

تأثیر محلول‌پاشی ملاتونین و سولفات پتاسیم بر تعدیل تنش کم آبی و کاهش تجمع نترات در کلم بروکلی

الهه فرشاد، نجمه زینلی‌پور* و روح‌الله عبدلی‌نژاد

گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۲، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۰۹/۲۹)

چکیده

این پژوهش به منظور بررسی کاربرد ملاتونین و سولفات پتاسیم بر خصوصیات کمی و کیفی محصول کلم بروکلی (*Brassica oleracea* var. *italica*) تحت تنش کم آبی، به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. فاکتورهای آزمایش شامل شرایط آبیاری در دو سطح (۵۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه)، ملاتونین در سه سطح (صفر، ۱۵۰ و ۳۰۰ میکرومولار) و سولفات پتاسیم در سه سطح (صفر، ۲ و ۵ میلی‌مولار) بود. نتایج نشان داد که در تیمار ملاتونین ۳۰۰ میکرومولار و آبیاری شاهد (۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه) سطح برگ دو برابر تیمار ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه بدون کاربرد ملاتونین بود. بیشترین فعالیت آنزیم کاتالاز در برهمکنش سطح آبیاری ۵۰ درصد و ملاتونین ۱۵۰ میکرومولار و بیشترین میزان مالون دی‌آلدئید در همین ظرفیت زراعی بدون کاربرد ملاتونین مشاهده گردید. بالاترین مقادیر کلروفیل a و b در برهمکنش ظرفیت زراعی ۱۰۰ درصد، ملاتونین ۱۵۰ میکرومولار و سولفات پتاسیم ۵ میلی‌مولار بدست آمدند. بیشترین میزان عملکرد هد در برهمکنش ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی با کاربرد ملاتونین ۳۰۰ میکرومولار و سولفات پتاسیم ۵ میلی‌مولار صورت گرفت که در همین تیمار بیشترین فعالیت آنزیم نترات ردوکتاز و کمترین تجمع نترات در هد محصول مشاهده گردید. بیشترین محتوای پرولین و فعالیت آنزیم پراکسیداز تحت شرایط ۵۰ درصد ظرفیت زراعی بدون کاربرد ملاتونین و سولفات پتاسیم بود. بهترین تیمار در اغلب صفات برهمکنش ملاتونین ۳۰۰ میکرومولار، سولفات پتاسیم ۵ میلی‌مولار در شرایط آبیاری شاهد (۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه) بود. بنابراین کاربرد این ترکیبات جهت بهبود صفات فیزیولوژیکی، عملکرد و کیفیت کلم بروکلی توصیه می‌گردد.

کلمات کلیدی: بروکلی، تجمع نترات، تنش کم آبی، سطح برگ

مقدمه

می‌شود. هم‌چنین برگ‌های آن به عنوان علف‌ه برای حیوانات مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سال‌های اخیر به عنوان سبزی محبوب در بین مردم رواج پیدا کرده است (Tripathi and Singh, 2008).

یکی از فاکتورهای تأثیرگذار بر رشد و عملکرد گیاهان دسترسی به آب است. پاسخ‌های فیزیولوژیک و مورفولوژیک گونه‌های مختلف گیاهی نسبت به تنش خشکی متفاوت است. خشکی منجر به آسیب دستگاه فتوسنتزی شده و به دنبال آن

کلم بروکلی (*Brassica oleracea* var. *italica*) از سبزی‌های ارزشمند است. بخش خوراکی کلم بروکلی ساقه نرم و لطیف و جوانه‌های گل باز نشده آن (هد) است که از نظر مواد مغذی، منبعی سرشار از فیبر می‌باشد که حاوی مقدار زیادی ویتامین‌های آ و ث و حاوی ریپوفلاوین، تیامین و نیاسین است (Getachew et al., 2016). این محصول یک سبزی با کیفیت بالا برای استفاده تازه‌خوری و نیز به صورت پخته محسوب

* نویسنده مسؤول، نشانی پست الکترونیکی: Nzeinali@uk.ac.ir

فتوستتز خالص نهال‌های ذرت می‌شود. در همین راستا محلول‌پاشی برگ‌ی با غلظت‌های مختلف ملاتونین باعث افزایش سرعت خالص فتوستتز و هدایت روزنه‌ای شده و باعث افزایش همزمان محتوای نسبی آب برگ می‌شوند. متابولیسم گیاه افزایش یافته و گیاه شرایط تنش را تحمل می‌کند (Ahmad et al., 2019). مطالعات موجود در مورد تعامل ملاتونین با مکانیسم‌های تنش‌زا، رابطه پیچیده‌ای با تولید گونه‌های فعال اکسیژن را مشخص کرده‌اند (Kaya and Dogonlar, 2019). شواهد تأیید می‌کنند که ملاتونین یک آنتی‌اکسیدان مستقیم با طیف گسترده‌ای است که می‌تواند این گونه‌های واکنش‌گر را غیرفعال کند یا از تولید آن‌ها ممانعت به عمل آورد (Zamani et al., 2019).

نیاز روزافزون به مواد غذایی برای جمعیت رو به رشد کشور و لزوم ایجاد امنیت غذایی ایجاب می‌کند تا در حد امکان میزان تولیدات بخش کشاورزی در کشور افزایش یابد، بنابراین کاربرد ترکیبات زیستی و کم‌خطر در صورتی که بتوانند منجر به حفظ بهتر راندمان عملکرد گیاه و تولید محصول با کیفیت گردد می‌تواند قدمی بسیار اساسی در جهت تولید محصولات فراسودمند و سلامت جامعه و بخصوص در اقلیم‌های دارای تنش‌های محیطی باشد. گزارش شده است که ملاتونین هم تحریک‌کننده و هم بازدارنده رشد است که این اثرات ملاتونین به غلظت آن بستگی دارد. در گیاه طالبی استفاده از ملاتونین در غلظت ۲۰۰ میکرومولار به صورت افشانه برگ‌ی به طور معنی‌داری از سرکوب رشد القاشده به وسیله سرما جلوگیری کرد و گیاهان تیمار شده با ملاتونین نسبت به غیر تیمار شده‌ها رشد و محتوای کلروفیل بیشتری داشتند (Zhao et al., 2017). ملاتونین از لحاظ ساختاری شبیه به اکسین است که هر دو، جز مشتقات ایندول آمین هستند و می‌تواند از طریق پذیرنده‌های اکسین اثر خود را اعمال کند (Zhang et al., 2015). غلظت‌های پایین ملاتونین، سبب تحریک بیوستتز ایندول استیک اسید (IAA) شده و IAA تولید شده رشد ریشه را تحریک می‌کند. اما ارتباط بین IAA و ملاتونین هنوز به طور کامل شناخته نشده است (Arnao and

متابولیسم گیاه تقلیل یافته و رشد و عملکرد کاهش می‌یابد. به طور کلی گیاه استراتژی‌های فرار یا تحمل از خشکی را برای رشد و سازگاری تحت شرایط خشکی انتخاب می‌کند (Naghizadeh et al., 2019). تنش‌های کمبود آب از عوامل اصلی کاهش عملکرد محصولات کشاورزی از جمله سبزیجات به شمار می‌آیند که این کاهش، به نحوه پاسخ گیاه به شرایط تنش بستگی دارد (Arbona et al., 2017). گیاهان با استفاده از راهکارهای فیزیولوژیک و بیوشیمیایی به همراه ویژگی‌های آناتومیک می‌توانند از اثرات منفی تنش خشکی بکاهند (Hefny, 2011). با این وجود امروزه کاربرد ترکیبات طبیعی، زیستی و یا ارگانیک در بخش‌های مختلف تولید و کشاورزی رو به افزایش است و نتایج مطالعات مشخص نموده است که در برخی موارد این گونه ترکیبات توانایی تعدیل آثار مخرب تنش‌های زنده و غیرزنده را دارا هستند که از این طریق بتوان بقا و عملکرد گیاه را در شرایط تنش‌زا بهتر حفظ نمود. یکی از این ترکیبات ملاتونین است که در گیاهان به عنوان یک محرک زیستی شناخته شده و نقش‌های متعددی در رشد گیاه و دفاع در برابر عوامل محیطی ایفا می‌کند. گزارش‌هایی در زمینه نقش ملاتونین در بهبود پاسخ‌های گیاه به تنش‌هایی چون خشکی، شوری، سرما، حمله پاتوژن‌ها، سمیت یونی و تنش اکسیداتیو ارائه شده است (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۸).

