فعالیت آنزیم‌هایی که باعث تسهیل انتقال کربوهیدرات‌ها و هم‌چنین سنتز پروتئین‌ها می‌شوند؛ نقش دارد. کمبود بور سبب آسیب به مریستم‌های انتهای ریشه می‌شود؛ بنابراین رشد ریشه و جذب آب کاهش می‌یابد. از طرفی کمبود بور باعث کاهش غلظت کلروفیل برگ، آسیب اکسیداتیو به کلروپلاست و اختلال در عملکرد سلول‌های محافظ روزنه می‌شود (Wimmer and Eichert, 2013). مجموعه این عوامل سبب کاهش فتوسنتز و درنهایت کاهش عملکرد خواهند شد. بنابراین محلول‌پاشی بور سریعاً این عنصر را در دسترس گیاه قرار می‌دهد و سبب افزایش عملکرد ریشه می‌شود که با یافته‌های Gobarah و Mekki (٢٠٠٥) مطابقت دارد.

عملکرد قند ناخالص یا عملکرد شکر: با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی بر عملکرد قند ناخالص ریشه چغندرقند در سطح احتمال ١ درصد معنی‌دار شد ولی برهمکنش آبیاری × محلول‌پاشی تأثیر معنی‌دار بر عملکرد قند ناخالص نداشت (جدول ٢). از لحاظ آبیاری بیشترین عملکرد قند ناخالص یا عملکرد شکر (١٠/٥٧ تن در هکتار) از تیمار آبیاری I_1 به‌دست آمد که با تیمارهای I_2 و I_3 اختلاف معنی‌دار داشت. کم‌ترین عملکرد قند ناخالص (٤/٤ تن در هکتار) نیز مربوط به تیمار I_3 بود (جدول ٣). نتایج نشان داد که خشکی شدید (تیمار I_3) عملکرد شکر را حدود ٥٨/٣٧ درصد نسبت به آبیاری کامل کاهش داد. با توجه به

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.42.5.7]

مشاهدات عروج‌نیا و همکاران (۱۳۹۱) بین سطوح مختلف آبیاری (تنش و نرمال) از لحاظ عملکرد قند ناخالص تفاوت معنی‌دار وجود نداشت. با این حال عملکرد قند ناخالص در شرایط آبیاری نرمال بیشتر بود. اگر چه ممکن است در شرایط تنش رطوبتی متوسط عیارقند افزایش یابد (ماهرخ و خواجه‌پور، ۱۳۸۹) ولی به‌دلیل کاهش عملکرد ریشه درنهایت عملکرد قند ناخالص کاهش پیدا می‌کند.

در بین تیمارهای محلول‌پاشی نیز بیشترین عملکرد قند ناخالص (۸/۴۹ تن در هکتار) از محلول‌پاشی بور + پتاسیم به‌دست آمد که با سایر تیمارهای محلول‌پاشی اختلاف معنی‌دار داشت. کم‌ترین عملکرد قند ناخالص (۶/۵۲ تن در هکتار) نیز مربوط به شرایط عدم محلول‌پاشی بود. از لحاظ آماری بین تیمارهای محلول‌پاشی بور و محلول‌پاشی پتاسیم اختلاف معنی‌دار وجود نداشت (جدول ۳). محلول‌پاشی بور + پتاسیم، پتاسیم و بور به‌ترتیب عملکرد قند ناخالص را حدود ۳۰/۲، ۱۸ و ۱۴/۹ درصد نسبت تیمار شاهد افزایش دادند. پتاسیم به‌واسطه نقشی که در جذب عناصر غذایی و ایجاد تعادل غذایی دارد، منجر به افزایش تولید آسیمیلات‌ها و در نتیجه بالابردن عملکرد شکر می‌شود (Milford *et al.*, 2000). پتاسیم سبب افزایش محتوای قند ریشه می‌شود و نقش بیوشیمیایی مهمی در انتقال قند در گیاهان بر عهده دارد (Abdel-Mawly and Zanouny, 2004). بور نیز احتمالاً به‌دلیل نقش آن در افزایش عیارقند و عملکرد ریشه چغندرقند سبب افزایش عملکرد شکر می‌شود. به‌طور مشابه طی پژوهشی گزارش شد محلول‌پاشی بور عملکرد قند ناخالص را افزایش داد (Mekdad, 2015).

