بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده کشاورزی

رساله دکتری مهندسی زراعت

تأثیر محلول‌پاشی و پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید و نانو ذرات کلسیم بر برخی ویژگی‌های زراعی و فیزیولوژیکی کنجد در شرایط تنش شوری

نگارنده: علیرضا فتحی

اساتید راهنما

دکتر مهدی برادران فیروزآبادی

دکتر محمدرضا عامریان

استاد مشاور

دکتر منوچهر قلی‌پور

شهریور ۱۳۹۷

۴۰۶ رک

شماره :
تاریخ : ۹۷/۷/۱۸
ویرایش :

باسمه تعالی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

صورت جلسه دفاع از رساله دکتری (Ph.D)

فرم شماره ۱۲

بدینوسیله گواهی می شود آقای **علیرضا فتحی** دانشجوی دکتری رشته **زراعت- فیزیولوژی گیاهان زراعی** به شماره دانشجویی ۹۲۴۶۴۶۵ ورودی **بهمن سال ۱۳۹۲** در تاریخ ۱۳۹۷/۶/۱۹ از رساله خود با عنوان : **تأثیر محلول‌پاشی و پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید و نانو ذرات کلسیم بر برخی ویژگی‌های زراعی و فیزیولوژیکی کنجد در شرایط تنش شوری** دفاع و با اخذ نمره ۱۸/۲۵ به درجه : بسیار خوب نائل گردید.

الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹ ☐ ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ – ۱۷ ☑

ج) درجه خوب: نمره۱۶/۹۹– ۱۵ ☐ د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐

ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد ☐

ردیف	هیئت داوران	سمت	مرتبه علمی	امضاء
۱	مهدی برادران فیروزآبادی	راهنما	دانشیار	
۲	محمدرضا عامریان		دانشیار	
۳	منوچهر قلی پور	مشاور	دانشیار	
۴	احمد غلامی	داور داخلی	دانشیار	
۵	مصطفی حیدری	داور داخلی	دانشیار	
۶	ابراهیم زینلی	داور خارجی	دانشیار	
۷	خلیل اژدری	نماینده تحصیلات تکمیلی	دانشیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم بعمل آید.

رئیس دانشکده و رئیس هیات داوران:

دکتر محمدرضا عامریان

تاریخ و امضاء:

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشکده کشاورزی

۸

تقدیم به:

همسر مهربان

و پدر و مادر عزیزم

که در فراز و فرود زیستن بی دریغ یاری ام نمودند.

تشکر و قدردانی

یزدان بی همتا را شاکرم که مرا در مسیری قرار داد تا ذره ای از دانش بی کرانش را فرا گیرم.

ستایش، او را که تجلی وجودش در دو گوهر گرانمایه زندگی ام، پدر و مادرم که هزاران بار دستان پر از مهر و محبت شان را می بوسم بوده است. قدردان مهربی دریغ همسر مهربانم هستم که سختی های فراوانی را در کنار من برای رسیدن به این مهم تحمل نمود. حال که در پرتو لطف و عنایات خداوند سبحان مراحل این تحقیق به سرنجام رسیده است، بر خود لازم می دانم که از دیگر عزیزانی که اینجانب را یاری نمودند، خاشعانه تشکر و قدردانی نمایم.

از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر مهدی برادران فیروزآبادی که دلسوزانه در کمال شکیبایی راهنمای من بوده اند و همچنین از جناب آقای دکتر محمدرضا عامریان که پشتوانه ای محکم برای من بوده اند سپاسگزاری می نمایم. از مشاوره و زحمات جناب آقای دکتر منوچهر قلی پور بی نهایت سپاسگزارم. و از اساتید محترم دکتر نگاریان، دکتر غلامی، دکتر حیدری، دکتر عباسدخت و دکتر اصغری که بابذل بی دریغ علم و تجربه و رهنمودهای خود همواره روشنگر راه بنده بوده اند نیز صمیمانه سپاس گذاری می نمایم.

یاد و خاطره و هم فکری همکلاسی ها و دوستان عزیزم آقایان شهرام طاهری، مجید جبیریانی، وحید اسکندر نژاد و خانوم ها مشفقی، رشیدی و فتحی از ماندگارترین خاطراتم خواهد بود. آرزومند بهروزیشان در پرتو الطاف الهی در تمامی مراحل زندگی هستم.

بجاست همچنین از زحمات جناب آقای دکتر حمیدرضا مهرآبادی عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات کشاورزی خراسان رضوی و جناب آقای مهندس صدری مسئول آزمایشگاه مرکز به خاطر هم فکری ها و همکاری هایشان در طی اجرای این طرح تشکر صمیمانه نمایم.

علیرضا فتحی

تابستان ۹۷

تعهدنامه

اینجانب علیرضا فتحی دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی زراعت گرایش فیزیولوژی گیاهان زراعی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه" **تأثیر محلول‌پاشی و پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید و نانو ذرات کلسیم بر برخی ویژگی‌های زراعی و فیزیولوژیکی کنجد در شرایط تنش شوری**" تحت راهنمائی آقایان دکتر مهدی برادران فیروزآبادی و دکتر محمدرضا عامریان متعهد می‌شوم :

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

تأثیر محلول‌پاشی و پیش تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید و نانو ذرات کلسیم بر برخی ویژگی‌های زراعی و فیزیولوژیکی کنجد در شرایط تنش شوری

چکیده

شورشدن زمین‌های کشاورزی یکی از فاکتورهای مهم در کاهش عملکرد و تولید محصولات زراعی به‌ویژه در نواحی خشک و نیمه خشک می‌باشد. کنجد یکی از گیاهان دانه روغنی و خوراکی مهم این نواحی به‌شمار می‌رود. لذا یافتن راهکاری مناسب برای کاهش خسارت وارده به این گیاه ضروری به‌نظر می‌رسد. امروزه عرضه کودهای شیمیایی به شکل نانو ذرات مورد توجه قرار گرفته است. در همین راستا، در سه بخش آزمایشگاهی، گلخانه‌ای (گلدانی) و مزرعه‌ای تأثیر محلول‌پاشی و پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید و کلسیم بر برخی ویژگی‌های زراعی و فیزیولوژیکی کنجد در شرایط تنش شوری مورد بررسی قرار گرفت. در بخش آزمایشگاهی اثر پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید (بدون پیش‌تیمار، آب مقطر، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میکرومولار) و تنش شوری (صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار در لیتر) با هدف تعیین میزان غلظت مناسب برای پیش‌تیمار سدیم نیتروپروساید در دو بخش دیگر مورد بررسی قرار گرفت. در بخش گلدانی و مزرعه‌ای نیز اثر سدیم نیتروپروساید (شاهد، پیش تیمار بذر با غلظت ۱۵۰ میکرومولار ، محلول‌پاشی با غلظت ۵۰ میکرومولار و محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر)، محلول‌پاشی کلسیم (شاهد، کربنات کلسیم به فرم معمول و نانو با غلظت ۴ در هزار) و تنش شوری (آبیاری با آب غیرشور و شور) مورد بررسی قرار گرفت. در بخش آزمایشگاهی، میزان صفات مرتبط با جوانه‌زنی کنجد اندازه‌گیری شده در تیمار پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید با غلظت ۱۵۰ میکرومولار از سایر سطوح بیش‌تر بود و این تیمار به‌عنوان سطح پیش‌تیمار بذر برای دو بخش آزمایش‌های گلدانی و مزرعه‌ای انتخاب شد. در بخش گلدانی تنش شوری سبب کاهش معنی‌دار صفات زراعی و مورفولوژیک, عملکرد و اجزای عملکرد، کلروفیل و میزان کلسیم و روغن شد. هم‌چنین، تنش شوری سبب افزایش حدوداً ۵ برابری در فعالیت کاتالاز شد؛ هم‌چنین فعالیت سوپراکسید دیسموتاز را حدود ۹ برابر و آسکوربات پراکسید را حدود ۱۰ برابر نسبت به شاهد افزایش داد. کاربرد سدیم نیتروپروساید باعث کاهش اثر تنش شوری بر شاخص‌های اندازه‌گیری‌شده گردید. پیش‌تیمار بذر و محلول‌پاشی با سدیم نیتروپروساید و کاربرد توأم آن‌ها با یکدیگر باعث افزایش صفات زراعی و مورفولوژیک, عملکرد و اجزای عملکرد، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، کلروفیل، پرولین و میزان کلسیم و روغن شد. نتایج آنالیز تبعیضی نشان داد که محلول‌پاشی کربنات‌کلسیم تأثیر کمی بر صفات زراعی و مورفولوژیک، عملکرد و اجزای عملکرد، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و صفات کیفی و میزان سدیم و کلسیم و پرولین داشت، اما اثر تیمارهای مختلف محلول‌پاشی کربنات‌کلسیم بر میزان کلروفیل a، کلروفیل b، نسبت کلروفیل a/b و کلروفیل کل کاملاً مشهود بود و باعث تمایز تیمارهای مختلف محلول‌پاشی کربنات‌کلسیم با تیمار شاهد شد. روند مشابهی هم‌چون آزمایش گلدانی در آزمایش مزرعه‌ای دیده شد. تنش شوری موجب کاهش میزان صفات زراعی و مورفولوژیک، عملکرد و اجزی عملکرد و میزان کلسیم گردید؛ اما کاربرد سدیم نیتروپروساید و محلول‌پاشی کربنات‌کلسیم موجب افزایش این صفات گردیدند و کاهش ناشی از تنش شوری را بهبود بخشیدند. علاوه‌بر این، تنش شوری، کاربرد سدیم نیتروپروساید و محلول‌پاشی کربنات‌کلسیم سبب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، میزان پرولین و پروتئین گردیدند و میزان مالون دی‌آلدئید و روغن را کاهش دادند. در نهایت در محدوده پژوهش انجام شده، محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید به‌همراه محلول‌پاشی با نانوکربنات‌کلسیم را می توان به عنوان بهترین ترکیب تیماری معرفی کرد.

کلمات کلیدی: آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، تنش‌های غیرزنده، کربنات کلسیم، نیتریک اکسید

لیست مقالات مستخرج از رساله تا تاریخ دفاع

۱- فتحی، ع.، برادران فیروزآبادی، م.، عامریان، م. و قلی‌پور، م. ۱۳۹۶. تاثیر نیتریک اکسید بر جوانه-زنی و فعالیت برخی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کنجد (*Sesamun indicum*) تحت تنش شوری. مجله علوم و تحقیقات بذر ایران . دانشگاه گیلان

۲- فتحی، ع.، برادران فیروزآبادی، م.، عامریان، م. و قلی‌پور، م. ۱۳۹۶. تأثیر سدیم نیترو پروساید و کربنات کلسیم بر برخی صفات فیزیولوژیکی کنجد تحت تنش شوری. مجله فیزیولوژی گیاهان زراعی . دانشگاه آزاد اهواز.

۳- فتحی، ع.، برادران فیروزآبادی، م.، عامریان، م. و قلی‌پور، م. ۱۳۹۶. تاثیر پیشتیمار بذر با سدیم نیترو پروساید بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاهچه کنجد تحت تنش شوری در شرایط کشت درون شیشه ای. پنجمین کنفرانس ملی فیزیولوژی گیاهی. دانشگاه زنجان.

۴- فتحی، ع.، برادران فیروزآبادی، م.، عامریان، م. و قلی‌پور، م. ۱۳۹۶. تاثیرمحلولپاشی و پیشتیمار بذور با سدیم نیترو پروساید و نانو ذرات کلسیم بر برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی و آنتی اکسیدانی کنجد تحت تنش شوری. پنجمین کنفرانس ملی فیزیولوژی گیاهی. دانشگاه زنجان.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: مقدمه	**۱**
فصل دوم: بررسی منابع	**۹**
۲-۱- تاریخچه و پراکنش جغرافیایی کنجد	۱۰
۲-۲- خصوصیات گیاه‌شناسی کنجد	۱۱
۲-۳- سازگاری	۱۲
۲-۴- مراحل رشد و نمو	۱۴
۲-۵- موارد مصرف کنجد	۱۴
۲-۶- تنش‌های محیطی	۱۶
۲-۷- تنش شوری	۱۷
۲-۸- نحوه و میزان گسترش شوری در ایران و جهان	۱۹
۲-۹- طبقه بندی گیاهان از لحاظ مقاومت به شوری	۲۱
۲-۱۰- تاثیر شوری بر گیاه	۲۱
۲-۱۱- مکانیسم‌های مقاومت به شوری در گیاهان	۲۴
۲-۱۱-۱- اجتناب از شوری	۲۵
۲-۱۱-۲- تحمل به شوری	۲۸
۲-۱۲- تنش اکسیداتیو	۳۰
۲-۱۳- مکانیسم دفاعی گیاه در مقابل انواع اکسیژن فعال	۳۱
۲-۱۳-۱- سوپراکسید دسموتاز (SOD)	۳۲

۲-۱۳-۲- آسکوربات پراکسیداز (APX) ۳۲
۲-۱۳-۳- گلوتاتیون ردوکتاز (GR) ۳۳
۲-۱۳-۴- فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT) ۳۳
۲-۱۴- تاثیر تنش‌های محیطی بر میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان ۳۴
۲-۱۵- تاثیر تنش شوری بر میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان ۳۵
۲-۱۶- تاثیر تنش شوری بر پراکسیداسیون لیپیدی ۳۶
۲-۱۷- تاثیر تنش شوری بر محتوای پرولین ۳۷
۲-۱۸- تاثیر تنش شوری بر میزان کلروفیل ۳۸
۲-۱۹- تاثیر تنش شوری بر محتوای یونی ۳۸
۲-۱۹-۱- کلر ۳۸
۲-۱۹-۲- سدیم ۳۹
۲-۱۹-۳- پتاسیم ۴۰
۲-۱۹-۴- منیزیم ۴۲
۲-۱۹-۵- کلسیم ۴۳
۲-۲۱- سدیم نیتروپروساید ۴۴
۲-۲۱-۱- کلیات ۴۴
۲-۲۱-۲- بیوسنتز و متابولیسم ۴۷
۲-۲۱-۳- نقش سدیم نیتروپروساید در گیاهان ۴۷
۲-۲۱-۴- اثر سدیم نیتروپروساید بر گیاهان در شرایط تنش ۴۹

۲-۲۲- محلول‌پاشی عناصر غذایی ۵۱
۲-۲۳- ضرورت بکارگیری فناوری نانو در علوم کشاورزی و صنایع غذایی ۵۲
فصل سوم: مواد و روشها **۵۵**
۳-۱ بخش اول (بخش آزمایشگاهی) ۵۶
۳-۲- صفات مورد بررسی ۵۷
۳-۲-۱ صفات مربوط به جوانه زنی ۵۷
۳-۲-۲ اندازه گیری فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی گیاهچه ۵۷
۳-۲-۲-۱- اندازه گیری فعالیت سوپراکسید دسموتاز(SOD) ۵۸
۳-۲-۲-۲- اندازه گیری فعالیت کاتالاز (CAT) ۵۸
۳-۲-۲-۳- اندازه گیری فعالیت آسکوربات پراکسیداز(APX) ۵۹
۳-۲-۲-۴- اندازه گیری فعالیت گلوتاتیون ردوکتاز (GR) ۵۹
۳-۲-۳ پراکسیداسیون لیپیدی (مقدار مالون د آلدهید) ۶۰
۳-۳- بخش دوم (بخش گلدانی) ۶۱
۳-۴- صفات مورد بررسی در بخش گلدانی ۶۳
۳-۴-۱- وزن خشک اندام هوایی و ریشه ۶۳
۳-۴-۲- سطح برگ ۶۳
۳-۴-۳- ارتفاع بوته ۶۳
۳-۴-۴- قطر ساقه ۶۳
۳-۴-۵- محتوای کلروفیل برگ ۶۴
۳-۴-۶- محتوای پرولین برگ ۶۴

۳-۴-۷- اندازه گیری فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی برگ ۶۵
۳-۴-۸- پراکسیداسیون لیپیدی (مقدار مالون دی آلدئید) ۶۵
۳-۴-۹- میزان سدیم و کلسیم در برگ ۶۵
۳-۴-۱۰- عملکرد و اجزای عملکرد ۶۶
۳-۴-۱۱- درصد پروتئین دانه ۶۶
۳-۴-۱۲- میزان روغن دانه ۶۷
۳-۵- بخش سوم (بخش مزرعه ای) ۶۸
۳-۵-۱- عملیات زراعی و اجرای آزمایش ۶۹
۳-۶- صفات مورد بررسی ۷۰
۳-۷- محاسبات آماری ۷۰
فصل چهارم: نتایج و بحث **۷۱**
۴-۱- بخش آزمایشگاهی ۷۲
۴-۱-۱- درصد جوانه‌زنی ۷۲
۴-۱-۲- سرعت جوانه‌زنی ۷۶
۴-۱-۳- وزن خشک ساقه‌چه ۷۷
۴-۱-۴- وزن خشک ریشه‌چه ۷۸
۴-۱-۵- طول ساقه‌چه ۷۹
۴-۱-۶- طول ریشه‌چه ۸۰
۴-۱-۷- فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی ۸۲

۴-۱-۷-۱- سوپراکسید دیسموتاز (SOD) ۸۲
۴-۱-۷-۲- کاتالاز (CAT) ۸۵
۴-۱-۷-۳- آسکوربات پراکسیداز (APX) ۸۸
۴-۱-۷-۴- گلوتاتیون ریداکتاز (GR) ۸۹
۴-۱-۷-۵- مالون دی‌آلدئید (MDA) ۹۰
۴-۲- آزمایش گلدانی ۹۳
۴-۲-۱- صفات زراعی و مورفولوژیک ۹۳
۴-۲-۱-۱-وزن خشک برگ ۹۳
۴-۲-۱-۲-وزن خشک ریشه ۹۷
۴-۲-۱-۳-سطح برگ ۹۸
۴-۲-۱-۴-ارتفاع گیاه ۹۹
۴-۲-۱-۵-قطر ساقه ۱۰۱
۴-۲-۲- عملکرد و اجزای عملکرد ۱۰۲
۴-۲-۲-۱- تعداد کپسول در بوته ۱۰۲
۴-۲-۲-۲- تعداد دانه در کپسول ۱۰۳
۴-۲-۲-۳-وزن هزار دانه ۱۰۵
۴-۲-۲-۴-عملکرد دانه ۱۰۷
۴-۲-۲-۵-وزن زیست توده ۱۱۱
۴-۲-۲-۶-شاخص برداشت ۱۱۳
۴-۲-۳-فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی ۱۱۴

۴-۲-۳-۱-سوپراکسید دیسموتاز (SOD) ۱۱۴
۴-۲-۳-۲-کاتالاز (CAT) ۱۱۷
۴-۲-۳-۳-آسکوربات پراکسیداز (APX) ۱۱۹
۴-۲-۳-۴- مالون دی‌آلدئید (MDA) ۱۲۲
۴-۲-۴-غلظت سدیم ۱۲۵
۴-۲-۵- غلظت کلسیم ۱۳۰
۴-۲-۶- محتوای کلروفیل برگ ۱۳۳
۴-۲-۶-۱- کلروفیل a ۱۳۳
۴-۲-۶-۲- کلروفیل b ۱۳۵
۴-۲-۶-۳- نسبت کلروفیل a/b ۱۳۶
۴-۲-۶-۴- کلروفیل کل ۱۳۸
۴-۲-۷- پرولین ۱۴۰
۴-۲-۸- صفات کیفی ۱۴۳
۴-۲-۸-۱-میزان پروتئین ۱۴۳
۴-۲-۸-۲-میزان روغن ۱۴۴
۴-۳- آزمایش مزرعه‌ای ۱۴۵
۴-۳-۱- صفات زراعی و مورفولوژیک ۱۴۵
۴-۳-۱-۱-وزن خشک برگ ۱۴۵
۴-۳-۱-۲-سطح برگ ۱۴۸

۴-۳-۱-۳-ارتفاع گیاه ۱۴۹
۴-۳-۱-۴-قطر ساقه ۱۵۰
۴-۳-۲- عملکرد و اجزای عملکرد ۱۵۱
۴-۳-۲-۱- تعداد کپسول در بوته ۱۵۱
۴-۳-۲-۲- تعداد دانه در کپسول ۱۵۲
۴-۳-۲-۳-وزن هزار دانه ۱۵۵
۴-۳-۲-۴-عملکرد دانه ۱۵۶
۴-۳-۲-۵-وزن زیست توده ۱۵۷
۴-۳-۲-۶-شاخص برداشت ۱۵۹
۴-۳-۳-فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی ۱۶۱
۴-۳-۳-۱-سوپراکسید دیسموتاز (SOD) ۱۶۱
۴-۳-۳-۲-کاتالاز (CAT) ۱۶۵
۴-۳-۳-۳-آسکوربات پراکسیداز (APX) ۱۶۶
۴-۳-۳-۴- مالون دی‌آلدئید (MDA) ۱۶۸
۴-۳-۴-غلظت سدیم ۱۷۱
۴-۳-۵- غلظت کلسیم ۱۷۴
۴-۳-۶- محتوای کلروفیل برگ ۱۷۶
۴-۳-۶-۱- کلروفیل a ۱۷۶
۴-۳-۶-۲- کلروفیل b ۱۷۸
۴-۳-۶-۳- نسبت کلروفیل a/b ۱۸۰

۴-۳-۶-۴- کلروفیل کل ۱۸۱

۴-۳-۷- پرولین ۱۸۳

۴-۳-۸- صفات کیفی ۱۸۴

۴-۳-۸-۱-میزان پروتیین ۱۸۴

۴-۳-۸-۲-میزان روغن ۱۸۵

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۸۷

۵-۱- نتیجه‌گیری ۱۸۸

۵-۲- پیشنهادات ۱۹۱

منابع ۱۹۳

پیوست ها ۲۲۵

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل۲-۱- پاسخ دومرحله‌ای گیاهان به تنش شوری ۲۳

شکل ۳-۱- تصاویر سدیم نیتروپروساید(راست) وکربنات کلسیم به فرم نانو ذرات (چپ) توسط دستگاه SEM ۶۳

شکل ۴-۱- اثر برهمکنش سدیم نیتروپروساید و تنش شوری بر درصد جوانی زنی کنجد ۷۵

شکل ۴-۲- اثر برهمکنش سدیم نیتروپروساید و تنش شوری بر فعالیت آنزیم کاتالاز در برگ گیاهچه کنجد ۸۸

شکل ۴-۳- اثر برهمکنش سدیم نیتروپروساید و تنش شوری بر غلظت مالون دی‌آلدئید در برگ گیاهچه کنجد ۹۳

شکل ۴-۴- اثر برهم‌کنش سطوح سدیم نیتروپروساید و تنش شوری بر وزن خشک ریشه گیاه کنجد در آزمایش گلدانی ۹۸

شکل ۴-۵- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و کلسیم بر عملکرد دانه کنجد در آزمایش گلدانی ۱۰۹

شکل ۴-۶- رابطه رگرسیون خطی بین عملکرد دانه با میزان کلسیم برگ (الف)، عملکرد دانه با وزن خشک برگ (ب) و وزن خشک برگ با میزان کلسیم برگ (ج) گیاه کنجد در آزمایش گلدانی ۱۱۱

شکل ۴-۷- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و کاربرد سدیم نیتروپروساید بر شاخص برداشت در گیاه کنجد در آزمایش گلدانی ۱۱۴

شکل ۴-۸- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و کاربرد سدیم نیتروپروساید بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در گیاه کنجد در آزمایش گلدانی ۱۱۷

شکل ۴-۹- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و محلول‌پاشی با کربنات‌کلسیم بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در گیاه کنجد در آزمایش گلدانی ۱۱۷

شکل ۴-۱۰- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و کاربرد سدیم نیتروپروساید بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در گیاه کنجد در آزمایش گلدانی ۱۲۱

شکل ۴-۱۱- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و محلول‌پاشی با کربنات‌کلسیم بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در گیاه کنجد در آزمایش گلدانی ۱۲۱

شکل ۴-۱۲- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و کاربرد سدیم نیتروپروساید بر غلظت مالون دی‌آلدئید در گیاه کنجد در آزمایش گلدانی ۱۲۴

شکل ۴-۱۳- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و محلول‌پاشی با کربنات‌کلسیم بر غلظت مالون دی‌آلدئید در گیاه کنجد در آزمایش گلدانی ۱۲۵

شکل ۴-۱۴- رابطه رگرسیون ساده خطی بین مقدار کلسیم برگ و غلظت مالون دی‌آلدئید در گیاه کنجد در آزمایش گلدانی ۱۲۵

شکل ۴-۱۵- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و کاربرد سدیم نیتروپروساید بر میزان سدیم برگ در گیاه کنجد در آزمایش گلدانی ۱۲۸

شکل ۴-۱۶- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و محلول‌پاشی با کربنات کلسیم بر میزان سدیم برگ در گیاه کنجد در آزمایش گلدانی ۱۲۸

شکل ۴-۱۷- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و محلول‌پاشی با کربنات‌کلسیم بر میزان کلسیم برگ در گیاه کنجد در آزمایش گلدانی ۱۳۲

شکل ۴-۱۸- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و کاربرد سدیم نیتروپروساید بر میزان پرولین در برگ گیاه کنجد درآزمایش گلدانی ۱۴۳

شکل ۴-۱۹- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و کاربرد سدیم نیتروپروساید بر میزان روغن دانه گیاه کنجد در آزمایش گلدانی ۱۴۵

شکل ۴-۲۰- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و کاربرد سدیم نیتروپروساید بر شاخص برداشت گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای ۱۶۰

شکل ۴-۲۱- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و کاربرد سدیم نیتروپروساید بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای ۱۶۲

شکل ۴-۲۲- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و محلول‌پاشی کربنات‌کلسیم بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای ۱۶۳

شکل ۴-۲۳- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و محلول‌پاشی کربنات‌کلسیم بر فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای ۱۶۶

شکل ۴-۲۴- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و سدیم نیتروپروساید بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای ۱۶۸

شکل ۴-۲۵- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و محلول‌پاشی کربنات‌کلسیم بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای ۱۶۸

شکل ۴-۲۶- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و سدیم نیتروپروساید بر غلظت مالون دی‌آلدئید در گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای ۱۷۰

شکل ۴-۲۷- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و محلول‌پاشی کربنات‌کلسیم بر غلظت مالون دی‌آلدئید در گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای ۱۷۱
شکل ۴-۲۸- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و سدیم نیتروپروساید بر میزان سدیم برگ در گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای ۱۷۴
شکل ۴-۲۹- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و محلول‌پاشی کربنات‌کلسیم بر میزان سدیم برگ در گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای ۱۷۴
شکل ۴-۳۰- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و کربنات‌کلسیم بر میزان کلسیم برگ در گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای ۱۷۶
شکل ۴-۳۱- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و سدیم نیتروپروساید بر میزان کلروفیل a در گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای ۱۷۸
شکل ۴-۳۲- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف سدیم نیتروپروساید و کربنات کلسیم بر میزان کلروفیل a درگیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای ۱۷۸
شکل ۴-۳۳- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و سدیم نیتروپروساید بر میزان کلروفیل b در گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای ۱۸۰
شکل ۴-۳۴- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف سدیم نیتروپروساید و کربنات‌کلسیم بر نسبت کلروفیل a/b در گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای ۱۸۱
شکل ۴-۳۵- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و سدیم نیتروپروساید بر درصد روغن دانه گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای ۱۸۶

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۳-۱- مشخصات خاک مورد استفاده ۶۲

جدول ۳-۲- مشخصات آب مورد استفاده ۶۲

جدول ۴-۱- مقایسه میانگین درصد و سرعت جوانه‌زنی، وزن خشک ساقه‌چه و ریشه‌چه و طول ساقه‌چه و ریشه‌چه تحت تأثیر سطوح مختلف سدیم نیتروپروساید در بخش آزمایشگاهی ۷۲

جدول ۴-۲- مقایسه میانگین درصد و سرعت جوانه‌زنی، وزن خشک ساقه‌چه و ریشه‌چه و طول ساقه چه و ریشه‌چه تحت تأثیر سطوح مختلف تنش شوری در بخش آزمایشگاهی ۷۴

جدول ۴-۳- مقایسه میانگین فعالیت سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، گلوتاتیون ریداکتاز و محتوای مالون دی‌آلدئید تحت تأثیر سطوح مختلف سدیم نیتروپروساید در بخش آزمایشگاهی ۸۴

جدول ۴-۴- مقایسه میانگین فعالیت سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، گلوتاتیون ریداکتاز و محتوای مالون دی‌آلدئید تحت تأثیر تنش شوری در بخش آزمایشگاهی ۸۵

جدول ۴-۵- مقایسه میانگین وزن خشک برگ و ریشه، سطح برگ، ارتفاع گیاه و قطر ساقه در گیاه کنجد تحت تأثیر تیمار شوری، سدیم نیتروپروساید و محلول‌پاشی کلسیم در آزمایش گلدانی ۹۶

جدول ۴-۶- مقایسه میانگین اجزای عملکرد، عملکرد دانه، وزن زیست‌توده و شاخص برداشت در گیاه کنجد تحت تأثیر تیمار شوری، سدیم نیتروپروساید و محلول‌پاشی کلسیم در آزمایش گلدانی ۱۰۴

جدول۴-۷- ضریب همبستگی پیرسون بین عملکرد دانه گیاه کنجد با برخی از صفات اندازه‌گیری شده ۱۱۰

جدول ۴-۸- مقایسه میانگین فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و غلظت مالون دی‌آلدئید در گیاه کنجد در آزمایش گلدانی ۱۱۶

جدول۴-۹- ضریب همبستگی پیرسون بین فعالیت آسکوربات پراکسیداز با برخی از صفات اندازه‌گیری شده در گیاه کنجد ۱۲۱

جدول ۴-۱۰- مقایسه میانگین مربوط به صفات سدیم، کلسیم کلروفیل، پرولین، میزان پروتئین و روغن در گیاه کنجد در آزمایش گلدانی ۱۲۹

جدول ۴-۱۱- مقایسه میانگین وزن خشک برگ و ریشه، سطح برگ، ارتفاع گیاه و قطر ساقه در گیاه کنجد تحت تأثیر تیمار شوری، سدیم نیتروپروساید و محلول‌پاشی کلسیم در آزمایش مزرعه‌ای ۱۴۷

جدول ۴-۱۲- مقایسه میانگین اجزای عملکرد، عملکرد دانه، وزن زیست‌توده و شاخص برداشت در گیاه کنجد تحت تأثیر تیمار شوری، سدیم نیتروپروساید و محلول‌پاشی کلسیم در آزمایش مزرعه‌ای ۱۵۴

جدول ۴-۱۳- مقایسه میانگین فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و غلظت مالون دی‌آلدئید در برگ گیاه کنجد تحت تأثیر تنش شوری، سدیم نیتروپروساید و محلول‌پاشی کلسیم در آزمایش مزرعه‌ای ۱۶۴
جدول ۴-۱۴- مقایسه میانگین سدیم و کلسیم برگ، کلروفیل، پرولین، میزان پروتئین و روغن در گیاه کنجد تحت تأثیر تنش شوری، سدیم نیتروپروساید و محلولپاشی کلسیم کربنات در آزمایش مزرعه‌ای ۱۷۳
جدول پیوست ۱- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات درصد و سرعت جوانه‌زنی، وزن خشک ساقه‌چه و ریشه‌چه و طول ساقه‌چه و ریشه‌چه تحت تأثیر سطوح سدیم نیتروپروساید و شوری در بخش آزمایشگاهی ۲۲۶
جدول پیوست ۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) فعالیت سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، گلوتاتیون ریداکتاز و محتوای مالون دی‌آلدئید تحت تأثیر سطوح سدیم نیتروپروساید و شوری در بخش آزمایشگاهی ۲۲۷
جدول پیوست ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات وزن خشک برگ و ریشه، سطح برگ، ارتفاع گیاه و قطر ساقه تحت تأثیر سطوح شوری، سدیم نیتروپروساید و کلسیم در آزمایش گلدانی ۲۲۸
جدول پیوست ۴- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اجزای عملکرد، عملکرد دانه، وزن زیست‌توده و شاخص برداشت تحت تأثیر سطوح شوری، سدیم نیتروپروساید و کلسیم در آزمایش گلدانی ۲۲۹
جدول پیوست ۵- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و غلظت مالون دی‌آلدئید تحت تأثیر سطوح شوری، سدیم نیتروپروساید و کلسیم در آزمایش گلدانی ۲۳۰
جدول پیوست ۶- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) غلظت سدیم و کلسیم برگ، محتوای کلروفیل، پرولین و میزان پروتئین و روغن دانه تحت تأثیر سطوح شوری، سدیم نیتروپروساید و کلسیم در آزمایش گلدانی ۲۳۱
جدول پیوست ۷- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات وزن خشک برگ و ریشه، سطح برگ، ارتفاع گیاه و قطر ساقه تحت تأثیر سطوح شوری، سدیم نیتروپروساید و کلسیم در آزمایش مزرعه‌ای ۲۳۲
جدول پیوست ۸- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اجزای عملکرد، عملکرد دانه، وزن زیست‌توده و شاخص برداشت تحت تأثیر سطوح شوری، سدیم نیتروپروساید و کلسیم در آزمایش مزرعه‌ای ۲۳۳
جدول پیوست ۹- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و غلظت مالون دی‌آلدئید تحت تأثیر سطوح شوری، سدیم نیتروپروساید و کلسیم در آزمایش مزرعه‌ای ۲۳۴
جدول پیوست ۱۰- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات غلظت سدیم و کلسیم برگ، محتوای کلروفیل، پرولین و میزان پروتئین و روغن دانه تحت تأثیر سطوح شوری، سدیم نیتروپروساید و کلسیم در آزمایش مزرعه‌ای ۲۳۵

فصل اول

مقدمه

شور شدن زمین‌های کشاورزی به‌دلیل روش‌های فشرده خاک‌ورزی و آبیاری یکی از فاکتورهای مهم در کم شدن عملکرد و تولید محصولات زراعی به ویژه در نواحی خشک و نیمه خشک می‌باشد. در شرایط آب و هوایی خشک و نیمه خشک مشکل شوری در اثر کمبود بارندگی، دمای بالا و سرعت تبخیر بالا تشدید می‌شود (تستر و دونپورت، ۲۰۰۳). در این نواحی محدودیت بارش قادر به شستن نمک‌های اضافی از ناحیه ریشه نمی‌باشد. همچنین سرعت تبخیر بالا می‌تواند سبب افزایش غلظت نمک در خاک سطحی شود. اصولاً خاک شور به خاکی گفته می‌شود که غلظت املاح محلول در آن به قدری باشد که عملکرد گیاه را کاهش دهد، مشروط بر آنکه سایر عوامل مانعی برای رشد محصول ایجاد نکند (اشرف و الری، ۱۹۹۶). شوری از طرق مختلفی موجب کاهش رشد و پتانسیل تولیدی گیاهان می‌شود. تجمع یون‌های سدیم و کلر در خاک علاوه بر اثر سمی که بر گیاه دارد، سبب کاهش پتانسیل اسمزی محلول خاک می‌شود و گیاه را در جذب آب با مشکل روبرو می‌کند. در نتیجه گیاه دچار نوعی خشکی فیزیولوژیک یا تنش اسمزی می‌شود. از طرفی برهم‌کنش بین نمک‌ها و مواد غذایی خاک موجب برهم‌زدن تعادل یونی محلول خاک می‌شود (بور و همکاران، ۲۰۰۲). پیامد این اثرات سرانجام بسته شدن روزنه‌ها و کاهش تثبیت CO_2 در گیاه است. فاکتورهای غیرروزنه‌ای از قبیل آنزیم‌های فتوسنتزی و غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی مانند کلروفیل و کاروتنوئید نیز به‌وسیله شوری تحت تأثیر قرار می‌گیرد (بور و همکاران، ۲۰۰۲).

همچنین شوری سبب افزایش‌گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)[1] به عنوان یکی از مهمترین عوامل آسیب‌رسان به سلول‌ها در شرایط تنش می‌شود. سوپراکسید ($O_2^{\cdot}$)، پراکسیدهیدروژن (H_2O_2)، هیدروکسیل ($HO^{\cdot}$) و اکسیژن مولکولی ازجمله گونه‌های فعال اکسیژن هستند که میزان آنها تحت شرایط تنش در گیاهان افزایش می‌یابد (میتلر و همکاران، ۲۰۰۴). این گونه‌های اکسیژن برای سلول

1- Reactive oxigen species

سمی می‌باشند و به‌طور جدی با مولکول‌های حیاتی از جمله لیپیدها، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلوئیک واکنش می‌دهند و موجب پراکسیداسیون لیپیدها، دناتوره شدن پروتئین‌ها و تغییر و جهش در DNA می‌شوند (کنت، ۱۹۹۰).

گیاهان برای مقابله با گونه‌های فعال اکسیژن بسته به ظرفیت ژنتیکی‌شان سیستم‌های دفاعی آنتی اکسیداتیو را در خود گسترش می‌دهند. در این میان آنزیم‌های آنتی اکسیدان نقش مهمی در پاکسازی گونه‌های فعال اکسیژن از طریق یک سری واکنش‌های پیچیده ایفا می‌کنند. این واکنش‌ها شامل تبدیل اکسیژن مولکولی (O_2) به پراکسید هیدروژن (H_2O_2) به‌وسیله آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD) و سمیت زدایی H_2O_2 توسط آنزیم‌های متعددی از قبیل پراکسیداز (POX)، آسکوربات پراکسیداز (APX)، کاتالاز (CAT) وگلوتاتیون ردوکتاز (GR) می‌باشد. در کنار فعالیت این آنزیم‌ها، مولکول‌های آنتی اکسیدانی دیگر مثل پرولین، آلفاتوکوفرول، فلاونوئید، کارتنوئید، آسکوربیک و گلوتاتیون نیز در بی‌اثر کردن فعالیت این گونه‌ها نقش دارند (میتلر و همکاران، ۲۰۰۴).

کلسیم به‌عنوان یک عنصر ضروری برای رشد گیاهان شناخته شده است. این عنصر که در گیاه غیرمتحرک است، دارای نقش‌های الکتروشیمیایی، ساختمانی و کاتالیکی بسیاری می‌باشد (گلوری و همکاران، ۲۰۱۶). وجود کلسیم و جذب آن از دو طریق ریشه و برگ می‌تواند در رقابت با سدیم، اثر این یون را کاهش دهد. مطالعه نتوندا و همکاران (۲۰۰۴) نشان داده است که برای حفاظت غشاء سلول در برابر آسیب‌های ناشی از تنش‌های مختلف، حضور کلسیم در محیط بیرونی ضروری است. نتایج آزمایش دابکسلیتا و ایکدا (۲۰۰۵) نشان داد که محلول‌پاشی کلسیم موجب کاهش غلظت سدیم در اندام‌های مختلف سویا و خیار تحت تنش شوری شد.

سدیم نیتروپروساید با فرمول شیمیایی $Na_2(Fe(CN)_5No).2H_2O$ که تنظیم کننده رشد گیاهی است. به صورت پودری قرمز رنگ عرضه میشود و این ترکیب قادر به رها کردن نیتریک اکسید است که در

حالت معمول به شدت به نور حساس بوده و تجزیه آن توسط اکسیژن و دمای زیاد تسریع می‌شود (وایکزورک و همکاران، ۲۰۰۶). نیتریک اکسید در تحریک جوانه‌زنی بذر، تقسیم سلولی، افزایش میزان کلروفیل و بسیاری از اعمال دیگر سلول دخالت دارد و قادر است با گونه‌های فعال اکسیژن واکنش و آسیب ناشی از آنها را کاهش دهد (بلیگنی و لاماتینا، ۱۹۹۹). گزارش شده است که سدیم نیتروپروساید می‌تواند فرآیندهای مرتبط با رشد و نمو را تنظیم کند (لی و همکاران، ۲۰۱۵). سدیم نیتروپروساید سبب توسعه برگ و ریشه می‌شود و پیری را به تأخیر می‌اندازد. این ماده در طی تنش‌های مختلف به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان عمل می‌کند (لشم و هرامتی، ۲۰۰۰). البته رهاسازی نیتریک اکسید از سدیم نیتروپروساید و ایفای نقش آن به‌عنوان آنتی اکسیدان نیازمند تابش نور یا احیای آن توسط ترکیباتی نظیر اسید آسکوربیک، تیول‌ها و هموپروتئین ها و غیره می‌باشد (وایکزورک و همکاران، ۲۰۰۶). در پژوهش انجام شده توسط فاروق و همکاران (۲۰۰۹)، کاربرد خارجی سدیم نیتروپروساید موجب افزایش تحمل برنج به تنش خشکی، افزایش وزن خشک گیاهچه و افزایش ارتفاع گیاه شد.

استفاده از فناوری نانو در کلیه عرصه‌ها از جمله کشاورزی در حال گسترش است. فرآورده‌های نانو شامل مخلوطی از ذره‌هایی با ابعاد بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر هستند که می‌توانند خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مواد اولیه خود را تغییر دهند (مونیکا و کرمونینی، ۲۰۰۹). اخیرا عرضه کودهای شیمیایی به شکل نانو ذرات مورد توجه قرار گرفته است و نتایج مطالعات موجود بیانگر واکنش متفاوت گونه‌های مختلف گیاهان به عناصر غذایی تهیه شده به شکل نانو می‌باشد. برای مثال در مطالعه ژو و همکاران (۲۰۰۸) در حالی که گیاه *Cucurbita maxiama* قادر به جذب، انتقال و تجمع مواد نانو در بافت‌های خود بود، جذب و انتقال این مواد توسط گیاه *Phaseolus limensis* انجام نشد. گزارشات محدودی مبنی بر تأثیر مثبت مواد غذایی نانو بر رشد برخی از گیاهان از جمله بادام زمینی (پراساد و همکاران، ۲۰۱۲)، نخود (پندی و همکاران، ۲۰۱۰) و اسفناج (یانگ و همکاران، ۲۰۰۶) وجود دارد.

امروزه تکنیک‌های مختلفی به منظور افزایش قدرت بذر در دسترس است که شامل دامنه‌ای از تیمارهای بذری پس از برداشت هستند و در نهایت سبب بهبود جوانه‌زنی و رشد گیاهچه از طریق تغییر بنیه و یا بهبود وضعیت فیزیولوژیک و سیتولوژیک بذر می‌گردند. هدف این تیمارها کوتاه کردن فاصله زمانی کاشت تا جوانه‌زنی است. یکی از این تکنولوژی‌ها پیش‌تیمار بذر به روش‌های مختلف می‌باشد (حسین و همکاران، ۲۰۱۴). پیش‌تیمار بذر سبب آغاز متابولیسم پیش از جوانه‌زنی می‌گردد. این فرآیند فیزیولوژیک طی مراحل اولیه آبنوشی رخ می‌دهد و شامل پاسخ‌های تعمیری بذر (فعالسازی مسیرهای بازسازی DNA و مکانیسم‌های آنتی‌اکسیدان) می‌باشد که برای حفظ تمامیت ژنوم، اطمینان از وقوع جوانه‌زنی مناسب و رشد گیاهچه ضروری است (پاپارلا و همکاران، ۲۰۱۵). تاکنون مطالعات زیادی در مورد به‌کارگیری تکنیک‌های مختلف پیش‌تیمار به‌کمک ترکیبات شیمیایی، ویتامین‌ها، قارچ‌کش‌ها، تنظیم کننده‌های رشد و ترکیبات آنتی اکسیدان به‌منظور بهبود افزایش مقاومت گیاهچه در برابر تنش‌های محیطی صورت گرفته است. به‌طوری که نتایج حاکی از آن است که کاربرد ترکیباتی نظیر اسید آسکوربیک (رضا و همکاران، ۲۰۱۳)، انواع ویتامین B (هاواکس، ۲۰۰۹)، پلی‌آمین‌هایی نظیر اسپرمین (هاریندرا چمپا و همکاران، ۲۰۱۵)، گلوتاتیون (نعمت الله و حسن، ۲۰۱۴) و بخار روغن گیاه اکالیپتوس (باتاچارجی و همکاران، ۲۰۰۶)، به‌صورت پیش تیمار بذر و یا محلول‌پاشی برگی قادر به تخفیف اثرات منفی انواع تنش‌های زنده و غیرزنده بوده‌اند.

گیاهان دانه روغنی از نظر تأمین انرژی مورد نیاز انسان و دام در بین محصولات زراعی از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند و از جمله با ارزش‌ترین محصولات بخش کشاورزی به شمار می‌روند. با این وجود سابقه تولید دانه‌های روغنی در ایران از ۳۵ سال متجاوز نمی‌باشد. با توجه به نیاز روز افزون کشور به روغن و با توجه به اینکه بیش از ۹۰ درصد روغن مورد نیاز کشور از خارج تأمین می‌شود، کنجد می‌تواند به‌عنوان یک گیاه صنعتی و روغنی مهم مطرح باشد (منصوری، ۱۳۸۸). کنجد یکی از گیاهان دانه روغنی و

خوراکی مهم درکشاورزی نواحی گرم به‌شمار می‌رود و ظاهراً قدیمی‌ترین گیاه دانه روغنی در جهان می-باشد. آفریقا و شبه قاره هند به‌عنوان دو منشاء اصلی این گیاه در منابع معرفی شده‌اند (آکپان و میساری، ۲۰۰۷). دانه کنجد و روغن آن به‌طور گسترده به‌عنوان غذا، دارو و تولید عطر در صنعت مصرف می‌شود. وجود بیش از ۵۰ درصد روغن در دانه کنجد که درصد بالایی از آن را اسیدهای چرب غیراشباع اولئیک و لینولئیک تشکیل می‌دهند، سبب کیفیت عالی روغن کنجد برای تغذیه انسان شده است. روغن کنجد دارای سسامین و سسامول می‌باشد که دارای نقش مهمی در پایداری اکسیداتیو و فعالیت‌های آنتی اکسیدانی هستند (محمود و همکاران، ۲۰۰۳).

مطالعات زیادی در مورد پاسخ گیاه کنجد به تنش شوری در دسترس نیست. کوکا و همکاران (۲۰۰۶) تأثیر تنش شوری را بر غلظت مالون دی‌آلدئید و آنزیم‌های آنتی اکسیدانی دو ژنوتیپ کنجد بررسی کردند. نتایج نشان داد که غلظت مالون دی‌آلدئید و فعالیت آنزیم‌های CAT، APX و GR در هر دو رقم با افزایش سطح تنش افزایش پیدا کرد، ولی افزایش در فعالیت SOD تنها در رقم *Cumhuriyet* مشاهده شد و در رقم *Orhangazi* تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد نداشت. بذرافشان و احسان‌زاده (۲۰۱۶) پاسخ هفت ژنوتیپ کنجد شامل ناز تک‌شاخه، ناز چندشاخه، اردستان، ورامین، یکتا، داراب و اولتان را به سه سطح شوری (صفر، ۳۰ و ۶۰ میلی‌مولار نمک طعام) در محیط آبکشت بررسی کردند. با افزایش شوری از سطح شاهد به سطح ۶۰ میلی‌مولار میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی CAT، APX، GR و SOD در ژنوتیپ‌های اردستان، داراب و ورامین افزایش یافت، در حالی‌که در ژنوتیپ‌های ناز تک‌شاخه، ناز چندشاخه و اولتان کاهش فعالیت آنزیم‌های CAT و SOD در سطح اخیر شوری مشاهده شد.

امروزه به‌دلیل کاهش قابل توجه در نزولات آسمانی و پایین افتادن سطح آب‌های زیرزمینی، تعداد چاه‌های آب شور روبه افزایش و کیفیت آب‌ها روبه کاهش است و کشاورزان ناگزیر به استفاده از این آب‌ها هستند که قطعاً خسارت کوتاه و بلند مدتی را به دنبال خواهد داشت. لذا یافتن راهکاری مناسب برای

کاهش خسارت وارده به گیاهان زراعی ضروری به‌نظر می‌رسد. از این رو با توجه به محدودیت مطالعات در مورد مصرف سدیم نیتروپروساید و نانو ذرات کلسیم تحت تنش‌های محیطی و آثار مفیدی که گاهاً برای نیتریک اکسید و کلسیم در مهار تنش‌ها ذکر شده است، در این آزمایش تأثیر محلول‌پاشی و پیش تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید و کلسیم (به دو شکل نانو ذره و رایج) تحت تنش شوری بر برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک و همچنین میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی در گیاه کنجد در شرایط آزمایشگاه، گلخانه و مزرعه مورد بررسی قرارگرفت.

اهداف مورد بررسی در این پژوهش به شرح ذیل بود:

۱- تعیین مناسب‌ترین غلظت پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید در آزمایشگاه
۲- بررسی فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و تغییرات ذخایر بذر کنجد تحت تأثیر پیش‌تیمار با غلظت‌های مختلف سدیم نیتروپروساید در شرایط تنش شوری
۳- بررسی رفتارهای زراعی، فیزیولوژیک و کیفی گیاه کنجد تحت تأثیر محلول‌پاشی و پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید و محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش شوری
۴- مقایسه دو فرم نانو و معمولی کلسیم از لحاظ تأثیرگذاری بر گیاه کنجد در شرایط تنش شوری

فصل دوم

بررسی منابع

۲-۱- تاریخچه و پراکنش جغرافیایی کنجد

کنجد که از آن به‌عنوان ملکه گیاهان روغنی یاد می‌شود، از جمله مهمترین دانه‌های روغنی و خوراکی در کشاورزی سنتی نواحی گرم به شمار می‌رود که سابقه کشت و کار آن به بیش از ۵۰۰۰ سال می‌رسد. این گیاه در نواحی با خشکی و گرمای شدید که امکان کشت گیاهان دیگر وجود ندارد، قابل کشت و کار می‌باشد (خواجه پور، ۱۳۸۳ و لانگهام و همکاران، ۲۰۰۶). منشاء دقیقی برای کنجد در منابع ذکر نشده است، اما با توجه به سابقه کشت و کار و پراکندگی گونه‌های مختلف کنجد در آفریقا به احتمال زیاد کنجد زراعی از *Sesamum capense* L. در نواحی مرکزی آفریقا و ظاهراً در اتیوپی منشاء یافته است. واویلف هند را منشاء کنجد دانسته است (خواجه پور، ۱۳۸۳). هر چند موطن اصلی این دانه روغنی آفریقا بوده است، اما دامنه کشت و کار آن به سرعت در کشورهای هندوستان، چین و ژاپن نیز گسترش یافته به‌طوری‌که این کشورها به‌عنوان مراکز ثانویه انتشار کنجد شناخته می‌شوند (کوکا و همکاران، ۲۰۰۶). کنجد امروزه به‌عنوان یک گیاه اقتصادی مهم به‌طور گسترده در بسیاری از نقاط دنیا ازجمله هند، چین، تایلند، مکزیک، گواتمالا، السالوادور، افغانستان، پاکستان، بنگلادش، اندونزی، عربستان سعودی و ترکیه کشت می‌شود (موریس، ۲۰۰۲). کشور ایران در بین ۷۶ کشور تولید کننده کنجد رتبه ۲۱ را به خود اختصاص داده است. زراعت کنجد در ۱۶ استان کشور انجام می‌شود که عمده کشت آن در استان‌های خوزستان، فارس، کرمان و بوشهر صورت می‌گیرد (منصوری، ۱۳۸۸). طبق آمار منتشر شده توسط سازمان خواربار جهانی (FAO) سطح زیر کشت کنجد در ایران در سال ۲۰۱۵ میلادی ۴۰ هزار هکتار و میزن تولید آن ۲۸ هزار تن گزارش شده است. بزرگترین تولید کنندگان کنجد در سال ۲۰۱۵ کشورهای هند، میانمار و چین بوده‌اند (فائو، ۲۰۱۵).

۲-۲- خصوصیات گیاه‌شناسی کنجد

کنجد با نام علمی سساموم ایندیکوم[1] گیاهی یکساله و دیپلوئید (۲n=۲۶) است که در رده‌بندی گیاهی در راسته توبی‌فلوره[2] خانواده پدالیاسه[3] جنس سزامی و گونه ایندیکوم قرار دارد (آکپان و میساری، ۲۰۰۷). کنجد گیاهی خودگشن می‌باشد، میزان دگرگشنی در آن به فعالیت حشرات بستگی دارد و به ندرت از ۱۰ درصد تجاوز می‌کند، هر چند در برخی ارقام و شرایط تا ۵۰ درصد نیز گزارش شده است. از نظر تیپ رشدی، کنجد گیاهی است که به‌صورت بوته‌ای استوار رشد می‌کند. گونه‌هایی از کنجد نیز وجود دارند که دارای تیپ رشدی چند ساله و دارای ساقه‌های منشعب می‌باشند. طول دوره رشد کنجد از ۳ تا ۶ ماه متغیر است و غالباً ۱۰۰ تا ۱۲۰ روز می‌باشد. کنجد دارای سیستم ریشه‌ای مستقیم، قوی و گسترده می‌باشد که در خاک‌های نفوذ پذیر قادر است تا عمق بیش از ۲ متری خاک نفوذ کند. ساقه کنجد مستقیم، دارای شیارهای طولی و در برش‌های قطری چهارگوش است. سطح ساقه از صاف تا بسیار کرک‌دار متغیر می‌باشد. ساقه کنجد دارای مواد لزج و آبدار است. رنگ ساقه از سبز روشن تا ارغونی متغیر و غالباً سبز تیره می‌باشد. ارتفاع ساقه معمولاً از ۶۰ تا ۱۵۰ سانتی‌متر می‌باشد و گاه به بیش از ۳ متر نیز می‌رسد. بوته کنجد ممکن است تک ساقه و یا دارای انشعابات جانبی باشد. ساقه‌دهی ممکن است ار ناحیه‌ی پائینی و یا بالائی ساقه اصلی باشد. بیشتر ارقام زراعی کنجد از نوع تک ساقه می‌باشند (خواجه پور، ۱۳۸۳). برگ‌ها از نظر شکل و اندازه روی یک بوته متفاوتند. به‌طوری‌که برگ‌های پائینی بوته عریض و اغلب مضرس و دارای بریدگی می‌باشند. با پیشروی برگ به سمت قسمت‌های فوقانی ساقه از میزان بریدگی برگ کاسته می‌شود و برگ‌ها باریک‌تر و کشیده‌تر می‌شوند. گل‌های کنجد به‌صورت زنگوله‌ای شکل در زاویه داخلی برگ‌ها به ظهور می‌رسند. تشکیل گل‌ها حدود ۲ ماه بعد از سبز شدن از ناحیه

1- *sesamum indicum* L.
2-Tubiflorae
3-Pedaliaceae

پائینی بوته آغاز شده و به طرف بالا ادامه می‌یابد. بالاترین گره‌های ساقه به گل تبدیل نمی‌گردند و بدین لحاظ گیاه رشد نامحدود می‌باشد. اما برخورد اواخر دوران رشد گیاه به هوای خنک سبب توقف رشد طولی ساقه و توقف تشکیل گل می‌گردد. میوه کنجد به‌صورت کپسولی چهارگوش با رأس کوتاه مثلثی، کرک‌دار و با شیارهای عمیق طولی است. طول کپسول از ۲/۵ تا ۸ سانتی‌متر و قطر آن از ۰/۵ تا ۲ سانتی‌متر متغیر است. در هر کپسول معمولا ۲ یا ۴ و گاه تا ۱۲ برچه مشاهده می‌شود. کپسول شکوفا بوده و در طول خط جوش برچه از بالا به پائین شکافته می‌شود. هر کپسول هنگامی کاملاً رسیده است که به رنگ قهوه‌ای یا ارغوانی درآمده باشد. دانه کوچک کنجد (عرض ۱/۵ و طول ۲/۵ میلی‌متر) تخم مرغی شکل، کمی پهن و در محل اتصال به تخمدان باریک‌تر است. پوسته دانه ممکن است صاف و یا ناهموار باشد. دانه به رنگ‌های سفید، زرد، قرمز مایل به قهوه‌ای، خاکستری و یا سیاه دیده می‌شود (خواجه پور، ۱۳۸۳).

۲-۳- سازگاری کنجد

کنجد محصول نواحی گرم است و در فاصله عرض جغرافیایی ۳۵ درجه جنوبی تا ۴۰ درجه شمالی و غالباً تا ارتفاع ۱۷۰۰ متر از سطح دریا کاشته می‌شود (کوکا و همکاران، ۲۰۰۶). دمای ۲۰ تا ۲۴ درجه سانتی‌گراد در اوایل دوره رشد و دمای ۲۷ درجه سانتی‌گراد در دوران دانه‌بندی برای کنجد مناسب است. دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد موجب تسریع سبز شدن، رشد اولیه و گلدهی می‌گردد. دمای زیر ۲۰ درجه سانتی‌گراد سبب نقصان سرعت سبز شدن و رشد و دمای زیر ۱۰ درجه سانتی‌گراد موجب توقف جوانه‌زنی و رشد گردیده و باعث عقیمی گیاه می‌شود. به‌طور کلی دمای ۲۵ تا ۲۷ درجه سانتی‌گراد (میانگین شبانه روز) برای رشد کنجد مناسب و دماهای بیشتر از ۳۴ و کمتر از ۱۸ درجه سانتی‌گراد برای رشد آن نامناسب هستند (خواجه پور، ۱۳۸۳). تکمیل سیکل حیاتی ارقام زودرس کنجد مستلزم تجمع حدود

۱۳۰۰ تا ۱۶۰۰ واحد دمایی استاندارد می‌باشد. کنجد در اصل گیاهی روز کوتاه است، اما اکثر ارقام زراعی آن نسبت به طول روز بی‌تفاوتند (آکپان و میساری، ۲۰۰۷). گیاه کنجد ریشه توسعه یافته‌ای دارد که آن را تا حدی به خشکی مقاوم می‌سازد. البته خشکی بیش از اندازه نیز سبب کاهش محصول می‌گردد. گل-دهی و دانه بندی حساس‌ترین مراحل رشدی کنجد نسبت به کم‌آبی می‌باشد. گیاه کنجد به آب ایستادگی بسیار حساس است و آب ایستادگی به‌ویژه در مرحله گیاهچه‌ای می‌تواند رشد و عملکرد گیاه را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. توسعه بیماری‌ها نیز در شرایط آب ایستادگی زیاد است و سبب خسارت به کنجد می‌شود. بنابراین زه‌کشی آب در شرایط بالایی سفره آب زیرزمینی و یا احتمال وقوع آب ایستادگی ضرورت دارد. خاک‌های دارای بافت متوسط شامل لوم، لوم شنی ریز و لوم سیلتی با ساختمان خوب و باروری متوسط برای کنجد ایده‌آل به‌شمار می‌روند. ولی گیاه در طیف وسیعی از خاک‌ها رشد می‌کند و خاک‌های نیمه سنگین و فقیر را نیز تحمل می‌کند (خواجه پور، ۱۳۸۳). کنجد در خاک‌های اسیدی و کم قلیایی رشد می‌کند، ولیpH حدود خنثی را ترجیح می‌دهد، با این‌حال دامنه pH بین ۵/۵ تا ۸ را تحمل می‌کند. با وجود این‌که کنجد به‌طور کلی جزء گیاهان حساس به شوری محسوب می‌شود، مطالعاتی درباره تنوع در میزان این تحمل در واریته‌های مختلف وجود دارد. به‌عنوان مثال، مطالعه کوکا و همکاران (۲۰۰۶) نشان داد که تا شوری پنج دسی‌زیمنس بر متر تفاوت چندانی بین خصوصیات مورفولوژیکی دو واریته کنجد نسبت به شاهد وجود ندارد، ولی با افزایش شوری تا ۱۰ دسی زیمنس بر متر ارتفاع گیاه، وزن تر و خشک اندام هوایی، طول ریشه و وزن تر و خشک ریشه کاهش یافت. در صورتیکه در بررسی گابالا و همکاران (۲۰۰۷) مشاهده شد رشد گیاه کنجد تا شوری ۲/۳ دسی زیمنس بر متر تحت تأثیر قرار نگرفت، ولی با افزایش شوری به ۴/۷ دسی زیمنس بر متر، ارتفاع و وزن خشک ساقه به ترتیب ۴۳ و ۷۶ درصد نسبت به شوری ۲/۳ دسی زیمنس بر متر کاهش یافت. از سوی دیگر، گزارش محمود و همکاران (۲۰۰۳) در مورد کنجد نشان داد که سطوح پایین شوری

تا ۶۰ میلی‌مولار کلرید سدیم رشد را افزایش داد، در حالی که با افـزایش سـطح شوری به بالاتر از آن، ارتفـاع گیـاه، تعـداد بـرگ، وزن خشـک انـدام هوایی، عملکرد و اجزاء آن کاهش یافت. کنجد به باد نیز به شدت حساس می‌باشد چرا که باد نه تنها موجب خوابیدگی محصول می‌شود، بلکه سبب ریزش دانه نیز می‌گردد و عملیات خشک کردن محصول را در شرایط سنتی بسیار مشکل می‌سازد (خواجه پور، ۱۳۸۳).

۲-۴- مراحل رشد و نمو

از نظر تصمیم‌گیری‌های زراعی، می‌توان مراحل نمو کنجد را شامل سبز شدن، تشکیل برگ‌ها، شروع تشکیل جوانه گل، شروع گل‌دهی، شروع نیام‌بندی، گل‌دهی کامل، شروع رسیدگی فیزیولوژیک و رسیدگی فیزیولوژیک کامل دانست. مرحله شروع گل‌دهی اولین روزی است که درآن اولین گل باز شده در روی ساقه اصلی ۵۰ درصد از بوته‌ها مشاهده شود. مرحله رسیدگی فیزیولوژیک کامل هنگامی است که ۷۵ درصد نیام‌های روی ساقه اصلی ۵۰ درصد از بوته‌ها به رنگ قهوه‌ای درآمده باشند (خواجه پور، ۱۳۸۳).

۲-۵- موارد مصرف کنجد

۶۵ درصد از دانه کنجد تولید شده در سطح جهان به منظور استخراج روغن و ۳۵ درصد آن در صنعت و تهیه غذا به‌کار گرفته می‌شود (سیراتو یاسوموتو و همکاران، ۲۰۰۱). مهمترین کاربرد دانه کنجد استخراج روغن از آن است. میزان روغن دانه کنجد از ۴۵ تا بیش از ۶۰ درصد متغیر می‌باشد. روغن کنجد از روغن‌های مایع، نیمه خشک و با مرغوبیت و پایداری زیاد است. وجود اسید چربی به نام سسامولین[1]در روغن کنجد که در اثر تجزیه به یک ماده ضداکسیداسیون به نام سسامول[2]تبدیل می‌گردد، موجب افزایش ثبات و پایداری روغن کنجد شده است (خواجه پور، ۱۳۸۳). روغن کنجد دارای اسیدهای چرب

1-Sesamolin
2-Sesamol

اولئیک[1] (۳۲/۷ تا ۵۳/۹ درصد) ، لینولئیک[2] (۳۹/۳ تا ۵۹ درصد)، پالمتیک[3] (۸/۳ تا ۹/۳ درصد) ، استئاریک[4] (۳/۴ تا ۶ درصد) و کمتر از ۲ درصد اسید لینولنیک[5] می‌باشد. بالا بودن درصد اسید چرب اولئیک سبب پایداری و مقدار قابل توجه اسید لینولئیک سبب افزایش کیفیت روغن و مناسب بودن آن برای تغذیه انسان شده است. میزان اسیدهای چرب اشباع و غیراشباع در روغن کنجد به ترتیب ۱۵ و ۸۵ درصد می‌باشد (کوکا و همکاران، ۲۰۰۶). رنگ روغن تصفیه شده کنجد از زرد روشن تا زرد پررنگ متغیر می‌باشد. روغن نیمه خشک شونده کنجد با ضریب یدی ۱۰۰ تا ۱۳۰ به‌صورت تجاری به‌عنوان روغن‌های سالادی به‌کار می‌رود. این روغن همچنین در صنعت داروسازی، تولید مارگارین، صنایع صابون‌سازی، در عطرسازی به‌عنوان ماده تثبیت کننده و در ساخت مواد آرایشی به‌کار می‌رود. دانه کنجد ممکن است به-صورت خام، برشته شده یا سرخ شده مصرف خوراکی داشته باشد و یا ممکن است جهت تولید روغن‌های ترکیبی قبل از آسیاب شدن با سایر دانه‌ها مخلوط شود (گابالا و همکاران، ۲۰۰۷). دانه‌های سفید و زرد کنجد به‌صورت کامل در تهیه نان، کیک و شیرینی مورد استفاده قرار می‌گیرند. دانه و برگ کنجد به‌عنوان داروی گیاهی در طب سنتی کاربرد دارد. تولید ارده، حلوا ارده و حلوا شکری از دیگر کاربردهای مهم دانه کنجد می‌باشد. همچنین ساقه و بقایای حاصل از خرمن‌کوبی کنجد را می‌توان به‌عنوان علوفه دام مصرف نمود، اما در اغلب موارد به‌عنوان سوخت مصرف می‌گردد (خواجه پور، ۱۳۸۳). اجزاء فرعی روغن کنجد یعنی سسامین و سسامول به‌عنوان ترکیبات مؤثره برای ساخت حشره‌کش پیریترین استفاده می‌شود (گابالا و همکاران، ۲۰۰۷). علاوه بر مصارف صنعتی و تغذیه‌ای، کنجد دارای خواص درمانی نیز می‌باشد،

1-Oleic acid
2-Linoleic acid
3-Palmitic acid
4-Stearic acid
5-Linolenic acid

به طوری‌که در برخی از کشورها از آن به‌عنوان ملین و حتی برای درمان بیماری‌هایی از جمله سرماخوردگی و سرطان استفاده می‌شود (کوکا و همکاران، ۲۰۰۶).

۲-۶- تنش‌های محیطی

تنش[1]در اصل یک مفهوم مکانیکی است که دانشمندان آن را به‌عنوان نیروی وارد بر سطح یک جسم تعریف کرده‌اند ولی در مقیاس بیولوژیکی و در سطح گیاه هر گونه عامل محدود کننده خارجی که سبب عدم رسیدن توان تولیدی گیاه به پتانسیل ژنتیکی آن شود نوعی تنش محسوب می‌شود. درتعریفی دیگر تنش به‌صورت هر نیرو یا تأثیر نامطلوبی که به جلوگیری از فعالیت‌های معمول سیستم منجر شود، تعریف شده است (احمدی و همکاران، ۱۳۸۶). به‌طورکلی، رشد و عملکرد گیاهان زراعی وابسته به عوامل محیطی متعدد و اثرات متقابل آن‌ها می‌باشد. رطوبت، دما، نور، مواد غذایی و گازها بسته به مقدار آن‌ها در محیط می‌توانند رشد و نمو گیاه را افزایش یا کاهش دهند. تنش‌های محیطی در حقیقت عوامل محدود کننده رشد می‌باشند که موجب کاهش عملکرد گیاهان می‌شوند. تنش را می‌توان نتیجه روند غیرعادی فرآیندهای فیزیولوژیکی نیز تعریف کرد که از تأثیر یک یا ترکیبی از عوامل زیستی و محیطی حاصل می-شود (پسارکلی، ۲۰۱۶). بر این اساس تنش‌های محیطی را می‌توان به دو دسته تنش‌های زیستی[2]و تنش‌های غیر زیستی[3](فیزیکو شیمیایی[4]) تقسیم بندی نمود. از میان تنش‌های غیر زنده خسارت وارده به گیاهان در اثر تنش‌های خشکی، شوری و دما در سطح جهان گسترده‌تر بوده و به همین جهت بیشتر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در طبیعت یک تنش به ندرت در غیاب تنش‌های دیگر رخ می‌دهد، از این‌رو تجزیه و تحلیل اثرات تنش‌هایی مانند تنش دمایی و آبی، و یا تنش شوری و خشکی به تفکیک مشکل است، اما خوشبختانه در اکثر موارد همبستگی خوبی بین مقاومت به تنش‌های مختلف وجود دارد. وجود

1-Stress
2-Biotic stress
3-Abiotic stress
4-Physicochemical

این همبستگی‌ها اصلاح گیاهان را برای مقاومت در مقابل تنش‌های مختلف محیطی که در شرایط بسیار متنوع مزرعه رخ می‌دهد، آسان‌تر می‌کند (سرمدنیا، ۱۳۷۷).

۲-۷- تنش شوری

شوری پس از خشکی به‌عنوان مهمترین تنش غیرزنده شناخته می‌شود و عملکرد بسیاری از گیاهان زراعی را در مناطق مختلف دنیا تحت تأثیر قرار می‌دهد (سایرام و همکاران، ۲۰۰۲). غلظت یون‌های معدنی در محیط گیاه می‌تواند از نقصان و کمبود تا وفور متفاوت باشد. از واژه تنش شوری برای بیان وجود بیش از حد یون‌ها (کاتیون‌ها و آنیون‌ها)، در محلول خاک استفاده می‌شود. این املاح در درجه اول سدیم، کلر و سپس بی‌کربنات‌ها، سولفات‌ها، کلسیم، منیزیم، بر و به ندرت نیترات‌ها می‌باشند (احمدی و همکاران، ۱۳۸۶).

در تعریف دیگری از شوری، خاک شور به خاکی اطلاق شده است که غلظت نمک‌های محلول مانند سولفات‌ها، بی‌کربنات‌ها و نیترات‌ها در آن به قدری باشد که موجب کاهش عملکرد در گیاهان شود، مشروط بر آن‌که سایر عوامل مانعی برای رشد محصول ایجاد نکند (ایزدی دربندی و همکاران، ۱۳۹۱). تنش شوری در گیاهانی به‌وجود می‌آید که در خاک‌هایی با املاح زیاد رشد کنند. شوری در این خاک‌ها به دلیل آبیاری با آب شور، عدم وجود بارندگی کافی در مناطق خشک و نیمه خشک به منظور شستشوی نمک‌های تجمع یافته در لایه سطحی خاک، وجود مواد مادری و رسوبات بادی شور، زهکشی ضعیف و صعود موئینگی آب از سفره آب زیرزمینی شور نزدیک به سطح زمین به‌وجود می‌آید (میرمحمدی میبدی، ۱۳۸۱). اگر چه تنش شوری به دلیل بیش بود یون‌ها در محلول خاک می‌باشد، اما تفاوت فاحشی میان تنش شوری و تنش یونی وجود دارد. زمانی که غلظت نمک در محلول خاک به حدی برسد که پتانسیل آب خاک را به‌طور قابل ملاحظه‌ای (۰/۵ تا ۱ بار) کاهش دهد، شوری رخ می‌دهد. اما به وضعیتی که تنش

وجود داشته باشد، ولی غلظت نمک به‌قدری نباشد که پتانسیل آب را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد، تنش یونی اطلاق می‌شود. شوری خاک نسبت به زمان و مکان تغییر می‌کند و بستگی زیادی به متغیرهای محیطی از جمله دما و شدت نور دارد. به طوری‌که دما و شدت بالای نور از طریق افزایش شدت تبخیر میزان شوری خاک را بیشتر می‌کند (میرمحمدی میبدی، ۱۳۸۱). از جمله روش‌های معمول برای تعیین شوری خاک، اندازه‌گیری هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (EC[1]) می‌باشد. بر این اساس مرز بین خاک شور و غیرشور هدایت الکتریکی ۴ دسی زیمنس بر متر برای عصاره اشباع خاک می‌باشد (بایبوردی و طباطبایی، ۲۰۱۰).

یکی از مشکلات عمده کشاورزی در مناطق خشک و نیمه خشک کشور علاوه بر خاک نامرغوب، کمبود منابع آب با کیفیت مناسب نیز می‌باشد. وجود آب‌های شور موجب محدودیت برای توسعه کشاورزی و استفاده بهینه از منابع آب و خاک می‌گردد. در رابطه با مصرف آب‌های شور در زراعت، مطالعات مختلفی صورت گرفته است. در مطالعه فیضی (۱۳۸۳) عملکرد گندم با شور شدن کیفیت آب آبیاری از ۲ دسی زیمنس در متر به ۸ دسی زیمنس در متر ۳۱ درصد کاهش یافت. یزدانی (۱۳۹۳) در بررسی تأثیر آب شور در مراحل مختلف رشد گندم و خواص خاک نتیجه‌گیری نمود که با افزایش تعداد مصرف آب شور عملکرد زهکش کاهش می‌یابد و همچنین شوری عصاره اشباع خاک و درصد سدیم تبادلی و مقادیر کاتیون‌ها و آنیون‌های عصاره اشباع خاک افزایش داشت. براساس نتایج ایشان که حاصل ۳ سال مصرف کیفیت‌های مختلف آب آبیاری برای گیاه یونجه بود، آبیاری با آب دارای شوری ۲ دسی زیمنس بر متر ۹۳ تن در هکتار علوفه تر تولید کرد در حالی‌که در تیمار مصرف آب با شوری ۹ دسی زیمنس بر مترعملکردی حدود ۷۰ تن در هکتار به‌دست آمد. متوسط شوری عصاره اشباع لایه‌های خاک (تا عمق ۲ متری) نیز با افزایش آب آبیاری افزایش یافت. بیک و همکاران (۲۰۰۴) تأثیر دراز مدت مصرف

1-Electrical conductivity

آب‌های شور را بر رشد و عملکرد محصولات مختلف (تناوب برنج، ذرت، ارزن و گندم) مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که شوری پروفیل خاک در سال‌های اول به‌سرعت افزایش داشته است. ولی بعد از گذشت ۵ سال متوسط غلظت املاح در عمق ۹۰-۰ سانتی‌متری پروفیل خاک تغییر قابل توجهی نداشت. شوری عصاره اشباع خاک (ECe) در هر دو تناوب زراعی تقریباً با شوری آب آبیاری مساوی شد. همچنین ترابیان و زاهدی (۱۳۹۲) مراحل جوانه‌زنی و رشد آفتابگردان را در سطوح مختلف شوری مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده نمودندکه پس از شوری ۶ دسی زیمنس بر متر پارامترهای رشدی آفتابگردان از جمله وزن تر و خشک ساقه، وزن تر و خشک برگ و وزن تر و خشک اندام هوایی شروع به کاهش کرد.

۲-۸- نحوه و میزان گسترش شوری در ایران و جهان

زمین سیاره‌ای شور است که بیشتر سطح آن را آب شوری با غلظت ۳۰ گرم در لیتر نمک پوشانده است. همین نمک محلول است که زمین‌هایی را که در آن امکان رشد گیاهان زراعی وجود دارد تحت تأثیر قرار می‌دهد (مونس، ۲۰۰۲). سطح اراضی کره زمین ۱۳/۲ میلیارد هکتار است که ۷ میلیارد هکتار از آن قابل کشت و ۱/۵ میلیارد آن تحت کشت می‌باشد. از مجموع اراضی تحت کشت ۰/۳۴ میلیارد هکتار (۲۳ درصد) اراضی شور و ۰/۵۶ میلیارد هکتار (۳۷ درصد) خاک‌های سدیمی می‌باشند. خاک‌های شور و سدیمی نه تنها در مناطق خشک و نیمه خشک به وفور یافت می‌شوند، بلکه در سایر شرایط آب و هوایی به دلیل حمل نمک توسط سیلاب‌ها و رسوبات بادی نیز یافت می‌شوند (کوکا و همکاران، ۲۰۰۷). سالیانه بیش از یکصد هزار هکتار از اراضی کشاورزی فاریاب جهان به سمت شور شدن پیش می‌رود. از طرفی یک سوم اراضی شور دنیا در آسیا یافت می‌شود و تقریباً تمامی کشورهای این قاره دارای مشکل خاک‌های شور می‌باشند. در آسیا بیشترین مساحت اراضی شور پس از کشورهای هند و پاکستان متعلق به ایران است. ایران دارای وسعتی معادل ۱۶۴۸۸۰۰ مترمربع می‌باشد. تخمین زده می‌شود بین ۱۸ تا ۲۷

میلیون هکتار از اراضی کشور با مشکل شوری مواجه می‌باشد که چیزی در حدود ۱۵-۱۰ درصد کل اراضی کشور را تشکیل می‌دهد (ایزدی دربندی و همکاران، ۱۳۹۱). کشور ایران با میانگین بارندگی حدود ۲۵۰ میلی‌متر در سال که حتی از یک سوم متوسط بارندگی در سطح دنیا کمتر می‌باشد، جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا به‌حساب می‌آید. میزان تبخیر سالیانه از ۷۰۰ میلی‌متر در نواحی ساحلی تا ۴۰۰۰ میلی‌متر در کویر متغیر می‌باشد، بنابراین در چنین شرایط آب و هوایی کمبود بارندگی و تبخیر شدید از مهمترین عوامل تجمع نمک محسوب می‌شود (بایبوردی و طباطبایی، ۲۰۱۰). هوازدگی کانی‌ها، نمک‌های فسیلی و آب‌های سطحی و زیرزمینی از دیگر فرآیندهای طبیعی ایجاد کننده شوری می‌باشد (سایرام و همکاران، ۲۰۰۲).

علاوه بر فرآیندهای طبیعی ذکر شده، فعالیت‌های انسانی نیز می‌تواند سبب گسترش و ایجاد شوری شود. این نوع گسترش شوری که به آن شوری ثانویه اطلاق می‌شود به دلیل فعالیت‌های انسان بالاخص روش‌های نادرست آبیاری به‌وجود آمده و در حال گسترش می‌باشد. انجام آبیاری‌های بی‌رویه به‌ویژه در نواحی خشک و نیمه‌خشک که سرعت تبخیر بالایی دارند، باعث تجمع نمک موجود در آب آبیاری می‌شود و از این راه سالانه مقادیر زیادی نمک در سطح خاک افزایش می‌یابد (گابالا و همکاران، ۲۰۰۷). همچنین غلظت‌های بسیار زیاد نیتروژن و گوگرد اتمسفری که بیشتر در نزدیکی نواحی صنعتی بر اثر فعالیت‌های بشر یافت می‌شود، نیز به مرور رسوب نموده و موجب افزایش میزان نمک‌های موجود در خاک می‌شود (کوکا و همکاران، ۲۰۰۷). چرای بی‌رویه و تسطیح نامناسب اراضی، کشت زمین‌های با قابلیت کشت پایین، از بین بردن جنگل‌ها و استفاده بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی نیز از جمله فعالیت‌های بشر می‌باشد که باعث گسترش شوری در مدت زمانی طولانی‌تر می‌شود (پسارکلی، ۲۰۱۶).