ملاتونین (N-استیل-۵-متوکسی تریپتامین) هورمونی از نوع ایندول آمین و مشتق از تریپتوفان است که در گیاهان عالی در کلروپلاست‌ها سنتز شده و به دلیل ظرفیت آنتی‌اکسیدانی بسیار بالا، دارای نقش‌های متعددی در رشد گیاه و دفاع در برابر عوامل نامساعد محیطی است (Li et al., 2018a). این ترکیب در واقع با کاهش وقوع واکنش فنتون (Phenton) صدمات اکسیداتیو را در مولکول‌های حیاتی مانند DNA، پروتئین‌ها و لیپیدها کاهش می‌دهد و ثابت شده که با حفظ فعالیت فتوشیمیایی غشاهای کلروپلاستی و واکنش‌های کربوکسیلاسیون در فتوستتز و ثبات عملکرد فتوسیستم II، باعث کاهش تنش اکسیداتیو می‌گردد (Liu et al., 2016). تنش خشکی باعث کاهش شدید تعرق، هدایت روزنه‌ای و میزان

رطوبت برگ و مهم تر از آن ایفای نقش در ساخت پروتئین‌ها، آنزیم‌ها و افزایش تجمع ساکارز تأثیر مثبتی در چرخه رشد گیاه دارد (Hu *et al.*, 2015). هم‌چنین موجب افزایش کارایی مصرف آب و تجمع ماده خشک در گیاه می‌گردد (Zhang *et al.*, 2014). طبق مطالعات متخصصین تغذیه گیاهی، سبزی‌های برگی و دارای هد نسبت به سایر محصولات گیاهی تمایل بیشتری به تجمع نیترات دارند. از سویی دیگر تجمع نیترات در گیاهان تحت تأثیر بسیاری از عوامل محیطی و ژنتیکی قرار دارد و این مورد به گونه، رقم، اندام‌های مختلف گیاه، سن و فاکتورهای ژنتیکی بستگی دارد (Tabande and Safarzadeh, 2018). استفاده از ارقام مناسب، کودهای پایه آمونیومی، مصرف بهینه کود و افزودن کودهای ارگانیک از روش‌های کاهش تجمع نیترات در سبزیجات است. هر عاملی که منجر به کاهش فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز در گیاه شود، به نحوی با تجمع نیترات در اندام هوایی گیاه همراه است. انتقال نیترات از ریشه به اندام هوایی گیاه کم است ولی با افزایش مقدار نیترات، انتقال به ساقه و برگ‌ها تحریک می‌شود. بنابراین تحت شرایطی که مقدار زیادی کود نیتروژنی مصرف شود، ظرفیت احیای نیترات کاهش می‌یابد و مقادیر مازاد نیترات به برگ‌ها انتقال می‌یابد (Malakouti *et al.*, 2013). نور کم، دمای زیاد و به خصوص تنش‌های رطوبتی منجر به کاهش فعالیت آنزیم احیاءکننده نیترات و در نتیجه افزایش تجمع نیترات می‌گردند (Alexander, 2008).

با توجه به اینکه نقش ملاتونین در رشد و نمو کلم بروکلی و نیز توانایی و قدرت آن در تعدیل تنش کم آبی مطالعه نشده، هم‌چنین خصوصیت مهم توانایی و استعداد انباشت نیترات در هد خوراکی این محصول چندان مورد بررسی قرار نگرفته است، این پژوهش با هدف سنجش میزان توانایی احتمالی این دو ترکیب در شرایط کم آبیاری بر خصوصیات فیزیولوژیکی گیاهچه، عملکرد محصول و انباشت نیترات در این گیاه طراحی و اجرا شده است.

مواد و روش‌ها

(Hernandez-Ruiz, 2014). تأثیر ملاتونین در جوانه‌های خیار نیز باعث افزایش سرعت فتوسنتز خالص هم در دمای مطلوب و هم در دمای نامساعد شد. این نتایج نشان می‌دهد که کاربرد ملاتونین خارجی تأثیر تحریک‌کننده بر فتوسنتز در گیاهان دارد (Shibaeva *et al.*, 2018). ملاتونین کارایی فتوسیستم II را در تاریکی بهبود می‌بخشد و باعث کاهش مهار فتوسنتز ناشی از تنش خشکی در درختان سیب می‌شود و هم‌چنین اجازه می‌دهد تا برگ‌ها ظرفیت بیشتری برای جذب CO₂ و هدایت روزنه‌ای داشته باشند (Arnao and Hernandez-Ruiz, 2014).

پتاسیم در همه سطوح گیاه تحرک زیادی دارد. پتاسیم در فرآیندهای متعدد فیزیولوژی رشد مثل فتوسنتز، فعالیت آنزیم‌ها و سنتز پروتئین‌ها نقش اساسی دارد، به همین دلیل مقاومت گیاه به خشکی را افزایش می‌دهد و نقش مهمی در تعیین کمیت و کیفیت محصول ایفا می‌کند (Basak and Biswas, 2009). پتاسیم یک عنصر ضروری برای رشد و گسترش گیاه است و کاتیون بسیار فراوانی در گیاه است که ۳ تا ۵ درصد وزن خشک کل گیاه را تشکیل می‌دهد. پتاسیم موجود در گیاه با تحریک رشد ریشه در جذب آب ایفای نقش می‌نماید و این مهم باعث حفظ رشد گیاه حتی در شرایط خشکی می‌گردد، به عبارت بهتر پتاسیم موجب افزایش مقاومت، کیفیت و عملکرد گیاه در شرایط کم آبی و خشکی می‌شود (Rohbakhsh, 2013). در مواقعی که گیاه دچار تنش می‌شود گیاهانی که دارای پتاسیم کافی هستند به سرعت اقدام به بسته‌شدن روزنه‌ها می‌نمایند که این عمل مانع خروج مقدار زیادی آب از گیاه می‌گردد. در واقع با این مکانیزم سلول نگهبان روزنه به سلول‌های روپوستی مجاور خود آب و املاح می‌دهد، در نتیجه این خروج پتاسیم به همراه مولکول‌های آب، موجب پلاسمولیزه و چروکیدگی شدن سلول‌های نگهبان شده و طول آن‌ها کم می‌شود و تحت فشار تورژسانس، سلول‌های مجاور به هم نزدیک می‌شوند تا روزنه بسته شود. در این حالت تبادلات گازی و آبی گیاه با محیط بیرون متوقف می‌شود (قاسم‌زاده گنجه‌ای، ۱۳۸۹).

نتایج مطالعات نشان داده که در شرایط تنش‌زا، کاربرد سولفات پتاسیم از طریق تنظیم پتانسیل اسمزی، آماس و

و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، ۸۰ روز و تا زمان تشکیل کامل هد خوراکی در اکثر تیمارها بود. اندازه‌گیری صفات نزدیک به مراحل پایانی رشد گیاه و با ارزیابی پارامترهایی مانند سطح برگ، رطوبت نسبی برگ، میزان کلروفیل‌های a و b، میزان نشت یونی، محتوای مالون دی‌آلدئید، پرولین برگ، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز، میزان تجمع نیترات در برگ و هد، فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز و عملکرد هد خوراکی صورت گرفت.

جهت اعمال تنش خشکی از روش وزنی با کاربرد ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم استفاده شد (داوری‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۴). برای اندازه‌گیری سطح برگ از مساحت‌سنج برگ مدل CI-203 شرکت دانشور شیمی استفاده شد. سنجش میزان رطوبت نسبی برگ به روش (Ritchie and Nguyen, 1990) انجام گرفت. اندازه‌گیری میزان کلروفیل‌های a و b به روش معروف (Lichtenthaler, 1987) صورت گرفت. برای تعیین پایداری غشا سلولی در برگ و میزان نشت یونی، از روش (Kumar and Dey, 2011) استفاده گردید. میزان پرولین برگ‌ها به روش رایج (Bates et al., 1973) سنجش شد. سنجش میزان پراکسیداسیون لیپیدهای غشا براساس تشکیل مالون دی‌آلدئید حاصل از پراکسیداسیون لیپیدهای غشا با تیوباریتوریک اسید (TBA) انجام شد (Coronel et al., 2008). برای تعیین میزان فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز از روش Bradford (۱۹۷۶) و دستگاه اسپکتروفتومتر یونیکو مدل UV2100 ساخت آمریکا استفاده گردید. برای تعیین وزن هد خوراکی این بخش از سبزی از برگ‌های پوشاننده کف هد جداسازی و با ترازو توزین و براساس گرم در بوته بیان گردید.

تجزیه آماری طرح با نرم‌افزار SAS (Version 9.3) انجام شد و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد صورت گرفت و جداول مورد نظر ترسیم شدند.