نتیجه‌گیری

باتوجه به نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، تنش خشکی آثار نامطلوبی بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک چغندرقند همچون شاخص سطح برگ، شاخص سبزینگی برگ و محتوای نسبی آب برگ برجا می‌گذارد. در نتیجه با کاهش میزان فتوسنتز و تولید آسیمیلات‌ها وزن خشک بوته و عملکرد ریشه نیز کاهش می‌یابد. علاوه بر صفات مورفوفیزیولوژیک، ویژگی‌های کیفی ریشه چغندرقند نیز تحت تأثیر تنش خشکی قرار می‌گیرد. بدین ترتیب که با افزایش سطح خشکی میزان ناخالصی‌های ریشه (سدیم، پتاسیم و نیتروژن مضره) افزایش پیدا می‌کند و کیفیت آن کاهش می‌یابد. نتایج این پژوهش نشان داد؛ اگر چه تنش خشکی ملایم اندکی درصد قند قابل استحصال را افزایش داد، اما کاهش قابل ملاحظه عملکرد ریشه سبب کاهش عملکرد شکر شد. تیمارهای محلول‌پاشی بور و پتاسیم باعث بهبود صفات مورفوفیزیولوژیک گیاه می‌شوند. بنابراین تا حدی اثرات سوء تنش خشکی را بر صفات کمی و کیفی چغندرقند کاهش می‌دهند که احتمالاً به‌واسطه نقش مهم این عناصر در فرایند تنظیم اسمزی و دیگر واکنش‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه است. بنابراین از آنجایی که خشکی یکی از عوامل اصلی کاهش عملکرد چغندرقند در نواحی خشک و نیمه‌خشک جهان و ایران است، محلول‌پاشی عناصر بور و پتاسیم به‌عنوان رهیافتی جهت مقابله با خشکی توصیه می‌شود.

منابع

اسماعیلی، ا. و تدین، م. ر. (۱۳۹۸) تأثیر تنش خشکی و اسید هیومیک بر رشد، عملکرد و شکر تولیدی توسط چغندرقند (*Beta vulgaris* L.). نشریه بوم‌شناسی کشاورزی ۱: ۱۹۸-۱۸۵.

امام، ی. و نیک‌نژاد، م. (۱۳۹۰) مقدمه‌ای بر فیزیولوژی عملکرد گیاهان زراعی. انتشارات دانشگاه شیراز، شیراز.

احمدی، ج.، چوگان، ر.، زینالی خانقاه، ح. و رستمی، م. ع. (۱۳۷۹) بررسی شاخص‌های مقاومت به خشکی و استفاده از روش‌های بای‌پلات در هیبریدهای ذرت دانه‌ای. مجله علوم کشاورزی ایران ۳: ۵۲۴-۵۱۳.

خواجه‌پور، م. ر. (۱۳۹۱) گیاهان صنعتی. چاپ پنجم. انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، اصفهان.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.42.5.7]

سیدان جاسبی، م. و احسان‌زاده، پ. (۱۳۹۲) بررسی ویژگی‌های فیزیولوژیک مرتبط با اثر تنش کمبود آب در ژنوتیپ‌های کنجد (*Sesamum indicum* L.). نشریه علوم گیاهان زراعی ایران ٤: ۵۸۳-۵۷۵.

عباسی‌مقدم، ا.، عبادی، ع. و شهبازی، ح. (۱۳۹۳) اثر پتاسیم و روی بر عملکرد، اجزای عملکرد و برخی صفات فیزیولوژیک نخود در شرایط دیم. فصل‌نامه بوم‌شناسی گیاهان زراعی ٤: ۲۵-۱۱.

عبداللهیان نوقابی، م.، شیخ‌الاسلامی، ر. و بابایی، ب. (۱۳۸٤) اصطلاحات و تعاریف کمیت و کیفیت تکنولوژیکی چغندرقند، اختصارات فنی. نشریه چغندرقند ۱: ۱۰٤-۱۰۱.