۲-۹- طبقه بندی گیاهان از لحاظ مقاومت به شوری

گیاهان را می‌توان بر مبنای عکس العمل آن‌ها به شوری به دو گروه هالوفیت‌ها[1] و گلیکوفیت‌ها[2] تقسیم کرد. هالوفیت‌ها گیاهانی هستند که بدون آنکه آسیب جدی و قابل توجهی را متحمل شوند قادر به رشد در محیط‌های شور می‌باشند. به این دسته از گیاهان اصطلاحاً شورپسند اطلاق می‌شود این گیاهان قادرند حتی در محیط‌هایی تا ۶ درصد کلرید سدیم چرخه زندگی خود را کامل نمایند. از واکنش‌های اصلی این گیاهان در مقابل تنش شوری می‌توان به ذخیره یون‌های غیر آلی و تنظیم اسمزی[3] تقسیم مؤثر ترکیبات محلول بین واکوئل و سیتوپلاسم، تشکیل غده‌های نمکی[4] و انتقال نمک به آن‌ها، جذب بیشتر آب و گوشتی کردن اندام‌ها، خواب موقت و کوتاه کردن فصل رشد اشاره کرد (پسرکلی، ۲۰۱۶).

در مقابل هالوفیت‌ها، گیاهان حساس به شوری یا گلیکوفیت‌ها قرار دارند. گلیکوفیت‌ها مقاومت اندکی به شوری در ناحیه ریشه دارند و نمی‌توانند به‌خوبی در محیط شور رشد نمایند. به این گروه از گیاهان شیرین پسند گفته می‌شود و تقریباً تمام گونه‌های گیاهان زراعی جزء این دسته هستند. گلیکوفیت‌ها در شرایط بدون تنش دارای رشد سریعتری در مقایسه با هالوفیت‌ها می‌باشند. بیشتر گونه-های مهم زراعی از جمله پنبه، چغندر قند، گندم، جو و برنج در این گروه قرار دارند که البته مقاومت آن‌ها به شوری متفاوت می‌باشد (پسرکلی، ۲۰۱۶).

۲-۱۰- تأثیر شوری بر گیاه

مشکل اصلی شوری برای گیاهان عالی به دلیل مقادیر بیش از حد NaCl می‌باشد که به‌طور گسترده در مناطق ساحلی، خاک‌های مناطق خشک و زمین‌های فاریاب پخش شده است. جدا کردن نقش‌های سدیم و کلر در تنش شوری در گیاهان کمتر مورد بررسی قرار گرفته و بیشتر تحقیقات روی آثار سدیم می‌باشد.

1-Hallophytes
2-Glycophytes
3-Osmotic adjustment
4-Salt glands

شوری زیاد در اثر NaCl دو مشکل عمده برای گیاهان عالی ایجاد می‌کند:

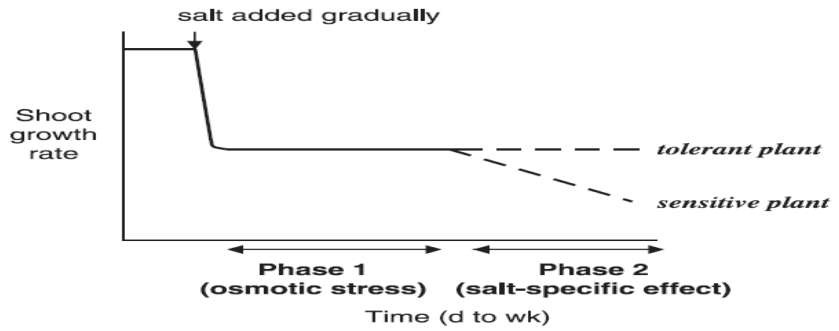
۱- در شرایط شور فشار اسمزی محلول خارجی می‌تواند نسبت به فشار اسمزی گیاه کاهش یابد و توانایی گیاه برای جذب آب را کاهش دهد و از این طریق منجر به کاهش رشد شود. این تأثیر شوری اثر اسمزی[1] یا خشکی فیزیولوژیک[2] نامیده می‌شود.

۲- سدیم و کلر در سطوح بالا می‌توانند وارد جریان تعرقی گیاه شوند و از این طریق به سلول‌های برگ‌های در حال تعرق خسارت وارد نمایند و در نتیجه، سبب کاهش رشد شوند. این قسمت از کاهش رشد در نتیجه اثر ویژه نمک و یا اثر یون زیاد خواهد بود.

این دو نوع اثر منجر به یک پاسخ دو فازی می‌شود که در شکل ۲-۱ آورده شده است. در طی فاز ۱، رشد هر دو ژنوتیپ حساس و متحمل به دلیل اثرات اسمزی محلول نمک خارج از ریشه کاهش می‌یابد. در طی فاز ۲، برگ‌ها در ژنوتیپ حساس‌تر می‌میرند و ظرفیت فتوسنتزی گیاه کاهش می‌یابد. این مرحله اثر مضاعفی را بر رشد گیاه خواهد داشت (مونس، ۲۰۰۵ و ۲۰۰۲).

به‌طورکلی اثرات نامطلوب شوری بر گیاه به دلیل تأثیر یون‌ها بر پتانسیل اسمزی محلول خاک می‌باشد، که به نوبه خود بر وضعیت آب گیاه اثر می‌گذارد. تنش اسمزی ناشی از تنش شوری با کاهش فشار تورژسانس منجر به پژمردگی گیاه می‌شود. کاهش فشار تورژسانس همچنین سبب ممانعت از تقسیم و طویل شدن سلول‌ها و بسته شدن روزنه‌ها در ژنوتیپ‌های حساس می‌شود. همچنین اثرات مستقیم و سمی یون‌ها نیز می‌تواند بر وظایف فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی سلول تأثیرگذار باشد. این اثرات زمانی بروز می‌کنند که غلظت یک یا چند یون خاص در محیط رشد گیاه افزایش یابد و موجب کاهش فشار تورژسانس، ممانعت از اعمال غشاء و فعالیت آنزیم‌ها و اختلال در عمل فتوسنتز می‌شود (مونس، ۲۰۱۵).

1-Osmotic effect
2-Physiological drought



شکل۲-۱- پاسخ دومرحله‌ای گیاهان به شوری، که در رسیدن غلظت نمک به سطح سمی‌در برگ‌ها تفاوت دارند. برای گونه‌های یکساله، مقیاس زمانی روز (d) یا هفته (wk) و بسته به نوع گونه و سطح شوری است. برای گونه‌های چند ساله، مقیاس زمانی ماه یا سال است (مونس، ۲۰۰۵).

شوری به‌طور غیرمستقیم نیز رشد گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در غلظت‌های بالای نمک رقابتی از لحاظ میزان جذب بین یون‌های نمک (Na^+ و Cl^-) و دیگر عناصر غذایی از قبیل کلسیم، پتاسیم، نیتروژن و فسفر روی می‌دهد که باعث کاهش کارایی در جذب عناصر غذایی و در نتیجه کاهش رشد گیاه می‌شود. در این میان جذب نیتروژن بیشتر از سایر عناصر تحت تأثیر قرار می‌گیرد (گابالا و همکاران، ۲۰۰۷). همچنین غلظت بالای املاح و به‌ویژه غلظت بالای سدیم سبب تخریب خاک می‌شود و چون تخلخل کاهش می‌یابد، هدایت هیدرولیکی و تهویه خاک در چنین خاکی ضعیف می‌شود و رشد گیاه را متأثر می‌کند. علاوه بر این وضعیت میکروارگانیسم‌های خاک نیز تا حدود زیادی وابسته به شوری است، به‌طوری‌که میکروارگانیسم‌های درگیر در عمل نیتریفیکاسیون با افزایش شوری خاک تحت تأثیر قرار می‌گیرند (احمدی و همکاران، ۱۳۸۶).

از آن‌جا که نمک طعام مهمترین نمک ایجاد کننده شوری در سطح جهان می‌باشد، تاثیر دو یون موجود در این نمک بر گیاهان بیشتر مورد مطالعه قرار گرفته است. هرچند آثار مخرب آنیون کلر و کاتیون سدیم بسیار متفاوت می‌باشد، اما نتیجه نهایی اثر این دو یون کاهش پتانسیل فتوسنتزی گیاه، کاهش میزان جذب هیدرات‌های کربن و در نهایت کاهش عملکرد می‌باشد (منگل، ۲۰۱۶). البته یون‌ها به

صورت مستقل عمل نمی‌کنند و برهم‌کنش‌هایی به‌ویژه بین یون‌های سدیم با کلسیم و پتاسیم وجود دارد. با افزایش غلظت کلسیم و پتاسیم از سمیت سدیم در گیاهان تحت تنش کاسته می‌شود. در محیط‌های شور سدیم جانشین کلسیم و پتاسیم می‌شود و از این طریق موجب آسیب و خسارت به گیاه می‌شود (احمدی و همکاران، ۱۳۸۶ و کومار و همکاران، ۲۰۱۱). به‌طورکلی اثر مخرب شوری بر گیاه تابع عوامل متعددی از جمله نوع و غلظت نمک، مدت زمان تنش، بافت و ساختمان خاک، مرحله رشدی گیاه و سایر عوامل محیطی و برهم‌کنش بین آن‌ها می‌باشد (منگل، ۲۰۱۶).

۲-۱۱- مکانیسم‌های مقاومت به شوری در گیاهان

مقاومت به شوری غالباً به پیچیدگی‌های فیزیولوژیکی و ساختاری گیاهان بستگی دارد. عواملی نظیر گونه گیاهی، شرایط محیطی، نوع نمک‌های محلول خاک و همچنین مرحله رشد و رقم گیاه روی تحمل و مقاومت گیاه در برابر شوری مؤثر می‌باشد (پسرکلی، ۲۰۱۶).

هنگامی که گیاهان با تنش شوری روبرو می‌شوند، بسته به ژنوتیپ مکانیسم‌های مختلفی را هم در سطح سلول (تجمع یون و مواد اسمولیت[1]در واکوئل‌ها و تنظیم اسمزی در سیتوپلاسم) و هم در سطح گیاه (تولید غدد نمکی و ترشح نمک به خارج از پیکره گیاه، محصور سازی یون‌ها در ریشه و انتخابی عمل کردن در جذب یون‌ها) به منظور فائق آمدن بر اثرات نامطلوب تنش به‌کار می‌گیرند (شیرواستاوا و کومار، ۲۰۱۵).

همانند مقاومت در برابر سایر تنش‌های محیطی مقاومت به شوری نیز شامل اجتناب از شوری و تحمل به شوری می‌باشد. اجتناب از شوری زمانی روی می‌دهد که گیاه از طریق مکانیسم‌هایی مانند جذب آب اضافی یا دفع نمک از تغییر حالت سلول‌ها در مواجهه با مقادیر زیاد نمک جلوگیری کند. در

1-Osmolytes

حالی‌که تحمل به شوری هنگامی روی می‌دهد که نمک در سلول‌های گیاه تجمع یابد و گیاه با مکانیسم-هایی مانند تولید مواد محلول معدنی و آلی به تنش شوری واکنش دهد (پسرکلی، ۲۰۱۶).

۲-۱۱-۱- اجتناب از شوری

اجتناب از شوری به معنای پرهیز سلول‌های گیاه از مواجهه با غلظت‌های بالای یونی در شرایط شور می‌باشد. طی این سازوکار گیاهان از طریق کنترل جذب یونی، حذف نمک[1] رقیق کردن نمک[2] و ذخیره و نگهداری نمک در اندامک‌های مختلف[3] از شوری اجتناب می‌کنند (پسرکلی، ۲۰۱۶).

۱- کنترل جذب یونی و ممانعت از انتقال نمک از طریق جریان تعرق

تجمع سدیم در ریشه و عدم انتقال آن به اندام هوایی از جمله ساز و کارهایی می‌باشد که در برخی از گیاهان به منظور اجتناب از شوری به‌کار گرفته می‌شود. از آنجایی‌که غشای پلاسمایی اولین محل در مقابله با ورود یون‌های مضر به داخل گیاه می‌باشد، ایجاد یک سیستم فیلتری در غشای ریشه می‌تواند از ورود یون‌های نمک به داخل گیاه جلوگیری کند. ممانعت از ورود یون‌ها به داخل ریشه از تفاوت‌های مهم بین واریته‌های حساس و مقاوم می‌باشد (منگل، ۲۰۱۶). ممانعت از جذب یون‌های نمک توسط سلول‌های غشای پلاسمایی ریشه هیچ‌گاه به‌طور کامل انجام نمی‌شود، وجود غلظت‌های بالای نمک در ناحیه‌ی ریشه گیاه سبب جذب نمک به همراه سایر عناصر غذایی می‌شود. پس از ورود یون‌های نمکی به داخل گیاه سلول‌های پارانشیم آوند چوبی نیز می‌توانند به‌عنوان یک مانع غشایی از ورود نمک به جریان تعرق ممانعت کنند. به‌عبارتی این سلول‌ها با ورود مجدد نمک از جریان تعرق باعث کاهش غلظت نمک در شیره خام می‌شوند. ممانعت از جذب نمک به داخل سیتوپلاسم به‌صورت دائم نیست و گیاه بالاخره در برابر نمک تسلیم شده و از بین می‌رود، مگر آنکه سرعت رشد آن به اندازه‌ای زیاد باشد که مخازن ذخیره

1-Salt exclusion
2-Salt dilution
3 Salt compartmentation

نمک پر نشوند و بدین طریق از ورود نمک به درون بافت‌های حساس جلوگیری گردد (رانجیوا و همکاران، ۲۰۰۶). برخی از گونه‌های زراعی نیز تا حدی قادرند از طریق انتقال نمک به داخل غشای برخی از اندامک‌ها از جمله واکوئل از ورود نمک به داخل جریان تعرق ممانعت کنند. با این‌حال بسیاری از گیاهان به‌دلیل عدم توانایی در نگهداری Na^+ و Cl^- خارج از جریان تعرق نمی‌توانند در مقابل غلظت‌های اضافی نمک تحمل نموده و در نتیجه نسبت به شوری حساس می‌باشند (میرمحمدی میبدی و قره‌یاضی، ۱۳۸۱).

۲- حذف نمک

تشکیل‌غده‌های نمکی در سطح برگ یا ساقه از دیگر مکانیسم‌هایی است که برخی از گیاهان به‌منظور دفع و حذف نمک به‌کار می‌گیرند. طی این مکانیسم گیاهان هالوفیت اگرچه املاح را جذب می‌کنند، ولی یون‌های نمک را به داخل این غده‌ها ترشح می‌کنند و آن را از دسترس گیاه خارج می‌سازند (تستر و داونپورت، ۲۰۰۳). دفع نمک از طریق غدد نمکی بسیار اختصاصی است، به‌طوری‌که اغلب یون‌های سدیم، کلر و بی‌کربنات بر خلاف شیب غلظت دفع می‌شوند در حالی‌که یون‌هایی مانند کلسیم، نیترات، سولفات و فسفات بر خلاف شیب غلظت حفظ می‌شوند (احمدی و همکاران، ۱۳۸۶). گزارش‌هایی مبنی بر استفاده برخی از گلیکوفیت‌ها نیز از این سازوکار وجود دارد. برای مثال ذرت و سورگوم با استفاده از این ساز و کار نسبت پتاسیم به سدیم خود را بالا نگه می‌دارند (میرمحمدی میبدی و قره‌یاضی، ۱۳۸۱). در همین ارتباط ماکسیموویک و همکاران (۲۰۱۰) بیان داشتند که در برخی از گلیکوفیت‌ها مثل نخود سلول‌هایی در پارانشیم آوندی تجمع پیدا می‌کنند که سدیم را در خود جمع می‌کنند. احتمالاً این عمل با مبادله پتاسیم همراه است و به نظر می‌رسد با این مکانیسم عملاً سدیم از قسمت‌های هوایی گیاه جدا می‌شود. گیاهان خانواده بقولات به‌ویژه یونجه نیز قادرند از طریق ترشح یون سدیم از سلول‌های برگ به خارج از سلول مقدار سدیم در بافت‌ها را کاهش دهند.

۳- رقیق کردن نمک

افزایش غلظت نمک در داخل گیاه آثار مخربی بر سیتوپلاسم دارد و سبب بروز مشکلاتی در فعالیت‌های فیزیکوشیمیایی گیاه می‌شود (کومار و همکاران، ۲۰۱۱). رقیق کردن غلظت یون‌ها یکی از مکانیسم‌های دفاعی گیاهان در مقابله با افزایش نمک در بافت‌های گیاهی می‌باشد. گیاهان رقیق کردن را از طریق افزایش حجم ذخیره‌ای و ایجاد ساختارهای گوشتی ضخیم و یا نازک انجام می‌دهند. در واقع گیاهان به منظور پایین نگه داشتن غلظت نمک در بافت‌ها، همزمان با رشد مقدار زیادی آب را نیز جذب می‌کنند، که به این عمل رقیق کردن شیره سلولی همزمان با رشد گفته می‌شود. هالوفیت‌ها از این طریق و با افزایش مقدار آب سلول‌های مزوفیل و رقیق‌سازی نمک در آپوپلاست نسبت به افزایش موقتی نمک در آپوپلاست مقاومت نشان می‌دهند (میر محمدی میبدی و قره‌یاضی، ۱۳۸۱). چنین مکانیسم‌های رقیق‌سازی شیره سلولی، در برخی از گلیکوفیت‌های مقاوم به شوری مانند جو نیز دیده می‌شود. میزان یون‌های سدیم و کلر درون بافت‌های گیاهی جو طی پنجه‌زنی به سرعت زیاد می‌شود ولی به دلیل رشد سریع، تغییر زیادی در غلظت آن ایجاد نمی‌شود. مشابه این وضعیت در گندم نیز اتفاق می‌افتد. به نظر می‌رسد بستن سریع روزنه‌ها طی تنش شوری نیز با هدف رقیق ساختن نمک شیره سلولی انجام می‌شود (کومار و همکاران، ۲۰۱۱).

۴- ذخیره و نگهداری نمک

بسیاری از گلیکوفیت‌ها به دلیل عدم توانایی نگهداری یون‌های نمک، خارج از جریان تعرق نسبت به شوری حساس می‌باشند. درحالی‌که هالوفیت‌ها با انتقال نمک به داخل اندامک‌هایی از جمله واکوئل از جذب این یون‌ها به داخل جریان تعرق جلوگیری می‌کنند (پسارکلی، ۲۰۱۶). ارسال یون‌های سدیم و کلر به داخل واکوئل‌ها یک نوع اجتناب از شوری به منظور زنده ماندن تحت شرایط تنش می‌باشد، اما سمیت یونی این عناصر تجمع یافته باعث اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیک می‌شود و از این طریق رشد گیاه را

کاهش می‌دهد (تستر و داونپورت، ۲۰۰۳). تجمع یون‌های نمک در اندامک‌هایی نظیر واکوئل تا حد مشخصی از شوری امکان پذیر است. با افزایش شدت تنش و تجمع بالاتر از حد آستانه شوری، گیاه توان کنترلی خود را از دست می‌دهد و یون‌های نمک به بافت‌های حساس مجاور نشت می‌کند که پیامد آن مرگ سلول و به دنبال آن مرگ گیاه می‌باشد. این حد آستانه بسته به نوع و ژنوتیپ گیاه متفاوت است و تفاوت در تحمل برخی از گیاهان به شوری نیز ناشی از همین موضوع می‌باشد (کومار و همکاران، ۲۰۱۱).

۲-۱۱-۲- تحمل به شوری

تحمل به شوری به معنای غلبه سلول‌های گیاه بر غلظت‌های بالای یونی در شرایط شور می‌باشد. این تحمل نوعی مقاومت اجزاء پروتوپلاسمی به تنش شوری می‌باشد و بسته به درجه مقاومت پروتوپلاسم که خود تابعی از گونه گیاهی، نوع بافت و قدرت گیاه است متفاوت می‌باشد (میر محمدی میبدی، ۱۳۸۱).

کاهش در پتانسیل اسمزی در اثر تجمع مواد محلول یکی از واکنش‌های مهم بسیاری از گیاهان در تحمل به شوری است، که به این فرآیند تنظیم اسمزی گفته می‌شود. تنظیم اسمزی سبب منفی‌تر شدن پتانسیل آب برگ و در نتیجه حرکت آب به داخل برگ می‌شود که پیامد آن حفظ تورم سلولی می‌باشد (احمدی و همکاران، ۱۳۸۶). به طور کلی گیاهان به دو روش غلظت درون سلولی خود را بالا می‌برند و بدین وسیله باعث کاهش پتانسیل اسمزی اجزاء داخلی خود می‌شوند، این دو روش شامل افزایش نمک-های معدنی و افزایش سنتز محلول‌های آلی سازگار می‌باشد که هر دو عامل موجب تنظیم اسمزی گیاهان در معرض تنش می‌شوند (میرمحمدی میبدی و قره‌یاضی، ۱۳۸۱).

۱- افزایش نمک های معدنی

خشکی فیزیولوژیک از جمله عوامل آسیب‌رسان به گیاهان طی تنش شوری می‌باشد. افزایش جذب یون‌هایی از قبیل پتاسیم، کلر، سدیم و کلسیم از محلول خاک یکی از راه کارهای اساسی هالوفیت‌ها در پایین نگه داشتن پتانسیل اسمزی اجزاء داخلی خود و در نتیجه تحمل در مقابل کم‌آبی ناشی از تنش

شوری می‌باشد. به این واکنش گیاه در مقابل شوری تنظیم اسمزی گفته می‌شود. میزان تحمل گیاه بسته به یون به‌کار گرفته شده به منظور تنظیم اسمزی متفاوت می‌باشد (تستر و داونپورت، ۲۰۰۳). به‌طور مثال هالوفیت‌هایی که بین سدیم و پتاسیم تمایز قائل هستند و بیشتر از یون پتاسیم برای تنظیم اسمزی استفاده می‌کنند دارای تحمل بیشتری نسبت به هالوفیت‌هایی هستند که از یون سدیم بدین منظور استفاده می‌کنند. برخی از گلیکوفیت‌ها نیز با کاهش انتقال سدیم به برگ و فراهم آوردن غلظت بالای یون پتاسیم در سیتوپلاسم بین این دو کاتیون توازن ایجاد کرده و در نتیجه تحمل به شوری در آن‌ها افزایش می‌یابد (تستر و داونپورت، ۲۰۰۳ و کومار و همکاران، ۲۰۱۱). به‌طورکلی ساز و کار غالب در اکثر گیاهان تحت تنش شوری پایین نگه داشتن غلظت سدیم و بالا نگه داشتن غلظت پتاسیم در اندام هوایی می‌باشد. در واقع بالا نگه داشتن نسبت پتاسیم به سدیم مهمتر از نگهداری پایین غلظت سدیم می‌باشد (تستر و داونپورت، ۲۰۰۳).

۲- افزایش سنتز محلول‌های آلی سازگار

گیاهان عالی در واکنش به پتانسیل پایین آب، از طریق تبدیل فرآورده‌های فتوسنتزی به مواد آلی با وزن مولکولی کم نظیر فروکتان‌ها، اسیدهای آمینه، پرولین، اسیدهای آلی، گلایسین بتائین[1] مانیتول[2] و غیره فشار اسمزی سلول‌ها را تنظیم می‌کنند (پسرکلی، ۲۰۱۶). این قبیل مواد محلول آلی نیز موجب تنظیم اسمزی و در نتیجه نگهداری بیشتر آب و دفع سدیم می‌شوند. بر طبق این نظریه این گونه متابولیت‌ها به این علت مواد محلول آلی سازگار تلقی می‌شوند که می‌توانند در برخی از واکنش‌های بیوشیمیایی جایگزین آب شوند و در واکنش‌های معمول گیاه مداخله نمایند. همچنین مواد محلول آلی سازگار می‌توانند با لیپیدها یا پروتئین‌ها همراه شوند و از فساد و برهم خوردن ساختمان آن‌ها و همچنین از غیرفعال شدن آنزیم‌ها جلوگیری کنند. به همین دلیل است که این متابولیت‌ها را گاهی محافظین با

1-Glycine betaine
2-Mannitol

وزن ملکولی پائین نیز می‌نامند (میرمحمدی میبدی و قره‌یاضی، ۱۳۸۱). اگرچه این مولکول‌ها با نگهداری ساختار پروتئین‌ها گیاه را در مقابل خسارت‌های ناشی از تنش محافظت می‌کنند، اما سنتز این گونه مواد هزینه‌های متابولیکی زیادی را برای گیاه به دنبال دارد که باعث کاهش رشد و عملکرد گیاه می‌شود (تستر و داونپورت، ۲۰۰۳).

۲-۱۲- تنش اکسیداتیو

به‌طورکلی گیاهان، دامنه گسترده‌ای از تنش‌های محیطی را که سرانجام منجر به بروز تنش اکسیداتیو می‌شود، درک می‌کنند. مکانیسم مقاومت در برخی از تنش‌ها به‌صورت یک ارتباط درونی و پیچیده است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد در شرایط تنش، حتی در شرایط غلظت‌های بالای CO_2 محیطی، باز هم فتوسنتز کاهش می‌یابد که بیان کننده این است که دستگاه فتوسنتز جدا از بسته شدن روزنه‌ها، تحت تأثیر قرار گرفته است (میتلر، ۲۰۰۲). در شرایط تنش روزنه‌ها در گیاه بسته می‌شوند و متعاقب آن غلظت CO_2 در بافت مزوفیل کاهش می‌یابد و به دنبال این وضعیت واکنش‌های تاریکی فتوسنتز مختل شده و محصولات حاصل از واکنش‌های روشنایی، که شامل ATP و NADPH می‌باشد، مصرف نمی‌شود. در چنین شرایطی به دلیل عدم مصرف شدن مولکول NADPH، مقدار $NADP^+$ جهت دریافت الکترون کاهش می‌یابد، بنابراین اکسیژن در مسیر زنجیره انتقال الکترون به‌عنوان پذیرنده جانشین الکترون عمل می‌کند و سبب به‌وجود آمدن رادیکال سوپراکسید (O_2^-)، پراکسید هیدروژن (H_2O_2) و رادیکال هیدروکسیل (OH^-) می‌گردد (وگا و همکاران، ۲۰۰۳). گونه‌های فعال اکسیژن (ROS[1]) فرآیندهای اکسیداتیو مخربی از قبیل بی‌رنگ شدن کلروفیل، پراکسیداسیون لیپید و آسیب به اسیدهای نوکلئیک را در گیاه موجب می‌شوند. انواع اکسیژن فعال، برخلاف اکسیژن اتمسفری از میل ترکیبی بسیار بالایی در ترکیب با بیومولکول‌های حیاتی برخوردارند. برخی از نقاط کلیدی متابولیسم تنها از یک نوع

1-Reactive Oxygen Species

آن‌ها آسیب می‌بیند. در حالی که نقاطی وجود دارند که همه انواع اکسیژن فعال از توانایی آسیب رساندن به آنها برخوردار هستند (پسرکلی، ۲۰۱۶).

۲-۱۳- مکانیسم دفاعی گیاه در مقابل انواع اکسیژن فعال

انواع اکسیژن فعال، از محصولات اجتناب ناپذیر متابولیسم سلولی هستند و حتی در شرایط مطلوب محیطی نیز تولید می‌شوند و به بیومولکول‌های حیاتی صدمه می‌زنند (پسرکلی، ۲۰۱۶). به‌علاوه در شبانه روز در حدود ۱۰۰۰۰ مرتبه به DNA یک سلول آسیب وارد می‌گردد. خوشبختانه گیاهان از مکانیسم‌های دفاعی ویژه‌ای برخوردارند که آنها را قادر می‌سازد تا انواع اکسیژن فعال را جمع آوری کرده و یا از تشکیل آنها جلوگیری نماید (کلیس و اونیایار، ۲۰۰۴). در شرایط مطلوب محیطی، میزان تولید انواع اکسیژن فعال با فعالیت مکانیسم‌های دفاعی سلول در تعادل بوده و سلول می‌تواند با جمع آوری عوامل آسیب‌رسان و یا ترمیم نقاط صدمه دیده از بروز تنش اکسیداتیو پیشگیری نماید. اما در شرایط تنش‌های محیطی، میزان تولید انواع اکسیژن فعال بر فعالیت مکانیسم‌های دفاعی سلول غلبه کرده و با آسیب رساندن به نقاط کلیدی متابولیسم، تنش اکسیداتیو را سبب می‌شود (بروسیگم و همکاران، ۲۰۰۱). برای پرهیز از اثرات مخرب و آسیب‌های اکسیداتیو ناشی از تولید ROS به‌ویژه در شرایط تنش، تمام سلول‌های گیاهی مجهز به یک سیستم دفاعی آنتی اکسیدانی کارآمد که متشکل از اجزای آنتی اکسیدانی آنزیمی و غیرآنزیمی است (پسارکلی، ۲۰۱۶). اجزای آنتی اکسیدان غیرآنزیمی به آنتی اکسیدان‌های محلول در آب و محلول در چربی قابل تقسیم بندی هستند. از اجزای آنتی اکسیدانی غیرآنزیمی محلول در آب می‌توان از آسکوربات[1] و گلوتاتیون[2] و از انواع محلول در چربی می‌توان از آلفا توکفرول[3] و بتاکاروتن[4] نام برد.

1-Ascorbate
2-Glutathione
3-Alpha Tocopherol
4-Beta Carotene

مکانیسم‌های دفاعی، اغلب از همکاری آنزیم‌های آنتی اکسیدانی و آنتی اکسیدان‌های غیرآنزیمی تشکیل شده است (میتلر و همکاران، ۲۰۰۴).

۲-۱۳-۱- سوپراکسید دیسموتاز (SOD[1])

SOD اولین سد دفاعی گیاه در برابر تنش اکسیداتیو می‌باشد و نقش اساسی و بارزی در مقابله با گونه-های فعال اکسیژن دارد. این آنزیم یک آنزیم میتوکندریایی است که همراه با گلوتاتیون پراکسیداز[2]موجب پیشگیری از اکسایش و تخریب غشاء میتوکندری می‌شود. این آنزیم به‌عنوان اولین ماده در زنجیره حذف گونه‌های فعال اکسیژن عمل کرده و به‌عنوان یک کاتالیزور رادیکال آزاد $O_2^{\cdot -}$ را به H_2O_2 تبدیل می‌کند. نتایج مطالعات حاکی از افزایش فعالیت آنزیم SOD در پاسخ به تنش‌های محیطی می‌باشد (لاسپینا و همکاران، ۲۰۰۵). بررسی‌ها وجود سه نوع SOD که از نظر بخش کوفاکتور فلزی متفاوتند را در اندامک-های زیر سلولی نشان داده است. این سه نوع شامل Cu/ZnSOD در سیتوپلاسم و استروما، MnSOD در میتوکندری و FeSOD در استرومای برخی از گونه‌ها می‌باشد (کاندان و تارهان، ۲۰۰۳).

۲-۱۳-۲- آسکوربات پراکسیداز (APX[3])

پراکسیدازهای گیاهی پروتئین‌هایی هستند که با استفاده از گروه وسیعی از پیش ماده‌ها از جمله ترکیبات فنولی و آنتی اکسیدان‌هایی نظیر آسکوربات عمل اکسیداسیون H_2O_2 را انجام می‌دهند. APX یکی از پراکسیدازهای اصلی در سمیت‌زدایی از H_2O_2 می‌باشد، و به دلیل تمایل زیادی که نسبت به H_2O_2 دارد پراکسید هیدروژنی را که نمی‌تواند مورد مصرف کاتالاز قرار بگیرد، خنثی می‌کند. فعالیت این آنزیم اولین بار در کلروپلاست و در چرخه گلوتاتیون آسکوربات شناخته شد (مورفی و همکاران، ۲۰۰۲). APX در کلروپلاست و سیتوسول سلول‌های گیاهی فعالیت می‌کند و عمل آن باعث جلوگیری از تخریب

1-Super Oxide Dismotase
2-Glutathione Peroxidase
3-Ascorbat Proxidase

کلروپلاست در غلظت‌های پایین H_2O_2 می‌شود. مکانیسم عمل APX بدین صورت است که در طی چرخه مهلر آنزیم APX با انتقال دو الکترون به H_2O_2 موجب اکسیداسیون این ماده سمی در کلروپلاست می-شود. دو الکترون از دست رفته در مرحله بعد زنجیره واکنش توسط آسکوربات به آنزیم بازگردانده می‌شود. APX بر خلاف کاتالاز و SOD یک آنزیم اختصاصی جاروبگر H_2O_2 در سلول‌های گیاهی می‌باشد و در سلول‌های جانوری و میکروارگانیسم‌ها گزارش نشده است (آسادا، ۲۰۰۰).

آنزیم APX یک پروتئین حاوی آهن می‌باشد، بررسی‌های انجام شده نشان داده است که آهن نقش مهمی در بیان ژن کد کننده APX دارد و در هنگام تنش‌های محیطی سطح بیان ژن و مقدار فعالیت این آنزیم افزایش می‌یابد. فعالیت APX و تمایل آن به H_2O_2 موجب از کاتالاز می‌باشد با این وجود نقش APX در حذف H_2O_2 در درجه دوم اهمیت قرار دارد. لذا برای APX نقش‌های دیگری هم پیشنهاد شده است، که از آن جمله می‌توان به نقش آن در جوانه‌زنی و تنظیم مقدار H_2O_2 به‌عنوان سوبسترا برای سایر آنزیم‌ها اشاره کرد (مورفی و همکاران، ۲۰۰۲).

۲-۱۳-۳-گلوتاتیون ردوکتاز (GR[1])

گلوتاتیون ردوکتاز آخرین آنزیم سیکل آسکوربات-گلوتاتیون است که توسط آسادا در سال ۱۹۹۹ پیشنهاد شده است. این آنزیم موجب احیای گلوتاتیون اکسیداز از طریق NADPH شده و از این طریق موجب ادامه فعالیت آنزیم‌های APX و SOD می‌شود و بدین ترتیب موجب کاهش ROS و افزایش مقاومت گیاهان در مقابل صدمات ناشی از تنش اکسیداتیو می‌شود (هالیول، ۱۹۹۹).

۲-۱۳-۴- کاتالاز (CAT[2])

این آنزیم همانند چرخه گلوتاتیون آسکوربات و پراکسی ردوکسین قادر است پراکسید هیدروژن را تجزیه

1 Glutathione Redoctase
2 Catalase

و به آب تبدیل نمایند. این آنزیم پراکسید هیدروژن حاصل از اکسیداسیون اسیدهای چرب و افزایش فعالیت گلی‌کولات اکسیداز[1]را در پراکسی‌زوم جمع آوری می‌کند و به خنثی سازی H_2O_2 تجمع یافته در پراکسی زوم می‌پردازد. CAT بخش اعظم H_2O_2 را کاتالیز می‌کند و H_2O_2 هایی که در دسترس CAT نیستند، توسط APX پاکسازی می‌شوند (میتلر، ۲۰۰۲).

۲-۱۴- تأثیر تنش‌های محیطی بر میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان

تنش‌های زنده و غیرزنده با تأثیر مستقیم و غیرمستقیم بر وضعیت آب گیاه سبب مختل شدن عمل فتوسنتز و در نهایت القای تنش اکسیداتیو در گیاهان می‌شوند. آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی عمومی‌ترین واکنش گیاهان در مقابله با صدمات ناشی از تنش اکسیداتیو می‌باشند (نیتو و همکاران، ۲۰۰۵). تغییر در فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی به‌طور گسترده در بسیاری از گیاهان تحت تنش مشاهده و گزارش شده است. در همین ارتباط لاسپینا و همکاران (۲۰۰۵) با مطالعه تأثیر تنش کادمیوم بر آفتابگردان افزایش فعالیت CAT را با افزایش سطح آلودگی گزارش کردند. یانارلی و همکاران (۲۰۰۶) نیز با مطالعه اثر تنش نور ماوراء بنفش بر آفتاب‌گردان افزایش فعالیت CAT را در سطوح بالای تشعشع گزارش کردند ولی تفاوت معنی‌داری در میزان فعالیت آسکوربات پراکسیداز در سطوح مختلف تنش در این مطالعه مشاهده نشد.

فنگ و همکاران (۲۰۰۴) با مطالعه روی گندم بیان کردند تنش خشکی موجب افزایش میزان فعالیت CAT و APX می‌شود. کلس و اونیایار (۲۰۰۴) با مطالعه تأثیر تنش غرقابی بر فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی در آفتاب‌گردان، افزایش فعالیت CAT در یکی از ژنوتیپ‌ها را گزارش کردند ولی ژنوتیپ دیگر تفاوت معنی‌داری از لحاظ میزان فعالیت این آنزیم نشان نداد.

3-Glycolate oxidase

تغییر در فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در بسیاری از تنش‌های زنده و غیرزنده مشاهده می‌شود، به‌عنوان مثال می‌توان به تنش کمبود نیتروژن در گندم (پولسکایا و همکاران، ۲۰۰۲) و تنش سرما در ذرت (لوکاتکین، ۲۰۰۲) و سویا (ون هردن و همکاران، ۲۰۰۵) اشاره نمود.

۲-۱۵- تأثیر تنش شوری بر میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان

مطالعات متعددی افزایش میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان را در محیط‌های شور در پنبه، برنج، آفتابگردان، گندم و ذرت گزارش کرده‌اند (ملونی و همکاران، ۲۰۰۳، فادزیلا و همکاران، ۱۹۹۷، ترابیان و همکاران، ۲۰۱۶، وو و همکاران، ۲۰۱۵ و فتحی و همکاران، ۲۰۱۷). فتحی و همکاران (۲۰۱۷) با مطالعه تأثیر تنش شوری بر تغییرات آنتی اکسیدان‌های برگ دو ژنوتیپ مقاوم و نیمه مقاوم گندم دریافتند که شوری در تمام سطوح موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های SOD، CAT و GR می‌شود. همچنین آن‌ها دریافتند که میزان افزایش فعالیت این آنزیم‌ها در ژنوتیپ مقاوم نسبت به ژنوتیپ نیمه مقاوم بیشتراست. در مطالعه نتو و همکاران (۲۰۰۵) بر واکنش‌های آنتی‌اکسیدانی برگ‌های ذرت نسبت به شوری مشخص شد که میزان فعالیت SOD در برگ‌های ژنوتیپ مقاوم ۴۱ درصد و در برگ‌های ژنوتیپ حساس ۲۱ درصد افزایش پیدا می‌کند. همچنین روند افزایشی مشابهی برای سایر آنزیم‌های آنتی اکسیدانی از جمله CAT، APX و GR هم گزارش شد. از طرفی در این آزمایش مشخص شد، فعالیت SOD وCAT در ریشه ژنوتیپ مقاوم کاهش و فعالیت GR وAPX تغییر معنی‌داری پیدا نمی‌کند، در حالی‌که در ریشه ژنوتیپ حساس فعالیت همه آنزیم‌ها به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد.

کوکا و همکاران (۲۰۰۶) تأثیر تنش شوری را بر آنزیم‌های آنتی اکسیدانی دو ژنوتیپ کنجد بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که فعالیت آنزیم‌های CAT، APX و GR در هر دو رقم با افزایش سطح تنش افزایش پیدا کرد، ولی افزایش در فعالیت SOD تنها در رقم *Cumhuriyet* مشاهده شد و در رقم

Orhangazi تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد نداشت. در مطالعه ای دیگر نیز روی تریتیکاله وگندم (ارزانی و صالحی، ۱۳۹۲) مشاهده شد در شرایط اعمال تنش شوری با افزایش سطوح تنش میزان فعالیت آنزیمهای CAT، SOD و APX به‌طور معنی داری نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت.

۲-۱۶- تأثیر تنش شوری بر پراکسیداسیون لیپیدی

غشای سلول اولین مکانی است که تحت تنش شوری دچار آسیب و خسارت می‌شود. گونه‌های فعال اکسیژن قادرند با اسیدهای چرب اشباع نشده غشاء واکنش دهند. آسیب ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن بر لیپیدها در سلول پراکسیداسیون لیپیدی[1] نامیده می‌شود. هر نوع رادیکال آزاد که قادر به برداشتن هیدروژن متصل به گروه فعال متیل موجود در زنجیره اسید چرب غیراشباع باشد می‌تواند باعث پراکسیداسیون لیپید شود (هالیول، ۱۹۹۹). پراکسیداسیون غشای پلاسمالما منجر به نشت محتویات سلول و سرانجام مرگ سلول می‌شود. آسیب غشاهای درون سلولی علاوه بر آن‌که می‌تواند بر فعالیت تنفس در میتوکندری تأثیر منفی داشته باشد، همچنین می‌تواند سبب تخریب رنگیزه‌های فتوسنتزی و کاهش توانایی تثبیت دی اکسیدکربن در کلروپلاست شود (اسفندیاری و همکاران، ۲۰۰۷). میزان مالون دی‌آلدئید[2](MDA) که محصول پراکسیداسیون لیپید غشای سلولی می‌باشد به‌عنوان یک شاخص مهم آسیب به غشاء تحت تنش شوری مطرح و شناخته شده می‌باشد. بنابراین از استحکام غشای سلولی به‌عنوان یک شاخص مهم در تفاوت بین ارقام مقاوم و حساس به شوری استفاده می‌شود (ملونی و همکاران، ۲۰۰۳). گزارشاتی مبنی بر پراکسیداسیون لیپید کمتر در ژنوتیپ‌های مقاوم گندم (فتحی و همکاران، ۲۰۱۷)، ذرت (فتحی و همکاران، ۲۰۱۷)، آفتابگردان (ترابیان و همکاران، ۲۰۱۵) وکنجد (کوکا و همکاران، ۲۰۰۶) تحت تنش شوری در مقایسه با ژنوتیپ‌های حساس موجود می‌باشد.

1-Lipid Peroxidation
2-Malondialdehyde

۲-۱۷- تأثیر تنش شوری بر محتوای پرولین

متداول‌ترین واکنش بیوشیمیایی سلول‌های گیاهی به تنش اسمزی، تجمع مواد متابولیکی آلی است که معمول‌ترین آن‌ها پرولین، بتائین و ساکارز می‌باشد. این مولکول‌ها به‌عنوان شاخص‌های فیزیولوژیکی مهم در ارزیابی توانایی گیاه در تنظیم اسمزی شناخته شده‌اند (بایبوردی و طباطبایی، ۲۰۱۰). پرولین یک مولکول آلی غالب است که به‌عنوان یک تنظیم کننده اسمزی در گیاهانی که در معرض استرس‌های اسمزی قرار گرفته‌اند، نقش قابل توجهی را ایفا می‌کند. تجمع این اسید آمینه ممکن است به دلیل سازگاری عمومی به شرایط محیطی و در واکنش به چندین تنش شامل دمای پایین، کمبود مواد غذایی، قرار گرفتن در معرض فلزات سنگین، اسیدیته بالا و کمبود رطوبت صورت گیرد. پرولین در امر سازگاری گیاهان به تنش‌ها از طریق اعمالی مثل تنظیم اسمزی، عمل آنتی اکسیدانی، انتقال انرژی، ذخیره کربن و انرژی، از بین بردن رادیکال‌های هیدروکسیل، تنظیم پتانسیل اکسیدانی سلول، حفظ نسبت $NADP^+/NADPH$، کاهش pH و حفظ تورژسانس سلولی که برای پایداری سلول لازم است، ایفای نقش می‌کند (رونینتن و همکاران، ۲۰۰۲). پرولین همچنین می‌تواند به‌طور مؤثری تجمع نیتروژن را تنظیم کند و به گلوتامات[1]تغییر شکل دهد. گلوتامات در ساخت سایر اسیدهای آمینه ضروری مشارکت می‌کند. بنابراین پرولین درگیاه تحت تنش شوری هم به‌عنوان ذخیره کننده نیتروژن و هم به‌عنوان تنظیم کننده فشار اسمزی عمل می‌کند (میرمحمدی میبدی و قره‌یاضی، ۱۳۸۱). در مجموع پذیرفته شده است که کاهش در تورژسانس به همراه کاهش فعالیت آنزیم پرولین اکسیداز و افزایش آلفا-گلوتامیل کیناز[2]عامل اولیه و محرک تجمع پرولین تحت تنش‌های شوری و خشکی می‌باشد (بایبوردی و طباطبایی، ۲۰۱۰). در مطالعات فتحی و همکاران (۲۰۱۷) تجمع پرولین در برگ‌های ذرت و گندم در شرایط شوری بررسی و

1-Glutamate
2-Alpha glutamyl kinase

مشخص شد که با افزایش سطوح شوری میزان تجمع این ماده آلی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. این روند افزایشی را سیدان و احسان‌زاده (۱۳۹۱) نیز در شرایط تنش خشکی روی کنجد گزارش کرده‌اند.

۲-۱۸- تأثیر تنش شوری بر میزان کلروفیل

محتوای کلروفیل برگ گیاه، یکی از فاکتورهای مهم در حفظ ظرفیت فتوسنتزی و تولید ماده خشک می‌باشد. واکنش محتوای کلروفیل برگ به شوری بسته به گونه گیاهی، ژنوتیپ و شرایط محیطی متفاوت است. محتوای کلروفیل برگ در هنگام تنش شوری ممکن است افزایش یا کاهش نشان دهد (شیرواستاوا و کومار، ۲۰۱۵). کاهش میزان کلروفیل در شرایط تنش ممکن است به دلیل فعالیت بیشتر آنزیم کلروفیلاز[1]و یا به دلیل تغییر متابولیسم نیتروژن در رابطه با ساخت ترکیب‌هایی نظیر پرولین باشد که در تنظیم اسمزی به‌کار می‌روند. از طرفی برخی از مواد تنظیم کننده رشد نظیر آبسیزیک اسید و اتیلن، موجب تحریک فعالیت آنزیم کلروفیلاز می‌شوند و در نتیجه در شرایط تنش غلظت این آنزیم افزایش می‌یابد و سبب کاهش غلظت کلروفیل می‌شود (مونس، ۲۰۱۵). فتحی و همکاران (۲۰۱۷) کاهش محتوای کلروفیل گندم را با افزایش شوری مشاهده نمودند و گزارش کردند که میزان کاروتنوئیدها و آنتوسیانین‌ها با افزایش شوری به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد. نصیرخان و همکاران (۲۰۰۷) نیز با مطالعه روی بزرک کاهش ۴۰ درصدی در کلروفیل کل را در سطح ۱۵۰ میلی مولار شوری گزارش کردند.

۲-۱۹- تأثیر تنش شوری بر محتوای یونی

۲-۱۹-۱- کلر

کلر عمده‌ترین آنیون محدود کننده رشد در زمین‌های شور می‌باشد. این عنصر که به‌عنوان یک ریز مغذی در فتوسیستم II دخالت دارد و می‌تواند موجب افزایش فشار اسمزی سلول شده و تنظیمات روزنه-

1- Chlorophyllase

ای را تحت تأثیر قرار دهد (سینگ و همکاران، ۲۰۰۲). کلر آنیونی بسیار متحرک است و از طریق جریان تعرق از آوندهای چوبی به قسمت‌های هوایی گیاه منتقل می‌شود و در برگ‌ها تجمع می‌یابد. علائم خسارت کلر در گیاه به صورت زردی برگ‌ها، سوختگی نوک و حاشیه برگ و در غلظت‌های بالاتر به‌صورت ریزش برگ قابل مشاهده می‌باشد (میرمحمدی میبدی و قره‌یاضی، ۱۳۸۱). غلظت کلر در بافت گیاه بسته به مدت زمانی است که گیاه در معرض تنش شوری قرار دارد. آستانه تجمع کلر در بافت گیاهی برای ظهور علائم سمیت در گیاهان مختلف متفاوت است با این حال چنان‌چه میزان کلرید در برگ ها از ۰/۳ تا ۰/۵ درصد بر مبنای وزن خشک تجاوز کند گیاهان حساس دچار مسمومیت می‌شوند (سینگ و همکاران، ۲۰۰۲).

۲-۱۹-۲- سدیم

سدیم یک عنصر غیرضروری برای اغلب گیاهان می‌باشد و از مهمترین یون‌هایی است که در شرایط شوری ایجاد مسمومیت می‌کند. سدیم در مقادیر بالا از طریق ایجاد مسمومیت در گیاه رشد و کارکرد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین حضور مقادیر بیش از حد این کاتیون در خاک از طریق برهم-زدن تعادل تغذیه‌ای و تخریب شرایط فیزیکی خاک به‌طور غیرمستقیم رشد گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. علائم مسمومیت این عنصر به‌صورت سوختگی برگ‌ها و تشکیل بافت‌های مرده در لبه کناری برگ بروز می‌کند. ظهور این علائم نیازمند در معرض قرار گرفتن گیاه تحت شرایط شور در یک دوره زمانی چند هفته‌ای است به‌طوری‌که میزان این عنصر در گیاه به حالت سمیت برسد (احمدی و همکاران، ۱۳۸۶).

تغییرات در محتوای یون‌های سدیم در گیاهان تحت تنش شوری توسط بسیاری از محققان مورد بررسی قرار گرفته است. محققان بسیاری اظهار داشته‌اند که افزایش شوری سبب افزایش سدیم در

قسمت‌های هوایی و ریشه‌ها شده است (فتحی و همکاران، ۱۳۹۲، ترابیان و همکاران، ۲۰۱۷ و شهلابی و همکاران، ۱۹۹۳). تافو و همکاران (۲۰۰۹) با مطالعه روی ژنوتیپ‌های مختلف لوبیای چشم بلبلی نشان دادند شوری به‌طور معنی‌داری باعث افزایش غلظت سدیم در اندام‌های گیاه شد در حالی‌که میزان پتاسیم و نسبت پتاسیم به سدیم با افزایش شوری به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت. در مطالعه‌ای روی گندم، حمداء (۱۹۹۶) افزایش محتوای سدیم در قسمت‌های هوایی و ریشه گندم با افزایش شوری و کاهش محتوای رطوبت خاک و تلفیق هر دو تیمار را گزارش کرد. گیل و دت (۱۹۸۷) نشان دادند که تحت تنش شوری ارقام جو نسبت به گندم نان، میزان سدیم بیشتری در ریشه داشتند و توانستند نسبت سدیم به پتاسیم بیشتری را در ریشه نسبت به قسمت‌های هوایی حفظ کنند، و بدین وسیله سدیم کمتری را به قسمت‌های هوایی انتقال دهند. در حالی‌که در گندم سدیم بیشتری به قسمت‌های هوایی انتقال یافت و در نتیجه اثرات زیان‌آور سدیم در گندم نسبت به جو بیشتر بود. وو و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای روی گندم، تریتیکاله و جو گزارش کردند که شوری تجمع سدیم در گیاهچه همه ژنوتیپ‌ها را به بیش از دو برابر رساند، از طرفی تجمع سایر عناصر مثل کلسیم و منیزیم کاهش یافت. به نظر می‌رسد که تحت تنش شوری اثرات مخرب به دلیل تجمع سدیم در قسمت‌های مختلف گیاه باشد. پسرکلی (۲۰۱۶) گزارش کردند که پاسخ پهنک برگ‌ها به نمک به سن و موقعیت برگ روی ساقه بستگی دارد، به‌طوری‌که میزان سدیم در برگ‌های پائینی به‌طور معنی‌داری بیشتر از برگ‌های جوان بود.

۲-۱۹-۳- پتاسیم

پتاسیم از عناصر ضروری در تغذیه گیاه می‌باشد. اگرچه این عنصر نقش ساختمانی قابل توجهی در گیاه ندارد ولی دارای نقش‌های الکتروشیمیایی و کاتالیک مهم و حیاتی می‌باشد (منگل، ۲۰۱۶). از نقش-های الکتروشیمیایی این عنصر می‌توان به حفظ تعادل یونی در سلول‌ها و در کل گیاه، حفظ وضعیت آب

در گیاه، باز و بسته شدن روزنه‌ها، انتقال مواد فتوسنتزی به ریشه‌ها، دوام کلروپلاست‌ها و متابولیسم ترکیبات نیتروژنه اشاره کرد (گلوری و همکاران ۲۰۱۶). از نقش‌های کاتالیکی این عنصر نیز می‌توان به کوفاکتور و فعال کننده بودن چند آنزیم از جمله پروتئینازها[1] و پیرووات کینازها[2] اشاره کرد. پتاسیم همچنین در افزایش راندمان فتوسنتزی و افزایش مقاومت گیاه در برابر امراض نقش قابل ملاحظه‌ای دارد (منگل، ۲۰۱۶).

گیاهان شورپسند قادرند تحت شوری‌های بسیار شدید و در محیط‌هایی با شوری ۲۰۰ میلی‌مولار نمک و حتی شرایط شورتر پتاسیم را به‌صورت انتخابی جذب و در واکوئل‌های خود ذخیره نمایند. توانایی نگهداری غلظت پتاسیم بالا در فضای بین سلولی برگ‌های گیاه تحت تنش معیار مناسبی در میزان مقاومت گیاه به شوری محسوب می‌شود (میرمحمدی میبدی و قره‌یاضی، ۱۳۸۱). به‌طورکلی، در گیاهان مختلف زراعی تنش شوری از طریق اختلال در مکانیسم جذب پتاسیم به‌وسیله ریشه، باعث کاهش غلظت پتاسیم در گیاه می‌شود و از آنجایی‌که پتاسیم به‌عنوان کوآنزیم در فعال کردن بیش از ۴۰ آنزیم دخالت دارد، هرگونه تغییر در غلظت آن اثر قابل توجهی بر رشد و نمو گیاه دارد (شیرواستاوا و کومار، ۲۰۱۵). ماکسیموویک و همکاران (۲۰۱۰) در آزمایشی روی ژنوتیپ‌های نخود گزارش کردند که شوری میزان تجمع پتاسیم در اندام‌های مختلف گیاه را کاهش می‌دهد که این کاهش در بالاترین سطح تنش در برگ گیاه به دو برابر سطح شاهد رسید. در همین رابطه فلاورز و همکاران (۱۹۹۷) نشان دادند که مقادیر بالای K^+ در غلظت‌های بالای نمک برای گیاه یک مزیت است و می‌تواند به‌عنوان معیار مناسبی برای انتخاب گیاهان از نظر تحمل به شوری به‌کار رود. علاوه بر غلظت K^+ نسبت $\frac{K+}{Na+}$ به‌عنوان معیار مناسب دیگری در تحمل به گیاهان به شوری استفاده می‌شود. مشخص شده است برای انجام طبیعی فرآیندهای

1-Proteinase
2-Pyruvate Kinase

متابولیکی گیاه، باید نسبت $\frac{K+}{Na+}$ بیشتر از یک باشد (میر محمدی میبدی و قره‌یاضی، ۱۳۸۱). مونس (۲۰۱۵) ارتباط نسبت پتاسیم به سدیم بافت‌ها با مقاومت به شوری را به‌عنوان یکی از قوی‌ترین شاخص‌ها برای انتخاب معیاری صحیح جهت اصلاح مقاومت به شوری دانسته است. سایرام و همکاران (۲۰۰۲) با مطالعه تأثیر شوری بر ژنوتیپ‌های گندم کاهش میزان پتاسیم اندام هوایی گندم را با افزایش شدت تنش گزارش کردند. کومار و همکاران (۲۰۰۷) نیز نشان دادند که تشدید شوری تا سطح ۳۰۰ میلی‌مولار باعث کاهش ۷۰ درصدی میزان پتاسیم اندام هوایی ژنوتیپ‌های برنج نسبت به سطح شاهد می‌شود.

۲-۱۹-۴- منیزیم

منیزیم از جمله عناصر ضروری مورد نیاز گیاه است که دارای چندین وظیفه مهم و حیاتی در گیاه می‌باشد. منیزیم یکی از عناصر اصلی و ضروری تشکیل دهنده کلروفیل است. همچنین این عنصر برای پایداری ساختمان ریزوبیوم مورد نیاز است و به‌عنوان فعال کننده برای بسیاری از آنزیم‌های حیاتی ایفای نقش می‌کند. منیزیم فعال کننده دو آنزیم ریبولوز بیس‌فسفات کربوکسیلاز[1] و فسفو انول پیرووات کربوکسیلاز[2] است که از جمله آنزیم‌های مهم و ضروری در تثبیت کربن فتوسنتزی هستند (احمدی و همکاران، ۱۳۸۶). کلروز برگ که به دلیل تخریب کلروفیل روی می‌دهد از جمله مشخص‌ترین علائم کمبود منیزیم در گیاهان تحت تنش شوری می‌باشد و با توجه به متحرک بودن این عنصر در گیاه آثار کلروز در برگ‌های مسن مشخص‌تر می‌باشد (احمدی و همکاران، ۱۳۸۶). پورآذری و همکاران (۱۳۹۰) با مطالعه تأثیر شوری بر ژنوتیپ‌های گندم تتراپلوئید کاهش میزان منیزیم برگ را با افزایش شدت شوری گزارش کردند، به طوری‌که سطح شدید شوری، میزان منیزیم برگ‌های گندم را ۵۳ درصد کاهش داد. وو و همکاران (۲۰۱۵) با مطالعه تأثیر تنش شوری بر گندم کاهش منیزیم در تمام بافت‌های گیاه را با تشدید

1-Ribulose Bisphosphate Carboxylase
2-Phosphoenol Pyruvate Carboxylase

شوری گزارش کردند. توکلی و همکاران (۲۰۱۰) نیز کاهش ۱۳ درصدی محتوای منیزیم اندام هوایی ژنوتیپ‌های جو را با افزایش شدت شوری گزارش کردند.

۲-۲۰- کلسیم

کلسیم به‌عنوان یک عنصر ضروری برای رشد گیاهان شناخته شده است. این عنصر که در گیاه غیر متحرک است، دارای نقش‌های الکتروشیمیایی، ساختمانی و کاتالیکی بسیاری می‌باشد (رانجیوا و همکاران، ۲۰۰۶). خنثی‌سازی و غیرمحلول کردن رادیکال‌های اسیدی و تنظیم نفوذپذیری سلول از جمله نقش‌های الکتروشیمیایی این عنصر می‌باشد. یون‌های کلسیم نفوذ پذیری سلول را بر عکس یون Na^+ کاهش می‌دهند. علاوه بر این نقش مهمی در انتقال یون‌ها در عرض غشای سلولی و جابجایی آن در بافت‌ها دارند (واحد و همکاران، ۱۹۹۷). نقش ساختمانی کلسیم در غیرمحلول‌سازی اسید پکتیک جهت تشکیل غشاهای پکتوسلولوزی می‌باشد. فعال کردن برخی آنزیم‌ها و عکس العمل با هورمون‌های گیاهی را می‌توان به‌عنوان نقش‌های کاتالیکی کلسیم در نظر گرفت (گلوری و همکاران، ۲۰۱۶). کلسیم همچنین با رسوب دادن برخی از ترکیبات از سمیت ناشی از غلظت زیاد آن‌ها در گیاه می‌کاهد. تشکیل اگزولات کلسیم نمونه‌ای از عمل سمیت زدایی کلسیم می‌باشد (خواجه پور، ۱۳۸۳).

افزایش غلظت کلسیم در محیط شور، تولید کل، محتوای رطوبت، نسبت اندام‌های هوایی به ریشه و محتوای پتاسیم گیاه را افزایش و محتوای سدیم را کاهش می‌دهد. بنابراین به نظر می‌رسد که با افزایش کلسیم تحت شرایط تنش می‌توان اثرات نامطلوب شوری را بر رشد گیاه تقلیل داد (رانجیوا و همکاران، ۲۰۰۶). واحد و همکاران (۱۹۹۷) بیان کردند که جذب عنصر کلسیم در گیاهان مختلف به ویژه نیشکر تحت تأثیر شوری قرار می‌گیرد و پیشنهاد کردند که از افزایش این عنصر در گیاهان تحت تنش شوری به‌عنوان شاخصی برای تحمل به شوری می‌توان استفاده کرد. سیدان و احسانزاده (۱۳۹۲) نیز نتایج

مشابهی را مبنی بر کاهش اثرات مخرب خشکی بر رشد گیاهچه کنجد تحت تیمار با غلظت‌های متفاوت کلسیم گزارش کردند.

خاک‌های زراعی ایران به دلایلی از قبیل آهکی بودن خاک‌ها، بی‌کربناته بودن آب آبیاری، پایین بودن مواد آلی و مصرف بی‌رویه کودهای فسفاته دچار کمبود شدید عناصر به ویژه کلسیم، آهن و روی می‌باشند. کمبود عناصر ریزمغذی در خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه خشک عامل محدودیت رشد بسیاری از گیاهان روغنی است (خوشگفتارمنش، ۱۳۸۶). نتایج آزمایش‌های مختلف نشان داده است که مصرف عناصر ریزمغذی در زراعت کنجد بر ارتفاع ساقه، تعداد شاخه، تعداد دانه در کپسول، وزن دانه، درصد روغن دانه، تعداد برگ و در نهایت عملکرد دانه تأثیر قابل توجهی دارد (کوکا و همکاران، ۲۰۰۶). آئین (۱۳۹۱) در بررسی اثر دو عنصر کلسیم و روی بر خواص فیزیولوژیکی کنجد گزارش کرد که کلسیم به میزان قابل توجهی در جذب پتاسیم و افزایش کربوهیدرات‌های محلول و غلظت پرولین در شرایط تنش شوری مؤثر است. گلیج و همکاران (۱۳۹۴) گزارش کردند که محلول‌پاشی نانو اکسید کلسیم به میزان یک کیلوگرم در ۱۰۰۰ لیتر آب می‌تواند تا حد زیادی مانع تأثیر سوء خشکی بر عملکرد کنجد شود. فتحی و همکاران (۲۰۱۷) در آزمایشی روی ذرت دریافتند که کمبود کلسیم سبب کاهش اندازه سلول می‌گردد و گیاه کوتاه می‌ماند.

۲-۲۱ - سدیم نیتروپروساید[1]

۲-۲۱-۱- کلیات

سدیم نیتروپروساید (SNP) یک ترکیب رها کننده نیتریک اکسید[2]است که در حالت محلول به شدت نسبت به نور حساس می‌باشد، تجزیه آن توسط اکسیژن و دمای زیاد تسریع می‌شود (وایکزورک و

1- Sodium NitroProsside
2- Nitric Oxide

همکاران، ۲۰۰۶). رهاسازی نیتریک اکسید، نیازمند تابش نور یا احیای آن توسط عوامل کاهنده، مثل اسید آسکوربیک، تیول‌ها و هموپروتئین‌ها، مانند NADH و NADPH است. نیتریک اکسید یک رادیکال آزاد گازی شکل است که نیمه عمر آن در سیستم‌های بیولوژیکی ۳ تا ۵ ثانیه می‌باشد (توتجا و همکاران، ۲۰۰۴) و مولکولی دو اتمی است که قابلیت انتشار بالایی دارد ($۴/۸ * ۱۰^{-۵}$ سانتی‌متر مربع در ثانیه در آب) و در گیاهان توسط مسیرهای آنزیمی و غیرآنزیمی تولید می‌شود (وایکزورک و همکاران، ۲۰۰۶).

نیتریک اکسید یک مولکول مهم است که در بافت‌های زیادی، فرآیندهای فیزیولوژیکی را تنظیم می‌کند و در همه گیاهان وجود دارد. وجود نیتریک اکسید در گیاهان در سال ۱۹۷۰ کشف شد، این ترکیب گاز مانند به‌عنوان یک سیگنال بزرگ در فعالیت‌های فیزیولوژیکی پدیدار می‌شود. تحقیقاتی روی نیتریک اکسید در گیاهان در سال‌های اخیر انجام شده است و نشان دهنده این است که این مولکول یک سیگنال کلیدی در گیاهان محسوب می شود. نیتریک اکسید یک تنظیم کننده رشد گیاهی است. در ابتدا این گاز به‌عنوان آلوده کننده محیطی مورد توجه قرار گرفت. هر چند بررسی‌های اخیر نشان داده است که نیتریک اکسید می‌تواند به‌عنوان یک مولکول در پدیده ترارسانی در گیاهان عمل کند و در فرآیندهای مختلف فیزیولوژیک، پاتوفیزیولوژیک و نموی مثل جوانه‌زنی دانه، بسته شدن روزنه، پاسخ به عوامل بیماری‌زا و نمو ریشه دخالت می‌کند (دوآن و همکاران، ۲۰۰۷). از طرف دیگر، نیتریک اکسید می‌تواند به‌عنوان واسطه در عمل تنظیم کننده‌های رشد گیاهی و متابولیسم ROS شرکت کند و در بسیاری از مطالعات نشان داده شده است که در انتقال پیام و پاسخ به تنش‌های زیستی و غیرزیستی نیز دخالت دارد (دل ریو و همکاران، ۲۰۰۴). مقدار زیاد نیتریک اکسید می‌تواند با $O_2^{\cdot}$ ترکیب شده، رادیکال پراکسی نیتریت ($ONOO^{\cdot}$) را تولید کند و گزارش شده است که این رادیکال موجب تخریب لیپیدها، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک می‌شود (بلیگنی و لاماتینا، ۱۹۹۹). چون $O_2^{\cdot}$ و H_2O_2 بسیار سمی‌تر از NO و $ONOO^{\cdot}$ هستند، بنابراین NO می‌تواند به‌عنوان یک تنش پیش‌تیمار سلول را از تخریب رادیکال‌های اکسیژن حفظ کند. بنابراین،

اعتقاد بر این است که NO دارای نقش دوگانه است. ممکن است سمی یا حفاظتی باشد که به غلظت آن، نوع گیاه، بافت گیاهی، سن گیاه و نوع تنش وارده به گیاه دارد (بلیگنی و لاماتینا، ۲۰۰۰ و دل‌ریو و همکاران، ۲۰۰۴). در بسیاری از مطالعات گزارش شده است که نیتریک اکسید خارجی در گیاهان موجب کاهش خسارات ناشی از برخی تنش‌ها مثل فلزات سنگین، علف‌کش‌ها، سرما، اشعه ماوراء بنفش و تنش شوری شده است (آراسیمویز و وایکزورک، ۲۰۰۷).

نیتریک اکسید یک مولکول فعال زیستی است که فعالیت‌های متنوعی را در سیستم‌های زنده اعمال می‌کند و نقش‌های تنظیمی، سیگنالی، حفاظتی و سمی را در سلول اعمال می‌کند (بلیگنی و لاماتینا، ۲۰۰۰ و ژانگ و همکاران، ۲۰۰۶). در مورد وضعیت شیمیایی نیتریک اکسید معمولاً به اثر متقابل سه گونه ردوکس شامل رادیکال نیتریک اکسید، کاتیون نیتروزونیوم و آنیون نیتروکسیل اشاره می‌شود. در کل رادیکال نیتریک اکسید به شدت مستعد اکسیداسیون و احیاء است (وندهن و همکاران، ۲۰۰۱). بسیاری از اعمال تأثیرگذار نیتریک اکسید مربوط به میل ترکیبی شدید آن با آهن مانند اثر بر پروتئین‌های تنظیمی آهن است (وتسر و همکاران، ۲۰۰۳). اثرات گوناگون این ترکیب مربوط به توانایی واکنش شیمیایی با دی اکسیژن، آهن و پروتئین‌های حاوی تیول است (وندهن و همکاران، ۲۰۰۱). در شرایط تنش، تولید فزاینده نیتریک اکسید در اندام‌های گوناگون گیاه دیده شده است. اثر حفاظتی یا سمی نیتریک اکسید در متابولیسم گیاه مربوط به غلظت مولکول، سنتز، انتقال و کارایی برداشت آن است. این ترکیب در تحریک جوانه‌زنی بذر، تقسیم سلول، افزایش میزان کلروفیل و بسیاری از اعمال دیگر سلول دخالت دارد و از طریق واکنش با گونه‌های اکسیژن فعال، آسیب ناشی از آن‌ها را کاهش می‌دهد (بلیگنی و لاماتینا، ۲۰۰۰).

۲-۲۱-۲- بیوسنتز و متابولیسم

نیتریک اکسید یک پیام‌آور نادر است که در تحریک و اجرای برنامه‌های مربوط به مرگ سلول در گیاهان دخالت دارد (وایتکک و همکاران، ۲۰۰۷). چندین سیستم آنزیمی و غیر آنزیمی برای تولید نیتریک اکسید وجود دارد. این ماده در گیاهان به روش‌های آنزیمی و غیر آنزیمی سنتز می‌شود و نقش-های گوناگونی در مقابله با تنش‌های زنده و غیرزنده ایفا می‌کند. نیتریک اکسید یک گاز قابل انتشار است که توسط نیتریک اکسید سینتاز (NOS) در سلول‌های پستانداران سنتز می‌شود (چانگ و همکاران، ۲۰۰۱). اثر نیتریک اکسید در گیاهان به غلظت آن بستگی دارد مثلاً کاربرد ۱۰ میکرو مولار از آن، رشد برگ را محدود می‌کند در حال که ۱ میکرو مولار موجب توسعه رشد برگ در کاهو (لشم و همکاران، ۱۹۹۷) و نخود (لشم و همکاران، ۱۹۹۸) شده است. در گیاهان، نیتریک اکسید از NO_2 توسط نیترات رداکتاز تولید می‌شود (کیسر و همکاران، ۲۰۰۲). تحقیقات نشان داده است که نیتریک اکسید نقش‌های مهمی در فرآیندهای کلیدی فیزیولوژیکی شامل رشد گیاه، جوانه‌زنی، مرگ سلول و اعمال میتوکندری ایفا می‌کند (ویلسون و همکاران، ۲۰۰۸).

۲-۲۱-۳- نقش سدیم نیتروپروساید در گیاهان

واکنش نیتریک اکسید با ROS موجب جلوگیری از آسیب غشاء می‌شود. گزارش شده است که نقش این ماده در جلوگیری از پراکسیداسیون لیپید مربوط به توانایی آن برای واکنش با رادیکال‌های آلکوکسی لیپید ($LO^{\cdot}$) و پراکسیل لیپید ($LOO^{\cdot}$) است که به توقف زنجیره پراکسیداسیون به روش مستقیم منجر می‌شود. هم‌چنین، طبق بررسی‌ها مشخص شده است که نیتریک اکسید با احیای Fe^{3+} به Fe^{2+} در جایگاه فعال لیپوکسی‌ژناز و غیر فعال کردن آن، می‌تواند پراکسیداسیون لیپید را کاهش دهد (وانگ و یانگ، ۲۰۰۵ و نصیبی و همکاران، ۱۳۸۸).

مطالعات انجام شده نشان داده است که نیتریک اکسید می‌تواند فرآیندهای مرتبط با رشد و نمو گیاه را تنظیم کند. نیتریک اکسید در بافت‌هایی از قبیل بافت‌های جنینی و لپه‌ها وجود دارد و مقدار آن در بافت‌های پیر کاهش می‌یابد (لشم و همکاران، ۱۹۹۸). اندازه کوچک و انتشار بالای این ماده از غشاها به این معنی است که نیتریک اکسید می‌تواند به آسانی انتقال یابد (بلیگنی و لاماتینا، ۲۰۰۰). کاربرد نیتریک اکسید در گیاهان موجب توسعه نقش واسطه‌ای آن در جلوگیری از فعالیت‌های کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و آکونیتاز می‌شود (کلارک و همکاران، ۲۰۰۰). هم‌چنین در طویل شدن دیواره سلولی (لشم و همکاران، ۲۰۰۰)، تنظیم کانال‌های یونی در سلول‌های محافظ (گراسیا ماتا و همکاران، ۲۰۰۳)، اعمال میتوکندریایی و کلروپلاستی (تاکاهاشی و یاماساکی، ۲۰۰۲)، مرگ سلول و پیری (هانگ و کائو، ۲۰۰۳) نقش دارد.

نیتریک اکسید به‌عنوان یک سیگنال مهم در فعالیت‌های فیزیولوژیکی گیاه و در مراحل مربوط به رشد و نمو، شروع جوانه‌زنی، گلدهی، رسیدگی میوه‌ها و پیری اندام‌ها نقش ایفا می‌کند (آراسیمویز و وایکزورک، ۲۰۰۷). کاربرد خارجی نیتریک اکسید، موجب تحریک فرآیند بسته شدن روزنه‌ها می‌شود (لاماتینا و همکاران، ۲۰۰۴). شاید دلیل آن ایجاد تغییر در Ca^{2+} درون سلولی است که در سلول‌های محافظ روزنه وجود دارند. هم‌چنین گزارش شده است که ABA، نیتریک اکسید را تحریک می‌کند که به‌عنوان یک واسطه در فرآیند بسته شدن روزنه‌ها دخالت کند (نیل و همکاران، ۲۰۰۸).

این ترکیب آب کشیدگی برگ‌ها، نشت یون‌ها و میزان تعرق را کاهش می‌دهد و بسته شدن روزنه‌ها را تحریک می‌کند و بدین ترتیب موجب افزایش تحمل به تنش‌ها می‌شود.کاربرد خارجی نیتریک اکسید می‌تواند از گیاه در برابر صدمات ناشی از تنش اکسیداتیو که به دنبال تنش خشکی اتفاق می‌افتد، محافظت کند (لاماتینا و همکاران، ۲۰۰۴).

فاروق و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند که کاربرد خارجی نیتریک اکسید موجب جارو کردن ROS، توسعه توانایی غشای سلولی، بهبود فتوسنتز و وضعیت آب برگ می‌شود. کاربرد خارجی نیتریک اکسید به صورت محلول‌پاشی مؤثرتر است. آن‌ها اعلام کردند که نیتریک اکسید می‌تواند در مراحل بحرانی در برنج تحت تنش خشکی در مزرعه استفاده شود.

۲-۲۱-۴- اثر سدیم نیتروپروساید بر گیاهان در شرایط تنش

نیتریک اکسید به‌عنوان یک مولکول کلیدی در تنش‌های زنده و غیرزنده منجر به پاسخ‌های فیزیولوژیکی در گیاهان می‌شود. اخیراً اثرات نیتریک اکسید در حفاظت از برگ‌های ذرت در مقابل کمبود آهن در تنش اکسیداتیو توسط سونا و همکاران (۲۰۰۷) مورد بررسی قرار گرفته است. آن‌ها پیشنهاد کردند که نیتریک اکسید می‌تواند بوته های ذرت را در برابر کمبود آهن از طریق واکنش با ROS به‌طور مستقیم یا تغییر فعالیت‌های آنزیم‌های جمع‌آوری کننده ROS محافظت کند.

اثرات نیتریک اکسید بر رشد و نمو گیاهان به غلظت آن بستگی دارد. غلظت‌های بالا (۴۰ تا ۸۰ میکرومولار) رشد گوجه فرنگی را محدود می‌کند، در حالی‌که غلظت‌های پایین (صفر تا ۲۰ میکرومولار) رشد را افزایش می‌دهد (کرافورد و جائو، ۲۰۰۵). این مسأله در گیاه نخود نیز دیده شد (لشم و همکاران، ۱۹۹۶). مطالعات دیگر نشان می‌دهد که کاربرد خارجی نیتریک اکسید موجب بهبود تنش اکسیداتیو ناشی از فلزات سنگین، شوری، دمای بالا، آب کشیدگی و غیره می‌شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۶ و لاسپینا و همکاران، ۲۰۰۵). نیتریک اکسید هم‌چنین در پاسخ به تنش‌های زنده و غیر زنده از قبیل خشکی، شوری، گرما، مقاومت به بیماری‌ها (سیدیکی و همکاران، ۲۰۱۱ ، زائو و همکاران، ۲۰۰۴ و ژانگ و همکاران، ۲۰۰۶)، تنش خشکی و تابش ماوراء بنفش (گراسیا ماتا و لاماتینا، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۲ و شی و همکاران، ۲۰۰۵) نقش دارد. نیتریک اکسید در تنش‌هایی از جمله تنش شوری (لیو و همکاران، ۲۰۱۴) و تنش خشکی (میسرا و همکاران، ۲۰۰۲) موجب توسعه رشد و نمو می‌شود. در همین ارتباط عرب و

همکاران (۱۳۹۴) گزارش کردند که محلول‌پاشی ۱۰۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید سبب بهبود عملکرد کیفی و کمی گلرنگ در شرایز تنش کم‌آبیاری شد. در آزمایش امیدی و سپهری (۱۳۹۳) نیز مصرف غلظت‌های متفاوت سدیم نیتروپروساید در رژیم‌های مختلف آبی، تأثیر مثبت زیادی بر بهبود وضعیت رشد و عملکرد لوبیا قرمز داشت.

شئوکاند و همکاران (۲۰۰۸) گزارش کردند که کاربرد خارجی سدیم نیتروپروساید موجب کاهش خسارت به غشاء در گیاه نخود و افزایش ۳ درصدی در میزان کلروفیل گیاه تحت تنش شوری شد ولی تأثیری بر میزان نسبی آب برگ نداشت. هم‌چنین سدیم نیتروپروساید موجب افزایش فعالیت کاتالاز و پراکسیداز به ترتیب به میزان ۷ و ۲۰ درصد شد. زائو و همکاران (۲۰۰۴) و ژانگ و همکاران (۲۰۰۶) گزارش کردند سدیم نیتروپروساید نقش محافظتی در تنش شوری در گیاهان ایفا می‌کند.

