

اثر محلول پاشی بور و پتاسیم بر واکنش‌های مورفوفیزیولوژیک و عملکرد ریشه چغندر قند 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 چغندر قند است. از این رو به کار بردن راهکارهایی جهت کاهش آثار سوء آن ضروری است؛ بنابراین به منظور بررسی اثر تیمارهای محلول پاشی بر برخی صفات کیفی، مورفوفیزیولوژیک و عملکرد ریشه چغندر قند تحت شرایط تنش خشکی، آزمایشی به صورت کرت‌های یکبار خرد شده 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 (به ترتیب I_3 , I_2 , I_1) میلی‌متر تبخیر تجمعی از تشتک تبخیر کلاس A در کرت‌های اصلی و تیمارهای کودی به صورت محلول پاشی 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، محلول پاشی و برهمکنش آبیاری \times محلول پاشی بر شاخص سطح برگ، محتوای پرولین برگ، محتوای نسبی آب برگ، درصد قند قابل استحصال، محتوای سدیم و پتاسیم ریشه چغندر قند معنی دار شد. بیشترین شاخص سطح برگ و محتوای نسبی آب برگ مربوط به محلول پاشی بور + پتاسیم و تیمار آبیاری I_1 بود. بالاترین محتوای پرولین برگ از محلول پاشی پتاسیم و تیمار آبیاری I_3 به دست آمد. بیشترین درصد قند قابل استحصال از محلول پاشی بور و تیمار آبیاری I_2 حاصل شد. کمترین محتوای پتاسیم و سدیم ریشه نیز به محلول پاشی بور + پتاسیم و آبیاری I_1 اختصاص داشت. هم‌چنین اثر تیمارهای آبیاری و محلول پاشی بر وزن خشک کل بوته، شاخص سبزیگی برگ، ضریب استحصال شکر، عملکرد قند ناخالص و عملکرد ریشه معنی دار شد. به طوری که بیشترین مقادیر صفات ذکر شده از محلول پاشی بور + پتاسیم و تیمار آبیاری I_1 به دست آمد. برهمکنش آبیاری \times محلول پاشی اثر معنی دار بر این صفات نداشت. به طور کلی محلول پاشی عناصر بور و پتاسیم اثر معنی داری بر صفات مورفوفیزیولوژیک، کمی و کیفی چغندر قند داشت و آثار نامطلوب تنش خشکی را می‌کاهد که احتمالاً به واسطه نقش مهم این عناصر در فرایند تنظیم اسمزی و سایر واکنش‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان است؛ بنابراین در زراعت چغندر قند محلول پاشی عناصر بور و پتاسیم، خصوصاً در شرایط تنش خشکی، توصیه می‌شود.

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

مقدمه

جهان از دیرباز مورد توجه بوده است. سطح زیرکشت چغندر قند در جهان در سال ۲۰۱۷ بیش از ۴/۸ میلیون هکتار

چغندر قند به عنوان اصلی‌ترین منابع تولید شکر در ایران و

مسیرهای متابولیکی گیاهان می‌شود (Farouk and Amany, 2016; Malekpoor et al., 2012). 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). در نتیجه پتاسیم با کاهش مقاومت روزنه‌ای،

بوده است (Studnicki et al., 2019). پتانسیل عملکرد ریشه چغندر قند 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). چغندر قند 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، دارا بودن 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 چغندر قند است (Ober, 2001). به‌دست آوردن عملکردهای زیاد مستلزم تأمین رطوبت کافی طی دوره رشد فعال گیاه است، به‌ویژه اینکه تولید چغندر قند 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 چغندر قند عملکرد ریشه و محتوای قند کاهش و درصد قند ملاس افزایش می‌یابد (اسماعیلی و تدین، ۱۳۹۸). اگرچه غلظت قند در ریشه چغندر قند 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 (خواججه‌پور، ۱۳۹۱). بنابراین باتوجه به تأثیر تنش خشکی بر رشد و تولید چغندر قند، 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

سبب افزایش عملکرد ریشه و اندام هوایی چغندر قند شد (Ibrahim et al., 2002).

محلول پاشی عناصر پرمصرف نیتروژن، فسفر و پتاسیم عملکرد و کیفیت گیاهان زراعی مختلفی را افزایش می دهد (Ling and Silberbush, 2002). محلول پاشی سبب جذب سریع عناصر معدنی می شود که می تواند در طول فصل رشد انجام گیرد. در شرایط محلول پاشی محدودیت های مربوط به آبشویی، جذب توسط ذرات خاک و از دست رفتن به وسیله فرسایش وجود ندارد (Fernandez and Brown, 2013). در گیاه توتون (*Nicotiana rustica*) مشاهده شد در شرایط تنش خشکی کاربرد برگی یا محلول پاشی پتاسیم نسبت به کاربرد خاکی آن در بهبود تولید بیوماس ریشه، فتوسنتز برگ ها و پتانسیل آب در گیاه نقش مؤثرتری داشت (Bahrami-Rad and Hajiboland, 2017). در گندم محلول پاشی پتاسیم سبب بهبود تحمل به خشکی و رشد گیاه شد (Aown et al., 2012). در سیب زمینی نیز محلول پاشی پتاسیم عملکرد را افزایش داد (Tisdale et al., 1985). در گیاه آفتابگردان تحت تنش شوری محلول پاشی پتاسیم از منبع هیدروکسید پتاسیم (KOH) رشد و عملکرد گیاه را بهبود بخشید (Akram et al., 2007). در گوجه فرنگی محلول پاشی تکمیلی فسفر و پتاسیم منجر به افزایش غلظت کلروفیل و تولید ماده خشک در شرایط شوری شد (Kaya et al., 2001). بنابراین محلول پاشی پتاسیم به ویژه در شرایط محدودیت رطوبت خاک نقش مؤثری در تحمل گیاه به خشکی دارد. جذب پتاسیم از خاک به صورت فعال و به شکل یون پتاسیم (K^+) انجام می شود. چنانچه پتاسیم به وسیله محلول پاشی در اختیار گیاه قرار گیرد، انرژی کمتری توسط گیاه برای جذب و انتقال آن مصرف می شود.

در تأمین نیاز کودی گیاهان علاوه بر عناصر پرمصرف همچون نیتروژن، فسفر، پتاسیم و... به عناصر کم مصرف مثل آهن، مس، روی، بور و... نیز بایستی توجه کافی شود. دسترسی پایین به عناصر ریزمغذی به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک مشکلی بزرگ به شمار می آید. بور مهم ترین عنصر کم مصرف مورد نیاز چغندر قند است؛ زیرا بدون مقدار کافی آن عملکرد و

سبب افزایش آسیمیلایسیون CO_2 می شود. پتاسیم همان طور که در باز شدن روزنه ها نقش دارد، در بسته شدن آن ها نیز بسیار مهم است. به این ترتیب که کاهش فشار آماس در سلول های اپیدرم ناشی از کمبود پتاسیم مانع از بسته شدن کامل روزنه ها می شود. هم چنین کمبود پتاسیم سبب افزایش تولید هورمون اتیلن می شود (Shin and Schachtman, 2004; Wang et al., 2013) که این هورمون آثار منفی بر پیام رسانی اسید آسبیزیک در هنگام بسته شدن روزنه ها 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 می شود (ولداآبادی و علی آبادی فراهانی، ۱۳۸۷).

به طور کلی در اثر تنش خشکی میزان جذب پتاسیم در گیاه افزایش می یابد، اما در مواردی هم مشاهده شده که درصد پتاسیم در گیاهان تحت تنش خشکی کم تر بوده که به دلیل کاهش قابلیت دسترسی به این عنصر در شرایط کمبود رطوبت است. زیرا معمولاً پتاسیم در خاک توسط کانی های رسی مانند میکا، ورمیکولیت و... تثبیت می شود که میزان آن بستگی به نوع کانی های رسی، شرایط رطوبتی خاک، اسیدیته و... دارد (Zorb et al., 2014). به تدریج که خاک خشک می شود، کلوئیدهای رس با قدرت بیشتری یون یک ظرفیتی پتاسیم را به سطح خود جذب می کنند و مانع از آزاد شدن آن به محلول خاک می شوند. هم چنین از آنجا که در اثر تنش خشکی رشد کلی گیاه از جمله فعالیت جذبی ریشه ها کاهش می یابد، ریشه های گیاه توانایی جذب پتاسیم را از سطح کلوئیدهای رس نخواهند داشت و در نتیجه میزان جذب این عناصر در گیاه کاهش می یابد (Radin and Eidenbock, 1984). بنابراین به نظر می رسد در شرایط خشکی محلول پاشی پتاسیم از کاربرد خاکی آن مؤثرتر باشد.

