چکیده

در شرایط تنشهای محیطی نظیر شوری و سمیت فلزات سنگین، گونه‌های اکسیژن فعال افزایش می‌یابد. این گونه‌ها منجر به تخریب و آسیب به لیپیدها، پروتئینها و اسیدهای نوکلئیک سلول شده، سوخت و ساز سلولی را دچار اختلال می‌کنند. این فرضیه وجود دارد که سیلسیم باعث کاهش خسارت‌های ناشی از تنش‌های محیطی نظیر شوری و فلزات سنگین نظیر کادمیم می‌شود. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر تغذیه سیلسیم بر رشد، عملکرد وکاهش خسارت اکسیداتیو ناشی از تنش شوری و سمیت کادمیم در دو ژنوتیپ خیار (*Cucumis sativus* L.) شامل نگین و سوپردامینوس اجرا شد. این آزمایش هیدروپونیک در گلخانه مرکز کشت بدون خاک دانشگاه صنعتی اصفهان به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارها عبارت بودند از دو سطح شوری (صفر و ۵۰ میلی‌مولار نمک کلرید سدیم)، دو سطح سیلسیم (صفر و ۱ میلی‌مولار)، دو سطح کادمیم (صفر و ۵ میکرومولار کلرید کادمیم) و دو رقم خیار (یک رقم گلخانه‌ای، نگین و یک رقم مزرعه‌ای، سوپردامینوس). در هر دو آزمایش تنش شوری و کادمیم باعث کاهش معنی‌دار وزن خشک و مرطوب شاخساره خیار شد اگر چه این کاهش در رقم سوپردامینوس بیشتر از رقم نگین بود. شوری و کادمیم همچنین سبب ایجاد خسارت اکسیداتیو بر روی غشاء سلولی شد، که نشانه آن افزایش غلظت مالون د آلدهید بود. شوری و کادمیم با تخریب غشاء سلولی منجر به افزایش جذب و انتقال یونهای سمی سدیم به شاخساره و کاهش پتاسیم، کلسیم و منیزیم شاخساره خیار شده و از این طریق منجر به خسارت شد. شوری باعث کاهش معنی‌دار فعالیت آنزیم‌های پالاینده کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و افزایش آنزیم گوآکول پراکسیداز برگ خیار شد در حالی که کادمیم دو آنزیم آسکوربات پراکسیداز و گوآکول پراکسیداز را کاهش داد. تغذیه سیلسیم منجر به افزایش فعالیت آنزیم‌های پالاینده گونه‌های فعال اکسیژنی شامل کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و گوآکول پراکسیداز شد. در همین ارتباط، پراکسیداسیون چربی و غلظت مالن د آلدهید در بوته‌های خیار تغذیه شده با سیلسیم کمتر از بوته‌های تغذیه نشده با سیلسیم بود. فعالیت بالاتر آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و گوآکول پراکسیداز در رقم نگین در مقایسه با رقم سوپردامینوس و در نتیجه خسارت اکسیداتیو کمتر وارد شده به غشاء سلولی، ممکن است علت بیشتر بودن تحمل این رقم در مقابل تنش شوری و سمیت کادمیم باشد. نتایج دو آزمایش نشان داد که افزایش تیمار شوری و کادمیم بعد از مرحله گلدهی به گلدان‌ها (آزمایش دوم)، آسیب بیشتری نسبت به اعمال تیمارها ۲۰ روز بعد از کشت (آزمایش اول) به گیاه وارد کرد.

فصل اول

مقدمه و بررسی منابع

۱-۱-مقدمه

شوری یکی از تنش‌های محیطی مهمی است که سبب کاهش عملکرد بسیاری از گیاهان زراعی در مناطق مختلف دنیا شده است [۱۴۷]. به طور کلی شوری از سه روش بر رشد و عملکرد گیاه تأثیر دارد [۱۵۶]، کاهش پتانسیل آب خاک که منجر به کاهش توانایی گیاه در استفاده از آب، عناصرغذایی، دی اکسید کربن و انرژی نورانی می‌گردد. تغییر در تعادل عناصرغذایی و در نتیجه،کاهش عناصرغذایی قابل دسترس گیاه و ایجاد اختلال در فرایندهای طبیعی رشد و انباشته شدن غلظت‌های بالای سدیم یا سایر یون‌های سمی در گیاه [۱۰۶، ۱۱۳]. در شرایط تنشهای محیطی نظیر شوری، گونه‌های اکسیژن فعال[1] نظیر رادیکالهای سوپراکسید($O_2^{\bullet-}$)، هیدروکسیل($OH^{\bullet}$) و آب اکسیژنه (H_2O_2) افزایش می‌یابد [۵۵، ۱۳۳].