یکی از اثرات مضر تنش شوری روی گیاهان، تجمع یون‌های Na^+، Cl^- در برگ‌ها است که موجب به هم ریختگی توازن مواد غذایی می‌شود که این به کاهش جذب مواد ضروری از جمله K^+ منجر می‌شود (جان و همکاران، ۲۰۰۵). لوپز و همکاران (۲۰۰۸) گزارش کردند که استفاده از غلظت ۰/۲۵ میلی مولار از سدیم نیتروپروساید موجب کاهش غلظت Na^+ در زمان کاربرد ۱۰۰ میلی مولار NaCl شد در حالی که کاربرد ۰/۵ و ۱ میلی مولار سدیم نیتروپروساید در ۱۰۰ میلی مولار NaCl تفاوتی با عدم کاربرد سدیم نیتروپروساید نداشت. نسبت K^+/Na^+ به‌عنوان یک فاکتور در تحمل به شوری مطرح است (جان و همکاران، ۲۰۰۵). زمانی که از ۰/۲۵ میلی مولار سدیم نیتروپروساید استفاده شد این نسبت افزایش پیدا کرد (لوپز و همکاران، ۲۰۰۸).

۲-۲۲- محلول‌پاشی عناصر غذایی

کمبود عناصر ریزمغذی در خاک‌ها، مسئله‌ای جهانی است و میلیون‌ها هکتار از اراضی زراعی دنیا با کمبود یکی از عناصر ریزمغذی مواجه است (منگل، ۲۰۱۶). مصرف بی‌رویه و نامتعادل کودهای شیمیایی به خصوص کودهای فسفری باعث شده، توازن عناصر غذایی به ویژه عناصر کم‌مصرف در خاک به هم خورده و منجر به کاهش جذب عناصر کلسیم، سدیم، آهن، روی، مس و منگنز توسط گیاه گردد. به علاوه شرایط آهکی و قلیایی خاک‌های زراعی از دیگر عوامل محدود کننده جذب عناصر کم‌مصرف می‌باشد. با توجه به محدودیت‌های مصرف خاکی عناصر کم‌مصرف (از قبیل تثبیت شدن و اثرات باقیمانده) محلول-پاشی یا تغذیه برگی از راه‌های مؤثر در برطرف کردن نیاز غذایی گیاهان به این عناصر است (سوویادر، ۲۰۰۰). در همین راستا گزارش شده است که در کلیه محصولات زراعی محلول‌پاشی کلسیم روش مؤثرتری برای جبران کمبود کلسیم بوده و قابل قبول‌تر از مصرف خاکی آن می‌باشد. همچنین محلول-پاشی، به دلیل این که می‌تواند عنصر یاد شده را در اسرع وقت در اختیار گیاه قرار دهد از اهمیت زیادی برخوردار است (هو و اشمید هالتر، ۲۰۰۵). در آزمایش برناردو موریلو و همکاران (۲۰۰۶) محلول‌پاشی کلسیم سبب ایجاد بالاترین درصد کلروفیل و عملکرد بیولوژیکی در لوبیا چشم بلبلی شد. در آزمایش ابراهیمیان و همکاران (۱۳۸۸) کارآیی مصرف ریزمغذی‌های مختلف بر عملکرد و اجزای عملکرد آفتابگردان مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج به‌دست آمده از آزمایش ایشان بیشترین عملکرد دانه و وزن هزار دانه در تیمارهای مصرف خاکی و محلول‌پاشی به‌طور هم‌زمان مشاهده شد، و در کلیه موارد تیمارهای محلول‌پاشی این عناصر تأثیر بیشتری نسبت به مصرف خاکی آنها داشت. در مطالعه عطارزاده و همکاران (۲۰۱۶) محلول‌پاشی عنصر کلسیم سبب افزایش کلروفیل، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی گلرنگ نسبت به تیمار عدم‌محلول‌پاشی شد. همچنین در آزمایش جمشیدی و همکاران (۱۳۹۶) محلول-

پاشی روی و کلسیم سبب افزایش مقاومت به تنش سرب در گیاه گلرنگ گردید. لینچ (۱۹۸۵) عنوان کرد تنش شوری مهمترین عامل در کاهش جذب کلسیم توسط گیاه می باشد و محلول‌پاشی کلسیم تأثیر مستقیم در افزایش مقاومت جو دو سر به تنش شوری داشت. نصری (۱۳۸۷) نشان داد محلول‌پاشی عناصر کم‌مصرف کلسیم، روی، آهن، بور، منگنز، منیزیم و مولیبدن با غلظت ۴ در هزار تأثیر معنی‌داری بر اجزای عملکرد کلزا داشته است. میثاق و همکاران (۱۳۹۵) گزارش کردند محلول‌پاشی روی و بور اثر معنی‌داری بر درصد روغن و پروتئین دانه کنجد در شرایط تنش خشکی دارد. در مطالعه جعفری‌نیا و خلیلپور (۱۳۹۶) عنوان شد محلول‌پاشی سدیم نیتروپروساید به‌ویژه در غلظت ۵۰ میکرومولار آسیب‌های تنش شوری به زنجیرهٔ انتقال الکترون فتوسنتزی را در گیاه جو دوسر کاهش داد. همچنین نیک روش و همکاران (۱۳۹۵) تأثیر معنی دار محلول‌پاشی سدیم نیتروپروساید با غلظت‌های مختلف را بر عملکرد رشدی، مقادیر پرولین و قندهای محلول در گیاه گلرنگ در شرایط تنش شوری را نشان دادند.

۲-۲۳- ضرورت بکارگیری فناوری نانو در علوم کشاورزی

طبق آخرین گزارش سازمان ملل متحد، حدود ۸۰۰ میلیون نفر از جمعیت جهان دچار فقر غذایی هستند، شمار افراد قرار گرفته در زیر خط فقر از نظر تأمین انرژی مورد نیاز روزانه بدن هر روز در حال افزایش است. جدیدترین پیش‌بینی‌ها حاکی از آن است که این آمار تا سال ۲۰۲۰ میلادی به رقمی بالغ بر یک میلیارد نفر خواهد رسید و این بدان معناست که نجات خیل عظیم انسان‌ها از خطر گرسنگی، نیازمند توجه ویژه متخصصان و سیاست‌مداران امروز جهان به توسعه پایدار و همه جانبه صنعت کشاورزی است. ورود نسل اول فناوری‌ها به عرصه کشاورزی، در چند دهه گذشته منجر به وقوع انقلاب سبز و گذر از کشاورزی سنتی به کشاورزی صنعتی گردید، در این دوره افزایش چشمگیری در کیفیت و کمیت محصولات کشاورزی صورت گرفت که البته در کنار آن استفاده بی‌رویه از منابع مشکلاتی را نیز در پی

داشت. اکنون با گذشت سال‌ها از وقوع انقلاب سبز و کاهش مجدد نسبت رشد تولیدات کشاورزی به جمعیت جهان، لزوم بکارگیری فناوری‌های جدید در صنعت کشاورزی پیش از هر زمان دیگری آشکار است. در این بین فناوری نانو به‌عنوان یک فناوری بین رشته‌ای و پیشتاز در جهت رفع مشکلات و کمبودها در بسیاری از عرصه‌های علمی و صنعتی، به‌خوبی جایگاه خود را در علوم کشاورزی و صنایع وابسته آن به اثبات رسانده است. فناوری نانو کاربردهای وسیعی در همه مراحل تولید، فرآوری، نگهداری، بسته‌بندی و انتقال تولیدات کشاورزی دارد. ورود فناوری نانو به صنعت کشاورزی و صنایع غذایی تضمین کننده افزایش میزان تولیدات و کیفیت آن‌ها، در کنار حفظ محیط زیست و منابع کره زمین می‌باشد (باشگاه نانو تکنولوژِی ایران، ۱۳۹۵).

به‌طور کلی کشاورزی دقیق یک نوع نگرش جدید در مدیریت مزرعه است. امروزه با استفاده از نانو سنسورها مشخص می‌شود که هر قسمت کوچک از مزرعه به چه میزان عناصر غذایی و سم نیاز دارد و بدین وسیله با مصرف بهینه نهاده‌ها از آلودگی محیط زیست جلوگیری می‌شود و سلامت محصولات و افزایش بازده اقتصادی را ممکن می‌سازد. نانو سنسورها می‌توانند با کنترل دقیق وگزارش‌دهی به موقع نیازهای گیاهان به مرکز پردازش اطلاعات سیستم را در نگهداری محصولات یاری نمایند. ابزارهای جدید برای بیولوژی سلولی و مولکولی ساخته شده‌اند که جهت تعیین مولکول‌های خاص، شناسایی و جداسازی آنها استفاده می‌شوند و کاربری بسیاری دارند. از این بین می‌توان به مواردی از جمله تکنولوژی و علم تولید مثل، اصلاح‌نژاد حیوانات و گیاهان، تبدیل ضایعات به انرژی و محصولات جانبی مفید، علم و تکنولوژی کودسازی و اصلاح بذور به شیوه اتمی اشاره نمود (باشگاه نانو تکنولوژی ایران، ۱۳۹۵). گزارشات محدودی مبنی بر تأثیر نانو کودها بر رشد برخی از گیاهان از جمله بادام زمینی (پراساد و همکاران، ۲۰۱۲) و نخود (پندی و همکاران، ۲۰۱۰) وجود دارد.

تولید سموم و کودهای شیمیایی با استفاده از نانوذرات و نانوکپسول‌ها باعث می‌شود که این نسل از سموم و کودها قابلیت رهایش کنترل شده یا تأخیری، جذب و تأثیرگذاری بیشتر و سازگاری با محیط زیست را دارا باشند. تولید کریستال‌های نانویی جهت افزایش کارایی استفاده از آفت‌کش‌ها امکان کاربرد آفت‌کش‌ها با دزهای کمتر را فراهم می‌آورد و این مسئله به معنی حداقل رساندن ورود این ترکیبات خطرناک به طبیعت است. در این میان ترکیبات نانو کودها به سرعت و به‌صورت کامل جذب گیاه شده و می‌توانند به خوبی نیازها و کمبودهای غذایی آن را مرتفع سازد. فتحی و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که کاربرد نانو کودهای آهن و روی میتواند اثرات مهمی در کاهش اثرات مضر تنش شوری در گیاهان گندم و ذرت داشته باشد. ترابیان و همکاران (۲۰۱۶) نیز نتایج مشابهی را بر روی گیاه آفتابگردان مشاهده کردند. در آزمایشی دیگر کاربرد نانو کودهای کلات آهن، پتاسیم و فسفر سبب بهبود صفات کیفی و بازار پسندی گیاه گوجه فرنگی نسبت به تیمار کاربرد این کودها به فرم معمول آن شد (روشن، ۱۳۹۴).

فصل سوم

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سه بخش مجزای آزمایشگاهی، گلدانی و مزرعه‌ای در آزمایشگاه و مزرعه‌ی ایستگاه تحقیقات کشاورزی شرق کشور واقع در ۵ کیلومتری شهرستان کاشمر (خراسان رضوی) طی سالهای ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ روی گیاه کنجد (رقم اولتان) به انجام رسید.

۳-۱- بخش آزمایشگاهی

این آزمایش به‌صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در فروردین سال ۱۳۹۵ انجام شد. تیمارها شامل پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید در شش سطح (بدون پیش‌تیمار، آب مقطر، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میکرومولار) و تنش شوری (با استفاده از کلرید سدیم) در سه سطح (صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار) بودند. هدف از آزمایش اول تعیین غلظت مناسب برای پیش‌تیمار سدیم نیتروپروساید در دو بخش دیگر آزمایش بود.

برای این منظور ابتدا بذر کنجد (رقم التان) مورد آزمایش، از مرکز تحقیقات نهال و بذر کرج تهیه شد. بذور کنجد به روش خیساندن با غلظت‌های مذکور سدیم نیتروپروساید به مدت ۱۲ ساعت پیش‌تیمار شدند. در این آزمایش از ظروف پتری دیش به قطر ۹ سانتی‌متر و ضخامت ۱۵میلی‌متر استفاده شد که قبلاً در آون ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۴ ساعت استریل شده بودند. در کف آن یک عدد کاغذ صافی واتمن شماره ۱ استریل شده قرار گرفت. در هر ظرف به‌عنوان یک واحد آزمایشی ۲۵ عدد بذر سالم قرار داده شد. بذور جهت ضدعفونی به مدت ۳۰ ثانیه در محلول وایتکس ۱۰درصد غوطه‌ور و بلافاصله با آب مقطر فراوان شستشو شدند. محلول‌های حاوی نمک کلرید سدیم به مقدار هریک ۱۰۰ سی سی تهیه و پس از انتقال بذور به محیط کشت، ۵ میلی‌لیتر از محلول تیمار مورد نظر به هر ظرف اضافه گردید. به منظور جلوگیری از تبخیر و نفوذ آلودگی، اطراف پتری دیش‌ها با استفاده از نوار پارافیکس بسته شد، سپس پتری دیش‌ها در داخل ژرمیناتور با دمای ۱±۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. بذرها به‌طور روزانه

و در ساعت ۱۰ صبح بازبینی و تعداد بذور جوانه زده (دارای طول ریشه‌چه حداقل۲ میلی‌متر) ثبت شدند. بعد از بررسی نتایج حاصل، غلظت ۱۵۰میکرومولار سدیم نیتروپروساید برای پیش‌تیمار بذر در آزمایش-های بعدی انتخاب شد.

۳-۲- صفات مورد بررسی در بخش آزمایشگاهی

۳-۲-۱- صفات مربوط به جوانه‌زنی

برای محاسبه درصد جوانه‌زنی، از روش معمول نسبت بذرهای جوانه زده به کل بذر (رابطه ۱) استفاده گردید (بای و دای، ۱۹۹۳).

$$Gp= 100.(NG/NT) \quad \text{(رابطه ۱)}$$

که در این معادله G_P درصد جوانه‌زنی، N_G تعداد کل بذرهای جوانه زده و N_T تعداد کل بذرها می‌باشد.

سرعت جوانه‌زنی نیز از طریق معادله ماگوئر (رابطه ۲) محاسبه شد (ماگوئر، ۱۹۶۲).

$$Rs = \sum_{i=1}^{n} \frac{Si}{Di} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

که در این معادله S_i تعداد بذور جوانه زده در هر شمارش و D_i تعداد روز شمارش تا روز nام می‌باشد.

بعد از گذشت ۷ روز با انتخاب ۱۰ نمونه از پتری دیش صفاتی مانند طول ریشه‌چه، طول ساقه‌چه، وزن خشک ریشه‌چه و وزن خشک ساقه‌چه اندازه گیری شد. نمونه‌ها در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در دستگاه آون به مدت ۴۸ ساعت خشک شدند و توزین نمونه‌ها به وسیلهٔ ترازو با دقت ۰/۰۰۱ گرم صورت گرفت. همچنین برای اندازه گیری طول ساقه‌چه و ریشه‌چه از کاغذ میلی‌متری استفاده شد.

۳-۲-۲- اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی گیاهچه

جهت اندازه‌گیری آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و گلوتاتیون ریداکتاز نمونه‌های فریز شده به آزمایشگاه منتقل شدند. نمونه‌ها توسط نیتروژن مایع پودر

شدند و میزان ۰/۱ گرم از آن به کمک یک میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌مولار با pH=۷/۸ حاوی EDTA ۰/۱ میلی‌مولار و پلی وینیل پیرولیدون[1] ۱درصد روی یخ همگن گردید. سپس عصاره‌های حاصل در ۱۴۰۰۰ دور در دقیقه و دمای ۴ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه سانتریفیوژ شد و محلول رویی حاصل در ویال‌های استریل جمع‌آوری گردید. محلول‌های رویی به‌دست آمده به‌عنوان عصاره‌های آنزیمی جهت اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی استفاده شدند. به منظور حفظ فعالیت آنزیمی، تمامی مراحل استخراج و اندازه‌گیری میزان فعالیت آنزیم روی یخ انجام شد (سایرام و همکاران، ۲۰۰۲).

۳-۲-۲-۱- اندازه گیری فعالیت سوپراکسید دسموتاز (SOD)

برای تهیه ترکیب واکنش از ۱۳ میلی‌مول متیونین، ۲۵ میکرومول نیتروبلوتترازولیوم[2](NBT)، ۶ میکرومول محلول ۰/۵ مولار EDTA، ۱/۵ میلی‌لیتر از محلول ۱ مولار فسفات بافر (pH=۷/۸)، ۶۰ میکرومول ریبوفلاوین ۱ میلی‌مولار و ۵۰ میلی‌مول سدیم بی‌کربنات استفاده شد. سپس ۲/۹ میلی‌لیتر از مخلوط حاصل را داخل تیوپ استریل ریخته، بلافاصله پس از افزودن ۲ میکرومول ریبوفلاوین و ۰/۱ میلی‌لیتر عصاره آنزیمی، به مدت ۱۵ دقیقه زیر نور لامپ فلورسانس ۱۵×۶ وات قرار داده شد. جهت تعیین میزان فعالیت آنزیم SOD مخلوط حاصل با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۶۰ نانومتر طیف‌سنجی گردید (سایرام و همکاران، ۲۰۰۲).

۳-۲-۲-۲- اندازه گیری فعالیت کاتالاز (CAT)

فعالیت CAT در ۳ میلی‌لیتر بافر واکنش به‌صورت ۵۰ میلی‌مولار بافر فسفات سدیمی با pH=۷، ۱۰میلی‌مولارآب اکسیژنه و ۴۰ میکرولیتر عصاره‌آنزیمی اندازه‌گیری شد. پس از اضافه کردن آب اکسیژنه فعالیت CAT موجود در عصاره آنزیمی، در طول موج ۲۴۰ نانومتر در مدت یک دقیقه با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل HITACHI u-1800) اندازه‌گیری شد. میزان فعالیت آنزیم طبق رابطه ۳

1- Polyvinylpyrrolidone
2- Nitro Blue Terazolium

تعیین گردید (سایرام و همکاران، ۲۰۰۲). (واحد اندازه گیری: mol/ min/ml

(μ= unit ml^{-1}

Enzyme activity (EA) = (ΔOD×1000)×(A-1)/(EC×B)/(C-1) (رابطه ۳)

در روابط فوق:

A= مقدار عصاره آنزیمی موجود در محلول واکنش.

B= مقدار بافر استخراج بکار رفته.

C= وزن نمونه تازه.

ΔOD= اختلاف جذب طول موج خاص هر آنزیم در طول مدت یک دقیقه.

EC= ضریب خاموشی آنزیم.

لازم به ذکر است که برای کاتالاز EC برابر ۳۹/۴ میلی‌مول بر سانتی‌متر می‌باشد.

۳-۲-۲-۳- اندازه گیری فعالیت آسکوربات پراکسیداز (APX)

فعالیت این آنزیم در یک میلی‌لیتر بافر واکنش به صورت ۵۰ میلی‌مولار بافر فسفات پتاسیم با pH=۷، ۰/۵ میلی‌مولار اسید اسکوربیک، ۰/۱ میلی‌مولار EDTA، ۱/۲۵ میلی‌مولار آب اکسیژنه و ۶۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی اندازه‌گیری شد. کاهش جذب آسکوربات پراکسیداز در اثر فعالیت این آنزیم با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۲۹۰ نانومتر در مدت یک دقیقه اندازه‌گیری شد. ضریب خاموشی آسکوربات پراکسیداز برابر ۲/۸ میلی‌مول بر سانتی‌متر در نظر گرفته شد (سایرام و همکاران، ۲۰۰۲).

۳-۲-۲-۴- اندازه گیری فعالیت گلوتاتیون ریداکتاز (GR)

برای طیف‌سنجی ترکیب واکنش، ۱ میلی‌لیتر فسفات پتاسیم بافر ۰/۲ مولار (pH =۷/۵) را که حاوی ۱ میلی مول EDTA، ۰/۵ میلی‌لیتر DTNB ۳ میلی‌مولار حل شده در ۰/۰۱ مول فسفات بافر pH =۷/۵، با ۰/۱ میلی‌لیتر NADPH ۲ میلی‌مولار بود، با ۰/۱ میلی‌لیتر عصاره آنزیمی مخلوط نموده و

بلافاصله پس از افزودن ۰/۱ میلی‌لیتر از گلوتاتیون اکسید شده ۲ میلی‌مولار، در طول موج ۴۱۲ نانومتر و در مدت ۱۰دقیقه، هر ۱۵ ثانیه یکبار، مورد طیف‌سنجی قرار گرفت (سایرام و همکاران، ۲۰۰۲).

۳-۲-۳- پراکسیداسیون لیپیدی (مقدار مالون دی آلدئید)

به منظور بررسی آثار مخرب گونه‌های فعال اکسیژن بر سلامت غشاء، از شاخص پراکسیداسیون لیپید استفاده شد. مالون دی آلدئید محصول نهایی پراکسیداسیون لیپید می‌باشد و لذا اندازه‌گیری مقدار آن می‌تواند به‌عنوان شاخصی از تأثیر گونه‌های فعال اکسیژن تولید شده در شرایط تنش بر گیاه باشد. بدین منظور ۰/۱ گرم برگ تازه و بالغ به‌طور جداگانه در ۲/۵ میلی‌لیتر محلول تری کلرو استیک اسید[1] سائیده و به‌مدت ۵ دقیقه با دور g ۳۰۰۰ سانتریفوژ شد. ۱ میلی‌لیتر از محلول رویی به ۲/۲۵ میلی‌لیتر محلول[2]TBA-TCA اضافه و ۳۰ دقیقه در بن‌ماری با دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و بعد از آن به‌منظور متوقف شدن واکنش بلافاصله در یخ سرد قرار داده شد. سپس نمونه‌ها سانتریفوژ شدند و مقدار جذب در دو طول موج ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شد، که تفاوت جذب در این دو طول موج مقدار مالون د آلدهید (شاخص پراکسیداسیون لیپید) را نشان داد. ضریب خاموشی به‌کار رفته برای اندازه‌گیری مقدار مالون دی آلدئید ۱۵۵ میلی‌مول بر سانتی‌متر بود. مقدار مالون دی آلدئید در هر طول موج طبق رابطه ۴ محاسبه و برحسب میکرومول بر گرم وزن تر برگ بیان گردید (هلث و پکر، ۱۹۶۸).

$$A=\varepsilon bc$$ (رابطه ۴)

که در آن:

A= مقدار جذب در یک طول موج مشخص

ε= ضریب خاموشی، ۱۵۵mM-1cm-1

c= غلظت نمونه b= عرض کوئت

1 Three Choloro Acetic Acid
2 Tio Barbituric Acid

۳-۳- بخش گلدانی

آزمایش دوم به‌صورت فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در ۱۵ اردیبهشت سال ۱۳۹۵ در فضای باز مجموعه گلخانه‌ای ایستگاه تحقیقات کشاورزی در گلدان انجام گرفت. تیمارها شامل مصرف سدیم نیتروپروساید در چهار سطح (صفر، پیش‌تیمار بذر با غلظت ۱۵۰ میکرومولار، محلول‌پاشی با غلظت ۵۰ میکرومولار و پیش تیمار بذر با غلظت ۱۵۰ میکرومولار + محلول‌پاشی با غلظت ۵۰ میکرومولار)، سه سطح محلول‌پاشی کلسیم (صفر، کربنات کلسیم به فرم معمول و نانو با غلظت ۴ در هزار) و تنش شوری در دو سطح (عدم تنش و تنش شوری) در سه تکرار بودند. تیمار تنش شوری با استفاده از آب شور چاه که با تانکر به محل منتقل شد پس از تعیین میزان شوری و مشخصات آب هر روز به میزان ۱۰۰ سی سی برای هر گلدان به وسیله بشر مدرج اعمال گشت و ویژگی‌های آن در جدول ۳-۲ آمده است. لازم به ذکر است که مازاد آب آبیاری از انتهای هر گلدان زهکش می شد. خاک آزمایش از همان زمین انتخابی برای کشت مزرعه ای تهیه و ویژگی‌های آن در جدول ۳-۱ آورده شده است. مقدار ECe خاک پیش از افزودن آب چاه و اعمال تیمار شوری حدود ۲/۲ دسی‌زیمنس بر متر و پتانسیل اسمزی آن حدود ۰/۸- بار بود که پس از اعمال شوری، ECe خاک حدود ۱۲/۲ دسی‌زیمنس بر متر و پتانسیل اسمزی آن حدود ۳/۶- بار گردید. جهت اعمال تیمار مربوط به پیش‌تیمار بذور توسط سدیم نیتروپروساید، بذور به مدت ۱۲ ساعت در محلول ۱۵۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید (غلظت محلول مستخرج از آزمون اول می باشد) خیسانده شدند، سپس بذور با آب مقطر شست و شو شده و تا رسیدن به وزن اولیه در دمای ۲۲ درجه خشک شدند. در مجموع تعداد ۷۲ گلدان با حجم ۱۰ لیتر در این آزمایش انتخاب و بعد از آن کشت بذور در داخل خاک به عمق ۲ سانتی‌متر انجام شد. تعداد ۱۰ بذر در هر گلدان کشت گردید و در مرحله ۲ برگ حقیقی، بوته‌های اضافی حذف و در هر گلدان ۴ بوته نگهداری شد. پودر حاوی نانو ذرات کربنات‌کلسیم با میانگین قطر ذرات ۱۰ تا ۳۰ نانومتر و سدیم نیتروپروساید به فرم معمولی مورد استفاده

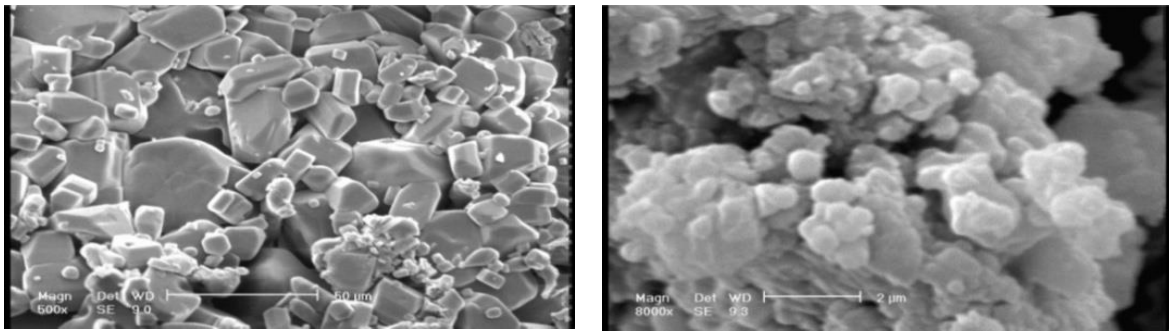
قرار گرفت. تصاویر دستگاه SEM از نمونه ذرات مورد استفاده در شکل ۳-۱ ارائه شده است. به منظور تأمین نیاز غذایی گیاهان، محلول غذایی آمونیوم نیترات با غلظت ۲ در هزار در مرحله دو برگ حقیقی در حجم ۲۰۰ میلی‌لیتر به هر گلدان اضافه شد. برای مقابله با آفات موجود در محیط از جمله مگس سفید، ضمن استفاده از برچسب‌های زرد، از سم ایمیدوکلروپرید با غلظت ۰/۵ در هزار در مرحله شش برگی و از سم دی‌متوات به غلظت ۱ در هزار در مرحله ۱۰ برگی استفاده شد. محلول‌پاشی کربنات‌کلسیم و سدیم نیتروپروساید به فرم‌های معمولی و نانو همزمان در دو مرحله با استفاده از سم‌پاش پشتی میکرون بعد از کالیبره‌کردن با فشار یک اتمسفر در مرحله ساقه‌رفتن و بعد از آن در مرحله گلدهی انجام گرفت. جهت جلوگیری از سوختگی برگ‌ها، محلول‌پاشی هنگام غروب آفتاب انجام شد. دو هفته بعد از آخرین محلول-پاشی نمونه‌گیری از برگ‌ها به‌صورت تصادفی جهت اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیکی انجام شد. و نمونه ها بعد از قرار گرفتن در فویل آلومینیومی و نام‌گذاری به فریزر ۸۰- منتقل شدند. در زمان برداشت نهایی که در اوایل مرداد ماه صورت گرفت، به منظور تعیین عملکرد و اجزای عملکرد دانه، پس از رسیدگی و باز شدن کپسول‌های پایین بوته و زرد شدن برگ‌های پایینی برای جلوگیری از ریزش دانه بوته‌ها به‌طور کامل از گلدان‌ها برداشت و به آزمایشگاه منتقل شدند. پس از خشک شدن کامل بوته‌ها و تعیین عملکرد بیولوژیکی، دانه‌ها با قرار دادن بوته ها در کیسه‌های پارچه ای مخصوص از کپسول خارج شدند.

جدول ۳-۱- مشخصات خاک مورد استفاده

بافت خاک	pH	ECe ($ds\ m^{-1}$)	نیتروژن کل (٪)	فسفر (ppm)	پتاسیم (ppm)	آهن (ppm)	روی (ppm)
لومی	۷/۸	۲/۱	۰/۱۵	۱۵/۶	۱۱۰	۰/۱۸	۰/۰۲

جدول ۳-۲- مشخصات آب مورد استفاده

نوع آب	pH	ECe ($ds\ m^{-1}$)	املاح محلول (g/l)	کلسیم (ppm)	سدیم (ppm)
شور	۷/۳	۵/۱	۱/۱۴	۱۷۰	۲۱۴
معمولی	۷/۱	۱/۲	۰/۴	-	-



شکل ۳-۱- **تصاویر سدیم نیتروپروساید (راست) وکربنات کلسیم به فرم نانو ذرات (چپ) توسط دستگاه SEM**

۳-۴- صفات مورد بررسی در بخش گلدانی

۳-۴-۱- وزن خشک برگ و ریشه

برای اندازه‌گیری وزن خشک اندام‌های مختلف گیاه، پس از برداشت گیاهان (۸۰ روز پس از کاشت در گلدان)، نمونه‌های گیاهی به صورت مجزا و در داخل پاکت به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی-گراد خشک و سپس با ترازوی دقیق توزین شدند.

۳-۴-۲- سطح برگ

سطح برگ کامل گیاهان در هر واحد آزمایشی توسط دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ (مدل-LI 3000A, USA) ۶۰ روز پس از کاشت اندازه‌گیری شد. میانگین دو بوته به‌عنوان سطح برگ در گیاه آن واحد آزمایشی ثبت گردید.

۳-۴-۳- ارتفاع بوته

ارتفاع گیاهان قبل از برداشت با خط‌کش میلی‌متری از قسمت طوقه تا انتهای ساقه اندازه‌گیری شد. میانگین ارتفاع دو گیاه موجود در هر واحد آزمایشی به‌عنوان ارتفاع بوته در نظر گرفته شد.

۳-۴-۴- قطر ساقه

قطر ساقه قبل از برداشت با استفاده از کولیس دیجیتال اندازه گیری شد. میانگین قطر دو گیاه موجود در هر واحد آزمایشی به‌عنوان قطر ساقه در نظر گرفته شد.

۳-۴-۵- محتوای کلروفیل برگ

نمونه برداری جهت اندازه‌گیری محتوای کلروفیل ۶۰ روز پس از کاشت انجام شد. برای اندازه‌گیری این صفت از روش آرنون (۱۹۴۹) استفاده شد. در این روش مقدار ۰/۵ گرم از قسمت پهنک برگ به قطعات کوچکی خرد و در داخل هاون قرار داده شد. سپس نمونه‌های برگی با اضافه کردن استون ۸۰ درصد داخل هاون له شدند. محتویات حاصل از کاغذ صافی عبور داده شد و این عمل تا زمانی که رنگ سبز برگ‌ها از بین رفت، ادامه یافت. عصاره حاصل به‌مدت ۱۵ دقیقه در دستگاه سانتریفیوژ با سرعت ۵۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. سپس محتوی هر لوله آزمایش با استون ۸۰ درصد به حجم ۱۵ میلی‌لیتر رسانده شد و میزان جذب نوری هریک از عصاره‌ها توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل HITACHI u-1800) در دو طول موج ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر خوانده شد. از استون ۸۰ درصد به‌عنوان محلول شاهد استفاده شد. داده‌های حاصل جهت محاسبه محتوای کلروفیل (میلی‌گرم در گرم وزن تازه برگ) به ترتیب در روابط ۵، ۶ و ۷ وارد گردیدند:

$$C\ chl\ a = ((0.0122 \times Abs\ 663) - (0.00269 \times Abs\ 645)) \times ml\ acceton / mg\ leaf \quad \text{(رابطه ۵)}$$

$$C\ chl\ b = ((0.0229 \times Abs\ 645) - (0.00460 \times Abs\ 663)) \times ml\ acceton / mg\ leaf \quad \text{(رابطه ۶)}$$

$$C\ chl\ total = 0.0202 \times Abs\ 645 + 0.00802 \times Abs\ 663 \quad \text{(رابطه ۷)}$$

در این روابط C نشان دهنده غلظت و chl a، chl b و chl total به ترتیب کلروفیل a، b و کل و Abs ۶۴۵ و Abs ۶۶۳ عبارت از جذب در طول موج‌های ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر می‌باشد.

۳-۴-۶- محتوای پرولین برگ

جهت اندازه‌گیری محتوای پرولین تعداد ۳ برگ فعال و هم‌سن از هر واحد آزمایشی به‌صورت تصادفی نمونه‌گیری شد و میزان پرولین به روش بیتز (۱۹۷۳) اندازه‌گیری شد. در این روش ۴۰۰ میلی-گرم از برگ تازه گیاه که قبلاً در دمای۲۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شده بود به داخل هاون چینی منتقل و با اضافه کردن ۱۰ میلی‌لیتر اسید سولفوسالیسیلیک ۳ درصد به آن در داخل هاون کوبیده شدند.

سپس محلول حاصل از کاغذ صافی عبور داده شد و مقدار ۲ میلی‌لیتر از محلول صاف شده به همراه ۲ میلی‌لیتر محلول ناین هیدرین و ۲ میلی‌لیتر محلول اسید استیک در یک لوله آزمایش ریخته شد. محلول حاصل به خوبی تکان داده شد و به مدت یک ساعت در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد در حمام بن‌ماری قرار داده شد. لوله‌های حاوی محلول جهت متوقف شدن واکنش بلافاصله در یخ قرار داده شدند و سپس مقدار ۴ میلی‌لیتر تولوئن به محلول اضافه و به مدت ۱۵ تا ۲۰ ثانیه تکان داده شد. بعد از تکان دادن محلولی دو فازی تشکیل شد که فاز بالایی حاوی پرولین بود.

برای کالیبره کردن دستگاه اسپکتروفتومتر از محلول تولوئن استفاده شد، پس از کالیبره کردن دستگاه قرائت نمونه‌ها در طول موج ۵۲۰ نانومتر صورت گرفت. میزان پرولین به‌دست آمده طی این روش، بر اساس میکرومول پرولین در گرم برگ تازه به‌دست آمد.

۳-۴-۷- فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی برگ

در این بخش فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی سوپر اکسید دیسموتاز، کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز اندازه‌گیری شد. روش اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های ذکر شده کاملاً مشابه آزمایش اول (بخش آزمایشگاهی) بود.

۳-۴-۸- پراکسیداسیون لیپیدی (مقدار مالون دی آلدئید)

میزان مالون‌دی‌آلدئید نیز مشابه آزمایش اول (بخش آزمایشگاهی) به‌وسیله تست تیوباربیتوریک اسید (TBAT) اندازه‌گیری شد (هلث و پکر، ۱۹۶۸).

۳-۴-۹- میزان سدیم و کلسیم در برگ

برای اندازه‌گیری مقدار عناصر سدیم و کلسیم در برگ‌های گیاه در پایان مرحله برداشت، نمونه‌های خشک شده ابتدا آسیاب شدند، سپس از هر نمونه آسیاب شده به مقدار ۰/۵ گرم با ترازوی دقیق توزین شد. نمونه‌های وزن شده داخل کروزه چینی ریخته شد و داخل کوره الکتریکی قرار گرفت. به منظور

سوختن کامل نمونه‌ها، کروزه‌های حاوی نمونه به مدت ۳ ساعت در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا به طور کلی مواد آلی سوخته و مواد گیاهی به خاکستر تبدیل شود. بعد از خنک شدن کروزه‌ها، ۵ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۲ نرمال به کروزه‌ها اضافه شد. سپس با حرارت دادن ملایم کروزه‌ها روی هیتر مواد خاکستر شده در اسید حل شدند، سپس محلول تهیه شده از قیف و کاغذ صافی عبور داده شد. عصاره در بالن ژوژه جمع آوری شد و مقدار کافی آب مقطر به آن اضافه شد و حجم عصاره نهایی به ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. برای اندازه‌گیری سدیم و کلسیم نمونه‌ها از دستگاه جذب اتمی (مدل PERKIN-ELMER 3030) استفاده شد. برای این منظور ابتدا محلول‌های استاندارد مورد نظر به دستگاه داده شد و سپس میزان عناصر نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.

۳-۴-۱۰- عملکرد و اجزای عملکرد

اجزای عملکرد گیاه کنجد شامل تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول و وزن هزار دانه پس از برداشت کامل محصول با استفاده از ۲ بوته از هر واحد آزمایشی مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. سپس اقدام به محاسبه عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک گردید. بعد از محاسبه میانگین عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک در دو بوته شاخص برداشت از حاصل تقسیم عملکرد دانه به عملکرد بیولوژیک به‌دست آمد.

۳-۴-۱۱- درصد پروتئین دانه

برای اندازه‌گیری میزان پروتئین از روش کجلدال استفاده شد. این روش دارای سه مرحله هضم، تقطیر و تیتراسیون بوده و برای این منظور در مرحله هضم ابتدا ۱ گرم از نمونه و ۵ گرم از مخلوط سولفات‌ها (سولفات مس ۳/۵ گرم+ سولفات پتاسیم ۰/۹۶ گرم + اکسید سلنیوم ۰/۵ گرم) و همچنین ۲۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ را در یک بالن حجمی با هم مخلوط و بالن روی هیتر قرار گرفت تا نمونه به‌طور کامل هضم شد و محتویات بالن به رنگ سبز درخشان درآمد. مشاهده این حالت نشان پایان مرحله هضم بود. پس از خنک شدن محلول، ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر به بالن اضافه گردید. سپس نمونه در مرحله

تقطیر در جایگاه مخصوص بالن در دستگاه قرار گرفت. در طرف دیگر ارلن حاوی اسید بوریک ۲ درصد + ۵ قطره محلول تاشیرو (۰/۸۸ گرم متیل رد + ۰/۱۶ گرم بروموکرازول + ۱۰۰ میلی‌لیتر اتانول) قرار داشت. شیر آب مبرد باز شد و شعله هیتر روشن گردید تا محلول بجوشد. در این مرحله رنگ محلول کاملاً سیاه شد. تقطیر تا زمان رسیدن حجم محلول داخل ارلن به حدود ۳۰۰ میلی‌لیتر ادامه یافت. تمام آمونیاک موجود در نمونه استخراج شده و به‌صورت مایع وارد اسید بوریک موجود در ارلن شد و بورات آمونیوم به‌وجود آمد. در مرحله آخر یعنی تیتراسیون بورات آمونیوم موجود در ارلن با اسید هیدروکلریک ۰/۱ نرمال تیتر گردید. برای این منظور بالن روی هات پلیت قرار داده شد و یک عدد مگنت داخل آن گذاشته شد، سپس محلول در حال هم زدن تا به‌وجود آمدن رنگ ارغوانی با اسید یاد شده تیتر شد. حجم اسید مصرف شده یادداشت و در رابطه ۸ قرار داده شد (علی امامی، ۱۳۷۵).

$$\text{درصد نیتروژن} = \frac{\text{عدد حاصل از تیتراسیون} \times ۰/۰۰۱۴}{\text{وزن نمونه(گرم)}} \times ۱۰۰ \qquad \text{(رابطه ۸)}$$

درصد پروتئین با استفاده از ضریب تبدیل پروتئین (اشرف، ۲۰۰۱) برای کنجد محاسبه شد.

$$\text{درصد پروتئین} = \text{درصد نیتروژن} \times ۵/۲۳ \qquad \text{(رابطه ۹)}$$

۳-۴-۱۲- میزان روغن دانه

اندازه‌گیری روغن دانه با استفاده از روش سوکسله انجام شد. برای این منظور ۵ گرم از نمونه‌های پودر شده، پس از قرارگرفتن در آون ۷۲ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۴ ساعت، وزن و داخل کارتوش سلولزی ریخته و درب آن با پنبه عاری از چربی پوشانده شد. حلال مورد استفاده متانول و کلروفورم به‌میزان ۱۸۰ میلی‌لیتر به نسبت ۲:۱ (دو قسمت متانول و یک قسمت کلروفورم) بود. مدت زمان روغن-

گیری ۴/۵ ساعت بود و درجه منبع حرارتی مطابق نقطه جوش حلال تنظیم گردید. همچنین برای تبخیر حلال از دستگاه تبخیر در خلاء[1]استفاده شد.

۳-۵- بخش مزرعه‌ای

آزمایش سوم نیز در اردیبهشت ماه سال ۱۳۹۵ در مزرعه آموزشی ایستگاه تحقیقات کشاورزی شرق کشور انجام شد. این منطقه دارای موقعیت جغرافیایی ۵۸ درجه و ۵۷ دقیقه طول شرقی، ۳۵ درجه و ۳۲ دقیقه عرض شمالی و ارتفاع ۱۰۶۳ متری از سطح آب‌های آزاد واقع است. بر اساس تقسیم بندی کوپن[2]، این منطقه دارای آب و هوایی نیمه خشک با تابستان‌های خشک وگرم است. میانگین سالیانه دمای این منطقه ۱۶/۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. این منطقه بر اساس آمار دراز مدت هواشناسی در فاصله زمانی تیرماه تا اواسط مهر فاقد بارندگی مؤثر است. بافت خاک منطقه آزمایشی لومی شنی و از رده اریدیسول[3] می‌باشد. مشخصات خاک مزرعه در جدول ۳-۱ آمده است.

این آزمایش به‌صورت اسپلیت پلات - فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. فاکتور اصلی شامل دو سطح شوری (آبیاری با آب معمولی و شور) و فاکتورهای فرعی شامل چهار سطح سدیم نیتروپروساید (صفر، پیش‌تیمار بذر با غلظت ۱۵۰ میکرومولار، محلول‌پاشی با غلظت ۵۰ میکرومولار و پیش تیمار بذر با غلظت ۱۵۰ میکرومولار + محلول‌پاشی با غلظت ۵۰ میکرومولار) و سه سطح محلول‌پاشی کلسیم (صفر، کربنات کلسیم به فرم معمول و نانو با غلظت ۴ در هزار) بودند. تیمار تنش شوری با استفاده از آب شور چاه پس از تعیین میزان شوری و مشخصات آب آن اعمال شد که ویژگی‌های آن در جدول ۳-۲ آمده است. برای این منظور آب شور چاه توسط تانکر به محل آزمایش منتقل می‌شد.

1- Evaporator
2- Kupen
3- Aridisoil

۳-۵-۱- عملیات زراعی و اجرای آزمایش

قطعه مورد نظر انتخاب و عملیات شخم و دیسک و ماله در فروردین ماه ۱۳۹۵ انجام و زمین کرت-بندی شد. یک نمونه خاک سطحی از هر تکرار قبل از کودپاشی و کاشت جهت آزمایش خاک‌شناسی و تجزیه برداشته شد و میزان کلسیم قابل جذب، فسفر، پتاسیم و نیتروژن نمونه خاک مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. به‌منظور تأمین فسفر و نیتروژن مورد نیاز گیاه بر اساس آزمون خاک کود مونوفسفات آمونیوم به میزان۱۵۰ کیلوگرم در هکتار وکود اوره نیز به میزان ۵۰ کیلوگرم در هکتار قبل از کاشت و ۵۰ کیلوگرم به‌صورت سرک هنگامی که ارتفاع بوته‌ها به حدود ۲۰ سانتی‌متر رسیده بود، به خاک مزرعه اضافه شد.

هر کرت آزمایشی شامل چهار خط کاشت به طول ۳ متر با فواصل بین ردیف ۵۰ سانتی‌متر و روی ردیف ۱۰ سانتی‌متر بود. بذور مربوط به پیش‌تیمار با سدیم نیتروپروساید به روش خیساندن در محلول ۱۵۰میکرومولار همانند آزمایش گلدانی تهیه شدند.کشت در نیمه دوم اردیبهشت ماه انجام شد و آبیاری مزرعه (به میزان یکسان و کنترل شده آب شور و معمول) با توجه به نیاز آبی رقم کشت شده (اولتان) هر ۸ روز انجام گرفت. کلیه عملیات داشت شامل سله‌شکنی، مبارزه با علف‌های هرز و تنک کردن به موقع اجرا گردید.

محلول‌پاشی کربنات‌کلسیم و سدیم نیتروپروساید به فرم‌های معمولی و نانو روی گیاهان در دو مرحله (به علت رشد نامحدود بودن کنجد و محلول‌پاشی برگ‌های جدید) با استفاده از سم‌پاش پشتی میکرون بعد از کالیبره‌کردن با فشار یک اتمسفر در مرحله ساقه‌رفتن و بعد از آن در مرحله آغاز گلدهی (۶۰ روز پس از کاشت) انجام گرفت. جهت جلوگیری از سوختگی برگ‌ها، محلول‌پاشی هنگام غروب آفتاب و در هوای آرام انجام شد.

دو هفته بعد از آخرین محلول‌پاشی در پایان تیرماه نمونه‌گیری از برگ‌ها جهت اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیکی انجام شد و نمونه‌ها بعد از قرار گرفتن در فویل آلومینیومی و نام‌گذاری به فریزر ۸۰- منتقل

شدند. در زمان برداشت نهایی که در شهریورماه صورت گرفت، به منظور تعیین عملکرد و اجزای عملکرد دانه، پس از رسیدگی و باز شدن کپسول‌های پایین بوته و زرد شدن برگ‌های پایینی برای جلوگیری از ریزش دانه ۱۰ بوته از هر کرت به‌طور تصادفی برداشت شد. بوته‌ها برای جلوگیری از ریزش دانه‌ها درون گونی قرار داده شدند و به انبار مرکز تحقیقات که دارای دستگاه تهویه بود منتقل شدند. در انبار نیز برای جلوگیری از کپک‌زدگی، گونی‌ها روی سکوهای چوبی قرار گرفتند تا هوا در زیر آن‌ها در جریان باشد. در نهایت پس از خشک شدن کامل بوته ها به شدت داخل همان گونی تکان داده شدند تا بذرها به‌طور کامل از کپسول‌ها خارج شوند. سپس برای اندازه‌گیری صفات عملکردی وزن کل بوته‌ها و بذرها اندازه‌گیری شد و شاخص برداشت و عملکرد دانه محاسبه گردید.

۳-۶- صفات مورد بررسی در بخش مزرعه‌ای

صفات زراعی (شامل وزن خشک اندام هوایی و ریشه، سطح برگ، ارتفاع و قطر ساقه، تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت)، صفات فیزیولوژیک (شامل مقدار کلروفیل a، b و کل برگ، محتوای پرولین برگ، فعالیت آنزیم‌های آنتی-اکسیدانی برگ، پراکسیداسیون لیپیدی و غلظت سدیم و کلسیم اندام‌هوایی) و صفات کیفی (شامل درصد پروتئین دانه و میزان روغن دانه) به همان روش‌های ذکر شده در بخش گلدانی مورد اندازه‌گیری قرارگرفتند.

۳-۷- محاسبات آماری

داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار SAS مورد تجزیه آماری قرار گرفتند. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد در صورت معنی‌دار بودن اثر عامل آزمایشی انجام گرفت.

فصل چهارم

نتایج و بحث

۴-۱- بخش آزمایشگاهی

۴-۱-۱- درصد جوانه‌زنی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تیمارهای سدیم نیتروپروساید، شوری و برهم‌کنش آن‌ها تأثیر معنی‌داری بر درصد جوانه‌زنی داشت (جدول پیوست ۱). بررسی برهم‌کنش بین پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید و تنش شوری نشان داد که در همه‌ی سطوح تیمار سدیم نیتروپروساید با افزایش شوری از درصد جوانه‌زنی کاسته شد ولی کاربرد سدیم نیتروپروساید تا حدودی نقش تعدیل‌کننده تنش شوری را ایفا کرد، به‌طور مشخص در شرایط شوری شدید میزان کاهش ثبت شده برای صفت درصد جوانه‌زنی در دو غلظت ۱۰۰ و ۱۵۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید کمتر از بقیه تیمارها بود (شکل ۴-۱). تمامی سطوح سدیم نیتروپروساید در شرایط شاهد تنش شوری مقادیر بالاتری از درصد جوانه‌زنی را نشان دادند. در این بین درصد جوانه‌زنی بذور در تیمار بدون پیش‌تیمار بذر در شرایط عدم شوری به‌طور معنی‌داری کمتر از ۵ سطح دیگر بود (شکل ۴-۱).

جدول ۴-۱- مقایسه میانگین درصد و سرعت جوانه‌زنی، وزن خشک ساقه‌چه و ریشه‌چه و طول ساقه‌چه و ریشه‌چه تحت تأثیر سطوح مختلف سدیم نیتروپروساید در بخش آزمایشگاهی

سدیم نیتروپروساید (میکرومولار)	درصد جوانه‌زنی	سرعت جوانه‌زنی (بذر در روز)	وزن خشک ساقه‌چه	وزن خشک ریشه‌چه	طول ساقه‌چه	طول ریشه‌چه
			(گرم در بوته)		(میلی‌متر)	
عدم پیش‌تیمار	۷۳/۲^{c}	۶/۱۷^{c}	۲/۲۱^{c}	۱/۶۳^{c}	۱۴/۳^{c}	۲۴/۹^{b}
آب مقطر	۷۹/۴^{b}	۶/۲۳^{c}	۲/۲۸^{c}	۱/۵۷^{c}	۱۵/۷^{c}	۲۵/۲^{b}
۵۰	۷۹/۶^{b}	۷/۷۳^{ab}	۲/۴۶^{bc}	۲/۳۳^{b}	۲۱/۲^{b}	۳۱/۵^{a}
۱۰۰	۸۲/۰^{a}	۷/۴۳^{ab}	۲/۸۱^{a}	۲/۵۳^{ab}	۲۱/۹^{b}	۳۲/۱^{a}
۱۵۰	۸۰/۰^{ab}	۸/۵۹^{a}	۲/۹۵^{a}	۲/۶۴^{a}	۲۴/۷^{a}	۳۵/۳^{a}
۲۰۰	۸۱/۰^{a}	۶/۹۲^{bc}	۲/۶۸^{ab}	۲/۳۰^{b}	۲۲/۷^{ab}	۳۱/۶^{a}

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک بر اساس آزمون LSD دارای اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد نمی‌باشند.

کورپس و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعه‌ای مروری روی اثر سدیم نیتروپروساید بر تنش‌های مختلف محیطی گزارش نمودند که پاسخ گونه‌ها و جنس‌های مختلف به این تیمار متفاوت است و غلظت‌های استفاده شده و نحوه اعمال تیمارها نیز می‌تواند در پاسخ به آن نقش داشته باشد.

گزارش شده است که تنش شوری به دلیل کاهش آب مورد نیاز برای آب‌نوشی و اثر سمیت یون‌های کلر و سدیم موجب القای خواب اجباری و کاهش درصد جوانه‌زنی می‌شود (خان، ۲۰۱۰). پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد که در غلظت‌های متوسط نمک، کاهش پتانسیل اسمزی عامل محدودکننده جوانه-زنی است، اما در غلظت‌های بالا سمیت یونی و در پی آن افزایش جذب یون‌ها به خصوص NaCl و عدم‌تعادل بین عناصر غذایی از عوامل مهم ایجاد اختلال و کاهش درصد جوانه‌زنی محسوب می‌شود (ایزدی دربندی و همکاران، ۱۳۹۱). با ورود نمک به بافت‌های داخلی بذر، ظرفیت آب درون آن کاهش و جذب افزایش می‌یابد. نمک جذب شده به داخل بذر اثر سمیت روی بافت‌ها داشته و قابلیت جوانه‌زدن را کاهش می‌دهد (ایزدی دربندی و همکاران، ۱۳۹۱). علت کاهش درصد جوانه‌زنی با افزایش شوری را می‌توان به حضور بیش از حد کاتیون‌ها و آنیون‌ها نیز نسبت داد که علاوه بر ایجاد مسمومیت با توجه به قابلیت انحلال آن‌ها در آب، پتانسیل آب را نیز کاهش می‌دهند. به‌طوری که علی‌رغم وجود آب در محیط به‌علت اینکه ظرفیت واکنش آن‌ها در اشغال یون‌های موجود قرار می‌گیرد، گیاه قادر به جذب آب نبوده و با نوعی کمبود آب فیزیولوژیکی مواجه می شود (ایزدی دربندی و همکاران، ۱۳۹۱). علاوه بر این، تجمع یون‌های مضر در سیتوپلاسم سبب تجمع و سمیت یک یون خاص شده و در متابولیسم سایر عناصر موردنیاز گیاهچه جهت رشد اختلال ایجاد کرده و دسترسی به این عناصر را با کاهش روبرو می‌کند (گورهام، ۱۹۹۶).

جدول ۴-۲- مقایسه میانگین درصد و سرعت جوانه‌زنی، وزن خشک ساقه‌چه و ریشه‌چه و طول ساقه چه و ریشه‌چه تحت تأثیر سطوح مختلف تنش شوری در بخش آزمایشگاهی

شوری (میلی مولار)	درصد جوانه‌زنی	سرعت جوانه‌زنی (بذر در روز)	وزن خشک ساقه‌چه	وزن خشک ریشه‌چه	طول ساقه‌چه	طول ریشه‌چه
			(گرم در بوته)		(میلی‌متر)	
صفر	۹۱/۸۹۴^{a}	۹/۶۹^{a}	۳/۲۳^{a}	۲/۸۳^{a}	۲۵/۲^{a}	۴۰/۲^{a}
۵۰	۸۰/۹۴۴^{b}	۷/۵۳^{b}	۲/۸۲^{b}	۲/۱۲^{b}	۲۰/۱^{b}	۲۹/۶^{b}
۱۰۰	۶۴/۷۳۳^{c}	۴/۳۲^{c}	۱/۶۵^{c}	۱/۵۵^{c}	۱۵/۰^{c}	۲۰/۵^{c}

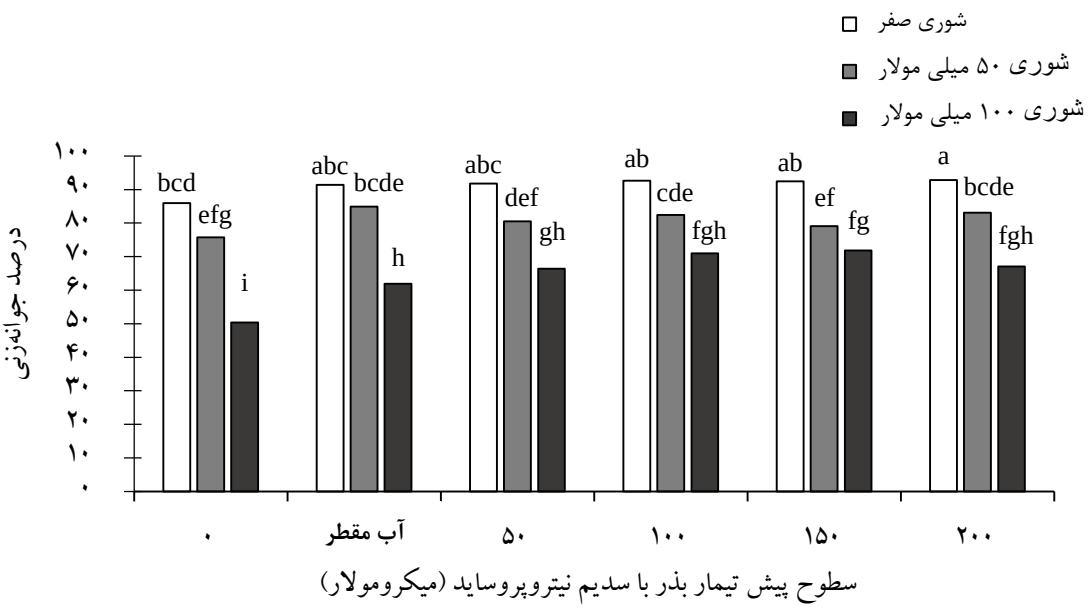
در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک بر اساس آزمون LSD دارای اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد نمی‌باشند.

قلی‌نژاد (۱۳۸۹) با بررسی اثر تنش شوری بر شاخص‌های جوانه‌زنی گندم گزارش داد که با افزایش شوری شاخص‌های جوانه‌زنی کاهش معنی‌داری پیدا می‌کنند، به‌طوری‌که بیش‌ترین و کم‌ترین شاخص جوانه‌زنی با میانگین ۴/۸۴ و ۲/۷۱ از تیمار شاهد و بالاترین سطح شوری (۱۶ دسی زیمنس بر متر) به دست آمد. هم‌چنین بیان نمود که شوری ۱۶ دسی زیمنس بر متر که بالاترین سطح شوری در آزمایش وی بود، سبب کاهش ۴۰ درصدی در میزان جوانه‌زنی گردید. در بررسی اثر تنش شوری بر شاخص‌های جوانه‌زنی در دو گیاه آرتیشو و سرخارگل گزارش شد که با افزایش تنش شوری از میزان درصد جوانه‌زنی به‌شدت کاسته می‌شود، به‌گونه‌ای که در بالاترین سطح تنش شوری درصد جوانه‌زنی در آرتیشو و سرخارگل به ترتیب ۹۸ و ۱۰۰ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش نشان داد. علاوه بر این، گزارش شد که در آرتیشو روند کاهشی درصد جوانه‌زنی با رسیدن شوری به ۵- بار آغاز شد، درحالی‌که سرخارگل به سطح پائین و متوسط تنش هم واکنش نشان داد (محمدی و همکاران، ۱۳۹۴).

احتمال دارد کاهش سرعت جوانه‌زنی به سبب اختلال در جذب آب توسط بذر و کندی فعالیت‌های آنزیمی درون بذر باشد، که درنهایت سبب می‌شود زمان لازم برای خروج ریشه‌چه افزایش یابد و یا به‌عبارت‌دیگر سرعت جوانه‌زنی کاهش نشان دهد. سرعت جوانه‌زنی یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی

ارقام در تحمل به تنش است (محمدی و همکاران، ۱۳۹۴). ارقام با سرعت جوانه‌زنی بالا در شرایط تنش شوری، امکان سبز شدن سریع‌تری نسبت به سایر ارقام دارند. همچنین ممکن است سرعت جوانه‌زنی به مقاومت پوسته بذر در کنترل و جذب آب و به نوع ژنوتیپ گیاه نیز بستگی داشته باشد.

بایبوردی و طباطبایی (۲۰۱۰) اعلام کردند که کاهش درصد و سرعت جوانه‌زنی در کلزا در شرایط تنش شوری با کاهش جذب آب توسط بذر در مرحله آبگیری و تورژسانس ارتباط دارد. در گیاهان مختلف هم‌چون کلم، چغندرقند و لوبیا گزارش شده است که زمان لازم برای جوانه‌زنی با افزایش غلظت نمک افزایش می‌یابد (جمیل و همکاران، ۲۰۰۴). در مطالعه دوازده‌امامی و همکاران (۱۳۹۲) روی گیاه بادرشبویه گزارش شد که با افزایش شدید تنش شوری تا میزان ۳۹ دسی زیمنس بر متر میزان جوانه‌زنی از ۹۶ درصد به صفر می‌رسد.



شکل ۴-۱- اثر برهم‌کنش سطوح سدیم نیتروپروساید و تنش شوری بر درصد جوانه‌زنی بذر کنجد

۴-۱-۲- سرعت جوانه‌زنی

اثر شوری و سدیم نیتروپروساید بر این صفت در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول پیوست ۱). پیش‌تیمار بذر کنجد با سدیم نیتروپروساید موجب افزایش سرعت جوانه‌زنی گردید، سرعت جوانه‌زنی در تیمار بدون پیش‌تیمار بذر (۶/۱۷ بذر در روز) و پیش‌تیمار با آب مقطر (۶/۲۳ بذر در روز) پایین بود. که در اثر پیش‌تیمار بذر با سه سطح ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید به‌طور معنی داری بهبود یافت به‌طوری که سرعت جوانه‌زنی در تیمار ۱۵۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید حدود ۳۹/۲ درصد نسبت به تیمار عدم پیش‌تیمار بیشتر بود ولی بین سه غلظت ذکر شده اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. لازم به ذکر است که کاربرد غلظت ۲۰۰ میکرومولار نیز تفاوت معنی داری با شاهد نشان نداد (جدول ۴-۱). جیبا و همکاران (۱۹۹۸) نیز افزایش درصد و سرعت جوانه‌زنی بذور را در حضور نیتریک اکسید در سرخدار گزارش کردند. در مطالعه کوپیرا و همکاران (۲۰۰۳) روی لوپین گزارش شد که غلظت‌های پائین سدیم نیتروپروساید جوانه‌زنی را به میزان بسیار بیشتری نسبت به غلظت‌های بالای سدیم نیتروپروساید تحریک می‌کنند.

مقایسه سطوح تنش شوری نشان داد که بیش‌ترین سرعت جوانه‌زنی مربوط به تیمار شاهد (۹/۶۹ بذر در روز) و کم‌ترین سرعت جوانه‌زنی متعلق به تیمار ۱۰۰ میلی‌مولار نمک طعام (۴/۳۲ بذر در روز) بود. سرعت جوانه‌زنی در شوری ۵۰ میلی‌مولار ۲۱ درصد و در سطح شوری ۱۰۰ میلی‌مولار ۵۵ درصد نسبت به تیمار شاهد (عدم تنش) کاهش یافت (جدول ۴-۲). یکی از اثرات شوری بعد از ایجاد سمیت برای گیاه بروز تنش اسمزی است، در این شرایط جذب آب توسط بذر دچار اختلال شده یا به‌کندی صورت می‌پذیرد و فعالیت‌های متابولیکی مربوط به جوانه‌زنی در داخل بذر به‌آرامی انجام خواهد شد، درنتیجه مدت‌زمان خروج ریشه‌چه از بذر افزایش و سرعت جوانه‌زنی کاهش می‌یابد (آبنوس و همکاران، ۲۰۰۱).

در مطالعه فاضلی‌کاخکی و همکاران (۱۳۹۳) تنش شوری موجب کاهش سرعت جوانه‌زنی اکوتیپ‌های کنجد گردید.

۴-۱-۳- وزن خشک ساقه‌چه

پیش‌تیمار بذور با سدیم نیتروپروساید سبب تأثیر معنی‌دار بر وزن خشک ساقه گردید (جدول پیوست ۱). نتایج نشان داد که پیش‌تیمار بذر با غلظت ۱۰۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید و بالاتر از آن سبب افزایش معنی‌دار وزن خشک ساقه‌چه گردید، البته بین سه غلظت ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید از لحاظ تأثیرگذاری بر این صفت اختلافی وجود نداشت (جدول ۴-۱).

همچنین نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تنش شوری بر این صفت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است، ولی اثر برهم‌کنش پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید و تنش شوری معنی‌دار نشد (جدول پیوست۱). با افزایش میزان تنش شوری میزان وزن خشک ساقه‌چه به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. بیش‌ترین وزن خشک ساقه‌چه مربوط به تیمار شاهد (۳/۲۳ گرم) و کم‌ترین وزن خشک ساقه‌چه متعلق به تیمار ۱۰۰ میلی‌مولار نمک طعام (۱/۶۵ گرم) بود (جدول ۴-۲). مطالعات نشان داده است که گیاهان در محیط شور جهت تحمل شرایط تنش ناچار به ساخت مواد آلی مانند پرولین و گلایسین و تجمع املاح معدنی جهت انجام تنظیم اسمزی می‌باشند. با توجه به اینکه ساخت این مواد نیازمند صرف انرژی است، لذا در این شرایط رشد گیاه با کاهش مواجه شده و وزن خشک گیاهچه کاهش می‌یابد (سراج و سینکلیر، ۲۰۰۲). ازاین‌رو کاهش وزن خشک ساقه‌چه در گیاه کنجد را می‌توان به هزینه‌ای نسبت داد که این گیاه به‌منظور بروز پاسخ‌های مقاومت به تنش صرف کرده است. در مطالعه ترابیان و زاهدی (۱۳۹۲) در بررسی اثر تنش شوری بر آفتابگردان گزارش شد که با افزایش تنش شوری وزن خشک ساقه‌چه به‌شدت کاهش می‌یابد.

بذر بعد از جذب آب و جوانه‌زنی و قبل از خروج برگ‌های اولیه و شروع فتوسنتز از موادغذایی اندوخته در درون خود استفاده می‌کند، به‌طوری که بعد از جذب آب و هم زمان با آن یک سری از هورمون‌ها و تعدادی از آنزیم‌های مهم درون بذر از جمله لیپازها و پروتئازها و آمیلاز تولید شده که منجر به تجزیه موادغذایی اندوخته در بذر از جمله نشاسته و انحلال آن‌ها در آب می‌شوند که از این طریق انرژی لازم برای خروج ریشه‌چه و ساقه‌چه و رشد آن‌ها فراهم می‌شود (ایزدی دربندی و همکاران، ۱۳۹۱). در نتیجه تنفس و مصرف اندوخته غذایی درون بذر وزن خشک کل زیست‌توده کاهش می‌یابد. بنابراین جذب کم‌تر آب توسط بذر در محیط شور موجب کاهش رشد و نمو گیاهچه شده که این کاهش رشد را می‌توان با کاهش اندازه طول ریشه، ساقه‌چه و هم‌چنین کاهش وزن تر و خشک آن‌ها مورد بررسی قرار داد (ایزدی دربندی و همکاران، ۱۳۹۱). اکیز و ایلماز (۲۰۰۳) با بررسی وزن خشک و طول گیاهچه‌های جو در شرایط تنش شوری نتیجه گرفتند که وزن خشک گیاهچه به‌طور کلی برای نشان دادن حساسیت به شوری معیار مناسب‌تری نسبت به طول آن است. هم‌چنین در بررسی اثر تنش شوری بر ارقام کنجد گزارش شد که وزن ساقه‌چه با افزایش تنش شوری به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد (ایزدی دربندی و همکاران، ۱۳۹۱).

۴-۱-۴- وزن خشک ریشه‌چه

اثر سدیم نیتروپروساید و شوری در سطح احتمال ۱ درصد بر وزن خشک ریشه‌چه معنی‌دار بود (جدول پیوست ۱). بیش‌ترین میزان این صفت در غلظت‌های ۱۰۰ و ۱۵۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید دیده شد، درحالی که مقدار این صفت در تیمارهای شاهد (۱/۶۳ گرم) و آب مقطر (۱/۵۷ گرم) پایین بود (جدول ۴-۱). بین افزایش غلظت و وزن خشک ریشه‌چه رابطه خطی و مستقیمی وجود نداشت. به عبارت بهتر، در بالاترین غلظت سدیم نیتروپروساید نه‌تنها روند افزایش در مقدار وزن خشک ریشه‌چه مشاهده

نشد بلکه مقدار این صفت کاهش یافت. این روند مشابه تأثیرپذیری صفات سرعت جوانه‌زنی و وزن خشک ساقه‌چه از افزایش غلظت سدیم نیتروپروساید بود (جدول ۴-۱).

در جدول ۴-۲ مشاهده می‌گردد که با افزایش میزان شوری از وزن خشک ریشه‌چه کاسته شد. مقدار این کاهش در دو سطح ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار شوری نسبت به سطح صفر به ترتیب ۲۵ و ۴۵ درصد بود (جدول ۴-۲). افزایش سطوح شوری با اثر بر تقسیم سلولی و متابولیسم گیاه جوانه‌زنی گیاهچه را کاهش داده و می‌تواند موجب کاهش وزن ریشه‌چه شود (تورهان و آیاز، ۲۰۰۴). همچنین اثر بازدارندگی کلرید سدیم بر جوانه‌زنی بذر به جذب یون‌های کلر و سدیم توسط هیپوکوتیل بستگی دارد (تورهان و آیاز، ۲۰۰۴). اکرم و همکاران (۲۰۰۷) با بررسی اثر تنش شوری بر آفتابگردان و بحرینی (۲۰۱۳) در مطالعه اثر تنش شوری در کلزا کاهش وزن‌تر و خشک ریشه‌چه را گزارش کردند. در مطالعه‌ای که روی یازده رقم پنبه صورت گرفت، گزارش شد که شوری به‌طور معنی‌داری بر وزن خشک ریشه‌چه اثر می‌گذارد (نور و همکاران، ۲۰۰۱). نونامی و همکاران (۱۹۹۷) نتیجه گرفتند که تیمار نمودن سیستم‌های ریشه‌ای با پتانسیل پایین آب، شیب پتانسیل آب را میان آوندهای چوبی و سلول‌های در حال رشد ساقه از بین می‌برد، از این رو اختلاف پتانسیل آب بین آوندهای چوبی و بیرون از آن علت اصلی ممانعت از رشد و کاهش وزن گیاهچه می‌باشد.

۴-۱-۵- طول ساقه‌چه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که سطوح مختلف سدیم نیتروپروساید و تنش شوری بر طول ساقه‌چه تأثیر معنی‌داری داشتند (جدول پیوست ۱). از لحاظ تأثیرگذاری پیش‌تیمار بذر با سدیم-نیتروپروساید بین دو غلظت ۵۰ و ۱۰۰ و نیز دو غلظت ۱۵۰ و ۲۰۰ میکرومولار اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. از این رو بیش‌ترین طول ساقه‌چه در تیمار ۱۵۰ و ۲۰۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید ثبت شد. کم‌ترین طول ساقه‌چه نیز در تیمارهای شاهد (۱۴/۳ میلی‌متر) و آب مقطر (۱۵/۷ میلی‌متر) مشاهده شد

(جدول ۴-۱). بر اساس نتایج به نظر می‌رسد که استفاده از سدیم نیتروپروساید تا غلظت ۱۵۰ میکرومولار افزایش طول ساقه‌چه را در پی دارد و افزایش غلظت آن تأثیر منفی بر این صفت دارد (جدول ۴-۱). هرچند که وجود یک یا چند تیمار غلظتی دیگر می‌توانست این روند را به‌گونه‌ای بهتر نمایش دهد.

طول ساقه‌چه در غلظت‌های ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار شوری به ترتیب ۲۰/۲ و ۴۰/۵ درصد کاهش یافت (جدول ۴-۲). یکی از دلایل کاهش طول ساقه‌چه در شرایط تنش، کاهش یا عدم انتقال مواد غذایی از لپه‌ها به جنین است (کافی و رستمی، ۱۳۸۶). علاوه بر آن، کاهش جذب آب از طریق بذر در شرایط تنش سبب کاهش ترشح هورمون‌ها و فعالیت آنزیم‌ها و درنتیجه اختلال در رشد گیاهچه (ساقه‌چه و ریشه‌چه) می‌شود (نصیرخان و همکاران، ۲۰۰۷). در بررسی‌هایی که روی ارقام مختلف گلرنگ و آفتابگردان با اعمال تنش شوری به‌عمل‌آمده است، مشاهده شد که درصد جوانه‌زنی و طول ریشه‌چه و ساقه‌چه و نیز وزن خشک آن‌ها با افزایش سطح شوری کاهش می‌یابد (ترابیان و زاهدی، ۱۳۹۲). به نظر می‌رسد طول ساقه‌چه با قدرت جوانه‌زنی و تغذیه کافی گیاهچه‌ها در ارتباط باشد (ایزدی دربندی و همکاران، ۱۳۹۱). جمیل و همکاران (۲۰۰۶) گزارش کردند که افزایش شوری موجب کاهش درصد و سرعت جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه و ساقه‌چه و وزن خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه در کلزا می‌شود. با توجه به این نتایج نیز به نظر می‌رسد افزایش شوری از طریق اختلال در کارکرد ساقه‌چه سبب کاهش معنی‌دار طول آن در کنجد شد.

۴-۱-۶- طول ریشه‌چه

طول ریشه‌چه از پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید، همچنین تنش شوری در سطح احتمال یک درصد تأثیر پذیرفت (جدول پیوست ۱). پیش‌تیمار بذر با آب مقطر تأثیری بر طول ریشه‌چه نداشت ولی سطوح سدیم نیتروپروساید این صفت را بهبود بخشیدند. علی‌رغم بالاتر بودن طول ریشه‌چه در تیمار ۱۵۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید اما بین این تیمار و تیمارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار از نظر آماری

تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. درواقع می‌توان گفت افزایش غلظت حتی تا سه برابر سبب افزایش معنی‌دار در طول ریشه‌چه نشد. اما همانند سایر صفت‌های اندازه‌گیری شده با افزایش غلظت سدیم نیترو پروساید به بالاترین سطح (۲۰۰ میکرومولار) از مقدار طول ریشه‌چه کاسته شد (جدول ۴-۱). در خصوص اثر سدیم‌نیتروپروساید بر شاخص‌های جوانه‌زنی در گیاه لوپین نیز گزارش شد که افزایش طول ریشه‌چه در غلظت‌های ۰/۱ تا ۴۰۰ میلی‌مولار قابل مشاهده نبود (کوپیرا و همکاران، ۲۰۰۳). در غلظت‌های ۴۰۰ تا ۶۰۰ افزایش در طول ریشه‌چه مشاهده شد و مجدداً در غلظت‌های ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ کاهش در طول ریشه‌چه اتفاق افتاد (کوپیرا و همکاران، ۲۰۰۳).

ریشه‌چه به سبب آنکه گیاه را در ارتباط مستقیم با خاک قرار می‌دهد و جذب آب و املاح را در ابتدای زندگی گیاه میسر می‌سازد و ساقه‌چه به دلیل فراهم نمودن مواد مورد نیاز گیاه از ریشه‌چه و انجام فرایند فتوسنتز از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند (کوپیرا و همکاران، ۲۰۰۳). نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر نشان داد که اعمال تنش شوری سبب کاهش قابل توجه در طول ریشه‌چه می‌شود به‌گونه‌ای که در تیمار ۱۰۰ میلی مولار نمک طعام کم‌ترین مقدار طول ریشه‌چه (۲۰/۵ میلی‌متر) دیده شد که تقریباً نصف شرایط عادی بود (جدول ۴-۲).

در مطالعه‌ای روی یازده رقم پنبه گزارش شد که تحت تنش شوری عملکرد هورمون سیتوکینین در ریشه‌چه متوقف می‌شود، بنابراین طول ریشه‌چه معیار مناسبی برای اندازه‌گیری تحمل به تنش شوری در گیاهان مختلف است (نور و همکاران، ۲۰۰۱). عابدی و پاک نیت (۲۰۱۱) معتقدند که بعد از جذب آب و هم زمان با آن یکسری از هورمون‌ها و تعدادی از آنزیم‌های مهم (ازجمله لیپاز، پروتئاز، آمیلاز و غیره) درون بذر ترشح می‌شوند، که سبب می‌شود تا موادغذایی اندوخته در بذر از جمله نشاسته تجزیه شده و در آب حل شوند و از این طریق انرژی لازم برای خروج ریشه‌چه و ساقه‌چه و رشد آن‌ها فراهم گردد که در شوری‌های بالا، مکانیسم فعالیت درون بذر دستخوش تغییر شده و این مراحل مختل می‌شوند و با

کاهش و یا توقف رشد به‌دلیل عدم انتقال موادغذایی از لپه به ریشه‌چه و ساقه‌چه، وزن خشک آن‌ها کاهش می‌یابد. در مطالعه اثر تنش شوری بر دو گیاه دارویی آرتیشو و سرخارگل گزارش شد که اثر سطوح تنش شوری بر طول ریشه‌چه و ساقه‌چه و نسبت آن‌ها در هر دو گیاه معنی‌دار بود. نتایج نشان داد که در گیاه سرخارگل با افزایش شدت تنش شوری طول ریشه‌چه و ساقه‌چه کاهش یافت تا این‌که به صفر رسید، درحالی‌که در گیاه آرتیشو طول ریشه‌چه و ساقه‌چه تیمارشده به‌مراتب بیش‌تر از تیمار شاهد بود و پس از آن کاهش یافت تا این‌که به صفر رسید (محمدی و همکاران، ۱۳۹۴). حسینی و رضوانی مقدم (۱۳۸۵) در مطالعه خود روی اثر تنش شوری بر اسفرزه گزارش کردند که با افزایش شوری از میزان طول ریشه‌چه و ساقه‌چه کاسته شد، به‌گونه‌ای که در تنش شوری ۱۰- بار طول ریشه‌چه و ساقه‌چه به صفر رسید. در پژوهشی دیگر روی اثر تنش شوری بر ژنوتیپ‌های مختلف عدس گزارش گردید که با افزایش تنش شوری از میزان طول ریشه‌چه کاسته می‌شود (صادقی آذر، ۱۳۹۲). شوری به علت کند نمودن جذب آب موجب کاهش طول ریشه‌چه و ساقه‌چه می‌شود. مطالعات نشان داده است که شوری با کاهش رشد ریشه، ظرفیت جذب آب و عناصر غذایی را کاهش می‌دهد (جمیل و همکاران، ۲۰۰۶).

۴-۱-۷- فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی

۴-۱-۷-۱- سوپراکسید دیسموتاز (SOD)

اثر سدیم نیتروپروساید در سطح احتمال ۱ درصد تأثیر معنی‌داری بر فعالیت این آنزیم در گیاهچه کنجد داشت، هرچند برهم‌کنش پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید و تنش شوری تأثیری بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز نداشت (جدول پیوست۲). با افزایش غلظت سدیم نیتروپروساید بر میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی آنزیم سوپراکسید دیسموتاز افزوده شد. در بین تیمارهای مورد بررسی بیش‌ترین مقدار فعالیت این آنزیم در غلظت‌های ۱۵۰ و ۲۰۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید (معادل ۱۸/۱ و ۱۹/۲ واحد آنزیمی بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) دیده شد درحالی‌که میزان فعالیت این آنزیم در تیمار شاهد

و آب مقطر (۱۰/۷ و ۱۱/۱ واحد آنزیمی بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) پایین بود. بین غلظت های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میکرومولار نیز اختلاف معنی‌داری از لحاظ تأثیرگذاری بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز وجود نداشت (جدول ۴-۳). ونگ و همکاران (۲۰۰۴) با بررسی اثر استفاده از سدیم نیتروپروساید بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گندم در شرایط تنش خشکی گزارش دادند که سدیم نیتروپروساید سبب افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز می‌شود ولی اثر کمی بر فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز دارد.