عروج‌نیا، س.، حبیبی، د.، فتح الله طالقانی، د.، صفری دولت آبادی، س.، پازکی، ع.، معاونی، پ.، رحمانی، م. و فرشیدی، م. (۱۳۹۱) بررسی عملکرد و اجزاء عملکرد ژنوتیپ‌های مختلف چغندرقند تحت شرایط تنش خشکی. مجله زراعت و اصلاح نباتات ۸: ۱٤٤-۱۲۷.

غفاری، ح. و تدین، م. ر. (۱۳۹٦) تأثیر چای ورمی‌کمپوست بر صفات مورفوفیزیولوژیک، عملکرد و کیفیت ریشه چغندرقند (*Beta vulgaris* L.) تحت شرایط کمبود آب. نشریه چغندرقند ۲: ۱۹۱-۱۷۷.

غفاری، ح. و تدین، م. ر. (۱۳۹۷) تأثیر محلول‌پاشی پرولین بر برخی شاخص‌های فیزیولوژیک چغندرقند (*Beta vulgaris* L.) در شرایط کمبود آب. فصلنامه فرایند و کارکرد گیاهی ۲٦: ۲٦-۱۳.

کافی، م.، برزوئی، ا.، صالحی، م.، کمندی، ع.، معصومی، ع. و نباتی، ج. (۱۳۹۷) فیزیولوژی تنش‌های محیطی در گیاهان. چاپ چهارم. انتشارات جهاد دانشگاهی، مشهد.

ماهرخ، ع. و خواجه‌پور، م. ر. (۱۳۸۹) تأثیر رژیم رطوبتی بر شاخص‌های رشد و عملکرد کمی و کیفی چغندرقند. نشریه علوم گیاهان زراعی ایران ۲: ۲٤٦-۲۳۵.

مهراندیش، م.، جامی‌معینی، م. و آرمین، م. (۱۳۹۷) اثر منبع و مقدار مصرف پتاسیم بر ویژگی‌های کیفی چغندرقند رقم ارس در شرایط آبیاری کامل و محدود. مجله اکوفیزیولوژی گیاهی ۳٤: ۱۰۸-۹۷.

میرزایی، م. ر. و رضوانی، س. م. ا. (۱۳۸٦) تأثیر تنش خشکی بر خصوصیات کیفی چغندرقند در مراحل مختلف رشد رویشی. نشریه چغندرقند ۱: ٤۲-۲۹.

نوشاد، ح.، عبداللهیان نوقابی، م. و بابایی، ب. (۱۳۹۱) تأثیر مقادیر مختلف کودهای نیتروژن و فسفر بر میزان جذب و کارایی نیتروژن در چغندرقند. نشریه علوم گیاهان زراعی ایران ۳: ۵۳۹-۵۲۹.

ولدآبادی، س. ع. ر. و علی‌آبادی فراهانی، ح. (۱۳۸۷) اثر کاربرد پتاسیم بر خواص کمی و توسعه ریشه در ذرت، سورگوم و ارزان در شرایط تنش خشکی. فصلنامه زراعت و اصلاح نباتات۲: ٤۹-۳۷.

Abbas, M. S., Dewdar, M. D. H., Gaber, E. I. and El-Aleem, H. A. (2014) Impact of boron foliar application on quantity and quality traits of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) in Egypt. Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences 5: 143-151.

Abdel-Mawly, S. E. and Zanouny, I. (2004) Response of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) to potassium application and irrigation with saline water. Assiut University Bulletin for Environmental Researches 7: 123-136.

Abdel-Motagally, F. M. F. and El-Zohri, M. (2016) Improvement of wheat yield grown under drought stress by boron foliar application at different growth stages. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences 17: 178-185.

Abido, W. A. E. (2012) Sugar beet productivity as affected by foliar spraying with methanol and boron. International Journal of Agriculture Sciences 4: 287-292.

Adams, E. and Shin, R. (2014) Transport, signaling, and homeostasis of potassium and sodium in plants. Journal of Integrative Plant Biology 56: 231-249.