مطالعات انجام شده توسط مهراندیش و همکاران (۱۳۹۷) نشان داد؛ استفاده از مقادیر بالای پتاسیم، به ویژه به شکل کلرید پتاسیم، جهت بهبود ویژگی های کیفی چغندر قند تحت شرایط آبیاری کامل و محدود قابل توصیه است. به طور مشابه طی پژوهشی مشخص شد؛ مصرف ۲۲۸/۵ کیلوگرم K_2O در هکتار

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 ۴۶ درصد، اجرا شد.

این آزمایش به صورت کرت‌های یکبار خرد شده (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 (به ترتیب I₃, I₂, I₁) میلی‌متر تبخیر تجمعی از تشتک تبخیر کلاس A در کرت‌های اصلی و چهار تیمار کودی به صورت محلول‌پاشی شامل: ۱ - شاهد (بدون مصرف کود)، ۲ - پتاسیم (K) از منبع ترست اکسید پتاسیم (TRUST K₂O) با غلظت ۸ در هزار، ۳ - بور (B) از منبع ترست بور (TRUST BORON) با غلظت ۱ در هزار و ۴ - 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 ۶ - ۸، ۱۲ - ۱۶ و ۲۰ - ۲۴ برگی صورت گرفت. محلول‌پاشی بوته‌ها تا زمان جاری شدن 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 به صورت 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 × ۴) بود.

بذر مورد استفاده در این پژوهش رقم کاستیل (Castile) تک‌جوانه هلندی بود. با مساعد شدن دما کشت در اول خرداد ماه انجام شد. بذرکاری به صورت 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 به دست 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

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

بور نقش مهمی در طول‌شدن و تقسیم‌شدن سلول‌ها (رشد)، تمایز بافت‌ها، متابولیسم کربوهیدرات‌ها و پروتئین‌ها، نفوذپذیری غشا و متابولیسم اکسین و فنول‌ها دارد. سنتز همی سلولز 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 به واسطه نقش آن در افزایش متابولیسم، رشد و نمو 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 Makhoulouf, 2015). گزارش شده است محلول‌پاشی بور به میزان یک کیلوگرم در هکتار عملکرد ریشه و قند را به ترتیب ۱۹/۴ و ۳۹/۵ درصد افزایش داد (Kristek et al., 2006).

در مجموع اگرچه چغندر قند 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 چغندر قند 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

جدول ۱- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

عمق خاک (سانتی متر)	اسیدیته	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)	کربن آلی	نیترژن کل (درصد)	فسفر قابل جذب (میلی گرم بر کیلوگرم)	پتاسیم قابل جذب (میلی گرم بر کیلوگرم)	بور	بافت
۰-۳۰	۷/۸	۰/۴۶	۰/۸	۰/۱۱	۱۷/۵	۳۹۵	۱/۹۱	سیلتی-شنی

$$LAI = LA/P$$

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

وزن خشک کل بوته: در انتهای فصل رشد (اول آبان ماه)

به منظور تعیین وزن خشک بوته ها؛ پس از حذف دو ردیف کناری و نیم متر از ابتدا و انتهای هر خط کاشت، به طور تصادفی تعداد پنج بوته از هر کرت انتخاب شد. اندام های هوایی به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۵ درجه سانتی گراد درون آن قرار گرفتند و وزن خشک آنها اندازه گیری شد. ریشه ها نیز تمیز و شسته شده و توسط چاقو ریز و در آن در دمای ۷۵ درجه سانتی گراد به مدت ۷۲ ساعت قرار گرفتند و سپس توزین شدند. میانگین وزن خشک پنج بوته به عنوان وزن خشک بوته ها در نظر گرفته شد.

محتوای پرولین برگ: اندازه گیری 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 نیترژن مایع در هاون چینی کاملاً پودر گردید. سپس پودر به دست آمده را درون لوله آزمایش ریخته و ۱۰ میلی لیتر اسید سولفوسالسیلیک ۳ درصد به آن اضافه شد. لوله در دستگاه سانتریفیوژ با دور ۶۰۰۰ به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی گراد قرار داده شد. سپس ۲ میلی لیتر از عصاره صاف شده را برداشته و در یک لوله آزمایش جدید ریخته شد. به هر لوله ۲ میلی لیتر معرف نین هیدرین و ۲ میلی لیتر اسید استیک گلاسیال اضافه و به خوبی بهم زده شد. همزمان مقدار ۲ میلی لیتر از محلول های استاندارد صفر، ۴، ۸، ۱۶ و ۲۰ میلی گرم در لیتر پرولین خالص را درون لوله های جدید ریخته و ۲ میلی لیتر اسید نین هیدرین و ۲ میلی لیتر اسید استیک گلاسیال به آنها افزوده و سپس به خوبی مخلوط شد. لوله های آزمایش در بن ماری با دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد

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

$$1) H = \rho b (\theta_{FC} - \theta_m) \times D$$

$$2) V = H \times A$$

در معادله های (۱) و (۲)، H نشان دهنده ارتفاع آب داخل کرت، ρb جرم مخصوص ظاهری خاک، θ_{FC} رطوبت در حد ظرفیت مزرعه، θ_m رطوبت جرمی کرت مورد نظر 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 چهارم حال و بختیاری و در اول آبان ماه انجام شد.

اندازه گیری صفات، شاخص سطح برگ: به منظور بررسی

چگونگی اثر تیمارها بر شاخص سطح برگ حدود ۹۰ روز پس از کاشت (۴۵ روز پس از اعمال تنش)، با در نظر گرفتن اثر حاشیه، پنج بوته از هر کرت جهت اندازه گیری شاخص سطح برگ انتخاب شد. سطح برگ توسط عکس برداری و محاسبه با نرم افزار Digimizer اندازه گیری شد. شاخص سطح برگ از نسبت سطح برگ هر بوته (LA) به سطح زمینی که توسط آن اشغال شده بود (P) محاسبه شد:

عملکرد ریشه: به منظور 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 چغندر قند: به‌منظور تعیین صفات کیفی ریشه چغندر قند؛ 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. عیار قند به روش پلاریمتری توسط دستگاه ساکاریمتر، غلظت سدیم و پتاسیم به روش فیلم فتومتر و نیتروژن مضره به روش عدد آبی و با استفاده از دستگاه بتاآنالیزر (Beta Analyzer) اندازه‌گیری شد. برخی صفات کیفی ریشه چغندر قند از روابط زیر محاسبه شدند (عبداللهیان نوقابی و همکاران، ۱۳۸۴):

$$(MS) = 0.343 (K+Na) + 0.094 (a\text{- amino-N}) - 0.31$$

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

درصد قند - عیار قند = (WSC) درصد قند قابل استحصال

$$+ ۰/۶) \text{ ملاس}$$

درصد قند قابل استحصال = (ECS) ضریب استحصال شکر

$$/ ۱۰۰ \times (\text{عیار قند})$$

عملکرد ریشه = (SY) عملکرد قند ناخالص یا عملکرد شکر

عیار قند

$$(ALC) = K + Na / a\text{- amino-N}$$

داده‌های حاصل از صفات اندازه‌گیری شده با نرم‌افزارهای آماری SAS و MSTAT-C آنالیز و میانگین‌های معنی‌دار شده 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.

به مدت 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 ۴ میلی‌لیتر تولوئن افزوده و به مدت ۲۰ ثانیه در دستگاه ورتکس به هم 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 طول موج 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 آب مقطر قرار گرفته و به مدت ۲۴ ساعت در یخچال در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. بعد از ۲۴ ساعت وزن اشباع نمونه‌ها اندازه‌گیری و به مدت ۲۴ 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 به دست 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 قرار گرفتن در آون و S_w وزن اشباع برگ بعد از قرار گرفتن در آب مقطر 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.