شی و همکاران (۲۰۰۷) نیز نقش نیتریک اکسید در کاهش تنش اکسیداتیو را مربوط به توانایی نیتریک اکسید در القای آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و تبدیل یون سوپراکسید به پراکسید هیدروژن و اکسیژن مولکولی می‌دانند و بیان نمودند که اگر پراکسید هیدروژن تولید شده به موقع از سلول دفع نشود، با آنیون‌های سوپراکسید واکنش داده و تولید رادیکال‌های هیدروکسیلی می‌کنند که بسیار سمی و واکنش‌پذیر هستند (شی و همکاران، ۲۰۰۷). از طرفی نیتریک اکسید با تبدیل آنیون سوپراکسید به پراکسید هیدروژن، این آنیون را از سلول حذف می‌کند و از طرفی دیگر با القای آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند آنزیم آسکوربات پراکسیداز، سمیت آب اکسیژنه را نیز کاهش می‌دهد (کوپیرا و گودز، ۲۰۰۳). هم‌چنین، نیتریک اکسید می‌تواند به طور مستقیم با آنیون سوپراکسید ترکیب شده و تولید رادیکال پراکسی نیتریت (-ONOO) کند که سمیت و خسارت آن به سلول بسیار کم‌تر از رادیکال‌های اکسیژن است (بلیگنی و لاماتینا، ۲۰۰۱). در تأیید این نتایج، بسیاری از پژوهش‌ها کارکرد نیتریک اکساید را در کاهش تنش اکسیداتیو به القای فعالیت آنزیم‌های حذف‌کننده رادیکال‌های آزاد نسبت داده‌اند (لی و همکاران، ۲۰۰۸ ؛ ژنگ و همکاران، ۲۰۰۹ ؛ یوچیدا و همکاران، ۲۰۰۲).

جدول ۴-۳- مقایسه میانگین فعالیت سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، گلوتاتیون ریداکتاز و محتوای مالون دی‌آلدئید تحت تأثیر سطوح مختلف سدیم نیتروپروساید در بخش آزمایشگاهی

سدیم نیتروپروساید (میکرومولار)	سوپراکسید دیسموتاز	کاتالاز	آسکوربات پراکسیداز	گلوتاتیون ریداکتاز	محتوای مالون دی‌آلدئید (میکرومول بر گرم وزن تر)
	(واحد آنزیمی بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه)				
عدم پیش‌تیمار	۱۰/۷^{c}	۱/۳۶^{a}	۵/۵۶^{d}	۰/۲۰^{b}	۱۳/۸۷^{a}
آب مقطر	۱۱/۱^{c}	۱/۳۷^{a}	۶/۳۳^{cd}	۰/۲۳^{b}	۱۱/۰۲^{b}
۵۰	۱۵/۳^{b}	۰/۸۷^{b}	۷/۳۳^{bc}	۰/۲۷^{ab}	۷/۶۰^{d}
۱۰۰	۱۵/۸^{b}	۰/۹۱^{b}	۸/۵۶^{ab}	۰/۲۶^{ab}	۸/۰۲^{cd}
۱۵۰	۱۸/۱^{ab}	۰/۸۴^{b}	۸/۶۹^{ab}	۰/۳۴^{a}	۷/۹۳^{cd}
۲۰۰	۱۹/۲^{a}	۱/۱۸^{a}	۹/۴۷^{a}	۰/۳۱^{a}	۹/۸۱^{bc}

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک بر اساس آزمون LSD دارای اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد نمی‌باشند.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر تنش شوری نیز بر فعالیت این آنزیم در گیاهچه کنجد در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول پیوست ۲). نتایج نشان داد که با افزایش سطح تنش فعالیت این آنزیم به شکل بسیار معنی‌داری افزایش می‌یابد. فعالیت این آنزیم در تنش ۵۰ میلی مولار نمک طعام ۱۴/۹۸ واحد بر گرم وزن خشک گیاهچه بود که با افزایش غلظت نمک به ۱۰۰ میلی مولار فعالیت این آنزیم به ۲۰/۷۵ واحد بر گرم وزن خشک گیاهچه رسید. این افزایش در فعالیت آنزیم در حدود ۳ برابر حالت نرمال (صفر میلی‌مولار) بود که نشان‌دهنده نقش آنتی‌اکسیدانی قوی این آنزیم در مقابله با تنش شوری است (جدول ۴-۴).

تنش شوری موجب اختلال وضعیت آبی سلول و کاهش پتانسیل آب آن، کاهش رشد گیاه، افزایش تولید یون‌های مخرب از جمله آنیون‌های سوپراکسید و خسارت اکسیداتیو در سلول می‌شود و در چنین شرایطی، فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز به‌عنوان یک آنزیم از بین برنده یون سوپراکسید افزایش

می‌یابد (میتوا و همکاران، ۲۰۰۴). این افزایش فعالیت، می‌تواند سمیت‌زدایی یون سوپراکسید را افزایش داده و سبب کاهش آسیب‌های اکسیداتیو به‌دست آمده از آن شود (اسدی‌صنم و همکاران، ۱۳۹۳). عابدی و پاک‌نیت (۲۰۱۱) تغییرات آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان را در پاسخ به تنش خشکی در ده واریته کلزا مورد بررسی قرار دادند و گزارش نمودند که فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در شرایط تنش به شکل معنی‌داری افزایش پیدا کرد. ملونی و همکاران (۲۰۰۳) با بررسی اثر تنش کلرید سدیم بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، پراکسیداز و گلوتاتیون ریداکتاز (GR) در دو رقم پنبه بیان نمودند که فعالیت SOD در رقم Pora با افزایش تنش نمک طعام افزایش یافت؛ اما تیمار شوری اثر قابل‌توجهی در فعالیت این آنزیم در رقم Guazuncho نداشت.

جدول ۴-۴- مقایسه میانگین فعالیت سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، گلوتاتیون ریداکتاز و محتوای مالون دی‌آلدئید تحت تأثیر تنش شوری در بخش آزمایشگاهی

تنش شوری (میلی‌مولار)	سوپراکسید دیسموتاز	کاتالاز	آسکوربات پراکسیداز	گلوتاتیون ریداکتاز	محتوای مالون دی‌آلدئید
	(واحد آنزیمی بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه)				(میکرومول بر گرم وزن تر)
صفر	۹/۳^{c}	۰/۶۷^{c}	۳/۹^{c}	۰/۲۲^{b}	۵/۴۷^{c}
۵۰	۱۴/۹^{b}	۰/۹۷^{b}	۷/۳۹^{b}	۰/۲۵^{b}	۹/۰۱^{b}
۱۰۰	۲۰/۷^{a}	۱/۶۲^{a}	۱۱/۷^{a}	۰/۳۳^{a}	۱۴/۶۳^{a}

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک بر اساس آزمون LSD دارای اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد نمی‌باشند.

۴-۱-۷-۲- کاتالاز (CAT)

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که سطوح مختلف سدیم نیتروپروساید، تنش شوری و برهم-کنش آن‌ها بر فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاهچه کنجد در سطح احتمال ۱ درصد تأثیر معنی‌داری داشت (جدول پیوست ۲). در تمام سطوح پیش‌تیمار با سدیم نیتروپروساید، افزایش شوری، افزایش در میزان فعالیت کاتالاز را به دنبال داشت، البته این افزایش در شرایط عدم پیش‌تیمار بذر و پیش‌تیمار با آب مقطر

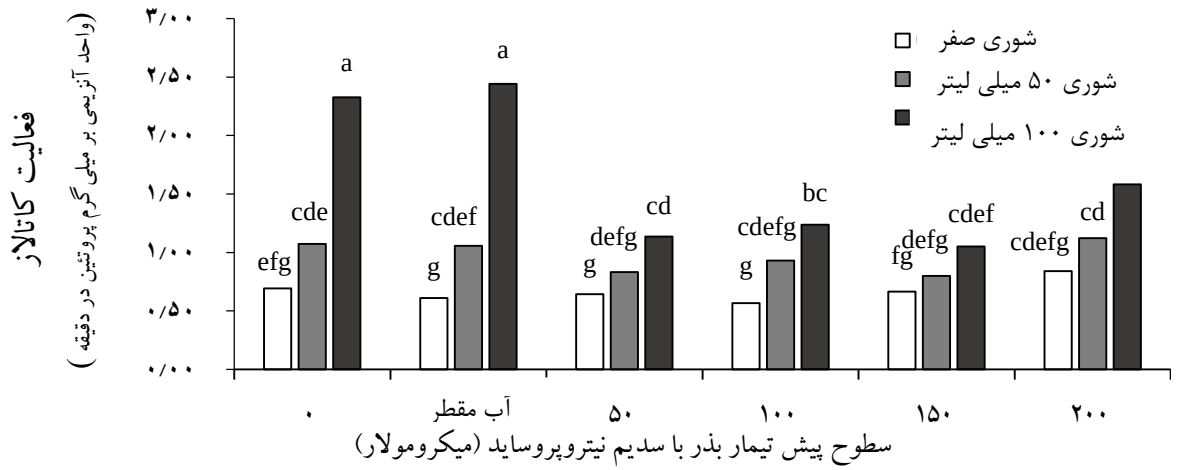
و اعمال شوری ۱۰۰ میکرومولار بسیار چشمگیر بود و به لحاظ آماری در گروه برتر قرار گرفتند (شکل ۴-۲). پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید و افزایش غلظت آن تا ۱۵۰ میکرومولار سبب کاهش قابل توجه فعالیت آنزیم کاتالاز درسطح شوری شدید گردید ولی کاربرد غلظت ۲۰۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید موجب تحریک دوباره فعالیت آنزیم کاتالاز شد. از نتایج به‌دست‌آمده می‌توان نتیجه‌گیری کرد که سدیم نیتروپروساید به دلیل دارا بودن نقش آنتی‌اکسیدانی، سبب کاهش خسارت‌های ناشی از تنش شوری ازجمله فعال شدن رادیکال‌های آزاد (ROS) می‌شود که در نهایت کاهش فعالیت آنزیم کاتالاز را سبب می‌شود.

در مطالعه نصیبی (۱۳۹۱) نیز کاهش فعالیت آنزیم کاتالاز به هنگام استفاده از تیمارهای سدیم نیتروپروساید گزارش شده است. در برخی مطالعات نقش نیتریک اکساید (NO) در القای آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان گزارش شده است، ولی در غلظت‌های بالا فعالیت برخی آنزیم‌ها مثل کاتالاز و گلوتاتیون پراکسیداز کاهش یافته که محققان معتقدند این اثر احتمالاً به سبب مسمومیت ایجادشده در این غلظت‌ها بوده است (وندهنه و همکاران، ۲۰۰۱). در مطالعه صورت گرفته توسط شئوکاند و همکاران (۲۰۰۸) روی گیاه نخود گزارش شد که استفاده از سدیم نیتروپروساید سبب افزایش ۳۰ درصدی فعالیت آنزیم کاتالاز می‌گردد. شئوکاند و همکاران (۲۰۱۰) همچنین بیان نمودند که میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در شرایط تنش خشکی با کاربرد سدیم نیتروپروساید در گیاه نرمال تا ۱۴ درصد و در گیاه تیمار شده ۲۷ درصد افزایش می‌یابد. ژانگ و همکاران (۲۰۰۶) گزارش نمودند که سدیم نیتروپروساید به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان عمل می‌کند. در این مطالعه نیز غلظت‌های پائین‌تر سدیم نیتروپروساید نقش آنتی‌اکسیدانی قوی‌تری داشتند؛ هرچند که این موضوع در خصوص تمامی گونه‌ها و حتی ارقام مختلف یک‌گونه صادق نیست. همچنین نقش محافظتی و آنتی‌اکسیدانی سدیم نیتروپروساید نیز که با فعال کردن آنزیم‌هایی نظیر کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و غیره در ارتباط است، در شرایط تنش خشکی در چندین مطالعه

گزارش شده است (وانگ و همکاران، ۲۰۰۴ و لاماتینا و همکاران، ۲۰۰۴). تو و همکاران (۲۰۰۳) گزارش دادند که در برگ‌های گندم تیمار شده با سدیم نیتروپروساید بر میزان فعالیت آنزیم کاتالاز افزوده شده و به دنبال آن از میزان پراکسید هیدروژن (H_2O_2) به‌شدت کاسته می‌شود.

شوری باعث ایجاد اختلال در سیستم‌های آنزیمی خنثی‌کننده انواع اکسیژن فعال می‌گردد که این امر منجر به افزایش پراکسیداسیون لیپیدها و درنتیجه خسارت به غشاء سلولی و تخریب رنگ‌دانه‌ها می‌شود (عبدالجلال و همکاران، ۲۰۰۹). در شرایط تنش میزان اکسیژن‌های آزاد در گیاهان افزایش می‌یابد، گیاهان در مقابله با این اکسیژن‌های واکنش‌پذیر، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیداتیو خاص از قبیل کاتالاز، پراکسیداز، گلوتاتیون ریداکتاز و سوپراکسید دیسموتاز را افزایش می‌دهند. تحقیقات نشان می‌دهد که تحت تنش شوری و اسمزی میزان مالون دی‌آلدئید (MDA) در برگ‌های گیاه افزایش می‌یابد، هم‌چنین فعالیت آنزیم لیپواکسیژناز و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی از قبیل سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و گلوتاتیون پراکسیداز نیز افزایش می‌یابد (لاماتینا و همکاران، ۲۰۰۴).

کاتالاز آنزیمی است که در تمام موجودات زنده ازجمله سلول‌های گیاهی، جانوری و میکروارگانیسم-های هوازی یافت شده و به‌عنوان یکی از مهم‌ترین آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان ایفای نقش می‌کند (بلوچ و همکاران، ۲۰۰۷ و اسکاندلیوس و همکاران، ۱۹۹۷) و نقش مهمی را در پاک‌سازی H_2O_2 تولیدشده به‌وسیله فرآیندهایی همچون بتااکسیداسیون اسیدهای چرب، اکسیداسیون در حین تنفس نوری و انتقال الکترون در زنجیره تنفسی میتوکندری‌ها را ایفا می‌نماید (اسکاندلیوس و همکاران، ۱۹۹۷).



شکل ۴-۲- اثر برهم‌کنش سطوح سدیم نیتروپروساید و تنش شوری بر فعالیت آنزیم کاتالاز در برگ گیاهچه کنجد در بخش آزمایشگاهی

۴-۱-۷-۳- آسکوربات پراکسیداز (APX)

اثر سطوح مختلف سدیم نیتروپروساید و تنش شوری در سطح احتمال ۱ درصد بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در گیاهچه کنجد معنی‌دار بود (جدول پیوست ۲). نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که با افزایش غلظت سدیم نیتروپروساید بر میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در گیاهچه کنجد افزوده شد به گونه‌ای که با حدود ۷۰/۳ درصد افزایش نسبت به تیمار عدم پیش‌تیمار در غلظت ۲۰۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید به ۹/۴۷ واحد آنزیمی بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه رسید. هرچند که در مواردی این افزایش فعالیت بین سطوح مختلف معنی‌دار نبود (جدول ۴-۳). شئوکاند و همکاران (۲۰۰۸) گزارش دادند که کاربرد سدیم نیتروپروساید سبب افزایش ۳۴ درصدی بر فعالیت آسکوربات پراکسیداز در گیاه نخود تحت تنش شوری گردید. در گزارش دیگری توسط این محقق در سال ۲۰۰۶ روی دو رقم نخود در شرایط تنش خشکی نیز گزارش شد که در شرایط تنش میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز تا ۱۸ درصد افزایش می‌یابد (شئوکاند و همکاران، ۲۰۱۰).

نتایج مقایسه سطوح شوری نشان داد که افزایش شدت تنش شوری موجب افزایش حدوداً ۳ برابری در میزان فعالیت این آنزیم گردید. میزان فعالیت این آنزیم از ۳/۹ در تیمار شاهد به ۱۱/۶۷ واحد آنزیمی بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه در تیمار ۱۰۰ میلی‌مولار نمک رسید (جدول ۴-۴).

آسکوربات پراکسیداز یکی از مهم‌ترین آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در گیاه است که با استفاده از آسکوربات برای احیا کردن، سمیت H_2O_2 را از بین می‌برد. ایزوفرم‌های مختلف APX در کلروپلاست، سیتوزول و میکروزوم‌ها فعال می‌باشند. در گیاهان مختلف، فعالیت APX در پاسخ به انواع تنش‌های زیستی و غیرزیستی افزایش می‌یابد. APX در ترکیب با چرخه آسکوربات-گلوتاتیون برای جلوگیری از انباشته شدن سطوح سمی H_2O_2 در موجودات زنده فتوسنتز کننده عمل می‌کند. APX اختصاصی‌تر عمل کرده و از آسکوربات به‌عنوان دهنده الکترون استفاده می‌کند؛ اما می‌تواند به میزان کمتر از گایاکول[1] یا سایر سوبستراها نیز استفاده کند (عبدالجلال و همکاران، ۲۰۰۹). فعالیت APX تقاضا برای بازسازی آسکوربات را افزایش خواهد داد. در این زمینه اعتقاد بر این است که افزایش همزمان چندین جز سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی به‌منظور به‌دست آوردن افزایش مکانیسم‌های دفاعی در گیاهان ضروری خواهد بود. APX با پاک‌سازی رادیکال‌های اکسیژن سمی از آسیب به غشاء جلوگیری می‌کند (عبدالجلال و همکاران، ۲۰۰۹). همچنین آسکوربات پراکسیداز توانایی واکنش مستقیم با رادیکال سوپراکسید و سایر فرم‌های فعال اکسیژن را دارد که می‌تواند شدت آسیب را مستقیما کاهش دهد (ایسرار و ساهی، ۲۰۰۶).

۴-۱-۷-۴- گلوتاتیون ریداکتاز (GR)

فعالیت گلوتاتیون ریداکتاز در بخش آزمایشگاهی از اثرات اصلی شامل شوری و سدیم نیتروپروساید در سطح احتمال ۱ درصد تأثیر پذیرفت (جدول پیوست ۲). فعالیت این آنزیم در شرایط عدم پیش‌تیمار و پیش‌تیمار بذر با آب مقطر پایین بود و اختلافی با هم نداشت. با کاربرد سدیم نیتروپروساید تا غلظت ۱۰۰

1- guaiacol

میکرومولار نیز اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد ولی دو غلظت ۱۵۰ و ۲۰۰ میکرومولار تقریباً به یک اندازه و به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد فعالیت گلوتاتیون ریداکتاز را بهبود بخشیدند (جدول ۴-۳). در جدول ۴-۴ مشاهده می‌شود که فعالیت این آنزیم در اثر شوری ۵۰ میلی‌مولار تغییری نکرد ولی شوری ۱۰۰ میلی‌مولار موجب تحریک فعالیت آن شد به‌طوری که نسبت به شاهد افزایش ۵۰ درصدی نشان داد.

به‌طورکلی می‌توان بیان کرد که آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی مانند اسید آسکوربیک و گلوتاتیون که در غلظت‌های بالا (به ترتیب ۲۰-۵ میلی‌مولار و ۵-۱ میلی‌مولار) در کلروپلاست‌ها و دیگر اجزای سلولی یافت می‌شوند، در مکانیسم‌های دفاعی گیاهان طی تنش‌های اکسایشی بسیار مهم هستند (نوکتور و فویر، ۱۹۹۸). لذا حفظ نسبت‌های بالای آسکوربات و گلوتاتیون احیاشده در سلول‌ها برای پاک‌سازی مناسب گونه‌های فعال اکسیژن بسیار ضروری می‌باشد که این نسبت به‌وسیله گلوتاتیون ریداکتاز نگه‌داری می‌شود. محققین نشان داده‌اند که غلظت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در شرایط تنش دو برابر شده و لذا سبب افزایش مقاومت به تنش‌های اکسایشی می‌شوند و از طرفی تنش شوری و خشکی نیز میزان فعالیت آنزیم گلوتاتیون ریداکتاز و سوپراکسید دیسموتاز را افزایش می‌دهد (گمبل، ۱۹۸۴). کور و بهاتلا (۲۰۱۶) گزارش دادند که نیتریک اکساید (NO) به‌طور معنی‌داری موجب کاهش اثر تنش شوری توسط تعدیل فعالیت GR و محتوای گلوتاتیون در گیاهچه آفتابگردان می‌شود.

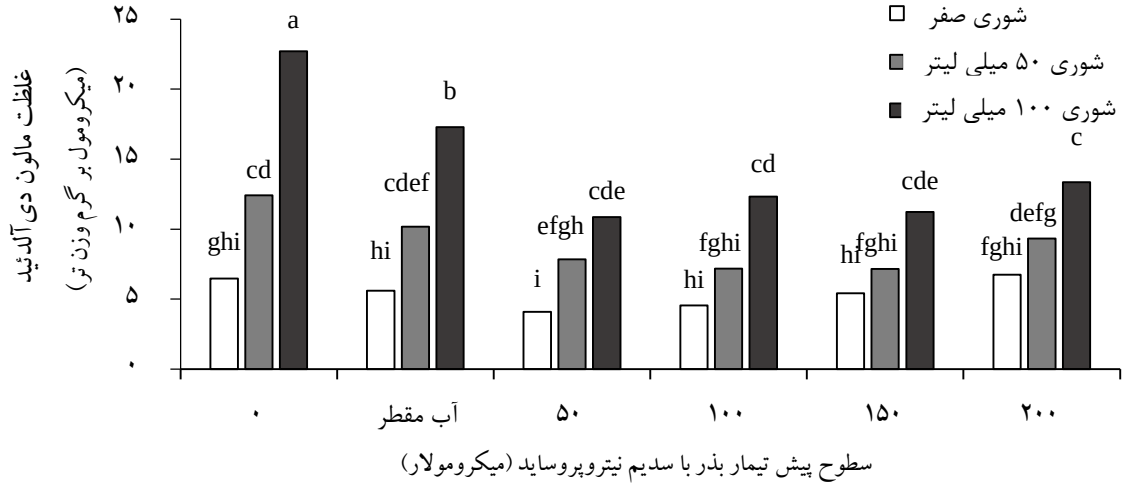
۴-۱-۷-۵- مالون دی‌آلدئید (MDA)

میزان مالون‌دی‌آلدئید از سطوح مختلف سدیم نیتروپروساید، تنش شوری و برهم‌کنش آن‌ها در سطح احتمال ۱ درصد به‌طور معنی‌داری تأثیر پذیرفت (جدول پیوست ۲). در تمام سطوح پیش‌تیمار با سدیم - نیتروپروساید، افزایش شوری، افزایش در غلظت مالون‌دی‌آلدئید را به دنبال داشت، در این بین بیشترین میزان مالون‌دی‌آلدئید که بیانگر بالا بودن پراکسیداسیون لیپیدها است در برگ گیاهانی مشاهده گردید

که در معرض سدیم نیتروپروساید نبودند و بالاترین سطح تنش شوری را تجربه کردند (شکل ۴-۳). پیش تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید و افزایش غلظت آن تا ۱۵۰ میکرومولار سبب کاهش غلظت مالون‌دی-آلدئید درسطح شوری شدید گردید. از نتایج به‌دست‌آمده می‌توان نتیجه‌گیری کرد که سدیم نیتروپروساید به دلیل دارا بودن نقش آنتی‌اکسیدانی، سبب کاهش خسارت‌های ناشی از تنش شوری ازجمله فعال شدن رادیکال‌های آزاد اکسیژن می‌شود که درنهایت کاهش غلظت مالون‌دی‌آلدئید را سبب می‌شود. در غلظت ۲۰۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید و هر سه سطح شوری مجدداً افزایش در غلظت مالون‌دی‌آلدئید مشاهده شد. دلیل آن می‌تواند افزایش و تجمع بیش از حد رادیکال پراکسی نیتریت باشد. استفاده از سدیم نیتروپروساید سبب کاهش تخریب غشاء و نشت این ماده می‌شود. از این رو کم‌ترین مقدار مالون دی آلدئید در تیمارهای ۵۰ تا ۱۵۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید و بیش‌ترین مقدار این ماده هم در تیمار شاهد دیده شد (شکل ۴-۳ و جدول ۴-۳). اسدی صنم و همکاران (۱۳۹۳) با بررسی اثر سدیم نیتروپروساید بر روی گیاه جو تحت تنش شوری گزارش دادند که کاربرد نیتریک اکساید (NO) خارجی سبب کاهش اکسیداسیون لیپیدهای غشاءی سلول و محتوای مالون دی‌آلدئید در برگ‌های گیاهچه‌های جو می‌گردد. آن‌ها گزارش دادند که تیمار ۰/۱ مولار سدیم نیتروپروساید کم‌ترین میزان MDA را در شرایط تنش شوری دارد. باویتا و همکاران (۲۰۱۲) با بررسی نقش سدیم نیتروپروساید در تنش گرما در گندم بیان نمودند که سدیم نیتروپروساید سبب کاهش میزان MDA می‌شود که میزان کاهش MDA در رقم C306 مشخص‌تر است و NO سبب ترمیم غشاء و فعال‌سازی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان می‌گردد. شئوکاند و همکاران (۲۰۰۸) گزارش دادند که استفاده از سدیم نیتروپروساید در شرایط تنش شوری سبب افزایش محافظت غشاء در برابر نمک شده، به‌گونه‌ای که در گیاهان تیمار شده با این ماده میزان MDA به‌شدت کاهش یافته است.

این‌گونه به نظر می‌رسد که نقش نیتریک اکساید در غلظت پائین سدیم نیتروپروساید (۵۰ میکرومولار) در پر اکسیداسیون لیپیدها، مربوط به توانایی NO و لیپید در واکنش با رادیکال‌های آلکوکسیل (LO) و پراکسیل (LOO) و درنتیجه، توقف زنجیره پر اکسیداسیون لیپیدها باشد (لی و همکاران، ۲۰۰۷). همچنین تصور می‌شود در غلظت‌های بالای سدیم نیتروپروساید به‌ویژه در غلظت ۲۰۰ میکرومولار با تولید بیش از حد رادیکال پراکسی نیتریت (ONOO-) ایجاد سمیت کرده و با رادیکال‌های اکسیژن در تخریب سلول به‌صورت همکاری عمل نماید (لی و همکاران، ۲۰۰۷). پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء توسط گونه‌های فعال اکسیژن منجر به خسارت غشاءها، افزایش نفوذپذیری غشاء و کاهش پایداری غشاء می‌گردد. مالون دی‌آلدئید در اثر پراکسیداسیون اسیدهای چرب غیراشباع توسط گونه‌های فعال اکسیژن تولید می‌شود. تغییر در پر اکسیداسیون لیپیدها به‌عنوان شاخص میزان خسارت اکسایشی در موجودات زنده محسوب می‌گردد. به نظر می‌رسد دلیل اصلی خسارت شدید به غشاءی سلولی تولید رادیکال‌های سوپراکسید ($O_2^{\cdot-}$)، پراکسید هیدروژن (H_2O_2) و رادیکال هیدروکسیل ($OH^{\cdot}$) باشد که درنهایت منجر به پراکسیداسیون لیپیدهای غشاءی سلولی می‌گردد. افزایش نفوذپذیری غشاء و کاهش پایداری آن می‌تواند منجر به افزایش نشت الکترولیت‌ها به فضای بین سلولی گردد (بورسانی و همکاران، ۲۰۰۱). تغییر در پراکسیداسیون لیپیدها به‌عنوان یک شاخص مهم جهت تعیین میزان خسارت اکسیداتیو در موجودات زنده محسوب می‌شود و منجر به کاهش یکپارچگی غشاء در موجودات زنده تحت شرایط تنش می‌گردد (دریو، ۲۰۰۶). به نظر می‌رسد دلیل اصلی خسارت شدید به غشاءی سلولی تولید رادیکال‌های سوپراکسید، پراکسید هیدروژن و رادیکال هیدروکسیل باشد که درنهایت منجر به پراکسیداسیون لیپیدهای غشاءی سلولی می‌گردد (لی و همکاران، ۲۰۰۷). پراکسیداسیون لیپید یکی از اولین نتایج خسارات اکسیداتیوی است. مواد واکنش‌دهنده با تیوباربیتوریک القاشده به‌عنوان شاخص تولید ROS توسط تنش اکسیداتیو اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که با تیمار سدیم نیتروپروساید میزان مالون

دی‌آلدئید کاهش یافته است که این اثر می‌تواند به توانایی NO در جمع‌کردن ROS و جلوگیری از افزایش تیوباربیتوریک (TBARS) و سایر آلدئیدها مربوط باشد (بلیگنی و لاکسالات، ۱۹۸۹).



شکل ۴-۳- اثر برهم‌کنش سطوح سدیم نیتروپروساید و تنش شوری بر غلظت مالون دی‌آلدئید در برگ گیاهچه کنجد در بخش آزمایشگاهی

با توجه به نتایج به‌دست آمده که بیانگر مقادیر مختلف صفات زراعی و فیزیولوژیک اندازه‌گیری شده کنجد تحت تأثیر سطوح مختلف پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید در شرایط آزمایشگاه می‌باشد، تیمار پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید با غلظت ۱۵۰ میکرومولار به‌عنوان سطح پیش‌تیمار بذر برای دو بخش آزمایش‌های گلدانی و مزرعه‌ای انتخاب شد. در مجموع در بین سطوح مورد بررسی برای پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید، غلظت ۱۵۰ میکرومولار نتایج مطلوب‌تری نشان داد.

۴-۲- آزمایش گلدانی

۴-۲-۱- صفات زراعی و مورفولوژیک

۴-۲-۱-۱- وزن خشک برگ

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که وزن خشک برگ تنها تحت تأثیر اثرات اصلی تنش شوری، سدیم نیتروپروساید و کلسیم قرار گرفت و اثرات متقابل تأثیر معنی‌داری روی این صفت نداشتند

(جدول پیوست ۳). مقدار وزن خشک برگ به میزان ۳۳/۸۴ درصد در شرایط تنش شوری کاهش یافت (جدول ۴-۵). در این راستا گزارش شده است که در شرایط تنش شوری وزن خشک اندام هوایی در گیاهان مختلف کاهش می‌یابد (بخرد و همکاران، ۱۳۹۴). تفاوت بین ژنوتیپ‌ها در تجمع وزن خشک بافت‌های گیاهی و کاهش آن در شرایط شوری به‌احتمال زیاد نشان‌دهنده‌ی افزایش هزینه انرژی متابولیکی و کاهش جذب کربن خالص می‌باشد که با سازگاری ژنوتیپ‌ها به تحمل شوری در ارتباط است (جیمز و همکاران، ۲۰۰۲ و نتوندو و همکاران، ۲۰۰۴)، همچنین نشان‌دهنده اثر منفی شوری بر بافت‌ها (گرینوی و مونس، ۱۹۸۰)، کاهش میزان فتوسنتز در واحد سطح برگ (جیمز، ۲۰۰۲ و نتوندو و همکاران، ۲۰۰۴) و سطح فتوسنتز کننده (جیمز، ۲۰۰۲) است. در گونه‌های حساس به شوری که قادر به دفع مؤثر نمک از طریق جریان تعرق نیستند، نمک در برگ‌ها تجمع می‌یابد و در ادامه منجر به مرگ برگ‌های پیر و توقف رشد یا صدمه به برگ‌های جوان می‌شود (الهنداوی، ۲۰۰۴).

کاربرد سدیم نیتروپروساید، تجمع ماده خشک در برگ گیاه کنجد را بشدت تحت تاثیر قرار داد (جدول پیوست ۳). بیش‌ترین مقدار وزن خشک برگ در تیمار محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید (۳/۵۹ گرم) و کم‌ترین مقدار وزن خشک برگ نیز در تیمار شاهد و پیش تیمار بذر (به ترتیب ۳/۰۵ و ۳/۱۸ گرم) دیده شد. به‌طور کلی تجمع ماده خشک برگ در شرایط کاربرد سدیم نیتروپروساید به‌صورت محلول پاشی به‌طور معنی‌داری بیشتر از پیش‌تیمار بذر بود (جدول۴-۵). اینز و همکاران (۲۰۱۵) نیز گزارش کردند که کاربرد سدیم نیتروپروساید سبب افزایش وزن تر و خشک و محتوای نسبی آب در گیاه آفتابگردان تحت شرایط تنش خشکی می‌شود.

تیمارهای مختلف محلول‌پاشی با کربنات‌کلسیم نیز تأثیر معنی‌داری بر تجمع ماده خشک برگ داشتند (جدول پیوست ۳). محلول‌پاشی با کربنات کلسیم به فرم معمول و نانو به ترتیب موجب افزایش ۱۲/۸ و

۲۲/۲ درصدی در وزن خشک برگ گردیدند که هم نسبت به شاهد و هم نسبت به یکدیگر اختلاف معنی-داری داشتند (جدول ۴-۵).

کومارپال و همکاران (۲۰۱۳) بیان نمودند که محلول‌پاشی کلسیم تأثیر معنی‌داری بر پارامترهای رشد، صفات عملکرد و محتوای کلروفیل دارد و سبب افزایش معنی‌دار وزن خشک برگ نسبت به تیمار شاهد (از ۸ تا ۲۶ درصد) می‌شود. صادقی لطف‌آبادی و همکاران (۱۳۸۹) گزارش دادند که محلول‌پاشی کلسیم موجب افزایش معنی‌دار کلروفیل و به خصوص وزن خشک در سه مرحله پنجه‌زنی، ساقه‌دهی و خوشه‌دهی در سورگوم می‌گردد.

جدول ۴-۵- مقایسه میانگین وزن خشک برگ و ریشه، سطح برگ، ارتفاع گیاه و قطر ساقه در گیاه کنجد تحت تأثیر تیمار شوری، سدیم نیتروپروساید و محلول‌پاشی کلسیم در آزمایش گلدانی

تیمار	سطح	وزن خشک برگ (گرم در بوته)	وزن خشک ریشه (گرم در بوته)	سطح برگ (سانتی‌متر مربع در بوته)	ارتفاع گیاه (سانتی‌متر)	قطر ساقه (میلی‌متر)
تنش شوری	آب غیرشور	۳/۹۶ a	۲/۲۱ a	۳۵۹/۲ a	۱۰۰/۶ a	۷/۳۶ a
	آب شور	۲/۶۲ b	۱/۶۱ b	۲۸۳/۹ b	۸۰/۴ b	۶/۴۲ b
سدیم نیتروپروساید	شاهد	۳/۰۵ c	۱/۶۹ d	۲۹۴/۶ d	۸۴/۵۰ c	۶/۰۵ c
	پیش‌تیمار بذر[1]	۳/۱۸ c	۱/۸۳ c	۳۱۸/۱ c	۸۷/۲۸ b	۶/۹۱ b
	محلول‌پاشی[2]	۳/۳۵ b	۱/۹۹ b	۳۳۱/۴ b	۹۴/۳۳ a	۷/۰۴ b
	پیش‌تیمار بذر و محلول‌پاشی	۳/۵۹ a	۲/۱۳ a	۳۴۲/۳ a	۹۵/۸۹ a	۷/۵۷ a
محلول‌پاشی کلسیم	شاهد	۲/۹۰ c	۱/۷۱ c	۳۰۴/۷ c	۸۴/۷۵ c	۶/۲۵ c
	کربنات‌کلسیم	۳/۳۴ b	۱/۹۳ b	۳۲۲/۳ b	۹۰/۲۵ b	۶/۹۰ b
	نانو کربنات‌کلسیم	۳/۶۴ a	۲/۰۹ a	۳۳۷/۸ a	۹۶/۵۰ a	۷/۵۳ a

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک بر اساس آزمون LSD دارای اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد نمی‌باشند.

۱. پیش‌تیمار بذر با غلظت ۱۵۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید

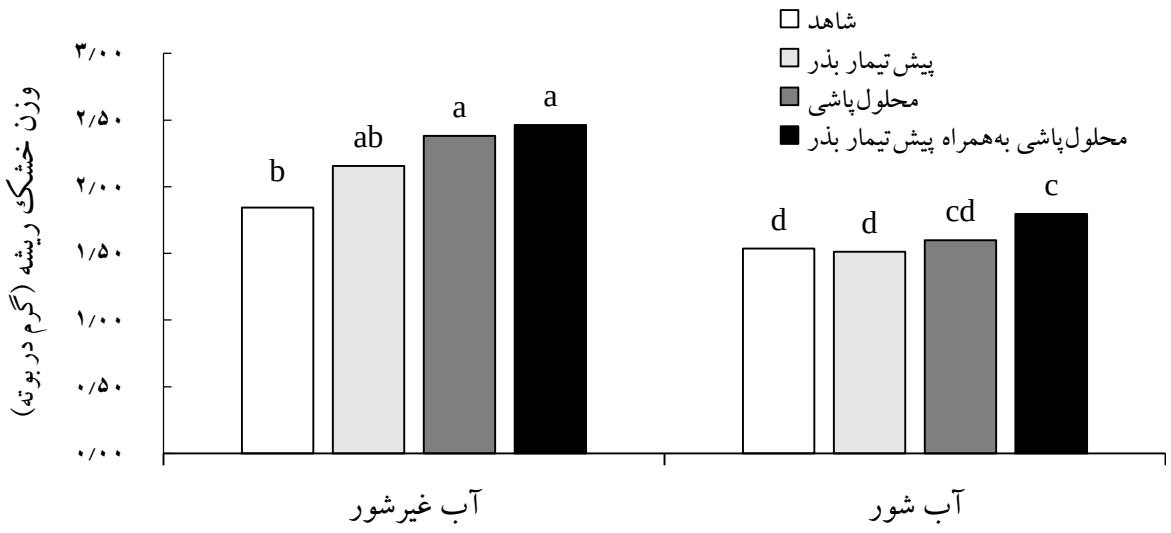
۲. محلول‌پاشی با غلظت ۵۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید

۴-۲-۱-۲- وزن خشک ریشه

تجمع ماده خشک در ریشه تحت تأثیر تیمار تنش شوری، سدیم نیتروپروساید، کلسیم و بر هم‌کنش تنش شوری و سدیم نیتروپروساید قرار گرفت (جدول پیوست ۳). در شکل ۴-۴ مشاهده می‌شود که آبیاری با آب شور به‌طور معنی‌داری وزن خشک ریشه را کاهش داد. این کاهش به طور متوسط ۳۳/۸ درصد بود. اگرچه با کاربرد توأم سدیم نیتروپروساید به‌صورت پیش‌تیمار بذر و محلول‌پاشی، ماده خشک ریشه بهبود یافت ولی به شرایط عادی برنگشت. در شرایط آبیاری با آب معمولی هر سه سطح پیش‌تیمار، محلول‌پاشی و کاربرد توأم سدیم نیتروپروساید سبب افزایش انباشت ماده خشک در ریشه شد که البته این افزایش در شرایط پیش‌تیمار بذر معنی‌دار نبود.

با توجه به اینکه اثر سمیت یونی در بسیاری از مکانیسم‌های مهم گیاه هم‌چون فتوسنتز، تنفس، فعالیت آنزیم‌ها، پایداری غشاء، انتقال مواد فتوسنتزی و غلظت تنظیم‌کننده‌های رشدی به‌خوبی مشخص گردیده است، به نظر می‌رسد گیاهان در غلظت‌های مخرب سدیم بدون شک دچار کاهش رشد می‌شوند. همبستگی منفی بالا بین تجمع سدیم در بافت‌ها و رشد گیاه که در بسیاری از مطالعات به آن اشاره شده نیز بر درست بودن این فرضیه دلالت دارد (مونس و تستر، ۲۰۰۸). محمدی و همکاران (۲۰۰۸) با تحقیق روی دو رقم یونجه زراعی بیان کردند تنش شوری تأثیر منفی بر وزن خشک ریشه و برگ داشت که این اثر منفی در رقم حساس بیش‌تر بود.

سلطانا و همکاران (۲۰۰۱) گزارش دادند که محلول‌پاشی کلسیم تا حدی کمبود عناصر غذایی ناشی از تنش شوری را کاهش می‌دهد، هم‌چنین موجب افزایش فتوسنتز، وزن خشک، تعداد کپسول در بوته و عملکرد دانه می‌شود. این مسئله بیانگر نقش مؤثر کلسیم در افزایش وزن خشک بوته است (شمس و همکاران، ۱۳۸۸). کلسیم نقش اساسی در فتوسنتز و متابولیسم نیتروژن دارد که کاهش آن موجب کاهش فتوسنتز و درنتیجه کاهش وزن خشک گیاه می‌شود (شمس و همکاران، ۱۳۸۸).



شکل ۴-۴- اثر برهم‌کنش سطوح سدیم نیتروپروساید و تنش شوری بر وزن خشک ریشه گیاه کنجد در آزمایش گلدانی

۴-۲-۱-۳- سطح برگ

اثر شوری، سدیم نیتروپروساید وکلسیم در سطح احتمال ۱ درصد بر سطح برگ گیاه کنجد معنی‌دار بود (جدول پیوست ۳). آبیاری گیاه کنجد با آب شور تأثیر منفی بر سطح برگ داشت و باعث کاهش ۲۱ درصدی سطح برگ نسبت به تیمار شاهد شد. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار سطح برگ در تیمار محلول‌پاشی به همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید (۳۴۲/۳ سانتی‌متر مربع) و تیمار شاهد (۲۹۴/۶ سانتی‌متر مربع) دیده شد. این درحالی است که تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید و محلول‌پاشی آن به‌تنهایی نیز افزایش معنی‌داری در سطح برگ نسبت به شاهد ایجاد نمود. البته تأثیر محلول‌پاشی بیشتر بود (جدول ۴-۵). برگ‌های توسعه‌یافته در شرایط تنش معمولاً کوچک‌تر هستند. تنش شوری از طریق کاهش تولید و رشد برگ‌ها و افزایش پیری آن‌ها شاخص سطح برگ را کاهش می‌دهد (شمس و همکاران، ۱۳۸۸). اثر حفاظتی سدیم نیتروپروساید بر حفظ و افزایش کلروفیل و سبزینگی برگ و تأثیر آن بر دسترسی آهن، و اثر مثبت آن در تولید بیشتر برگ به‌خصوص در شرایط تنش دلالت دارد (عرب و

همکاران، ۱۳۹۴). نتایج به‌دست آمده در آزمایش پیش رو مشابه نتایج ماگدی و همکاران (۲۰۱۲) است. آن‌ها گزارش کردند کاربرد سدیم نیتروپروساید سبب افزایش پارامترهای مورفولوژیکی در گیاه توتون تحت شرایط تنش می‌شود.

همچنین بررسی نتایج روشن ساخت که محلول‌پاشی کلسیم سبب افزایش سطح برگ نسبت به شاهد شد. هرچند استفاده از نانوذرات کربنات کلسیم با افزایش ۱۰/۸ درصدی نتیجه‌ی بهتری را دربر داشت (جدول ۴-۵).

محققان گزارش کردند که گیاهان تحت تنش شوری با کاهش دادن سطح برگ، مانع از دست رفتن آب می‌شوند و درنتیجه برگ‌های گیاهان در این گونه محیط‌ها کوچک‌تر و ضخیم‌تر می‌گردد. با افزایش غلظت نمک در محیط رشد، یک نوع خشکی فیزیولوژیکی در گیاه ایجاد می‌شود که خود عامل اصلی در جلوگیری از ایجاد فشار تورژسانس در سلول‌های گیاهی و جلوگیری از رشد و تقسیم سلولی است که درنهایت موجب کاهش سطح برگ در گیاه می‌گردد. هم‌چنین کاهش سطح فتوسنتز کننده گیاه در شرایط شوری براثر آبگیری سریع و خشکی زودهنگام برگ‌ها نیز اتفاق می‌افتد که این امر منجر به پیری زودرس برگ‌های مسن‌تر گیاه و حذف آن‌ها می‌گردد. به‌طورکلی سریع‌ترین واکنش در مقابله با تنش شوری کاهش توسعه سطح برگ است و به دنبال آن با افزایش شدت تنش، رشد و توسعه سطح برگ متوقف می‌شود، در صورت خفیف بودن شدت تنش، رشد و توسعه برگ‌ها پس از رهایی از تنش دوباره آغاز می‌شود (عطار زاده و همکاران، ۱۳۹۳).

۴-۲-۱-۴- ارتفاع گیاه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها مشخص کرد که از بین منابع تغییر اثرات اصلی تنش شوری، سدیم نیتروپروساید و محلول‌پاشی کلسیم بر ارتفاع گیاه کنجد معنی‌دار بودند (جدول پیوست ۳). ارتفاع گیاه در شرایط غیر تنش ۱۰۰/۶ سانتی‌متر بود که در اثر آبیاری با آب شور با ۲۰ درصد کاهش به ۸۰/۴

سانتی‌متر رسید (جدول ۴-۵). کاهش رشد در شرایط تنش شوری به‌سرعت پایین فتوسنتز که تحت غلظت بالای نمک اتفاق می‌افتد؛ نسبت داده می‌شود که با انتقال کم آهن و یا با غیرقابل حل‌کردن آهن در محیط همراه است که سبب صدمه به سنتز کلروفیل می‌شود (بخرد و همکاران، ۱۳۹۴). شوری احتمالاً با کاهش تقسیم و طویل شدن سلولی نیز می‌تواند سبب کاهش ارتفاع گردد. این کاهش ارتفاع ممکن است به‌دلیل اثرات منفی پتانسیل اسمزی بالا باشد که جذب آب و عناصر غذایی را کاهش داده و درنهایت سبب کاهش رشد ساقه می‌شود. همچنین کاهش رشد در اثر شوری می‌تواند در اثر تغییر در انتقال فرآورده‌های فتوسنتزی به ریشه‌ها، کاهش ارتفاع و یا به دلیل بسته شدن جزئی یا کلی روزنه‌ها باشد (عطار زاده و همکاران، ۱۳۹۳). کاهش ارتفاع در اثر تنش شوری در برنج (کومار و همکاران، ۲۰۰۷)، گلرنگ (نتاپاتیل، ۲۰۱۲) و نیز سورگوم (صادقی لطف‌آبادی و همکاران، ۲۰۱۰) گزارش شده است.

در بین سطوح سدیم نیتروپروساید، ارتفاع گیاه در تیمار محلول‌پاشی به همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید (۹۵/۸۹ سانتی‌متر) بالا بود که اختلاف آن با تیمار محلول‌پاشی با سدیم نیتروپروساید (۹۴/۳۳ سانتی‌متر) معنی‌دار نبود. کم‌ترین مقدار ارتفاع گیاه نیز در تیمار شاهد (۸۴/۵۰ سانتی‌متر) دیده شد (جدول ۴-۵). بهترین شاخص برای تعیین تحمل واقعی گیاهان به تنش اندازه‌گیری زیست‌توده آن‌ها است (مونس و تستر، ۲۰۰۸). کاهش زیست‌توده با کاهش سطح برگ و ارتفاع گیاه ارتباط مستقیمی دارد (هولتکلن و همکاران، ۲۰۰۶). فاروق و همکاران (۲۰۰۹) بیان نمودند که کاربرد خارجی سدیم نیتروپروساید موجب افزایش تحمل برنج به تنش خشکی، افزایش وزن خشک گیاهچه و افزایش ارتفاع گیاه می‌شود.

ارتفاع گیاه کنجد تحت تأثیر سطوح مختلف محلول‌پاشی کلسیم قرار گرفت به نحوی که بین تمامی سطوح اختلاف معنی‌دار مشاهده شد. کاربرد کربنات کلسیم و نانوذرات کربنات کلسیم ارتفاع گیاه کنجد را به ترتیب به میزان ۶/۵ و ۱۴ درصد نسبت به شاهد افزایش داد (جدول ۴-۵). نصیرپور و همکاران

(۱۳۹۴) گزارش دادند که محلول‌پاشی کلسیم ارتفاع بوته، قطر ساقه، طول و قطر میوه گوجه‌فرنگی را به‌طور معنی داری افزایش می‌دهد (نصیرپور و همکاران، ۱۳۹۴). شمس و همکاران (۱۳۸۸) گزارش دادند که محلول‌پاشی غلظت‌های مختلف کلسیم تأثیر معنی‌داری بر ارتفاع بوته، عملکرد ماده خشک اندام هوایی، میزان کلروفیل و میزان فنل و تانن کل داشت.

۴-۲-۱-۵- قطر ساقه

قطر ساقه به شکل معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد تحت تأثیر تنش شوری، تیمارهای مختلف سدیم نیتروپروساید و کلسیم قرار گرفت (جدول پیوست ۳). با اعمال تنش شوری از میزان قطر ساقه کاسته شد و مقدار قطر ساقه از ۷/۳۶ میلی‌متر در شرایط غیرتنش به ۶/۴۲ میلی‌متر در شرایط تنش شوری رسید (جدول ۴-۵). بیش‌ترین مقدار قطر ساقه با میانگین ۷/۵۷ میلی‌مترمربوط به تیمار محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید بود که نسبت به شاهد ۲۵ درصد بیشتر بود و در گروه برتر آماری قرار گرفت. دو سطح پیش‌تیمار و محلول‌پاشی به‌تنهایی نیز افزایش معنی داری نسبت به شاهد نشان دادند، اگر چه با یکدیگر تفاوتی نداشتند (جدول ۴-۵).

قطر ساقه گیاهان محلول‌پاشی شده با کربنات کلسیم و نانوکربنات‌کلسیم به ترتیب ۱۰ و ۲۰/۵ درصد بیشتر از تیمار شاهد بود (جدول ۴-۵). عطارزاده و همکاران (۱۳۹۱) گزارش دادند که شوری سبب کاهش برخی از پارامترهای رشد در گلرنگ می‌شود و محلول‌پاشی کلسیم تا حدودی می‌تواند اثرات منفی شوری را کاهش دهد. صادقی لطف‌آبادی و همکاران (۱۳۸۹) بیان نمودند که استفاده از کلسیم موجب بهبود قابل توجه صفات رشدی سورگوم نسبت به عدم مصرف آن در شرایط شوری می‌شود.

۴-۲-۲- عملکرد و اجزای عملکرد

۴-۲-۲-۱- تعداد کپسول در بوته

این صفت عملکردی اندازه‌گیری شده در آزمایش گلدانی از همه اثرات اصلی شامل شوری، سدیم نیتروپروساید و کلسیم کربنات در سطح احتمال ۱ درصد تأثیر پذیرفت (جدول پیوست ۴). تنش شوری سبب کاهش قابل‌ملاحظه‌ی تعداد کپسول در بوته کنجد شد، به‌گونه‌ای که تعداد کپسول موجود در بوته با حدود ۵۰ درصد کاهش از ۲۷/۸۰ کپسول در تیمار شاهد به ۱۴/۰۱ کپسول در بوته رسید (جدول ۴-۶). اشرف و هریس (۲۰۰۴) بیان کردند در شرایط تنش شوری، محدودیت جذب عناصر غذایی توسط ریشه، منجر به کاهش تولید مواد فتوسنتزی و کاهش تخصیص آن به اندام‌های زایشی می‌گردد؛ بنابراین، کمبود منبع طی دوره گل‌دهی موجب ریزش اندام‌های زایشی و گل‌های بارور خصوصاً غلاف‌های جوان می‌شود که نتیجه آن کاهش تعداد غلاف‌های بالغ است. همچنین نبی‌زاده مرودوست و همکاران (۱۳۸۲) عنوان کردند یکی از مکانیسم‌های مؤثر در کاهش تعداد سنبله گندم در شرایط شور، کمبود شیره پرورده در دوره قبل از ظهور گل است.

نتایج نشان داد که تعداد کپسول در بوته گیاهانی که تیمار محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید را دریافت کرده بودند، ۲۲/۱۳ کپسول در بوته و کم‌ترین مقدار این صفت مربوط به تیمار شاهد (۱۹/۹۶) بود. بین تیمارهای پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید (۲۰/۷۴) و محلول‌پاشی با سدیم نیتروپروساید (۲۰/۷۹) تفاوت معنی‌داری از لحاظ آماری وجود نداشت (جدول ۴-۶). امیدی و سپهری (۱۳۹۲) در بررسی اثر سدیم نیتروپروساید بر عملکرد و اجزای عملکرد لوبیا گزارش کردند که استفاده از سدیم نیتروپروساید در شرایط تنش خشکی سبب ممانعت از کاهش تعداد غلاف در بوته در شرایط تنش شد، هم‌چنین آن‌ها بیان نمودند که سدیم نیتروپروساید سبب حفظ تعداد شاخه‌های فرعی تولیدی و درنتیجه افزایش تعداد غلاف در بوته در وضعیت تنش شده است.

بررسی سطوح تیمار کلسیم نشان داد که در اثر محلول‌پاشی کربنات کلسیم به فرم معمول و نانو تعداد کپسول در بوته به‌طور معنی‌دار و به‌ترتیب معادل ۱۰/۵ و ۱۸ درصد بهبود یافت (جدول ۴-۶). نتایج عطارزاده و همکاران (۱۳۹۴) نشان داد که شوری سبب تأثیر منفی بر برخی از صفات فیزیولوژیک در گلرنگ می‌شود و محلولپاشی کلسیم تا حدودی می‌تواند این خسارات را جبران کند و اثرات نامطلوب شوری را بهبود بخشد.

۴-۲-۲-۲- تعداد دانه در کپسول

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها مشخص کرد که اثر تنش شوری، سدیم نیتروپروساید و کربنات کلسیم بر تعداد دانه در کپسول معنی‌دار ($P < ۰/۰۱$) بود (جدول پیوست ۴). تنش شوری سبب کاهش قابل‌ملاحظه‌ی تعداد دانه در کپسول شد، به‌گونه‌ای که تعداد دانه موجود در کپسول با حدود ۳۵/۸۹ درصد کاهش از ۳۳/۲۱ دانه در تیمار شاهد به ۲۱/۲۹ دانه رسید (جدول ۴-۶). شمس‌الدین و فرح بخش (۱۳۸۷) همبستگی مثبت و معنی‌داری را بین طول غلاف کلزا و تعداد دانه در غلاف گزارش دادند و بیان کردند که یکی از علل کاهش تعداد دانه در غلاف کلزا در اثر شوری کاهش طول غلاف‌ها است. محمود و همکاران (۲۰۰۳) در مطالعه خود روی اثر تنش شوری بر اجزای عملکرد ژنوتیپ‌های مختلف کنجد گزارش کردند که اعمال تنش شوری، تأثیر معنی‌داری در تعداد دانه در کپسول داشت. در این مطالعه گزارش شد که با افزایش شوری از تعـداد دانه در کپسول کاسته می‌شود.

تعداد دانه درکپسول گیاهانی که تیمار محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید را دریافت کرده بودند، با میانگین ۳۱/۵۱ دانه در کپسول بیشترین و کم‌ترین مقدار این صفت مربوط به تیمار شاهد (۲۶/۳۲) بود (جدول ۴-۶).

جدول ۴-۶- مقایسه میانگین اجزای عملکرد، عملکرد دانه، وزن زیست‌توده و شاخص برداشت در گیاه کنجد تحت تأثیر تیمار شوری، سدیم نیتروپروساید و محلول‌پاشی کلسیم در آزمایش گلدانی

تیمار	سطح	تعداد کپسول در بوته	تعداد دانه در کپسول	وزن هزاردانه (گرم)	عملکرد دانه (گرم در یوته)	وزن زیست‌توده (گرم در بوته)	شاخص برداشت (درصد)
تنش شوری	آب غیرشور	۲۷/۸۰ a	۳۳/۵۱ a	۲/۹۴ a	۲/۷۵ a	۶/۰۴ a	۴۵/۳۹ a
	آب شور	۱۴/۰۱ b	۲۱/۲۹ b	۲/۶۹ b	۱/۲۶ b	۳/۰۲ b	۴۱/۴۲ b
سدیم نیتروپروساید	شاهد	۱۹/۹۶ c	۲۶/۳۲ c	۲/۶۳ c	۱/۷۸ c	۴/۲۱ c	۴۱/۲۸ c
	پیش‌تیمار بذر[1]	۲۰/۷۴ b	۲۹/۴۹ b	۲/۸۰ b	۱/۹۸ b	۴/۴۶ bc	۴۳/۵۰ b
	محلول‌پاشی[2]	۲۰/۷۹ b	۲۹/۲۶ b	۲/۸۶ b	۲/۰۱ b	۴/۵۳ b	۴۳/۵۰ b
	پیش‌تیمار بذر و محلول‌پاشی	۲۲/۱۳ a	۳۱/۵۱ a	۲/۹۶ a	۲/۲۵ a	۴/۹۱ a	۴۵/۳۳ a
محلول‌پاشی کلسیم	شاهد	۱۹/۰۸ c	۲۶/۳۰ c	۲/۷۱ c	۱/۷۵ c	۴/۱۰ c	۴۱/۸۸ b
	کربنات‌کلسیم	۲۱/۰۹ b	۲۸/۳۹ b	۲/۸۳ b	۲/۰۲ b	۴/۵۳ b	۴۴/۰۰ a
	نانو کربنات‌کلسیم	۲۲/۵۵ a	۲۹/۵۰ a	۲/۹۰ a	۲/۲۴ a	۴/۹۶ a	۴۴/۳۳ a

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک بر اساس آزمون LSD دارای اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد نمی‌باشند.

۱. پیش‌تیمار بذر با غلظت ۱۵۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید

۲. محلول‌پاشی با غلظت ۵۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید

نتایج نشان داد که بین تیمارهای پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید (۲۹/۴۹) و محلول‌پاشی با سدیم نیتروپروساید (۲۹/۲۶) تفاوت معنی‌داری از لحاظ آماری وجود نداشت (جدول ۴-۶).

بررسی سطوح تیمار کلسیم نیز نشان داد که در اثر تیمارهای مختلف محلول‌پاشی با کربنات‌کلسیم تعداد دانه در کپسول به‌طور معنی داری بهبود یافت. بیش‌ترین تعداد دانه در کپسول با میانگین ۲۹/۵۰ مربوط به تیمار محلول‌پاشی با نانوکربنات‌کلسیم و کم‌ترین تعداد دانه در کپسول با میانگین ۲۶/۳۰ مربوط به تیمار شاهد بود (جدول ۴-۶). ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۵) گزارش دادند که بیش‌ترین تأثیر محلول‌پاشی کلسیم در اجزای عملکرد عدس، مربوط به افزایش تعداد دانه در غلاف بود. کیایی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۳) گزارش دادند که به لحاظ تأثیرگذاری بر ماده خشک کل و وزن خشک برگ در گیاه بزرک محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش کم‌آبی موجب بهبود این صفات می‌گردد. همچنین محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش کم‌آبی موجب بهبود صفاتی از قبیل نسبت پوسته به دانه، تعداد دانه در کپسول و نسبت کلروفیل a/b می‌گردد.

۴-۲-۲-۳- وزن هزار دانه

اثر شوری، سدیم نیتروپروساید و کلسیم در سطح احتمال ۱ درصد بر وزن هزار دانه گیاه کنجد معنی دار بود (جدول پیوست ۴). تنش شوری سبب کاهش وزن هزار دانه به میزان ۸/۵ درصد شد (جدول ۴-۶). کاهش معنی‌دار وزن هزار دانه با افزایش شوری می‌تواند به دلایل کاهش مواد فتوسنتزی در مرحله‌ی پرشدن دانه، کاهش شدت رشد در اثر پتانسیل اسمزی و یا کاهش طول دوره‌ی پرشدن دانه‌ها باشد (کیایی نژاد و همکاران، ۱۳۹۳). در همین زمینه پوستینی (۱۳۸۱) بیان کرد که همبستگی معنی‌دار بین وزن هزاردانه و طول دوره پرشدن دانه گندم در شرایط شور، بیانگر نقش مؤثر دوام این دوره در تحمل به شوری است. نبی زاده مرودوست و همکاران (۱۳۸۲) علت دیگر کاهش وزن هزار دانه را تغییر در مسیر مواد فتوسنتزی و مواد پرورده جهت مقابله با اثرات تنش شوری بیان کردند. تیموری و همکاران (۱۳۹۲)

در بررسی اثر سطوح مختلف شوری بر میزان دانه و اجزای عملکرد گیاه کنجد گزارش کردند که شوری سبب کاهش وزن هزار دانه گیاه کنجد می‌شود. در این مطالعه بیان شد که واکنش ژنوتیپ‌های مختلف به تنش شوری به مرحله اعمال تنش و مقدار تخصیص مواد بـه اندام‌های مختلف تحت شرایط تنش بستگی دارد. بنابراین میانگین وزن هزار دانه در سطوح مختلف تنش بسته به ژنوتیـپ در سطوح متفاوتی بروز می‌کند.

سدیم نیتروپروساید تأثیر مثبت و معنی‌داری بر میزان وزن هزار دانه داشت. استفاده از سطوح مختلف این ماده سبب افزایش در میزان وزن هزار دانه شد. مقدار وزن هزار دانه در تیمار شاهد با کاربرد محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید از ۲/۶۳ گرم با افزایش ۱۲/۵ درصدی به ۲/۹۶ گرم رسید که در گروه برتر آماری جای گرفت (جدول ۴-۶). انجام پیش‌تیمار بذر و محلول‌پاشی به‌تنهایی نیز افزایش معنی‌داری در وزن هزار دانه نسبت به شاهد ایجاد نمود ولی این دو تیمار با یکدیگر اختلافی نداشتند (جدول ۴-۶). امیدی و سپهری (۱۳۹۳) در مطالعه خود روی گیاه لوبیا گزارش کردند در شرایط تنش خشکی بیش‌ترین وزن صد دانه در رقم اختر و با محلول‌پاشی ۳۰۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید حاصل شد. تو و زو (۲۰۰۳) گزارش کردند که سدیم نیتروپروساید با جلوگیری از تخریب کلروفیل، پیری برگ‌ها را به تأخیر می‌اندازد، از این‌رو سدیم نیتروپروساید ممکن است با طولانی کردن دورهٔ مؤثر پرشدن دانه سبب افزایش وزن هزار دانه شود.

محلول‌پاشی کلسیم وزن هزار دانه را بهبود بخشید، کاربرد کربنات کلسیم به فرم معمول و نانو ذرات، به ترتیب ۴/۴۲ و ۷ درصد سبب بهبود این صفت نسبت به شاهد شد (جدول ۴-۶). منشی و همکاران (۱۳۹۶) بیان کردند که کاربرد کلسیم آسیب‌های ناشی از تنش را در گیاه کلزا تا حدودی کاهش می‌دهد و موجب افزایش عملکرد دانه، وزن هزاردانه و میزان روغن می‌شود. هم‌چنین در آزمایشی دیگر مشخص

شد، کاربرد کلسیم در گیاه برنج بر شمار برگ‌ها افزوده و سبب افزایش شمار پنجه‌ها، سنبلک‌ها، وزن دانه‌ها و درصد سنبلک‌های پرشده و خوشهٔ باز(پانیکول) گردید و بر کیفیت و عملکرد دانه اثرگذار بوده است (آگاری و همکاران، ۱۹۹۳).

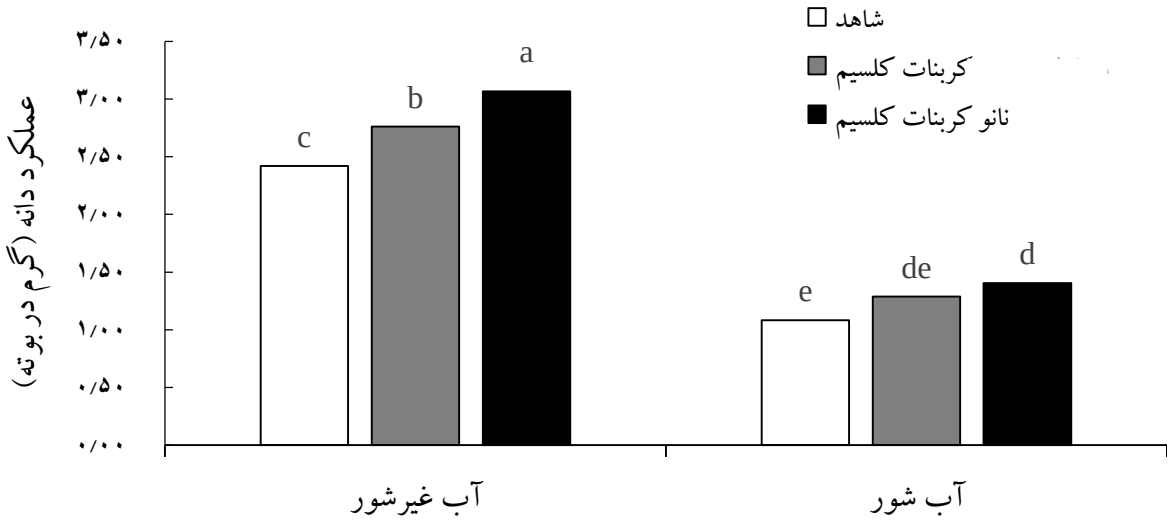
۴-۲-۲-۴- عملکرد دانه

اثر تنش شوری، سدیم نیتروپروساید و محلول‌پاشی کلسیم در سطح احتمال ۱ درصد و اثر متقابل شوری و محلول‌پاشی کلسیم در سطح احتمال ۵ درصد بر عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول پیوست ۴). به طور کلی، اعمال تنش شوری توانست به‌طور متوسط با کاهش حدود ۵۰ درصدی در عملکرد دانه خسارت قابل‌ملاحظه‌ای را سبب شود (شکل ۴-۵) ولی محلول‌پاشی کلسیم باعث تخفیف اثرات سوء تنش شوری شد. همان‌طور که در شکل ۴-۵ مشاهده می شود کاربرد کربنات کلسیم به فرم نانو توانست افزایش معنی‌داری در عملکرد دانه نسبت به عدم کاربرد کلسیم در شرایط آبیاری با آب شور ایجاد کند در حالی‌که تیمار محلول‌پاشی کلسیم به فرم معمول در این شرایط تفاوت معنی‌داری نسبت به شاهد نشان نداد. البته هنگامی که گیاهان با آب غیرشور نیز آبیاری شدند، محلول‌پاشی کلسیم در هر دو فرم معمول و نانو عملکرد دانه را به‌طور معنی‌داری بهبود بخشید به‌طوری که بالاترین مقدار عملکرد دانه در گیاهانی ثبت شد که با آب غیرشور آبیاری شدند و نانو کربنات کلسیم را از طریق برگ دریافت کردند (شکل ۴-۶). کومارپال و همکاران (۲۰۱۳) بیان نمودند که محلول‌پاشی کلسیم می‌تواند سبب افزایش عملکرد استویا از طریق بهبود رشد جوانه‌های جانبی و فعالیت‌های فیزیولوژیکی شود. نتایج سلطانا و همکاران (۲۰۰۱) نشان داد که محلول‌پاشی کلسیم تا حدودی سبب کاهش اثرات نامطلوب تنش شوری بر فتوسنتز و پارامترهای فتوسنتز، عملکرد و اجزای عملکرد از طریق تعدیل عرضه عناصر غذایی در گیاهان تحت تنش شوری می‌شود. احمدی و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که محلول‌پاشی کلسیم بیش‌ترین تأثیر را بر

افزایش عملکرد دانه از طریق تأثیرگذاری بر اجزای عملکرد گیاه کنجد دارد. رِید و اسمیت (۲۰۰۰) نشان دادند اگر چه رشد گیاهچه‌های گندم توسط غلظت‌های بالای کلرید سدیم به‌شدت ممانعت می‌شود، ولی افزودن کلسیم به محیط رشد موجب بهبود رشد می‌گردد و در شرایط کمبود کلسیم، اثرات منفی سدیم بالا است. مطالعات بانولس و همکاران (۱۹۹۱)، هاوکینز و لوئیس (۱۹۹۳) و دینپورت و همکاران (۱۹۹۷) نشان داد که کلسیم می‌تواند به‌عنوان دارنده نقش اصلاحی و تعدیل‌کننده اثرات شوری عمل نماید. نقش کلسیم به عنوان فعال‌کننده سیستم انتقال پیام‌های سلولی و هم‌چنین به‌عنوان یک تنظیم‌کننده اسمز گیاه نیز مشاهده شده است. از این رو، مصرف صحیح کودهای کلسیم در اراضی شور موجب کاهش عوارض فیزیولوژیکی ناشی از شوری و در نتیجه افزایش عملکرد می‌شوند (صادقی لطف‌آبادی و همکاران، ۱۳۸۹).

در بررسی میزان عملکرد دانه به هنگام کاربرد سدیم نیتروپروساید نتایج نشان داد که بین تیمارهای مختلف سدیم نیتروپروساید ازلحاظ میزان عملکرد دانه تفاوت معنی‌داری وجود دارد (جدول پیوست ۴). کاربرد سدیم نیتروپروساید سبب بهبود عملکرد دانه شد. بین تیمارهای مختلف کاربرد سدیم نیتروپروساید، بیش‌ترین میزان عملکرد دانه (۲/۲۵ گرم در بوته) درتیمار محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید با ۲۶ درصد افزایش نسبت به شاهد دیده شد و این تیمار را در گروه برتر آماری قرار داد. تیمارهای دیگر کاربرد سدیم نیتروپروساید نیز سبب بهبود عملکرد دانه شدند اما با یکدیگر تفاوت معنی داری نداشتند (جدول ۴-۶). امیدی و سپهری (۱۳۹۳) گزارش کردند کاربرد سدیم نیتروپروساید به‌صورت محلول‌پاشی سبب افزایش عملکرد لوبیا قرمز در هر دو وضعیت تنش و بدون تنش می‌شود. بهبود در رشد و عملکرد در اثر کاربرد سدیم نیتروپروساید می‌تواند ناشی از حفظ محتوای

رطوبت نسبی برگ و کاهش گونه‌های فعال اکسیژن به ویژه پراکسید هیدروژن (تیان و لی، ۲۰۰۷) و بهبود سیستم آنزیمی گیاه (شئوکاند و همکاران، ۲۰۱۰) باشد.



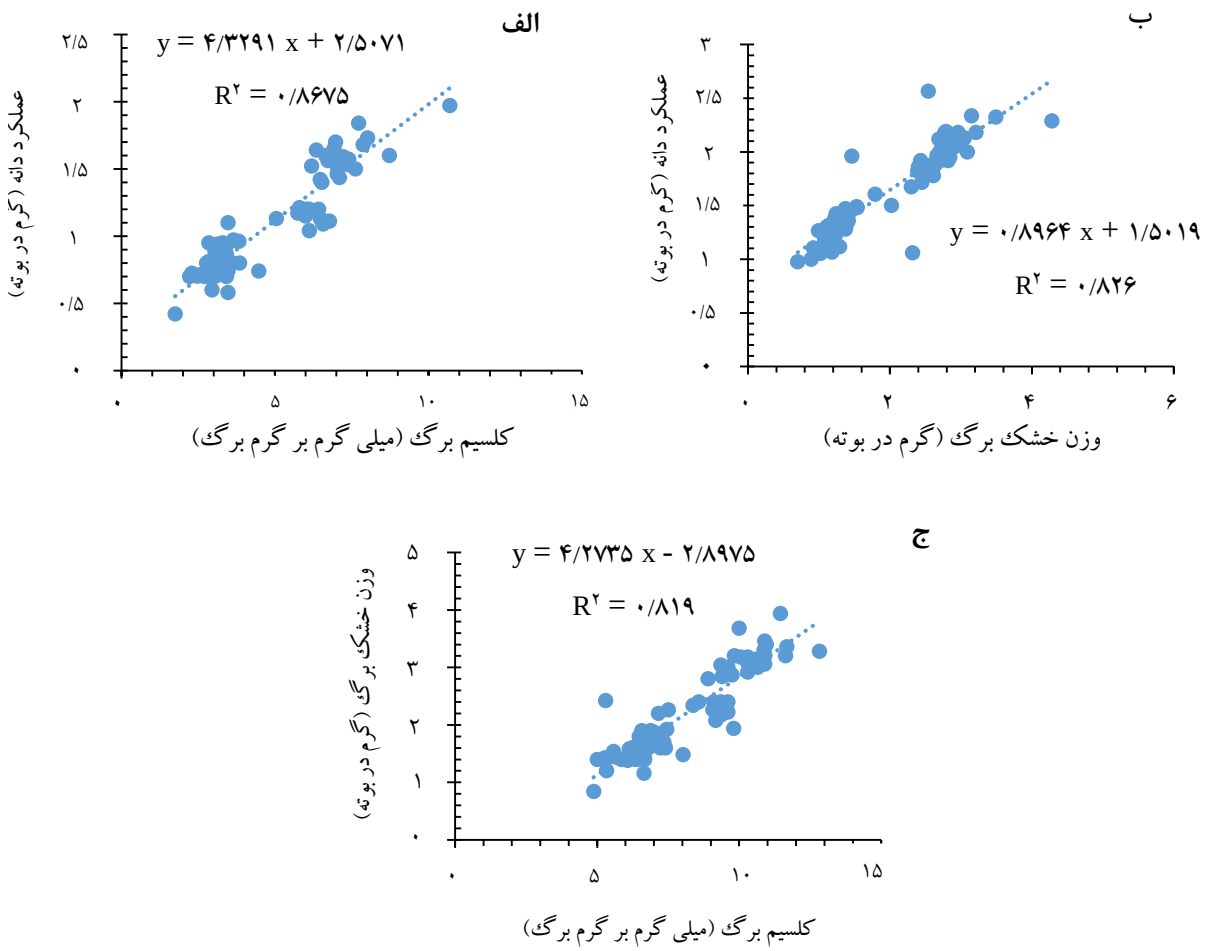
شکل ۴-۵- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و کلسیم بر عملکرد دانه کنجد در آزمایش گلدانی

با توجه به ضرایب همبستگی بین عملکرد دانه و برخی صفات اندازه‌گیری شده (جدول ۴-۷) می‌توان بیان نمود که کاهش تولیدات فتوسنتزی درنتیجه محدودیت جذب عناصر غذایی توسط ریشه‌ها در شرایط تنش شوری سبب می‌شود که مواد فتوسنتزی کمتری تولید شده و قادر به پر کردن تمامی دانه‌های تشکیل‌شده در کپسول‌ها نباشد که درنهایت کاهش تخصیص مواد فتوسنتزی به دانه‌های موجود سبب کاهش عملکرد دانه می‌شود. وجود همبستگی مثبت و بالا بین سطح برگ و کلروفیل‌های برگ با عملکرد دانه به‌خوبی این موضوع را تبیین می‌کند. از بین اجزای عملکرد، تعداد کپسول در بوته همبستگی بسیار بالایی با عملکرد دانه نشان داد. این نتیجه با یافته‌های پیشین مبنی بر کاهش عملکرد در اثر تنش شوری به دلیل پایین بودن تعداد غلاف در ساقه و تعداد دانه در غلاف مطابقت دارد (فتحی و زاهدی، ۱۳۹۲).

از سوی دیگر، استفاده از کلسیم سبب افزایش وزن خشک برگ می‌شود که در تحقیقات پیشین نیز به آن اشاره شده است. دلیل این اتفاق می‌تواند اتصال کلسیم به CDPKها باشد که در نمو دانه‌ی گرده، کنترل چرخه‌ی سلولی، انتقال پیام فیتوهورمون‌ها، تحمل شوری و پاسخ به پاتوژن‌ها دخالت دارند (توتجا و همکاران، ۲۰۰۷). افزایش وزن برگ نیز می‌تواند از طریق تأثیرگذاری بر محتوای کلروفیل گیاه، تعداد کپسول در بوته و افزایش وزن زیست‌توده منجر به افزایش عملکرد دانه شود. رابطه خطی بین عملکرد دانه با وزن خشک و میزان کلسیم برگ نیز دلیلی بر درست بودن این فرضیه می‌باشد (جدول ۴-۷ و شکل ۴-۶). البته نباید از نقش کلیدی کلسیم در کاهش اثرات منفی ناشی از سدیم غافل شد. چنانچه شوری شدید بر گیاه تحمیل شود افزایش فعالیت‌های اکسیداتیو ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن سبب تخریب بخش‌های حیاتی سلول از جمله غشاء ها می‌شود که به‌صورت تجمع موادی مانند مالون‌دی‌آلدئید قابل ردیابی است. همان‌گونه که در جدول ۴-۷ مشاهده می‌شود هر عاملی که افزایش سطح مالون‌دی‌آلدئید را به دنبال داشته باشد موجب کاهش عملکرد خواهد شد.

جدول۴-۷- ضریب همبستگی پیرسون بین عملکرد دانه گیاه کنجد با برخی از صفات اندازه‌گیری شده

وزن خشک برگ	سطح برگ	کپسول در بوته	وزن زیست‌توده	غلظت مالون دی آلدئید
۰/۹۰۹**	۰/۹۰۰**	۰/۹۸۵**	۰/۹۹۶**	-۰/۹۳۷**
سدیم برگ	**کلسیم برگ**	**کلروفیل a**	**کلروفیل b**	**کلروفیل کل**
-۰/۹۱۵**	۰/۹۳۱**	۰/۹۶۴**	۰/۹۵۸**	۰/۹۵۷**



شکل ۴-۶- رابطه رگرسیون خطی بین عملکرد دانه با میزان کلسیم برگ (الف)، عملکرد دانه با وزن خشک برگ (ب) و وزن خشک برگ با میزان کلسیم برگ (ج) گیاه کنجد در آزمایش گلدانی

۴-۲-۲-۵- وزن زیست توده

نتایج نشان داد که تنها اثرات اصلی شامل تنش شوری، کاربرد سدیم نیتروپروساید و محلول‌پاشی کلسیم بر وزن زیست توده گیاه کنجد معنی‌دار بود (جدول پیوست ۴). اعمال تنش شوری سبب کاهش قابل ملاحظه‌ی میزان زیست‌توده تولیدی گیاه کنجد شد. به‌گونه‌ای که با اعمال تنش میزان زیست‌توده تولیدی از ۶/۰۴ گرم با کاهش ۵۰ درصدی به ۳/۰۲ گرم رسید (جدول ۴-۶).