Ahanger, M. A., MoradTalab, N., Fathi Abd-Allah, E., Ahmad, P. and Hajiboland, R. (2016) Plant growth under drought stress: Significance of mineral nutrients. Water Stress and Crop Plants: A Sustainable Approach 2: 649-668.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.42.5.7]

Akram, M. S., Athar, H. R. and Ashraf, M. (2007) Improving growth and yield of sunflower (*Helianthus annuus* L.) by foliar application of potassium hydroxide (KOH) under salt stress. Pakistan Journal of Botany 39: 769-776.

Allakhverdiev, S. I., Sakamoto, A., Nishiyama, Y. and Murata, N. (2000) Inactivation of photosystems I and II in response to osmotic stress in Synechococcus. Contribution of water channels. Plant Physiology 122: 1201-1208.

Allison, M. (1996) The micronutrient needs of sugar beet. British Sugar Beet Review 64: 26-29.

Anjum, S. A., Ashraf, U., Tanveer, M., Khan, I., Hussain, S., Shahzad, B., Zohaib A., Farhat, A., Muhammad, S., Iftikhar, A. and Wang, L. C. (2017) Drought induced changes in growth, osmolyte accumulation and antioxidant metabolism of three maize hybrids. Frontiers in Plant Science 8: 1-12.

Aown, M., Raza, S., Saleem, M. F., Anjum, S. A., Khaliq, T. and Wahid, M. A. (2012) Foliar application of potassium under water deficit conditions improved the growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.). Journal of Animal and Plant Sciences 22: 431-437.

Bahrami-Rad, S. and Hajiboland, R. (2017) Effect of potassium application in drought-stressed tobacco (*Nicotiana rustica* L.) plants: Comparison of root with foliar application. Annals of Agricultural Sciences 62: 121-130.

Barker, A. V. and Pilbeam, D. J. (2007) Handbook of plant nutrition (Books in soils, plants, and the environment). 1nd Ed. Crc Press, Boca Raton.

Barker, D. J., Sullivan, C. Y. and Moser, L. E. (1993) Water deficit effects on osmotic potential, cell wall elasticity, and proline in five forage grasses. Agronomy Journal 85: 270-275.

Bates, L. S., Waldren, R. P. and Teare, I. D. (1973) Rapid determination of free proline for water-stress studies. Plant and Soil 39: 205-207.

Blum, A. and Ebercon, A. (1976) Genotypic responses in sorghum to drought stress. III. Free Proline accumulation and drought resistance. Crop Science 16: 428-431.

Castrillo, M. and Trujillo, I. (1994) Ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase activity and chlorophyll and protein contents in two cultivars of French bean plants under water stress and rewatering. Photosynthetica 30: 175-181.

Clover, G., Smith, H. and Jaggard, K. (1998) The crop under stress. British Sugar Beet Review 66: 17-19.

Cooke, D. A. and Scott, R. K. (1993) The sugar beet crop: Science into practice. Champan and Hall, New York.

Dewdar, M. D. H., Abbas, M. S., Gaber, E. I. and Abd El-Aleem, H. A. (2015) Influence of time addition and rates of boron foliar application on growth, quality and yield traits of sugar beet. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences 4: 231-238.

Draycott, A. P. (2008) Sugar beet. Black Well Publishing, Oxford.

Egilla, J. N., Davies, F. T. and Boutton, T. W. (2005) Drought stress influences leaf water content, photosynthesis, and water-use efficiency of *Hibiscus rosa-sinensis* at three potassium concentrations. Photosynthetica 43: 135-140.

El-Geddawy, D. I. and Makhlouf, B. S. I. (2015) Effect of hill spacing and nitrogen and boron fertilization levels on yield and quality attributes in sugar beet. Minufiya Journal of Agricultural Research 40: 959-980.

El-hady, A. (2017) Response of sugar beet growth, productivity and quality to foliar application of different forms of boron microelement and number of sprays under new reclaimed soil conditions. Egyptian Journal of Agronomy 39: 401-410.

Farouk, S. and Amany, A. R. (2012) Improving growth and yield of cowpea by foliar application of chitosan under water stress. Egyptian Journal of Biology 14: 14-16.

Fernandez, V. and Brown, P. H. (2013) From plant surface to plant metabolism: The uncertain fate of foliar-applied nutrients. Frontiers in Plant Science 4: 1-5.