1- Reactive Oxygen Species (ROS)

انباشتگی این رادیکال‌هادر ژنوتیپ‌های مختلف گندم [۱۱۶] و گوجه فرنگی [۱۶] توسط محققان مختلف گزارش شده است. این گونه‌ها منجر به تخریب و آسیب به لیپیدها، پروتئینها و اسیدهای نوکلئیک سلول شده، سوخت و ساز سلولی را دچار اختلال می‌کنند [۵۵، ۱۳۳]. واکنش رادیکالهای آزاد اکسیژن با اسیدهای چرب و پراکسیداسیون چربی غشای سلولی موجب تخریب دیواره سلولی و تولید آلدهیدها و بویژه مالون د آلدهید می‌شود [۵۵]. افزایش بیش از اندازه غلظت ROS در شرایط تنش شوری در گیاهان باعث اختلال در فرایند انتقال الکترون در کلروپلاست و میتوکندری شده و در نهایت، بر فرایندهایی نظیر تنفس تأثیر منفی دارد. در مقابل، آنتی‌اکسیدانت‌ها سیستم دفاعی درسلول‌های گیاهی است که شامل آنتی‌اکسیدانت‌های آنزیمی مانند سوپراکسید دسموتاز (SOD)، کاتالاز (CAT) و آسکوربیک پراکسیداز (APX) و آنتی اکسیدانت‌های غیر آنزیمی مانند آسکوروبات،گلوتین و توکوفرول_آلفا است که بیشترین حذف کننده SOD است [۵۵]. نتیجه‌ی برخی مطالعات نشان می‌دهد که تحمل گیاه در برابر تنش شوری معمولا" وابسته به سیستم آنتی‌اکسیدانت کارآمد است [۱۰۸، ۱۰۹]. بر اساس نتایج برخی مطالعات اخیر، یکی از مشکلات خاک‌های شور، افزایش حلالیت کادمیم خاک و در نتیجه، افزایش قابلیت جذب کادمیم برای گیاه است [۹۲]. این مشکل به ویژه در خاک‌های حاوی غلظت‌های زیاد کادمیم (به عنوان مثال، در زمین‌های کشاورزی که مقادیر زیاد کودهای فسفاته حاوی ناخالصی کادمیم مصرف شده است)، دارای اهمیت است. کادمیم یکی از مضرترین فلزات سمی برای موجودات زنده است [۱۷۷]. غلظت کادمیم در خاک‌های غیر آلوده معمولا" ۰/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم است اما در برخی خاک‌ها با توجه به ماده‌ی مادری تا ۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است [۱۵۵]. امروزه غلظت فلزات سنگین مانند کادمیم در خاک به واسطه‌ی فعالیت-های زمین‌شناسی، انسانی و صنعتی افزایش پیدا کرده است [۱۷۲]. کادمیم به راحتی توسط گیاه جذب شده و انباشتگی آن در اندام‌های گیاه سبب اختلال در سوخت و ساز می‌شود [۱۰۴]. کادمیم همچنین از طریق زنجیره ی غذایی وارد بدن انسان می‌شود و انباشت آن در بدن، پیامدهای نامطلوبی بر سلامت انسان دارد [۱۷۷]. نتایج مطالعات اخیر نشان میدهد اختلال شدید ناشی از انباشتگی فلزات سنگین در بافت‌های گیاه به دلیل انباشتگی گونه‌های اکسیژن فعال است [۱۶۹]. در واقع یکی از پیامدهای سمیت کادمیم در گیاه، ایجاد خسارت اکسیداتیو نظیر تخریب لیپیدها و پروتئینها می‌باشد [۵۵، ۱۳۳]. بر همین اساس، افزایش ظرفیت آنتی-

اکسیداتیو گیاه می‌تواند نقش مهمی در کاهش خسارت ناشی از سمیت کادمیم داشته باشد [۶۳، ۶۴]. یکی از ساز و کارهای افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیداتیو گیاه، استفاده از عناصر مفیدی نظیر سیلسیم می‌باشد [۵۴]. سیلسیم هنوزجزء عناصر ضروری برای گیاهان شناخته نشده است ولی برای بهبود رشد بسیاری از گونه‌های گیاهی، به ویژه گندمیان مانند برنج و نیشکر و بعضی از درختان مفید است و این تأثیر مفید سیلسیم بیشتر در گیاهان تحت تنش گزارش شده است [۱۶]. سیلسیم تنها عنصری است که در صورت جذب بیش از حد در گیاه، به دلیل رسوب آن در بافت‌ها سمیت ایجاد نمی‌کند [۱۰۸، ۱۰۹]. این عنصر در افزایش فتوسنتز و استقامت اندام‌های گیاهی،کاهش تبخیر و تعرق و بهبود تحمل گیاه در برابر تنش‌های زیستی و غیر زیستی نقش دارد [۱۰۶] . سیلسیم باعث بهبود فعالیت فتوسنتز می‌شود و با افزایش رشد، کمبود الکترولیت برگ گیاهان را در شرایط شور کاهش می‌دهد [۱۰۹]. نتایج برخی مطالعات نشان داده است که تغذیه جو با سیلسیم در شرایط شور، فعالیتSOD (آنتی اکسیدانت) برگ را افزایش و غلظت MDA (اکسیدانت) را کاهش می-دهد [۱۶]. به نظر می‌رسد سیلسیم ظرفیت آنتی‌اکسیداتیو گیاه را افزایش داده و باعث کاهش خسارت‌های ناشی از تنش‌های محیطی و سمیت فلزات سنگین می‌شود [۱۵۷، ۱۸۶].