هنگامی که گیاه تحت شرایط تنش شوری قرار می‌گیرد در اثر کاهش پتانسیل اسمزی دچار نوعی خشکی فیزیولوژیک می‌شود و ریشه‌ها تحت این شرایط مقدار آبسزیک اسید را افزایش می‌دهند که این هورمون از طریق جریان تعرق به اندام‌های هوایی منتقل می‌شود. آبسزیک اسید در اندام‌های هوایی سبب کاهش هدایت روزنه‌ها و به تبع آن کاهش تعرق می‌شود (توتیجا، ۲۰۰۷) و درنهایت به‌دلیل کاهش انتشار CO_2، فتوسنتز، رشد و در نتیجه عملکرد گیاه دچار اختلال می‌شود (اشرف، ۲۰۰۱). تحت تنش شوری، عدم تورژسانس مناسب سلول‌ها و تخصیص بیش‌تر مواد سنتزشده جهت مقابله با تنش، کوتاه شدن دورهٔ رشد گیاه و نیز مکانیسم‌های فرار از تنش می‌توانند مانع از توسعه عادی سلول‌ها و درنتیجه کاهش ارتفاع گیاه و زیست‌توده شوند (عطارزاده و همکاران، ۲۰۱۶). تیموری و همکاران (۱۳۹۲) در بررسی اثر تنش شوری در چهار ژنوتیپ کنجد بیان کردند تنش شوری سبب کاهش وزن خشک تک بوته در هر چهار ژنوتیپ شد.

استفاده از سدیم نیتروپروساید سبب افزایش میزان زیست‌توده شد. تیمار محلول‌پاشی به‌همراه پیش-تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید با تولید ۴/۹۱ گرم در بوته ماده خشک بیش‌ترین تأثیر را بر وزن زیست‌توده کنجد داشت، پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید نتوانست تأثیر معنی‌داری بر این صفت نسبت به شاهد داشته باشد ولی محلول‌پاشی با این ماده اثر مثبت و معنی‌داری داشت (جدول ۴-۶). امیدی و همکاران (۱۳۹۳) گزارش کردند محلول‌پاشی سدیم نیتروپروساید سبب افزایش عملکرد بیولوژیک در شرایط تنش کم‌آبی در دو رقم لوبیا شد. به عقیده آن‌ها سدیم نیتروپروساید با حفظ توانایی تولید و نگهداری شاخهٔ فرعی در گیاهان تحت تنش، سبب بهبود عملکرد بیولوژیک می‌شود.

بررسی سطوح تیمار کلسیم نشان داد که در اثر محلول‌پاشی کربنات کلسیم به فرم معمول و نانو وزن زیست توده به‌طور معنی داری و به ترتیب معادل ۱۰/۴ و ۲۱ درصد بهبود یافت. ایبرگر (۲۰۰۲) گزارش داد که استفاده از کلرید کلسیم سبب افزایش میزان زیست‌توده گوجه‌فرنگی شد. صادقی لطف آبادی و

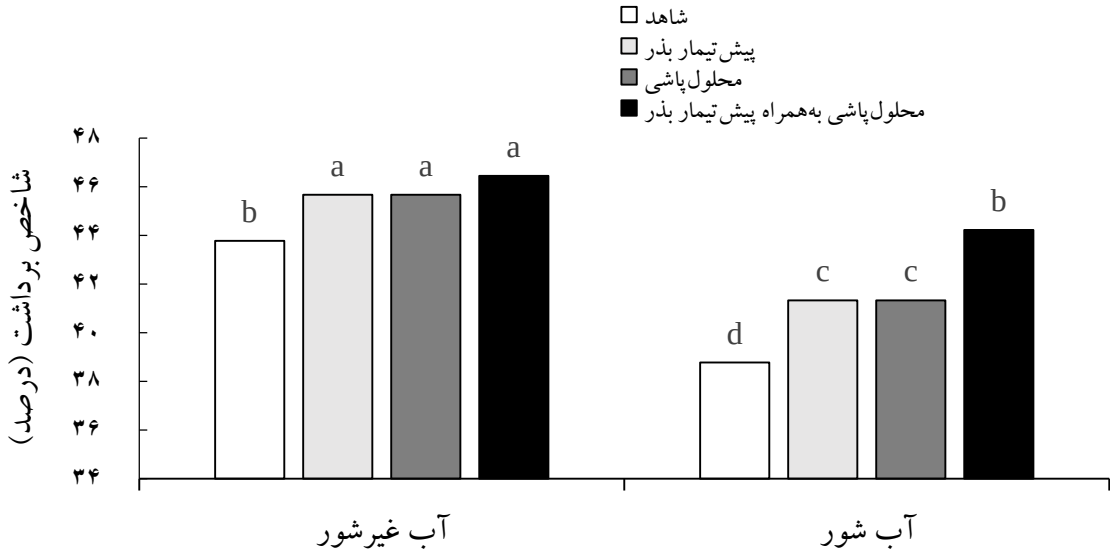
همکاران (۲۰۱۰) نیز گزارش کردند که کلسیم سبب جلوگیری از کاهش مقدار زیست‌توده در سورگوم می‌شود.

۴-۲-۲-۶- شاخص برداشت

از بین منابع تغییر، تنش شوری، تیمار سدیم نیتروپروساید، محلول‌پاشی کلسیم و برهم‌کنش تنش شوری و سدیم نیتروپروساید تأثیر معنی‌داری ($P < ۰/۰۱$) بر شاخص برداشت داشتند (جدول پیوست ۴). در شکل ۴-۷ مشاهده می‌شود که آبیاری با آب شور به‌طور معنی داری شاخص برداشت را کاهش داد. این کاهش به طور متوسط ۸/۷ درصد بود. در شرایط عدم کاربرد سدیم نیتروپروساید، آبیاری با آب شور موجب کاهش ۱۱/۴ درصدی در شاخص برداشت نسبت به شرایط غیر شور شد که با کاربرد همزمان تیمار محلول‌پاشی و پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید، اثرات سوء شوری تعدیل گشت به‌طوری که میزان شاخص برداشت به‌حد گیاهان شاهد رسید. برخی محققین اظهار داشتند که کاهش عملکرد بیولوژیک گیاه تحت شرایط شوری بسته به ترکیب نمک، غلظت نمک، گونهٔ گیاهی و مرحلهٔ رشدی گیاه متغیر است و با افزایش شوری، عملکرد بیولوژیک گیاه کاهش می‌یابد (حیدری شریف آباد، ۱۳۸۰ و دپاسکال وهمکاران، ۲۰۰۵). مقدار کاهش عملکرد بیولوژیک با افزایش سطح شوری در ارقام مختلف گیاهی متفاوت است و در شرایط تنش، ارقام مقاوم به شوری می‌توانندکاهش وزن کم‌تری نسبت به ارقام حساس نشان دهند (همائی،۱۳۸۱). عملکرد یک گیاه را می‌توان از طریق افزایش کل ماده خشک تولید شده در مزرعه یا افزایش سهم عملکرد اقتصادی (شاخص برداشت) یا هر دو برآورد کرد. در سال‌های اخیر گزارش شده است که افزایش پتانسیل عملکرد با افزایش شاخص برداشت همراه است و همبستگی بالایی بین این دو در بسیاری از گیاهان زراعی وجود دارد (دپاسکال و همکاران، ۲۰۰۵).

استفاده از تیمارهای مختلف محلول‌پاشی با کربنات‌کلسیم سبب افزایش معنی‌دار میزان شاخص برداشت گیاه کنجد شد. در بین تیمارهای محلول‌پاشی با کربنات‌کلسیم، بیش‌ترین و کم‌ترین شاخص

برداشت به‌ترتیب در تیمار محلول‌پاشی با نانوکربنات‌کلسیم (۴۴/۳۳ درصد) و تیمار شاهد (۴۱/۸۸ درصد) دیده شد. البته بین تیمار محلول‌پاشی با کربنات‌کلسیم (۴۴/۰۰ درصد) و محلول‌پاشی با نانوکربنات‌کلسیم (۴۴/۳۳ درصد) تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۴-۶). معدنی‌پور و همکاران (۱۳۹۳) گزارش دادند که محلول‌پاشی کلسیم تأثیر معنی‌داری بر شاخص برداشت در سویا دارد و در شرایط تنش کم‌آبی محلول‌پاشی کلسیم می‌تواند سبب تعدیل خسارات ناشی از تنش و افزایش مقاومت این گیاه زراعی شود.



شکل ۴-۷- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و کاربرد سدیم نیتروپروساید بر شاخص برداشت در گیاه کنجد در آزمایش گلدانی

۴-۲-۳- فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی

۴-۲-۳-۱- سوپراکسید دیسموتاز (SOD)

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده ها نشان داد که تیمارهای شوری، سدیم نیتروپروساید و برهمکنش بین آن‌ها، محلول‌پاشی کلسیم و برهمکنش بین شوری و محلول‌پاشی کلسیم تأثیر معنی‌داری ($P < ۰/۰۱$) بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز داشتند (جدول پیوست ۵). در شرایط تنش شوری فعالیت این آنزیم افزایش قابل ملاحظه‌ای یافت، به طوری‌که فعالیت این آنزیم آنتی‌اکسیدانی به‌طور متوسط از ۰/۵۷

واحد بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه در شرایط غیرتنش تقریباً با ۸ برابر افزایش به ۴/۵ واحد بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه در شرایط تنش شوری رسید (شکل ۴-۸). در شرایط غیرتنش، هیچ‌یک از سطوح سدیم‌نیتروپروساید اثر معنی‌داری بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز نداشتند ولی زمانی که گیاه در معرض تنش شوری قرار گرفت، افزایش چشمگیری در فعالیت آنزیم مذکور دیده شد. تحت شرایط تنش تیمار محلول‌پاشی توأم با پیش‌تیمار بذر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز را حدود ۴۱ درصد نسبت به تیمار عدم استفاده از سدیم نیتروپروساید در شرایط شور افزایش داد؛ که همراه با تیمار محلول‌پاشی در یک گروه آماری قرار گرفت. دانگ و همکاران (۲۰۱۷) بیان نمودند که کاربرد سدیم نیتروپروساید فعالیت سوپراکسید دیسموتاز، پراکسیداز و کاتالاز را در گیاهچه‌های بادام زمینی به‌طور معنی‌داری افزایش می‌دهد. کایا و اشرف (۲۰۱۵) گزارش دادند که کاربرد سدیم نیتروپروساید موجب کاهش اثرات مضر سمیت بور بر پارامترهای کلیدی رشد و عملکرد گوجه فرنگی از طریق کاهش نفوذپذیری غشاء، محتوای H_2O_2و MDA ، فعالیت‌های آنزیمی و آنتی‌اکسیدانی می‌شود. مانای و همکاران (۲۰۱۴) گزارش دادند که تنش شوری منجر به کاهش فعالیت آنزیم کاتالاز و افزایش فعالیت گلوتاتیون ریداکتاز و سوپراکسید دیسموتاز تحت تنش شوری در گوجه‌فرنگی شد.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر برهم‌کنش تنش شوری و محلول‌پاشی با کربنات‌کلسیم بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز معنی‌دار بود (جدول پیوست ۵). در شرایط آبیاری با آب غیر شور، سطوح مختلف محلول‌پاشی کربنات کلسیم از نظر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز تفاوتی با تیمار شاهد نداشتند ولی در شرایط تنش شوری افزایش چشمگیری در فعالیت آنزیم مذکور دیده شد و بین مصرف و عدم مصرف کلسیم تفاوت معنی‌داری وجود داشت؛ هرچند دو سطح تیمار محلول‌پاشی (کربنات کلسیم و نانوذرات کربنات کلسیم) از لحاظ آماری تفاوت معنی داری با یکدیگر نداشتند ولی فعالیت این آنزیم در تیمار محلول‌پاشی با نانوکربنات‌کلسیم (۴/۹۸ واحد بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) بیشتر بود

(شکل ۴-۹). ژیو و همکاران (۲۰۰۴) دریافتند که بهبود سمیت فلز سنگین آلومینیوم با تغذیه گیاه با کلسیم می‌تواند مرتبط با نقش کلسیم در کاهش جذب آلومینیوم و افزایش فعالیت سیستم‌های آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در سلول گیاهی باشد. محققین بیان کردند که عنصر کلسیم با تقویت فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، شرایط ادامه حیات را برای گیاه گندم در سطوح متفاوت تنش فلز سنگین فراهم نمود (سیدیکی و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین نتایج مطالعاتی دیگر نشان داد که تغذیه گیاه با کلسیم در شرایط تنش فلز سنگین سرب (گارلند و همکاران، ۱۹۸۱) و کادمیوم (سیدیکی ی و همکاران، ۲۰۱۱) نقش مهمی در واکنش‌های فیزیولوژیکی و سمیت‌زدایی فلز سنگین در سلول گیاهی داشت.

جدول ۴-۸- مقایسه میانگین فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و غلظت مالون دی‌آلدئید در گیاه کنجد در آزمایش گلدانی

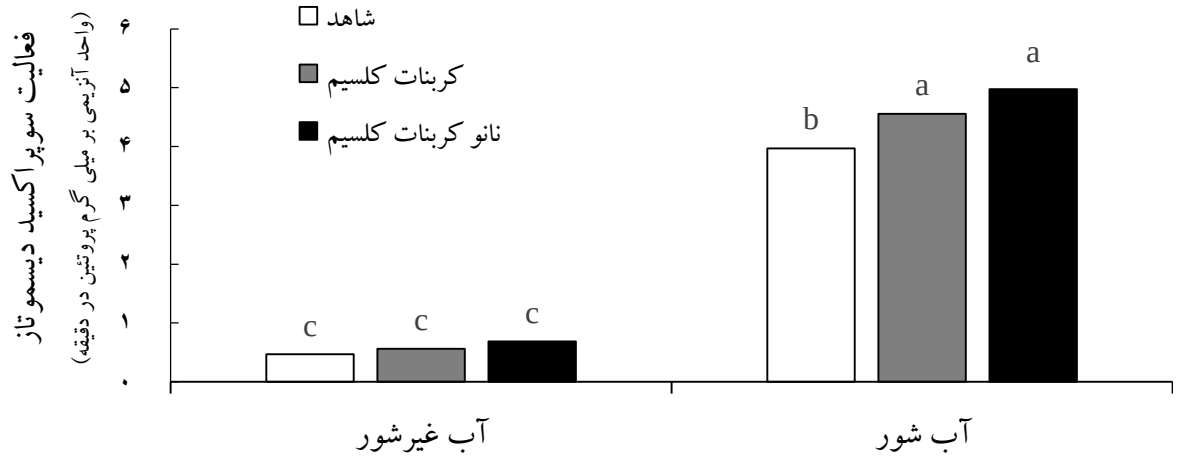
تیمار	سطح	سوپراکسید دیسموتاز	کاتالاز	آسکوربات پراکسیداز	مالون دی‌آلدئید (میکرومول بر گرم وزن تر)
		(واحد آنزیمی بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه)			
تنش شوری	آب غیرشور	۰/۵۷ b	۰/۵۲ b	۰/۷۷ b	۰/۸۴ b
	آب شور	۴/۵۰ a	۲/۶۷ a	۸/۰۳ a	۵/۰۹ a
سدیم نیتروپروساید	شاهد	۲/۰۷ b	۱/۲۷ c	۳/۷۵ c	۳/۷۴ a
	پیش‌تیمار بذر[1]	۲/۲۱ b	۱/۵۱ b	۴/۱۶ b	۳/۰۳ b
	محلول‌پاشی[2]	۲/۸۵ a	۱/۷۳ a	۴/۷۷ a	۲/۶۳ c
	پیش‌تیمار بذر و محلول‌پاشی	۳/۰۲ a	۱/۸۶ a	۴/۹۲ a	۲/۴۸ c
محلول‌پاشی کلسیم	شاهد	۲/۲۲ c	۱/۳۶ c	۴/۰۸ c	۳/۳۳ a
	کربنات‌کلسیم	۲/۵۶ b	۱/۶۴ b	۴/۳۹ b	۲/۸۸ b
	نانو کربنات‌کلسیم	۲/۸۳ a	۱/۸۲ a	۴/۰۸ a	۲/۷۰ b

حروف مختلف در هر ستون بیانگر اختلاف معنی دار در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون LSD می باشد.

۱. پیش‌تیمار بذر با غلظت ۱۵۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید

۲. محلول‌پاشی با غلظت ۵۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید

شکل ۴-۸- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و کاربرد سدیم نیتروپروساید بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در گیاه کنجد در آزمایش گلدانی



شکل ۴-۹- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و محلول‌پاشی با کربنات‌کلسیم بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در گیاه کنجد در آزمایش گلدانی

۴-۲-۳-۲-کاتالاز (CAT)

کاتالاز برای حذف پراکسید هیدروژن (H_2O_2) و تبدیل آن به آب و اکسیژن در طی تنفس نوری در پراکسی‌زوم عمل می‌کند و برای مقاومت به تنش شوری از اهمیت زیادی برخوردار است (پسرکلی، ۲۰۱۶). اثر تنش شوری، سدیم نیتروپروساید و محلول‌پاشی کلسیم بر میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاه

کنجد معنی‌داری بود (جدول پیوست ۵). تنش شوری سبب افزایش ۵ برابری فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاه کنجد شد، به‌گونه‌ای که میزان فعالیت این آنزیم از ۰/۵۲ واحد آنزیمی بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه در شرایط غیرتنش به ۲/۶۷ واحد آنزیمی بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه در شرایط تنش شوری افزایش پیداکرد (جدول ۴-۸).

استفاده از تیمارهای مختلف سدیم نیتروپروساید سبب افزایش در میزان فعالیت کاتالاز شد (جدول ۴-۸). در این بین تیمار محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید موجب افزایش ۴۶ درصدی آن گردید. این تیمار و تیمار محلول‌پاشی تأثیر بیشتری بر فعالیت کاتالاز داشتند و اختلاف معنی‌داری را ایجاد نمودند. کمترین میزان فعالیت آنزیم هم با مقدار ۱/۲۷ واحد آنزیمی بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه مربوط به تیمار شاهد بود (جدول ۴-۸). لاسپینا و همکاران (۲۰۰۵) گزارش دادند که محتوای آسکوربات به شدت تحت تنش کادمیوم افزایش می‌یابد، اما پیش از آن با کاربرد سدیم نیترپروساید به‌عنوان فراهم‌کننده نیتریک اکسید، این افزایش فزونی می‌یابد. هم‌چنین بیان نمودند که نیتریک اکسید سبب جلوگیری از افزایش فعالیت سوپراکسید دیسموتاز ناشی از تنش کادمیوم و بازیابی کاتالاز شد. چن و همکاران (۲۰۱۵) گزارش دادند که کاربرد سدیم نیترپروساید سبب کاهش فعالیت سوپراکسید دیسموتاز و افزایش میزان گلوتاتیون و فعالیت پراکسیداز، کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز در برنج شد.

تیمار محلول‌پاشی با کربنات‌کلسیم تأثیر معنی‌داری بر میزان فعالیت این آنزیم داشت (جدول پیوست ۵). بیش‌ترین میزان فعالیت این آنزیم در تیمار محلول‌پاشی با نانوکربنات‌کلسیم با غلظت ۴ در هزار (۱/۸۲ واحد بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) دیده شد، بعد از آن تیمار محلول‌پاشی با کربنات کلسیم (۱/۶۴ واحد بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) قرار داشت (جدول ۴-۸). نتایج جمشیدی و همکاران (۱۳۹۶) نشان داد که در شرایط تنش سرب، محلول‌پاشی کلسیم سبب افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز،

کاهش پراکسیداسیون لیپید غشاء، جلوگیری از تخریب کلروفیل و حفظ عملکرد دانه می‌گردد. همچنین دیگر تحقیقات نشان داه است که کلسیم با حفظ فعالیت سیستم آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و تجمع پرولین می‌تواند آسیب‌های وارده از طریق تنش شوری در گیاه گندم را بکاهد (سیدتقوی و همکاران، ۲۰۱۱).

۴-۲-۳-۳-آسکوربات پراکسیداز (APX)

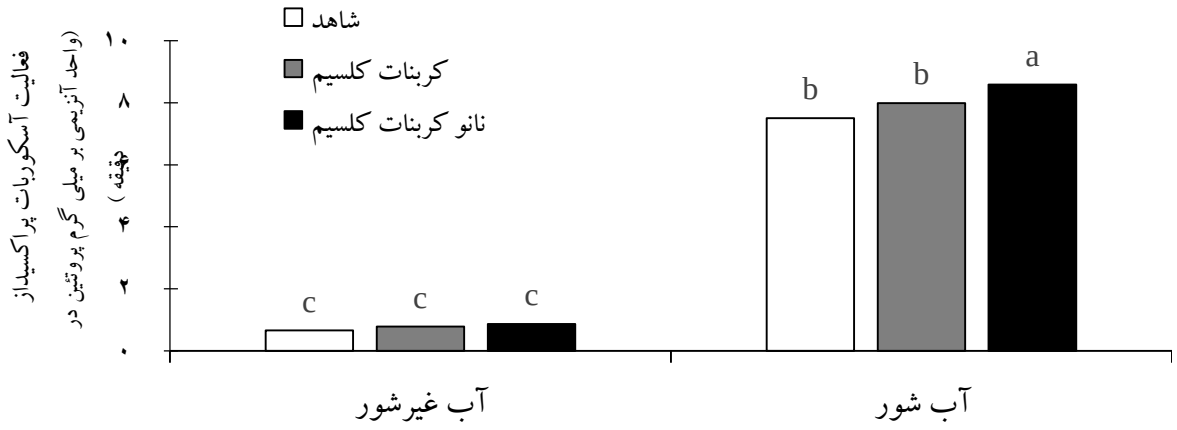
میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز از سطوح مختلف شوری، سدیم نیتروپروساید، کربنات کلسیم، برهم‌کنش بین شوری و سدیم نیتروپروساید و برهم‌کنش بین شوری و کربنات کلسیم در سطح احتمال ۱ درصد تأثیر پذیرفت (جدول پیوست ۵). بررسی نتایج نشان داد، هنگامی که گیاهان تحت آبیاری با آب غیر شور قرار گرفتند، اعمال سطوح مختلف سدیم نیترو پروساید تأثیری بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز نداشت، ولی در شرایط تنش اثرات چشمگیری بر فعالیت آنزیم گذاشتند (شکل ۴-۱۰). به-صورت کلی تنش شوری سبب افزایش ۱۰ برابری در فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز شد (جدول ۴-۸). در شرایطی که گیاهان تحت تنش شوری قرار گرفتند، تیمار محلول‌پاشی سدیم نیتروپروساید و همچنین تیمار محلول‌پاشی توأم با پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید بیشترین اثر را بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز داشتند و با هم در یک گروه برتر آماری جای گرفتند (شکل ۴-۱۰). رضوان و همکاران (۲۰۱۸) گزارش دادند که کاربرد سدیم نیتروپروساید ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در گیاهان تحت تنش را از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز، سم‌زدایی گونه‌های فعال اکسیژن به‌ویژه پراکسیداز و کاتالاز در ریشه و برگ، افزایش می‌دهد. نتایج سانگ و همکاران (۲۰۱۷) نشان داد کاربرد نیتریک اکسید از منبع سدیم نیتروپروساید فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (SOD، POD وCAT) را افزایش و سطح گونه‌های فعال اکسیژن و MDA را کاهش می‌دهد و از این رو مقاومت در برابر تنش اکسیداتیو را افزایش می‌دهد.

محلول‌پاشی کلسیم نیز در شرایط غیرشور تأثیری در میزان فعالیت آسکوربات پراکسیداز نداشت. در حالی‌که تیمار محلول‌پاشی با نانوذرات کربنات کلسیم سبب افزایش قابل توجه ۱۳ درصدی فعالیت این آنزیم در شرایط شوری نسبت به عدم کاربرد کلسیم در همین شرایط گردید. این اثر به لحاظ آماری نیز معنی‌دار بود و در مجموع بیشترین فعالیت آنزیم را بین ۶ ترکیب تیماری مورد مقایسه نشان داد (شکل ۴-۱۱). کلسیم با فعال‌سازی مسیرها و کانال‌های کلسیمی از قبیل CDPKها و همچنین فعال‌سازی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و نهایتاً کاهش رادیکال‌های آزاد نقش مهمی را در جلوگیری از آسیب‌پذیری غشاء دارد (خان و همکاران، ۲۰۱۰). کلسیم یک کاتیون دو ظرفیتی مهم است که در دیواره‌ی سلولی و غشاءها و به‌عنوان پکتات کلسیم نقش ساختاری دارد. پکتات کلسیم در دیواره تجمع می‌یابد و از طریق اتصال سلول‌ها به یکدیگر، سبب محافظت از سلول می‌شود (خان و همکاران، ۲۰۱۰). ایبرگر و همکاران (۲۰۰۲) با مطالعه صورت گرفته روی گندم بیان کرد که استفاده از کلرید کلسیم سبب کاهش میزان آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و افزایش میزان آنزیم آسکوربات پراکسیداز می‌شود. همچنین در مطالعه صورت گرفته روی گوجه‌فرنگی استفاده از کلرید کلسیم کاهش میزان آنزیم آسکوربات پراکسیداز را سبب شد. آسکوربات پراکسیداز یکی از مهم‌ترین آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در گیاه است که با استفاده از آسکوربات برای احیا کردن، سمیت H_2O_2 را از بین می‌برد و با پاک‌سازی رادیکال‌های اکسیژن سمی از آسیب به غشاء جلوگیری می‌کند (عبدالجلال و همکاران، ۲۰۰۹). با توجه به ضرایب همبستگی پیرسون بین فعالیت آسکوربات پراکسیداز و مقدار کلروفیل a، b و کلروفیل کل می‌توان بیان کرد با افزایش تنش شوری و کاهش محتوای کلروفیل در برگ میزان فعالیت آسکوربات پراکسیداز افزایش یافته تا از میزان خسارت اکسیداتیو حاصل از افزایش اشکال مخرب اکسیژن کاسته شده و در نهایت از آسیب به غشاء جلوگیری شود (جدول ۴-۹)

جدول۴-۹- ضریب همبستگی پیرسون بین فعالیت آسکوربات پراکسیداز با برخی از صفات اندازه‌گیری شده در گیاه کنجد

سدیم برگ	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل
۰/۹۲۹***	-۰/۹۱۶***	-۰/۹۲۲***	-۰/۹۴۴***

شکل ۴-۱۰- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و کاربرد سدیم نیتروپروساید بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در گیاه کنجد در آزمایش گلدانی



شکل ۴-۱۱- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و محلول‌پاشی با کربنات‌کلسیم بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در گیاه کنجد در آزمایش گلدانی

۴-۲-۳-۴- مالون دی‌آلدئید (MDA)

میزان مالون دی آلدئید در آزمایش گلدانی از همه اثرات اصلی شامل اثر شوری، سدیم نیتروپروساید وکلسیم کربنات در سطح احتمال ۱ درصد تأثیر پذیرفت. در بین اثرات متقابل نیز اثر برهم‌کنش بین شوری و سدیم نیتروپروساید و برهم‌کنش بین شوری و کربنات کلسیم معنی دار ($P < ۰/۰۱$) بود (جدول پیوست ۵).

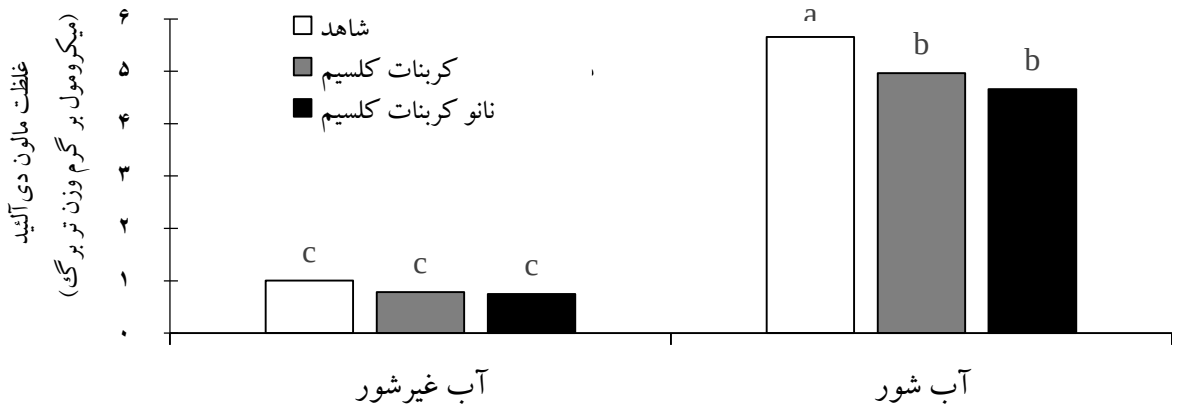
در شکل ۴-۱۲ مشاهده می‌شود که آبیاری با آب شور به‌طور معنی‌داری غلظت مالون دی آلدئید را افزایش داد. این افزایش به طور متوسط حدود ۶ برابر بود. از طرفی کلیه‌ی تیمارهای کاربرد سدیم نیتروپروساید نیز سبب کاهش معنی‌دار پراکسیداسیون لیپید در شرایط تنش شوری شدند. سدیم نیتروپروساید دارای نقش حفاظتی است و سبب کاهش پر اکسیداسیون لیپید و نهایتاً میزان مالون دی‌آلدئید شد، به‌گونه‌ای که در شرایط آبیاری با آب شور مقدار مالون دی‌آلدئید از ۶/۳۷ میکرومول بر گرم وزن تر برگ در تیمار عدم کاربرد سدیم نیتروپروساید به ۴/۴۷ میکرومول بر گرم وزن تر برگ در تیمار محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید رسید. کاهش مالون‌دی‌آلدئید در اثر پیش‌تیمار بذر، محلول‌پاشی و کاربرد توأم سدیم نیتروپروساید در محیط شور به ترتیب ۲۱/۱۹ ، ۲۷/۱۵ و ۲۹/۸۲ درصد بود (شکل ۴-۱۲). بنابراین نتایج مشخص کرد که اثر محلول‌پاشی سدیم نیتروپروساید در کاهش مقدار MDA نسبت به پیش‌تیمار بذر با این ماده بیشتر بود (شکل ۴-۱۲). در این راستا یافته‌های رضوان و همکاران (۲۰۱۸) نشان داد که کاربرد سدیم نیتروپروساید، اهداکننده نیتریک اکسید، عملکرد رشدی گیاهچه‌های برنج تحت تنش نیکل را افزایش می‌دهد. افزایش تحمل تنش نیکل در برنج به‌وسیله سدیم نیتروپروساید ممکن است به توانایی سدیم نیتروپروساید در تنظیم جذب نیتروژن، کاهش استرس اکسیداتیو ناشی از کاهش پراکسید هیدروژن، مالون دی‌آلدئید و نشت الکترولیتی در گیاهان تحت تنش

باشد. لاسپینا و همکاران (۲۰۰۵) گزارش دادند که کاربرد سدیم نیترپروساید به‌عنوان فراهم‌کننده نیتریک اکسید، کاهش وزن خشک و تخریب کلروفیل ناشی از تنش فلزات سنگین در آفتابگردان را کاهش می‌دهد. هم‌چنین موجب افزایش پراکسیداسیون لیپید و کاهش ۳۰ درصدی در میزان گلوتاتیون شد. مطالعه کایا و اشرف (۲۰۱۵) نشان داد که نیتریک اکسید خارجی (از منبع سدیم نیتروپروساید) می‌تواند اثرات زیانبار سمیت بور بر عملکرد میوه و زیست‌توده کل گوجه فرنگی را از طریق کاهش غلظت بور، MDA و H_2O_2 و نیز نشت الکترولیت در برگ‌ها کاهش دهد. شی و همکاران (۲۰۰۷) بیان نمودند که تنش شوری موجب تجمع H_2O_2 و پراکسیداسیون لیپید در میتوکندری خیار می‌شود و استفاده از سدیم نیتروپروساید سبب تحریک آنزیم‌های جاروب‌کننده گونه‌های فعال اکسیژن و کاهش تجمع H_2O_2 در میتوکندری‌های ریشه‌های خیار ناشی از تنش شوری می‌گردد. این‌گونه به نظر می‌رسد که نقش سدیم نیتروپروساید در کاهش پراکسیداسیون لیپیدها، مربوط به توانایی سدیم نیتروپروساید در واکنش با رادیکال‌های آلکوکسیل (LO) و پراکسیل (LOO) و درنتیجه، توقف زنجیره پراکسیداسیون لیپیدها باشد (آراسیموویک و وایزوریک، ۲۰۰۷).

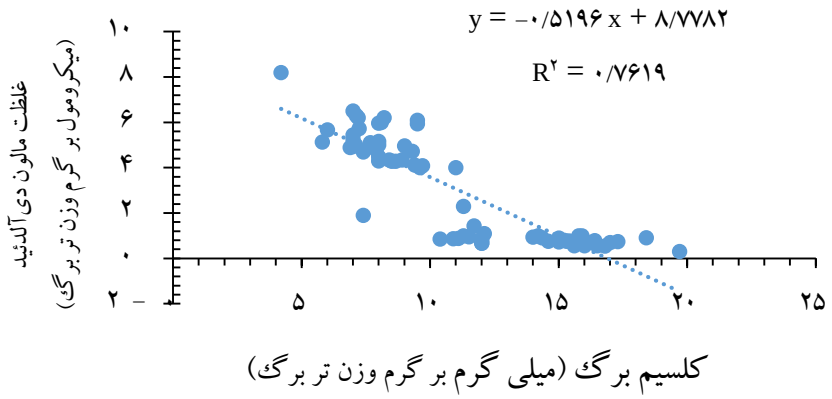
همچنین در شکل ۴-۱۳ نیز مشاهده می شود که با اعمال تنش شوری به‌طور قابل ملاحظه‌ای بر میزان مالون دی آلدئید افزوده شده است. تیمارهای محلول‌پاشی کربنات کلسیم تا حدی سبب تعدیل غلظت مالون دی آلدئید در شرایط آبیاری با آب شور شدند. به نحوی که تیمار محلول‌پاشی با فرم معمول و نانو ذرات کربنات کلسیم به ترتیب موجب کاهش ۱۴/۲۴ و ۱۷/۵ درصدی این صفت نسبت به شاهد (سطح صفر کربنات کلسیم در شرایط شور) گردید. لازم به ذکر است که تفاوت بین دو فرم محلول‌پاشی کربنات کلسیم در شرایط تنش معنی دار نبود. در شرایط آبیاری با آب غیرشور اعمال تیمارهای محلول-پاشی کربنات کلسیم در تعدیل میزان مالون دی آلدئید از نظر آماری مؤثر نبود (شکل ۴-۱۳).کلسیم در حفاظت از غشاءی سلولی، تنظیم تبادل یونی و فعالیت آنزیم‌ها تأثیر دارد و در انجام فعالیت‌های ساختاری

و کارکردی گیاهان نقش مهمی را ایفا می‌کند (رانجل، ۱۹۹۲)، بنابراین محلول‌پاشی با کربنات‌کلسیم از طریق افزایش کلسیم در برگ‌ها منجر به کاهش غلظت مالون دی‌آلدئید تولید شده در اثر تنش شوری شده است. شکل ۴-۱۴ به خوبی تأیید کننده این مطلب می‌باشد. تونا و همکاران (۲۰۰۷) با مطالعه روی گیاه گوجه‌فرنگی گزارش کردند که استفاده از کلسیم در شرایط تنش شوری سبب کاهش معنی‌دار میزان پراکسیداسیون لیپید می‌شود. در مطالعه صورت گرفته روی گوجه‌فرنگی مشخص شد که کمبود کلسیم سبب افزایش میزان مالون دی‌آلدئید و استفاده از کلرید کلسیم سبب کاهش آن می‌شود. برای حفاظت از غشاء پلاسمایی در مقابل آسیب‌های ناشی از تنش‌های مختلف، حضور کلسیم در محیط بیرونی، جایی که می‌تواند جذب یون‌ها تنظیم کننده شود، ضروری است (رودریگومورنو و همکاران، ۲۰۱۳). کاربرد کلسیم در شرایط تنش فلز سنگین کادمیوم به‌طور معنی‌داری منجر به کاهش سطح مالون دی‌آلدهید در گیاه شبدر شد و اثرات سمی فلز سنگین کادمیوم را کاهش داد (وانگ و سانگ، ۲۰۰۹). لی و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که کاربرد کلسیم سبب افزایش جذب عناصر غذایی ضروری در شرایط تنش فلز سنگین کادمیوم می‌شود و مالون دی‌آلدهید که نشانگر پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء است، در شرایط تنش کاهش می‌یابد.

شکل ۴-۱۲- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و کاربرد سدیم نیتروپروساید بر غلظت مالون دی‌آلدئید در گیاه کنجد در آزمایش گلدانی



شکل ۴-۱۳- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و محلول‌پاشی با کربنات‌کلسیم بر غلظت مالون دی‌آلدئید در گیاه کنجد در آزمایش گلدانی



شکل ۴-۱۴- رابطه رگرسیون ساده خطی بین مقدار کلسیم برگ و غلظت مالون دی‌آلدئید در گیاه کنجد در آزمایش گلدانی

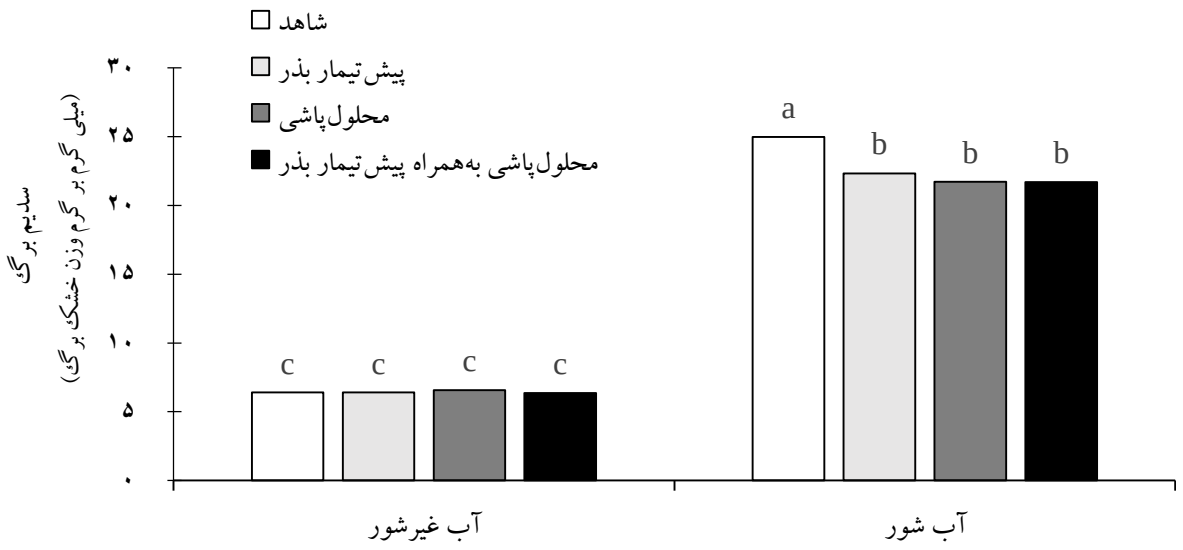
۴-۲-۴- غلظت سدیم

میزان سدیم برگ از شوری، سدیم نیتروپروساید، کربنات کلسیم، برهم‌کنش بین شوری و سدیم نیتروپروساید و برهم‌کنش بین شوری و کربنات کلسیم در سطح احتمال ۱ درصد تأثیر پذیرفت (جدول پیوست ۶). در شکل ۴-۱۵ مشاهده می‌شود که آبیاری با آب شور به‌طور معنی‌داری میزان سدیم را در برگ ها افزایش داد. این افزایش نسبت به شاهد در شرایط غیرشور بین ۲۴۴ و ۲۹۶ درصد متغییر بود.

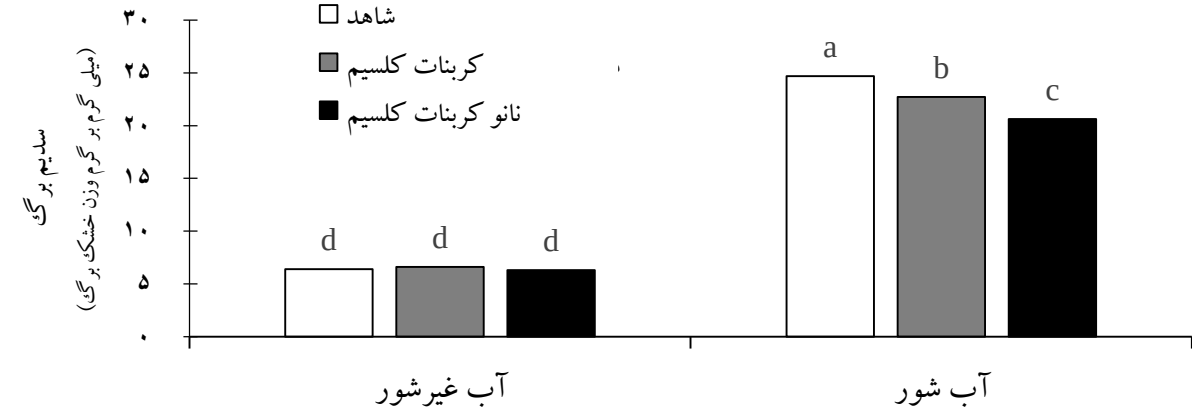
اعمال تیمارهای مختلف سدیم نیتروپروساید در شرایط تنش تقریباً به‌طور یکسان سبب کاهش معنی‌دار میزان سدیم در برگ‌ها نسبت به شاهد شد، به‌طوری‌که مقدار سدیم برگ از ۲۴/۹۷ میلی‌گرم بر گرم در تیمار شاهد در شرایط تنش به ۲۱/۶۸ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک برگ در تیمار محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید کاهش یافت (شکل ۴-۱۵). اما تفاوت معنی‌داری در بین خود سطوح مختلف کاربرد سدیم نیتروپروساید مشاهده نشد. اثر کاربرد سدیم نیتروپروساید در شرایط غیرتنش بر میزان سدیم برگ نیز معنی‌دار نبود (شکل ۴-۱۵). تجمع یون سدیم در برگ‌ها، منجر به کاهش عملکرد می‌شود (پوستینی و رجبی، ۲۰۰۵). تجمع بالای یون سدیم سبب صدمه شدید به برگ، کاهش دوام برگ و همچنین کاهش میزان فتوسنتز در برگ می‌شود و این امر منجر به کاهش عملکرد می‌گردد (حسین و همکاران، ۲۰۰۳). درنتیجه ریشه‌ها باید از جذب یون سدیم و کلر موجود در محلول خاک ممانعت به‌عمل آورند، زیرا در غیر این صورت، به‌تدریج باگذشت زمان، نمک در اندام‌های هوایی به مقدار زیادی تجمع پیدا کرده و سبب از بین رفتن برگ‌ها می‌شود (جیمز و همکاران، ۲۰۰۲)؛ بنابراین می‌توان گفت که استفاده از تیمارهای سدیم نیتروپروساید نقش مهمی در کاهش تجمع سدیم موجود در برگ و خسارت حاصل از آن به گیاه دارند. بایبوردی و همکاران (۱۳۸۹) با بررسی تنش شوری ناشی از کلرور سدیم بر خصوصیات فیزیولوژیکی ارقام پاییزه کلزا بیان نمودند که همراه با افزایش شوری، غلظت پتاسیم و نسبت K^+/Na^+ کاهش و غلظت سدیم، کلسیم و منیزیم افزایش می‌یابد. دفع سدیم از اندام‌های هوایی به‌عنوان یکی از مکانیسم‌های مهم تحمل شوری در برخی از گیاهان ازجمله گندم و جو شناسایی شده است. تحمل به شوری در این‌گونه‌ها بستگی زیادی به توانایی آن‌ها برای دفع سدیم دارد به‌گونه‌ای که از تجمع غلظت‌های بالای یون سدیم در برگ، به‌ویژه پهنک برگ جلوگیری می‌کنند (مونس، ۲۰۰۵). گزارش شده است که با افزایش تنش شوری میزان سدیم و نسبت سدیم به پتاسیم در ساقه های خلر (*Lathyrus Sativus* L.) نیز افزایش می‌یابد (بخرد و همکاران، ۱۳۹۴). بیائو و همکاران (۲۰۱۴) نیز مشاهده کردند

که تنش شوری میزان سدیم را در ساقه‌های گندم افزایش می‌دهد. افزایش تجمع سدیم ممکن است به‌علت کاهش در جریان Na^+ باشد. در شرایط تنش شوری، کمبود پروتون‌های خارجی ممکن است فعالیت تبادلی ناقلین Na^+/H^+ را روی غشاءی پلاسمایی کاهش دهد که تجمع Na^+ را در بافت‌های زنده افرایش می‌دهد (بخرد و همکاران، ۱۳۹۴).

همچنین در شکل ۴-۱۶ مشاهده می‌شود که مقدار سدیم برگ در سه سطح تیمار کلسیم در گیاهانی که با آب معمولی آبیاری شدند، تقریباً ثابت و حدود ۵ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک بود. مقدار این عنصر در برگ گیاهانی که آب شور را دریافت کردند ولی با کلسیم تیمار نشدند با ۳۶۱ درصد افزایش به ۲۴/۳۸ میلی‌گرم در گرم وزن خشک رسید که از نظر آماری بالاترین مقدار را در بین ۶ ترکیب تیماری مورد بررسی داشت. محلول‌پاشی با کربنات کلسیم و نانو کربنات کلسیم انباشت سدیم برگ را به طور معنی‌داری کاهش داد که البته میزان این کاهش در فرم نانو به مراتب بیشتر بود (شکل ۴-۱۶). مانای و همکاران (۲۰۱۴) بیان نمودند که استفاده از تیمارهای خارجی کلسیم دارای خاصیت بهبوددهنده در مقابله با تنش در گیاهان است به‌گونه‌ای که با حفظ و نگهداری نسبت بهینه K^+/Na^+ و همئوستازی در سیتوزول سبب ممانعت از ورود سدیم و خروج پتاسیم می‌شود. دابکسلیتا و ایکدا (۲۰۰۵) گزارش دادند که محلول‌پاشی کلسیم موجب کاهش غلظت سدیم در اندام‌های مختلف سویا و خیار تحت تنش شوری می‌شود. عطارزاده و همکاران (۱۳۹۴) گزارش دادند که محلول‌پاشی کلسیم سبب افزایش معنی‌دار محتوای کلسیم و پتاسیم اندام هوایی گلرنگ در شرایط تنش شوری گردید. آن‌ها هم‌چنین گزارش دادند که افزایش شوری منجر به افزایش محتوای سدیم گردید و محتوای پرولین برگ در شرایط محلول‌پاشی کلسیم افزایش معنی‌داری داشت.



شکل ۴-۱۵- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و کاربرد سدیم نیتروپروساید بر میزان سدیم برگ در گیاه کنجد در آزمایش گلدانی



شکل ۴-۱۶- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و محلول‌پاشی با کربنات کلسیم بر میزان سدیم برگ در گیاه کنجد در آزمایش گلدانی

جدول ۴-۱۰- مقایسه میانگین مربوط به صفات سدیم، کلسیم کلروفیل، پرولین، میزان پروتئین و روغن در گیاه کنجد در آزمایش گلدانی

تیمار	سطح	سدیم برگ	کلسیم برگ	کلروفیل (میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ)				پرولین	میزان پروتئین	میزان روغن
		(میلی‌گرم بر گرم وزن خشک برگ)		a	b	a/b	کل	(میکرومول بر گرم وزن تر برگ)	(درصد)	(درصد)
تنش شوری	آب غیرشور	۶/۴۳ b	۱۴/۳۴ a	۱/۷۸ a	۰/۹۰ a	۱/۹۷ b	۲/۶۵ a	۸/۸۶ b	۲۳/۴۰ b	۴۸/۱۹ a
	آب شور	۲۲/۶۸ a	۸/۰۲ b	۰/۶۶ b	۰/۳۰ b	۲/۲۳ a	۰/۸۷ b	۳۳/۱۳ a	۲۴/۱۶ a	۴۷/۴۱ b
سدیم نیتروپروساید	شاهد	۱۵/۶۸ a	۱۰/۶۴ b	۱/۰۹ c	۰/۵۵ c	۲/۰۶ b	۱/۶۳ c	۱۸/۰۳ c	۲۲/۴۸ b	۴۹/۰۵ a
	پیش‌تیمار بذر[1]	۱۴/۳۶ b	۱۱/۱۶ ab	۱/۲۰ b	۰/۵۹ bc	۲/۱۶ a	۱/۷۶ b	۱۸/۹۸ c	۲۲/۵۶ b	۴۹/۲۹ a
	محلول‌پاشی[2]	۱۴/۱۴ b	۱۱/۲۸ ab	۱/۲۲ b	۰/۶۱ b	۲/۰۶ b	۱/۷۶ b	۲۲/۳۷ b	۲۴/۹۱ a	۴۶/۳۸ b
	پیش‌تیمار بذر و محلول‌پاشی	۱۴/۰۳ b	۱۱/۶۴ a	۱/۳۶ a	۰/۶۶ a	۲/۱۱ ab	۱/۹۱ a	۲۴/۵۹ a	۲۵/۱۸ a	۴۶/۴۷ b
محلول‌پاشی کلسیم	شاهد	۱۵/۵۴ a	۸/۹۳ c	۱/۱۳ c	۰/۵۴ b	۲/۱۶ a	۱/۶۵ c	۱۸/۲۸ b	۲۳/۷۳ a	۴۷/۷۵ a
	کربنات‌کلسیم	۱۴/۶۶ b	۱۱/۵۳ b	۱/۲۱ b	۰/۶۰ a	۲/۰۸ b	۱/۷۷ b	۲۱/۷۳ a	۲۳/۷۲ a	۴۷/۷۵ a
	نانو کربنات‌کلسیم	۱۳/۴۷ c	۱۳/۰۸ a	۱/۳۱ a	۰/۶۶ a	۲/۰۶ b	۱/۸۷ a	۲۲/۹۶ a	۲۳/۹۰ a	۴۷/۷۴ a

حروف مختلف در هر ستون بیانگر اختلاف معنی دار در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون LSD می باشد.

۱. پیش‌تیمار بذر با غلظت ۱۵۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید

۲. محلول‌پاشی با غلظت ۵۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید

۴-۲-۵- غلظت کلسیم

اثر شوری، سدیم نیتروپروساید، کربنات کلسیم و برهم‌کنش بین شوری و کربنات کلسیم بر میزان کلسیم برگ معنی‌دار بود (جدول پیوست ۶). از بین سطوح سدیم نیتروپروساید تنها تیمار محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید توانست اختلاف معنی‌داری نسبت به شاهد ایجاد نماید. تیمارهای پیش‌تیمار بذر و محلول‌پاشی با سدیم نیتروپروساید تفاوت معنی‌داری با کاربرد توأم آنها نداشتند (جدول ۴-۱۰). کایا و اشرف (۲۰۱۵) گزارش دادند که کاربرد سدیم نیترپروساید موجب کاهش غلظت بور و افزایش Ca^{2+}، K^{+} و N^{+} در برگ گوجه فرنگی تحت تنش بور می‌شود.

در شکل ۴-۱۷ مشاهده می‌شود که آبیاری با آب شور سبب کاهش قابل توجه و معنی‌داری در میزان کلسیم برگ گردید. این کاهش به‌طور متوسط ۴۴ درصد بود. ولی محلول‌پاشی با کربنات کلسیم به فرم معمول و نانو در هر دو شرایط تنش و عدم‌تنش موجب افزایش میزان کلسیم در برگ‌ها شد که این افزایش هم نسبت به شاهد و هم نسبت به یکدیگر معنی‌دار بود. کلسیم سیتوپلاسمی در سلول‌های گیاهی در پاسخ به چالش‌های محیطی مختلف مانند تنش‌های زنده و غیرزنده و نمو افزایش می‌یابد. این افزایش ناپایدار در غلظت کلسیم سیتوپلاسمی برای پاسخ‌های فیزیولوژیکی حیاتی است. بالا رفتن غلظت کلسیم یک پاسخ عمومی به تنش است. اختلال در سطح کلسیم سیتوپلاسمی سیگناتور[1]نامیده می‌شود و از طریق چالش‌های محیطی، نشانه‌های نموی ایجاد کرده و پاسخ فیزیولوژیکی مناسب به هریک داده می‌شود. لازم به توضیح است که افزایش در مقدار کلسیم برگ ناپایدار است به‌گونه‌ای که در مطالعات مختلف نیز کاهش در میزان کلسیم برگ در طی تنش شوری گزارش شده است (کیایی نژاد و همکاران، ۱۳۹۳). هاگبای و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند تنش شوری سبب کاهش غلظت یون‌های نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم در ریشه و برگ می‌گردد. در مطالعه مانای و همکاران (۲۰۱۴) روی

1- signature

گوجه‌فرنگی گزارش شد که وجود کلرید سدیم در محیط رشد سبب کاهش معنی‌دار رشد در ژنوتیپ‌های مختلف گوجه‌فرنگی می‌شود. تونا و همکاران (۲۰۰۷) نیز در مطالعه خود روی گوجه‌فرنگی گزارش کردند که تنش شوری سبب افزایش تجمع سدیم در برگ، کاهش کلسیم و پتاسیم در برگ و ساقه در هر دو ژنوتیپ مورد مطالعه شد. افزایش تجمع کلسیم و منیزیم در گیاهان متعددی نظیر کوشیا (*Kochia scoparia*) (یانگ و همکاران، ۲۰۰۷)، جو (یانگ و همکاران، ۲۰۰۹)، آفتابگردان (*Helianthus annus*) (لیو و شی، ۲۰۱۴) و گندم (ژیو و همکاران، ۲۰۰۸) در شرایط تنش گزارش شده است. در بعضی موارد نشان داده شده است که تجمع یون‌های کلسیم سمیت تنش شوری را کاهش می‌دهد که احتمالاً به علت افزایش جذب انتخابی یون‌های پتاسیم است (پاریدا و داس، ۲۰۰۵). احتمالاً نیتریک اکسید رهاشده از سدیم نیتروپروساید با بستن روزنه‌ها تطابق گیاهچه کنجد را به تنش شوری داخل سلولی افزایش داده است (ماتا و لاماتینا، ۲۰۰۱). ماتا و لاماتینا (۲۰۰۱) نشان دادند که سدیم نیتروپروساید توانست غلظت Ca^{+2}داخل سلولی را افزایش دهد. نتایج حاصل از پژوهش حاضر روی کنجد نیز با نتایج آن‌ها تطابق دارد.

نتایج به‌دست آمده توسط دیگر محققان نشان می‌دهد که در شرایط تنش شوری، نمک سدیم به‌طور آزادانه وارد گیاه می‌شود و سبب افزایش محتوای سدیم می‌شود، اما کاربرد میزان مناسب یون کلسیم می‌تواند تا حدودی از ورود اضافی یون سدیم به گیاه ممانعت کند (آچورو و سردا، ۱۹۹۴). اما محتوای بالای کلسیم می‌تواند قابلیت نفوذ غشاء پلاسمایی برای سدیم را کاهش دهد و منجر به افزایش جذب کلسیم شود. تنش شوری سبب اختلال در جذب مواد غذایی مورد نیاز رشد می‌شود (عطارزاده و همکاران، ۱۳۹۴). گیاهان در یک محیط شور، مقدار زیادی یون سدیم را به جای یون‌هایی مثل کلسیم جذب می کنند (چن و همکاران، ۲۰۰۵). جایگزینی سدیم به جای کلسیم در غشاءی سلول سبب کاهش خاصیت نیمه‌تراوایی غشاء و خروج پتاسیم می‌شود (عطارزاده و همکاران، ۱۳۹۴). به همین دلیل در

شرایط شوری، افزایش کلسیم در سلول سبب حفظ یکپارچگی و خاصیت نیمه‌تراوایی آن می‌گردد که برای گیاه در شرایط تنش شوری بسیار حائز اهمیت است (آچورو و سردا، ۱۹۹۴). به‌نظر می‌رسد محلول‌پاشی کلسیم در شرایط تنش شوری می‌تواند جذب عناصر غذایی را تحت تأثیر قرار دهد و سبب بهبود جذب کلسیم مورد نیاز گیاه گردد، ولی در سطوح شوری پایین مانع از انباشتگی و تجمع یونی می‌گردد. در اثر تنش شوری، یون سدیم به دلیل اثر رقابتی که با یون کلسیم دارد، سبب کاهش این یون شده است. بنابراین، اثرات سمیت سدیم ممکن است تنها به‌دلیل اثرات مستقیم یون سدیم نباشد، بلکه به‌علت کاهش مقدار عناصر غذایی ضروری پتاسیم و کلسیم در گیاه باشد (عطارزاده و همکاران، ۱۳۹۴). کیایی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۳) گزارش دادند که محلول‌پاشی کلسیم در هنگام گلدهی سبب افزایش میزان کلسیم برگ، کلروفیل a و تعداد شاخه فرعی در گیاه بزرگ می‌شود. عطارزاده و همکاران (۱۳۹۱) گزارش دادند که محلول‌پاشی کلسیم سبب افزایش قند محلول گیاه در شرایط غیرتنش شوری می‌گردد و از طرف دیگر سبب افزایش محتوای کلسیم و پتاسیم در شرایط شوری می‌شود.

شکل ۴-۱۷- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و محلول‌پاشی با کربنات‌کلسیم بر میزان کلسیم برگ در گیاه کنجد در آزمایش گلدانی

۴-۲-۶- محتوای کلروفیل برگ

۴-۲-۶-۱- کلروفیل a

اثر شوری، سدیم نیتروپروساید و کربنات کلسیم در سطح احتمال ۱ درصد بر میزان کلروفیل a معنی دار بود (جدول پیوست ۶). نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها مشخص نمود که تنش شوری سبب کاهش معنی‌دار میزان کلروفیل a شد. مقدار کلروفیل a از ۱/۷۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ به ۰/۶۶ میلی‌گرم بر گرم کاهش یافت (جدول ۴-۱۰). کاهش مقدار کلروفیل های a ، b و کاروتنوئید در شرایط تنش شوری در گیاه گوجه‌فرنگی نیز گزارش شده است که در این آزمایش کاهش مقادیر رنگدانه ها در ارقام حساس بیشتر از ارقام مقاوم بود (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۵). اگرچه گزارش‌هایی وجود دارد که نشان‌دهنده عدم کاهش و یا افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی در تنش شوری می‌باشد. ولی معمولاً افزایش فعالیت آنزیم کلروفیلاز در عکس‌العمل به تنش شوری منجر به کاهش این رنگیزه‌ها می‌شود و از طرف دیگر هورمون‌های بازدارنده رشد از قبیل هورمون آبسزیک اسید و اتیلن که در شرایط تنش شوری افزایش می‌یابند، در افزایش فعالیت این آنزیم نقش دارند و موجب تخریب بیشتر کلروفیل می‌شود (بیان و همکاران، ۲۰۱۳). کلروفیل a مرکز واکنش فتوسیستم‌های I و II را تشکیل می‌دهد (وانگ و نیل، ۲۰۰۵). لذا افزایش مقدار آن تقویت سیستم فتوسنتزی گیاه را به دنبال خواهد داشت. تنش شوری سبب افزایش گونه‌های فعال اکسیژن در کلروپلاست می‌شود و تخریب مولکول کلروفیل و غشاءی کلروپلاست را در پی دارد که منجر به کاهش فتوسنتز و رشد می‌گردد (عرب و همکاران، ۱۳۹۴). در گیاهان تنش دیده کاهش معنی‌داری در محتوای کلروفیل a دیده شد. در چنین شرایطی مولکول کلروفیل به یک عامل فتودینامیک برای کاهش اثر مخرب نیاز دارد، در غیر این صورت تخریب کلروفیل توسط گونه‌های فعال اکسیژن افزایش می‌یابد (عرب و همکاران، ۱۳۹۴). هم‌چنین تخریب مولکول کلروفیل به وسیله جدا شدن

زنجیره فیتولی از حلقه پورفیرین در اثر رادیکال‌های آزاد اکسیژن و یا آنزیم کلروفیلاز صورت می‌گیرد (عرب و همکاران، ۱۳۹۴).

تیمار محلول‌پاشی به همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید با افزایش ۲۴/۷ درصدی نسبت به شاهد بیش‌ترین میزان کلروفیل a را به خود اختصاص داد و در گروه برتر آماری قرار گفت (جدول ۴-۱۰). بین تیمارهای پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید و تیمار محلول‌پاشی با این ماده ازلحاظ آماری تفاوت معنی‌داری وجود نداشت، اگرچه هردو تیمار به لحاظ آماری با تیمار شاهد تفاوت داشتند و از میزان کلروفیل بالاتری برخوردار بودند (جدول ۴-۱۰). شئوکاند و همکاران (۲۰۰۸) گزارش کردند که سدیم نیتروپروساید میزان کلروفیل را در گیاهان نخود تحت تنش کاهش داده است. سدیم نیتروپروساید از طریق تأثیر بر ترکیباتی که توانایی جارو نمودن H_2O_2 را دارا می‌باشند، می‌تواند از بسته‌شدن روزنه‌ها به واسطه افزایش H_2O_2 جلوگیری نماید و هم‌چنین از آسیب‌های اکسیداتیو ناشی از تجمع انواع گونه‌های فعال اکسیژن بر آنزیم‌های چرخه کالوین بکاهد (عرب و همکاران، ۱۳۹۴). بنابراین حضور سدیم نیتروپروساید می‌تواند در بهبود فتوسنتز مؤثر باشد.

بررسی سطوح تیمار کلسیم نشان داد که در اثر محلول‌پاشی کربنات کلسیم به فرم معمول و نانو میزان کلروفیل a به‌طور معنی‌داری و به ترتیب معادل ۷ و ۱۶ درصد بهبود یافت (جدول ۴-۱۰). افزایش غلظت کلسیم در برگ‌ها از طریق محلول‌پاشی، سبب حفظ کلروفیل و جلوگیری از کمبود آن در شرایط تنش شوری می شود. کمبود کلسیم سبب زرد شدن و پیری برگ‌ها می‌شود که ناشی از کاهش بیوسنتز کلروفیل در گیاهان است (بیان و همکاران، ۲۰۱۳). کلسیم یک ماده غذایی مهم است که در رشد و توسعه گیاه و سنتز کلروفیل نقش دارد (وایت، ۲۰۰۰).

۴-۲-۶-۲- کلروفیل b

نتایج مربوط به تجزیه واریانس داده ها نشان داد که اثر شوری، کاربرد سدیم نیتروپروساید و نیز محلولپاشی کربنات کلسیم تأثیر معنی‌داری ($p < ۰/۰۱$) بر مقدار کلروفیل b برگ داشتند (جدول پیوست ۶). در اثر تنش شوری مقدار کلروفیل b از ۰/۹۰ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ به ۰/۳۰ میلی‌گرم بر گرم کاهش یافت (جدول ۴-۱۰). کاهش مقدار کلروفیل های a ، b و کاروتنویید در شرایط تنش شوری در گیاه سویا نیز گزارش شده است (عبدالصمد و همکاران، ۱۹۹۷). با این حال در آزمایشی دیگر افزایش مقدار کلروفیل در تنش شوری در گیاه تاج خروس نیز گزارش شده است (وانگ و نیل، ۲۰۰۵). نقش کلروفیل b در سیستم فتوسنتزی گیاه دریافت نور در کمپلکس برداشت نور و انتقال به کلروفیل a است. در شرایط عدم‌تنش به واسطه فراهم‌بودن سطح برگ بیش‌تر، احساس نیاز گیاه به تقویت کمپلکس برداشت نور کم‌تر است و این می‌تواند دلیلی برای بیش‌تر بودن کلروفیل b در شرایط عدم‌تنش باشد (عرب و همکاران، ۱۳۹۴). البته همان‌گونه که مشاهده شد سدیم نیتروپروساید نقش مؤثری در بهبود کمپلکس برداشت نور ایفا کرد. محققان گزارش کردند کاربرد سدیم نیتروپروساید سبب افزایش کلروفیل bدر گیاه پنبه می‌شود (عرب و همکاران، ۱۳۹۴).

بررسی سطوح کاربرد سدیم نیتروپروساید نشان داد که میزان کلروفیل b در تیمار محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید بیش‌ترین میزان را داشت (جدول ۴-۱۰). اگرچه بین تیمارهای پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید و تیمار محلول‌پاشی با سدیم نیتروپروساید از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری وجود نداشت ولی فقط تیمار محلول‌پاشی توانست اختلاف معنی‌داری نسبت به شاهد ایجاد نماید (جدول ۴-۱۰). نتایج سانگ و همکاران (۲۰۱۷) نشان داد کاربرد نیتریک اکسید از منبع سدیم نیتروپروساید سبب افزایش قابل‌ملاحظه انتقال آهن از ریشه‌ها به شاخه‌ها می‌شود و انتقال آهن از دیواره سلولی به سلول‌های ارگانوسل را افزایش می‌دهد. در نتیجه غلظت آهن و کلروفیل موجود در برگ افزایش

یافت و فعالیت +H و ATPase در گیاه بادام‌زمینی افزایش یافت (سانگ و همکاران، ۲۰۱۷). گنگ و همکاران (۲۰۱۴) گزارش دادند که نیتریک اکسید سبب کاهش تنش شوری در گیاهان گوجه فرنگی می‌شود که ممکن است به دلیل نقش آن در تنظیم تعادل عناصر غذایی و گونه‌های واکنش‌پذیر اکسیژن (ROS) باشد که موجب محافظت سیستم فتوسنتزی گیاه از آسیب می‌گردد.

میزان کلروفیل b در برگ گیاهان محلول‌پاشی شده با کربنات کلسیم و نانو کربنات کلسیم به ترتیب ۱۱ و ۲۲ درصد بیشتر از تیمار شاهد بود. این تفاوت در بین دو فرم مختلف کاربرد کلسیم کربنات معنی-دار نبود (جدول ۴-۱۰). کلسیم سبب بهبود رشد گیاه از طریق ترمیم متابولیسم گیاه و سنتز کلروفیل (سیدیکی و همکاران، ۲۰۱۱) و حفظ پایداری غشاء تحت شرایط تنش شوری می‌شود (هال و همکاران، ۲۰۰۲). کیایی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۳) گزارش دادند که صفات فیزیولوژیکی مانند پایداری غشاء پلاسمایی، کلروفیلb، کلروفیل کل، کاروتنوئید و میزان پتاسیم برگ در گیاه بزرک با محلول‌پاشی کلسیم افزایش می‌یابد. عطارزاده و همکاران (۱۳۹۳) گزارش کردند که محلول‌پاشی کلسیم می‌تواند موجب افزایش سطح برگ، مانع از کاهش سرعت رشد گیاه و کاهش مقدار نسبی کلروفیل در شرایط تنش شوری شود. افزایش مقدار کلروفیل با مصرف کلسیم همچنین با نتایج اشرف و همکاران (۲۰۱۲) و بایبوردی و همکاران (۲۰۰۹) مطابقت دارد.

۴-۲-۶-۳- نسبت کلروفیل a/b

اثر تنش شوری در سطح احتمال ۱ درصد و سدیم نیتروپروساید و کلسیم کربنات در سطح احتمال ۵ درصد بر این صفت اندازه‌گیری شده معنی‌دار بود (جدول پیوست ۶). تنش شوری سبب افزایش نسبت کلروفیل a/b شد، به طوری‌که مقدار این نسبت از ۱/۹۷ در شرایط غیرتنش به ۲/۲۳ در شرایط تنش شوری رسید (جدول ۴-۱۰). گزارش شده است که نسبت کلروفیل a به کلروفیل b در شرایط تنش افزایش می‌یابد. می‌توان این‌گونه استنباط کرد که بالابودن این نسبت به مفهوم تقویت مرکز واکنش

فتوسیستم‌ها و پایین‌بودن آن نشان دهنده تقویت کمپلکس برداشت نور یا شاید تضعیف مراکز واکنش در سیستم فتوسنتزی گیاه است (عرب و همکاران، ۱۳۹۴).

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که نسبت کلروفیل a/b در تیمار پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید (۲/۱۶) بیشتر بود هرچند که به لحاظ آماری بین این تیمار و تیمار کاربرد توأم محلول‌پاشی و پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید (۲/۱۱) تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۴-۱۰). البته تیمار محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید (۲/۱۱) در مقایسه با تیمار محلول‌پاشی با سدیم نیتروپروساید (۲/۰۶) و تیمار شاهد (۲/۰۶) تأثیر معنی‌داری بر میزان نسبت کلروفیل a/b نداشت (جدول ۴-۱۰). محققان گزارش کردند که تنش شوری موجب کاهش رنگیزه‌ها به واسطه افزایش تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن است که این رادیکال‌های آزاد سبب پراکسیداسیون و در نتیجه تجزیه رنگیزه‌ها می شود (عرب و همکاران، ۱۳۹۴). در تحقیق حاضر کاربرد سدیم نیتروپروساید به‌صورت محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر تأثیر مثبتی بر این صفت داشته است. در این مورد به نظر می‌رسد که اثر کاربرد توأم نیتروپروساید به صورت محلول‌پاشی و پیش‌تیمار بذر به واکنش قوی‌تر سدیم نیتروپروساید با گونه‌های اکسیژن فعال بر می‌گردد، زیرا رادیکال‌های آزاد اکسیژن اصلی‌ترین عاملی هستند که در شرایط تنش موجب خسارت و شکستن رنگیزه‌های فتوسنتزی و پروتئین‌های ساختاری دستگاه فتوسنتزی می‌شوند، لذا استفاده توأم از سدیم نیتروپروساید توانسته است از کاهش میزان کلروفیل در اثر فعالیت رادیکال‌های آزاد اکسیژن جلوگیری کند (عرب و همکاران، ۱۳۹۴).

همان‌گونه که عنوان شد استفاده از تیمارهای مختلف محلول‌پاشی با کربنات کلسیم نیز تأثیر معنی داری بر نسبت کلروفیل a/b داشت (جدول پیوست ۶). دو سطح محلول‌پاشی با کربنات‌کلسیم (۲/۰۸) و نانوکربنات‌کلسیم (۲/۰۶) تفاوت معنی‌داری از لحاظ تأثیر بر نسبت کلروفیل a/b نداشتند، درحالی‌که تفاوت هردوی این تیمارها با تیمار شاهد (۲/۱۶) معنی‌دار بود (جدول ۴-۱۰). میزان کل کلروفیل و

نسبت کلروفیل a به کلروفیل b از جمله خصوصیاتی هستند که تحت تأثیر میزان کلسیم می‌باشند. افزایش میزان کلسیم در طی دوره رشد گیاه موجب افزایش محتوای کلروفیل و افزایش نسبت کلروفیل a به کلروفیل b می‌شود. هم‌چنین افزایش میزان کلسیم موجب حفاظت از کلروفیل a و جلوگیری از کاهش نسبت کلروفیل a به کلروفیل b شده و مانع رنگ‌زدایی از کلروفیل a در فتوسیستم I می‌شود (شمس و همکاران، ۱۳۸۸). نقش کلسیم را در افزایش میزان کلروفیل می‌توان به تأثیر آن در تجمع مولکول‌های آپوپروتئین کلروفیل در کمپلکس کلروفیل آنتن دانست. توده کلروفیل‌ها در فتوسیستم به عنوان کلروفیل آنتن انجام وظیفه می‌کنند. اتصال کلروفیل با پروتئین‌های خاص تعداد زیادی کمپلکس کلروفیل پروتئین پدید می‌آورد، انرژی فوتون‌های جذب شده از طریق کمپلکس آنتن انتقال می‌یابد و از یک مولکول کلروفیل به دیگری می‌رسد تا سرانجام به مرکز واکنش برسد (شمس و همکاران، ۱۳۸۸).

۴-۲-۶-۴- کلروفیل کل

میزان کلروفیل کل نیز همانند سایر صفات به شکل معنی‌داری ($p < ۰/۰۱$) تحت تأثیر تنش شوری، کاربرد سدیم نیتروپروساید و کربنات کلسیم قرارگرفت (جدول پیوست ۶). مقدار کلروفیل کل در گیاه کنجد تحت تأثیر شوری از ۲/۵۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ در شرایط غیرتنش به ۰/۸۸ میلی‌گرم بر گرم در شرایط تنش شوری رسید و یک کاهش ۶۵ درصدی را نشان داد (جدول ۴-۱۰). به عبارتی تنش شوری سبب شد که مقدار کلروفیل کل به یک سوم نسبت آن در شرایط غیرتنش برسد که این موضوع می‌تواند کاهش شدید عملکرد را در پی داشته باشد. علی‌رغم این که توانایی گیاهان در میزان تحمل به شوری متفاوت است، اما در نهایت شوری از طریق افت ظرفیت فتوسنتزی در اثر کاهش محتوای کلروفیل گیاه سبب کاهش رشد گیاهان می‌شود (پسارکلی، ۲۰۱۶). مهم‌ترین علت این موضوع، به ویژه در شرایط تنش شدید، کاهش فعالیت و تولید آنزیم‌های مؤثر در سنتز کلروفیل (ALA-دهیدروژناز) می‌باشد (ویرا سانتوس، ۲۰۰۴). قرارگرفتن گیاه در شرایط شور سبب کاهش فعالیت فتوسنتزی، میزان رشد، سطح برگ

و محتوای کلروفیل و افزایش فلورسانس کلروفیل می‌شود. در برخی گزارش‌ها تخریب کلروفیل توسط یون‌های سدیم و در نتیجه کاهش غلظت آن در برگ در سطوح متوسط شوری نیز گزارش شده است (پندی و سکسونا، ۱۹۸۷). به علاوه کاهش رشد در شرایط تنش شوری به سرعت پایین فتوسنتز که تحت غلظت بالای نمک اتفاق می‌افتد، نسبت داده می‌شود که با انتقال کم آهن و یا با غیرقابل حل‌کردن آهن در محیط همراه است. تنش شوری از طریق افزایش تخریب کلروپلاست سبب کاهش مقدار کلروفیل می‌شود (بخرد و همکاران، ۱۳۹۴). یانگ و همکاران (۲۰۱۱) نشان دادند که افزایش غلظت نمک سبب کاهش در میزان کلروفیل b و a در برگ‌های گونه‌ای از یونجه (*Medicago ruthenica*) گردید. تنش شوری احتمالاً سبب رسوب یون منیزیم می‌شود و بدین طریق از سنتز کلروفیل جلوگیری می‌کند. همچنین تنش شوری ممکن است فعالیت آنزیم کلروفیلاز را افزایش دهد و منجر به تجزیه کلروفیل گردد (بخرد و همکاران، ۱۳۹۴).

تیمار با سدیم نیتروپروساید سبب افزایش معنی‌دار محتوی کلروفیل کل گردید. کم‌ترین محتوی کلروفیل کل با مقدار ۱/۶۳ میلی‌گرم بر گرم مربوط به تیمار شاهد و بیش‌ترین مقدار کلروفیل کل مربوط به تیمار محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید (۱/۹۱ میلی‌گرم بر گرم) بود، که یک افزایش ۱۷ درصدی را نشان می‌دهد (جدول ۴-۱۰). بین تیمارهای محلول‌پاشی با سدیم نیتروپروساید (۱/۷۶ میلی‌گرم بر گرم) و پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید (۱/۷۶ میلی‌گرم بر گرم) نیز تفاوت معنی‌داری دیده نشد (جدول ۴-۱۰). رادیکال‌های آزاد اکسیژن در شرایط تنش شوری سبب شکستن رنگیزه‌ها و پروتئین‌های دستگاه فتوسنتزی می‌شوند. احتمالاً نیتریک اکسید با اثرات رباینده‌گی گونه‌های واکنش‌کننده اکسیژن (ROS) تولید شده در تنش موجب بهبود وضعیت کلروفیل سلول‌های گیاهی می‌شود و با افزایش فتوسنتز مقدار ماده خشک گیاه نیز افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، غلظت‌های بالای سدیم نیتروپروساید با تولید گونه‌های فعال نیتروژن اثرات بازدارندگی ROS را شدیدتر کرده و احتمالاً به

دستگاه فتوسنتزی گیاه آسیب رسانده و منجر به کاهش رشد گیاه می‌شود (نیک‌روش و همکاران، ۱۳۹۵). در این راستا، تو و زو (۲۰۰۳) و بویارشینف و اسفوا (۲۰۱۱) در گندم به افزایش میزان کلروفیل تحت تنش‌های محیطی با کاربرد سدیم نیتروپروساید اشاره کردند. ترکیب سدیم نیتروپروساید با جلوگیری از تخریب کلروفیل و پروتئین‌های محلول به‌خصوص روبیسکو پیری را در برگ‌ها به تأخیر می‌اندازد (محمدی و همکاران، ۱۳۹۴). در برخی بررسی‌ها گزارش شده است که در حضور نیتریک اکسید دسترسی گیاه به آهن بیش‌تراست و این نیز می‌تواند یکی از نقش‌های نیتریک اکسید در حفظ کلروفیل گیاه باشد (حسینی و رضایی‌نژاد، ۱۳۹۴).