Giroux, M. and Tran, T. S. (1989) Effect of potassium fertilization and NK interaction on sugar beet quality and yield. Journal of Sugar Beet Research 26: 11-23.

Gobarah, M. E. and Mekki, B. B. (2005) Influence of boron application on yield and juice quality of some sugar beet cultivars grown under saline soil conditions. Journal of Applied Sciences Research 1: 373-379.

Grzebisz, W., Gransee, A., Szczepaniak, W. and Diatta, J. (2013) The effects of potassium fertilization on water use efficiency in crop plants. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 176: 355-374.

Gustav, O. A., Pereyra, I., Luciano, V., Leandra, L. and Aguirrezabal, L. A. N. (2008) Genetic variability for leaf growth rate and duration under water deficit in sunflower: Analysis of responses at cell, organ, and plant level. Journal of Experimental Botany 59: 2221-32.

Hermans, C., Hammond, J. P., White, P. J. and Verbruggen, N. (2006) How do plants respond to nutrient shortage by biomass allocation? Trends in Plant Science 11: 610-617.

Hernandez-Santana, V., Fernandez, J. E., Cuevas, M. V., Perez-Martin, A. and Diaz-Espejo, A. (2017) Photosynthetic limitations by water deficit: Effect on fruit and olive oil yield, leaf area and trunk diameter and its potential use to control vegetative growth of super-high density olive orchards. Agricultural Water Management 184: 9-18.

Ibrahim, M. M., Khalifa, M. R., Koriem, M. A., Zein, F. I. and Omer, E. H. (2002) Yield and quality of sugar beet crop as affected by mid to late season drought and potassium fertilization at North Nile Delta. Egyptian Journal of Soil Science 42: 87-102.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.42.5.7]

Kaiser, W. M., Kaiser, G., Schoner, S. and Neimanis, S. (1981) Photosynthesis under osmotic stress: Differential recovery of photosynthetic activities of stroma enzymes, intact chloroplasts, protoplasts, and leaf slices after exposure to high solute concentrations. Planta 13: 430-435.

Kant, S. and Kafkafi, U. (2002) Potassium and abiotic stresses in plants. In: Potassium for Sustainable Crop Production (eds. Pasricha, N. and Bansal, S.) Pp. 233-251. Potash Institute of India, Gurgaon.

Kaya, C., Kirnak, H. and Higgs, D. (2001) Enhancement of growth and normal growth parameters by foliar application of potassium and phosphorus in tomato cultivars grown at high (NaCl) salinity. Journal of Plant Nutrition 24: 357-367.

Kerr, S. and leaman, M. (1997) Varieties for 1998. British Sugar Beet Review 65: 7-11.

Krasensky, J. and Jonak, C. (2012) Drought, salt, and temperature stress-induced metabolic rearrangements and regulatory networks. Journal of Experimental Botany 63: 1593-1608.

Kristek, A., Stojic, B. and Kristek, S. (2006) Effect of the foliar boron fertilization on sugar beet root yield and quality. Poljoprivreda 12: 22-26.

Kwak, J. M., Murata, Y., Baizabal-Aguirre, V. M., Merrill, J., Wang, M., Kemper, A., Hawke, S. D., Gray, T. and Schroeder, J. I. (2001) Dominant negative guard cell K^+ channel mutants reduce inward-rectifying K^+ currents and light-induced stomatal opening in Arabidopsis. Plant Physiology 127: 473-485.

Lang, Y., Wang, M., Xia, J. and Zhao, Q. (2018) Effects of soil drought stress on photosynthetic gas exchange traits and chlorophyll fluorescence in *Forsythia suspensa*. Journal of Forestry Research 29: 45-53.

Le Pabic, C., Farineau, N. and Roussaux, J. (1983) Effects of 6-benzylaminopurine and potassium chloride on the greening of detached cucumber cotyledons. Zeitschrift for Pflanzenphysiologie 111: 261-272.

Lindhauer, M. G. (1985) Influence of K nutrition and drought on water relations and growth of sunflower (*Helianthus annuus* L.). Journal of Plant Nutrition and Soil science 148: 654-669.