نتایج و بحث

این پژوهش در سال ۱۴۰۰ به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با ۱۸ تیمار، سه تکرار اصلی و مجموعاً ۵۴ واحد آزمایشی و دارابودن ده گلدان در هر واحد آزمایش، در گلخانه شهرک سلامت خاتم واقع در جنوب غربی شهرک پردیسان قم با موقعیت جغرافیایی ۳۴ درجه شمالی و طول ۵۰ درجه شرقی با ارتفاع ۱۰۵۴ متر از سطح دریا انجام شد. تیمارهای مورد استفاده در این پژوهش شامل؛ سه سطح ملاتونین، سه سطح سولفات پتاسیم و دو سطح تنش آبی بودند. بستر کشت مورد استفاده ترکیبی از کوکوپیت، خاک مرغوب باغچه و پیت‌ماس با نسبت‌های ۳:۱:۲ که کوکوپیت را به مدت ۲۴ ساعت قبل از اختلاط مرطوب کرده و پس از آبکشی به ترکیب بالا اضافه نمودیم. این ترکیب بستر کشت و نسبت‌های بین اجزای آن در همه مراحل کشت استفاده گردید و یکسان بود. بذور کلم بروکلی رقم آگاسی خریداری‌شده از شرکت سپاهان رویش درون سینی‌های کشت حاوی بستر ترکیبی مذکور، در تاریخ ۱۴۰۰/۰۷/۲۵ کشت شدند. میانگین دمای گلخانه در روز ۲۸ و در شب ۱۲ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۸۰ درصد بود و برای حفظ رطوبت در هنگام شب با استفاده از گونی روی سینی‌های کشت کاور ایجاد شد. در تاریخ ۱۴۰۰/۰۸/۰۱ بذرها جوانه زده و برای حفظ بهتر نشاهای بروکلی میانگین دمای روزانه گلخانه بین ۲۴ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد. در مرحله‌ای که نشاها دارای سه برگ حقیقی بودند تغذیه با محلول هوگلند استاندارد انجام شد. ۳۵ روز پس از جوانه‌زنی، گیاهچه‌ها از سینی‌های کشت به گلدان‌های با قطر دهانه ۳۸ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر منتقل شدند و پس از استقرار گیاهچه‌ها در گلدان جدید، بلافاصله با استفاده از محلول استاندارد هوگلند در طی دو مرحله و به فاصله هر پانزده روز یکبار تغذیه تکرار شد. در چهل و پنجمین روز پس از جوانه‌زنی محلول‌پاشی گیاهان با تیمارهای ملاتونین (صفر، ۱۵۰ و ۳۰۰ میکرومولار) و سولفات پتاسیم (صفر، ۲ و ۵ میلی‌مولار در لیتر) آغاز و یک هفته پس از تیمار، سطح تنش کم‌آبی (۵۰ درصد ظرفیت مزرعه) روی گیاهان اعمال شد. مدت زمان اعمال تنش و برقراری سطوح آبیاری به صورت ۵۰

جدول ۱- تجزیه واریانس صفات مطالعه شده کلم بروکلی

میانگین مربعات						درجه آزادی	منابع تغییرات
کلروفیل b	کلروفیل a	عملکرد هد	سطح برگ	نشت یونی	رطوبت نسبی برگ		
۴۵/۲۱**	۱۲۹/۶۷**	۳۷۶۵۱/۶**	۲۱۶۸۸/۰۸**	۴۷۹۹/۶۸**	۵۴۸۶/۳۴	۱	شرایط آبیاری
۱۲۱/۲۶**	۱۶۸/۹۶**	۲۰۱۵۴/۴**	۲۷۹۸/۸۲**	۲۹۷/۳۷**	۶۶/۹۴ ns	۲	ملاتونین
۴۱/۵۹**	۱/۷۵ ns	۴۰۱۲۳/۵*	۷۲۱/۸۸ ns	۴۳/۱۱**	۶/۸۹ ns	۲	سولفات پتاسیم
۲۷/۸۲**	۴۲/۸۴**	۱۱۱۵۱/۵ ns	۴۴۴/۵۳*	۲۳۶/۹۷**	۱۵۶/۷۷*	۲	آبیاری × ملاتونین
۵/۰۸ ns	۱/۴۰ ns	۴۴۳۱۲/۹ ns	۹۹/۱۳ ns	۱۵/۸۵*	۱۹/۱۳ ns	۲	آبیاری × سولفات پتاسیم
۱۷/۹۰**	۵/۷۸**	۲۶۷۱۲/۳*	۸۱/۰۳ ns	۱۲/۱۱*	۱۷/۵۰ ns	۴	ملاتونین × سولفات پتاسیم
۱۱/۶۵**	۶/۶۰**	۵۴۷۱۱**	۳۱۲/۴۱ ns	۱۲/۷۸*	۲۳/۳۹ ns	۴	آبیاری × ملاتونین × سولفات پتاسیم
۱/۳۰	۱/۰۹	۱۰/۲۴	۷/۷۹	۳/۹۸	۱۵/۷۵	۳۶	خطا
۱۵/۳۱	۹/۱۰	۵/۸۹	۷/۹۵	۷/۵۶	۸/۱۶	-	ضریب تغییرات

ns, * و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

ادامه جدول ۱-

میانگین مربعات						درجه آزادی	منابع تغییرات
کاتالاز	پراکسیداز	پرولین	مالون دی آلدئید	نیترات هد	نیترات ردوکتاز		
۸/۸۹**	۸۳/۴۳**	۱۶/۵۲**	۷/۲۰**	۴۷۵۶۰/۱۷۷**	۰/۰۰۳۱*	۱	شرایط آبیاری
۱۰/۳۹**	۰/۵۷ ns	۲/۱۷**	۱/۸۰**	۶۷۵/۵۲**	۰/۰۰۰۴۱*	۲	ملاتونین
۰/۵۰ ns	۲/۸۵**	۰/۲۰**	۰/۰۳ ns	۳۲۱۴/۳۵**	۰/۰۰۰۵۲ ns	۲	سولفات پتاسیم
۲/۲۲**	۱۸/۲۴**	۲/۳۲**	۱/۹۷**	۴۱۷۶/۹۸*	۰/۰۰۰۲۴*	۲	آبیاری × ملاتونین
۰/۰۰۴ ns	۳/۲۸**	۰/۱۵**	۰/۰۰۲ ns	۸۷۶۱۲/۱۷*	۰/۰۰۷۱**	۲	آبیاری × سولفات پتاسیم
۰/۰۰۰۸ ns	۰/۴۴ ns	۰/۰۹**	۰/۰۱۰ ns	۶۵۱۹/۱۱*	۰/۰۰۳۵*	۴	ملاتونین × سولفات پتاسیم
۰/۰۰۳ ns	۰/۸۲*	۰/۰۶*	۰/۰۰۱ ns	۷۲۱۴/۰۹*	۰/۰۰۶۲*	۴	آبیاری × ملاتونین × سولفات پتاسیم
۰/۰۰۵	۰/۲۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۱۲۳/۲۷	۰/۰۰۰۰۷	۳۶	خطا
۵/۸۰	۹/۱۰	۱۲/۹۶	۲/۳۴	۱۱/۳۶	۱/۷۷	-	ضریب تغییرات

ns, * و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

عدم کاربرد ملاتونین مشاهده گردید، هر چند که اختلاف معنی داری بین سه غلظت ملاتونین وجود نداشت و کمترین مقدار رطوبت نسبی در تیمار عدم کاربرد ملاتونین و سطح کم آبیاری (۵۰ درصد ظرفیت مزرعه) حاصل شد (جدول ۲). در شرایط تنش کم آبیاری در ظرفیت زراعی ۵۰ درصد در این

رطوبت نسبی برگ: براساس نتایج تجزیه واریانس، اثر متقابل شرایط آبیاری و ملاتونین بر رطوبت نسبی برگ در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار گردید (جدول ۱). طبق نتایج مقایسه میانگین، بررسی اثر متقابل آبیاری و غلظت‌های ملاتونین نشان داد که بیشترین رطوبت نسبی در آبیاری شاهد و

جدول ۲- اثر متقابل سطوح آبیاری و غلظت‌های مختلف ملاتونین بر برخی خصوصیات کلم بروکلی

تیمارها	رطوبت نسبی برگ (درصد)	سطح برگ (سانتی متر مربع)	کاتالاز (واحد بر میلی گرم پروتئین)	مالون دی آلدئید (میکرومولار بر گرم وزن تازه)
ملاتونین (میکرومولار)	۹۳/۸۲ ^a	۱۷۸/۸۲ ^c	۳/۰۹ ^e	۰/۵۲ ^d
٪۱۰۰	۹۳/۲۰ ^a	۱۹۹/۲۰ ^b	۳/۷۴ ^d	۰/۳۴ ^e
۳۰۰	۹۱/۷۲ ^a	۲۴۳/۷۲ ^a	۴/۲۱ ^c	۰/۶۳ ^e
۰	۶۷/۶۶ ^c	۱۱۴/۶۶ ^f	۳۳/۳ ^e	۱/۹۵ ^a
٪۵۰	۷۳/۲۳ ^{bc}	۱۳۳/۲۳ ^e	۵/۳۴ ^a	۰/۹۴ ^b
۳۰۰	۷۷/۳۶ ^b	۱۳۷/۴۵ ^d	۴/۸۲ ^b	۰/۷۸ ^c

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک از نظر آماری در سطح احتمال ۵ درصد آزمون دانکن فاقد اختلاف معنی‌دار هستند.