نتایج و بحث

شاخص سطح برگ: اثر تیمارهای آبیاری، محلول پاشی و برهمکنش آبیاری \times محلول پاشی بر شاخص سطح برگ چغندر قند در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار شد (جدول ۲). مقایسه میانگین داده ها نشان داد که بیشترین شاخص سطح برگ (۴/۱۵) مربوط به تیمار آبیاری I_1 و محلول پاشی بور + پتاسیم بود که با تیمار شاهد (عدم محلول پاشی) اختلاف معنی دار داشت ولی با محلول پاشی پتاسیم تفاوت معنی دار نداشت. کمترین شاخص سطح برگ (۲/۹۱) به تیمار آبیاری I_3 و عدم محلول پاشی اختصاص داشت که با محلول پاشی بور در این سطح آبیاری اختلاف معنی دار نداشت ولی با محلول پاشی پتاسیم و بور + پتاسیم تفاوت معنی دار نشان می داد. در شرایط تنش خشکی شدید (تیمار I_3) محلول پاشی بور + پتاسیم، پتاسیم و بور به ترتیب شاخص سطح برگ را حدود ۱۸/۶، ۱۷/۵ و ۳/۴ درصد نسبت به تیمار شاهد (عدم محلول پاشی) افزایش دادند. در شرایط خشکی ملایم (تیمار I_2) نیز بیشترین شاخص سطح برگ (۴) از محلول پاشی بور + پتاسیم به دست آمد که با تیمار شاهد و محلول پاشی بور در همین سطح آبیاری تفاوت معنی دار داشت ولی با محلول پاشی پتاسیم از لحاظ آماری اختلاف معنی دار نشان نمی داد (جدول ۴). در تیمار آبیاری I_2 محلول پاشی پتاسیم، پتاسیم و بور به ترتیب شاخص سطح برگ را حدود ۱۲/۷، ۹/۶ و ۳/۴ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش دادند. در شرایط تنش خشکی فشار آماس کاهش می یابد که منجر به کاهش توسعه سلول ها می شود. در نتیجه اندازه و سطح برگ ها کوچک می شود (Neseim et al., 2014). تنش سبب تأخیر در ظهور برگ، توسعه کندتر آن و کاهش تولید مواد فتوسنتزی و تسریع پیری می شود (Clover et al., 1998). با توجه به مشاهدات غفاری و تدین (۱۳۹۶) شاخص سطح برگ چغندر قند با کم شدن میزان آب آبیاری کاهش یافت. به طور مشابه طی پژوهشی مشخص شد با افزایش تنش رطوبتی شاخص سطح برگ چغندر قند کاهش یافت (ماهرخ و خواجه پور، ۱۳۸۹).

پتاسیم با کاهش از دست دادن آب، پژمردگی و حفظ

وضعیت آماس و کمک به جذب عناصر غذایی به افزایش رشد گیاه و شاخص سطح برگ کمک می کند (Neseim et al., 2014). نیتروژن نقش مهمی در رشد رویشی گیاه و بنابراین افزایش شاخص سطح برگ دارد. در شرایط خشکی فعالیت آنزیم های درگیر در متابولیسم نیتروژن (نیترات ردوکتاز، گلوتامین سینتتاز و گلوتامات سینتاز) کاهش می یابد. به کار بردن پتاسیم تا حدی این کاهش را جبران می کند (Zahoor et al., 2017). گزارش شده است که در پنبه (*Gossypium hirsutum* L.) کمبود پتاسیم منجر به کاهش فتوسنتز و سطح برگ گیاه می شود (Zhao et al., 2001). کمبود پتاسیم در گیاه به واسطه کاهش پتاسیم خاک یا کاهش دسترسی به آن به دلیل خشکی سبب توقف توسعه برگ ها و کاهش چشمگیر تبادل کربن می شود. افزایش شاخص سطح برگ با کاربرد پتاسیم می تواند 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. به طور 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 به کار بردن عنصر بور احتمالاً به واسطه افزایش تارهای کشنده ریشه و در نتیجه افزایش جذب آب از خاک است. بنابراین از طریق افزایش فشار آماس و توسعه کامل برگ ها، هدایت روزنه ای و آسیمپلاسیون کربن بهبود می یابد (Gustav et al., 2008). از این رو محلول پاشی بور در شرایط تنش خشکی آثار مثبتی بر کارایی فتوسنتز و رشد گیاه دارد و منجر به بهبود شاخص سطح برگ می شود. 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 برگ های گیاهان دچار کمبود بور کوچک تر، سفت تر و ضخیم تر هستند (Mekdad, 2015).

وزن خشک کل بوته: براساس نتایج تجزیه واریانس، اثر

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر تیمارهای آبیاری و محلول پاشی بر برخی صفات مرفوفیزیولوژیک، کیفی و عملکردی ریشه چغندر قند

میانگین مربعات							درجه آزادی	منابع تغییر
درصد قند قابل استحصال	شاخص سبزی‌نگی برگ	محتوای نسبی آب برگ	محتوای پرولین برگ	وزن خشک کل بوته	شاخص سطح برگ	درصد قند		
۰/۰۴ ^{ns}	۷/۵ ^{ns}	۱/۹۹ ^{ns}	۰/۶ ^{ns}	۹۷/۳۸ ^{ns}	۰/۰۰۱ ^{ns}	۲	تکرار	
۱۴/۳۲ ^{**}	۳۸۰/۸۳ ^{**}	۲۸۶/۸۵ ^{**}	۵۱/۰۸ ^{**}	۱۲۰۷/۸۶ ^{**}	۲/۲۱ ^{**}	۲	آبیاری	
۰/۰۷	۳/۴۹	۳/۵۶	۰/۳۵	۶۲/۰۳	۰/۰۱	۴	خطا اصلی	
۵/۰۳ ^{**}	۹۶/۶۸ ^{**}	۱۱۸/۶۳ ^{**}	۶/۸ ^{**}	۳۹۲/۰۳ ^{**}	۰/۳۳ ^{**}	۳	محلول پاشی	
۱/۱۲ ^{**}	۱/۹ ^{ns}	۱۱/۹۱ [*]	۲/۳۸ [*]	۲۹/۲۲ ^{ns}	۰/۰۳ ^{**}	۶	آبیاری × محلول پاشی	
۰/۲۵	۴/۲۹	۳/۸۵	۰/۷۲	۵۸/۲۶	۰/۰۰۵	۱۸	خطا فرعی	
۳/۱۷	۴/۹۹	۲/۴۳	۱۳/۴	۵/۲۶	۱/۹	-	ضریب تغییرات (%)	
عملکرد قند ناخالص	عملکرد ریشه	ضریب استحصال شکر	آلکالینه یا ضریب قلیائیت	محتوای پتاسیم ریشه	محتوای سدیم ریشه			
۰/۰۴ ^{ns}	۲/۳۷ ^{ns}	۰/۱۲ ^{ns}	۰/۰۴ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۵ ^{ns}	۰/۰۲ ^{ns}	۲	تکرار	
۱۱۴/۰۷ ^{**}	۲۸۰۷/۸۳ ^{**}	۳۱/۷۹ ^{**}	۰/۱۵ ^{ns}	۰/۵۶ ^{**}	۰/۷۹ ^{**}	۲	آبیاری	
۰/۱	۳/۸۲	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۰۰۱	۰/۰۲	۴	خطا اصلی	
۵/۹۳ ^{**}	۱۰۵/۰۴ ^{**}	۱۷/۹۲ ^{**}	۰/۳۶ ^{**}	۰/۵۶ ^{**}	۰/۸ ^{**}	۳	محلول پاشی	
۰/۲۵ ^{ns}	۵/۲ ^{ns}	۰/۴ ^{ns}	۰/۰۲ ^{ns}	۰/۰۰۹ [*]	۰/۰۴ [*]	۶	آبیاری × محلول پاشی	
۰/۱۹	۴/۳۴	۰/۲۲	۰/۰۳	۰/۰۰۳	۰/۰۱	۱۸	خطا فرعی	
۵/۷۴	۵/۲	۰/۵۵	۵/۶۶	۱/۱۲	۷/۰۷	-	ضریب تغییرات (%)	

^{ns}، * و ** به ترتیب: غیر معنی دار، معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

انجام شده توسط غفاری و تدین (۱۳۹۶) نیز نشان داد تنش خشکی منجر به کاهش وزن خشک اندام هوایی و ریشه چغندر قند شد.