Lindhauer, M. G., Haeder, H. E. and Beringer, H. (1990) Osmotic potentials and solute concentrations in sugar beet plants cultivated with varying potassium/sodium ratios. Zeitschrift for Pflanzenernahrung and Bodenkunde 153: 25-32.

Ling, F. and Silberbush, M. (2002) Response of maize to foliar vs. soil application of nitrogen–phosphorus–potassium fertilizers. Journal of Plant Nutrition 25: 2333-2342.

Ma, L. and Shi, Y. (2011) Effects of potassium fertilizer on physiological and biochemical index of *Stevia rebaudiana* Bertoni. Energy Procedia 5: 581-586.

Malekpoor, F., Pirbalouti, A. G. and Salimi, A. (2016) Effect of foliar application of chitosan on morphological and physiological characteristics of basil under reduced irrigation. Research on Crops 17: 354-359.

Marschner, H. (2012) Mineral Nutrition of Higher Plants. 3nd Ed. Academic Press, Amsterdam.

Mekdad, A. A. A. (2015) Sugar beet productivity as affected by nitrogen fertilizer and foliar spraying with boron. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences 4: 181-196.

Milford, G. F. J., Armstrong, M. J., Jarvis, P. J., Houghton, B. J., Bellett-Travers, D. M., Jones, J. and Leigh, R. A. (2000) Effect of potassium fertilizer on the yield, quality and potassium offtake of sugar beet crops grown on soils of different potassium status. The Journal of Agricultural Science 135: 1-10.

Miransari, M. (2011) Soil microbes and plant fertilization. Applied Microbiology and Biotechnology 92: 875-885.

Morgan, J. M. (1984) Osmoregulation and water stress in higher plants. Annual Review of Plant Physiology 35: 299-319.

Motaghi, S. and Saki Nejad, T. (2014) The effect of different levels of humic acid and potassium fertilizer on physiological indices of growth. International Journal of Biosciences 5: 99-105.

Mubarak, M. U., Zahir, M., Ahmad, S. and Wakeel, A. (2016) Sugar beet yield and industrial sugar contents improved by potassium fertilization under scarce and adequate moisture conditions. Journal of Integrative Agriculture 15: 2620-2626

Mukhopadhyay, M. and Mondal, T. K. (2015) Effect of zinc and boron on growth and water relations of *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze cv. T-78. National Academy Science Letters 38: 283-286.

Narayan, D., Chandel, A. S. and Singh, G. R. (1989) Effect of boron fertilization on yield and quality of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). Indian Journal of Plant Physiology 32: 164-168.

Neseim, M. R., Amin, A. Y. and El-Mohammady, M. M. S. (2014) Effect of potassium applied with foliar spray of yeast on sugar beet growth and yield under drought stress. Global Advanced Research Journal of Agriculture Science 3: 211-222.

Nofal, O. A., El-Eila, H. I. and El-Sayed, S. A. A. (2014) Changes in growth characters of sugar beet varieties as affected by potassium and boron fertilization grown in calcareous soil. Egyptian Journal of Applied Science 29: 915-926.

Ober, E. (2001) The search for drought tolerance in sugar beet. British Sugar Beet Review 69: 40-43.

Oosterhuis, D. M. and Wullschleger, S. D. (1987) Osmotic adjustment in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) leaves and roots in response to water stress. Plant Physiology 84: 1154-1157.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.42.5.7]