پتاسیم تحت شرایط کم آبیاری شدید بوده است و کمترین نشت یونی در تیمارهای برهمکنش محلول‌پاشی با سولفات پتاسیم و ملاتونین (در همه غلظت‌های کاربردی این دو ترکیب) با آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه حاصل شده است (جدول ۳). در سطح تنش کم آبی ۵۰ درصد ظرفیت زراعی نیز کمترین نشت یونی در گیاهان تیمار شده با ملاتونین ۱۵۰ میکرومولار و سولفات پتاسیم ۲ میلی‌مولار بدست آمد. فعالیت آنتی‌اکسیدانی ملاتونین را به نقش آن در جاروب‌کنندگی مستقیم گونه‌های فعال اکسیژن و علاوه بر آن نیتروژن که به طور غیرمستقیم سبب تحریک و سنتز آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی می‌شود، می‌دانند و نیز از این جهت که باعث افزایش ظرفیت زنجیره انتقال الکترون در میتوکندری و در نتیجه کاهش تولید رادیکال‌های آزاد و کاهش نشت یونی می‌گردد، قابل توجه است (Liu et al., 2016).

سطح برگ: براساس نتایج تجزیه واریانس، اثر متقابل شرایط آبیاری و ملاتونین در سطح احتمال ۵ درصد بر سطح برگ کلم بروکلی معنی‌دار گردید (جدول ۱). طبق جدول مقایسه میانگین، بیشترین سطح برگ در شرایط آبیاری شاهد (۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه) و با کاربرد ملاتونین ۳۰۰ میکرومولار و کمترین سطح برگ در شرایط کم آبیاری (۵۰ درصد ظرفیت مزرعه) و بدون کاربرد ملاتونین اندازه‌گیری شد (جدول ۲). با بررسی گیاهان تحت تنش کم آبیاری با ظرفیت

تحقیق، رطوبت نسبی برگ در گیاهان تحت تیمار ۳۰۰ میکرو-مولار ملاتونین بهتر حفظ گردید. گزارش شده است که در شرایط تنش خشکی محلول‌پاشی برگ‌گی ذرت با غلظت‌های مختلف ملاتونین باعث افزایش سرعت خالص فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای و افزایش همزمان محتوای نسبی آب برگ شده که متابولیسم گیاه افزایش یافته و گیاه شرایط تنش را بهتر تحمل می‌کند (Ahmad et al., 2019). محققان در پژوهشی اظهار داشتند که محلول‌پاشی تیمار ۵ میلی‌مولار پتاسیم باعث افزایش محتوای آب نسبی برگ اسفناج و کارایی استفاده از آب در شرایط تنش شوری در مقایسه با تیمار شوری فاقد کاربرد تیمار پتاسیم در این گیاه شده است اما در شرایط این مطالعه غلظت ۵ میلی‌مولار سولفات پتاسیم نتوانسته اثر معنی‌داری بر رطوبت نسبی برگ اعمال کند. کاهش جذب مواد و عناصر غذایی در شرایط کمبود آب، رشد و توسعه برگ‌ها را محدود می‌کند (Kaya and Doganlar, 2019). افزایش میزان رطوبت نسبی برگ در سطوح مختلف تنش شوری با کاربرد ملاتونین در گیاه استویا گزارش شد (نورمحمدی و همکاران، ۱۴۰۰).

نشت یونی: براساس نتایج جدول تجزیه واریانس اثر برهمکنش تیمارهای شرایط آبیاری، ملاتونین و سولفات پتاسیم بر نشت یونی در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شده است (جدول ۱). طبق نتایج مقایسه میانگین‌ها، بیشترین میزان نشت یونی (۵۱/۲٪) در تیمار عدم کاربرد ملاتونین و سولفات

جدول ۴- اثر متقابل سطوح آبیاری و غلظت‌های مختلف ملاتونین و سولفات پتاسیم بر خصوصیات فیزیولوژیکی و عملکرد کلم بروکلی

نیترات ردوکتاز	نیترات هد	پرولین	پراکسیداز	عملکرد هد	نشت یونی	کلروفیل b	کلروفیل a	تیمارها		سطوح آبیاری (درصد)
								سولفات پتاسیم (میلی مولار)	ملاتونین (میکرومولار)	
۰/۰۵ ^d	۳۸۸/۲ ^b	۰/۴۶ ^g	۲/۰۲ ⁱ	۱۹۴/۶ ^d	۱۸/۲ ^e	۴/۱۳ ^{ij}	۸/۰۶ ^{fgh}	۰	۰	٪۱۰۰
۰/۰۶ ^{cd}	۳۳۶/۴۱ ^c	۰/۴۲ ^g	۲/۲۲ ⁱ	۲۱۱/۴ ^c	۱۶/۴۲ ^e	۵/۰۳ ^{hij}	۸/۲۵ ^{fg}	۲	۰	
۰/۰۵ ^d	۳۷۱/۸۳ ^d	۰/۳۸ ^g	۲/۱۸ ⁱ	۲۱۷/۱ ^c	۱۷/۷۳ ^e	۴/۷۲ ^{ij}	۹/۰۶ ^{fg}	۵	۰	
۰/۸۲ ^b	۲۹۷/۶۱ ^e	۰/۳۶ ^g	۳/۸۷ ^{fgh}	۲۵۳/۴ ^b	۱۷/۶۳ ^e	۹/۳۶ ^{bcd}	۱۵/۷۷ ^{bc}	۰	۱۵۰	
۰/۸۰ ^{ab}	۲۷۴/۱۷ ^{ef}	۰/۳۷ ^g	۳/۶۰ ^{gh}	۲۴۸/۳ ^{bc}	۱۷/۱۱ ^e	۸/۹۹ ^{cde}	۱۴/۱۵ ^{cde}	۲	۰	
۰/۹۸ ^a	۲۱۶/۰۳ ^g	۰/۳۹ ^g	۳/۶۵ ^{gh}	۲۵۷/۴ ^b	۱۶/۰۰ ^e	۱۶/۴۹ ^a	۸۰/۶۰ ^a	۵	۰	
۱/۰۰ ^a	۱۷۷/۰۱ ⁱ	۰/۴۶ ^g	۳/۴۰ ^h	۳۰۶/۸ ^{ab}	۱۷/۰۱ ^e	۸/۵۵ ^{def}	۱۴/۴۵ ^{bcd}	۰	۳۰۰	
۱/۰۱ ^a	۱۷۹/۲۷ ⁱ	۰/۴۲ ^g	۳/۵۴ ^h	۳۰۹/۳ ^{ab}	۱۶/۲۳ ^e	۱۰/۸۲ ^{bc}	۱۶/۱۶ ^b	۲	۰	
۱/۱۰ ^a	۱۲۳/۱۰ ^j	۰/۴۳ ^g	۳/۶۷ ^{gh}	۳۲۶/۵ ^a	۱۶/۱۰ ^e	۷/۳۲ ^{ef}	۱۲/۷۶ ^{de}	۵	۰	
فاقد هد	فاقد هد	۲/۷۳ ^a	۸/۷۱ ^a	۰ ^h	۵۱/۲ ^a	۳/۲۸ ^j	۶/۴۳ ^h	۰	۰	٪۵۰
فاقد هد	فاقد هد	۲/۳۴ ^b	۶/۱۱ ^b	۰ ^h	۴۲/۴۲ ^b	۴/۳۷ ^{ij}	۸/۴۱ ^{fg}	۲	۰	
۰/۰۵ ^d	۳۱۷/۷۵ ^d	۱/۸۴ ^c	۶/۰۴ ^b	۸۷/۵ ^g	۴۱/۷۳ ^b	۵/۴۰ ^{ghi}	۷/۵۹ ^{gh}	۵	۰	
۰/۰۳ ^e	۴۸۸/۶۳ ^a	۱/۴۳ ^d	۵/۴۱ ^{bcd}	۱۱۸/۳ ^f	۳۴/۶۳ ^c	۵/۳۵ ^{ghi}	۹/۴۷ ^f	۰	۱۵۰	
۰/۰۴ ^e	۴۱۷/۱۶ ^a	۱/۲۸ ^d	۵/۰۲ ^{cde}	۱۲۹/۹ ^f	۳۰/۱۱ ^d	۵/۴۰ ^{ghi}	۹/۷۸ ^f	۲	۰	
۰/۰۶ ^{cd}	۲۳۲/۳۲ ^d	۱/۳۵ ^d	۴/۷۲ ^{cd}	۱۲۲/۶ ^f	۳۱/۰۰ ^{cd}	۱۰/۰۰ ^{bcd}	۹/۳۵ ^f	۵	۰	
۰/۷۰ ^b	۲۷۹/۲۴ ^{ef}	۱/۰۶ ^e	۵/۵۶ ^{bc}	۱۲۴/۵ ^f	۳۱/۰۱ ^{cd}	۷/۰۹ ^{fg}	۱۲/۵۴ ^e	۰	۳۰۰	
۰/۸۰ ^{ab}	۲۴۷/۰۱ ^f	۰/۸۲ ^f	۴/۶۳ ^{ef}	۱۳۸/۷ ^e	۳۱/۲۳ ^{cd}	۶/۸۸ ^{fgh}	۱۲/۹۴ ^{de}	۲	۰	
۰/۹۰ ^{ab}	۲۳۶/۲۳ ^{fg}	۰/۸۸ ^{ef}	۴/۳۴ ^{efg}	۱۴۳/۴ ^e	۳۱/۱۰ ^{cd}	۱۱/۱۶ ^b	۱۲/۸۳ ^{de}	۵	۰	

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک از نظر آماری در سطح احتمال ۵ درصد آزمون دانکن فاقد اختلاف معنی‌دار هستند.