در بین تیمارهای محلول پاشی بیشترین وزن خشک بوته (۱۵۲/۴۳ گرم) مربوط به محلول پاشی بور + پتاسیم بود که با تیمار عدم محلول پاشی اختلاف معنی دار داشت ولی با محلول پاشی پتاسیم تفاوت معنی دار نداشت. نتایج نشان می‌دهد محلول پاشی بور + پتاسیم وزن خشک بوته را حدود ۱۱ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داده است و از این لحاظ بر سایر تیمارهای محلول پاشی برتری دارد. کمترین وزن خشک بوته (۱۳۷ گرم) نیز از تیمار شاهد (عدم محلول پاشی) به دست آمد (جدول ۳). محلول پاشی بور اگرچه سبب افزایش حدود ۴/۶ درصدی وزن خشک بوته شد ولی با عدم

تیمارهای آبیاری و محلول پاشی بر وزن خشک کل بوته چغندر قند در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار شد. اما برهمکنش آبیاری × محلول پاشی تأثیر معنی دار بر وزن خشک کل بوته چغندر قند نداشت (جدول ۲). از لحاظ آبیاری بیشترین وزن خشک بوته (۱۵۶/۲۸ گرم) مربوط به تیمار I₁ بود که با تیمارهای I₂ و I₃ اختلاف معنی دار داشت. کمترین وزن خشک بوته (۱۳۶/۷۵ گرم) نیز از تیمار آبیاری I₃ به دست آمد. بین تیمارهای I₂ و I₃ تفاوت معنی دار دیده نشد (جدول ۳). بدین ترتیب تیمارهای کم آبیاری I₂ و I₃ به ترتیب 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

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر تیمارهای آبیاری و محلول پاشی بر برخی صفات کیفی، مورفوفیزیولوژیک و عملکرد ریشه چغندر قند

تیمارها	وزن خشک کل		شاخص سبزی‌نگی برگ	آلکالیته یا ضریب قلیائیت	ضریب استحصال شکر (%)	عملکرد قند ناخالص (تن در هکتار)	عملکرد ریشه
	بوته (گرم)	بسته					
سطوح آبیاری							
I ₁	۱۵۶/۲۸ ^a	۴۵/۸۹ ^a	۲/۹۴ ^b	۸۶/۲۳ ^a	۱۰/۵۷ ^a	۵۵/۶۲ ^a	
I ₂	۱۴۲/۵۳ ^b	۴۳/۴۲ ^b	۲/۷۹ ^b	۸۶/۱۹ ^a	۷/۶۶ ^b	۳۹/۵ ^b	
I ₃	۱۳۶/۷۵ ^b	۳۵/۱۳ ^c	۲/۷۲ ^b	۸۳/۳۹ ^b	۴/۴ ^c	۲۵/۰۵ ^c	
LSD 5 %	۶/۵۵	۱/۷۸	۰/۱۴	۰/۴	۰/۳۷	۱/۷۹	
سطوح محلول پاشی							
شاهد	۱۳۷ ^c	۳۸ ^c	۲/۶۸ ^b	۸۳/۳۷ ^c	۶/۵۲ ^c	۳۶/۵۱ ^c	
بور	۱۴۳/۳۴ ^{bc}	۳۹/۸۳ ^c	۲/۶۳ ^b	۸۵/۰۴ ^b	۷/۴۹ ^b	۳۸/۳۷ ^c	
پتاسیم	۱۴۷/۹۸ ^{ab}	۴۲/۵۷ ^b	۳/۰۲ ^a	۸۶/۱۳ ^a	۷/۷ ^b	۴۰/۹۶ ^b	
بور + پتاسیم	۱۵۲/۴۳ ^a	۴۵/۵۱ ^a	۲/۹۳ ^a	۸۶/۵۲ ^a	۸/۴۹ ^a	۴۴/۳۹ ^a	
LSD 5 %	۷/۵۶	۲/۰۵	۰/۱۶	۰/۴۷	۰/۴۳	۲/۰۶	

میانگین های هر عامل آزمایشی در هر ستون که حداقل در یک حرف مشترک هستند، بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی دار ندارند (I₁، I₂ و I₃ به ترتیب آبیاری پس از ۷۰، ۱۰۰ و ۱۳۰ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A).

دی اکسید و تولید ماده خشک می شود (Kwak et al., 2001). به طور مشابه گزارش شده است به کار بردن پتاسیم سبب افزایش وزن خشک ریشه و اندام هوایی چغندر قند شد (Mubarak et al., 2016).

بور نیز سبب افزایش متابولیسم، رشدونمو گیاه می شود (Abido, 2012). بور برای فعالیت آنزیم های درگیر در سیستم های فتوسنتزی و تنفسی ضروری است. هم چنین نقش مهمی در تشکیل برگ های جدید دارد. بور سبب افزایش رنگیزه های فتوسنتزی و بنابراین افزایش فتوسنتز می شود (Dewdar et al., 2015). این عنصر هم چنین برای تقسیم سلولی و متابولیسم نیتروژن ضروری است (Nofal et al., 2014). مطالعات انجام شده توسط Abbas و همکاران (۲۰۱۴) نیز نشان داد؛ محلول پاشی بور وزن خشک ریشه و اندام هوایی چغندر قند را افزایش داد.

محتوای پرولین برگ: باتوجه به نتایج تجزیه واریانس داده ها، اثر تیمارهای آبیاری و محلول پاشی بر محتوای پرولین

محلول پاشی اختلاف معنی دار نداشت. بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده؛ تیمارهای محلول پاشی به ویژه محلول پاشی پتاسیم و بور + پتاسیم سبب بهبود تجمع ماده خشک در چغندر قند می شود. این نکته خصوصاً در شرایط تنش خشکی که میزان تولید ماده خشک کاهش می یابد اهمیت بیشتری دارد. بور و پتاسیم نقش مهمی در متابولیسم کربوهیدرات ها دارند. هم چنین به عنوان فعال کننده بسیاری از آنزیم هایی که در تحریک رشد و تولید نقش دارند؛ عمل می کنند (Nofal et al., 2014). پتاسیم سبب تحریک رشد ریشه ها می شود. بنابراین سطح تماس ریشه با خاک افزایش می یابد که منجر به افزایش جذب آب و مواد غذایی از خاک می شود (Romheld and Kirkby, 2010). به کار بردن پتاسیم کارایی فتوسنتز را افزایش می دهد. زیرا سبب افزایش محتوای کلروفیل می شود. بنابراین رشد چغندر قند افزایش می یابد (Mubarak et al., 2016). پتاسیم برای باز شدن روزنه ها ضروری است. بنابراین سبب کاهش مقاومت روزنه ای و افزایش آسیمیلاسیون کربن

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 در نتیجه افزایش جریان آب به منظور حفظ پتانسیل آماس می‌شود (Oosterhuis and Wullschlegler, 1987).

کمبود پتاسیم در تنباکو سبب کاهش محتوای پرولین برگ در شرایط تنش آبی و آبیاری کامل و به کار بردن پتاسیم باعث افزایش تجمع پرولین می‌شود. نقش پتاسیم در سنتز پرولین به خوبی 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 در نتیجه افزایش تبدیل آرژینین (arginine) به پرولین می‌شود (Rao *et al.*, 1981). طی پژوهشی مشاهده شد، به کار بردن پتاسیم با افزایش تولید پرولین سبب بهبود تحمل آفتابگردان به خشکی شد (Zamani *et al.*, 2020).