Peiter, E. (2011) The plant vacuole: Emitter and receiver of calcium signals. Cell Calcium 50: 120-128.
Radin, J. W. and Eidenbock, M. P. (1984) Hydraulic conductance as a factor limiting leaf expansion of phosphorus-deficient cotton plants. Plant Physiology 75: 372-377.
Rao, R. N., Krishnasastry, K. S. and Udayakumar, M. (1981) Role of potassium in proline metabolism. I. Conversion of precursors into proline under stress conditions in K-sufficient and K-deficient plants. Plant Science Letters 23: 327-334.
Ritchie, S. W., Nguyen, H. T. and Holaday, A. S. (1990) Leaf water content and gas-exchange parameters of two wheat genotypes differing in drought resistanc. Crop Science 30: 105-111.
Romheld, V. and Kirkby, E. A. (2010) Research on potassium in agriculture: Needs and prospects. Plant and Soil 335: 155-180.
Rowe, E. A. (1936) A study of heart-rot of young sugar-beet plants grown in culture solutions. Annals of Botany 50: 735-746.
Sarkar, A. K. and Ghosh, P. K. (1989) Effect of decapitation and foliar application of KNO_3 solution of root enlargement stage on yield of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). Indian Agriculture 33: 259-261.
Shabbir, R. N., Waraich, E. A., Ali, H., Nawaz, F., Ashraf, M. Y., Ahmad, R., Awan, M. I., Ahmad, S., Irfan, M., Hussian, S. and Ahmad, Z. (2016) Supplemental exogenous NPK application alters biochemical processes to improve yield and drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.). Environmental Science and Pollution Research 23: 2651-2662.
Shafiq, F., Batool, H., Raza, S. H. and Hameed, M. (2015) Effect of potassium nitrate seed priming on allometry of drought-stressed cotton (*Gossypium hirsutum* L.). Journal of Crop Science and Biotechnology 18: 195-204.
Shehzad, M. A., Maqsood, M., Nawaz, F., Abbas, T. and Yasin, S. (2018) Boron-induced improvement in physiological, biochemical and growth attributes in sunflower (*Helianthus annuus* L.) exposed to terminal drought stress. Journal of Plant Nutrition 41: 943-955.
Shehzad, M. A., Nawaz, F., Ahmad, F., Ahmad, N. and Masood, S. (2020) Protective effect of potassium and chitosan supply on growth, physiological processes and antioxidative machinery in sunflower (*Helianthus annuus* L.) under drought stress. Ecotoxicology and Environmental Safety 187: 109841-109852.
Shin, R. and Schachtman, D. P. (2004) Hydrogen peroxide mediates plant root cell response to nutrient deprivation. Proceedings of the National Academy of Sciences 101: 8827-8832.
Smith, T. E., Grattan, S. R., Grieve, C. M., Poss, J. A. and Suarez, D. L. (2010) Salinity's influence on boron toxicity in broccoli: II. Impacts on boron uptake, uptake mechanisms and tissue ion relations. Agricultural Water Management 97: 783-791.
Studnicki, M., Lenartowicz, T., Noras, K., Wojcik-Gront, E. and Wyszynski, Z. (2019) Assessment of stability and adaptation patterns of white sugar yield from sugar beet cultivars in temperate climate environments. Agronomy 9: 405-416.
Tambussi, E. A., Bartoli, C. G., Beltrano, J., Guiamet, J. J. and Araus, J. L. (2000) Oxidative damage to thylakoid proteins in water-stressed leaves of wheat (*Triticum aestivum*). Physiologia Plantarum 108: 398-404.
Tanaka, Y., Sano, T., Tamaoki, M., Nakajima, N., Kondo, N. and Hasezawa, S. (2005) Ethylene inhibits abscisic acid-induced stomatal closure in Arabidopsis. Plant Physiology 138: 2337-2343.
Tisdale, S. L., Nelson, W. L. and Beaton, J. D. (1985) Soil fertility and fertilizers. Collier Macmillan Publishers, London.
Wada, S., Takagi, D., Miyake, C., Makino, A. and Suzuki, Y. (2019) Responses of the photosynthetic electron transport reactions stimulate the oxidation of the reaction center chlorophyll of photosystem I, p700, under drought and high temperatures in rice. International Journal of Molecular Sciences 20: 2068-2084.
Wang, M., Zheng, Q., Shen, Q. and Guo, S. (2013) The critical role of potassium in plant stress response. International Journal of Molecular Sciences 14: 7370-7390.
Waraich, E. A., Ahmad, R. and Ashraf, M. Y. (2011) Role of mineral nutrition in alleviation of drought stress in plants. Australian Journal of Crop Science 5: 764-777.
Wimmer, M. A. and Eichert, T. (2013) Mechanisms for boron deficiency-mediated changes in plant water relations. Plant Science 203: 25-32.
Zahoor, R., Zhao, W., Abid, M., Dong, H. and Zhou, Z. (2017) Potassium application regulates nitrogen metabolism and osmotic adjustment in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) functional leaf under drought stress. Journal of Plant Physiology 215: 30-38.
Zaki, M., Maamoun, H. A. and Mubarak, M. (2018) Agronomic performance sugar beet (*Beta vulgaris* L.) in Egypt using inorganic, organic and biofertilizers. Egyptian Journal of Agronomy 40: 89-103.
Zamani, S., Naderi, M. R., Soleymani, A., Nasiri, B. M. and Miransari, M. (2020) Sunflower (*Helianthus annuus* L.) biochemical properties and seed components affected by potassium fertilization under drought conditions. Ecotoxicology and Environmental Safety 190: 110017-110025.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.42.5.7]