کلروفیل a و b (میلی‌گرم بر گرم وزن تازه)، نشت یونی (درصد)، عملکرد هد (گرم بر مترمربع)، پراکسیداز (واحد بر میلی‌گرم پروتئین)، پرولین (میکرومولار بر گرم وزن تازه)، نیترات هد (میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن تر)، نیترات ردوکتاز (میلی‌مولار دی‌اکسید نیتر و بر گرم وزن تر)

کاسته شد (Atif et al., 2013). ملاتونین علاوه بر عملکرد به صورت یک آنتی‌اکسیدان قوی، در فرآیندهایی مانند جوانه‌زنی، نمو و توسعه ریشه و اندام هوایی، افزایش سطح برگ و وزن تر در نتیجه افزایش کیفیت و کمیت محصولات دخالت دارد (Zhang et al., 2015). در گزارشی آمده است که در گیاه سویا تحت تنش شوری، سطح برگ و ارتفاع بوته با کاربرد ملاتونین افزایش یافته است (Zhang et al., 2018).

عملکرد هد (گل آذین) خوراکی: طبق نتایج اثرات متقابل سه تیمار شرایط آبیاری، ملاتونین و سولفات پتاسیم بر عملکرد

زراعی ۵۰ درصد مشخص شد که بیشترین حفظ سطح برگ در گیاهان بروکلی تیمار شده با ملاتونین ۳۰۰ میکرومولار بدست آمد (جدول ۲). کاهش سطح برگ نیز به کاهش از دست رفتن آب از طریق تعرق منجر می‌شود که به عنوان اولین مکانیسم دفاعی گیاه در برابر خشکی در نظر گرفته می‌شود. کاهش گسترش برگ در شرایط کمبود آب برای گیاه مفید است زیرا یک مکانیسم اجتناب از تنش است (Mahajan and Tuteja, 2005). در گل جعفری (*Tagetes erecta* L.) تحت شرایط تنش خشکی، از سطح برگ و وزن خشک اندام‌های هوایی

سطوح آن‌ها زمانی افزایش می‌یابد که کارایی دستگاه به دلیل استرس یا افزایش سن شروع به از بین رفتن می‌کند و منجر به ناتوانی در جذب انرژی نور اضافی می‌شود (Szafranska et al., 2017).

کلروفیل a: براساس جدول تجزیه واریانس اثر برهمکنش تیمارهای شرایط آبیاری، ملاتونین و سولفات پتاسیم بر پارامتر کلروفیل a برگ کلم بروکلی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شده است (جدول ۱). بیشترین میزان کلروفیل در تیمار توأم سولفات پتاسیم ۵ میلی‌مولار + ملاتونین ۱۵۰ میکرومولار + شرایط آبیاری شاهد (۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه) بدست آمد و کمترین مقدار کلروفیل در برهمکنش سولفات پتاسیم و ملاتونین صفر تحت شرایط کم آبیاری شدید (۵۰ درصد ظرفیت مزرعه) حاصل شد. همان‌گونه که نتایج نشان داده است در آبیاری شاهد (۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه) همراه با کاربرد ملاتونین ۱۵۰ میکرومولار و سولفات پتاسیم ۵ میلی‌مولار حفظ کلروفیل‌های a و b بهتر صورت گرفت (جدول ۳). علاوه بر این، شرایط تنش کم آبی باعث تجزیه کلروفیل گردیده و گلوتامات که پیش‌ماده کلروفیل و پرولین است در اثر این تنش به پرولین تبدیل شده و در نتیجه از محتوای کلروفیل کاسته می‌شود (Lawlor and Cornic, 2002). نتایج آزمایشی دیگر حاکی از این بود که محلول‌پاشی با سولفات پتاسیم در سه رقم زیتون سبب افزایش میزان کلروفیل برگ در همه رقم‌ها گردیده است (Zivdar et al., 2016).

کلروفیل b: براساس نتایج بدست آمده از جدول تجزیه واریانس برهمکنش تیمارهای شرایط کم آبیاری، ملاتونین و سولفات پتاسیم بر صفت کلروفیل b در کلم بروکلی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شده است (جدول ۱). طبق بررسی نتایج مقایسه میانگین‌ها، بیشترین میزان کلروفیل b در تیمار توأم سولفات پتاسیم ۵ میلی‌مولار + ملاتونین ۱۵۰ میکرومولار + شرایط کم آبیاری شاهد (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) بدست آمد و کمترین میزان کلروفیل b برگ در تیمار برهمکنش سولفات پتاسیم و ملاتونین صفر تحت شرایط تنش کم آبیاری شدید حاصل شده است (جدول ۳). از سویی دیگر محققان به

هد خوراکی بروکلی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شده است (جدول ۱). طبق نتایج مقایسه میانگین‌ها، بیشترین عملکرد هد در گیاهان تحت تیمار سولفات پتاسیم ۵ میلی‌مولار + ملاتونین ۳۰۰ میکرومولار + آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی بدست آمد، در حالیکه در تیمار گیاهان تحت تنش کم آبی ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه و بدون کاربرد ملاتونین و سولفات پتاسیم صفر و ۲ میلی‌مولار محصول خوراکی به صورت هد بروکلی تشکیل نشد (جدول ۳). نتایج آزمایش دیگری حاکی از این بود که محلول‌پاشی با سولفات پتاسیم در سه رقم زیتون سبب افزایش میزان کلروفیل برگ در همه رقم‌ها گردید (Zivdar et al., 2016). هم‌چنین کاربرد ملاتونین روی خیار و درختان یک ساله سیب در شرایط تنش خشکی، با به تأخیر انداختن پیری برگ از تجزیه کلروفیل جلوگیری به عمل آورد و در نتیجه سبب بهبود کارایی فتوسنتز II، افزایش هدایت روزنه‌ای و در نتیجه افزایش انتشار CO₂ به داخل گیاه و حفظ ظرفیت بالای اسیمیلاسیون CO₂ و تولید ماده خشک و عملکرد گردیده است (Wang and Janas, 2012). از طرفی دیگر ملاتونین ممکن است باعث بهبود رشد کلی گیاه و حفظ تعداد برگ در شرایط تنش شود و از این طریق وزن خشک گیاه نیز تحت شرایط تنش بهتر حفظ می‌شود (Wang et al., 2016). افزایش میزان پتاسیم سبب افزایش میزان تثبیت دی‌اکسید کربن می‌گردد، بنابراین مقدار فتوسنتز و تولید کربوهیدرات در برگ‌ها افزایش می‌یابد (یداللهی فارسانی و همکاران، ۱۴۰۰). در گزارشی دیگر کاربرد سولفات پتاسیم سبب افزایش وزن تر ساقه، سطح برگ و میزان محصول در سه رقم توت‌فرنگی شد (Tohidloo et al., 2018). نقش مثبت پتاسیم را در تعدیل و تقلیل اثرات خشکی، به افزایش تولید ماده خشک و انتقال آن به قسمت‌های رویشی نسبت می‌دهند که در نهایت سبب کاهش از دست رفتن عملکرد در اثر تنش خشکی می‌شود (Abid et al., 2016). هم‌چنین مشخص شده است که ملاتونین عملکرد و کارایی دستگاه فتوسنتزی را در گونه‌های مختلف بهبود می‌بخشد. گزارش شده است که این مکانیزم عمدتاً از طریق خاموش کردن گونه‌های ROS اضافی رخ می‌دهد، که

پتاسیم و ملاتونین و در سطح آبیاری شاهد (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) بدست آمد (جدول ۳). نتایج تحقیقی دیگر در چای نیز نشان می‌دهد که ملاتونین باعث افزایش رشد گیاه در شرایط تنش خشکی می‌شود. در این مطالعه استفاده از ملاتونین در خاک و تماس ریشه با آن، به طرز چشمگیری فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز را افزایش داد که برای حذف گونه‌های مخرب اکسیژن مفید بود (Li et al., 2018b). از نظر مکانیکی، ملاتونین قادر است تا ۱۰ واحد از گونه‌های مخرب اکسیژن را خاموش نماید بدون اینکه نیازمند مکانسیم بازیافت باشد (Rodriguez-Naranjo et al., 2012).