محتوای پاشی بور در شرایط تنش خشکی سبب کاهش غلظت پرولین در گندم (*Triticum aestivum*) شد که احتمالاً به واسطه 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 \times محلول‌پاشی بر محتوای نسبی آب برگ (RWC) چغندر قند به ترتیب در سطح احتمال ۱ درصد و ۵ درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). بیشترین محتوای نسبی آب برگ (۸۷/۶٪) مربوط به تیمار آبیاری I₁ و محلول‌پاشی بور + پتاسیم بود که از لحاظ آماری با تیمار شاهد (عدم محلول‌پاشی) و سایر تیمارهای محلول‌پاشی در سطح آبیاری I₁ اختلاف معنی‌دار نشان نمی‌داد. کم‌ترین محتوای نسبی آب

برگ در سطح احتمال ۱ درصد و برهمکنش آبیاری \times محلول‌پاشی در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد، بیشترین میزان پرولین (۱۰/۰۲۶ میکرومول بر وزن تازه برگ) مربوط به تیمار آبیاری I₃ (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 (۴/۰۶ میکرومول بر وزن تازه برگ) به تیمار آبیاری I₁ (آبیاری کامل) و محلول‌پاشی بور اختصاص داشت که از لحاظ آماری با سایر تیمارهای محلول‌پاشی در این سطح آبیاری اختلاف معنی‌دار نشان نمی‌داد (جدول ۴). هم‌چنین در سطح آبیاری I₂ 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 فرآیند 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 در نتیجه حفاظت سامانه‌های غشایی می‌شود

جدول ۴- مقایسه میانگین برهمکنش تیمارهای محلول پاشی در سطوح مختلف آبیاری بر برخی صفات کیفی و مورفوفیزیولوژیک چغندر قند

ترکیب تیماری	شاخص سطح برگ	محتوای پرولین برگ (میکرومول بر وزن تازه برگ)	محتوای نسبی آب برگ (%)	قد قابل استحصال (%)	محتوای سدیم ریشه (میلی اکی والان در صد گرم ریشه)	محتوای پتاسیم ریشه
I ₁	شاهد	۳/۹۴ ^c	۴/۴۴ ^{ef}	۸۴/۳۳ ^{ab}	۱۴/۷۲ ^{fg}	۵/۰۴ ^c
	بور	۳/۹۷ ^{bc}	۴/۰۶ ^f	۸۴/۷۳ ^{ab}	۱۶/۴۸ ^{cd}	۵/۰۴ ^c
	پتاسیم	۴/۰۸ ^{ab}	۴/۷۶ ^{def}	۸۶/۷۳ ^a	۱۶/۸۶ ^{bc}	۴/۶۶ ^{de}
	بور + پتاسیم	۴/۱۵ ^a	۴/۴۵ ^{ef}	۸۷/۶ ^a	۱۷/۴۵ ^{ab}	۴/۶۱ ^c
I ₂	شاهد	۳/۵۵ ^{de}	۵/۵۵ ^{cde}	۷۴/۹ ^{fg}	۱۵/۸۵ ^{de}	۵/۲۴ ^b
	بور	۳/۶۷ ^d	۵/۶۲ ^{cde}	۷۵/۹۷ ^{ef}	۱۷/۹۸ ^a	۴/۹۹ ^c
	پتاسیم	۳/۸۹ ^c	۶/۹۴ ^{bc}	۸۲/۹۳ ^{bc}	۱۶/۴ ^{cd}	۴/۷۲ ^d
	بور + پتاسیم	۴ ^{bc}	۶/۰۱ ^{cd}	۸۶/۳۷ ^a	۱۶/۶۹ ^{bcd}	۴/۷۳ ^d
I ₃	شاهد	۲/۹۱ ^g	۷/۷۶ ^b	۷۲/۲۳ ^g	۱۳/۹۸ ^g	۵/۵ ^a
	بور	۳/۰۱ ^g	۶/۲۹ ^c	۷۳/۶ ^{fg}	۱۵/۰۵ ^{ef}	۵/۴۱ ^a
	پتاسیم	۳/۴۲ ^f	۱۰/۰۲ ^a	۷۸/۵۳ ^{de}	۱۴/۸۳ ^{fg}	۵/۰۳ ^c
	بور + پتاسیم	۳/۴۵ ^{ef}	۱۰/۰۲ ^a	۸۰/۱۷ ^{cd}	۱۴/۸۸ ^f	۵/۰۴ ^c
LSD 5 %						
	۰/۱۲	۱/۴۵	۳/۳۷	۰/۸۶	۰/۱۸	۰/۰۹

میانگین های با حروف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی دار ندارند (I₁), I₂ و I₃ به ترتیب آبیاری پس از ۷۰، ۱۰۰ و ۱۳۰ میلی متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A).

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 بر اساس محتوای نسبی آب برگ و نه آب خاک باشد (کافی و همکاران، ۱۳۹۷).

با توجه به مطالعات Castrillo و Trujillo (۱۹۹۴) همبستگی مثبتی بین محتوای نسبی آب برگ و غلظت کلروفیل، پروتئین و فعالیت رایبوسکو وجود داشت. با توجه به نقش کلروفیل و پروتئین در حفظ فتوسنتز و مقاومت به خشکی می توان از محتوای نسبی آب برگ به عنوان یک شاخص مهم جهت بررسی وضعیت گیاه در شرایط تنش خشکی استفاده کرد.

حفظ وضعیت مطلوب آب در گیاه نقش مهمی در بقاء گیاه

برگ (۷۲/۲۳٪) نیز به تیمار آبیاری I₃ و عدم محلول پاشی اختصاص داشت که با تیمار محلول پاشی بور در همین سطح از آبیاری تفاوت معنی دار نداشت. در سطح آبیاری I₃ بیشترین محتوای نسبی آب برگ (۸۰/۱۷٪) از محلول پاشی بور + پتاسیم به دست آمد که با تیمار محلول پاشی پتاسیم اختلاف معنی دار نداشت (جدول ۴). در شرایط خشکی شدید (تیمار آبیاری I₃)، محلول پاشی بور + پتاسیم سبب افزایش حدود ۱۱ درصدی محتوای نسبی آب برگ نسبت به تیمار شاهد شد. در شرایط خشکی ملایم (تیمار آبیاری I₂) نیز محلول پاشی بور + پتاسیم، محتوای نسبی آب برگ را حدود ۱۵/۳ درصد در مقایسه با تیمار شاهد افزایش داد.

یکی از مهم ترین تغییرات ناشی از تنش خشکی، کاهش محتوای نسبی آب برگ است. این شاخص می تواند توانمندی

به واسطه 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 در نتیجه افزایش جذب آب از خاک؛ هم‌چنین به وسیله تنظیم عملکرد روزنه‌ها باعث بهبود تحمل برگ‌های آفتابگردان (*Helianthus annuus*) در خشکی شد.

شاخص سبزیگی برگ (عدد کلروفیل متر): براساس نتایج تجزیه واریانس، اثر تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی بر شاخص سبزیگی برگ چغندر قند در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد؛ ولی برهمکنش آبیاری \times محلول‌پاشی تأثیر معنی‌داری بر شاخص سبزیگی برگ نداشت (جدول ۲). با توجه به مقایسه میانگین داده‌ها، در بین تیمارهای آبیاری بیش‌ترین میزان شاخص سبزیگی برگ (۴۵/۸۹) به تیمار I₁ اختصاص داشت که با تیمارهای I₂ و I₃ اختلاف معنی‌دار داشت. کم‌ترین شاخص سبزیگی برگ (۳۵/۱۳) نیز در تیمار آبیاری I₃ مشاهده شد (جدول ۳). به عبارتی تیمارهای کم‌آبیاری I₂ و I₃ به ترتیب سبب کاهش حدود ۵/۳۹ و ۲۳/۴ درصدی سبزیگی برگ نسبت به شرایط آبیاری کامل شدند که با یافته‌های تدین و غفاری (۱۳۹۷) مطابقت دارد. شاخص سبزیگی معیاری از محتوای کلروفیل برگ است و با افزایش میزان کلروفیل شاخص سبزیگی برگ نیز افزایش می‌یابد. کاهش سبزیگی برگ در شرایط تنش خشکی احتمالاً به واسطه 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., 2000; Tambussi et al., 1981). 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).

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 در نتیجه کاهش پتاسیل اسمزی و در نهایت 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 متابولیسم 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^+ ATPase 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 در نتیجه 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

بنابراین افزایش سبزینگی برگ می شود (Shehzad *et al.*, 2018). به طور مشابه در چغندر قند نیز مشاهده شد محلول پاشی بور سبب افزایش شاخص سبزینگی برگ شد (Abido, 2012).