بررسی داده‌ها نشان داد که تیمارهای مختلف محلول‌پاشی با کربنات‌کلسیم نیز تأثیر مثبت و معنی‌داری بر محتوی کلروفیل کل داشتند. بیش‌ترین محتوی کلروفیل کل در تیمار محلول‌پاشی با نانوکربنات‌کلسیم با میزان ۱/۸۷ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ بود که نسبت به شاهد ۱۳ درصد بیشتر بود و در گروه برتر آماری قرار گرفت (جدول ۴-۱۰). عطارزاده و همکاران (۱۳۹۵) بیان نمودند که با توجه به نقش مثبت کلسیم در تولید و حفاظت از کلروفیل و پروتئین، محلول‌پاشی آن می‌تواند راهکار مناسبی در جهت کاهش خسارت گیاهان در شرایط تنش شوری باشد. درداس (۲۰۰۹) نشان داد که با افزایش غلظت کلسیم، میزان کلروفیل در گیاه مرزنجوش افزایش پیدا کرد.

۴-۲-۷- پرولین

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده ها مشخص نمود که اثر تنش شوری، سدیم نیتروپروساید و کربنات کلسیم در سطح احتمال ۱ درصد و برهم‌کنش بین شوری و سدیم نیتروپروساید در سطح احتمال ۵ درصد بر این صفت معنی‌دار بود (جدول پیوست ۶).

در شکل ۴-۱۸ مشاهده می‌شود که آبیاری با آب شور به‌طور معنی‌داری میزان پرولین را افزایش داد. کاربرد برخی از سطوح تیمار سدیم نیتروپروساید نیز سبب افزایش میزان پرولین در هر دو شرایط آبیاری

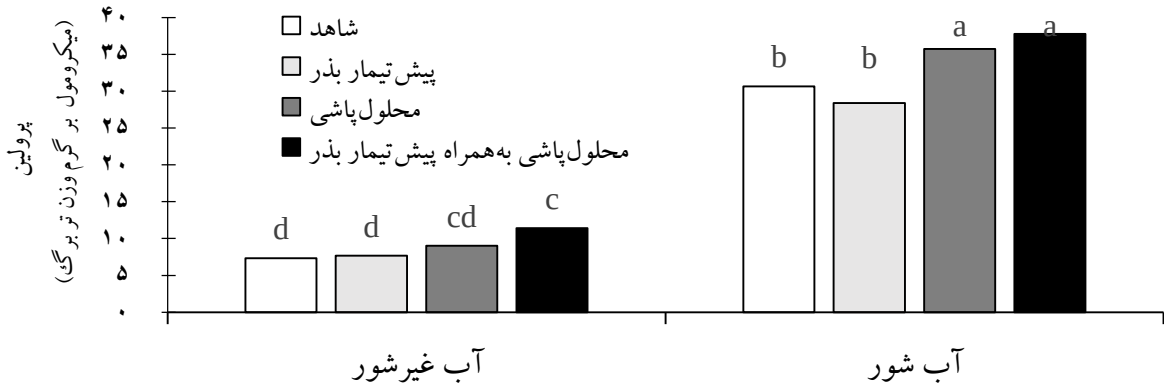
با آب شور و غیرشور شد. به نحوی که در شرایط تنش شوری میزان پرولین در تیمار محلول‌پاشی به همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید نسبت به شاهد ۲۴/۵ درصد افزایش نشان داد که با تیمار محلول‌پاشی اختلاف معنی داری نداشت و در گروه برتر آماری قرار گرفتند. تیمار پیش‌تیمار بذر تأثیر معنی‌داری بر میزان پرولین در شرایط تنش نداشت. در شرایط آبیاری با آب معمولی هم تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای شاهد و پیش‌تیمار بذر و محلول‌پاشی وجود نداشت و همگی در یک گروه آماری قرار گرفتند. تنها تیمار محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید با شاهد تفاوت معنی‌داری داشت (شکل ۴-۱۸). تجمع اسمولیت‌هایی نظیر پرولین و کربوهیدرات‌های محلول و افزایش فعالیت‌های آنزیمی (مانند SOD، CAT و APX) یکی از راه‌کارهای افزایش تحمل شوری در گیاهان می‌باشد. تجمع اسیدآمینه پرولین از ویژگی‌های معمول در بسیاری از گیاهان در شرایط تنش است، بنابراین می‌توان از آن به‌عنوان یک نشانگر بیوشیمیایی در گزینش واریته‌های مقاوم در شرایط تنش استفاده نمود (اشرف و هریس، ۲۰۰۴). افزایش فعالیت این آنزیم‌ها، احتمالاً به دلیل نقش آنتی‌اکسیدانی آن‌ها در برابر گونه‌های فعال اکسیژن است. اسیدآمینه پرولین در طیف وسیعی از گیاهان در پاسخ به تنش‌های محیطی تجمع می‌یابد (لهمان و همکاران، ۲۰۱۰، کیشورو ، ۲۰۰۵ و وربروگن و همکاران، ۲۰۰۵). مطالعات اشرف و همکاران (۲۰۱۲) روی گیاه گندم نشان داد که با افزایش شوری میزان پرولین برگ در این گیاه افزایش می‌یابد؛ همچنین برگ‌هایی که در مرحله رویشی مورد بررسی قرارگرفته بودند نسبت به مراحل زایشی پرولین بیشتری تولید کرده بودند. هیر و کرس (۱۹۹۷) بیان نمودند که وقتی سدیم نیتروپروساید به-عنوان دهنده نیتریک اکسید مصرف شود، سبب افزایش بیش از حد پرولین می‌شود،که با نتایج حاضر هم‌خوانی دارد. رضوان و همکاران (۲۰۱۸) بیان نمودند که نقش مثبت نیتریک اکسید در برابر سمیت نیکل از طریق اثر محافظتی آن بر رنگدانه‌های فتوسنتزی، پروتئین‌های محلول و پرولین منعکس می‌شود. دانگ و همکاران (۲۰۱۷) گزارش دادند که استفاده از سدیم نیتروپروساید انتقال کادمیم از ریشه به برگ

را کاهش می‌دهد، هم‌چنین سبب افزایش محتوای کلروفیل و پرولین و کاهش غلظت ROS و MDA می‌شود.

کاربرد سدیم نیتروپروساید سبب افزایش پرولین تحت تنش شوری گردید که این امر می‌تواند بدلیل افزایش سنتز پرولین باشد. القای فعالیت آنزیم پیرولین ۵-کربوکسیلاز به‌عنوان آنزیم اصلی در مسیر بیوسنتز پرولین، توسط نیتریک اکسید در گیاهچه در حال رشد برنج گزارش شده است (حمیدی و همکاران، ۱۳۹۵). مطالعات دیگران نیز افزایش فعالیت این آنزیم توسط نیتریک اکسید تحت تنش خشکی را به اثبات رسانده است (نیک‌روش و همکاران، ۱۳۹۵).

تیمارهای مختلف محلول‌پاشی با کربنات‌کلسیم تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد بر میزان پرولین داشتند (جدول پیوست ۶). مقدار پرولین در تیمار محلول‌پاشی با نانوکربنات‌کلسیم معادل ۲۲/۹۶ میکرومول بر گرم وزن تر برگ بود، که نسبت به شاهد ۲۵ درصد بیشتر بود. بین این تیمار و تیمار محلول‌پاشی با فرم معمول کربنات‌کلسیم (۲۱/۷۳ میکرومول بر گرم وزن تر برگ) تفاوت معنی‌داری دیده نشد (جدول ۴-۱۰). اشرف و نیلی (۲۰۰۴) تجمع اسمولیت‌هایی نظیر پرولین و کربوهیدرات‌های محلول را یکی از راه‌کارهای افزایش تحمل شوری در گیاهان خانواده براسیکا عنوان نمودند. والنتوویک و همکاران (۲۰۰۶) با بررسی واکنش دو رقم ذرت به تنش خشکی بیان نمودند که رقم متحمل به تنش خشکی با سنتز کربوهیدرات‌های محلول و پرولین موجب افزایش پتانسیل اسمزی گیاه شد و این موضوع سبب جذب آب بیش‌تر در شرایط تنش توسط رقم متحمل در مقایسه با رقم حساس شد؛ بنابراین می‌توان گفت که استفاده از تیمارهای محلول‌پاشی با کربنات‌کلسیم می‌تواند با افزایش مقدار پرولین موجود در گیاه نقش مهمی را در موفقیت گیاه در مقابله با تنش شوری ایفا کند. در بسیاری از گیاهان تنش شوری منجر به افزایش پرولین در گیاه می شود. تغییر در میزان پرولین یکی از غالب ترین پدیده‌های گزارش شده می‌باشد که طی تنش شوری در گیاهان القاء می‌شود و پذیرفته شده است که در سازوکارهای بردباری به

تنش دخیل است، گرچه نقش دقیق آن هنوز یک موضوع بحث برانگیز است (لوتوس و همکاران، ۱۹۹۹). تجمع زیاد پرولین گیاه را قادر می‌سازد تعادل اسمزی بافت‌های خود را تحت شرایط تنش حفظ کند (عطارزاده و همکاران، ۱۳۹۴). وقتی گیاه در شرایط تنش رشد می‌کند، پرولین به‌عنوان ذخیره‌ای برای انرژی و نیتروژن برای استفاده در خلال تنش به کار می‌رود (سوداکر و همکاران، ۱۹۹۳). عطارزاده و همکاران (۱۳۹۱) بیان کردند که محتوای پرولین گیاه گلرنگ در شرایط تنش شوری با محلول‌پاشی کلسیم افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۱۸- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و کاربرد سدیم نیتروپروساید بر میزان پرولین در برگ گیاه کنجد درآزمایش گلدانی

۴-۲-۸- صفات کیفی

۴-۲-۸-۱- پروتئین دانه

میزان پروتئین کنجد به شکل معنی‌داری تحت تأثیر شرایط تنش شوری و کاربرد سدیم نیتروپروساید قرار گرفت (جدول پیوست ۶). میزان پروتئین در شرایط غیرتنش ۲۳/۴۰ درصد و در شرایط تنش شوری ۲۴/۱۶ درصد بود، لذا تنش شوری سبب افزایش ۰/۸ درصدی پروتئین دانه شد (جدول ۴-۱۰). در همین راستا ژنگ و همکاران (۲۰۰۹) عنوان کردند که با اعمال سطوح مختلف تنش شوری میزان پروتئین دانه گندم افزایش یافت.

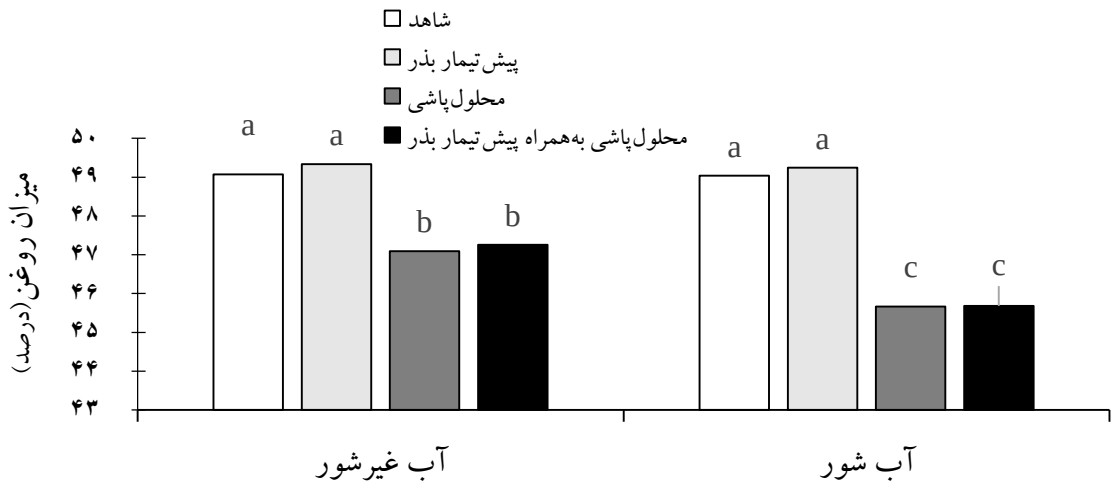
پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید تأثیری بر پروتئین دانه گیاهان رشد یافته از این بذور نداشت ولی محلول‌پاشی با این ماده و نیز توأم شدن محلول‌پاشی با پیش‌تیمار به یک اندازه به‌طور معنی‌داری این صفت را بهبود بخشید. به‌طوری که مقدار پروتئین دانه در این تیمارها نسبت به شاهد به ترتیب ۲/۴ و ۲/۷ درصد بیشتر بود (جدول ۴-۱۰). در آزمایشی که توسط نیل و همکاران (۲۰۰۲) انجام شد، گزارش گردید که محلول‌پاشی سدیم نیتروپروساید موجب افزایش میزان پروتئین در ذرت گردید و از تخریب ساختار پروتئین‌ها جلوگیری کرد. کاهش پتانسیل آب در برگ‌ها موجب کاهش قابل توجهی در پلی-ریبوزوم‌ها و مونوریبوزوم‌ها می‌شود که این مسئله بازگو کننده کاهش سنتز پروتئین‌ها می‌باشد. همچنین رادیکالهای آزاد اکسیژن میل ترکیبی بالایی با پروتئین‌ها دارند و سبب اکسید شدن آنها می‌شوند.

۴-۲-۸-۲- روغن دانه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها وجود تفاوت‌های معنی‌دار بین اثرات اصلی شوری و سدیم نیتروپروساید و متقابل تنش شوری و سدیم نیتروپروساید بر میزان روغن کنجد را روشن ساخت (جدول پیوست ۶).

روند مشابهی در هر دو شرایط غیرتنش و تنش شوری برای میزان روغن در تیمارهای مختلف کاربرد سدیم نیتروپروساید دیده شد (شکل ۴-۱۹). در هر دو شرایط غیرتنش و تنش شوری بذور حاصل از تیمارهای شاهد و پیش تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید بیش‌ترین میزان روغن را داشتند. محلول‌پاشی با سدیم نیتروپروساید و محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید سبب کاهش مقدار روغن شد که این کاهش در شرایط تنش شوری بیش‌تر بود (شکل ۴-۱۹). دیوید و همکاران (۲۰۱۵) بیان نمودند که افزایش نیتریک اکسید در اطراف بخش‌های تولید روغن (OB) در لپه‌های بذر آفتابگردان تحت تنش شوری، نشان‌دهنده‌ی انتقال سریع سیگنال‌های استرس نیتروزاتیو از ریشه به لپه‌ها می باشد؛ بنابراین، تجمع سریع نیتریک اکسید در ریشه‌ی گیاهچه و لپه‌های بذر آفتابگردان تحت تنش شوری و تأثیر آن بر پروتئین‌های تقویت کننده OB به‌عنوان مکانیسمی برای فراهم کردن طول عمر OB برای

بقای گیاهچه تحت تنش شوری است. احتمالاً دلیل افزایش میزان روغن در تیمار پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید نیز همین امر باشد (شکل ۴-۱۹).



شکل ۴-۱۹- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و کاربرد سدیم نیتروپروساید بر میزان روغن دانه گیاه کنجد در آزمایش گلدانی

۴-۳- آزمایش مزرعه‌ای

۴-۳-۱- صفات زراعی و مورفولوژیک

۴-۳-۱-۱- وزن خشک برگ

در جدول پیوست ۷ دیده می‌شود که اثر شوری، سدیم نیتروپروساید و کلسیم بر این صفت اندازه-گیری شده در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار بود (جدول ۷ پیوست). مقدار وزن خشک برگ به میزان ۲۶/۸۵ درصد در شرایط تنش شوری کاهش یافت (جدول ۴-۱۱). بهترین فاکتور تعیین تحمل واقعی گیاهان به تنش اندازه‌گیری وزن زیست‌توده آن‌ها است (مونس و تستر، ۲۰۰۸). در ابتدای اعمال تنش شوری، خشکی فیزیولوژیک ناشی از کاهش پتانسیل آب در محیط ریشه عامل اصلی کاهش رشد است؛ ولی به‌تدریج، تجمع املاح در اندام‌های گیاه افزایش‌یافته و زمانی که غلظت املاح در این اندام‌ها به حد سمیت برسد، خسارت ناشی از سمیت یون‌ها نیز موجب کاهش رشد می‌گردد. سمیت یون سدیم موجب

تخریب کلروفیل و رنگ‌پریدگی و کلروزه شدن برگ‌ها می‌شود. این تغییرات به همراه کاهش سطح برگ، موجب کاهش پتانسیل فتوسنتزی گیاه در شرایط شور و درنتیجه سبب کاهش رشد گیاه خواهد شد (صادقی‌آذر و همکاران، ۱۳۹۲).

نتایج نشان داد که استفاده از تیمارهای مختلف سدیم نیتروپروساید افزایش وزن خشک برگ کنجد را در پی داشت؛ به‌گونه‌ای که بیش‌ترین مقدار وزن خشک برگ با میانگین ۱۱۷/۵۴ گرم بر مترمربع در تیمار محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید و کم‌ترین مقدار وزن خشک برگ هم با میانگین ۹۹/۲۵ گرم بر مترمربع در تیمار شاهد دیده شد. بین تیمار محلول‌پاشی با سدیم نیتروپروساید (۱۰۹/۵ گرم بر مترمربع) و تیمار پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید (۱۰۶/۲۵ گرم بر مترمربع) نیز تفاوت معنی‌داری دیده نشد (جدول۴-۱۱). افزایش وزن تر و خشک در گیاه آفتابگردان تحت شرایط تنش خشکی با کاربرد سدیم نیتروپروساید توسط اینز و همکاران (۲۰۱۵) گزارش شده است.

تیمارهای مختلف محلول‌پاشی با کربنات‌کلسیم تقریباً به یک اندازه تأثیر معنی‌داری بر میزان وزن خشک برگ داشتند. مقدار وزن خشک برگ در تیمار محلول‌پاشی با نانوکربنات‌کلسیم یک افزایش ۱۷ درصدی را نسبت به شاهد نشان داد. بین تیمار محلول‌پاشی با نانوکربنات‌کلسیم (۱۱۵/۴۳ گرم بر مترمربع) و تیمار محلول‌پاشی با کربنات‌کلسیم (۱۱۰/۷۵ گرم بر مترمربع) نیز تفاوت معنی‌داری دیده نشد (جدول۴-۱۱). اتصال کلسیم به CDPKها در ترکیب با کیناز و رفع مهار ایجادشده توسط ناحیه‌ی خود مهارکننده مؤثر است. CDPK در نمو دانه‌ی گرده، کنترل چرخه‌ی سلولی، انتقال پیام فیتوهورمون‌ها، بیان ژن‌های تنظیم‌کننده‌ی نور، زمین‌گرایی[1] گرایش تحت تأثیر تحریک لمسی، سازش به سرما، تحمل شوری، تحمل خشکی و پاسخ به پاتوژن‌ها دخالت دارند (توتجا، ۲۰۰۷).

1 gravitropism

جدول ۴-۱۱- مقایسه میانگین وزن خشک برگ و ریشه، سطح برگ، ارتفاع گیاه و قطر ساقه در گیاه کنجد تحت تأثیر تیمار شوری، سدیم نیتروپروساید و محلول‌پاشی کلسیم در آزمایش مزرعه‌ای

تیمار	سطح	وزن خشک برگ (گرم بر مترمربع)	شاخص سطح برگ	ارتفاع گیاه (سانتی‌متر)	قطر ساقه (میلی‌متر)
تنش شوری	آب غیرشور	۱۲۴/۷۵ a	۲/۸۶a	۹۰/۹a	۷/۸۶ a
	آب شور	۹۱/۲۵b	۱/۷۶ b	۷۰/۳ b	۶/۹۴ b
سدیم نیتروپروساید	شاهد	۹۹/۲۵ c	۲/۵۵ c	۷۲/۶۱ c	۶/۴۶ c
	پیش‌تیمار بذر[۱]	۱۰۶/۲۵ b	۲/۸۱ b	۷۷/۳۹ b	۷/۴۴ b
	محلول‌پاشی[۲]	۱۰۹/۵ b	۲/۹۶ ab	۸۴/۳۹ a	۷/۵۱ b
	پیش‌تیمار بذر و محلول‌پاشی	۱۱۷/۵۴ a	۳/۱۲ a	۸۷/۷۲ a	۸/۲۱ a
محلول‌پاشی کلسیم	شاهد	۹۸/۵۲ b	۲/۳۹c	۷۳/۰۸c	۶/۶۰c
	کربنات‌کلسیم	۱۱۰/۷۵ a	۲/۶۳ b	۸۰/۴۲ b	۷/۵۰ b
	نانو کربنات‌کلسیم	۱۱۵/۴۳ a	۲/۸۷a	۸۸/۲۱ a	۸/۱۱ a

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک بر اساس آزمون LSD دارای اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد نمی‌باشند.

۱. پیش‌تیمار بذر با غلظت ۱۵۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید

۲. محلول‌پاشی با غلظت ۵۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید

۴-۳-۱-۲- شاخص سطح برگ

اثر شوری، سدیم نیتروپروساید و کلسیم در سطح احتمال ۱ درصد بر میزان سطح برگ کنجد معنی‌دار بود (جدول پیوست ۷). نتایج نشان داد که در اثر اعمال تنش شوری از میزان سطح برگ به شکل معنی‌داری کاسته شد؛ به‌گونه‌ای که میزان سطح برگ کاهش ۲۵ درصدی را نسبت به شاهد نشان داد (جدول ۴-۱۱). کاهش سطح برگ ممکن است به‌دلیل کاهش تعداد برگ و یا کاهش مساحت برگ و یا اثر توأم شوری بر هر دو صفت باشد.کافی و همکاران (۱۳۹۰) ضمن بررسی تنش شوری بر هشت رقم گندم گزارش کردند که سطح برگ مؤثر تحت تنش شوری کاهش می‌یابد و این کاهش در ارتباط مستقیم با افزایش سطح شوری است.

کاربرد تیمارهای مختلف سدیم نیتروپروساید یک اثر افزایشی بر میزان سطح برگ گیاه کنجد داشتند. بیش‌ترین شاخص سطح برگ در تیمار محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید (۳/۱۲) و کم‌ترین مقدار آن در تیمار شاهد (۲/۵۵) دیده شد (جدول ۴-۱۱).

همچنین بررسی نتایج روشن ساخت که محلول‌پاشی کلسیم سبب افزایش سطح برگ نسبت به شاهد شد. در این بین استفاده از نانوذرات کربنات کلسیم با افزایش ۲۰/۰۸ درصدی نتیجه‌ی بهتری را نسبت به محلول‌پاشی کربنات کلسیم به فرم معمول در برداشت (جدول ۴-۱۱). محلول‌پاشی کلسیم و پتاسیم نقش قابل توجهی در افزایش سطح برگ در برنج تحت تنش شوری دارد (سلطانا و همکاران، ۲۰۰۱). ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۵) با بررسی اثر کلسیم بر رشد، عملکرد و اجزای عملکرد عدس تحت رژیم‌های مختلف آبیاری بیان نمودند که محلول‌پاشی کلسیم اثر معنی‌داری بر بیشینه شاخص سطح برگ، سرعت رشد محصول و تدوام شاخص سطح برگ و همچنین افزایش محتوی آب نسبی برگ داشت.

۴-۳-۱-۳- ارتفاع گیاه

ارتفاع گیاه به‌طور معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد تحت تأثیر تنش شوری، تیمارهای مختلف سدیم نیتروپروساید و کلسیم قرار گرفت (جدول پیوست ۷). با اعمال تنش شوری از ارتفاع گیاه به شکل معنی‌داری کاسته شد، ارتفاع گیاه در شرایط غیر تنش ۹۰/۹ سانتی‌متر بود که در اثر آبیاری با آب شور با ۲۰ درصد کاهش به ۷۰/۳ سانتی‌متر رسید (جدول ۴-۱۱). می‌توان گفت که کاهش ارتفاع بوته و انتقال کربوهیدرات‌های غیرساختمانی به دانه‌های درحال‌توسعه از عواملی هستند که می‌تواند بر تجمع ماده خشک و وزن زیست‌توده اثر نامطلوبی داشته باشند. همچنین افت سطح برگ سبب کاهش جذب نور و کاهش تولید ماده خشک جدید می‌شود و رشد گیاه را کاهش می‌دهد (محمودزاده، ۲۰۰۸). در مطالعه مونس و تستر (۲۰۰۸) روی مکانیسم‌های شوری بیان شد که تنش شوری در مرحله اول موجب کاهش محتوی آب سلول‌ها می‌گردد و طویل شدن آن را با مشکل روبرو می‌کند و حتی پس از ایجاد تعادل اسمزی و فشار اسمزی مجدد سلول‌ها،گسترش و طویل شدن آن‌ها به‌کندی صورت می‌گیرد.

دربین سطوح سدیم نیتروپروساید، ارتفاع گیاه در تیمار محلول‌پاشی به همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید (۸۷/۷۲ میلی‌متر) در بالاترین مقدار بود که اختلاف آن با تیمار محلول‌پاشی با سدیم نیتروپروساید (۸۴/۳۹ میلی‌متر) معنی‌دار نبود. کم‌ترین مقدار ارتفاع گیاه نیز در تیمار شاهد (۷۲/۶۱ میلی‌متر) دیده شد (جدول ۴-۱۱).

ارتفاع گیاه کنجد تحت تأثیر سطوح مختلف محلول‌پاشی کلسیم قرار گرفت به نحوی که بین تمامی سطوح اختلاف معنی‌دار مشاهده شد. کاربرد کربنات کلسیم و نانوذرات کربنات کلسیم ارتفاع گیاه کنجد را به ترتیب به میزان ۱۰ و ۲۰ درصد نسبت به شاهد افزایش داد (جدول ۴-۱۱). ارتفاع گیاه یکی از اجزای بسیار تأثیرگذار در میزان شاخص برداشت گیاه است که کاهش مقدار آن به دنبال تنش شوری سبب کاهش توان رقابت گیاه در جذب نور می‌شود (کافی و همکاران، ۱۳۹۰). نصیرپور و همکاران

(۱۳۹۴) گزارش دادند که محلول‌پاشی کلسیم ارتفاع بوته، قطر ساقه، طول و قطر میوه گوجه‌فرنگی را به‌طور معنی‌داری افزایش می‌دهد.

۴-۳-۱-۴- قطر ساقه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها مشخص کرد که از بین منابع تغییر اثرات اصلی تنش شوری، سدیم نیتروپروساید و محلول‌پاشی کلسیم بر قطر ساقه گیاه کنجد معنی‌دار بودند (جدول پیوست ۷). با اعمال تنش شوری از میزان قطر ساقه کاسته شد و قطر ساقه از ۷/۸۶ میلی‌متر در شرایط غیرتنش به ۶/۹۴ میلی‌متر در شرایط تنش شوری رسید (جدول ۴-۱۱).

کاربرد سدیم نیتروپروساید بر این صفت مؤثر بود به‌طوری که بیش‌ترین مقدار قطر ساقه با میانگین ۸/۲۱ میلی‌متر در تیمار محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید و کم‌ترین مقدار قطر ساقه با میانگین ۶/۴۶ در تیمار شاهد دیده شد. که یک افزایش ۲۷ درصدی را نسبت به شاهد نشان می‌دهد (جدول ۴-۱۱). هم‌چنین بین پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید (۷/۴۴ میلی‌متر) و محلول‌پاشی با این ماده (۷/۵۱ میلی‌متر) تفاوت معنی‌داری از نظر تأثیر بر قطر ساقه وجود نداشت (جدول ۴-۱۱).

قطر ساقه گیاه کنجد تحت تأثیر سطوح مختلف محلول‌پاشی کلسیم قرار گرفت به نحوی که بین تمامی سطوح اختلاف معنی‌دار مشاهده شد. قطر ساقه گیاهان محلول‌پاشی شده با کربنات کلسیم و نانوکربنات‌کلسیم به ترتیب ۱۳ و ۲۲/۸۷ درصد بیشتر از تیمار شاهد بود (جدول ۴-۱۱). عطارزاده و همکاران (۱۳۹۱) گزارش دادند که شوری سبب کاهش برخی از پارامترهای رشد در گلرنگ می‌شود و محلول‌پاشی کلسیم تا حدودی توانسته اثرات منفی شوری را کاهش دهد (عطارزاده و همکاران، ۱۳۹۱). صادقی لطف‌آبادی و همکاران (۱۳۸۹) بیان نمودند که استفاده از کلسیم موجب بهبود قابل توجه صفات رشدی سورگوم نسبت به عدم مصرف آن در شرایط شوری می‌شود.

۴-۳-۲- عملکرد و اجزای عملکرد

۴-۳-۲-۱- تعداد کپسول در بوته

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر تنش شوری، سدیم نیتروپروساید و کلسیم کربنات تأثیر معنی‌داری ($p < ۰/۰۱$) بر تعداد کپسول در بوته کنجد داشت (جدول پیوست ۸). تنش شوری سبب کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در این صفت عملکردی شد، به‌گونه‌ای که تعداد کپسول موجود در بوته از ۳۳/۰۴ کپسول در تیمار شاهد به ۱۹/۷۳ کپسول در بوته در تیمار تنش شوری کاهش یافت. که یک کاهش محسوس ۴۰ درصدی را نشان می‌دهد (جدول ۴-۱۲). تنش شوری از طریق کاهش شدید در تعداد کپسول به‌عنوان یکی از اجزای مهم عملکرد، سبب افت شدید عملکرد می‌شود (منصوری، ۱۳۸۸). تعداد کپسول در بوتـه از مهم‌ترین اجـزای عملکرد در کنجد می‌باشد. به نظر می‌رسد در شرایط تنش شوری، محدودیت جذب عناصر غذایی توسط ریشه، منجر به کاهش تولید مواد فتوسنتزی و کاهش تخصیص آن به اندام‌های زایشی می‌شود، بنابراین کمبود منبع طی دوره گل‌دهی سبب ریزش اندام‌های زایشی و گل‌های بارور خصوصاً غلاف‌های جوان می‌شود که نتیجه آن کاهش تعداد غلاف‌های بالغ است (میر محمدی میبدی و قره یاضی، ۱۳۸۱). تجلی و همکاران (۱۳۹۰) نیز عنوان کردند که افزایش سطح شوری کاهش تعداد غلاف در گیاه کلزا را در پی داشت به‌گونه‌ای که تعداد غلاف از ۵۶ عدد در گیاه شاهد به ۲۳ عدد در گیاه در حال تنش کاهش یافت.

مقایسه سطوح سدیم نیتروپروساید نشان داد که بیش‌ترین تعداد کپسول در بوته گیاه کنجد در تیمار محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید با میانگین ۲۸/۴۹ کپسول در بوته ثبت شد که حدود ۱۲ درصد نسبت به سایر سطوح این تیمار بهتر بود (جدول ۴-۱۲). بر اساس نتایج به‌دست آمده بین تیمارهای پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید (۲۵/۸۳ کپسول در بوته)، محلول‌پاشی با سدیم نیتروپروساید (۲۵/۸۵ کپسول در بوته) و تیمار شاهد (۲۵/۳۷ کپسول در بوته) تفاوت معنی‌داری وجود

نداشت (جدول ۴-۱۲). امیدی و سپهری (۱۳۹۲) در بررسی اثر سدیم نیتروپروساید بر عملکرد و اجزای عملکرد لوبیا گزارش کردند که استفاده از سدیم نیتروپروساید در شرایط تنش خشکی سبب ممانعت از کاهش تعداد غلاف در بوته در شرایط تنش شد. سدیم نیتروپروساید سبب حفظ تعداد شاخه‌های فرعی تولیدی و درنتیجه افزایش تعداد غلاف در بوته نسبت به وضعیت تنش می‌شود (امیدی و سپهری، ۱۳۹۲).

بررسی سطوح تیمار کلسیم نشان داد که در اثر محلول‌پاشی کربنات کلسیم به فرم معمول و نانو تعداد کپسول در بوته به‌طور معنی‌دار و به ترتیب معادل ۹ و ۱۴ درصد بهبود یافت (جدول ۴-۶). تعداد کپسول‌ها را می‌توان یکی از اجزای مهم تشکیل‌دهنده عملکرد به‌حساب آورد، زیرا دربرگیرنده تعداد دانه‌ها و نیز تولید کننده مواد پرورده مورد نیاز برای افزایش وزن دانه‌ها می‌باشند و در مراحل اولیه پر شدن دانه از طریق فتوسنتز، در رشد و تکامل دانه مشارکت می‌کنند و در نتیجه تعداد دانه کم‌تری سقط می‌گردد (احمدی و همکاران، ۲۰۱۲). لذا با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان گفت که استفاده از محلول‌پاشی کربنات‌کلسیم نقش مهمی در افزایش عملکرد ایفا می‌کند (جدول ۴-۱۲).

۴-۳-۲-۲- تعداد دانه در کپسول

تنش شوری، سدیم نیتروپروساید و کربنات کلسیم تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد بر تعداد دانه در کپسول گیاه کنجد داشت (جدول پیوست ۸). در شرایط تنش شوری کاهش ۳۲ درصدی تعداد دانه موجود در کپسول نسبت به شرایط آبیاری با آب معمولی مشاهده شد (جدول ۴-۱۲). شمس‌الدین و فرح بخش (۱۳۸۷) همبستگی مثبت و معنی‌داری را بین طول غلاف و تعداد دانه در غلاف گزارش دادند و بیان کردند که یکی از علل کاهش تعداد دانه در غلاف کلزا در اثر شوری کاهش طول غلاف‌ها است. لانگهام و همکاران (۲۰۰۶) بیان کردند که تعداد دانه در غلاف به‌طور متوسط به ۶۰ تخمک در زمان گل‌دهی می‌رسد ولی تعداد نهایی آن‌ها همواره از مقدار مذکور کم‌تر است؛ زیرا عواملی مانند شوری، افزایش فشار اسمزی و عوامل محیطی دیگر در کاهش تعداد دانه در غلاف مؤثر است.

بیش‌ترین تعداد دانه در کپسول کنجد با میانگین ۳۵/۴۹ دانه در کپسول در شرایطی به‌دست آمد که ابتدا بذور توسط سدیم نیتروپروساید پیش‌تیمار شدند و سپس گیاهان حاصل از همین بذور توسط سدیم نیتروپروساید محلول‌پاشی شدند. افزایش حاصل از این تیمار نسبت به شاهد ۱۶ درصد بود (جدول ۴-۱۲). این در حالی است که بین تیمارهای پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید (۳۱/۶۹ کپسول در بوته)، محلول‌پاشی با سدیم نیتروپروساید (۳۱/۸۷ کپسول در بوته) و تیمار شاهد (۳۰/۶۰ کپسول در بوته) تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۴-۱۲).

محلول‌پاشی با کربنات‌کلسیم از نظر تأثیر بر تعداد دانه در کپسول مفید بود. بیش‌ترین تعداد دانه در کپسول با میانگین ۳۴/۶۳ در تیمار محلول‌پاشی با نانوکربنات‌کلسیم مشاهده شد که یک افزایش ۲۱ درصدی را نسبت به شاهد نشان داد. لازم به ذکر است که کاربرد کربنات کلسیم به فرم معمول نیز تاثیر معنی داری بر این شاخص عملکردی نسبت به شاهد داشت و این تیمار نیز افزایش ۱۰/۵ درصدی را ثبت کرد (جدول ۴-۱۲).

جدول ۴-۱۲- مقایسه میانگین اجزای عملکرد، عملکرد دانه، وزن زیست‌توده و شاخص برداشت در گیاه کنجد تحت تأثیر تیمار شوری، سدیم نیتروپروساید و محلول‌پاشی کلسیم در آزمایش مزرعه‌ای

تیمار	سطح	تعداد کپسول در بوته	تعداد دانه در کپسول	وزن هزاردانه (گرم)	عملکرد دانه (گرم در مترمربع)	وزن زیست‌توده (گرم در مترمربع)	شاخص برداشت (درصد)
تنش شوری	آب آبیاری	۳۳/۰۴^{a}	۳۳/۵۷^{a}	۲/۹۵^{a}	۶۵/۳۳^{a}	۱۵۴/۱۱^{a}	۴۲/۳۶^{a}
	آب شور	۱۹/۷۳^{b}	۲۲/۵۹^{b}	۲/۵۷^{b}	۳۴/۱۰^{b}	۸۷/۲۲^{b}	۳۸/۸۹^{b}
سدیم نیتروپروساید	شاهد	۲۵/۳۷^{b}	۳۰/۶۰^{b}	۲/۵۹^{c}	۴۵/۲۴^{c}	۱۱۴/۴۴^{b}	۳۸/۷۸^{c}
	پیش‌تیمار بذر[1]	۲۵/۸۳^{b}	۳۱/۶۹^{b}	۲/۷۷^{b}	۴۹/۲۳^{b}	۱۱۹/۵۰^{b}	۴۰/۶۱^{b}
	محلول‌پاشی[2]	۲۵/۸۵^{b}	۳۱/۸۷^{b}	۲/۷۶^{b}	۴۸/۲۰^{b}	۱۱۷/۵۸^{b}	۴۰/۵۶^{b}
	پیش‌تیمار بذر و محلول‌پاشی	۲۸/۴۹^{a}	۳۵/۴۹^{a}	۲/۹۱^{a}	۵۶/۲۰^{a}	۱۳۱/۱۳^{a}	۴۲/۵۶^{a}
محلول‌پاشی کلسیم	شاهد	۲۴/۴۵^{c}	۲۸/۵۹^{c}	۲/۶۷^{b}	۴۴/۷۱^{c}	۱۱۲/۱۹^{b}	۳۹/۲۹^{b}
	کربنات‌کلسیم	۲۶/۶۸^{b}	۳۱/۵۲^{b}	۲/۸۰^{a}	۵۰/۷۵^{b}	۱۲۱/۹۲^{a}	۴۱/۱۳^{a}
	نانو کربنات‌کلسیم	۲۸/۰۲^{a}	۳۴/۶۳^{a}	۲/۸۱^{a}	۵۳/۶۹^{a}	۱۲۷/۸۸^{a}	۴۱/۴۶^{a}

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک بر اساس آزمون LSD دارای اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد نمی‌باشند.

۱. پیش‌تیمار بذر با غلظت ۱۵۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید

۲. محلول‌پاشی با غلظت ۵۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید

۴-۳-۲-۳- وزن هزار دانه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر تنش شوری، سدیم نیتروپروساید و کلسیم بر وزن هزار دانه در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۸ پیوست). با اعمال تنش شوری از میزان وزن هزار دانه کاسته شد، به‌گونه‌ای که این صفت از ۲/۹۵ گرم به ۲/۵۷ گرم رسیده و یک کاهش ۱۳ درصدی را نشان داد (جدول ۴-۱۲). شهیدی و همکاران (۱۳۸۹) بیان داشتند که تأثیر تنش شوری بر وزن هزار دانه، به زمان اعمال تنش و غلظت نمک در محیط رشد بستگی دارد، تیمارهایی که در فاز رویشی تحت تنش قرارگرفته بودند در مقایسه با تیمارهایی که در فاز زایشی و در کل فصل رشد تحت تنش قرارگرفته بودند کم‌ترین خسارت را از نظر وزن هزار دانه داشتند. کاهش وزن هزار دانه در اثر شوری در کلزا توسط زمانی و همکاران (۱۳۸۸) و در جو توسط تدین و امام (۱۳۸۶) گزارش گردیده است.

کاربرد سدیم نیتروپروساید نیز تأثیر مثبت و معنی‌داری بر سومین جزء عملکرد داشت. بیش‌ترین مقدار وزن هزار دانه با مقدار ۲/۹۱ گرم در تیمار محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید و کم‌ترین مقدار وزن هزار دانه با میانگین ۲/۵۹ گرم در تیمار شاهد دیده شد (جدول ۴-۱۲). بر خلاف دو جزء دیگر عملکرد تیمارهای محلول‌پاشی با سدیم نیتروپروساید و پیش‌تیمار بذر با این ماده نیز به‌طور معنی‌داری وزن هزار دانه را بهبود بخشیدند (جدول ۴-۱۲). گزارش شده است که سدیم نیتروپروساید با جلوگیری از تخریب کلروفیل، پیری برگ‌ها را به تأخیر می‌اندازد، از این‌رو سدیم نیتروپروساید ممکن است با طولانی کردن دورهٔ مؤثر پرشدن دانه سبب افزایش وزن هزار دانه شود (تو و زو، ۲۰۰۳)

بررسی سطوح تیمار کلسیم نشان داد که در اثر محلول‌پاشی کربنات کلسیم به فرم معمول و نانو تعداد کپسول در بوته به‌طور معنی‌دار و به ترتیب معادل ۴/۸۱ و ۵/۲۴ درصد بهبود یافت. ولی تفاوت بین دو تیمار متفاوت محلول‌پاشی با کربنات کلسیم با یکدیگر معنی‌دار نبود (جدول ۴-۱۲). در این راستا گزارش

شده است که کاربرد کلسیم آسیب‌های ناشی از تنش را تا حدودی کاهش می‌دهد و موجب افزایش عملکرد دانه، وزن هزاردانه و میزان روغن در کلزا می‌شود (منشی و همکاران، ۱۳۹۶).

۴-۳-۲-۴- عملکرد دانه

عملکرد دانه در آزمایش مزرعه‌ای از همه اثرات اصلی شوری، سدیم نیتروپروساید و کلسیم در سطح احتمال ۱ درصد تأثیر پذیرفت (جدول پیوست ۸). تنش شوری سبب کاهش معنی‌داری در عملکرد دانه کنجد شد، به‌گونه‌ای که میزان عملکرد از ۶۵/۳۳ گرم در مترمربع در شرایط غیرتنش با یک کاهش عمده ۴۸ درصدی به ۳۴/۱۰ گرم در مترمربع در شرایط تنش شوری رسید (جدول ۴-۱۲). کاهش در مقدار عملکرد بذر را می‌توان به‌دلیل کاهش در سایر شاخص‌ها و اجزای عملکرد از قبیل کاهش در تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در بوته و تعداد بذر دانست (اشرف، ۲۰۰۱). وقتی گیاه در معرض تنش شوری قرار می‌گیرد در اثر کاهش پتانسیل اسمزی دچار نوعی خشکی فیزیولوژیک می‌شود و ریشه‌ها تحت این شرایط مقدار اسید آبسزیک را افزایش می‌دهند که این هورمون از طریق جریان تعرق به اندام‌های هوایی منتقل می‌شود. این هورمون در اندام‌های هوایی سبب کاهش هدایت روزنه‌ها و به تبعیت از آن کاهش تعرق می‌شود (فهاد و همکاران، ۲۰۱۵) و درنهایت به‌دلیل کاهش انتشار CO_2، فتوسنتز، رشد و عملکرد دچار اختلال می‌شود (اشرف، ۲۰۰۱).

برآیند تأثیر سدیم نیتروپروساید بر اجزای عملکرد در نهایت در عملکرد دانه گیاه کنجد نمود پیدا کرد. از این رو بیش‌ترین میزان عملکرد دانه از تیمار محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید (۵۶/۲۰ گرم بر مترمربع) حاصل شد که خود یک افزایش ۲۴ درصدی را نسبت به شاهد نشان می دهد (جدول ۴-۱۲). تیمارهای پیش‌تیمار بذر (۴۹/۲۳ گرم در مترمربع) و محلول‌پاشی با سدیم نیتروپروساید (۴۸/۲۰ گرم در مترمربع) نیز توانستند سبب بهبود این شاخص عملکردی گردند و به‌طور مشترک در رتبه دوم از لحاظ آماری قرار گیرند (جدول ۴-۱۲). تیان و لی (۲۰۰۷) بیان کردند که بهبود در رشد و

عملکرد در اثر کاربرد سدیم نیتروپروساید می‌تواند ناشی از حفظ محتوای رطوبت نسبی برگ و کاهش گونه‌های فعال اکسیژن به‌ویژه پراکسید هیدروژن و بهبود سیستم آنزیمی گیاه (شئوکاند و همکاران، ۲۰۱۰) باشد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، کاربرد سدیم نیتروپروساید در وضعیت تنش با بهبود اثر تنش شوری و تأثیر مثبت بر اجزای عملکرد، در نهایت سبب حفظ عملکرد دانه گردید.

محلول‌پاشی کربنات کلسیم به فرم نانو موجب افزایش ۲۰ درصدی عملکرد دانه نسبت به شاهد شد و این مهم سبب شد که این تیمار در گروه برتر آماری قرار گیرد. کاربرد کربنات کلسیم به فرم معمول نیز توانست به‌طور معنی داری سبب افزایش عملکرد دانه نسبت به شاهد گردد و در مرتبه بعدی قرار گرفت (جدول ۴-۱۲). رِید و اسمیت (۲۰۰۰) نشان دادند اگر چه رشد گیاهچه‌های گندم توسط غلظت‌های بالای کلرید سدیم به‌شدت ممانعت می‌شود، ولی افزودن کلسیم به محیط رشد موجب بهبود رشد می‌گردد و در شرایط کمبود کلسیم، اثرات منفی سدیم بالا است. مطالعات بانولس و همکاران (۱۹۹۱)، هاوکینز و لوئیس (۱۹۹۳) و دینپورت و همکاران (۱۹۹۷) نشان داد که کلسیم می‌تواند نقش اصلاحی داشته باشد و به‌عنوان تعدیل‌کننده اثرات منفی شوری عمل نماید. نقش کلسیم به‌عنوان فعال‌کننده سیستم انتقال پیام‌های سلولی و هم‌چنین ب عنوان یک تنظیم‌کننده اسمزی گیاه نیز مشاهده شده است. از این رو، مصرف صحیح کودهای کلسیم در اراضی شور موجب کاهش عوارض فیزیولوژیکی ناشی از شوری و در نتیجه افزایش عملکرد می‌شوند (صادقی لطف‌آبادی و همکاران، ۱۳۸۹).

۴-۳-۲-۵- وزن زیست توده

اثر تنش شوری، سدیم نیتروپروساید و کربنات کلسیم بر وزن زیست توده معنی‌دار ($p < ۰/۰۱$) بود (جدول پیوست ۸). نتایج نشان داد که تنش شوری موجب کاهش میزان زیست‌توده تولیدی گیاه کنجد شد؛ به‌گونه‌ای که میزان زیست‌توده تولیدی در شرایط غیرتنش با میانگین ۱۵۴/۱ گرم در متر مربع با اعمال تنش شوری به ۸۷/۲۱ گرم در متر مربع کاهش یافت (جدول ۴-۱۲). کاهش زیست‌توده ارتباط

شدیدی با کاهش سطح برگ و ارتفاع گیاه دارد (هولتکلن و همکاران، ۲۰۰۶). اسیش‌کومار و باندهوداس (۲۰۰۵) بیان نمودند که با افزایش سطح شوری کاهش معنی‌داری در میزان زیست‌توده برگ، ریشه و ساقه و افزایش نسبت ریشه به ساقه در گیاه توتون مشاهده می‌شود. تحقیقات نشان داده است که کاهش برخی از ویژگی‌های رشد و از جمله تعداد برگ با کارایی فتوسنتزی آن همراه است که در تنش شوری با توجه به نقش ویژه برگ به‌عنوان واحد فتوسنتزی در بوته، تعداد برگ کمتر در ارقام حساس، می‌تواند مؤید توان فتوسنتزی کمتر این ارقام در شرایط تنش باشد (غلام و همکاران، ۲۰۰۲). تیموری و همکاران (۱۳۹۲) در بررسی اثر تنش شوری در چهار ژنوتیپ کنجد کاهش مقدار وزن خشک تک بوته در هر ۴ ژنوتیپ را گزارش کردند.

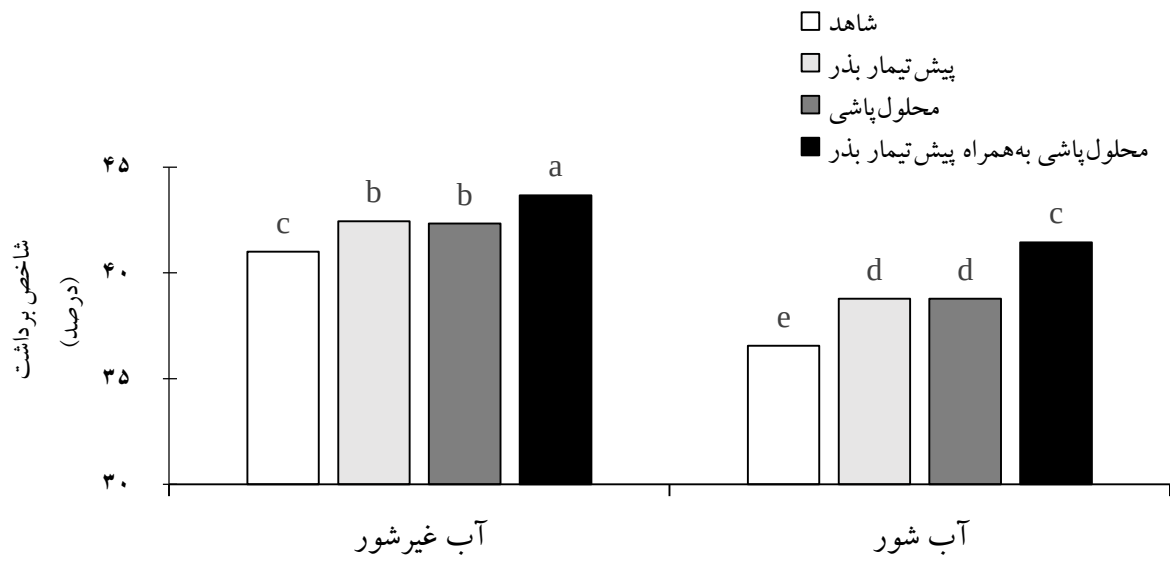
همچنین کاربرد سدیم نیتروپروساید نیز تأثیر معنی‌داری در جهت بهبود میزان زیست‌توده کنجد داشت (جدول ۸ پیوست). کاربرد توأم پیش‌تیمار و محلول‌پاشی سدیم نیتروپروساید سبب افزایش ۱۴/۵۸ درصدی این صفت نسبت به شاهد شد که آن را در گروه برتر آماری قرار داد، در حالی‌که کاربرد سدیم نیتروپروساید به‌تنهایی به‌صورت پیش‌تیمار بذری و محلول‌پاشی نتوانست موجب بهبود معنی‌دار این صفت گردد (جدول ۴-۱۲). امیدی و همکاران (۱۳۹۳) گزارش کردند محلول‌پاشی سدیم نیتروپروساید با حفظ توانایی تولید و نگهداری شاخهٔ فرعی در گیاهان تحت تنش کم‌آبی می‌تواند سبب بهبود عملکرد بیولوژیک در ارقام لوبیا شود.

در تیمار کلسیم هر دو سطح محلول‌پاشی با نانوکربنات‌کلسیم و کربنات کلسیم به فرم معمول وزن زیست توده را به‌طور معنی‌داری افزایش دادند ولیکن تفاوت معنی‌داری بین این دو تیمار وجود نداشت (جدول ۴-۱۲). ایبرگر (۲۰۰۲) گزارش داد که استفاده از کلرید کلسیم سبب افزایش میزان زیست‌توده گوجه‌فرنگی شد. هم‌چنین گزارش شده است که کلسیم سبب جلوگیری از کاهش مقدار زیست‌توده در گندم می‌شود (آگاروال و همکاران، ۲۰۰۵).

۴-۳-۲-۶- شاخص برداشت

صفت شاخص برداشت در آزمایش مزرعه ای از همه اثرات اصلی شامل شوری، سدیم نیتروپروساید و کربنات کلسیم در سطح احتمال ۱ درصد تأثیر پذیرفت. در بین اثرات متقابل هم اثر برهم‌کنش شوری و سدیم نیتروپروساید معنی‌دار ($p < ۰/۰۵$) بود (جدول پیوست ۸). برخی محققین اظهار داشتند که کاهش عملکرد بیولوژیک گیاه تحت شرایط شوری بسته به ترکیب نمک، غلظت نمک، گونهٔ گیاهی و مرحلهٔ رشدی گیاه متغیر است و با افزایش شوری، عملکرد بیولوژیک گیاه کاهش می‌یابد (حیدری شریف آباد، ۱۳۸۰، محمود و همکاران، ۲۰۰۳ و دپاسکال وهمکاران، ۲۰۰۵). مقدار کاهش عملکرد بیولوژیک با افزایش سطح شوری در ارقام مختلف گیاهی متفاوت است و در شرایط تنش، ارقام مقاوم به شوری می‌توانندکاهش وزن کم‌تری نسبت به ارقام حساس نشان دهند (همائی،۱۳۸۱).

در شکل ۴-۲۰ مشاهده می‌شود که در گیاهان آبیاری شده با آب‌شور شاخص برداشت به‌طور معنی‌داری افت پیدا کرد. تأثیر کاربرد سدیم نیتروپروساید در هر دوشرایط غیرتنش و تنش شوری از الگوی مشابه‌ای پیروی داشت و بیش‌ترین میزان شاخص برداشت در تیمار محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید دیده شد. اثر این تیمار در شرایط آبیاری با آب‌شور از اهمیت بالاتری برخوردار بوده زیرا در اثر جبران تنش، شاخص برداشت به حد گیاهان شاهد رسید. در هر دو شرایط غیرتنش و تنش شوری بین تیمارهای محلول‌پاشی با سدیم نیتروپروساید و تیمار پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید تفاوت معنی‌داری دیده نشد. نظر به اینکه شاخص برداشت نشان دهندهٔ درصد انتقال مواد آلی ساخته‌شده از منبع به مخزن است، شاید بتوان نتیجه گرفت که کاربرد سدیم نیتروپروساید، کربوهیدرات بیش‌تری را از اندام‌های سبز به دانه منتقل می‌کند و سبب افزایش عملکرد دانه و شاخص برداشت می‌شود.



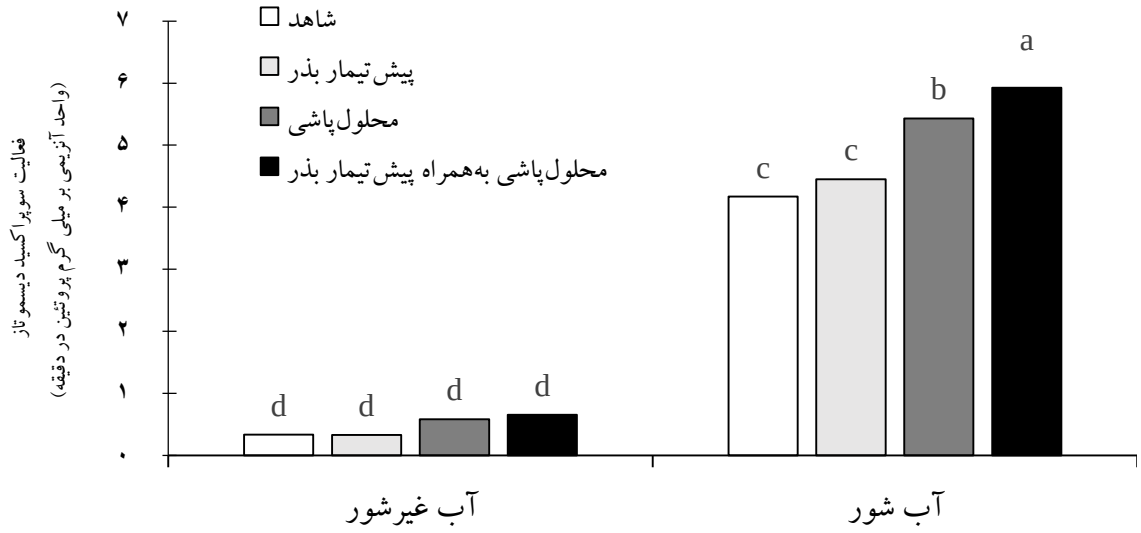
شکل ۴-۲۰- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و کاربرد سدیم نیتروپروساید بر شاخص برداشت گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای

شاخص برداشت گیاهان محلول‌پاشی شده با کربنات کلسیم و نانو کربنات کلسیم به ترتیب ۱/۸۴ و ۲/۱۷ درصد بیشتر از تیمار شاهد بود. اما این دو تیمار با یکدیگر اختلاف معنی داری نداشتند (جدول ۴-۱۲). در همین راستا گزارش شده است که محلول‌پاشی کلسیم تأثیر معنی‌داری بر شاخص برداشت در سویا دارد و در شرایط تنش کم‌آبی محلول‌پاشی کلسیم می‌تواند سبب تعدیل خسارات ناشی از تنش و افزایش مقاومت این گیاه زراعی شود (معدنی‌پور و همکاران، ۱۳۹۳). در آزمایشی دیگر هانگ و همکاران (۱۹۹۵) عنوان نمودند که محلول‌پاشی با غلظت‌های متفاوت کلسیم در شرایط تنش شوری بهبود شاخص برداشت جو در هر دو رقم وحشی و زراعی در هر دو سال انجام آزمایش را باعث گردید. آنها این بهبود در عملکرد و متعاقب آن شاخص برداشت را در ارتباط با نقش کلسیم در تعدیل محتوای سدیم در محیط ریشه می‌دانند.

۴-۳-۳- فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی

۴-۳-۳-۱- سوپراکسید دیسموتاز (SOD)

این آنزیم آنتی‌اکسیدانی در آزمایش مزرعه‌ای از همه اثرات اصلی شامل شوری، سدیم نیتروپروساید و کربنات کلسیم در سطح احتمال ۱ درصد تأثیر پذیرفت. در بین اثرات متقابل نیز اثر برهم‌کنش شوری و سدیم نیتروپروساید و برهم‌کنش شوری و کربنات کلسیم معنی دار ($P < ۰/۰۱$) بود (جدول پیوست ۹). در شکل ۴-۲۱، مشاهده می‌شود که زمانی که گیاه در معرض تنش شوری قرار گرفت، افزایش چشمگیری در فعالیت این آنزیم دیده شد. در شرایط غیر تنش، هیچ‌یک از سطوح سدیم‌نیتروپروساید اثر معنی‌داری بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز نداشتند ولی در شرایط تنش در تیمار محلول‌پاشی توأم با پیش-تیمار بذر بیشترین فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز ثبت شد. میزان فعالیت آنزیم در این شرایط حدود ۳۷ درصد افزایش یافت و در گروه برتر آماری قرار گرفت. تیمار کاربرد سدیم نیتروپروساید به‌صورت محلول‌پاشی نیز تأثیر معنی‌داری بر افزایش آنزیم مذکور داشت و با ۲۷ درصد افزایش در مرتبه دوم از لحاظ آماری قرار گرفت. درحالی‌که تیمار پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید مفید نبود. گزارش شده است که کاربرد سدیم نیتروپروساید سبب افزایش فعالیت سوپراکسید دیسموتاز، پراکسیداز و کاتالاز در گیاهچه‌های بادام زمینی شد (دانگ و همکاران، ۲۰۱۷). هم‌چنین عنوان شده است که تنش شوری منجر به کاهش فعالیت آنزیم کاتالاز و افزایش فعالیت گلوتاتیون ریداکتاز و گلوتاتیون پراکسیداز تحت تنش شوری در گوجه‌فرنگی می‌شود (مانای و همکاران، ۲۰۱۴).



شکل ۴-۲۱- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و کاربرد سدیم نیتروپروساید بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای

اثر برهم‌کنش تنش شوری و محلول‌پاشی با کربنات‌کلسیم بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در شکل ۴-۲۲ بررسی شده است. در اینجا نیز دیده می‌شود که تنش شوری سبب افزایش چشمگیری در فعالیت آنزیم مذکور گردید. در شرایط آبیاری با آب غیرشور، سطوح مختلف محلول‌پاشی کربنات کلسیم از نظر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز تفاوتی با تیمار شاهد نداشتند ولی در محیط شور بین تیمارهای محلول‌پاشی کلسیم به فرم‌های معمول (۵/۰۰ واحد آنزیمی بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) و نانو (۵/۵۹ واحد آنزیمی بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) با تیمار شاهد (۴/۳۶ واحد آنزیمی بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) تفاوت معنی داری مشاهده شد. دراین بین تیمار محلول‌پاشی با نانو کربنات کلسیم با افزایش ۲۸ درصدی نسبت به شاهد نتایج بهتری را نشان داد (شکل ۴-۲۲). ژیو و همکاران (۲۰۰۴) دریافتند که بهبود سمیت فلز سنگین آلومینیوم با تغذیه گیاه با کلسیم می‌تواند مرتبط با نقش کلسیم در کاهش جذب آلومینیوم و افزایش فعالیت سیستم‌های آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در سلول گیاهی باشد.

فتحی و همکاران (۲۰۱۷) عنوان کرد که عنصر کلسیم با تقویت فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، شرایط ادامه حیات را برای گیاه گندم در شرایط تنش شوری فراهم نمود.

شکل ۴-۲۲- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و محلول‌پاشی کربنات‌کلسیم بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای

جدول ۴-۱۳- مقایسه میانگین فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و غلظت مالون دی‌آلدئید در برگ گیاه کنجد تحت تأثیر تنش شوری، سدیم نیتروپروساید و محلول‌پاشی کلسیم در آزمایش مزرعه‌ای

تیمار	سطح	سوپراکسید دیسموتاز	کاتالاز	آسکوربات پراکسیداز	مالون دی‌آلدئید
		(واحد آنزیمی بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه)			(میکرومول بر گرم وزن تر برگ)
تنش شوری	آب غیرشور	۰/۴۸ b	۰/۶۱ b	۰/۶۸ b	۱/۳۴ b
	آب شور	۴/۹۹a	۳/۷۰ a	۹/۰۰ a	۴/۲۹a
سدیم نیتروپروساید	شاهد	۲/۲۵ b	۱/۸۳ c	۴/۰۰ c	۳/۶۵ a
	پیش‌تیمار بذر[۱]	۲/۳۹ b	۲/۰۶ b	۴/۶۳ b	۲/۹۱ b
	محلول‌پاشی[۲]	۳/۰۱ a	۲/۳۰ a	۵/۲۱ a	۲/۴۲ c
	پیش‌تیمار بذر و محلول‌پاشی	۳/۲۹ a	۲/۴۳ a	۵/۵۲ a	۲/۲۹ c
محلول‌پاشی کلسیم	شاهد	۲/۳۹c	۱/۹۰c	۴/۳۴c	۳/۲۰a
	کربنات‌کلسیم	۲/۷۳ b	۲/۱۷ b	۴/۸۵ b	۲/۷۱b
	نانو کربنات‌کلسیم	۳/۰۹ a	۲/۳۹ a	۵/۳۶ a	۲/۵۵b

حروف مختلف در هر ستون بیانگر اختلاف معنی دار در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون LSD می باشد.

۱. پیش‌تیمار بذر با غلظت ۱۵۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید

۲. محلول‌پاشی با غلظت ۵۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید

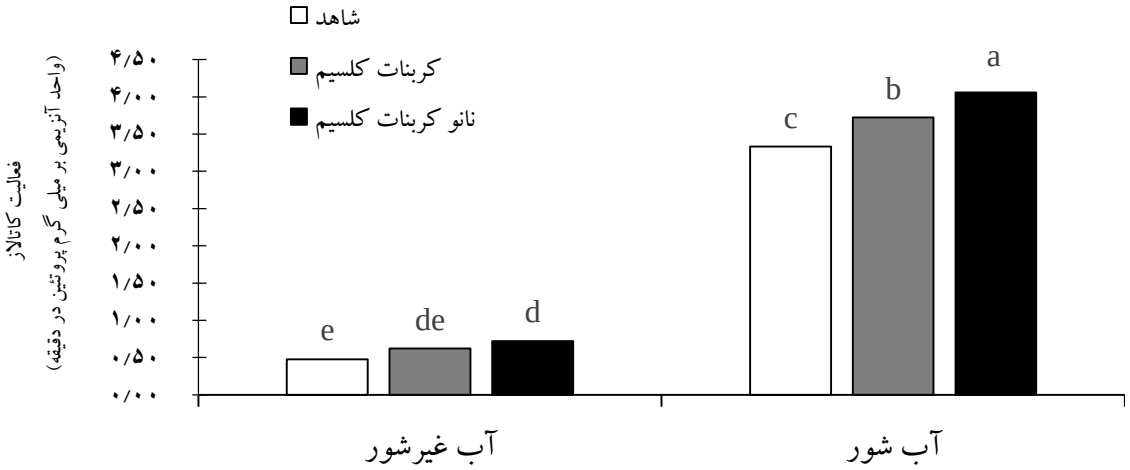
۴-۳-۳-۲-کاتالاز (CAT)

اثر شوری، سدیم نیتروپروساید و کربنات کلسیم در سطح احتمال ۱ درصد و اثر برهم‌کنش شوری و کربنات کلسیم در سطح احتمال ۵ درصد بر میزان فعالیت آنزیم کاتالاز معنی‌دار بود (جدول پیوست ۹).

در شکل ۴-۲۳ مشاهده می‌شود که آبیاری با آب شور حدود ۶ برابر فعالیت آنزیم کاتالاز را افزایش داد. بیشترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در تیمار محلول‌پاشی با نانوکربنات‌کلسیم در شرایط تنش شوری (۴/۰۵ واحد آنزیمی بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) دیده شد. محلول‌پاشی با کربنات کلسیم نیز در همین شرایط تفاوت معنی‌داری ایجاد نمود. در شرایط غیرتنش نیز افزایش فعالیت کاتالاز ناشی از کربنات کلسیم مشاهده شد ولی تنها افزایش حاصل از نانو کربنات کلسیم از نظر آماری معنی دار بود (شکل ۴-۲۶). نتایج جمشیدی و همکاران (۱۳۹۶) نشان داد که محلول‌پاشی کلسیم سبب افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز، کاهش پراکسیداسیون لیپید غشاء، جلوگیری از تخریب کلروفیل و حفظ عملکرد دانه در شرایط تنش سرب می‌گردد. همچنین سیدیکی و همکاران (۲۰۱۱) گزارش دادند که در شرایط تنش شوری، محلول‌پاشی کلسیم با حفظ فعالیت سیستم آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و تجمع پرولین می‌تواند آسیب‌های وارده در گیاه گندم را کاهش دهد.

بررسی سطوح تیمار سدیم نیتروپروساید حاکی از این بود که فعالیت آنزیم کاتالاز در تیمار محلول‌پاشی به همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید، ۳۸ درصد بیشتر از شاهد بود که با تیمار محلول‌پاشی با سدیم نیتروپروساید تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۴-۱۳). بین تیمارهای کاربرد سدیم نیتروپروساید، تیمار پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید با میانگین ۲/۰۶ واحد آنزیمی بر میلی‌گرم بر دقیقه اثر کمتری داشت ولی نسبت به شاهد برتری معنی‌داری نشان داد (جدول ۴-۱۳). لاسپینا و همکاران (۲۰۰۵) بیان نمودند که نیتریک اکسید سبب جلوگیری از افزایش فعالیت سوپراکسید دیسموتاز و بازیابی کاتالاز تحت شرایط تنش فلز سنگین می‌شود. هم‌چنین گزارش شده است که کاربرد سدیم

نیترپروساید در برنج سبب کاهش فعالیت سوپراکسید دیسموتاز و افزایش فعالیت کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز می‌شود (چن و همکاران، ۲۰۱۵).



شکل ۴-۲۳- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و محلول‌پاشی کربنات‌کلسیم بر فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای

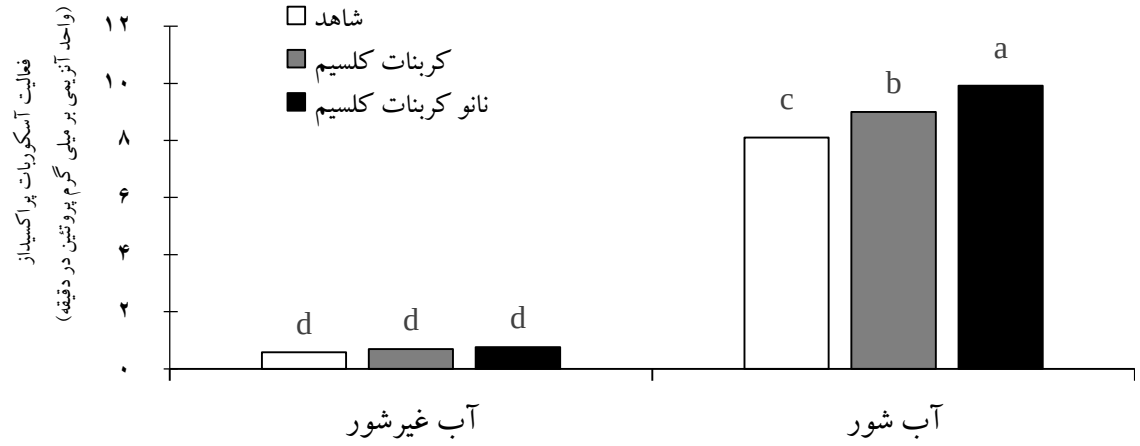
۴-۳-۳-۳-آسکوربات پراکسیداز (APX)

میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز از سطوح مختلف شوری، سدیم نیتروپروساید، کربنات کلسیم، برهم‌کنش بین شوری و سدیم نیتروپروساید و برهم‌کنش بین شوری و کربنات کلسیم در سطح احتمال ۱ درصد تأثیر پذیرفت (جدول پیوست ۹). به‌طورکلی تنش شوری باعث افزایش ۱۰ برابری در فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز شد نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان داد، هنگامی که گیاهان تحت آبیاری با آب غیرشور قرار گرفتند، اعمال سطوح مختلف سدیم نیتروپروساید تأثیری بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز نداشت، ولی در شرایطی که گیاهان تحت تنش شوری قرار گرفتند، تیمار محلول‌پاشی سدیم نیتروپروساید و همچنین تیمار محلول‌پاشی توأم با پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید بیشترین اثر را بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز داشتند و با هم در گروه برتر آماری جای گرفتند. تیمار پیش‌تیمار بذر نیز توانست سبب افزایش معنی دار فعالیت این آنزیم نسبت به شاهد

شود، اما در رتبه دوم از لحاظ آماری قرار گرفت (شکل ۴-۲۴). لاسپینا و همکاران (۲۰۰۵) گزارش دادند که کاربرد سدیم نیترپروساید به‌عنوان فراهم‌کننده نیتریک اکسید، موجب افزایش بیشتر محتوای آسکوربات در گیاه می‌گردد. هم‌چنین گزارش شده است که کاربرد سدیم نیتروپروساید در شرایط تنش-های محیطی، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی را از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز، پراکسیداز و کاتالاز افزایش می‌دهد (رضوان و همکاران، ۲۰۱۸). نتایج سانگ و همکاران (۲۰۱۷) نشان داد کاربرد نیتریک اکسید از منبع سدیم نیتروپروساید فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (SOD، POD وCAT) را افزایش داده و سطح گونه‌های فعال اکسیژن و مالون‌دی‌آلدئید را کاهش می‌دهد و از این رو مقاومت در برابر تنش اکسیداتیو را افزایش می‌دهد.

بر اساس نتایج به‌دست آمده محلول‌پاشی با کربنات کلسیم نیز در شرایط بدون تنش مفید واقع نشد ولی در شرایط بروز تنش شوری تیمار محلول‌پاشی با نانوذرات کربنات کلسیم افزایش قابل توجه ۱۳ درصدی را در فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در این شرایط نسبت به عدم مصرف کلسیم موجب شد البته محلول‌پاشی با کربنات کلسیم به فرم معمول نیز افزایش معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد نشان داد (شکل ۴-۲۵). فعالیت بالای APX نشان‌دهنده حفاظت بیش‌تر گیاه در برابر صدمات اکسایشی القاشده به‌وسیله تنش شوری می‌باشد (چای و همکاران، ۲۰۰۵). هم‌چنین ژن‌های آیزوزایم APX و APX سیتوسولی که پاسخ‌دهنده تنش‌های محیطی از قبیل خشکی و شوری می‌باشند، نقش مهمی در حفاظت اجزای سلولی در برابر تنش اکسایشی ایفا می‌کنند و می‌توانند از طریق افزایش بیان ژن APX تحمل گیاهان را نسبت به تنش‌های اکسایشی افزایش دهند (جین و همکاران، ۲۰۰۶). از طرف دیگر محصول واکنش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز یعنی H_2O_2 سوبسترای فعالیت APX است، بنابراین H_2O_2 می‌تواند نقش سیگنال را برای القای APX ایفا کند (فایز و همکاران، ۲۰۱۱).

شکل ۴-۲۴- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و سدیم نیتروپروساید بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای



شکل ۴-۲۵- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و محلول‌پاشی کربنات‌کلسیم بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای

۴-۴-۳-۳- مالون دی آلدئید (MDA)

میزان مالون دی آلدئید در آزمایش پیش رو از همه اثرات اصلی شامل شوری، سدیم نیتروپروساید و کربنات کلسیم در سطح احتمال ۱ درصد تأثیر پذیرفت. در بین اثرات متقابل اثر برهم‌کنش شوری و

سدیم نیتروپروساید در سطح احتمال ۱ درصد و برهم‌کنش بین شوری و کربنات کلسیم در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بودند (جدول پیوست ۹). در شکل ۴-۲۶ مشاهده می‌شود که آبیاری با آب شور به‌طور قابل توجه و معنی‌داری غلظت مالون‌دی‌آلدئید را به عنوان نماد پراکسیداسیون لیپیدها افزایش داد. به‌طوری که افزایش ناشی از شوری در گیاهان که با سدیم نیتروپروساید تیمار نشده بودند، بیش از ۲۳۰درصد بود. در مقابل کلیه‌ی سطوح تیمار سدیم نیتروپروساید سبب کاهش پراکسیداسیون لیپید در شرایط تنش شدند. به‌گونه‌ای که بیش‌ترین مقدار مالون دی‌آلدئید در شرایط تنش شوری در تیمار شاهد با میزان ۵/۷۴ میکرومول بر گرم وزن تر برگ ثبت شد که در اثر محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید به ۳/۲۹ میکرومول بر گرم وزن تر برگ رسید که یک کاهش ۴۱ درصدی را نشان داد. همچنین نتایج مشخص کرد که محلول‌پاشی سدیم نیتروپروساید در کاهش مقدار MDA از مطلوبیت بیش‌تری نسبت به پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید برخوردار است (شکل ۴-۲۶ و جدول ۴-۱۳). شایان ذکر است که تیمارهای مختلف سدیم نیتروپروساید تأثیر معنی‌داری بر غلظت مالون‌دی‌آلدئید در شرایط آبیاری با آب معمولی نداشتند (شکل ۴-۲۶). کوکا و همکاران (۲۰۰۶) گزارش دادند که غلظت مالون دی‌آلدئید و فعالیت آنزیم‌های CAT، APX و GR در هر دو رقم مورد بررسی کنجد با افزایش سطح تنش افزایش پیدا می‌کند، ولی افزایش در فعالیت SOD تنها در رقم Cumhuriyet دیده شد و در رقم Orhangazi تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد وجود نداشت. کایا و اشرف (۲۰۱۵) بیان نمودند که کاربرد سدیم نیتروپروساید می‌تواند از طریق کاهش MDA و H_2O_2 سبب افزایش عملکرد میوه و زیست‌توده کل گوجه فرنگی در شرایط تنش فلز سنگین شود. شی و همکاران (۲۰۰۷) نیز بیان نمودند که استفاده از سدیم نیتروپروساید سبب تحریک آنزیم‌های جاروب‌کننده گونه‌های فعال اکسیژن و کاهش تجمع H_2O_2 در میتوکندری‌های ریشه‌های خیار در شرایط تنش شوری می‌شود. رضوان و همکاران (۲۰۱۸) اظهار

داشتند که کاربرد سدیم نیتروپروساید، در شرایط تنش فلزات سنگین عملکرد رشدی گیاهچه‌های برنج را افزایش می‌دهد.

افزایش غلظت مالون دی آلدئید در اثر تنش شوری در شکل ۴-۲۷ نیز قابل مشاهده است. البته نتیجه قابل تأمل در این شکل این است که اعمال تیمارهای متفاوت کلسیم به فرم معمول و نانو توانستند این افزایش را تعدیل کنند و غلظت MDA را به ترتیب ۱۹/۵ و ۲۲ درصد نسبت به شاهد در شرایط شور کاهش دهند اما تفاوت آن‌ها با یکدیگر معنی‌دار نبود. در شرایط عدم‌تنش کاربرد کربنات کلسیم تأثیری بر غلظت مالون‌دی‌آلدئید نداشت (شکل ۴-۲۷). در مطالعات متعددی گزارش شده است که استفاده از کلسیم در شرایط تنش شوری سبب کاهش معنی‌دار میزان پراکسیداسیون لیپید می‌شود (تونا و همکاران، ۲۰۰۷). هم‌چنین گزارش شده است که کمبود کلسیم سبب افزایش میزان مالون دی‌آلدئید و استفاده از کلرید کلسیم سبب کاهش مالون دی‌آلدئید می‌گردد (مانا و همکاران، ۲۰۱۴). لی و همکاران (۲۰۱۵) عنوان کردند که محلول‌پاشی کلسیم سبب افزایش جذب عناصر غذایی ضروری در شرایط تنش فلز سنگین کادمیوم می‌شود و مالون‌دی‌آلدئید که نشانگر پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء است، کاهش می‌یابد.