پرولین: براساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس، اثر برهمکنش تیمارهای شرایط آبیاری، ملاتونین و سولفات پتاسیم بر میزان پرولین در برگ بروکلی در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شده است (جدول ۲). طبق بررسی نتایج مقایسه میانگین‌ها، بیشترین مقدار پرولین (۲/۷۳) میکروگرم در گرم وزن تر) در تیمار برهمکنش شاهد سولفات پتاسیم و ملاتونین تحت شرایط کم آبیاری شدید (۵۰ درصد ظرفیت مزرعه) بوده است و کمترین میزان پرولین در تیمارهای برهمکنش با شاهد آبیاری (۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه) حاصل شده است (جدول ۴). در شرایط تنش کم آبی، خشکی باعث تجزیه کلروفیل گردیده و گلوتامات که پیش‌ماده کلروفیل و پرولین است در اثر این تنش به پرولین تبدیل شده و در نتیجه از محتوای کلروفیل کاسته و بر محتوای پرولین افزوده می‌شود (Lawlor and Cornic, 2002).

مالون دی‌آلدئید: براساس نتایج جدول تجزیه واریانس، اثرات اصلی شرایط آبیاری، ملاتونین و برهمکنش شرایط آبیاری و ملاتونین بر مالون دی‌آلدئید کلم بروکلی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین برهمکنش شرایط آبیاری و ملاتونین نشان داد که بیشترین میزان مالون دی‌آلدئید در تیمار برهمکنش ملاتونین صفر و کم آبیاری شدید (۵۰ درصد ظرفیت مزرعه) مشاهده شد و کمترین میزان مالون دی‌آلدئید مربوط به تیمار برهمکنش ملاتونین ۱۵۰ میکرومولار تحت شرایط آبیاری شاهد (۱۰۰

این نتیجه رسیدند که به دنبال تنش خشکی و شرایط ایجاد شده آناتومی برگ تغییر یافته و برگ‌های گیاه کوچک‌تر و ضخیم‌تر می‌شوند که در نتیجه غلظت کلروفیل‌ها به ویژه کلروفیل b در واحد سطح برگ بیشتر می‌شود (Lawlor and Cornic, 2002).

کاتالاز: براساس نتایج تجزیه واریانس اثرات اصلی شرایط آبیاری، ملاتونین، سولفات پتاسیم و برهمکنش شرایط آبیاری و ملاتونین بر فعالیت کاتالاز برگ کلم بروکلی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین برهمکنش شرایط آبیاری و ملاتونین نشان داد که بیشترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاهان تحت تیمار توام ملاتونین ۱۵۰ میکرومولار و سطح کم آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی حاصل شد (جدول ۳). ملاتونین به عنوان یک آنتی‌اکسیدان با طیف گسترده و پاکسازی‌کننده رادیکال‌های آزاد اکسیژن در نظر گرفته می‌شود و از این رو ممکن است مستقیماً هنگام تولید در شرایط تنش، ROS را از بین ببرد (Ahmad et al., 2019). در این مطالعه، بیشترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در تیمار تنش کم آبی و کمترین مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز در تیمار آبیاری نرمال بدست آمد. بنابراین به منظور خنثی کردن اثرات رادیکال‌های آزاد اکسیژن و پایداری غشا، میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاه افزایش یافته است. هم‌چنین در تعداد قابل توجهی از مطالعات نشان داده شده است که ملاتونین چرخه گلوکوتایون آسکوربات را تنظیم می‌کند و در شرایط تنش فعالیت اغلب آنزیم‌ها از جمله؛ سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز را افزایش می‌دهد (Szafranska et al., 2017).

پراکسیداز: براساس نتایج جدول تجزیه واریانس اثر برهمکنش تیمارهای شرایط آبیاری، ملاتونین و سولفات پتاسیم بر فعالیت آنزیم پراکسیداز کلم بروکلی در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شده است (جدول ۲). طبق نتایج مقایسه میانگین‌ها، بیشترین فعالیت آنزیم پراکسیداز در تیمار برهمکنش سولفات پتاسیم صفر و ملاتونین صفر و تحت شرایط کم آبیاری (۵۰ درصد ظرفیت مزرعه) حاصل شده است و کمترین فعالیت آن در تیمار بدون کاربرد سولفات

اما نقش سولفات پتاسیم هم بی‌تأثیر نبوده و اثرات متقابل این دو ترکیب از طریق بهبود فعالیت و عملکرد آنزیم نیترات ردوکتاز در کاهش تجمع نیترات در بخش خوراکی بروکلی به چشم می‌خورد. احتمالاً وجود گروه‌های آمین در ساختمان ملاتونین اثری شبیه به اسیدآمینه‌ها و پلی‌آمین‌ها را در تخفیف تجمع نیترات در محصولات کشاورزی القا می‌نماید. از همین رو، محلول‌پاشی اسیدهای آمینه با تأثیر بر فعالیت آنزیم‌های نیترات ردوکتاز و گلوتامین سنتتاز در آسیمیلایسون نیترات، تجمع نیترات در برگ‌های تربچه را کاهش داد اما بر غلظت نیترات غده تأثیر معنی‌دار نداشت (حسینی و نورزاده، ۱۳۹۵). جهت کاهش تجمع نیترات به ویژه در سبزی‌های مستعد، استفاده از یک برنامه تغذیه‌ای دقیق و مطابق با نیاز گیاه، استفاده از مواد آلی کمپوست‌شده، کودهای زیستی، تقسیط کودهای حاوی نیتروژنی در طی دوره رشد فعال گیاه صورت گیرد.

نیترات ردوکتاز: نتایج نشان داد که برهمکنش بین شرایط آبیاری، ملاتونین و سولفات پتاسیم بر فعالیت نیترات ردوکتاز هد بروکلی در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شده است (جدول ۲). طبق نتایج مقایسه میانگین‌ها، کمترین فعالیت این آنزیم در گیاهان تحت تیمار برهمکنش سولفات پتاسیم صفر و ۲ میلی‌مولار + ملاتونین صفر میکرومولار + سطح آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه برآورد شده و بیشترین فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز در هدهای تحت تیمار سولفات پتاسیم ۵ میلی‌مولار + ملاتونین ۳۰۰ میکرومولار و آبیاری معمول با ظرفیت زراعی ۱۰۰ درصد بدست آمد و پس از آن بیشترین میزان فعالیت آن در گیاهان تحت تیمار توأم سولفات پتاسیم صفر و ۲ میلی‌مولار + ملاتونین ۳۰۰ میکرومولار + آبیاری معمول با ظرفیت زراعی ۱۰۰ درصد حاصل شد (جدول ۴). محتمل است که گروه‌های آمین ملاتونین به مثابه نیترات به عنوان سوسترای اولیه فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز عمل نموده و موجب تقویت و بهبود عملکرد این آنزیم در شرایط این آزمایش گردیده است. فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز، به عنوان یک عامل ژنتیکی و اولین آنزیم مؤثر در متابولیسم و احیا یون نیترات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از این رو

درصد ظرفیت زراعی) بود. در سطح تنش کم‌آبی این آزمایش، کمترین میزان مالون دی‌آلدئید برگ‌ها در گیاهان تیمار شده با ملاتونین ۳۰۰ میکرومولار اندازه‌گیری شد (جدول ۳). یکی از تأثیرات مهم تنش خشکی بر روند فیزیولوژیکی فتوسنتز است. در ارتباط با معنی‌دار شدن اثر برهمکنش سطوح آبیاری، محلول‌پاشی ملاتونین و سولفات پتاسیم بر میزان مالون دی‌آلدئید و نشت یونی حاصل از تجمع آن، نتایج مطالعات مشابه این تحقیق هم نشان می‌دهد که محتوای مالون دی‌آلدئید در برگ گیاهان سورگوم تحت تنش خشکی نسبت به گیاهان شاهد افزایش زیادی نشان داد، اما استفاده از تیمار ملاتونین منجر به کاهش محتوای مالون دی‌آلدئید شد (Kaya and Doganlar, 2019). هم‌چنین تأثیر نامطلوب مالون دی‌آلدئید و پراکسیداسیون لیپیدها از طریق تولید گونه‌های مخرب اکسیژن که منجر به آسیب سلول و افزایش نشت الکترولیت می‌شود را به حداقل می‌رساند و باعث تحمل گیاه در برابر تنش خشکی می‌شود (Naghizadeh et al., 2019).