Zhao, D., Oosterhuis, D. M. and Bednarz, C. W. (2001) Influence of potassium deficiency on photosynthesis, chlorophyll content, and chloroplast ultrastructure of cotton plants. Photosynthetica 39: 103-109.

Zivcak, M., Brestic, M. and Sytar, O. (2016) Osmotic adjustment and plant adaptation to drought stress. In: Drought Stress Tolerance in Plants (eds. Hossain, M. A., Wani, S. H., Bhattacharjee, S., Burritt, D. J. and Tran, L. S. P.) Pp. 105-143. Springer, Cham.

Zorb, C., Senbayram, M. and Peiter, E. (2014) Potassium in agriculture–status and perspectives. Journal of Plant Physiology 171: 656-669.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.42.5.7]

The effect of potassium (K) and boron (B) foliar application on morphophysiological responses and root yields of Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.) under drought stress conditions

Nima Yadollahi Farsani, Mahmoud Reza Tadayon * and Mojtaba Karimi

Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Shahrekord University
(Received: 10/05/2020, Accepted: 29/12/2020)

Abstract

Drought stress is the most important factor of yield reduction in sugar beet. Therefore, adopting effective strategies to diminish the drought adverse effects in sugar beet is necessary. This field experiment was conducted in order to study the effects of foliar application of potassium (K) and boron (B) on morpho-physiological responses, quality and root yields of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) under drought stress conditions, using a split plot experiment based on randomized complete block design with three replications, in Shahrekord University, in 2019. The main plots were allocated to irrigation treatments including: irrigation after 70, 100 and 130 mm (I_1, I_2 and I_3, respectively) cumulative evaporation from class A evaporation pan and the sub plots were allocated to fertilizer treatments in the form of foliar spraying including: control (no fertilizer application), K, B and B + K. Results showed that the effect of irrigation, foliar spraying and interaction of irrigation × foliar spraying treatments was significant regarding to leaf area index (LAI), leaf proline content, relative water content (RWC), extractable sugar, as well as sodium and potassium content of sugar beet. The highest value of LAI and RWC was related to interaction of I_1 irrigation and B + K spraying treatments. The highest value of leaf proline content was obtained by interaction of I_3 irrigation and K spraying treatments. The highest percentage of extractable sugar was observed in interaction of I_2 irrigation and B treatments. In other words, I_2 irrigation treatment slightly increased the percentage of extractable sugar, which did not have significant difference with I_1 irrigation treatment. The lowest amount of root sodium and potassium content was obtained under interaction of I_1 irrigation and B + K treatments. The effect of irrigation and foliar application treatments on total plant dry weight, chlorophyll index, extraction coefficient of sugar (ECS), sugar and root yield was significant, as the highest amount of the mentioned traits were recorded in B + K and I_1 irrigation treatments. Interaction of irrigation×foliar spraying did not have a significant effect on these traits. Alkalinity coefficient was only affected by foliar spraying treatments and the highest amount of alkalinity coefficient was observed in K fertilizer treatment. Generally, foliar application of B and K significantly improved the morpho-physiological, quantitative and qualitative properties of sugar beet and reduced the adverse effectss of drought stress, probably due to the important role of these elements in the osmotic adjustment and other plant physiological and biochemical processes. Therefore, in sugar beet cultivation especially under drought stress conditions, spraying of B and K is recommended.

Key word: Extractable sugar, Irrigation, Osmotic adjustment, Proline

Corresponding author, Email: mrtadayon@yahoo.com

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.42.5.7]