درصد قند قابل استحصال: اثر تیمارهای آبیاری، محلول پاشی و برهمکنش آبیاری × محلول پاشی بر درصد قند قابل استحصال ریشه چغندر قند در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار شد (جدول ۲). با توجه به مقایسه میانگین داده ها؛ بیشترین درصد قند قابل استحصال (۱۷/۹۸٪) مربوط به تیمار آبیاری I_2 و محلول پاشی بور بود که با تیمار شاهد (عدم محلول پاشی) و سایر تیمارهای محلول پاشی در همین سطح آبیاری اختلاف معنی دار داشت. کمترین درصد قند قابل استحصال (۱۳/۹۸٪) نیز به تیمار آبیاری I_3 و عدم محلول پاشی اختصاص داشت. در سطح آبیاری I_3 بین تیمارهای محلول پاشی بور + پتاسیم، پتاسیم و بور اختلاف معنی دار وجود نداشت (جدول ۴). 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 معنی دار ندارد. محلول پاشی بور + پتاسیم درصد قند قابل استحصال را در سطوح آبیاری I_1 ، I_2 و I_3 به ترتیب حدود ۱۸/۵۵، ۵/۳، ۶/۴۴ درصد نسبت به تیمارهای شاهد افزایش داد. درصد قند قابل استحصال مهم ترین بخش عملکرد اقتصادی چغندر قند به شمار می رود (نوشاد و همکاران، ۱۳۹۱). یکی از واکنش های درونی چغندر قند به کمبود آب افزایش غلظت قند در ریشه است. در چغندر قند ساکارز نیز در کنار پرولین، گلیسین بتائین و یون های هم چون سدیم جزء اسمولیت های مهم به شمار می رود (Draycott, 2008). هم چنین بالاتر بودن عیار قند در شرایط تنش خشکی ممکن است به علت از دست رفتن آب ریشه ها و کوچک بودن آنها در این شرایط باشد (Ober, 2001). به طور مشابه ماهرخ و خواجه پور (۱۳۸۹) نیز نشان دادند؛ افزایش تنش رطوبتی از طریق افزایش عیار قند باعث افزایش درصد شکر قابل استحصال شد. اما تنش خشکی شدید (تیمار آبیاری I_3) درصد قند قابل استحصال را حدود ۱۰

بنابراین، کاهش سبزینگی برگ در شرایط تنش خشکی طولانی مدت ممکن است تا حدودی به دلیل کاهش جریان نیتروژن به بافت ها و فعالیت نترات ردوکتاز باشد. در شرایط خشکی آنزیم های کلروفیلاز و پراکسیداز نیز از عوامل مؤثر در کاهش میزان کلروفیل هستند (احمدی و همکاران، ۱۳۷۹).

در بین تیمارهای محلول پاشی نیز بیشترین شاخص سبزینگی برگ (۴۵/۵۱) از محلول پاشی بور + پتاسیم به دست آمد که با سایر تیمارهای محلول پاشی تفاوت معنی دار داشت. محلول پاشی پتاسیم و بور + پتاسیم به ترتیب سبزینگی برگ را حدود ۱۲ و ۱۹/۷۵ درصد افزایش دادند. کمترین شاخص سبزینگی برگ (۳۸) نیز مربوط به تیمار شاهد بود (جدول ۳). محلول پاشی بور اگرچه موجب افزایش حدود ۵ درصدی سبزینگی برگ شد؛ ولی با تیمار شاهد از لحاظ آماری اختلاف معنی دار نداشت.

در شرایط تنش خشکی گیاهان دچار کمبود پتاسیم به دلیل مختل شدن دستگاه فتوسنتزی و تولید گونه های فعال اکسیژن (ROS) محتوای کلروفیل کمتری دارند (Shehzad *et al.*, 2018). نیتروژن از بخش های مهم و جدایی ناپذیر کلروفیل است. در شرایط تنش خشکی، پتاسیم از طریق حفظ فعالیت آنزیم های دخیل در متابولیسم نیتروژن سبب تنظیم این فرایند می شود. بنابراین با تأمین پتاسیم کافی، محتوای نیتروژن برگ بهبود می یابد و غلظت کلروفیل و در نتیجه سبزینگی افزایش می یابد (Zahoor *et al.*, 2017). به طور مشابه طی پژوهشی گزارش شد که در گیاه استویا (*Stevia rebaudiana*) پتاسیم با بهبود فعالیت آنزیم نترات ردوکتاز سبب افزایش میزان کلروفیل و فتوسنتز شد (Ma and Shi, 2011). هم چنین پتاسیم سبب افزایش تولید گرانا و تیلاکوئیدها می شود (Le Pabic *et al.*, 1983). با توجه به اینکه رنگدانه های فتوسنتزی از جمله کلروفیل در غشاء تیلاکوئیدها قرار دارند، احتمالاً افزایش تیلاکوئیدها به افزایش غلظت کلروفیل کمک می کند.

به کار بردن عنصر بور دارای اثر هم افزایی با جذب نیتروژن است. نیتروژن نیز به طور مستقیم در سنتز آمینو اسیدها، RNA و پروتئین ها نقش دارد و در نهایت سبب افزایش تولید کلروفیل و

شدید (I_2 و I_3) بیشترین درصد قند قابل استحصال مربوط به محلول پاشی بور بود. این نتیجه احتمالاً ناشی از این است که در شرایط تنش خشکی با حضور پتاسیم گیاه نیاز کمتری به تجمع ساکارز به عنوان یک اسمولیت جهت تنظیم اسمزی دارد؛ بنابراین درصد قند قابل استحصال در تیمار محلول پاشی بور نسبت به تیمارهایی که در آن‌ها پتاسیم حضور داشته افزایش یافته است.

محتوای سدیم ریشه: اثر تیمارهای آبیاری، محلول پاشی و برهمکنش آبیاری \times محلول پاشی بر محتوای سدیم ریشه چغندر قند به ترتیب در سطح احتمال ۱ درصد و ۵ درصد معنی دار شد (جدول ۲). بیشترین میزان سدیم ریشه (۲/۱۱ میلی‌اکی‌والان در صد گرم ریشه) به تیمار آبیاری I_3 و عدم محلول پاشی اختصاص داشت که با محلول پاشی بور در همین سطح از آبیاری اختلاف معنی دار نداشت. کمترین محتوای سدیم ریشه (۱/۰۶ میلی‌اکی‌والان در صد گرم ریشه) نیز مربوط به تیمار آبیاری I_1 و محلول پاشی بور + پتاسیم بود که با محلول پاشی پتاسیم در همین سطح از آبیاری اختلاف معنی دار نداشت (جدول ۴). نتایج نشان داد که تنش خشکی سبب افزایش محتوای سدیم ریشه چغندر قند شد. به طوری که تیمارهای کم آبیاری I_2 و I_3 میزان سدیم ریشه را به ترتیب حدود ۱۲ و ۳۹ درصد نسبت به شرایط آبیاری کامل افزایش دادند. تیمارهای محلول پاشی سبب کاهش میزان سدیم ریشه در همه سطوح آبیاری شدند. محلول پاشی بور + پتاسیم در سطح آبیاری I_1 ، I_2 و I_3 محتوای سدیم ریشه را به ترتیب حدود ۳۰، ۳۶ و ۳۵ درصد نسبت به تیمارهای شاهد کاهش داد.

افزایش کیفیت محصول چغندر قند از طریق بالابردن درصد قند و کاهش مواد غیرقندی به ویژه 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). به طوری که برای هر اتم سدیم یا پتاسیم یک مولکول قند به صورت ضایعات وارد ملاس می‌شود (Giroux and Tran, 1989). کاهش عملکرد ریشه چغندر قند در اثر تنش

درصد نسبت به شرایط آبیاری کامل کاهش داد. در شرایط خشکی شدید هدایت روزنه‌ای کاهش می‌یابد. در نتیجه با کاهش جذب دی‌اکسید کربن و محدود شدن فتوسنتز، تولید آسیمیلات‌ها نیز کم می‌شود. در نهایت 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 در نهایت 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 چغندر قند می‌شود. در نتیجه عیار قند و درصد قند قابل استحصال افزایش می‌یابد. از طرفی پتاسیم در کاهش میزان ناخالصی‌های ریشه مثل سدیم نقش دارد. بنابراین میزان ورودی به ملاس را کاهش می‌دهد. به طور 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 به واسطه افزایش عیار قند و کاهش ناخالصی‌های ریشه (سدیم، پتاسیم و نیتروژن مضره) است (Abbas et al., 2014). بنابراین افزایش قند قابل استحصال با به کار بردن بور و پتاسیم احتمالاً به واسطه نقش مهم این عناصر در انتقال قند و ذخیره و تجمع آن در ریشه چغندر قند است (El-hady et al., 2017). با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش؛ در شرایط آبیاری کامل (I_1) بیشترین درصد قند قابل استحصال از محلول پاشی بور + پتاسیم به دست آمد. اما در تیمارهای تنش خشکی ملاس و