نیترات هد: نتایج نشان داد که برهمکنش بین شرایط آبیاری، ملاتونین و سولفات پتاسیم بر میزان تجمع نیترات در هد بروکلی در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شده است (جدول ۲). طبق نتایج مقایسه میانگین‌ها، بیشترین تجمع نیترات در برهمکنش شرایط ۵۰ درصد ظرفیت زراعی تحت تیمار ملاتونین ۱۵۰ میکرومولار و سولفات پتاسیم صفر و ۲ میلی‌مولار رخ داد. این در حالی است که در سطح کم آبیاری براساس ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، بدون کاربرد ملاتونین و سولفات پتاسیم تشکیل هد خوراکی میسر نگردید. کمترین تجمع نیترات در شرایط آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، در هدهای تحت تیمار سولفات پتاسیم ۵ میلی‌مولار + ملاتونین ۳۰۰ میکرومولار بدست آمد (جدول ۴). نتیجه حاصل از کاربرد غلظت‌های ملاتونین ۳۰۰ میکرومولار و سولفات پتاسیم ۵ میلی‌مولار در هر دو شرایط آبیاری مورد استفاده در این تحقیق بیانگر این است که کمترین تجمع نیترات در گیاهان تحت این تیمارها رخ داده، به نظر می‌رسد اثر بزرگ و اصلی اگر چه شاید مربوط به کاربرد ترکیب زیستی ملاتونین است،

میلی مولار برای ارتقا سطح کیفی محصول و نیز تحمل شرایط احتمالی تنش‌زا در اقلیم‌ها و رژیم‌های کم آب و معمول توصیه می‌گردد.

یون نیترات در حضور این آنزیم، به یون آمونیوم تبدیل شده و بدین طریق از تجمع نیترات در بافت گیاهی کاسته می‌شود (Campbell, 1999).

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از جناب آقای دکتر مخبر مدیر عامل محترم شرکت مادر تخصصی نسیم سلامت پاسارگاد و شرکت نسیم سلامت خاتم برای حمایت و پشتیبانی ایشان که با در اختیار گذاشتن امکانات گلخانه و نیز نیروی انسانی کمک شایانی در اجرا و پیشبرد این پژوهش داشتند، کمال سپاسگزاری را دارند.

نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه غلظت‌های ۳۰۰ و ۱۵۰ میکرومولار ملاتونین در هر دو سطح آبیاری مورد تحقیق در این آزمایش بر اکثر صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی کلم بروکلی تأثیر مطلوب داشته و موجب حفظ بهتر پارامترهای عملکرد و تعدیل شرایط تنش کم آبیاری در این گیاه شده و در عین حال موجبات تجمع کمتر نیترات در بخش خوراکی این سبزی ارزشمند گردیده است، بنابراین کاربرد این ترکیب و نیز به صورت کاربرد تلفیقی آن با سولفات پتاسیم به خصوص در غلظت ۵

منابع

- حسینی، اکبر، و نورزاده حداد، مهدی (۱۳۹۵). تأثیر نیترات آمونیوم و اسیدهای آمینه آزاد بر تجمع نیترات در تربچه قرمز. *فصلنامه دانش آب و خاک*، ۲۶ (۴)، ۶۷-۷۸.
- داوری‌نژاد، غلامحسین، شیربانی، سمیه، و زراعی، مهدی (۱۳۹۴). اثر رژیم‌های کم آبیاری روی برخی از خصوصیات مورفوفیزیولوژیکی چهار رقم انجیر. *نشریه علوم باغبانی*، ۲۹ (۴)، ۵۱۷-۵۰۱. <https://doi.org/10.22067/jhorts4.v29i4.51520>
- عزیزی، فاطمه، امیری، حمزه، و اسماعیلی، احمد (۱۳۹۸). اثر ملاتونین بر برخی ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی گیاه لوبیا رقم صدری تحت تنش شوری. *مجله پژوهش‌های گیاهی*، ۳۲ (۲)، ۶۴۸-۶۳۶. <https://dori.net/dor/20.1001.1.23832592.1398.32.3.20.7>
- قاسم‌زاده گنجه‌ای، محمد (۱۳۸۹). اثرات کلرور پتاسیم بر تحمل به خشکی ژنوتیپ‌های گندم دوروم در نیشابور. *فصلنامه علمی اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی*، ۲ (۲)، ۱۲۸-۱۱۹. <https://sid.ir/paper/176452/fa>
- نورمحمدی، زهرا، اسماعیل‌پور، بهروز، آذر می، رسول، شیخ علیپور، مرتضی، چمنی، اسماعیل، و شهبازی یاجلو، رقیه (۱۴۰۰). بررسی اثر ملاتونین بر خصوصیات رشد، فیزیولوژی و بیوشیمیایی گیاه استویا تحت شرایط تنش شوری. *دو فصلنامه علمی پژوهشی علوم سبزی‌ها*، ۵ (۹)، ۱۷-۱. DOI: 10.22034/IUVS.2021.534020.1170
- یداللهی فارسانی، نیما، تدین، محمود رضا، و کریمی، مجتبی (۱۴۰۰). اثر محلول پاشی برگ پتاسیم و بور بر صفات کمی و کیفی چغندر قند تحت شرایط تنش خشکی. *نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی*، ۱۱ (۱)، ۱۳۶-۱۲۵. <http://dx.doi.org/10.47176/jcpp.11.1.209113>
- Abid, M., Tian, Z., Ata-Ul-Karim, S. T., Liu, Y., Cui, Y., Zahoor, R., Jiang, D., & Dai, T. (2016). Improved tolerance to post-anthesis drought stress by pre-drought priming at vegetative stages in drought tolerant and sensitive wheat cultivars. *Journal of Plant Physiology and Biochemistry*, 106, 218-227. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.05.003>.
- Ahmad, S., Kamran, M., Ding, R., Meng, X., Wang, H., Ahmad, I., & Han, Q. (2019). Exogenous melatonin confers drought stress by promoting plant growth, photosynthetic capacity and antioxidant defense system of maize seedlings. *Peer Journal*, 7, 77-93. doi: 10.7717/peerj.7793. eCollection.

- Alexander, J., Benford, D., Cockburn, A., Cravedi, J., Dogliotti, E., & Domenico, A. (2008). Nitrate in vegetables: Scientific opinion of the panel on contaminants in the food chain. *European Food Safety Authority Journal*, 689, 1-79. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2008.689>.
- Arbona, V., Manzi, M., Zandalinas, S., Vives Peris, V., Perez-Clemente, R. M., & GomezCadenas, A. (2017). Physiological, metabolic, and molecular responses of plants to abiotic stress. In: *Stress Signaling in Plants: Genomics and Proteomics Perspective*. Pp. 1-35. Springer, International Publishing. https://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-42183-4_1.
- Arnao, M. B., & Hernandez-Ruiz, J. (2014). Melatonin: Plant growth regulator and/or biostimulator during stress? *Trends in Plant Science*, 19(12), 789-797. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.07.006>.
- Atif, R., Adnan, Y., Asif, R. T., Asmat, K., Usman, T., Shoaib, M., & Sitwat, R. (2013). Effect of drought stress on growth and flowering of marigold (*Tagetes erecta* L.). *Pakistan Journal Botany*, 45(1), 123-131. <https://www.researchgate.net/publication/259484411>.
- Basak, F., & Biswas, D. (2009). Influence of potassium solubilizing microorganism (*Bacillus mucilaginosus*) and waste mica on potassium uptake dynamics by Sudan grass (*Sorghum vulgare* Pers.) grown under two Alfisols. *Journal of Plant and Soil*, 317, 235-255. doi: <https://10.1007/s11104-008-9805-z>.
- Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Journal of Plant and Soil*, 39, 205-207.
- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72, 248-254. doi: 10.1006/abio.1976.9999.
- Campbell, W. H. (1999). Nitrate reductase structure, function and regulation: Bridging the gap between biochemistry and physiology. *Annual Review of Plant Biology*, 50(1), 277-303. doi: 10.1146/annurev.arplant.50.1.277.
- Coronel, G., Chang, M., & Rodriguez-Delfin, A. (2008). Nitrate reductase activity and chlorophyll content in lettuce plants grown hydroponically and organically. In: *Proceedings of 3th International Symposium on Soilless Culture and Hydroponics*, 19-22 March, Cyprus, Lemesos. doi: 10.17660/ActaHortic.2009.843.16.
- Getachew, E., Abraham, E., & Melese, W. (2016). Growth response of (*Brassica oleracea*) to different planting date at jimma Sout Western Ethiopia. *International Journal of Research granthaalaya*, 110-118. doi: 10.29121/granthaalayah.v4.i6.2016.2644.
- Hefny, M. M. (2011). Agronomical and biochemical responses of white lupin (*Lupinus albus* L.) genotypes to contrasting water regimes and inoculation treatments. *Journal of American Science*, 7(3), 187-198. <https://doi.org/10.3390%2Fijms24032351>.
- Hu, W., Yang, J., Meng, Y., Wang, Y., Chen, B., Zhao, W., Oosterhuis, D. M., & Zhou, Z. (2015). Potassium the cotton (*Gossypium hirsutum* L.) boll and its relationship with boll biomass. Field application affects carbohydrate metabolism in the leaf subtending. *Journal of Crops Research*, 179, 120-131. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.04.017>Get rights and content.
- Kaya, A., & Doganlar, Z. B. (2019). Melatonin improves the multiple stress tolerance in pepper (*Capsicum annum*). *Scientia Horticulturae*, 12(4), 256-267. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.05.036>.
- Kumar, S., & Dey, P. (2011). Effects of different mulches and irrigation methods on root growth, nutrient uptake, water-use efficiency and yield of strawberry. *Scientia Horticulturae*, 127(3), 318-324. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.10.023>.
- Lawlor, D. W., & Cornic, G. (2002). Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant, Cell and Environment*, 25, 275-294. <https://dx.doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00814>.
- Li, J., Zeng, L., Cheng, Y., Lu, G., Fu, G., Ma, H., Liu, Q., Zhang, X., Zou, X., & Li, C. (2018a). Exogenous melatonin alleviates damage from drought stress in *Brassica napus* L. (rapeseed) seedlings. *Acta Physiologiae, Plantarum*, 12(5), 40-43. <https://doi.org/10.1007/s11738-017-2601-8>.
- Li, X., Wei, J. P., Scott, E. R., Liu, J. W., Guo, S., Li, Y., & Han, W. Y. (2018b). Exogenous melatonin alleviates cold stress by promoting antioxidant defense and redox homeostasis in *Camellia sinensis* L. *Journal of Molecules*, 23(1), 165-169. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00677>.
- Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148, 350-382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1).
- Liu, W., Zhang, Y., Yuan, X., Xuan, Y., & Yan, Y. (2016). Exogenous salicylic acid improves salinity tolerance of *Nitraria tangutorum*. *Russian Journal of Plant Physiology*, 63(1), 132-142. <https://doi.org/10.1134/S1021443716010118>.
- Mahajan, S., & Tuteja, N. (2005). Cold, salinity and drought stresses: An overview. *Journal of Biochemistry and Biophysical*, 444,139-158. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2005.10.018>.
- Malakouti, M. J., Ladan, Sh., & Tabatabaee, S. J. (2013). Content in the edible parts of vegetables: Origin, safety, toxicity limits and the prevalence of cancer in Iran. *International Publishing House*, 14(5), 93-122. (In Farsi)
- Naghizadeh, M., Kabiri, R., Hatami, A., Oloumi, H., Nasibi, F., & Tahmasei, Z. (2019). Exogenous application of