شکل ۴-۲۶- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و سدیم نیتروپروساید بر غلظت مالون دی‌آلدئید در گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای

شکل ۴-۲۷- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و محلول‌پاشی کربنات‌کلسیم بر غلظت مالون دی‌آلدئید در گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای

۴-۳-۴- غلظت سدیم

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تنش شوری، سدیم نیتروپروساید، کربنات کلسیم ، برهم کنش بین شوری و سدیم نیتروپروساید و برهم‌کنش بین شوری و کربنات کلسیم تأثیر معنی‌داری (۰/۰۱ > P) بر میزان سدیم برگ کنجد داشت (جدول پیوست ۱۰). نتایج شکل ۴-۲۸ نشان دهنده این است که با اعمال تنش شوری میزان سدیم برگ با یک جهش چشمگیر به بیش از ۳/۳ برابر رسید. اعمال تیمارهای متفاوت سدیم نیتروپروساید تنها در شرایط شور مفید واقع شد و به‌طور معنی‌داری سبب کاهش این عنصر در برگ گیاه کنجد گردید. به‌نحوی که کاربرد تیمار محلول‌پاشی به همراه پیش‌تیمار بذر با ثبت بیشترین کاهش، غلظت سدیم را ۲۱/۱۹ درصد نسبت به شاهد در شرایط تنش کاهش داد. تیمارهای محلول‌پاشی و پیش‌تیمار بذر نیز تقریباً به یک اندازه سبب کاهش معنی‌دار این عنصر نسبت به شاهد شدند ولی با یکدیگر تفاوت معنی‌داری نداشتند. افزایش میزان سدیم موجود در برگ سبب ایجاد سمیت در گیاه می‌شود. از دلایل اصلی سمیت یون سدیم در داخل سلول، رقابت آن با یون پتاسیم بر سر

محل‌های اصلی اتصال در فرآیندهای کلیدی متابولیک نظیر فعالیت‌های آنزیمی، سنتز پروتئین و فعالیت ریبوزوم‌ها است (فلاورز و کولمر، ۲۰۰۸). اگرچه برخی از مکانیسم‌های فیزیولوژیکی عکس‌العمل گیاهان به شوری ناشناخته است، ولی گزارش‌ها حاکی از آن است که وجود پتانسیل اسمزی ناشی از حضور یون‌های موجود در آب صرف‌نظر از منبع آن منجر به کاهش سطح برگ، تبخیر و تعرق و امکان استفاده آب موجود برای گیاه می‌گردد (افیونی و همکاران، ۱۳۷۶). همچنین سمیت ناشی از حضور برخی از یون‌ها و فراوانی نسبی آن‌ها منجر به برهم خوردن تعادل موجود میان عناصر گشته و درنهایت با افزایش شوری خاک و کاهش پتانسیل اسمزی جذب آب و عناصر غذایی ازجمله نیتروژن و پتاسیم کمتر شده و آهنگ رشد کاهش می‌یابد (افیونی وهمکاران، ۱۳۷۶).

اطلاعات درج شده در شکل ۴-۲۹ نیز تأیید می‌کند که آبیاری با آب شور به‌طور معنی‌داری میزان سدیم در برگ گیاه کنجد را افزایش داد. کاربرد تیمارهای محلول‌پاشی با کربنات کلسیم به فرم معمول و نانو هر دو توانستند این میزان را در شرایط تنش شوری به‌طور معنی‌دار و به ترتیب ۷/۹۸ و ۱۵/۵ درصد کاهش دهند، ولی هرگز میزان این عنصر در برگ گیاه کنجد به شرایط بدون تنش نزدیک هم نشد. کاربرد تیمارهای مختلف کربنات کلسیم در شرایط بدون تنش تأثیری بر میزان این عنصر در گیاه نداشتند (شکل ۴-۲۹). تجمع سدیم در محیط و یا در گیاه سبب ایجاد رقابت در جذب عناصر در گیاه می‌شود و درنهایت کاهش جذب پتاسیم را به دنبال دارد و این امر برای سدیم در نمک‌های کلرید یا سولفات صادق می‌باشد. از مقدار سدیم و پتاسیم موجود در برگ به‌عنوان شاخصی برای تعیین ارقام مقاوم به تنش شوری استفاده می‌شود، به‌گونه‌ای که ارقامی که نسبت سدیم موجود در برگ آن‌ها کمتر از پتاسیم باشد به‌عنوان ارقام مقاوم انتخاب می‌شوند (دیانت، ۱۳۹۲).

جدول ۴-۱۴- مقایسه میانگین سدیم و کلسیم برگ، کلروفیل، پرولین، میزان پروتئین و روغن در گیاه کنجد تحت تأثیر تنش شوری، سدیم نیتروپروساید و محلولپاشی کلسیم کربنات در آزمایش مزرعه‌ای

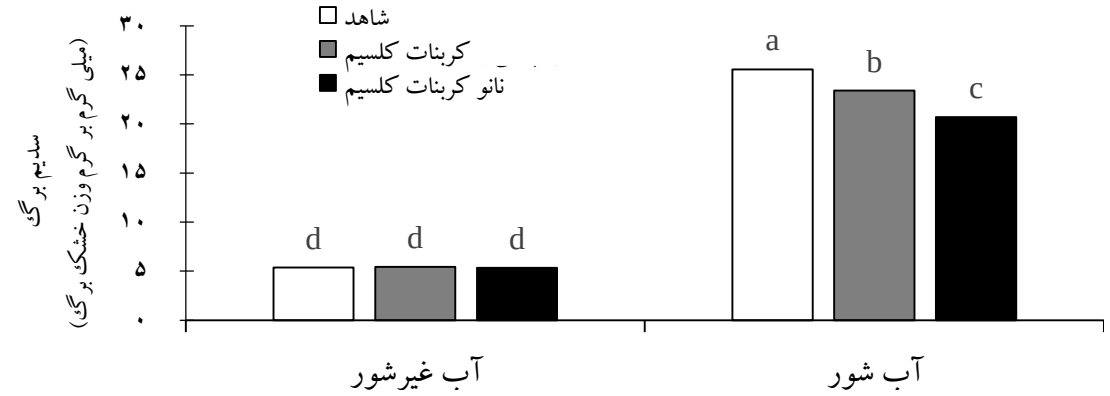
تیمار	سطح	سدیم برگ	کلسیم برگ	کلروفیل				پرولین	پروتئین دانه	روغن دانه
		(میلی‌گرم بر گرم وزن خشک برگ)		a	b	a/b	کل	(میکرومول بر گرم وزن تر برگ)	(درصد)	(درصد)
				(میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ)						
تنش شوری	آب آبیاری	۵/۳۸ b	۱۵/۵۶ a	۱/۸۹ a	۱/۰۰ a	۱/۸۹ b	۲/۸۷ a	۶/۸۳ b	۲۳/۹۳ b	۴۷/۵۸ a
	آب شور	۲۳/۲۲a	۷/۰۷b	۰/۵۷b	۰/۲۵b	۲/۳۲a	۰/۷۹b	۳۵/۳۷a	۲۵/۳۲a	۴۶/۶۰ b
سدیم نیتروپروساید	شاهد	۱۶/۱۱ a	۱۰/۷۶ b	۱/۱۳ c	۰/۵۹ d	۲/۰۶ ab	۱/۷۲ c	۱۹/۶۰ c	۲۳/۲۹ b	۴۸/۴۷ a
	پیش‌تیمار بذر[1]	۱۴/۱۵ b	۱۱/۲۴ab	۱/۲۰ b	۰/۶۱ c	۲/۱۵ ab	۱/۸۲ b	۱۹/۸۵ c	۲۳/۳۷ b	۴۸/۵۵ a
	محلول‌پاشی[2]	۱۳/۷۸ b	۱۱/۳۹ ab	۱/۲۲ b	۰/۶۴ b	۲/۰۳ b	۱/۸۲ b	۲۱/۳۴ b	۲۵/۷۸ a	۴۵/۷۱ b
	پیش‌تیمار بذر و محلول‌پاشی	۱۳/۱۸ b	۱۱/۸۵ a	۱/۳۵ a	۰/۶۶ a	۲/۱۶ a	۱/۹۵ a	۲۳/۶۲ a	۲۶/۰۱ a	۴۵/۶۴ b
محلول‌پاشی کلسیم	شاهد	۱۵/۴۷a	۹/۱۰c	۱/۱۵c	۰/۵۹c	۲/۱۵a	۱/۷۴c	۱۹/۹۲b	۲۴/۵۲a	۴۷/۲۵a
	کربنات‌کلسیم	۱۴/۴۱ a	۱۱/۶۳ b	۱/۲۲ b	۰/۶۲b	۲/۱۲ a	۱/۸۳ b	۲۱/۲۳ a	۲۴/۶۰a	۴۷/۱۰a
	نانو کربنات‌کلسیم	۱۳/۰۳ b	۱۳/۲۱ a	۱/۳۱ a	۰/۶۶a	۲/۰۷ a	۱/۹۲ a	۲۲/۱۵ a	۲۴/۷۶a	۴۶/۹۳a

حروف مختلف در هر ستون بیانگر اختلاف معنی دار در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون LSD می باشد.

۱. پیش‌تیمار بذر با غلظت ۱۵۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید

۲. محلول‌پاشی با غلظت ۵۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید

شکل ۴-۲۸- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و سدیم نیتروپروساید بر میزان سدیم برگ در گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای



شکل ۴-۲۹- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و محلول‌پاشی کربنات‌کلسیم بر میزان سدیم برگ در گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای

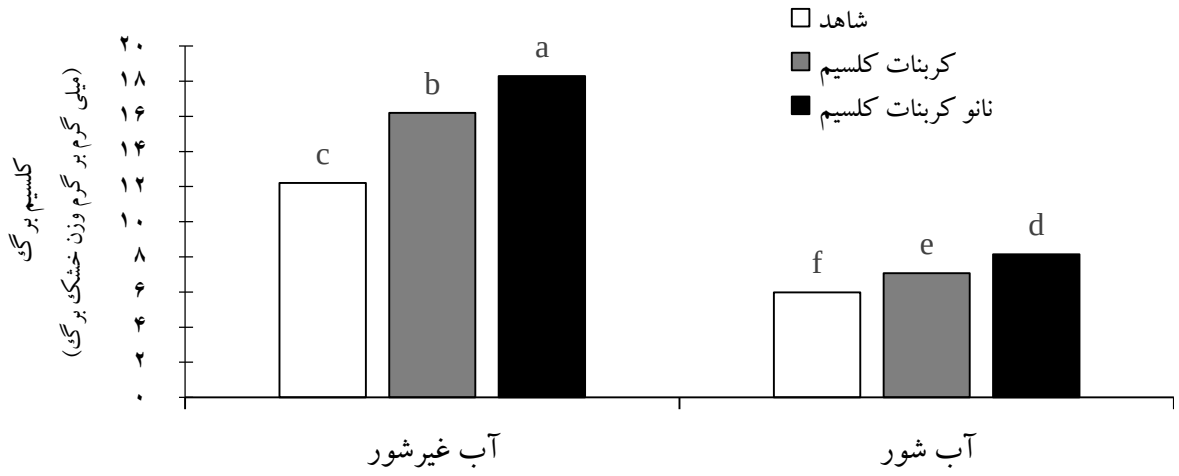
۴-۳-۵- غلظت کلسیم

میزان کلسیم برگ در آزمایش مزرعه‌ای از همه اثرات اصلی شامل شوری ($p < ۰/۰۱$)، سدیم نیتروپروساید ($p < ۰/۰۵$)، کربنات کلسیم ($p < ۰/۰۱$) تأثیر پذیرفت. در بین اثرات متقابل اثر برهم‌کنش شوری و کاربرد کربنات کلسیم معنی‌دار ($p < ۰/۰۱$) بود (جدول پیوست ۱۰).

تنش شوری سبب کاهش میزان کلسیم برگ از ۱۵/۵۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ در شرایط غیرتنش به ۷/۰۷ میلی‌گرم بر گرم در شرایط تنش شوری شد (جدول ۴-۱۴). این مهم در شکل ۴-۳۰ نیز مشهود است. همزمان کاربرد تیمارهای مختلف کربنات کلسیم تا حدودی این کاهش را تعدیل نمودند به‌نحوی که در گیاهان آبیاری شده با آب‌شور تیمارهای محلول‌پاشی کربنات کلسیم به‌صورت معمول و نانو به ترتیب ۲۰/۴ و ۳۲ درصد نسبت به شاهد افزایش در میزان کلسیم را ثبت کردند. تفاوت بین این دو تیمار هم از نظر آماری معنی دار بود. نتایج مشابهی در شرایط آبیاری با آب غیرشور نیز مشاهده شد. در نهایت بیشترین مقدار کلسیم در برگ گیاهانی مشاهده شد که با آب معمولی آبیاری شدند و نانو کربنات کلسیم را از طریق برگ‌های خود جذب نمودند (شکل ۴-۳۰). آچورو و همکاران (۱۹۹۴) گزارش دادند که تنش شوری سبب افزایش محتوای سدیم می‌شود، ولی کاربرد میزان مناسب یون کلسیم می‌تواند تا حدودی از ورود اضافی یون سدیم به گیاه ممانعت کند. محتوای بالای کلسیم می‌تواند قابلیت نفوذ غشاء پلاسمایی برای سدیم را کاهش دهد و منجر به افزایش جذب کلسیم شود (عطارزاده و همکاران، ۱۳۹۴). در اثر تنش شوری، یون سدیم به دلیل اثر رقابتی که با یون کلسیم دارد، سبب کاهش این یون شده است. بنابراین، اثرات سمیت سدیم ممکن است تنها به دلیل اثرات مستقیم یون سدیم نباشد، بلکه به‌علت کاهش مقدار عناصر غذایی ضروری پتاسیم و کلسیم در گیاه باشد (عطارزاده و همکاران، ۱۳۹۴). کیایی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۳) گزارش دادند که محلول‌پاشی کلسیم در هنگام گلدهی سبب افزایش میزان کلسیم برگ، کلروفیلa و تعداد شاخه فرعی در گیاه بزرک می‌شود.

نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان دهنده تأثیر معنی دار کاربرد سدیم نیتروپروساید بر میزان کلسیم برگ بود (جدول پیوست ۱۰). از بین سطوح سدیم نیتروپروساید تنها تیمار محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید (۱۱/۸۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) توانست به‌طور معنی‌دار میزان کلسیم برگ را بهبود بخشد. این تیمار یک افزایش ۱۰ درصدی را نسبت به تیمار شاهد نشان داد.

البته تیمارهای پیش‌تیمار بذر و محلول‌پاشی با سدیم نیتروپروساید نیز مؤثر بودند ولی اثر آنها به لحاظ آماری معنی‌دار نبود (جدول ۴-۱۴). گزارش شده است که تجمع یون‌های کلسیم سمیت تنش شوری را کاهش می‌دهد که احتمالاً به دلیل افزایش جذب انتخابی یون‌های پتاسیم است (صادقی لطف‌آبادی و همکاران، ۲۰۱۰). احتمالاً سدیم نیتروپروساید با بستن روزنه‌ها تطابق گیاهچه کنجد را به تنش شوری داخل سلولی افزایش داده است (ماتا و لاماتینا، ۲۰۰۱). کایا و اشرف (۲۰۱۵) افزایش Ca^{2+}، K^{+} و Na^{+} در برگ گوجه فرنگی تحت تنش بور را با کاربرد سدیم نیترپروساید گزارش دادند.



شکل ۴-۳۰- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و کربنات‌کلسیم بر میزان کلسیم برگ در گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای

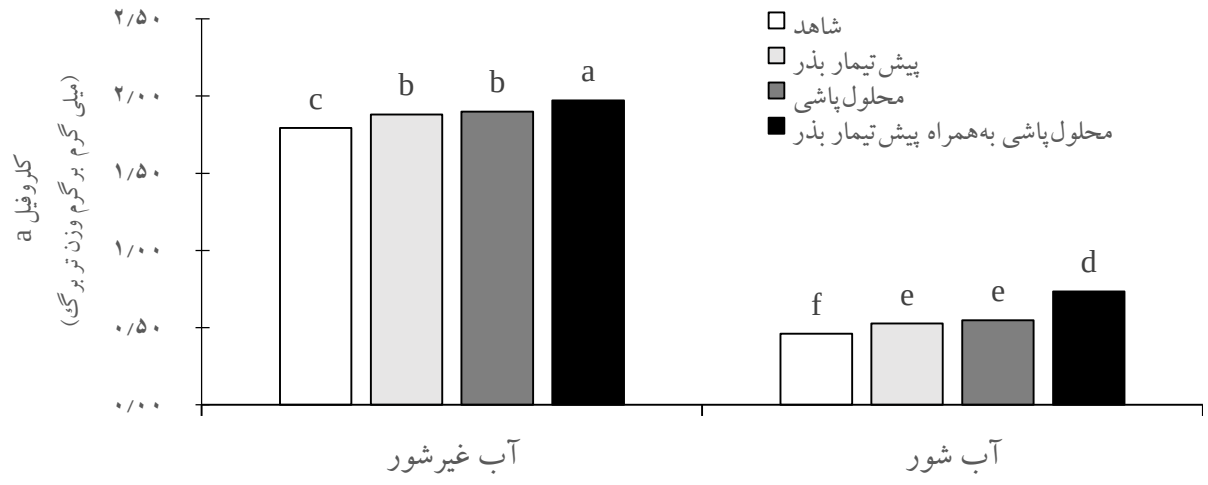
۴-۳-۶- محتوای کلروفیل برگ

۴-۳-۶-۱- کلروفیل a

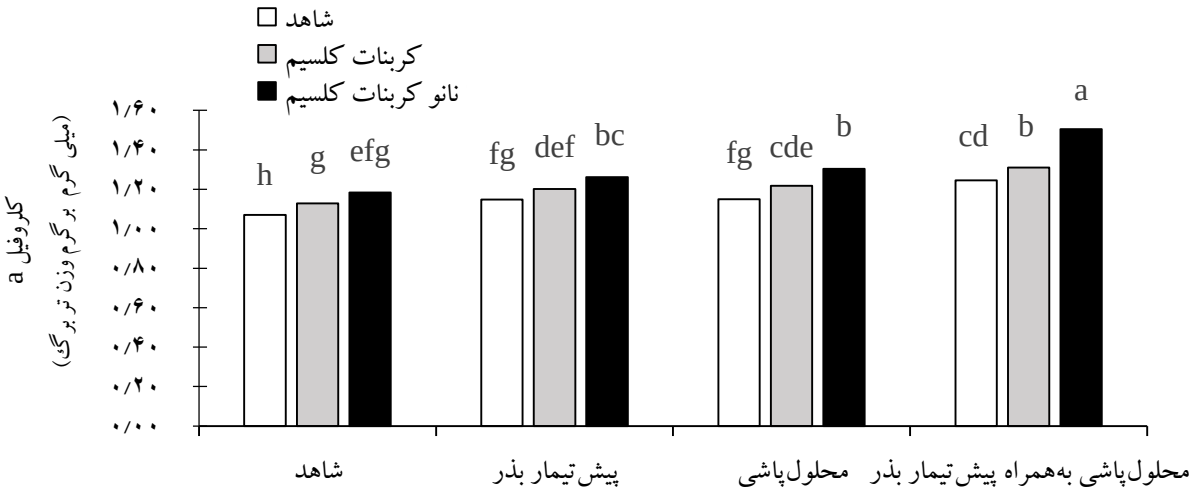
اثر تنش شوری، سدیم نیتروپروساید، کربنات کلسیم، اثر متقابل شوری و سدیم نیتروپروساید و اثر متقابل سدیم نیتروپروساید و کربنات کلسیم در سطح احتمال ۱ درصد بر میزان کلروفیل a معنی‌دار بود (جدول پیوست ۱۰). میزان کلروفیل a موجود در برگ گیاهانی که با آب شور آبیاری شدند، تقریباً یک سوم گیاهان رشد کرده در شرایط عدم تنش بود. در هر دو شرایط تنش و عدم تنش کاربرد تیمارهای

مختلف سدیم نیتروپروساید توانستند تا حدودی میزان کلروفیل a را بهبود بخشند. در این بین بیشترین تأثیر مربوط به تیمار محلول‌پاشی به همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروسایدبود. البته دو سطح محلول‌پاشی و پیش‌تیمار به‌تنهایی نیز توانستند سبب افزایش میزان کلروفیل a نسبت به شاهد شوند ولی با یکدیگر تفاوت معنی‌داری نشان ندادند. این وضعیت در هر دو شرایط تنش و بدون تنش شوری مشابه بود (شکل ۴-۳۱). پاریدا و داس (۲۰۰۵) بیان نمودند که در شرایط تنش شوری مقدار کلروفیل های a ، b و کاروتنوئید در گیاه گوجه‌فرنگی کاهش می‌یابد. شئوکاند و همکاران (۲۰۰۸) گزارش کردند که سدیم نیتروپروساید میزان کلروفیل را در گیاهان نخود تحت تنش کاهش داده است. سدیم نیتروپروساید از طریق تأثیر بر ترکیبات که توانایی جارو نمودن H_2O_2 را دارا می‌باشند، می‌تواند از بسته‌شدن روزنه‌ها به واسطه افزایش H_2O_2 جلوگیری نماید و همچنین از آسیب‌های اکسیداتیو ناشی از تجمع انواع گونه‌های اکسیژن‌های فعال بر آنزیم‌های چرخه کالوین بکاهد، بنابراین سدیم نیتروپروساید سبب بهبود فتوسنتز می‌شود (عرب و همکاران، ۱۳۹۴).

مقایسه ترکیبات تیمارهای حاصل از کاربرد سدیم نیتروپروساید و محلول‌پاشی کربنات کلسیم نیز در شکل ۴-۳۲ آورده شده است.گیاهان شاهد با میانگین ۱/۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر کمترین مقدار کلروفیل a را دارا بودند. سایر ترکیبات تیماری این صفت را بین 8/33 تا 24/21 درصد افزایش دادند. بیش‌ترین میزان کلروفیل a در ترکیب تیماری محلول‌پاشی با نانوکربنات‌کلسیم توأم با محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید (۱/۵۱ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) دیده شد (شکل ۴-۳۲). افزایش غلظت کلسیم در برگ‌ها از طریق محلول‌پاشی، سبب حفظ سنتز کلروفیل و جلوگیری از کمبود آن در شرایط تنش شوری می‌شود (بیان و همکاران، ۲۰۱۳).



شکل ۴-۳۱- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و سدیم نیتروپروساید بر میزان کلروفیل a در گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای



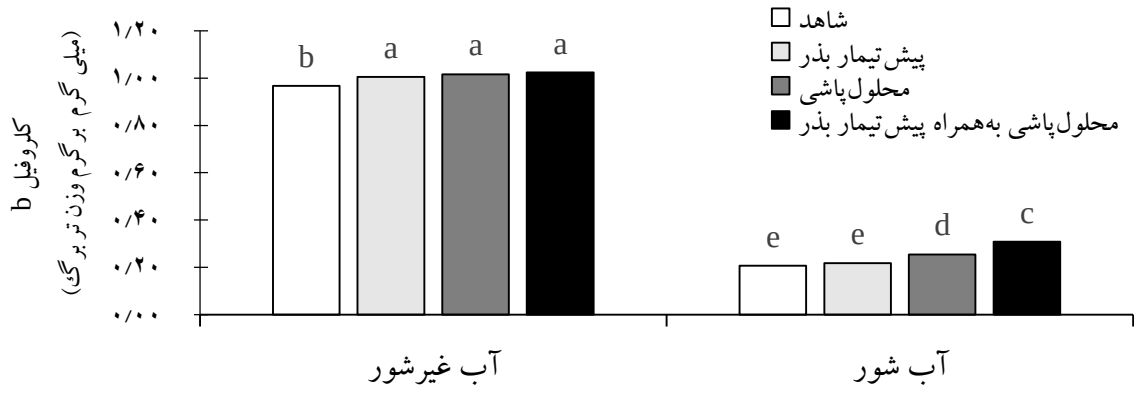
شکل ۴-۳۲- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف سدیم نیتروپروساید و کربنات کلسیم بر میزان کلروفیل a درگیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای

۴-۳-۶-۲- کلروفیل b

صفت میزان کلروفیل b در آزمایش مزرعه‌ای از همه اثرات اصلی شامل شوری، سدیم نیتروپروساید و کربنات کلسیم تأثیر پذیرفت ($p < ۰/۰۱$). در بین اثرات متقابل اثر شوری و سدیم نیتروپروساید در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول پیوست ۱۰). با اعمال تنش شوری از میزان کلروفیل b به شدت

کاسته شد، به‌گونه‌ای که مقدار کلروفیل b از ۱/۰۰ میلی‌گرم بر گرم به ۰/۲۵ میلی‌گرم بر گرم کاهش یافت (جدول ۴-۱۴). کاربرد تیمارهای مختلف سدیم نیتروپروساید، هم در شرایط استفاده از آب شور و هم شرایط معمول سبب افزایش در میزان کلروفیل b در برگ‌ها شدند. لازم به ذکر است که اختلاف بین تیمارهای مختلف کاربرد سدیم نیتروپروساید با یکدیگر در شرایط آبیاری با آب غیرشور معنی‌دار نبود ولی در شرایط اعمال تنش شوری تیمار محلول‌پاشی به همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید بهترین نتیجه را نشان داد البته تیمار محلول‌پاشی نیز سبب افزایش معنی‌دار میزان کلروفیل نسبت به شاهد شد ولی تیمار پیش‌تیمار بذر تأثیر معنی‌داری بر این صفت در شرایط تنش نداشت (شکل ۴-۳۳). عبدالصمد و همکاران (۱۹۹۷) گزارش دادند که در شرایط تنش شوری مقدار کلروفیل‌های a ، b و کاروتنوئید در گیاه سویا کاهش می‌یابد. گنگ و همکاران (۲۰۱۴) گزارش دادند که نیتریک اکسید سبب کاهش تنش شوری در گیاهان گوجه فرنگی می‌شود که ممکن است به دلیل نقش آن در تنظیم تعادل عناصر غذایی و گونه‌های واکنش‌پذیر اکسیژن (ROS) باشد که موجب محافظت سیستم فتوسنتز از آسیب می‌گردد.

نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان داد که محلول‌پاشی کلسیم تأثیر مثبت و معنی داری بر این صفت اندازه‌گیری شده داشت. به‌نحوی‌که میزان کلروفیل b در برگ‌های گیاهان محلول‌پاشی شده با کربنات کلسیم و نانوکربنات کلسیم به ترتیب ۵ و ۱۱/۸ درصد بیشتر از تیمار شاهد بود. (جدول ۴-۱۴). کیایی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۳) گزارش دادند که کلروفیل b و کلروفیل کل گیاه بزرک با محلول‌پاشی کلسیم افزایش می‌یابد. عطارزاده و همکاران (۱۳۹۳) نیز بیان نمودند که در شرایط تنش شوری افزایش سطح برگ ناشی از محلول‌پاشی کلسیم می‌تواند مانع از کاهش سرعت رشد گیاه و کاهش مقدار نسبی کلروفیل شود، که با نتایج اشرف (۱۹۹۴) نیز مطابقت دارد.

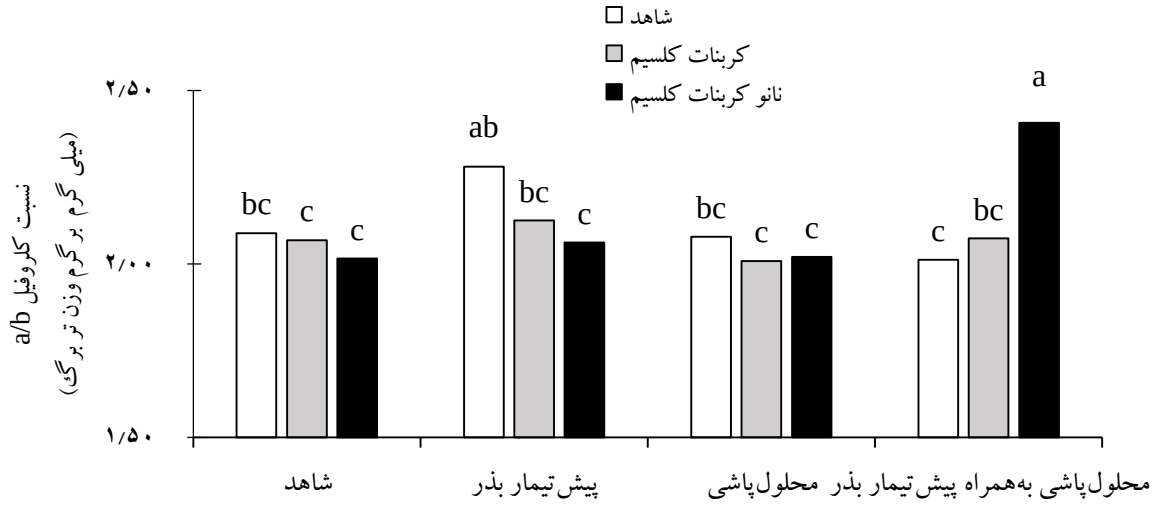


شکل ۴-۳۳- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و سدیم نیتروپروساید بر میزان کلروفیل b در گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای

۴-۳-۶-۳- نسبت کلروفیل a/b

نسبت کلروفیل a/b تحت تأثیر تنش شوری و برهم‌کنش بین سدیم نیتروپروساید و کربنات کلسیم در سطح احتمال ۱ درصد قرار گرفت (جدول پیوست ۱۰). تنش شوری سبب افزایش نسبت کلروفیل a/b شد، به‌گونه‌ای که مقدار این نسبت از ۱/۸۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ در شرایط غیرتنش با ۲۳ درصد افزایش به ۲/۳۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ در شرایط تنش شوری رسید (جدول ۴-۱۴). تنش خشکی و شوری می‌توانند غلظت کلروفیل را از طریق جلوگیری از ساخت کلروفیل و یا تسریع تجزیه آن توسط آنزیم کلروفیلاز (ردی و وورا، ۱۹۸۶) و فتواکسیداسیون کلروفیل توسط گونه‌های فعال اکسیژن (آلونسو و همکاران، ۲۰۰۱) کاهش دهد. این کاهش در کلروفیل b بیشتر از کلروفیل a است که با افزایش نسبت کلروفیل a به b تحت تنش همراه هست. افزایش این نسبت می‌تواند به دلیل خسارت به کمپلکس‌های برداشت کننده نور در فتوسیستم II باشد، زیرا مقدار قابل‌توجهی از کلروفیل b در این کمپلکس‌ها قرار دارد و نسبت کلروفیل b به a در آن سه به یک است. گزارش شده است که نسبت کلروفیل a/b در شرایط تنش شوری افزایش می‌یابد (عرب و همکاران، ۱۳۹۴).

اثر برهمکنش بین سدیم نیتروپروساید و کلسیم کربنات بر این صفت اندازه گیری شده معنی دار ($p < ۰/۰۱$) بود (جدول پیوست ۱۰). اطلاعات موجود در شکل ۴-۳۴ نشان داد که بیش‌ترین نسبت کلروفیل a/b در تیمار محلول‌پاشی با نانوکربنات‌کلسیم در تیمار محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید (۲/۴۱ میلی گرم بر گرم وزن تر برگ) دیده شد. در سایر تیمارهای کاربرد سدیم نیتروپروساید این روند مشاهده نشد و تیمارهای محلولپاشی کلسیم کربنات نتوانستند اثر مثبت و معنی داری بر نسبت کلروفیل a/b بگذارند.



شکل ۴-۳۴- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف سدیم نیتروپروساید و کربنات‌کلسیم بر نسبت کلروفیل a/b در گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای

۴-۳-۶-۴- کلروفیل کل

اثر شوری، سدیم نیتروپروساید و کربنات کلسیم بر میزان کلروفیل کل در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار بود (جدول پیوست ۱۰). نتایج ثبت شده در مزرعه برای این صفت کاملاً نتایج حاصل از آزمایش گلدانی را تأیید کرد. اعمال تنش شوری تأثیر به‌سزایی در میزان کلروفیل کل داشت به نحوی‌که مقدار کلروفیل کل در گیاه کنجد با اعمال تنش شوری یک کاهش ۷۰ درصدی را نشان داد و از ۲/۸۷ میلی‌گرم

بر گرم وزن تر برگ در شرایط غیرتنش به ۰/۷۹ میلی‌گرم بر گرم در شرایط تنش شوری رسید (جدول ۴-۱۴). از دلایل کاهش کلروفیل تحت تنش شوری می‌توان به افزایش رادیکال‌های آزاد اکسیژن اشاره کرد که منجر به افزایش پراکسیداسیون لیپیدها و درنتیجه آسیب به غشاء کلروپلاستی می‌گردد که سبب تخریب کلروفیل می‌شود. همچنین تجمع مقادیر بالای سدیم در بافت‌های گیاه ازجمله عوامل مؤثر در تخریب رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی، کلروز برگ و کاهش فتوسنتز گزارش شده است (تقی پور و صالحی، ۲۰۰۸). کاهش در میزان کلروفیل a و b در شرایط تنش شوری توسط محققان دیگر نیز گزارش گردیده است (محمدی و همکاران، ۲۰۰۸؛ اشرف و هریس، ۲۰۱۴ و سودیر و مورتی، ۲۰۰۴).

تیمارهای مختلف کاربرد سدیم نیتروپروساید سبب افزایش محتوی کلروفیل کل شدند. بیش‌ترین مقدار کلروفیل کل با میزان ۱/۹۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ در تیمار محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید و کم‌ترین مقدار این صفت با مقدار ۱/۷۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ در تیمار شاهد دیده شد (جدول ۴-۱۴). این درحالی است که تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید و محلول‌پاشی آن نیز توانستند سبب بهبود میزان کلروفیل در برگ گیاه شوند اما با یکدیگر تفاوت معنی‌داری نداشتند و در مرتبه دوم از لحاظ آماری قرار گرفتند. افزایش میزان کلروفیل تحت تنش‌های محیطی با کاربرد سدیم نیتروپروساید در گیاهان متفاوتی همچون گندم و ذرت گزارش شده است (تو و زو، ۲۰۰۳ و بویارشینف و اسفوا، ۲۰۱۱).

محلول‌پاشی کربنات‌کلسیم تأثیر معنی‌داری بر محتوی کلروفیل کل داشت (جدول پیوست ۱۰). به‌نحوی‌که میزان کلروفیل کل در گیاهان محلول‌پاشی شده با کربنات کلسیم و نانوکربنات کلسیم به ترتیب ۶/۵ و ۱۱ درصد بیشتر از تیمار شاهد بود. این تفاوت بین تیمارهای مختلف محلول‌پاشی کربنات کلسیم نیز از نظر آماری معنی دار بود (جدول ۴-۱۴). عطارزاده و همکاران (۱۳۹۵) بیان نمودند که با توجه به نقش مثبت کلسیم در تولید و حفاظت از کلروفیل و پروتئین، محلول‌پاشی آن می‌تواند راهکار مناسبی در

جهت کاهش خسارت گیاهان در شرایط تنش شوری باشد. درداس (۲۰۰۹) نشان داد که با افزایش غلظت کلسیم، میزان کلروفیل در گیاه مرزنجوش افزایش پیدا کرد.

۴-۳-۷- پرولین

مقدار پرولین برگ در آزمایش مزرعه‌ای از همه اثرات اصلی شامل شوری، سدیم نیتروپروساید و کلسیم در سطح احتمال ۱ درصد تأثیر پذیرفت (جدول پیوست ۱۰). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که تنش شوری سبب افزایش بسیار چشمگیری در میزان پرولین شد؛ به‌گونه‌ای که مقدار پرولین از ۶/۸۳ میکرومول بر گرم در شرایط غیرتنش به ۳۵/۳۷ میکرومول بر گرم در شرایط تنش شوری افزایش یافت (جدول ۴-۱۴). میسرا و ساکسنا (۲۰۰۹) در مطالعه ای روی عدس به بررسی تجمع پرولین و آنزیم‌های دخیل در مسیر پرولین در شرایط تنش شوری پرداختند. بررسی آن‌ها نشان داد که با افزایش شوری و زمان تأثیر شوری بر گیاه غلظت پرولین افزایش می‌یابد. همچنین فعالیت آنزیم پرولین اکسیژناز یا همان پرولین دهیدروژناز (PDH) در شرایط تنش شوری کاهش یافت؛ بنابراین چنین به نظر می‌رسد که در شرایط شوری گیاهان با افزایش بیوسنتز پرولین و کاهش تجزیه آن، موجب افزایش پرولین در گیاه می‌شوند. برخلاف نقشی که پرولین در بهبود مکانیسم‌های گیاه در شرایط تنش دارد، کاربرد خارجی پرولین در گیاهان در شرایط نرمال ایجاد سمیت می‌نماید که در این شرایط ظاهر گیاه مانند زمانی می-شود که مرگ سلولی رخداده است (لوپز و همکاران، ۲۰۰۸).

کاربرد سدیم نیتروپروساید تأثیر مثبت و معنی‌داری بر میزان پرولین داشت. در تیمار محلول‌پاشی به همراه پیش‌تیمار بذر میزان پرولین در برگ‌های گیاه کنجد افزایش ۲۰/۵ درصدی را نسبت به شاهد ثبت کرد و این تیمار را در گروه برتر آماری نسبت به سایر تیمارها قرار داد. تیمار محلول‌پاشی نیز توانست میزان پرولین را در برگ‌های گیاه کنجد نسبت به شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش دهد و با ۹ درصد افزایش در مرتبه دوم از نظر آماری قرار گیرد. اما تیمار پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید تأثیر معنی-

داری بر این صفت اندازه‌گیری شده نداشت (جدول ۴-۱۴). هیر و کرس (۱۹۹۷) بیان نمودند که سدیم نیتروپروساید سبب افزایش پرولین می‌شود که با نتایج حاضر هم‌خوانی دارد. رضوان و همکاران (۲۰۱۸) نیز افزایش پرولین در شرایط تنش فلز سنگین را گزارش نمودند. دانگ و همکاران (۲۰۱۷) گزارش دادند که استفاده از سدیم نیتروپروساید (SNP، اهداکننده NO خارجی) انتقال کادمیم از ریشه به برگ را کاهش می‌دهد، هم‌چنین سبب افزایش محتوای کلروفیل، کاهش غلظتROS ، MDA و پرولین می‌شود (عرب و همکاران، ۱۳۹۴).

همچنین محلول‌پاشی کربنات‌کلسیم تأثیر مثبتی بر میزان پرولین داشت. پرولین در برگ گیاهان محلول‌پاشی شده با کربنات کلسیم و نانو کربنات کلسیم به ترتیب ۶/۵ و ۱۱ درصد بیشتر از تیمار شاهد بود. اما این دو تیمار با یکدیگر تفاوت معنی‌داری نداشتند (جدول ۴-۱۴). پرولین می‌تواند به‌عنوان پایدارکننده ساختمان سلول، منبع انرژی و حتی به‌عنوان سیگنال دهنده تنش نیز عمل کند. تجمع پرولین ممکن است به دلیل کاهش اکسیداسیون پرولین یا تحریک سنتز آن از گلوتامات و یا افزایش فعالیت آنزیم پروتئاز باشد (کوکا و همکاران، ۲۰۰۶). عطارزاده و همکاران (۱۳۹۱) بیان کردند که محتوای پرولین گیاه در شرایط تنش شوری با محلول‌پاشی کلسیم افزایش می‌یابد. تجمع پرولین در شرایط تنش شوری در آفتابگردان (موتیلو بروزک، ۲۰۰۵) و ارقام مقاوم برنج گزارش شده است (عطارزاده و همکاران، ۱۳۹۴).

۴-۳-۸- صفات کیفی

۴-۳-۸-۱- پروتئین دانه

همانند بخش گلدانی، در بخش مزرعه‌ای نیز تنها اثر تنش شوری و کاربرد سدیم نیتروپروساید بر میزان پروتئین دانه کنجد معنی‌دار ($p < ۰/۰۱$) بود (جدول پیوست ۱۰). نتایج نشان داد که در شرایط تنش شوری میزان پروتئین دانه ۱/۴ درصد بیشتر بود (جدول ۴-۱۴). یکی از دلایل افزایش درصد

پروتئین می‌تواند رقابت با روغن بر سر اشغال فضای دانه باشد (پسارکلی، ۲۰۱۶). رابرتسون و همکاران (۲۰۰۱) نیز نتایج مشابهی را در خصوص افزایش درصد پروتئین و کاهش درصد روغن در شرایط تنش خشکی گزارش نمودند.

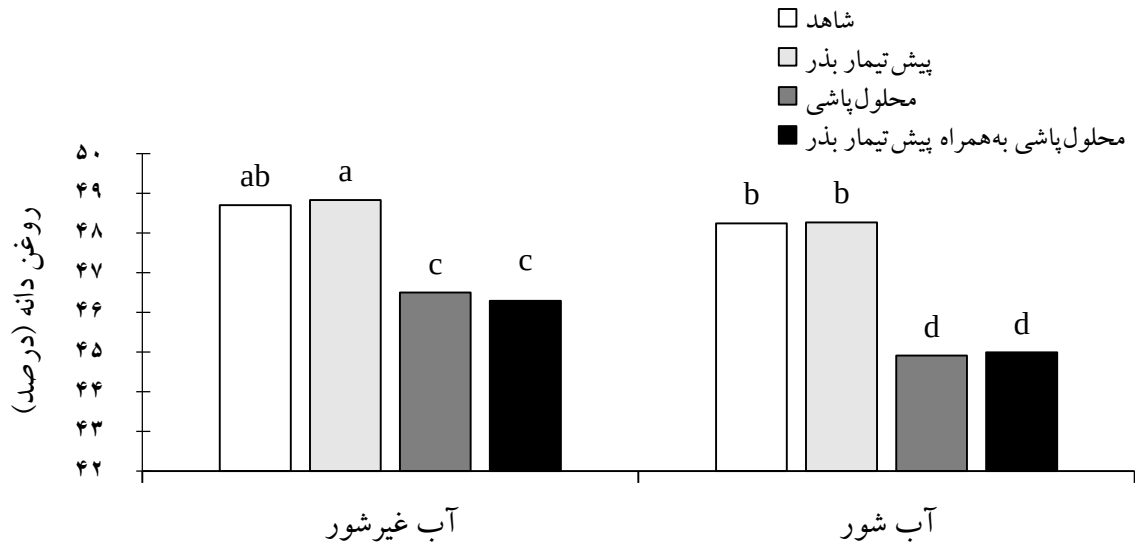
کاربرد سدیم نیتروپروساید تأثیر مثبتی بر میزان پروتئین کنجد داشت. مقدار پروتئین دانه در تیمار محلول‌پاشی به‌همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید ۲۶/۰۱ درصد بود که با تیمار شاهد اختلاف ۲/۷ درصدی داشت. تیمار محلول‌پاشی سدیم نیتروپروساید نیز سبب افزایش میزان پروتئین دانه شد و با تیمار محلول‌پاشی به همراه پیش‌تیمار بذر در گروه برتر آماری قرار گرفتند. ولی تیمار پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید موجب اختلاف معنی‌داری با شاهد نشد (جدول ۴-۱۴). عرب و همکاران (۱۳۹۴) نیز گزارش کردند با کاربرد سطوح مختلف سدیم نیتروپروساید میزان پروتئین دانه گلرنگ افزایش یافت.

۴-۳-۸-۲- روغن دانه

درصد روغن دانه از اثرات اصلی شوری ($p < ۰/۰۵$)، سدیم نیتروپروساید($p < ۰/۰۱$) و برهم‌کنش بین آن‌ها ($p < ۰/۰۱$) تأثیر پذیرفت (جدول پیوست ۱۰).

در شکل ۴-۳۵ دیده می‌شود که آبیاری با آب شور به‌طور معنی‌داری میزان روغن در دانه کنجد را کاهش داد. این کاهش به‌طور متوسط حدود ۱ درصد بود. سدیم نیتروپروساید در هر دو شرایط غیر تنش و تنش شوری اثر مشابهی برجای گذاشت به‌طوری که در هر دو شرایط بیشترین روغن دانه در گیاهانی مشاهده شد که توسط سدیم نیتروپروساید تیمار نشده بودند (شاهد) یا اینکه فقط بذور آنها با این ماده پیش‌تیمار شده بود. محلول‌پاشی سدیم نیتروپروساید و یا تؤام شدن آن با پیش‌تیمار به‌طور معنی‌داری این صفت کیفی را کاهش داد. البته بین این دو تیمار اختلاف معنی داری وجود نداشت. این نتیجه کاملاً تکرار نتیجه آزمایش گلدانی بود (شکل ۴-۳۵). منصوری (۱۳۸۸) عنوان کرد که تنش اسمزی در مرحله‌ی گل‌دهی گیاه سبب کاهش محتوای روغن دانه می‌گردد. در آزمایشی دیگر بر روی گلرنگ

مشاهده شد با محلولپاشی سدیم نیتروپروساید در دو سطح ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار در شرایط اعمال تنش خشکی میزان روغن دانه گلرنگ به طور معنی داری افزایش یافت (عرب و همکاران، ۱۳۹۱).



شکل ۴-۳۵- اثر برهم‌کنش سطوح مختلف تنش شوری و سدیم نیتروپروساید بر درصد روغن دانه گیاه کنجد در آزمایش مزرعه‌ای

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه‌گیری کلی

به‌طورکلی نتایج داده‌های این پژوهش نشان داد که تنش شوری به شکل معنی‌داری بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذر ازجمله درصد جوانه‌زنی، وزن خشک ریشه‌چه، وزن خشک ساقه چه، طول ریشه‌چه، طول ساقه چه و سرعت جوانه‌زنی تأثیر گذاشته و کاهش این شاخص‌ها را به دنبال دارد. به نظر می‌رسد که تنش شوری به دلیل کاهش آب موردنیاز برای آبنوشی و اثر سمیت یون‌های کلر و سدیم موجب القای خواب اجباری و کاهش درصد جوانه‌زنی می‌شود. تنش شوری به واسطه اختلال در جذب آب توسط بذر و کندی فعالیت‌های آنزیمی درون بذر کاهش سرعت جوانه‌زنی و همچنین سایر شاخص‌ها از قبیل طول ریشه‌چه و ساقه چه را سبب می‌شود.

بر طبق نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش استفاده از تیمار سدیم نیتروپروساید تأثیر مطلوبی در بهبود شاخص‌های جوانه‌زنی بذر در شرایط تنش شوری داشت. نتایج نشان داد که در بین تیمارهای سدیم نیتروپروساید به‌کاربرده شده در این پژوهش تیمار ۱۵۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید تأثیر مطلوب‌تری در بهبود شاخص‌های جوانه‌زنی بذر کنجد داشت.

نتایج نشان داد که تنش شوری سبب افزایش معنی‌دار فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز، آسکوربات پراکسیداز و گلوتاتیون ردوکتاز شد. نتایج نشان داد که افزایش سطح تنش شوری افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان گیاهچه را به دنبال دارد به‌گونه‌ای که برای مثال فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز از ۹/۳ در شرایط نرمال به ۱۴/۹۸ در شرایط شوری ۵۰ میلی مولار رسید و با افزایش غلظت نمک به ۱۰۰ میلی مولار فعالیت این آنزیم ۲۰/۷۵ برآورد شد و نتایج نشان داد که استفاده از تیمار ۲۰۰ میکرومولار سدیم نیتروپروساید افزایش فعالیت اکثر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مورد بررسی را به دنبال داشت.

نتایج مربوط به سنجش مالون دی آلدئید (MDA) در گیاهچه به‌عنوان شاخص تخریب غشا نشان داد

که تنش شوری سبب تخریب و آسیب غشای سلولی و نهایتاً افزایش مالون‌دی‌آلدئید می‌شود. بر طبق نتایج به‌دست‌آمده استفاده از سدیم نیتروپروساید دارای یک نقش حفاظتی است و سبب کاهش تخریب غشاء و نشت این ماده می‌شود به‌گونه‌ای که کمترین مقدار این ماده در تیمارهای ۵۰ تا ۱۵۰ سدیم نیتروپروساید به‌دست آمد.

نتایج مربوط به بررسی اجزای عملکرد نشان داد که تنش شوری سبب کاهش تعداد کپسول، دانه در کپسول، وزن دانه و عملکرد دانه می‌شود. با توجه به اینکه صفات ذکرشده از اجزای مهم عملکرد هستند کاهش هرکدام تأثیر زیادی بر میزان عملکرد نهایی می‌گذارد. نتایج نشان داد که استفاده از تیمارهای سدیم نیتروپروساید و همچنین تیمارهای کلسیمی نقش مهمی در بهبود این صفات در شرایط تنش شوری دارند. در بین تیمارهای کلسیمی مورد بررسی تیمار نانو کربنات کلسیم از مطلوبیت بیشتری برخوردار بود. در خصوص شاخص برداشت هم نتایج مشابهی به‌دست آمد به‌گونه‌ای که تنش شوری کاهش میزان شاخص برداشت از ۴۵ درصد به ۴۱ درصد را به دنبال داشت. بیشترین مقدار شاخص برداشت هم مربوط به تیمار پیش‌تیمار بذر به‌علاوه محلول‌پاشی با سدیم نیتروپروساید و در بین تیمارهای کلسیمی مربوط به تیمار نانو کربنات کلسیم بود.

نتایج مربوط به سنجش آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در شرایط گلدانی و مزرعه شباهت بسیار زیادی داشت به‌گونه‌ای که در هر دو آزمایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز به شکل معنی‌داری افزایش پیدا کرد. برای مثال فعالیت سوپراکسید دیسموتاز از ۰/۵۷ در شرایط نرمال به ۴/۵ در شرایط تنش شوری افزایش یافت. همچنین فعالیت کاتالاز در شرایط تنش شوری حدود ۵ برابر و آسکوربات پراکسید حدود ۱۰ برابر نسبت به شاهد افزایش پیدا کرد. استفاده از تیمارهای کلسیمی و سدیم نیتروپروساید نیز افزایش فعالیت آنزیم‌ها را به دنبال داشت. نتایج مربوط به سنجش مالون دی آلدئید به‌عنوان یک شاخص تعیین خسارت نشان داد که تنش شوری افزایش شدید میزان مالون دی

آلدئید را به دنبال داشت که این نشان از نقش خسارتی تنش شوری است. نتایج نشان داد که استفاده از تیمارهای کلسیمی و سدیم نیتروپروساید دارای یک نقش حفاظتی است و سبب کاهش پراکسیداسیون لیپیدی می‌شود. به‌طورکلی می‌توان نتیجه گرفت که تنش شوری سبب افزایش تولید رادیکال‌های آزاد و تخریب غشا و نهایتاً افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی به‌منظور مقابله با آن‌ها می‌شود.

نتایج نشان داد که تنش شوری سبب افت عمده ظرفیت فتوسنتزی و میزان کلروفیل شد به‌گونه‌ای که میزان کروفیل در شرایط تنش شوری به یک‌سوم خود در شرایط نرمال رسید. بر طبق نتایج به‌دست‌آمده استفاده از تیمارهای سدیم نیتروپروساید تأثیر مطلوبی در افزایش میزان کلروفیل داشت در بین تیمارهای سدیم نیتروپروساید به‌کار برده شده، تیمار پیش‌تیمار به‌علاوه محلول‌پاشی بیشترین مقدار کلروفیل را داشت. همچنین تنش شوری باعث کاهش نسبت کلروفیل a/b شد. استفاده از تیمارهای کلسیمی باعث افزایش هر دو نوع کلروفیل a و b گردید.

نتایج نشان داد که محتوی پرولین در شرایط تنش شوری به شکل چشمگیری افزایش می‌یابد. استفاده از تیمارهای کلسیمی نقش قابل‌ملاحظه‌ای در افزایش میزان پرولین داشت. در بین تیمارهای کلسیمی به‌کاربرده شده نیز تیمار کربنات سدیم بیشترین مقدار پرولین را داشت. تیمارهای سدیم نیتروپروساید نیز تأثیر معنی‌داری در افزایش مقدار پرولین داشتند در بین این تیمارها بیشترین مقدار پرولین مربوط به تیمار پیش‌تیمار به‌علاوه محلول‌پاشی بود.

اعمال تنش شوری سبب افزایش قابل‌ملاحظه‌ای در میزان سدیم برگ شد به‌گونه‌ای که برای مثال در آزمایش مزرعه‌ای مقدار سدیم موجود در برگ از ۶/۴ در شرایط نرمال به ۲۲/۷ در شرایط اعمال تنش شوری افزایش یافت. همچنین استفاده از تیمارهای کربنات کلسیم و سدیم نیتروپروساید سبب کاهش معنی‌داری در مقدار سدیم موجود در برگ شد. با توجه به اینکه تجمع بالای یون سدیم سبب صدمه شدید به برگ، کاهش دوام برگ و همچنین کاهش میزان فتوسنتز در برگ می‌شود و این امر منجر به

کاهش میزان فتوسنتز جاری گیاه و کاهش عملکرد می‌شود، لذا می‌توان استفاده از این تیمارها را در جهت کاهش اثرات نامطلوب تجمع سدیم توصیه نمود.

بر طبق نتایج مربوط به آزمون مقایسه میانگین داده‌ها اعمال تنش شوری کاهش معنی‌دار وزن خشک برگ و ریشه را به همراه داشته است. نتایج نشان داد که استفاده از تیمار نانو کربنات کلسیم تأثیر معنی‌داری در افزایش وزن خشک برگ و ریشه دارد. نتایج نشان داد که استفاده از تیمارهای مختلف سدیم نیتروپروساید نیز افزایش وزن خشک برگ و وزن خشک ریشه کنجد را در پی داشته است. به‌گونه‌ای که بیشترین مقدار وزن خشک برگ مربوط به تیمار محلول‌پاشی به‌علاوه پیش‌تیمار بذر بود.

نتایج نشان داد که صفات ارتفاع گیاه، سطح برگ و قطر ساقه تحت تأثیر شوری قرارگرفته و در اثر تنش شوری از میزان این صفات به شکل معنی‌داری کاسته می‌شود. استفاده از تیمارهای کربنات کلسیم و همچنین پیش‌تیمار بذر به‌علاوه محلول‌پاشی نقش مثبت و مؤثری در بهبود این صفات دارد.

بر اساس نتایج آزمون مقایسه میانگین داده‌ها با اعمال تنش شوری از میزان روغن دانه کنجد کاسته و بر میزان پروتئین افزوده می‌شود. با توجه به کلیه موارد ذکر شده در مجموع می‌توان تیمار محلول‌پاشی به همراه پیش‌تیمار بذر با سدیم نیتروپروساید را به‌عنوان تیمار برتر مورد استفاده در این پژوهش معرفی کرد.

۵-۲- پیشنهادات

با توجه به یافته‌های این پژوهش پیشنهاد می‌گردد:

۱) طی آزمایشی تأثیر کاربرد سدیم نیتروپروساید و تیمارهای کلسیمی بر سایر ارقام تجاری کنجد کشور در شرایط تنش مورد بررسی قرارگیرد تا هم بتوان ارقام مقاوم را شناسایی کرد و هم تأثیر تیمارهای به‌کار برده شده روی ارقام مختلف مورد بررسی قرار گیرد.

۲) با توجه به اینکه در بخش‌هایی از کشور کنجد به‌صورت دیم کاشته می‌شود پیشنهاد می‌گردد که در

پژوهشی اثر تیمارهای سدیم نیتروپروساید و نانو کربنات در شرایط تنش خشکی مورد مطالعه قرار گیرد.

۳) به‌منظور بررسی دقیق‌تر روند تغییرات فیزیولوژیکی پیشنهاد می‌گردد که در پژوهش‌های آتی از سطوح شوری بیشتری استفاده شود تا بتوان روند تغییرات فیزیولوژی را به‌صورت دقیق‌تر مورد بررسی قرار داد.

۴) ازآنجاکه اعمال تنش‌هایی مانند شوری دارای اثرات کوتاه‌مدت و درازمدت در گیاهان هستند، بهتر است نمونه‌برداری از گیاهان در طی دوره‌های تنش به‌صورت مستمر انجام شود تا اطلاعات بیشتر و کامل‌تری از تغییرات حاصل در خصوصیات بیوشیمیایی گیاهان مانند پروتئین و آنزیم‌ها در طی زمان به‌دست آید.

۵) با توجه به تنش شوری و سیستم آنتی‌اکسیدانی مؤثر در تنش، برای به‌دست آوردن اطلاعات کامل‌تر نسبت به سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه و نحوه عملکرد آن در شرایط تنش شوری پیشنهاد می‌شود مقادیر متابولیت‌های آنتی‌اکسیدان مانند اسید آسکوربیک و گلوتاتیون و ایزوآنزیم‌های مختلف این آنزیم‌ها که از مهم‌ترین مکانیزم‌های غیرآنزیمی آنتی‌اکسیدان می‌باشند در تمامی اندام‌های مختلف نیز مورد مطالعه قرار گیرند.

منابع

۱) **ابراهیمیان، ا.، پاسبان اسلام، ب.، رشدی، م.، خلیلی محله، ج. و بایبوردی، ا. ۱۳۸۸.** ارزیابی کارایی روش‌های مصرف ریزمغذی‌های آهن و روی بر عملکرد و اجزای عملکرد آفتابگردان روغنی. سومین همایش ملی گیاهان دانه روغنی. ۲۴-۲۵ تیر. دانشگاه صنعتی اصفهان

۲) **ابراهیمی، ع. ر. ۱۳۹۵.** اثر محلول پاشی کلرید کلسیم بر رشد، عملکرد و اجزای عملکرد عدس تحت رژیم‌های مختلف آبیاری. پایان‌نامه کارشناسی ارشد زراعت. دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه بوعلی‌سینا. ۱۴۵صفحه.

۳) **احمدی، ع.، احسان‌زاده، پ. و جباری، ف. ۱۳۸۶.** مقدمه‌ای بر فیزیولوژی گیاهی(ترجمه). جلد دوم. انتشارات دانشگاه تهران. ۲۵۷ صفحه.

۴) **ارزانی، ا. و صالحی، م. ۱۳۹۰.** اثر تنش شوری بر صفات مورفو-فیزیولوژیک لاین های تریتیکاله. مجله علوم زراعی ایران. ۴: ۶۹۱-۷۱۱.

۵) **اسدی‌صنم، س.، زواره، م.، پیردشتی، ه. ا. و هاشم پور، ا. ۱۳۹۳.** اثر سدیم نیتروپروساید (SNP) بر برخی ویژگی‌ها بیوشیمیایی گیاهچه‌های جو در تنش شوری. نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی. ۲۳: ۱۷۱-۱۸۹.

۶) **افیونی، م.، مجتبی پور، ر. و نوربخش، ف. ۱۳۷۶.** خاک های شور و سدیمی و اصلاح آن ها. انتشارات ارکان اصفهان. ۱۹۰ صفحه.

۷) **امامی، ع. ۱۳۷۵.** روش‌های تجزیه گیاه. نشریه فنی موسسه تحقیقات آب و خاک سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. ۱۴۰ صفحه.

۸) **امیدی، ف. و سپهری، ع. ۱۳۹۲.** اثر سدیم نیتروپروساید بر رشد، عملکرد و اجزای عملکرد لوبیای قرمز تحت تنش کم آبی. مجله علوم گیاهان زراعی ایران. ۴۵ (۲): ۲۴۳-۲۵۴.

۹) **امیدی، ف. و سپهری، ع. ۱۳۹۳.** تأثیر کاربرد نیتروپروساید سدیم بر سطح برگ، رشد و کارایی مصرف آب ارقام لوبیا قرمز تحت تنش کم‌آبی. مجله به زراعی کشاورزی. ۱۶(۴): ۸۷۱-۸۸۵.

۱۰) **ایزدی دربندی، ا.، محمدیان، م.، یانق، ع. و زرقانی، ه. ۱۳۹۱.** اثرات دما و شوری بر ویژگی‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه توده‌های کنجد. مجله پژوهش‌های زراعی ایران. ۱۰: ۳۳۵-۳۴۵.

۱۱) **آئین، ا. ۱۳۹۱.** تغییرات میزان پرولین، کربوهیدرات‌های محلول و جذب عناصر پتاسیم، روی و کلسیم در ژنوتیپهای کنجد (*Sesamum indicum* L.) تحت تنش خشکی. مجله تولید گیاهان زراعی در شرایط تنش‌های محیطی. ۴(۳): ۳۹-۴۵.

۱۲) **باشگاه نانو تکنولوژی ایران. ۱۳۹۵.** قابل دسترس در سایت www.nano.ir.

۱۳) **بخرد، ح.، مهدوی، ب. و رحیمی، ا. ۱۳۹۴.** اثر پرایمینگ بذر بر رشد رویشی و برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه کنجد (*Sesamum indicum L.*) در شرایط شوری حاصل از نمک‌های قلیایی. مجله پژوهش‌های زراعی ایران. ۱۳: ۸۱۰-۸۲۲.

۱۴) **پور آذری، ف.، احسانزاده، پ. و جهان بین، ش.** ۱۳۹۰. واکنش گندم‌های تتراپلوئید پوشینه‌دار به تنش کمبود نیتروژن در مقایسه با گندم ماکارونی. مجله علوم گیاهان زراعی ایران. ۴۲: ۲۸۵-۲۹۴.

۱۵) **پوستینی، کاظم. ۱۳۸۱.** ارزیابی۳۰ رقم گندم از نظر واکنش به تنش شوری. مجله علوم کشاورزی ایران. ۳۳(۱): ۶۴-۵۷.

۱۶) **تجلی، ط.، باقری، ع. و حسینی، م. ۱۳۹۰.** اثر تنش شوری بر عملکرد و اجزای عملکرد پنج رقم کلزا. مجله اکوفیزیولوژی گیاهی. ۳(۹): ۷۷-۹۰.

۱۷) **تدین، م. و امام، ی.۱۳۸۶.** واکنش‌های فیزیولوژیک و مرفولوژیک دو رقم جو به تنش شوری و ارتباط آن با عملکرد دانه. مجله علوم زراعی ایران. ۱۱(۱): ۲۵۳-۲۶۲.

۱۸) **ترابیان، ش. و زاهدی، م. ۱۳۹۲.** تأثیر تغذیه برگی سولفات آهن به دو شکل معمول و نانو ذرات بر رشد ارقام آفتابگردان تحت تنش شوری. مجله علوم گیاهان زراعی ایران. ۴۴(۱): ۱۰۹-۱۱۸.

۱۹) **تیموری، م.، خزاعی، ح.، نصیری محلاتی، م. و نظامی، ا. ۱۳۹۲.** تأثیرسطوح مختلف شوری بر عملکرد و اجزای عملکرد تک بوته، خصوصیات مورفولوژیک و میزان کلروفیل برگ گیاه کنجد (*Sesamum indicum* L.). مجله تنش های محیطی در علوم کشاورزی. ۲: ۱۱۹-۱۳۰.

۲۰) **جعفری نیا، م. و خلیلپور، م. ۱۳۹۶.** بررسی تاثیرات تنش شوری و نیتریک اکساید بر تغییرات فلورسانس کلروفیل a در گیاه جو دوسر(*Avena sativa* L.). مجله زیست‌شناسی گیاهی ایران. ۹(۲): ۸۷-۹۵.

۲۱) **جمشیدی، پ.، برادران فیروزآبادی، م.، علومی، ح.، نقوی، ه. ۱۳۹۶.** بررسی محلول‌پاشی کود روی و کلسیم بر عملکرد و صفات فیزیولوژیکی گلرنگ تحت تنش سرب، نشریه پژوهش‌های زراعی ایران. ۱۵: ۳۶۸-۳۷۹.

۲۲) **حسینی، ح. و رضایی‌نژاد، ع. ح. ۱۳۹۴.** بررسی اثر محلول پاشی سدیم نیتروپروساید (SNP) بر برخی ویژگی‌های گل جعفری (*Tagetes spp.*). نهمین کنگره علوم باغبانی. اهواز. ۲۵-۲۹ تیر.

۲۳) **حسینی، ح. و رضوانی مقدم، پ. ۱۳۸۵.** اثر تنش خشکی و شوری بر جوانه زنی اسفرزه. مجله پژوهش‌های زراعی ایران. ۴(۱): ۱۵-۲۲.

۲۴) **حمیدی، ح.، مسعودیان، ن. و سعیدیسار، س. ۱۳۹۵.** اثر نیتریک اکسید بر میزان پرولین، قندهای محلول و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاه کلزا (*Brassica napus* L.) تحت تنش سرب. مجله پژوهش‌های گیاهی. ۲۹: ۷۶۵-۷۷۱.

۲۵) **حیدری شریف آباد، ح. ۱۳۸۰.** گیاه و شوری. انتشارات موسسه تحقیقات جنگلها و مراتع. تهران. ایران. ۱۹۹ صفحه.

۲۶) **خواجه پو، م. ر. ۱۳۸۳.** گیاهان صنعتی. انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان. ۵۸۰ صفحه.

۲۷) **خوشگفتارمنش، ا. ح. ۱۳۸۶.** مبانی تغذیه گیاه. انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان. ۳۴۰ صفحه.

۲۸) **دوازده امامی، س.، جهان‌سو، م.، مظاهری، ر. و سفیدکن، ف. ۱۳۹۲.** اثر شوری آب آبیاری بر جوانه‌زنی، سبز شدن، عملکرد بیولوژیکی و کمیت و کیفیت اسانس بادرشبویه. مجله فناوری تولیدات گیاهی. ۱۰(۱): ۲۵-۳۳.

۲۹) **دیانت، زهره. ۱۳۹۲.** بررسی اثر تنش شوری بر پتانسیل رشد مجدد و ذخایر نیتروژنی ۱۰ رقم یونجه چندساله. پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تهران. ۱۳۰صفحه.

۳۰) **روشن، ش. ۱۳۹۴.** اثر محلول‌پاشی کلات و نانو کلات آهن، پتاسیم و فسفر بر خواص کمی و کیفی میوه گوجه فرنگی. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد دانشگاه خلیج فارس بوشهر. ۱۲۰ صفحه.

۳۱) **زمانی، ص.، نظامی، م.، حبیبی، د. و بایبوردی، ا . ۱۳۸۸.** بررسی عملکرد و اجزای عملکرد ارقام کلزای پاییزه در شرایط تنش شوری. مجله تنش های محیطی در علوم گیاهی. ۱(۲) : ۱۲۱-۱۰۹.

۳۲) **سرمدنیا، غ. ۱۳۷۷.** اهمیت تنش های محیطی در زراعت. مقالات کلیدی اولین کنگره زراعت و اصلاح نباتات ایران، دانشگاه تهران- دانشکده کشاورزی کرج. ۱۵-۱۸ شهریور. ۱۵۷-۱۷۲.

۳۳) **سیدان جاسبی، م. و احسانزاده، پ. ۱۳۹۲**. بررسی ویژگی‌های فیزیولوژیک مرتبط با اثر تنش کمبود آب در ژنوتیپ‌های کنجد (*Sesamum indicum* L.). علوم گیاهان زراعی ایران. ۴۴(۴): ۵۷۵-۵۸۳.

۳۴) **شمس الدین سعید، م. و فرح بخش، ح. ۱۳۸۷** . بررسی صفات کمی و کیفی عملکرد کلزا تحت شرایط تنش شوری و شناسایی بهترین شاخص مقاومت. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۴۳: ۶۵-۷۸.

۳۵) **شمس، ه.، نقدی‌بادی، ح. ع.، امیدی، ح.، رضازاده، ش. ع.، سروش‌زاده، ع. و سیف‌سهندی، م. ۱۳۸۸.** تغییرات کمی و کیفی اندام هوایی گیاه گاوزبان در اثر محلول‌پاشی نیترات کلسیم. فصلنامه گیاهان دارویی.۳۲: ۱۳۸-۱۴۴.

۳۶) **شهیدی، ع.، نحوی نیا، م. ح.، پارسی نژاد، م. و لیاقت، ع. ۱۳۸۹.** تعیین مدل بهینه جذب آب در شرایط تنش همزمان شوری و خشکی توسط ارقام زراعی گندم (*Triticum aestivum*) در منطقه بیرجند. مجله آب و خاک. ۲۴(۳): ۵۳۴-۵۴۴.

۳۷) **صادقی آذر، ل.، مداح حسینی، ش.، رحیمی، ا. و محمدی میریک، ع. ۱۳۹۲.** اثر تنش شوری بر برخی شاخص های جوانه زنی و رشد رویشی ژنوتیپ های عدس. مجله به‌زراعی کشاورزی. ۱۵(۴): ۱۰۷-۱۱۷ .

۳۸) **صادقی لطف‌آبادی، س.، کافی، ح. و خزاعی، ر. ۱۳۸۹.** بررسی اثرات تعدیل‌کنندگی کاربرد خاکی و محلول‌پاشی کلرید پتاسیم و کلرید کلسیم بر صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه سورگوم (*Sorghum bicolor* L.) در شرایط تنش شوری. مجله آب و خاک. ۲۴: ۳۸۵-۳۹۳.

۳۹) **عرب، ص.، برادران فیروزآبادی، م. و اصغری، ح. ر. ۱۳۹۴.** تأثیر محلول‌پاشی اسید آسکوربیک و سدیم نیتروپروساید بر رنگیزه‌های فتوسنتزی و برخی صفات گلرنگ بهاره در شرایط تنش کم آبیاری. مجله تولیدات گیاهی. ۳۸: ۶۴۴-۶۵۸.

۴۰) **عطارزاده، م.، ۱۳۹۱.** اثر محلول‌پاشی کلسیم و پتاسیم بر رشد و تجمع یونی در گلرنگ تحت شرایط تنتش شوری. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد زراعت. دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه ولی‌عصر (عج) رفسنجان. ۱۶۵ صفحه.

۴۱) **عطارزاده، م.، رحیمی، ا.، ترابی، ب. و دشتی، ح. ۱۳۹۳.** تأثیر محلول‌پاشی کلسیم، پتاسیم و منگنز بر برخی شاخص‌های رشد گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) در شرایط تنش شوری. مجله پژوهش‌های زراعی ایران. ۱۲: ۴۴۵-۴۵۳.

۴۲) **عطارزاده، م.، رحیمی، ا.، ترابی، ب. و دشتی، ح. ۱۳۹۴.** تأثیر محلول‌پاشی نیترات کلسیم، پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات و سولفات منگنز بر تجمع یونی و ویژگی‌های فیزیولوژیک گلرنگ در شرایط تنش شوری. مجله زراعت. ۱۰۷: ۱۳۳-۱۴۲.

۴۳) **عطارزاده، م.، رحیمی، ا.، ترابی، ب. و دشتی، ح. ۱۳۹۵.** واکنش کلروفیل، محتوای نسبی آب و پروتئین برگ گلرنگ به تنش شوری و محلول‌پاشی کلسیم، پتاسیم و منگنز. مجله اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی. ۱۰: ۲۶۹-۲۸۲.

۴۴) **فاضلی کاخکی، ف.، نظامی، ا.، پارسا، م. و کافی، م. ۱۳۹۳.** ارزیابی مولفه‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه اکوتیپ‌های کنجد (*Sesamum indicum* L.) در شرایط تنش شوری. تنش‌های محیطی در علوم زراعی. ۷(۲): ۲۱۷-۲۳۲.

۴۵) **فتحی، ع. و زاهدی، م. ۱۳۹۲.** تأثیر محلول‌پاشی نانو ذرات اکسید آهن و روی بر رشد و محتوای یونی دو ژنوتیپ ذرت (*Zea mays* L.) در شوری‌های متفاوت خاک. پژوهش‌های زراعی ایران.۱۲:۱۱۰-۱۱۷.

۴۶) **فیضی، م. ۱۳۸۳.** تأثیر شوری آب آبیاری بر عملکرد محصول آفتابگردان. مجله علوم خاک و آب. ۱۸: ۱۸۴-۱۹۳.

۴۷) **قلی نژاد، ا. ۱۳۸۹.** تأثیر تنش شوری بر شاخص‌های جوانه‌زنی ژنوتیپ‌های گندم. مجله علوم و تکنولوژی بذر. ۱(۱): ۱۴-۲۱.

۴۸) **کافی، م. و نصیری محلاتی، م. ۱۳۹۰.** اثر شوری بر عملکرد و اجزاء عملکرد هشت رقم گندم. مجله علوم و صنایع کشاورزی. ۱۹(۱): ۲۴-۳۱.

۴۹) **کیایی‌نژاد، ز. ۱۳۹۳.** بررسی پاسخ گیاه بزرک به محلول پاشی با کلسیم تحت شرایط کم آبیاری. پایان‌نامه کارشناسی ارشد زراعت و اصلاح نباتات. دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود. ۱۳۰ صفحه.

۵۰) **گلیج، م.، قربانی، ه. و برادران فیروزآبادی، م. ۱۳۹۴.** تأثیر تنش خشکی و محلول‌پاشی نانواکسید آهن بر عملکرد دانه، محتوای یونی و رنگدانه‌های نورساختی کنجد. مجله علوم گیاهان زراعی ایران. ۴۶(۴): ۶۱۹-۶۲۸.

۵۱) **محمدی، س.، رامئه، م. و.، گرامی، م.، اسدی‌صنم، س. و خوشروز، م. ۱۳۹۴.** اثر نیتریک اکساید بر برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی گیاه دارویی سرخارگل (*purpurea Moench* L.) تحت تنش شوری. نخستین کنفرانس ملی توسعه کشاورزی و زمین سالم. دانشگاه تهران، پردیس کرج. ۱۵-۱۹ تیر.

۵۲) **معدنی‌پور، ا. و. ۱۳۹۳.** بررسی تأثیر هگزاکونازول، پنکونازول و سیلیکات کلسیم بر صفات کمی و کیفی دو رقم سویا در شرایط کم‌آبیاری. پایان‌نامه کارشناسی ارشد زراعت. دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه پیام نور استان البرز. ۱۲۰ صفحه.

۵۳) **منشی، ر.، شرقی، ی.، زاهدی، ح.، مدرس ثانوی، س. ع. م. و مرادی قهدریجانی، م. ۱۳۹۶.** تأثیر محلول‌پاشی تریازول و سیلیکات کلسیم بر مقاومت به خشکی کلزا. مجله علوم گیاهان زراعی ایران. ۴۸: ۳۰۳-۳۱۷.

۵۴) **منصوری، س. ۱۳۸۸.** تحقیقات به‌نژادی و به‌زراعی گیاهان دانه روغنی در ایران دستاوردها و چشم اندازها. موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر. بخش تحقیقات دانه های روغنی. کرج. ۲۷۵ صفحه.

۵۵) **میثاق، م.، موحدی دهنوی، م.، یدوی، ع. و خادم حمزه، ح. ر. ۱۳۹۵.** بهبود عملکرد، درصد روغن و پروتئین کنجد (*Sesamum indicum* L.) تحت شرایط تنش خشکی با محلول‌پاشی روی و بور. مجله تولید گیاهان زراعی. ۹(۱):۱۶۳-۱۸۰.

۵۶) **میر محمدی میبدی، س. ع. م. و قره یاضی، ب. ۱۳۸۱.** جنبه‌های فیزیولوژی و به‌نژادی تنش شوری گیاهان زراعی. انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان. ۳۱۳ صفحه.

۵۷) **نبی زاده مرودست، م.، کافی، م. و راشد محصل، م. ح. ۱۳۸۲.** اثرات شوری بر رشد، عملکرد، تجمع املاح و درصد اساانس زیره سبز. پژوهش‌های زراعی ایران. ۱: ۵۳-۶۰.

۵۸) **نصری، م. و خلعتبری. م. ۱۳۸۷.** بررسی تأثیر غلظت محلول‌پاشی ریزمغذی بر خصوصیات کمی و کیفی ارقام کلزا (*Brassica napus* L.) در منطقه ورامین. فصلنامه دانش کشاورزی ایران. ۵: ۱۹۷-۲۱۳.

۵۹) **نصیرپور، م. ۱۳۹۴.** تأثیر کاربرد هیومیک اسید، کلسیم و بور بر عملکرد و خصوصیات فیزیکوشیمیایی میوه گوجه فرنگی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد باغبانی. دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود. ۱۳۷ صفحه.

۶۰) **نصیبی، ف.، منوچهری کلانتری، خ. و خداشناس، م. ۱۳۸۸.** اثر پیش‌تیمار سدیم نیتروپروساید بر برخی عوامل بیوشیمیایی گیاهچه گوجه فرنگی تحت تنش خشکی. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۶(۲): ۱۲۱-۱۳۵.

۶۱) **نصیبی، ف. ۱۳۹۱.** بررسی اثر غلظت‌های متفاوت نیتروپروساید سدیم (SNP) در تخفیف صدمات اکسیداتیو ناشی از تنش خشکی در گیاه گوجه فرنگی. مجله زیست شناسی گیاهی ایران. ۳(۹): ۶۳-۷۳.

۶۲) **نیک‌روش، م.، خلدبرین، ب.، نژادستاری، ط. و نجفی، ف. ۱۳۹۵.** اثر سدیم نیتروپروساید (SNP) بر برخی عوامل فیزیولوژیکی گیاه کلزا (*Brassica napus* L.) تحت تنش خشکی. مجله پژوهش‌های گیاهی. ۲۹: ۶۴۴-۶۵۸.

۶۳) **همائی، م. ۱۳۸۱.** واکنش گیاهان به شوری. انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران. ۲۱۳ صفحه.

۶۴) **یزدانی، ح.، قهرمان، ب.، داوری، ک. و کافی، م. ۱۳۹۳.** اثرات تنش شوری و کم‌آبیاری بر شاخص کارایی مصرف آب دو رقم کلزا. فصلنامه علمی-پژوهشی مهندسی منابع آب. ۷: ۶۷-۸۳.

65) **Abdul Jalal, C., Riadh, K., Gopi, R., Manivannan, P., Ines, J., Chang-Xing, X., Hong-Bo, S. and Panneerselvam, R. 2009.** Antioxidant defense responses: physiological plasticity in higher plants under abiotic constraints. Acta Physiol. Plant. 31:427–436.

66) **Abdul Samad, H.M. and Shaddad, M. 1997.** Salt tolerance of soybean cultivars. Biol. Plant. 39: 263-269.

67) **Abedi, T. and Pakniat, H. 2011.** Antioxidant enzyme changes in response to drought stress in ten cultivars of oilseed rape (*Brassica napus* L.). Plant Breed. 46: 27–34.

68) **Abnoos, L.E., Maas, E.V., Donovan, T. J. and Youngs, V.L. 2001.** Effect of salinity on grain yield and quality,vegetative growth and germination of semi-dwarf and sesame. Agron. J. 78: 1053-1058.