نداشت (جدول ۴). نتایج نشان داد تیمارهای کم‌آبیاری سبب افزایش محتوای پتاسیم ریشه چغندر قند شد. به طوری که تیمارهای کم‌آبیاری I_2 و I_3 به ترتیب میزان پتاسیم ریشه را حدود $1/65$ و $8/26$ درصد نسبت به شرایط آبیاری کامل افزایش دادند. تیمارهای محلول پاشی میزان پتاسیم ریشه را در همه سطوح آبیاری کاهش دادند. محلول پاشی بور + پتاسیم در سطوح آبیاری I_1 ، I_2 و I_3 به ترتیب محتوای پتاسیم ریشه را $8/48$ ، $9/73$ و $8/47$ 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 (۱۳۸۶) گزارش کردند تنش خشکی سبب افزایش معنی‌دار سدیم و پتاسیم ریشه چغندر قند و تجمع این عناصر به صورت ذخیره و مصرف نشده در ریشه شد. بنابراین محلول پاشی 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 چغندر قند کاهش یافت. از طرفی محلول پاشی 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. به طور مشابه مهراندیش و همکاران (۱۳۹۷) مشاهده کردند با افزایش میزان مصرف پتاسیم، غلظت پتاسیم ریشه به طور قابل توجهی کاهش یافت. همچنین گزارش شده است به کاربرد بور نیز با کاهش محتوای پتاسیم ریشه سبب افزایش کیفیت عصاره ریشه چغندر قند شد. در شرایط کمبود بور رشد گیاه محدود می‌شود؛ در نتیجه غلظت سدیم و پتاسیم افزایش می‌یابد. بنابراین به کاربرد بور سبب افزایش رشد گیاه و کاهش غلظت سدیم و پتاسیم می‌شود (Narayan et al., 1989).

آلکالیت یا ضریب قلیائیت: تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر تیمارهای محلول پاشی بر ضریب قلیائیت ریشه چغندر قند در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد ولی

خشکی، عامل اصلی افزایش محتوای سدیم ریشه در تیمارهای کم‌آبیاری است (مهراندیش و همکاران، ۱۳۹۷). بنابراین تیمارهای محلول پاشی با بهبود عملکرد ریشه چغندر قند در کاهش میزان سدیم ریشه مؤثر هستند. از طرفی عناصر سدیم، پتاسیم و کربوهیدرات‌های محلول نقش مهمی در فرایند تنظیم اسمزی در چغندر قند 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 چغندر قند قابلیت جانشینی برای یکدیگر دارند؛ با انجام محلول پاشی و افزایش دسترسی گیاه به پتاسیم از میزان جذب سدیم کاسته شده است. به طور مشابه طی پژوهشی گزارش شد به کاربرد ۲۹۶ کیلوگرم در هکتار پتاسیم سبب کاهش میزان سدیم ریشه و اندام هوایی چغندر قند 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 چغندر قند 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) محلول پاشی بور به شکل اسید بوریک سبب کاهش محتوای سدیم ریشه چغندر قند شد.

محتوای پتاسیم ریشه: اثر تیمارهای آبیاری، محلول پاشی و برهمکنش آبیاری \times محلول پاشی بر محتوای پتاسیم ریشه چغندر قند به ترتیب 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 محلول پاشی اختصاص داشت که با محلول پاشی بور در همین سطح از آبیاری اختلاف معنی‌دار نداشت. کمترین محتوای پتاسیم ریشه (۴/۶۱ میلی‌اکی‌والان در صد گرم ریشه) نیز مربوط به تیمار آبیاری I_1 و محلول پاشی بور + پتاسیم بود که با محلول پاشی پتاسیم در این سطح آبیاری تفاوت معنی‌دار

درصد نسبت به شرایط آبیاری کامل (تیمار I₁) کاهش داد. ضریب استحصال شکر یا راندمان استحصال شکر در واقع نسبت ساکارز قابل استحصال به کل ساکارز موجود در ریشه است و به صورت 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 به دست 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 به ترتیب 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 چغندر قند 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 I₁ اختصاص داشت که با سایر تیمارهای آبیاری اختلاف معنی‌داری نشان داد. کم‌ترین عملکرد ریشه (۲۵/۰۵ تن در هکتار) نیز از تیمار I₃ به دست آمد (جدول ۳). به عبارتی تیمارهای کم‌آبیاری I₂ و I₃ به ترتیب 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). در نهایت با کاهش تولید آسیمیلات‌ها عملکرد ریشه نیز کاهش پیدا می‌کند. Scott و Cooke (۱۹۹۳)

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 آلکالیت (۲/۶۳) نیز از محلول‌پاشی بور به دست آمد که با تیمار عدم محلول‌پاشی تفاوت معنی‌دار نشان نمی‌داد (جدول ۳). با توجه به نتایج به دست آمده محلول‌پاشی پتاسیم آلکالیت را حدود ۱۲/۳۱ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد.

آلکالیت 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 آلکالیت 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 (K₂O) 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 چغندر قند 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 I₁ به دست آمد که لحاظ آماری با تیمار I₂ تفاوت معنی‌دار نداشت. کم‌ترین ضریب استحصال شکر (۸۳/۳۹٪) نیز به تیمار آبیاری I₃ اختصاص داشت (جدول ۳). تنش خشکی شدید (تیمار I₃) ضریب استحصال شکر را حدود ۳/۳

پتاسیم سبب افزایش عملکرد ریشه چغندر قند شد (Sarkar and Ghosh, 1989).

عنصر بور نیز نقش مهمی در رشد و تولید بسیاری از گیاهان زراعی خصوصاً چغندر قند 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 چغندر قند احتمالاً به‌خاطر نقش آن در طول شدن سلول‌های ریشه است (Mekdad, 2015). با توجه به مشاهدات Dewdar و همکاران (۲۰۱۵) بور در فعالیت آنزیم‌هایی که باعث تسهیل انتقال کربوهیدرات‌ها و همچنین سنتز پروتئین‌ها می‌شوند؛ نقش دارد. کمبود بور سبب آسیب به مریستم‌های انتهایی 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 در نهایت کاهش عملکرد خواهند شد. بنابراین محلول پاشی بور سریعاً این عنصر را در دسترس گیاه قرار می‌دهد و سبب افزایش عملکرد ریشه می‌شود که با یافته‌های Gobarah و Mekki (۲۰۰۵) مطابقت دارد.

عملکرد قند ناخالص یا عملکرد شکر: با توجه به نتایج

تجزیه واریانس داده‌ها، اثر تیمارهای آبیاری و محلول پاشی بر عملکرد قند ناخالص ریشه چغندر قند در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار شد ولی برهمکنش آبیاری × محلول پاشی تأثیر معنی دار بر عملکرد قند ناخالص نداشت (جدول ۲). از لحاظ آبیاری بیشترین عملکرد قند ناخالص یا عملکرد شکر (۱۰/۵۷ تن در هکتار) از تیمار آبیاری I_1 به دست آمد که با تیمارهای I_2 و I_3 اختلاف معنی دار داشت. کمترین عملکرد قند ناخالص (۴/۴ تن در هکتار) نیز مربوط به تیمار I_3 بود (جدول ۳). نتایج نشان داد که خشکی شدید (تیمار I_3) عملکرد شکر را حدود ۵۸/۳۷ درصد نسبت به آبیاری کامل کاهش داد. با توجه به

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

در بین تیمارهای محلول پاشی بیشترین عملکرد ریشه (۴۴/۳۹ تن در هکتار) به محلول پاشی بور + پتاسیم اختصاص داشت که با سایر تیمارهای محلول پاشی اختلاف معنی داری داشت. به عبارتی محلول پاشی بور + پتاسیم عملکرد ریشه را حدود ۲۱/۶ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد و از این لحاظ نسبت به سایر تیمارهای محلول پاشی برتری داشت. کمترین عملکرد ریشه (۳۶/۵۱ تن در هکتار) نیز در شرایط عدم محلول پاشی به دست آمد (جدول ۳). محلول پاشی بور اگر چه عملکرد ریشه را حدود ۵ درصد افزایش داد؛ اما با تیمار شاهد تفاوت معنی داری 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 به واسطه 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 آسمیلات‌ها 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 Zanonny, 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

(Mekdad, 2015).