- melatonin mitigates the adverse effects of drought stress on morpho-physiological traits and secondary metabolites in Moldavian balm (*Dracocephalum moldavica*). *Journal of Physiology and Molecule Biology Plants*, 25(4), 881-894. (In Farsi) <https://doi.org/10.1007/s12298-019-00674-4>.
- Ritchie, S. W., & Nguyen, H. T. (1990). Leaf water content and gas exchange parameters of two wheat genotypes differing in drought resistance. *Journal of Crop Science*, 30, 105-111. <https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X003000010025x>.
- Rodriguez-Naranjo, M. I., Moya, M. L., Cantos-Villar, E., & Garcia-Parrilla, M. C. (2012). Comparative evaluation of the antioxidant activity of melatonin and related indoles. *Journal of Food Company*, 28, 16-22. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2012.07.001>.
- Rohbakhsh, H. (2013). Alleviating adverse effects of water stress on growth and yeild of forage sorghum by potassium application. *Advances in Environmental Biology*, 7(1), 40-46. (In Farsi)
- Shibaeva, T. G., Markovskaya, E. F., & Mamaev, A. V. (2018). Phytomelatonin: A review. *Biology Bulletin Reviews*, 8(5), 375-388. doi: 10.1134/S2079086418050080.
- Szafrańska, K., Reiter, R. J., & Posmyk, M. M. (2017). Melatonin improves the photosynthetic apparatus in pea leaves stressed by paraquat via chlorophyll breakdown regulation and its accelerated de novo synthesis. *Journal of Plant Science*, 8, 878-882. doi: 10.3389/fpls.2017.00878.
- Tabande, L., & Safarzadeh Shiraze, S. (2018). Investigation of nitrate accumulation and its effective factors in some leafy vegetables In Zanjan region. *Journal of Soil Research, Soil and Water Sciences*, 32(2), 189-202. (In Farsi) doi: 10.22092/ijsr.2018.117043.
- Tohidloo, G., Souri, M. K., & Eskandarpour, S. (2018). Growth and fruit biochemical characteristics of three strawberry genotypes under different potassium concentrations of nutrient solution. *Journal of Open Agriculture*, 3, 356-362. (In Farsi) <https://doi.org/10.1515/opag-2018-0039>.
- Tripathi, S. K., & Singh, M. (2008). Hybrid seed production cauliflower. *Journal of New Seed*, 2(4), 43-49. https://doi.org/10.1300/J153v02n04_05.
- Velikova, V., Yordanov, I., & Edreva, A. (2000). Oxidative stress and some antioxidant system in acid rain treated bean plants: Protective role of exogenous polyamines. *International Journal of Plant Sciences*, 151, 59-66. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(99\)00197-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(99)00197-1).
- Wang, L., Liu, J., Wang, W., & Sun, Y. (2016). Exogenous melatonin improves growth and photosynthetic capacity of cucumber under salinity-induced stress. *Journal of Photosyntheticia*, 54(1), 19-27. <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0140-3>.
- Wang, P., & Janas, K. (2012). Delayed senescence of apple leaves by exogenous melatonin treatment: Toward regulating the ascorbate-glutathione cycle. *Journal of Pineal Research*, 53, 11-20. doi: 10.1111/j.1600-079X.2011.00966.x.
- Zamani, Z., Amiri, H., & Ismaili, A. (2019). Improving drought stress tolerance in fenugreek (*Trigonella foenum-graecum*) by exogenous melatonin. *Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 5(4), 1-13. (In Farsi) <https://doi.org/10.1080/11263504.2019.1674398>.
- Zhang, A., Han, D., Wang, Y., Mu, H., Zhang, T., Yan, X., & Pang, Q. (2018). Transcriptomic and proteomic feature of salt stress-regulated network in Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) root based on de novo assembly sequencing analysis. *Journal of Plant*, 247(3), 715-732. doi: 10.1007/s00425-017-2818-1.
- Zhang, L., Gao, M., Li, S., Alva, A. K., & Ashraf, M. (2014). Potassium fertilization mitigates the adverse effects of drought on selected Zea mays cultivars. *Turkish Journal of Botany*, 38, 713-723. doi: 10.3906/bot-1308-47.
- Zhang, N., Sun, Q., Zhang, H., Cao, Y., Weeda, S., Ren, Sh., & Guo, Y. D. (2015). Roles of melatonin in abiotic stress resistance in plants. *Journal of Experimental Botany*, 66, 647-56. doi: 10.1093/jxb/eru336.
- Zhao, H., Zhang, K., Zhou, X., Xi, L., Wang, Y., Xu, H., Pan, T., & Zou, Z. (2017). Melatonin alleviates chilling stress in cucumber seedlings by up-regulation of CsZat12 and modulation of polyamine and abscisic acid metabolism. *Scientific Reports*, 7, 4998. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05267-3>.
- Zivdar, S., Arzani, K., Souri, M. K., Moallemi, N., & Seyyednejad, S. M. (2016). Physiological and biochemical response of olive (*Olea europaea* L.) cultivars to foliar potassium application. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 18, 1897-1908. URL: <https://jast.modares.ac.ir/article-23-11776-en.html>.

The effect of foliar application of melatonin and potassium sulfate on the water deficit adjustment and reduction of nitrate accumulation in broccoli

Elaheh Farshad, Najmeh Zeinalipour*, Ruhollah Abdolinejad

Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

(Received: 24/10/2022, Accepted: 20/12/2022)

Abstract

This research was conducted in order to investigate the application of melatonin and potassium sulfate on the quantitative and qualitative characteristics of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) under water stress. A factorial experiment was performed in a completely randomized design with three replications. The experimental factors included irrigation conditions at two levels (50 and 100% FC), melatonin at three levels (0, 150 and 300 μ M) and potassium sulfate at three levels (0, 2 and 5 mM). The results showed that in the treatment of 300 μ M melatonin and control irrigation (100% FC), the leaf area was twofold greater than in the treatment of 50% FC without the use of melatonin. The highest activity of the catalase enzyme was observed in the interaction of 50% irrigation level and 150 μ M melatonin and the highest amount of malondialdehyde was observed in the same field capacity without the use of melatonin. The highest amounts of chlorophyll a and b were obtained in the interaction of 100% FC, 150 μ M melatonin and 5 mM potassium sulfate. The highest amount of head yield was achieved in the interaction of 100% FC with the use of 300 μ M melatonin and 5 mM potassium sulfate, and in this treatment, the highest nitrate reductase enzyme activity and the lowest nitrate accumulation in the crop head were observed. The highest content of proline and activity of the peroxidase enzyme were observed under conditions of 50% FC without the use of melatonin and potassium sulfate. The best treatment in most of the interaction traits was melatonin 300 μ M, potassium sulfate 5 mM under control irrigation conditions (100% FC). Therefore, the use of these compounds is recommended to improve the physiological characteristics, yield and quality of broccoli.

Keywords: Broccoli, Leaf area, Nitrate accumulation, Water deficit stress

Corresponding author, Email: Nzeinali@uk.ac.ir