69) **Achorro, P., Ortiz, A. and Cerda. A. 1994.** Implications of calcium nutrition on the response of *Phaseolus vulgaris* L. to salinity. Plant Soil. 159: 205- 212.

70) **Agarie, S., Uchida, H., Agata, W., Kubota. F. and Kaufamn. B. 1993.** Effect of silicon on growth, dry matter production and photosynthesis in rice (*Oryza sativa* L.). Crop Produc. Improv. Tech. 34: 225-234.

71) **Agarwal, S., Sairam, R.K., Srivastava, G.C. and Meena, R.C. 2005.** Changes in antioxidant enzymes activity and oxidative stress by abscisic acid and salicylic acid in wheat genotypes. Bio. Plant. 49(4): 541-550.

72) **Ahmadi, J., Seyfi, M.M. and Amini, M. 2012.** Effect of spraying micronutrients Fe, Zn and Ca on grain and oil yield of sesame (*Sesamus indicum* L.) varieties. Electronic J. Crop Product. 5: 115-130.

73) **Akpan-Iwo, G., Idowu, A.A. and Misari, S.M. 2007.** Collection and evaluation of sesame (*Sesamum* spp.) germplasm in Nigeria. PGR Newsletter.142: 59-62.

74) **Akram, M.S., Athar, H.R., Ashraf, M. and Pak, J. 2007.** Improving growth and yield of sunflower (*Helianthus annuus* L.) by foliar application of potassium hydroxide (KOH) under salt stress. Plant Sci. 27: 196- 207.

75) **Alhendawi, R.A., Römheld, V., Kirkby, E.A. and Marschner, H. 2004.** Influence of increasing bicarbonate concentration on plant growth, organic acid accumulation in roots and iron uptake by barley, sorghum and maize. Plant Nutr. 20:1731–1753.

76) **Alonso, R., Elvira, F., Castillo, B. and Gimeno, D. 2001**. Interactive effects of ozone and drought stress on pigments and activities of antioxidative enzymes in pinus halepensis. Plant cell Environ. 24: 905-916.

77) **Arasimowics, M. and Wieczoorek, J.F. 2007.** Nitric oxide as a bioactive signaling molecule in plant stress responses. Plant Sci. 172: 876- 887.

78) **Arnon, D.I. 1949.** Copper enzymes in isolated chloroplasts polyphenoloxidase in beta vulgaris. Plant Physiol. 24: 1-14.

79) **Asada, K. 2000.** The water-water cycle as alternative photon and electron sinks. Phill. Trans. R. Soc. Lond. B. 355:1419-1431.

80) **Ashraf, M. and Oleary, W. 1996.** Response of some newly developed salt tolerant genotypes of spring wheat to salt stress, Yield components and ion distribution. J. Agron. 176: 91-101.

81) **Ashraf, M. 2001.** The effect of NaCl on water relations, chlorophyll, and protein and proline contents of two cultivars of blackgram (*Vigna mungo* L.). Plant and soil. 119: 205-210.

82) **Ashraf, M.A., Ashraf, M. and Shahbaz, M. 2012.** Growth stage-based modulation in antioxidant defense system and proline accumulation in two hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars differing in salinity tolerance. Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants. 192: 98-112.

83) **Ashraf, M. and Neilly, T. 2004.** Salinity tolerance in brassica oilseeds. Critical Rev. of Plant Sci. 23: 157- 174.

84) **Ashraf, M. And Harris, P.J. 2004.** Potential biochemical indicators on salinity tolerance in plants. Plant Sci. 166: 4- 16.

85) **Asish Kumar, k. and Bandhuds, P. 2005**. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. Ecotoxicol Environ. Saf. 60: 324-349.

86) **Attarzadeh, M., Rahimi, A. and Torabi, B. 2016.** Response of chlorophyll, relative water content and protein persentage of safflower leaves to salinity and foliar calcium, potasium snd magnesium applications. J. crop physiol. 35(1): 269-282.

87) **Banuls, J., Legaz, F. and Primo-Milo, E. 1991.** Salinity- calcium intractions on growth and ionic concentration of citrus plants. Plant Soil. 133: 39-46.

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

89) **Bavita, A., Shashi, B. and Navtej, S. 2012.** Nitric oxide alleviates oxidative damage induced by high temperature stress in wheat. Indian J. Exp. Biol. 97: 372-378.

90) **Bazrafshan, A.H. and Ehsanzadeh, P. 2016.** Evidence for differential lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities in *Sesamum indicum* L. genotypes under NaCl salinity. JAST. 18: 207-222.

91) **Bahrani, A. 2013.** Effect of salinity on growth, ions distribution, accumulation and chlorophyll concentrations in two canola (*Brassica napus* L.) cultivars. American-Eurasian J. Agric. Environ. Sci. 13: 683-689.

92) **Beck, E.H., Fettig, S., Knake, C., Hartig, K. and Bhattarai, T. 2004**. Specific and unspecific responses of plants to salinity and drought stress. J. Biosci. 32(3): 501-510.

93) **Beligni, M.V. and Lamattina, L. 2001.** Nitric oxide in plants: the history is just beginning. Plant Cell Environ. 24: 267-278.

94) **Beligni, M.V. and Lamattina, L. 2000.** Nitric oxide stimulates seed germination and de-etiolation, and inhibits hypocotyls elongation, three light inducible responses in plants. Planta. 210: 215-221.

95) **Beligni, M. Laxalt, A. 1989.** Temporal and spatial patterns of GAPDHc mRNA accumulation during an incompatible potato-Phytophthora infestans interaction. Comparison with a compatible interaction. Plant biology. 105: 280- 287.

96) **Beligni, M.V. and Lamattina, L. 1999.** Nitric oxide counteracts cytotoxic processes mediated by reactive oxygen species in plant tissues. Planta. 208: 337-344.

97) **BernardoMurillo-Amadora, G., Jones, B., CengizKayac, R. and López, A. 2006.** Effects of foliar application of calcium nitrate on growth and physiological attributes of cowpea (*Vigna unguiculata* L.) grown under salt stress. Environ. Exp. Bot. 15(3): 188-196.

98) **Bhattacharjee, A., Kanp, A.K., Chakrabarti, D. and Pati, C.K. 2006.** Technique for storage longevity of mung bean and sunflower seeds using sodium dikegulac and eucalyptus oil. Bangladesh J. Bot. 35(1):55-61.

99) **Bian, M., Zhou, M., Sun, D. and Li, C. 2013.** Molecular approaches unravel the mechanism of acid soil tolerance in plants. Crop J. 1: 91-104.

100) **Biao, G., Lia, X.S., Bloszies, D., Wen, S., Sun, M., Wei, Y., Li, F., Yang, Q., Shi, L. and Wang, X. 2014.** Sodic alkaline stress mitigation by interaction of nitric oxide and polyamines involves antioxidants and physiological strategies in *Solanum lycopersicum*. Free Radical Biol. Medic. 71: 36-48.

101) **Bloch, K.E., Shichman, M., Vorobeychik, D. and Vardi, P. 2007.** Catalase expression in pancreatic alpha cells of diabetic and non-diabetic mice. Cell Biol. 127:227-232.

102) **Borsani, O., Valpuesta,V. and Butella, M.A. 2001.** Evidence for the role of salisylic acid in the oxidative damage generated by NaCl and osmotic stress in Arabidopsis seedlings. Plant Physiol. 126: 1024-1030.

103) **Bor, M., Ozdemir, F. and Tutkan, I. 2002.** The effect of salt stress on lipid peroxidation and antioxidants in leaves of sugar beet and wild beet (*Beta maritima* L.). Plant Sci. 164: 77-84.

104) **Boyarshinov, A.V. and Asfova, E.V. 2011.** Stress responses of Wheat leaves to dehydration participation of endogenous NO and effect of sodium nitroprusside. Russian J. plant physiol. 58: 1034-1039.

105) **Breusegem, F.V., Vranova, E., Dat, J. and Inze, D. 2001.** The role of active oxygen species in plant signal transduction. Plant Sci. 161: 405-414.

106) **Bybordi, A., Tabatabaei, S.J. and Ahmedov, A. 2010.** Effects of salinity stress on fatty acids composition of Canola (*Brassica napus* L.). Food Agri J. 8: 113-115.

107) **Candan, N. and Tarhan, L. 2003.** The correlation between antioxidant enzyme activities and lipid peroxidation levels in Mentha pulegium organs grown in Ca2+, Mg2+, Cu2+, Zn2+ and Mn2+ stress conditions. Plant Sci. 163: 769-779.

108) **Chai,T., Fadzillah, N.M., Kusnan, M. and Mahmood, M. 2005.** Water stress-induced oxidative damage and antioxidant responses in micropropagated banana plantlets. Biol. Plant. 49: 153–156.

109) **Chen, J., Liu, X., Wang, S.S., Yin, X.L., Hu, M., Simon, Z.J., Shen, Q., Xiao, C. C., Chuo, X., Peng, X. and Zheng. H.L. 2015.** Nitric oxide ameliorates zinc oxide nanoparticles-induced phytotoxicity in rice seedlings. J. Hazar Mat. 297: 173-182.

110) **Chung, H.T., Pae, H.O., Choi, B.M., Billiar, T.R. and Kim, Y.M. 2001.** Nitric oxide as a bioregulator of apoptosis. Biochem. Biophys. Res. Commun. 282: 1075-1079.

111) **Clark, D., Durner, J., Navarre, D.A. and Klessig, D.F. 2000.** Nitric oxide inhibition of tobacco catalase and ascorbate peroxidase. Mol Plant Microbe Interact. 13: 1380-1384.

112) **Corpas, F.J., Leterrier, M., Valderrama, R. and Airaki, M. 2011.** Nitric oxide imbalance provokes a nitrosative response in plants under abiotic stress. Plant Science. 181 : 604– 611.

113) **Crawford, N.M. and Guo, F.Q. 2005.** New insights into nitric oxide metabolism and regulatory functions. Trends Plant Sci. 10: 195-200.

114) **Dabuxilatu, S. and Ikeda, M. 2005.** Interactive effect of salinity and supplemental calcium application on growth and ionic concentration of soybean and cucumber plants. Soil Sci. Plant Nutri. 51: 549-555.

115) **Davenport, R.J., Reid, R.J. and Smith, F.A. 1997.** Sodium- calcium interactions in two wheat species differing in sality tolerance. Physiol. Planta. 99: 323- 327.

116) **David, A., Yadav, S., Baluska, F. and Bhatla, S.C. 2015.** Nitric oxide accumulation and protein tyrosine nitration as a rapid and long distance signalling response to salt stress in sunflower seedlings. Nitric Oxide. 50: 28-37.

117) **Del Rio, L.A., Corpas, F.J. and Barroso, J.B. 2004.** Nitric oxide and nitric oxide synthase activity in plants. Phyto. chem. 65: 783-792.

118) **DePascale, S., Ruggiero, C. and Barbieri, G. 2005.** Physiological responses of pepper to salinity and drought. J. Ame. Soci. Sci. 128: 48-54.

119) **Derio, W. 2006.** Water reiations in wheat leaves as screening tests for rought resistance. Canadian J. Plant Sci. 55: 369-378.

120) **Dordas, D. 2009.** Foliar application of calcium and magnesium improves growth, yield and essential oil yield of oregano (*Origanum vulgare* ssp.). Indus Crops Produc. 29: 599 – 608.

121) **Dong, Y., Chen, W., Bai, X., Liu, F. and Wan, Y. 2017.** Effects of exogenous nitric oxide and 24-Epibrassinolide on physiological characteristics of peanut under cadmium stress. Pedosphere. 18: 1-22.

122) **Duan, B., Yang, Y., Lu, Y., Korpelainen, H., Berninger, F. and Li, C. 2007.** Interaction between drought stress, ABA and genotypes in picea asperata. J. of Exp. Bot. 58: 3025-3036.

123) **Eiberger, M. Haefs, R. and Noga, G. 2002.** Calcium deficiency-Influence on the antioxidative defense system in tomato plants. J. Plant Physiol. 159: 733- 742.

124) **Ekiz, H. and Yilmaz, A. 2003.** Determination of the salt tolerance of some barley genotypes and the characteristics affecting tolerance.Tturk. J. Agric. 27: 253-260.

125) **Esfandiari, E., Shekari, F. and Esfandiari, M. 2007.** The effect of salt stress on antioxidant enzymes activity and lipid peroxidation on the wheat seedling. Not. Bot. Hortic. Agrobot. Cluj. 35: 48-56

126)**Fadzilla, N.M., Finch, R.H. and Burdon, R.H. 1997.** Salinity, oxidative stress and antioxidant responses in shoot cultures of rice. J. Exp. Bot. 48: 325-331.

127)**Fahad, S., Hussain, S., Matloob, A., Khan, F.A., Khaliq, A., Saud, S., Hassan, S., Shan, D., Khan, F., Ullah, N. and Faiq, M. 2015.** Phytohormones and plant responses to salinity stress: a review. Plant Growth Regul. 75(2): 391-404.

128)**FAO stat Agriculture Data, 2015**. Available at: http://faostat.fao.org (last accessed 20 October 2015).

129)**Farooq, M., Basra, S.M.A., Wahid, A. and Rehman, H. 2009.** Exogenously applied nitric oxide enhances the drought tolerance in fine grain aromatic rice. J. Agron. Crop Sci. 195: 254-261.

130)**Fathi, A., Zahedi, M., Torabian, S. and Khoshgoftar, A. 2017**. Response of wheat genotypes to foliar spray of ZnO and Fe2O3 nanoparticles under salt stress. J. Plant Nutri. 40(10): 1376-1385.

131)**Fathi, A., Zahedi, M. and Torabian, S. 2017**. Effect of interaction between salinity and nanoparticles (Fe2O3 and ZnO) on physiological parameters of *Zea mays* L. J. Plant Nutri. 40(19): 2745-2755.

132)**Faize, M., Burgos, L., Faize, L., Piqueras, A., Nicolas, E., Barba-Espin, G., Clemente-Moreno, M.J., Alcobendas, R., Artlip, T. and Hernandez, J.A. 2011.** Involvement of cytosolic ascorbate peroxidase and Cu/Zn-superoxide dismutase for improved tolerance against drought stress. J. Exp. Bot. 62: 2599–2613.

133)**Feng, Z., Jin-Kui, G., Ying-Li, Y., Wen-Liang, H. and Li-Xin, Z. 2004.** Changes in the pattern of antioxidant enzymes in wheat exposed to water deficit and rewatering. Acta Physiol. Plant. 26: 345-352.

134)**Flowers, T.J., Troke, P.F. and Yeo, A.R. 1997.** The mechanism of salt tolerance in halophytes. Ann. Rev. Plant Physiol. 28: 89-121.

135)**Flowers, T.J. and Colmer, T.D. 2008.** Salinity tolerance in halophytes. New Phyto. 179: 945-963.

136)**Gaballah, M.S., Leila, B.A., El-Zeiny, H.A. and Khalil, S. 2007.** Estimating the performance of salt stressed sesame plant treated with antitranspirants. J. Appl. Sci. Res. 3: 811-817.

137) **Gamble, P.E. and Burke, J.J. 1984.** Effect of water stress on the chloroplast antioxidant system alterations in glutathione reductase activity. Ame. Soci. Plant Biol. 76: 615- 621.

138) **Garland, C.J. and Wilkins, D.A. 1981.** Effect of calcium on the uptake and toxicity of lead in hordeum vulgare and festuca ovina. New Phyto. 87: 581-593.

139) **Ghorham, J. 1996.** Salt tolerance in the triticeae: ion discrimination in rye and triticale. J. Exp. Bot. 41: 609- 614.

140) **Ghoulam, C., Foursy, A. and Fares, K. 2002.** Effects of salt stress on growth, inorganic ions and proline accumulation in relation to osmotic adjustment in five sugar beet cultivars. Environ. Exp. Bot. 47: 39-50.

141) **Giba, Z., Grubišić, D., Todorović, L., Sajc, S. and Konjević, K. 1998.** Effect of nitric oxide releasing compounds on phytochrome controlled germination of Empress tree seeds. Plant Growth Regul. 26: 175- 184.

142) **Gilroy, S., Białasek, M., Suzuki, N., Górecka, M., Devireddy, A. R., Karpiński, S. and Mittler, R. 2016.** ROS, calcium, and electric signals: key mediators of rapid systemic signaling in plants. Plant physiol. 171(3): 1606-1615.

143) **Gong, B., Miao, L., Kong, W., Bai, J. G., Wang, X., Wei, M. and Shi, Q. 2014.** Nitric oxide, as a downstream signal, plays vital role in auxin induced cucumber tolerance to sodic alkaline stress. Plant physiol. biochem. 83: 258-266.

144) **Gracia Mata, C., Gray, R., Sokolovski, S., Hills, A., Lamattina, L. and Blatt, M. R. 2003.** Nitric oxide regulates K+ and CL- channels in gard cells through a subset of abscisic acid evoked signaling path ways. Proc. Nail. Acad. Sci. U.S.A. 100: 116-121.

145) **Gracia Mata, C. and Lamattina, L. 2001.** Nitric oxide induces stomatal closure and enhances the adaptative plant responses against drought stress. Plant Physiol. 126: 1196-1204.

146) **Gracia Mata, C. and Lamattina, L. 2002.** Nitric oxide and abscisic acid cross talk in guard cells. Plant Physiol. 128: 790-792.

147) **Greenway, H. and Munns, R. 1980.** Mechanisms of salt tolerance in nonhalophytes. Ann. Rev. Plant Physiol. 31: 141-190.

148)**Halliwell, B. 1999.** Antioxidant defense mechanism from the beginning to the end. Free Radical Res. 31:261-272.

149)**Hamada, A.M. 1996.** Effect of NaCl, water stress or both on gass exchange and growth of wheat. Biologia Planta. 38: 405-412.

150)**Harindra Champa, W.A., Gill, M.I.S., Mahajan, B.V.C. and Bedi, S. 2015.** Exogenous treatment of spermine to maintain quality and extend postharvest life of table grapes (*Vitis vinifera* L.) Lame seedlings under low temperature storage. Food Sci. Technol. 60(1): 412-419.

151)**Hare, P.D. and Cress, W.A. 1997.** Metabolic implications of stress-induced proline accumulation in plants. Plant Growth Regul. 21: 79-102.

152)**Havaux, M.B., Ksas, A., Szewczyk, D., rumeau, F., Francks, F., Caffarri, S. and Triantaphylides, C. 2009.** Vitamin B6 deficient plants display increased sensitivity to high light and photo-oxidative stress. Plant Biol. 35:168-177.

153)**Hawkins, H.J. and Lewis, O.A.M. 1993.** Combination effect of sodium chloride salinity, nitrogen from and calcium concentration on the growth. ionic content and gaseous exchange properties of triticum aestivum. New Phytol. 124: 167-170.

154)**Heath, L.R. and Packer, L. 1968.** Photoperoxidation in isolated chloroplasts, Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. Arch. Biochem. Biophys. 125: 189-198.

155) **Holtekjlen, A. Kinitz, C. and Knutsen, S.H. 2006.** Flavanol and bound phenolic acid contents in different barley varieties. J. Agric. food chem. 54: 2253-2260.

156)**Hung, K.T. and Kao, C.H. 2003.** Nitric oxide counteracts the senescence of rice leaves induced by abscisic acid. J. Plant Physiol. 160(8): 871-879.

157) **Huang, J. and Redmann, R.E. 1995.** Responses of growth, morphology, and anatomy to salinity and calcium supply in cultivated and wild barley. Canadian J. Bot. 73(12): 1859-1866.

158) **Hu, Y. and Schmidhalter, U. 2005.** Drought and salinity: A comparison of their effects on mineral nutrition of plants. J. Plant Nutri. Soil Sci. 168(4): 541-549.

159)**Hussian, I.R., Ahmad, M., Farooq, M., Rehman, A., Amin, M. and Bakar, M.A. 2014.** Seed priming: a tool to invigorate the seeds. Sci. Agric. 7(3): 122-128.

160) **Hussain, T.M. Chandrasekhar, T., Hazara, M., Sultan, Z., Saleh, B.Z. and Gopal, G.R. 2003.** Recent advances in salt stress biology. Biotechnol. Mol. Biol. Rev. 3: 8–13.

161) **Ineso, C., Cardoso, G.S., Terezinha, D.F.F. and Corniani, N. 2015.** Nitric oxide reduces oxidative damage induced by water stress in sunflower plants. Bragantia Campinas. 74: 200-206.

162) **Israr, M. and Sahi, S.V. 2006.** Antioxidative responses to mercury in the cell cultures of *Sesbania drummondi*. Plant Physiol. Biochem. 44: 590-595.

163) **James, R.A. 2002.** Factors affecting CO2 assimilation, leaf injury and growth in salt-stressed durum wheat. Functional Plant Biol. 29: 1393-1403.

164) **Jamil, M., Lee, D., Jung, K.Y., Ashraf, M., Lee, S.C. and Rha, E.S. 2004.** Effect of salt stress on germination and early seedling growth of four vegetables species. J. Cent. Eur. Agric. 23: 323-331.

165) **Jamil, M., Bae Lee, D., Yony Jun, K., Ashraf, M. and Chin, S. 2006.** Effect of salt (NaCl) stress on germination and early seedling growth of four vegetables species. J. Agric. 7: 273-282.

166) **Jin, J., Shan, N., Ma, N., Bai, J. and Gao, J. 2006.** Regulation of ascorbate peroxidase at the transcript level is involved in tolerance to postharvest water deficit stress in the cut rose (*Rosa hybrida* L.). Samantha Postharvest Bio. Tech. 40: 236–243.

167) **Juan, M., Rievero, R.M., Romero, L. and Rui, Z.J.M. 2005.** Evaluation of some nutritional and biochemical indicators in selecting salt resistance tomato cultivars. Environ. Exp. Bot. 54: 193-201.

168) **Kaiser, W.M., Weiner, H., Kandibimder, A., Tsai, C.B., Rockel, P., Sonoda, M. and Planchet, E. 2002.** Modulation of nitrate reductase. Some new insights an unusual case and a potentially important side reaction. J. Exp. Bot. 53:875-882.

169) **Kaur, H. and Satish Bhatla, C. 2016.** Melatonin and nitric oxide modulate glutathione content and glutathione reductase activity in Sunflower seedling cotyledons accompanying salt stress. Nitric Oxide. 59: 42-53.

170)**Kayaa, C. and Ashraf, M. 2015.** Exogenous application of nitric oxide promotes growth and Oxidative defense system in highly boron stressed tomato plants bearing fruit. Sci. Hort. 185: 43-47.

171)**Kenneth, K.T. 1990.** Plant responses to saline and sodic condition. PP: 113-138. In: Agricultural salinity assessments and management. Scientific publishers.

172)**Keles, Y. and Unyayar, S. 2004.** Responses of antioxidant defense system of *Hlianthus annus* to abscisic acid treatment under drought and waterlogging. Acta Physiol. Plant. 26: 149-156.

173)**Khan, M.A., Shirazi, M.U., Khan, M., Mujtaba, S., Islam, E., Mumtaz, S., Shereen, A., Ansari, R. and Ashraf, M. 2010.** Role of proline, K+/Na+ ratio and chlorophyll content in salt tolerance of wheat. Pak. J. Bot. 41: 633-638.

174)**Kishor, P.B.K. 2005.** Regulation of proline biosynthesis, degradation, uptake and transport in higher plants: its implications in plant growth and abiotic stress tolerance. Curr. Sci. 88: 424-438.

175)**Koca, H., Bor, M., Ozdemir, F. and Turkan. I. 2006.** The effect of salt stress on lipid peroxidation, antioxidative enzymes and proline content of sesame cultivars. Environ. Exp. Bot. 60:344-351.

176)**Koca, H., Bor, M., Özdemir, F. and Türkan, I. 2007.** The effect of salt stress on lipid peroxidation, antioxidative enzymes and proline content of sesame cultivars. Environ. Exp. Bot. 60(3): 344-351.

177)**Kopyra, M. and Gwóźdź, E.A. 2003.** Nitric oxide stimulates seed germination and counteracts the inhibitory effect of heavy metals and salinity on root growth of *Lupinus luteus*. Plant Physiol. Biochem. 41 : 1011–1017.

178)**Kumr, V., Shriram, V., Nikam, T.D., Narendra, J. and Shitole, M.G. 2011.** Sodium Chloride-induced changes in mineral nutrients and proline accumulation in indica rice cultivars differing in salt tolerance. J. Plant Nutr. 31: 1999-2017.

179)**Kumar Pal, P., Prasad, R. and Pathania, V. 2013.** Physiology Effect of decapitation and nutrient applications on shoot branching, yield and accumulation of secondary metabolites in leaves of *Stevia reballodiana* Bertoni. J. Plant Physiol. 170: 1526-1535.

180) **Kumar, V., Shiram, V., Jawali, N. and Shitole, M.G. 2007.** Differential response of indica rice genotypes to NaCl stress in relation to physiological and biochemical parameters. Arch. Agron. Soil Sci. 53: 581-592.

181) **Lamattina, L., García-Mata, C., Graziano, M. and Pagnussat, G. 2004.** Nitric Oxide: The versatility of an extensive signal molecule. Plant Biol. 54:109-136.

182) **Langham, D.R., Smith, G., Wiemers, T. and Riney, J. 2006.** Southwest sesame grower's pamphlet. Sesaco Corporation. San Antonio, Texas. 350 p.

183) **Laspina, N.V., Groppa, M.D., Tomaro, M.L. and Benavides, M.P. 2005.** Nitric oxide protects sunflower leaves against Cd-induced oxidative stress. Plant Sci.169: 323-330.

184) **Leshem, Y.Y. and Pinchasov, Y. 2000.** Non-invasive photoacoustic spectroscopic determination of relative endogenous nitric oxide and ethylene content stoichiometry during the ripening of strawberries Fragaria ananasa and avocados persea americana. J. Exp. Bot. 51: 1471-1473.

185) **Leshem, Y.Y., Haramaty, E., Iiuz, D., Mali, K.Z., Sofer, Y. and Roitman, L. 1997.** Effect of stress nitric oxide: interaction between cholorophyll fluorescence, galactolipid fluidity and lipoxygenase activity. Plant Physiol. Biochem. 35: 573-579.

186) **Leshem, Y.Y. 1996.** Nitric oxide in biological systems. Plant Growth Regul. 18: 155-159.

187) **Leshem, Y.Y. and Haramaty, E. 2000.** The characterization and contrasting effects of the nitric oxide free radical in vegetative stress and senescence of *Pisum sativum* Linn Foliage. J. Plant Physiol. 148: 258-263.

188) **Leshem, Y.Y., Wills, R.B.H. and Ku, V.V.V. 1998.** Evidence for the function of the free radical gas nitric oxide as an endogenous maturation and senescense regulating factor in higher plants. Plant Physiol. Biochem. 36: 825-833.

189) **Lehmann, S. 2010.** Proline metabolism and transport in plant development. Amino Acids J. 39: 949-962.

190)**Li, H., Sun, Y.L., Yu, X.H., Guo, H.P., Lian, H.F., Sun, X.D., Shi Q. H. and Liu S. Q. 2015.** Effects of exogenous calcium on the growth and physiological traits of garlic seedlings under cadmium stress. J. Animal Plant Sci. 25: 107-113.

191)**Li, Q.Y., Niu, H.B., Yin, J., Wang, M.B., Shao, H.B., Deng, D.Z., Chen, X.X., Ren, J.P. and Li, Y.C. 2008.** Protective role of exogenous nitric oxide against oxidative-stress induced by salt stress in barley (*Hordeum vulgare* L.). Colloids Surf. Biointerfaces. 56: 220-225.

192)**Liu, J., Guo, W.Q. and Shi, D.C. 2014.** Seed germination, seedling survival, and physiological response of sunflowers under saline and alkaline conditions. Photosynthetica. 48: 278-286.

193)**Lopez, A.I., Castellano, R., Rosales, M.A., Ruiz, J.M. and Romero, L. 2008.** Role of nitric oxide under saline stress: implication on proline metabolism. J. Biologia Plantarum. 52(3): 587-591.

194)**Lutts, S., Majerus, V. and Kinet, J.M. 1999.** NaCl effect on proline metabolism in rice seedlings. Plant Physiol. 105: 450-45S.

195)**Lynch, H. and Lauchli, A. 1985.** Salt stress disturbs the calcium nutrition of barely (*HordiumVulgary* L.). New phytologist. 99(3): 345-354.

196)**Magdy, A.S., Hassan, H., Alia, M.M., Namich, A.M. and Ibrahim. A.A. 2012.** Effect of sodium niroprusside, putrescine and glycine betaine on alleviation of drought stress in cotton plant. American-Eurasian J. Agric. Environ. Sci. 12: 12-12.

197)**Maguire, J.D. 1962.** Seed of germination aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigour. Crop Sci. 2: 176-178**.**

198)**Mahmoodzadeh, H. 2008.** Comparative study of tolerant and sensitive cultivars of *Brassica napus* in response to salt conditions. Asian J. Plant Sci. 7(6): 594-598.

199)**Mahmood, S., Iram, S. and Athar, H.R. 2003.** Intra-specific variability in sesame (*Sesamun Indicum* L.) for various quantitative and qualitative attributes under differential salt regimes. J. Res. (Science).72: 102-113.

200)**Maksimović, I., Putnik-Delić, M., Gani, I., Marić, J. and Ilin, Ž. 2010**. Growth, ion composition, and stomatal conductance of peas exposed to salinity. Open Life Sci. 5(5): 682-691.

201) **Manaaa, A., Gharbia, E., Mimounia, H., Wastia, S., Aschi-Smitia, S., Luttsb, S. and Ben a Ahmeda, H. 2014.** Simultaneous application of salicylic acid and calcium improves salt tolerance in two contrasting tomato (*Solanum lycopersicum* L.) cultivars. South African J. Bot. 95: 32-39

202) **Manai, J., Gouia, H. and Corpas, F.J. 2014.** Redox and nitric Oxide homeostasis are affected in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) roots under salinity-induced oxidative Stress. J. Plant Physiol. 171: 1028-1035.

203) **Mata, C. and Lamattina, L. 2001.** Nitric oxide induces stomatal closure and enhances the e plant adaptive responses against drought stress. Plant Physiol. 126: 1196-1204.

204) **Meloni, D.A., Oliva, M.A., Martinez, C.A. and Cambraia, J. 2003.** Photosynthesis and activity of superoxide dismutase, peroxidase and glutathione reductase in cotton under salt stress. Environ. Exp. Bot. 49: 69–76.

205) **Mengel, K. 2016**. Handbook of plant nutrition. CRC Press. New York. 675 p.

206) **Misra, A.N., Biswal, A.K. and Misra, M. 2002.** Physiological, biochemical and molecular aspects of water stress responses in plants and the biotechnological application. Proc. Nat. Acad. Sci. 2: 115-134.

207) **Misra, N. and Saxena, P. 2009.** Effect of salicylic acid on proline metabolism in lentil grown under salinity stress. Plant Sci. 177: 181-189.

208) **Mittler, R. 2002.** Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. Trends Plant Sci. 7: 405-410.

209) **Mittler, R., Vanderauwera, S., Gollery, M. and Breusegem, F.V. 2004.** Reactive oxygen gene network of plants. Trends Plant Sci. 9: 490-498.

210) **Mittova, V., Guy, M., Tal, M. and Volokita, M. 2004.** Salinity up-regulates the antioxidative system in root mitochondria and peroxisomes of the wild salt tolerant tomato species *Lycopersicon pennellii*. J. Exp. Bot. 55: 1105-1113.

211) **Monica, R.C. and Cremonini, R. 2009.** Nanoparticles and higher plants. Caryologia. 62: 161-165.

212)**Mohammadi, H., Poustini, K. and Ahmadi, A., 2008.** Root nitrogen remobilization and ion status of two alfalfa (*Medicago sativa* L.) cultivars in response to salinity stress. J. Agro. Crop Sci. 194(2): 126-134.

213)**Morris, J.B. 2002.** Food, industrial, nutraceutical and pharmaceutical uses of sesame genetic resources. ASHS Press. Alexandria. 390 p.

214)**Munns, R. 2002.** Comparative physiology of salt and water stress. Plant Cell Environ. 25: 239–250.

215)**Munns, R. and Tester, M. 2008.** Mechanisms of salinity tolerance. Annual Rev. Plant Biol. 59: 651– 681.

216)**Munns, R. 2005.** Genes and salt tolerance: bringing them together. New Phytol. 167: 645-663.

217)**Munns, R. and Gilliham, M. 2015**. Salinity tolerance of crops–what is the cost?. New Phytol. 208(3): 668-673.

218)**Murphy, C.D., Moore, R.M. and White, R.L. 2002.** Peroxidases from marine microalgae. J. Appl. Phytol. 12: 507-513.

219)**Mutlu, F. and Bozcuk, S. 2005.** Effects of salinity on the contents of polyamines and some other compounds in Sunflower plants differing in salt tolerance. Russian J. Plant Physiol. 52: 29-34.

220)**Nasir Khan, M., Siddiqui, M.H., Mohammad, F., Masroor, M., Khan, A. and Naeem, M. 2007.** Salinity induced change in growth, enzyme activities, photosynthesis, proline accumulation and yield in linseed genotypes. J. Agric. Sci. 3: 685-689.

221)**Nasir Khan, M., Mobin, M., Abbas, Z.K., AI Mutairi, K.A. and Siddiqui, Z.H. 2017.** Role of nanomaterials in plants under challenging environments. Plant Physiol. Biochem. 110: 194-209.

222)**Neeta Patil, M. 2012.** Adaptations in response to salinity in safflower. Asian J. crop Sci. 4: 50-62.

223)**Neill, S., Desikan, R. and Hancock, J. 2002.** Hydrogen peroxide signaling. Curr. Opin. Plant Biol. 5: 388-395.

224) **Neill, S., Barros, R., Bright, J., Desikan, R., Hancock, J., Harrisan, J., Morris, P., Ribeiro, D. and Wilson, I. 2008.** Nitric oxide, stomatal closure, and abiotic stress. J. Exp. Bot. 59: 165-176.

225) **Nemat Alla, M.M. and Hasan, N.M. 2014.** Alleviation of isoproturon toxicity to wheat by exogenous application of glutathione. Pestic. Biochem. Physiol. 112: 56-62.

226) **Neto, A.D., Prisco, J.T., Eneas-Filho, J., Abreu, B. and Gomes-Filho, E. 2005.** Effect of salt stress on antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of salt-tolerant and salt-sensitive maize genotypes. Environ. Exp. Bot. 56:87-94.

227) **Netondo, G.W., Beck, E. and Onyango, J.C. 2004.** Sorghum and salinity. Crop Sci. 44: 797-805

228) **Noctor, G. and Foyer, C.H. 1998.** Ascorbate and glutathione: Keeping active oxygen under control. Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Molecul. Biol. 49: 249–279

229) **Nonami, H., Yajun, W. and Boyer, J.S. 1997.** Decreased growth-induced water potential. Plant Physiol. 114: 501-509.

230) **Noor, E., Azhar, F.M. and Khan, A. 2001.** Differences in responses of *Gossypium hirsutum* L. varieties to NaCl salinity at seedling stage. Int. J. Environ. Agric. Res. 38: 345- 347.

231) **Pandey, A.C., Sanjay, S.S. and Yadav, R.S. 2010.** Application of ZnO nanoparticles in influencing the growth rate of *Cicer arietinum*. J. Exp. Nanosci. 5: 488-497.

232) **Pandey, V.K. and Saxena, H. 1987.** Effects of soil salinity on chlorophyll, photosynthesis, respiration and ionic composition at various growth stages in paddy. Indian J. Agric. Chem. 20: 49-155.

233) **Paparella, S., Araujo, S., Rossi, G., Wija Yasingh, M., Carbonera, D. and Balestrazzi, A. 2015.** Seed priming: State of the art and new perspectives. Plant Cell Rep. 25: 98-105.

234) **Parida, A.K. and Das, A.B. 2005**. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. Ecotoxicol environ. Saf. 60(3): 324-349.

235)**Pessarakli, M. 2016.** Handbook of plant and crop stress. CRC press. 157 p.

236)**Polleskaya, O.G., Kashirina, E.I. and Alekhina, N.O. 2002.** Changes in activity of antioxidant enzymes in wheat leaves and roots as a function of nitrogen source and supply. Rus. J. Plant Physiol. 51: 615-620.

237)**Postini, K. and Rajabi, R. 2005.** Effects of NaCl on thirty cultivars of bread wheat seed germination. J. Agric. Sci Tech. 27: 29-45.

238)**Prasad, T.N.V.K.V., Sudhakar, P., Sreenivasulu, Y., Latha, P., Munaswamy, V., Raja Reddy, K., Sreeprasad, T.S., Sajanlal, P.R. and Pradeep, T. 2012.** Effect of nanoscales zinc oxide on the germination, growth and yield of peanut. J. Plant Nutri. 35: 905-927.

239)**Raid, R.J. and Smith, F.A. 2000.** The limits of sodium-calcium interactions in plant growth. Aust. J. Plant Physiol. 27: 709-715.

240)**Rangel, Z. 1992.** The role of calcium in salt toxicity. Plant Cell Environ. 15: 625-632.

241)**Ranjeva, R., Netendo, A. and Boudet, A.M. 2006**. Phosphorylation of proteins in plants: regulatory effects and potential involvement in stimulus response coupling. Ann. Rev. Plant Physiol. 38(1): 73-94.

242)**Reddy, M.P. and Vora, A.B. 1986.** Change in pigment composition, Hill reaction activity and saccharides metabolism in Bajra (*Penni-setum typhoides* L.) leaves under NaCl salinity. Photosyntetica. 38:615-620.

243)**Reza, H., Shafiq, S.F., Chaudhary, M. and Khan, I. 2013.** Seed invigoration with water, ascorbic and salicylic acid stimulates development and biochemical characters of okra (*Ablemoschus esculentus* L.) under normal and saline conditions. Int. J. Agric. Biol. 15: 486-492.

244)**Rizwan, M., Golam Mostofa, M., Zulfiqar Ahmadd, M., Imtiaz, M., Mehmood, S., Adeel, M., Daia, Z., Lio, Z., Aziza, O., Zhanga, Y. and Tu, S. 2018.** Nitric oxide induces rice tolerance to excessive nickel by regulating nickel uptake, reactive oxygen species detoxification and defense-related gene expression. Chemosphere. 191: 23-35.

245) **Robertson, M.J., Silim, S.N., Chauhan, Y.S. and Ranganathan, R. 2001.** Predicting growth and development of pigeonpea: biomass accumulation and partitioning. Field Crops Res. 70: 89–100.

246) **Rodrigo-Moreno, A., Andres-Colas, N., Poschenrieder, C., Gunse, B., Penarrubia, L. and Shabala. S. 2013.** Calcium- and potassium-permeable plasma membrane transporters are activated by copper in Arabidopsis root tips: linking copper transport with cytosolic hydroxyl radical production. Plant Cell Environ. 36: 844-855.

247) **Rontain, D., Basset, G. and Hanson, A.D. 2002.** Metabolic engineering of osmoprotectant accumulation in plants. Met. Eng. 4: 49-56.

248) **Sadeghi Lotfabadi, S., Kafi, M. and Khazaei, H.R. 2010.** Effects of calcium, potassium and method of application on sorghum (*Sorghum bicolor* L.) morphological and physiological traits in the presence of salinity. J. Soil Water Cons. 24: 385-393.

249) **Sairam, R.K., Rao, K.V. and Srivastava, G.C. 2002.** Differential response of wheat genotypes to long term salinity stress in relation to oxidative stress, antioxidant activity and osmolyte concentration. Plant Sci. 163: 1037- 1046.

250) **Scandalios, J.G., Guan, L.M. and Polidoros, A.N. 1997.** Oxidative stress and the molecular biology of antioxidant defenses. Cold Spring Harbor Lab Press. 23: 343-406.

251) **Seraj, R. and Sinclair, T.R. 2002.** Osmolyte accumulation can it really help increase crop yield under drought conditions. Plant Cell Environ. 25: 333–341.

252) **Shahlaby, E.E., Epstein, E. and Qualset, C.O. 1993.** Variation in salt tolerance among some wheat and triticale genotypes. Crop Sci. 17: 298-304.

253) **Sheokand, S., Bhankar, V. and Sawhney, V. 2010.** Ameliorative effect of exogenous nitric oxide on oxidative metabolism in NACl treated chickpea plants. Brazilian Soc. Plant Physiol. 22: 81-90.

254) **Sheokand, S., Kumari, A. and Sawhney, V. 2008.** Effect of nitric oxide and putrescine on antioxidative responses under NaCl stress in chickpea plants. Physiol. Molecul. Biol. plants. 14(4): 355-362.

255) **Shrivastava, P. and Kumar, R. 2015**. Soil salinity: a serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. Saudi J. Bio. Sci. 22(2): 123-131.

256) **Shi, Q., Fei, D., Xiufeng, W. and Min, W. 2007.** Exogenous nitric oxide protect cucumber roots against oxidative stress induced by salt stress. Plant Physiol. Biochem. 45: 542-550.

257) **Siddiqui, M.H., Al-Whaibi, M.H. and Basalah, M.O. 2011**. Interactive effect of calcium and gibberellin on nickel tolerance in relation to antioxidant systems in *Triticum aestivum* L. Protoplasma. 248(3): 503-511.

258) **Singh, B., Singh, Y., Ladha, J.K., Bronson, K.F., Balasubramanian, V., Singh, J. and Khind, C.S. 2002.** Chlorophyll meter and leaf color chart based nitrogen management for rice and wheat in Northwestern India. Agron. J. 94(4): 821-829.

259) **Sirato-Yasumoto, S., Katsuta, M., Okuyama, Y., Takahashi, Y. and Ide, T. 2001.** Effect of sesame seeds rich in sesamin and sesamolin on fatty acid oxidation in rat liver. J. Agrc. Food Chem. 49: 2647–2651.

260) **Song, Y., Yuanjie, T., Xianyi, W., Wanwan, W. and Zhenli, H. 2017.** Mechanisms of exogenous nitric oxide and 24-epibrassinolide in alleviating iron deficiency stress of peanut seedlings. Pedosphere. 93: 1-17.

261) **Sudhakar, C.P., Reddy, S. and Veerajaneyula, K. 1993.** Effect of salt stress on the enzymes of proline synthesis and oxidation in green gram seedling. J. Plant Physiol. 141: 621-623.

262) **Sudhir, P. and Murthy, S.D. 2004.** Effect of salt stress on basic processes of photosynthesis. Photosantetica. 42: 481- 486.

263) **Sultana, N., Ikeda, T. and Kashem, M.A. 2001.** Effect of foliar spray of nutrient solutions on photosynthesis, dry matter accumulation and yield in seawater-stressed rice. Environ. Exp. Bot. 46: 129-140.

264) **Suna, B., Jingb, Y., Chena, K., Songa, L., Chena, F. and Zhang, L. 2007.** Protective effect of nitric oxide on iron deficiency hnduced oxidative stress in maize (*Zea mays* L.). J. Plant Physiol. 164: 536-543.

265) **Swiader, J.M. 2000.** Micronutrient fertilizer recommendation for vegetable crop. Hortic. facts. 42(2): 21-35.

266) **Taghipour, F. and salehi, M. 2008.** The study of salt tolerance of iranian barley (*hordeom vulgar* L.) genotyps in seedling growth stages. American-Eurasian J. Agric. Environ. Sci. 5: 525- 529.

267) **Taffouo, V.D., Kemdem, J., Ngalangu, L.M.T., Ndjeudji, B.A.N. and Akoa, A. 2009.** Effects of salinity stress on growth, ions partitioning and yield of some cowpea (*Vigna unguiculata* L.). Inter. J. Bot. 2: 135-143.

268) **Tavakoli, F., Vazan, S., Moradi, F., Shiran, B. and Sorkheh, K. 2010.** Differential response of salt-tolerant and susceptible barley genotypes to salinity stress. J. crop Improv. 24(3): 244-260.

269) **Tester, M. and Davenport, R. 2003.** Na+ tolerance and Na+ transport in higher plants. Ann. Bot. 91: 503-527.

270) **Tian, X.R. and Lei, Y.B. 2007.** Physiological responses of wheat seedling to drought and UV-B radiation effect of exogenous sodium nitroprusside application. Plant Physiol. 54: 763-769.

271) **Torabian, S., Zahedi, M. and Khoshgoftar, A.H. 2016**. Effects of foliar spray of two kinds of zinc oxide on the growth and ion concentration of sunflower cultivars under salt stress. J. plant nutri. 39(2): 172-180.

272) **Torabian, S., Zahedi, M. and Khoshgoftar, A.H. 2017.** Effects of foliar spray of nano-particles of FeSO4 on the growth and ion content of sunflower under saline condition. J. Plant Nutri. 40(5): 615-623.

273) **Tuna, A.L., Kaya, C., Ashraf, M., Altunlu, H., Yokas, I. and Yagmur, B. 2007.** The effects of calcium sulphate on growth, membrane stability and nutrient uptake of tomato plants grown under salt stress. Environ. Exp. Bot. 59: 173-178.

274) **Turhan, H. and Ayaz, O.S. 2004.** Assessment of the effect of salinity on the early growth stage of the common sunflower (Sanay cultivar) using spectral discrimination techniques. African J. Biotech. 6: 59-71.

275)**Tuteja, N., Chandra, M., Tuteja, R. and Misra, M.K. 2004.** Nitric oxide as a unique bioactive signaling messenger in physiology and pathophysiology. J. Biomed. Biotech. 4: 227-237.

276)**Tuteja, N. 2007.** Abscisic acid and abiotic stress signaling. Plant Signal Behav. 3: 135-138.

277)**Tu, J., Shen, W.B. and Xu, L.L. 2003.** Regulation of nitric oxide on the aging process of wheat leaves. Act. Bot. Sin. 45: 1055-1062.

278)**Uchida, A., Jagendorf, A.T., Hibino, T., Takabe, T. and Takabe, T. 2002.** Effects of hydrogen peroxide and nitric oxide on both salt and heat stress tolerance in rice. Plant Sci. 163: 515-523.

279)**Uzun, B., Arslan, C. and Furat, C. 2008.** Variation in fatty acid compositions, oil content and oil yield in a germplasm collection of sesame (*Sesamum indicum* L.). J. Ame. Oil Chemists Socie. 85: 1135-1142.

280)**Valentovic, P., Luxova, M., Kolarovi, L. and Gasparikora, O. 2006.** Effect of osmotic stress on compatible solutes content, membrane stability and water relation in two maize cultivars. Plant Soil Environ. 52: 186- 191.

281)**VanHeerden, P.D.R. and Kurger, G.H.J. 2002.** Separately and simultaneously induced dark chilling and drought stress on proline accumulation and antioxidant metabolism in soybean. J. Plant Physiol. 159: 1077-1086.

282)**Vega, D.L., Fernandez, R.P., Mateo, M.C.M., Bustamante, J., Bustamante, A. Herrero, A.M. and Munguira, E.B. 2003.** Study of activity of glutathione-peroxidase, glutathione-transferase and glutathione reductase in renal transplants. Transplantation Proceedings. 35: 1346-1350.

283)**VieraSantos, C. 2004.** Regulation of chlorophyll biosynthesis and degradation by salt stress in sunflower leaves. Sci Hort. 103: 93-99.

284)**Vitecek, J., Wunschova, A., Petrek, J., Adem, V., Kizek, R. and Havel, L. 2007.** Cell death induced by sodium nitroprusside and hydrogen peroxide in tobacco BY- 2 cell suspension. Biol. Plant. 51: 472-479.

285)**Wahid, A., Rasul, E. and Rao, A.R. 1997.** Germination responses of sensitive and tolerance sugarcane lines to sodium chloride. Seed Sci. Tech. 25: 465-470.

286) **Wang, L., Chen, S., Kong, W., Li, S. and Archbold, D. 2004.** Nitro proside alleviates drought stress injury and affects the antioxidant system and heat shock proteins of peaches during cold storage. Postharvest Biol. Tech. 41: 244-251.

287) **Wang, Y.S. and Nil, N. 2005.** Changes in chlorophyll, ribulose bisphosphate carboxylase-oxygenase, glycine betaine content, photosynthesis and transpiration in *Amaranthus tricolor* leaves during salt stress. J. Hort. Sci. Biotech. 75: 623-627.

288) **Wang, C.Q. and Song, H. 2009.** Calcium protects *Trifolium repens* L. seedlings against cadmium stress. Plant Cell reports. 28: 1341-1349.

289) **Wang, Y.S. and Yang, Z.M. 2005.** Nitric oxide rduces aluminum toxicity by preventing oxidative stress in the roots of *Cassia tora* L. Plant Cell Physiol. 46: 1915-1923.

290) **Wattsr, N., Ponka, P. and Richardson, R. 2003.** Effects of nitrogen monoxide and carbon monoxide on molecular and cellular iron metabolism: mirror image effector molecules that tatget iron. Biochem. J. 369: 429-440.

291) **Wendehenne, D., Pugin, A., Klessig, D.F. and Durner, J. 2001.** Nitric oxide: comparative synthesis and signaling in animal and plant cells. Plant Sci. 6: 1360-1385.

292) **White, P.J. 2000.** Calcium channels in higher plants. BBA- Biomembranes. 465: 171-189.

293) **Wieczorek, J.F., Milczarek, G., Arasimovicz, M. and Ciszewski, A. 2006.** Do nitric oxide donors mimic endogenous No- related response in plants. Planta. 224: 1363-1372.

294) **Wilson, I.D., Neill, S.J. and Hancock, J.T. 2008.** Nitric oxide synthesis and sigalling in plants. Plant Cell Environ. 31: 622-631.

295) **Wu, H., Shabala, L., Liu, X., Azzarello, E., Zhou, M., Pandolfi, C., Chen, Z.H., Bose, J., Mancuso, S. and Shabala, S. 2015.** Linking salinity stress tolerance with tissue-specific Na+ sequestration in wheat roots. Frontiers plant Sci. 6: 65-71.

296) **Yang, F., Hong, F.S., You, W.J., Liu, C., Gao, F.Q., Wu, C. and Yang, P. 2006.** Influences of nano-anatase TiO2 on the nitrogen metabolism of growing spinach. Biol. Trace Elem. Res. 110: 179-190.

297) **Yang, C., Xu, H.H., Wang, L., Liu, J., Shi, D.C. and Wang, D. 2009.** Comparative effects of salt-stress and alkaline-stress on the growth, photosynthesis, solute accumulation, and ion balance of barley plants. Photosynthetica. 47: 79-86.

298) **Yang, C., Chong, J., Li, C., Kim, C., Shi, D. and Wang, D. 2007.** Osmotic adjustment and ion balance traits of an alkali resistant halophyte Kochia sieversiana during adaptation to salt and alkali conditions. Plant soil. 294(1-2): 263-276.

299) **Yannarelli, G.G., Gallego, S.M. and Tomaro, M.L. 2006.** Effect of UV-B radiation on the activity and isoforms of enzymes with peroxidase activity in sunflower cotyledons. Environ. Exp. Bot. 56: 174-181.

300) **Zhang, Y., Wang, L., Liu, Y., Zhang, Q., Wei, Q. and Zhang, W. 2006.** Nitric oxide enhances salt tolerance in maize seedlings through increasing activities of proton pump and Na+/H+ antiport in the tonoplast. Planta. 224: 545-555.

301) **Zhang, Z., Pang, X., Duan, X. and Jiang, Y. 2005.** Role of peroxidase in anthocyanin degradation in litchi fruit pericarp. Food Chem. 90: 47-52.

302) **Zheng, C., Jiang, D., Liu, F., Dai, T., Liu, W., Jing, Q.I. and Cao, W. 2009.** Exogenous nitric oxide improves seed germination in wheat against mitochondrial oxidative damage induced by high salinity. Environ. Exp. Bot. 67: 222-227.

303) **Zheo, L., Zhan, F., Guo, J., Yang, Y., Li, B. and Zhang, L. 2004.** Nitric oxide functions a signal in salt resistance in the calluses from two ecotypes of reed. Plant Physiol. 134: 849-857.

304) **Zhu, H., Han, J., Xiao, J.Q. and Jin, Y. 2008.** Uptake, translocation and accumulation of manufactured iron oxide nanoparticles by pumpkin plants. J. Environ. Monitor. 10: 713-717.

پیوست ها

جدول پیوست ۱- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات درصد و سرعت جوانه‌زنی، وزن خشک ساقه‌چه و ریشه‌چه و طول ساقه‌چه و ریشه‌چه تحت تأثیر سطوح سدیم نیتروپروساید و شوری در بخش آزمایشگاهی

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		درصد جوانه‌زنی	سرعت جوانه‌زنی	وزن خشک ساقه‌چه	وزن خشک ریشه‌چه	طول ساقه‌چه	طول ریشه‌چه
سدیم نیتروپروساید (A)	۵	۸۵/۲۷*	۷/۸۱**	۰/۷۸۱**	۱/۸۰**	۱۵۳/۵۳**	۱۵۵/۱**
شوری (B)	۲	۳۳۶۱/۲**	۱۳۱/۴**	۱۲/۱۰**	۷/۴۸**	۴۷۱/۷۵**	۱۴۷۸**
A× B	۱۰	۷۰/۷۴*	۱/۵۹^{ns}	۰/۰۵۴۱^{ns}	۰/۱۳۴^{ns}	۳/۹۱^{ns}	۵/۴۶^{ns}
خطا	۳۶	۳۴/۵۵	۱/۵۷	۰/۱۲۲	۰/۱۰۲	۷/۲۰	۱۹/۸۱
ضریب تغییرات (درصد)	-	۷/۴۲	۱۷/۴۶	۱۳/۶۳	۱۴/۷۷	۱۳/۳۷	۱۴/۸۰

ns، *و **به ترتیب بیانگر معنی‌دار نبودن، معنی‌دار بودن در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد می‌باشد.

جدول پیوست ۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) فعالیت سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، گلوتاتیون ریداکتاز و محتوای مالون دی‌آلدئید تحت تأثیر سطوح سدیم نیتروپروساید و شوری در بخش آزمایشگاهی

منبع	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		سوپراکسید دیسموتاز	کاتالاز	آسکوربات پراکسیداز	گلوتاتیون ریداکتاز	محتوای مالون دی‌آلدئید
سدیم نیترو پروساید(A)	۵	۱۱۰/۶**	۰/۵۴۸**	۲۰/۵۶**	۰/۰۲۲**	۵۳/۰۵**
شوری (B)	۲	۵۸۹/۸**	۴/۳۳**	۲۷۲/۸۴**	۰/۰۵۶**	۳۸۳/۷**
A×B	۱۰	۱۶/۰۴ ^{ns}	۰/۳۲۹**	۱/۹۰ ^{ns}	۰/۰۰۹ ^{ns}	۱۲/۹۲**
خطا	۳۶	۹/۶۵	۰/۰۵۹	۳/۳۸	۰/۰۰۶	۴/۳۲
ضریب تغییرات (درصد)	-	۶/۶۹	۹/۳۲	۴/۰۱	۶/۹۶	۱۰/۴۹

ns، *و **به ترتیب بیانگر معنی‌دار نبودن، معنی‌دار بودن در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد می‌باشد.

جدول پیوست ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات وزن خشک برگ و ریشه، سطح برگ، ارتفاع گیاه و قطر ساقه تحت تأثیر سطوح شوری، سدیم نیتروپروساید و کلسیم در آزمایش گلدانی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		وزن خشک برگ	وزن خشک ریشه	سطح برگ	ارتفاع گیاه	قطر ساقه
بلوک	۲	۰/۰۱ ns	۰/۱۰۴ns	۱۵/۵ns	۱۸/۰ns	۰/۰۰۴ns
تنش شوری (A)	۱	۳۲/۳۵**	۶/۴۶۸**	۱۰۲۱۵۲/۰**	۷۳۶۰/۹**	۱۶/۰۵۶**
سدیم نیتروپروساید (B)	۳	۰/۹۸**	۰/۶۵۵**	۷۵۹۰/۳**	۵۴۰/۷**	۷/۰۵۹**
کلسیم (C)	۲	۳/۳۳**	۰/۸۸۹**	۶۶۰۹/۶**	۸۲۹/۵**	۹/۸۸۲**
A×B	۳	۰/۰۳ ns	۰/۱۸۷ **	۵۹۸/۳ns	۲/۹ns	۰/۱۱۷ ns
A×C	۲	۰/۱۳ns	۰/۰۴۳ns	۳۱۵/۵ns	۷/۴ns	۰/۱۷۱ ns
B×C	۶	۰/۱۲ns	۰/۰۳۸ns	۱۰۱/۸ns	۸/۶ns	۰/۰۸۴ns
A×B×C	۶	۰/۰۵ ns	۰/۰۰۵ns	۲۹۱/۵ns	۴/۳ ns	۰/۳۱۰ ns
خطا	۴۶	۰/۰۶	۰/۰۴۰	۲۴۳/۷	۱۵/۹	۰/۲۳۹
ضریب تغییرات (درصد)	-	۷/۲۷	۱۰/۴۹	۴/۸۵	۴/۴۱	۷/۰۹

ns، *و **به ترتیب بیانگر معنی‌دار نبودن، معنی‌دار بودن در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد می‌باشد.

جدول پیوست ۴- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اجزای عملکرد، عملکرد دانه، وزن زیست‌توده و شاخص برداشت تحت تأثیر سطوح شوری، سدیم نیتروپروساید و کلسیم در آزمایش گلدانی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		تعداد کپسول در بوته	تعداد دانه در کپسول	وزن هزار دانه	عملکرد دانه	وزن زیست‌توده	شاخص برداشت
بلوک	۲	۰/۰۵^{ns}	۰/۳۴^{ns}	۰/۰۰۶^{ns}	۰/۰۰^{ns}	۰/۰۴^{ns}	۰/۱۸^{ns}
تنش شوری (A)	۱	۳۴۲۲/۴۰**	۰/۸۷**	۱/۱۲۸**	۴۰/۰۱**	۱۶۴/۱۴**	۲۸۴/۰۱**
سدیم نیتروپروساید (B)	۳	۱۴/۵۶**	۰/۲۹**	۰/۳۸۲**	۰/۶۶**	۱/۵۲**	۴۹/۵۷**
کلسیم (C)	۲	۷۲/۵۳**	۰/۲۴**	۰/۲۲۷**	۱/۴۲**	۴/۴۳**	۴۲/۶۸**
A×B	۳	۰/۳۲^{ns}	۰/۰۶^{ns}	۰/۰۰۴^{ns}	۰/۰۴^{ns}	۰/۱۷^{ns}	۶/۵۷**
A×C	۲	۳/۲۹^{ns}	۰/۳۴^{ns}	۰/۰۰۹^{ns}	۰/۱۶*	۰/۴۵^{ns}	۰/۱۸^{ns}
B×C	۶	۱/۶۶^{ns}	۰/۵۶^{ns}	۰/۰۱۶^{ns}	۰/۰۷^{ns}	۰/۳۲^{ns}	۰/۲۴^{ns}
A×B×C	۶	۰/۲۳^{ns}	۰/۲۸^{ns}	۰/۰۱۳^{ns}	۰/۰۲^{ns}	۰/۱۵^{ns}	۰/۷۴^{ns}
خطا	۴۶	۱/۱۰	۰/۲۸	۰/۰۱۴	۰/۰۴	۰/۲۱	۱/۱۵
ضریب تغییرات (درصد)	-	۵/۰۱	۱/۵۹	۴/۱۸	۹/۵۳	۱۰/۲۱	۲/۴۷

ns، *و **به ترتیب بیانگر معنی‌دار نبودن، معنی‌دار بودن در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد می‌باشد.

جدول پیوست ۵- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و غلظت مالون دی‌آلدئید تحت تأثیر سطوح شوری، سدیم نیتروپروساید و کلسیم در آزمایش گلدانی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		سوپراکسید دیسموتاز	کاتالاز	آسکوربات پراکسیداز	مالون دی‌آلدئید
بلوک	۲	۰/۰۴^{ns}	۰/۰۸^{ns}	۰/۱^{ns}	۰/۰۰۲^{ns}
تنش شوری (A)	۱	۲۷۸/۰۹**	۸۲/۶۳**	۹۴۶/۲**	۳۲۵/۱۲۵**
سدیم نیتروپروساید (B)	۳	۳/۸۹**	۱/۲۱**	۵/۳**	۵/۷۴۲**
کلسیم (C)	۲	۲/۲۵**	۱/۲۷**	۲/۵**	۲/۵۱۹**
A×B	۳	۱/۵۲**	۰/۰۶^{ns}	۲/۸**	۲/۵۱۷**
A×C	۲	۰/۹۵**	۰/۱۳^{ns}	۱/۱**	۰/۸۵۸**
B×C	۶	۰/۰۶^{ns}	۰/۰۷^{ns}	۰/۱^{ns}	۰/۱۵۸^{ns}
A×B×C	۶	۰/۰۱^{ns}	۰/۰۱^{ns}	۰/۱^{ns}	۰/۰۶۹^{ns}
خطا	۴۶	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۱	۰/۱۱۷
ضریب تغییرات (درصد)	-	۱۰/۸۲	۱۳/۳۹	۵/۸۰	۱۱/۵۲

ns، *و **به ترتیب بیانگر معنی‌دار نبودن، معنی‌دار بودن در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد می‌باشد.

جدول پیوست ۶- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) غلظت سدیم و کلسیم برگ، محتوای کلروفیل، پرولین و میزان پروتئین و روغن دانه تحت تأثیر سطوح شوری، سدیم نیتروپروساید و کلسیم در آزمایش گلدانی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات							
		سدیم برگ	کلسیم برگ	کلروفیل				پرولین	میزان پروتئین	میزان روغن
				a	b	a/b	کل			
بلوک	۲	۰/۲^{ns}	۰/۶^{ns}	۰/۰۰۱^{ns}	۰/۰۰۵۰^{ns}	۰/۰۱۱^{ns}	۰/۰۱۱^{ns}	۱۲/۳^{ns}	۰/۱ ^{ns}	۱/۱ ^{ns}
تنش شوری (A)	۱	۴۷۵۲/۳**	۷۲۰/۹**	۲۲/۳**	۶/۶۱**	۱/۲۴۸**	۵۶/۶**	۱۰۶۰/۷**	۱۰/۵**	۱۱/۰**
سدیم نیتروپروساید (B)	۳	۱۰/۶**	۳/۱*	۰/۲۲۰**	۰/۰۴۰۵**	۰/۰۴۰*	۰/۲۳۸**	۱۶۵/۷**	۳۸/۵**	۴۵/۵**
کلسیم (C)	۲	۲۵/۸**	۱۰۵/۳**	۰/۱۹۳**	۰/۰۷۴۳**	۰/۰۶۱*	۰/۲۷۹**	۱۴۱/۲**	۰/۲ ^{ns}	۰/۲^{ns}
A×B	۳	۱۱/۳**	۰/۹^{ns}	۰/۰۱۰^{ns}	۰/۰۰۳۷^{ns}	۰/۰۳۵^{ns}	۰/۰۱۰^{ns}	۳۵/۸ *	۰/۴ ^{ns}	۳/۱ **
A×C	۲	۲۳/۶**	۱۴/۷ **	۰/۰۰۱^{ns}	۰/۰۰۰۶ ^{ns}	۰/۰۰۵^{ns}	۰/۰۰۲^{ns}	۳۲/۱^{ns}	۰/۳^{ns}	۰/۴^{ns}
B×C	۶	۰/۵^{ns}	۰/۳^{ns}	۰/۰۱۴^{ns}	۰/۰۰۲۱ ^{ns}	۰/۰۰۱^{ns}	۰/۰۱۸^{ns}	۱۰/۴^{ns}	۰/۲^{ns}	۰/۶^{ns}
A×B×C	۶	۰/۶^{ns}	۰/۲^{ns}	۰/۰۰۱^{ns}	۰/۰۰۰۱^{ns}	۰/۰۰۴^{ns}	۰/۰۰۵^{ns}	۹/۲^{ns}	۰/۱ ^{ns}	۰/۲^{ns}
خطا	۴۶	۱/۵	۱/۱	۰/۰۰۹	۰/۰۰۳۵	۰/۰۱۳	۰/۰۱۹	۱۰/۴	۰/۳	۰/۹
ضریب تغییرات (درصد)	-	۸/۴۵	۹/۱۹	۷/۸۳	۹/۸۰	۵/۴۹	۷/۸۰	۱۵/۳۳	۲/۴۱	۱/۹۶

ns، *و **به ترتیب بیانگر معنی‌دار نبودن، معنی‌دار بودن در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد می‌باشد.

جدول پیوست ۷- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات وزن خشک برگ و ریشه، سطح برگ، ارتفاع گیاه و قطر ساقه تحت تأثیر سطوح شوری، سدیم نیتروپروساید و کلسیم در آزمایش مزرعه‌ای

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		وزن خشک برگ	شاخص سطح برگ	ارتفاع گیاه	قطر ساقه
بلوک	۲	۰/۰۳۵ ns	۰/۲۸ ns	۲۲/۲۶ ns	۰/۰۶۷ ns
تنش شوری (A)	۱	۳۲/۶۱۶ **	۷/۷۶ **	۷۶۶۷/۳۵ **	۱۵/۳۰۹ **
خطای اصلی	۲	۰/۰۸	۰/۱۸	۱۰/۱۸	۰/۱۱۸
سدیم نیتروپروساید (B)	۳	۱/۶۴۵ **	۱۵/۰۱ **	۸۴۳/۰۱ **	۹/۳۷۵ **
کلسیم (C)	۲	۲/۸۶۳ **	۱۶/۷۳ **	۱۳۷۳/۰۱ **	۱۳/۷۳۱ **
A×B	۳	۰/۱۸۷ ns	۰/۱۲ ns	۱۳/۳۸ ns	۰/۴۰۳ ns
A×C	۲	۰/۰۳۷ ns	۰/۴۰ ns	۲۴/۶۸ ns	۰/۰۵۰ ns
B×C	۶	۰/۱۰۸ ns	۰/۳۴ ns	۵۴/۰۱ ns	۰/۷۴۳ ns
A×B×C	۶	۰/۱۴۴ ns	۰/۱۹ ns	۲۲/۳۸ ns	۰/۱۲۶ ns
خطای فرعی	۳۴	۰/۱۴۷	۰/۲۹	۳۲/۱۰	۰/۳۲۲
ضریب تغییرات (درصد)	-	۸/۸۶	۹/۰۶	۷/۰۳	۷/۶۶

ns، *و **به ترتیب بیانگر معنی‌دار نبودن، معنی‌دار بودن در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد می‌باشد.

جدول پیوست ۸- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اجزای عملکرد، عملکرد دانه، وزن زیست‌توده و شاخص برداشت تحت تأثیر سطوح شوری، سدیم نیتروپروساید و کلسیم در آزمایش مزرعه‌ای

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		تعداد کپسول در بوته	تعداد دانه در کپسول	وزن هزار دانه	عملکرد دانه	وزن زیست‌توده	شاخص برداشت
بلوک	۲	۵/۹۹^{ns}	۰/۱۳^{ns}	۰/۰۱۲^{ns}	۴۱/۴۰^{ns}	۳۵۸/۸۳^{ns}	۰/۷۹^{ns}
تنش شوری (A)	۱	۳۱۸/۴۸**	۰/۰۱**	۲/۵۳۵**	۱۷۵/۳۸**	۸۰۵۳۸/۹۱**	۲۱۷/۰۱*
خطای اصلی	۲	۲/۰۲	۰/۰۶	۰/۰۰۵	۸/۲۷	۱۸۵/۱۸	۴/۷۶
سدیم نیتروپروساید (B)	۳	۳۶/۳۱**	۰/۱۵**	۰/۳۱۶**	۳۸۷/۲۰**	۹۵۴/۵۵**	۴۲/۸۷**
کلسیم (C)	۲	۷۸/۱۷**	۰/۰۷**	۰/۱۵۳**	۵۰۲/۹۰**	۱۵۰۵/۵۲**	۳۲/۶۷**
A×B	۳	۵/۱۳^{ns}	۰/۱۲^{ns}	۰/۰۵۷^{ns}	۲۵/۲۹^{ns}	۱۵۸/۳۵^{ns}	۳/۸۳*
A×C	۲	۲/۲۷^{ns}	۰/۰۴^{ns}	۰/۰۴۶^{ns}	۴/۵۲^{ns}	۱۱۹/۲۸^{ns}	۰/۲۲^{ns}
B×C	۶	۳/۴۴^{ns}	۰/۰۶^{ns}	۰/۰۳۳^{ns}	۲۵/۵۸^{ns}	۱۱۳/۳۱^{ns}	۰/۵۱^{ns}
A×B×C	۶	۱/۴۸^{ns}	۰/۱۶^{ns}	۰/۰۳۱^{ns}	۱۱/۹۶^{ns}	۸۱/۷۵^{ns}	۰/۴۸^{ns}
خطای فرعی	۳۴	۲/۸۰	۰/۱۴	۰/۰۲۸	۱۷/۷۴	۱۱۳/۱۰	۰/۶۶
ضریب تغییرات (درصد)	-	۶/۳۴	۱/۱۲	۶/۰۸	۸/۴۷	۸/۸۱	۱/۹۹

ns، *و **به ترتیب بیانگر معنی‌دار نبودن، معنی‌دار بودن در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد می‌باشد.

جدول پیوست ۹- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و غلظت مالون دی‌آلدئید تحت تأثیر سطوح شوری، سدیم نیتروپروساید و کلسیم در آزمایش مزرعه‌ای

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		سوپراکسید دیسموتاز	کاتالاز	آسکوربات پراکسیداز	مالون دی‌آلدئید
بلوک	۲	۰/۰۴^{ns}	۰/۰۳^{ns}	۰/۰۲^{ns}	۰/۱۶^{ns}
تنش شوری (A)	۱	۳۶/۵۲**	۱۷/۷۰**	۱۲/۳۳**	۱۵/۷۶**
خطای اصلی	۲	۰/۱۲	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۱۰
سدیم نیتروپروساید (B)	۳	۴/۴۰**	۱/۲۵**	۸/۱۲**	۶/۷۹**
کلسیم (C)	۲	۲/۹۵**	۱/۴۲**	۵/۹۶**	۲/۷۳**
A×B	۳	۱/۹۵**	۰/۱۵^{ns}	۵/۱۷**	۳/۶۳**
A×C	۲	۱/۵۴**	۰/۳۵*	۳/۹۶**	۱/۳۶*
B×C	۶	۰/۲۰^{ns}	۰/۰۸^{ns}	۰/۶۸^{ns}	۰/۴۴^{ns}
A×B×C	۶	۰/۱۰^{ns}	۰/۰۷^{ns}	۰/۶۲^{ns}	۰/۲۴^{ns}
خطای فرعی	۳۴	۰/۲۳	۰/۰۸	۰/۶۳	۰/۳۷
ضریب تغییرات (درصد)	-	۱۷/۵۵	۱۳/۳۴	۱۶/۳۹	۲۱/۶۶

ns، *و **به ترتیب بیانگر معنی‌دار نبودن، معنی‌دار بودن در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد می‌باشد.

جدول پیوست ۱۰- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات غلظت سدیم و کلسیم برگ، محتوای کلروفیل، پرولین و میزان پروتئین و روغن دانه تحت تأثیر سطوح شوری، سدیم نیتروپروساید و کلسیم در آزمایش مزرعه‌ای

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات							
		سدیم برگ	کلسیم برگ	کلروفیل				پرولین	میزان پروتئین	میزان روغن
				a	b	a/b	کل			
بلوک	۲	۰/۴^{ns}	۰/۳^{ns}	۰/۰۰۲^{ns}	۰/۰۰۳۰^{ns}	۰/۰۰۴^{ns}	۰/۰۰۹^{ns}	۲/۸^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۱/۰ ^{ns}
تنش شوری (A)	۱	۵۷/۷**	۱۲۹/۱**	۳۱/۳۲۴**	۱۰/۲۹**	۳/۴۳۲**	۷/۲۷**	۱۴۶/۱**	۳۵/۰۰**	۱۷/۲*
خطای اصلی	۲	۲۵/۷	۶/۳	۰/۰۶۳	۰/۰۴۸۷	۰/۰۳۹	۰/۱۴۸	۲۰/۶	۰/۱۰	۰/۴
سدیم نیتروپروساید (B)	۳	۲۸/۹**	۳/۷*	۰/۱۵۹**	۰/۰۲۰۴**	۰/۰۷۹^{ns}	۰/۱۵۳**	۶۱/۵**	۴۰/۴۶**	۴۸/۴**
کلسیم (C)	۲	۳۶/۱**	۱۰۳/۷**	۰/۱۵۶**	۰/۰۳۲۲**	۰/۰۲۲^{ns}	۰/۱۸۳**	۳۰/۰**	۰/۳۶ ^{ns}	۰/۶^{ns}
A×B	۳	۲۹/۲**	۱/۹^{ns}	۰/۰۱۴**	۰/۰۰۴۰**	۰/۰۴۵^{ns}	۰/۰۱۹^{ns}	۲/۳^{ns}	۰/۵۰ ^{ns}	۱/۴**
A×C	۲	۳۴/۹**	۲۴/۸ **	۰/۰۰۱^{ns}	۰/۰۰۰۹ ^{ns}	۰/۰۱۲^{ns}	۰/۰۰۲^{ns}	۱/۱^{ns}	۰/۲۲^{ns}	۰/۱^{ns}
B×C	۶	۲/۳^{ns}	۱/۳^{ns}	۰/۰۱۰**	۰/۰۰۰۴ ^{ns}	۰/۱۱۴ **	۰/۰۰۵^{ns}	۵/۹^{ns}	۰/۲۴^{ns}	۰/۴^{ns}
A×B×C	۶	۲/۶^{ns}	۰/۲^{ns}	۰/۰۰۱^{ns}	۰/۰۰۰۶^{ns}	۰/۰۶۸^{ns}	۰/۰۰۹^{ns}	۶/۲^{ns}	۰/۰۴ ^{ns}	۰/۵^{ns}
خطای فرعی	۳۴	۳/۷	۱/۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۶	۰/۰۳۲	۰/۰۰	۴/۸	۰/۱۸	۰/۳
ضریب تغییرات (درصد)	-	۱۳/۴۴	۱۰/۱۳	۴/۰۴	۳/۹۲	۸/۵۱	۷/۰۲	۱۰/۳۵	۱/۷۲	۱/۱۹

ns، *و **به ترتیب بیانگر معنی‌دار نبودن، معنی‌دار بودن در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد می‌باشد.

The effect of foliar application and seed pretreatment with sodium nitroprusside and calcium nano particle on some agronomical and physiological characteristics of sesame under salinity stress

Abstract

Salisination of agricultural lands is one of the most important factors in reducing yield and production of crops, especially in dry and semi-arid regions. Sesame is one of the important oil and vegetable seeds of these areas. Therefore, it seems necessary to find a suitable solution to reduce the damage to this plant. Recently, the supply of chemical fertilizers in the form of nanoparticles has been considered. In this regard, in three experimental parts, greenhouses and fields, the effect of seeding and seed priming with sodium nitroprusside and calcium on some of the agronomic and physiological characteristics of sesame were investigated under salt stress conditions. In vitro, the effect of seed primer with sodium nitroprusside (without penicillary, distilled water, 50, 100, 150 and 200 µm) and salinity stress (0, 50 and 100 mM / L) were investigated in order to determine the appropriate concentration of sodium nitroprusside in two The other part was examined. In the potted and field fields, the effect of sodium nitroprusside (control, pre-treatment of 150 µM, 50 µM and foliar application with seed primer), calcium soluble (control, calcium carbonate in the usual form and nano concentration of 4,000) And salinity stress (irrigation with non-saturated water and saline water) were investigated. In the laboratory section, the agronomic and morphological traits of sesame were measured in seed primer treatment with sodium nitroprusside with a concentration of 150 µM from other levels and this treatment was selected as seed primer for both pot experimental and field experiment. In the potting section, salt stress significantly decreased the agronomic and morphological traits, yield and yield components, chlorophyll content and calcium and oil content. Also, salinity stress increased about 5 times in catalase activity, also increased the activity of superoxide dismutase 9 times and ascorbate peroxide increased 10 times more than control. Sodium nitroprusside application reduced the effect of salinity stress on measured parameters. Seed primers and spraying with sodium nitroprusside and their application together increased agronomic and morphological traits, yield and yield components, antioxidant activity, chlorophyll, proline and calcium and oil content. The results of discriminative analysis indicated that the calcium carbonate application had a small effect on agronomic and morphological traits, yield and yield, activity of antioxidant enzymes and qualitative traits and sodium, calcium and proline, but the effect of different treatments on calcium carbonate foliar application on chlorophyll a, chlorophyll b, Chlorophyll a/b and chlorophyll were completely evident and caused differentiation of different treatments of carbonate calcium foliar application with control treatment. A similar process, such as a pot experiment, was seen in a field experiment. Salinity stress reduced the amount of agronomic and morphological traits, yield and yield, and calcium content, but sodium nitroprusside and calcium carbonate application increased these traits and improved the reduction of salinity stress. In addition, salinity stress, sodium nitroprusside, and calcium carbonate foliar application increased the activity of antioxidant enzymes, proline and protein levels, and reduced levels of malondialdehyde and oil. Finally, in the research area, foliar application along with seed primer with sodium nitroprusside, as well as foliar application with calcium nanocarbonate can be described as the best treatment combination.

Keywords: Antioxidant enzymes, Abiotic stress, Calcium carbonate, Nitric oxide.

Shahrood University of Thchnology

Faculty of Agriculture

Ph.D. Thesis in Agronomy

The effect of foliar application and seed pretreatment with sodium nitroprusside and calcium nano particle on some agronomical and physiological characteristics of sesame under salinity stress

By: Alireza Fathi

Supervisors:

Dr. Mehdi Baradaran Firouzabadi

Dr. Mohammad Reza Amerian

Advisor:

Dr. Manouchehr Gholipoor

September 2018