نتیجه گیری

باتوجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش، تنش خشکی آثار نامطلوبی بر ویژگی های مورفوفیزیولوژیک چغندر قند همچون شاخص سطح برگ، شاخص سبزیگی برگ و محتوای نسبی آب برگ برجا می گذارد. در نتیجه با کاهش میزان فتوسنتز و تولید آسیمیلات ها وزن خشک بوته و عملکرد ریشه نیز کاهش می یابد. علاوه بر صفات مورفوفیزیولوژیک، ویژگی های کیفی ریشه چغندر قند نیز تحت تأثیر تنش خشکی قرار می گیرد. بدین ترتیب که با افزایش سطح خشکی میزان ناخالصی های ریشه (سدیم، پتاسیم و نیتروژن مضره) افزایش پیدا می کند و کیفیت آن کاهش می یابد. 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 محلول پاشی بور و پتاسیم باعث بهبود صفات مورفوفیزیولوژیک گیاه می شوند. بنابراین تا حدی اثرات سوء تنش خشکی را بر صفات کمی و کیفی چغندر قند کاهش می دهند که احتمالاً به واسطه نقش مهم این عناصر در فرایند تنظیم اسمزی و دیگر واکنش های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه است. بنابراین از آنجایی که خشکی یکی از عوامل اصلی کاهش عملکرد چغندر قند در نواحی خشک و نیمه خشک جهان و ایران است، محلول پاشی عناصر بور و پتاسیم به عنوان رهیافتی جهت مقابله با خشکی توصیه می شود.

مشاهدات عروج نیا و همکاران (۱۳۹۱) بین سطوح مختلف آبیاری (تنش و نرمال) از لحاظ عملکرد قند ناخالص تفاوت معنی دار وجود نداشت. با این حال عملکرد قند ناخالص در شرایط آبیاری نرمال بیشتر بود. اگر چه ممکن است در شرایط تنش رطوبتی متوسط عیار قند افزایش یابد (ماهرخ و خواجه پور، ۱۳۸۹) ولی به دلیل کاهش عملکرد ریشه در نهایت عملکرد قند ناخالص کاهش پیدا می کند.

در بین تیمارهای محلول پاشی نیز بیشترین عملکرد قند ناخالص (۸/۴۹ تن در هکتار) از محلول پاشی بور + پتاسیم به دست آمد که با سایر تیمارهای محلول پاشی اختلاف معنی دار داشت. کمترین عملکرد قند ناخالص (۶/۵۲ تن در هکتار) نیز مربوط به شرایط عدم محلول پاشی بود. از لحاظ آماری بین تیمارهای محلول پاشی بور و محلول پاشی پتاسیم اختلاف معنی دار وجود نداشت (جدول ۳). محلول پاشی بور + پتاسیم، پتاسیم و بور به ترتیب عملکرد قند ناخالص را حدود ۳۰/۲، ۱۸ و ۱۴/۹ درصد نسبت تیمار شاهد افزایش دادند. پتاسیم به واسطه نقشی که در جذب عناصر غذایی و ایجاد تعادل غذایی دارد، منجر به افزایش تولید آسیمیلات ها و در نتیجه بالا بردن عملکرد شکر می شود (Milford et al., 2000). پتاسیم سبب افزایش محتوای قند ریشه می شود و نقش بیوشیمیایی مهمی در انتقال قند در گیاهان بر عهده دارد (Abdel-Mawly and Zouny, 2004). بور نیز احتمالاً به دلیل نقش آن در افزایش عیار قند و عملکرد ریشه چغندر قند سبب افزایش عملکرد شکر می شود. به طور مشابه طی پژوهشی گزارش شد محلول پاشی بور عملکرد قند ناخالص را افزایش داد

منابع

- اسماعیلی، ا. و تدین، م. ر. (۱۳۹۸) تأثیر تنش خشکی و اسید هیومیک بر رشد، عملکرد و شکر تولیدی توسط چغندر قند (*Beta vulgaris* L.). نشریه بوم شناسی کشاورزی ۱: ۱۹۸-۱۸۵.
- امام، ی. و نیک نژاد، م. (۱۳۹۰) مقدمه ای بر فیزیولوژی عملکرد گیاهان زراعی. انتشارات دانشگاه شیراز، شیراز.
- احمدی، ج.، چوگان، ر.، زینالی خانقاه، ح. و رستمی، م. ع. (۱۳۷۹) بررسی شاخص های مقاومت به خشکی و استفاده از روش های بای پلات در هیبریدهای ذرت دانه ای. مجله علوم کشاورزی ایران ۳: ۵۲۴-۵۱۳.
- خواجه پور، م. ر. (۱۳۹۱) گیاهان صنعتی. چاپ پنجم. انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، اصفهان.

- 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 ۴: ۵۷۵-۵۸۳.
- عباسی مقدم، 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 ۴: ۱۱-۲۵.
- عبداللهیان نوقابی، م.، شیخ‌الاسلامی، ر. و بابایی، ب. (۱۳۸۴) اصطلاحات و تعاریف کمیت و کیفیت تکنولوژیکی چغندرقد، اختصارات فنی. نشریه چغندرقد ۱: ۱۰۴-۱۰۱.
- عروج‌نیا، س.، حبیبی، د.، فتح‌الله طالقانی، د.، صفری دولت‌آبادی، س.، پازکی، ع.، معاونی، پ.، رحمانی، م. و فرشیدی، م. (۱۳۹۱) بررسی عملکرد و اجزاء عملکرد ژنوتیپ‌های مختلف چغندرقد تحت شرایط تنش خشکی. مجله زراعت و اصلاح نباتات ۸: ۱۲۷-۱۴۴.
- غفاری، ح. و تدین، م. ر. (۱۳۹۶) تأثیر چای ورمی‌کمپوست بر صفات مورفوفیزیولوژیک، عملکرد و کیفیت ریشه چغندرقد (*Beta vulgaris* L.) تحت شرایط کمبود آب. نشریه چغندرقد ۲: ۱۷۷-۱۹۱.
- غفاری، ح. و تدین، م. ر. (۱۳۹۷) تأثیر محلول‌پاشی پرولین بر برخی شاخص‌های فیزیولوژیک چغندرقد (*Beta vulgaris* L.) در شرایط کمبود آب. فصلنامه فرایند و کارکرد گیاهی ۲۶: ۱۳-۲۶.
- 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 چغندرقد. نشریه علوم گیاهان زراعی ایران ۲: ۲۳۵-۲۴۶.
- مهراندیش، م.، جامی‌معینی، م. و آرمین، م. (۱۳۹۷) اثر منبع و مقدار مصرف پتاسیم بر ویژگی‌های کیفی چغندرقد رقم ارس در شرایط آبیاری کامل و محدود. مجله اکوفیزیولوژی گیاهی ۳۴: ۹۷-۱۰۸.
- میرزایی، م. ر. و رضوانی، س. م. ا. (۱۳۸۶) تأثیر تنش خشکی بر خصوصیات کیفی چغندرقد در مراحل مختلف رشد رویشی. نشریه چغندرقد ۱: ۲۹-۴۲.
- نوشاد، ح.، عبداللهیان نوقابی، م. و بابایی، ب. (۱۳۹۱) تأثیر مقادیر مختلف کودهای نیتروژن و فسفر بر میزان جذب و کارایی نیتروژن در چغندرقد. نشریه علوم گیاهان زراعی ایران ۳: ۵۲۹-۵۳۹.
- 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 نباتات ۲: ۳۷-۴۹.
- 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 Zounouy, 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.

- 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 Makhlof, 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.

- 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 für 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 für Pflanzenernährung und 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. 3rd 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 Wullschlegel, S. D. (1987) Osmotic adjustment in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) leaves and roots in response to water stress. *Plant Physiology* 84: 1154-1157.

- 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 KNO₃ 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.

- 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.

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 \times 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 \times 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 effects 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