با توجه به اهمیت سیلسیم به عنوان عنصر غذایی مفید و حتی ضروری در تولید خیار از یک سو و کمبود اطلاعات در مورد تأثیر کاربرد این عنصر بر تحمل این گیاه در برابر تنش شوری و سمیت ناشی از فلزات سنگین به ویژه تأثیر بر ظرفیت آنتی‌اکسیداتیو گیاه در شرایط تنش از سوی دیگر، این پژوهش با اهداف زیر اجرا شد:

اهداف:

۱) بررسی اثر تغذیه سیلسیم بر رشد و عملکرد دو رقم رایج خیار گلخانه‌ای و مزرعه‌ای درشرایط شور.

۲) بررسی تعدادی از سازوکارهای تأثیر سیلسیم بر کاهش خسارت اکسیداتیو ناشی از تنش شوری.

۳) بررسی تعدادی از سازوکارهای تأثیر سیلسیم برکاهش خسارت اکسیداتیو ناشی از سمیت کادمیم.

۴) مقایسه پاسخ آنتی‌اکسیداتیو دو رقم خیار در شرایط تنش شوری و کادمیم.

۱-۲- مفهوم تنش

تنش معمولا به عنوان یک عامل خارجی که آثار نامطلوب بر گیاه به جای می‌گذارد، تعریف می‌شود. در بیشتر موارد، تنش در ارتباط با رشد (انباشتگی زیست توده) یا فرایندهای اولیه اسیمیلاسیون (جذب CO_2 و مواد معدنی)، مرتبط با رشد کلی گیاه اندازه‌گیری می‌شود. گیاهان تحت شرایط طبیعی و زراعی، بطور پیوسته در معرض تنش هستند. تنش‌های غیر زیستی که گیاهان به طور گسترده‌ای در معرض آن هستند شامل تنش‌های فیزیکی مانند، درجه حرارت بالا، شدت زیاد نور و خشکسالی و تنش‌های شیمیایی شامل آلودگی هوا، شوری و غلظت بالای فلزات سنگین می‌باشد. بعضی عوامل محیطی مانند دمای هوا در مدت چند دقیقه می‌توانند در گیاه ایجاد تنش کنند در صورتی که سایر عوامل محیطی مانند رطوبت خاک، شوری و یا کمبود یا زیاد بود عناصر معدنی روزها تا هفته‌هاآثار زیان باری ایجاد نکنند. رشد و عملکرد گیاه توسط تنش‌های زیستی و محیطی متعدد محدود می‌گردد [۸۱]. به همین علت اختلاف قابل توجهی بین عملکرد بالقوه و عملکرد واقعی محصولات مختلف دیده می‌شود [۱، ۹].

۱-۲-۱- تنش شوری

الف- پراکنش اراضی شور در دنیا و ایران

شوری یکی از تنش‌های محیطی مهمی است که سبب کاهش عملکرد بسیاری از گیاهان زراعی در مناطق مختلف دنیا شده است [۱۴۷]. تخمین زده شده است که تا سال ۲۰۵۰ در حدود ۵۰ درصد از اراضی قابل کشت دنیا دچار مشکل شوری خواهند شد [۳۷]. ایران از جمله کشورهایی است که وسعت به نسبت زیادی از آن راخاک‌های شور تشکیل می‌دهد به نحوی که ۲۳۸۰۰۰ کیلومتر مربع، معادل ۱۵ درصد از کل اراضی کشور، شور هستند [۱۹].

ب-سازوکارهای آسیب رسانی نمک در گیاهان

شوری بر همه جنبه‌های متابولیسم گیاهی اثر گذاشته و تغییراتی را در کالبدشناسی و زیست‌شناسی گیاهی ایجاد می‌کند. گزارش‌های متعددی درباره کاهش کلی فتوسنتز در شرایط شور در گیاهانی نظیر پنبه، پیاز، حبوبات، گوجه‌فرنگی، گندم، جو، ارزن مرواریدی، ذرت، نخود، چغندر قند، برنج و بسیاری گیاهان دیگر وجود دارد [۲، ۹]. شوری خاک به طور جدی شرایط محیط ریشه، پتانسیل اسمزی محلول خاک و موازنه طبیعی یون‌های محلول را تغییر می‌دهد. مؤثرترین اثر شوری بر گیاهان، کاهش رشد می‌باشد که با کاهش عملکرد همراه است [۲، ۳۰]. به طور کلی شوری از سه روش کاهش پتانسیل آب خاک، انباشته شدن غلظت-های بالای سدیم یا سایر یون‌های سمی در گیاه و تغییر در تعادل عناصر غذایی بر رشد و عملکرد گیاه تأثیر دارد [۱۵۶].

-کاهش پتانسیل آب خاک (آثار اسمزی)

شوری، آب قابل استفاده گیاه را کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر در خاک‌های شور، بدلیل افزایش فشار اسمزی و کاهش پتانسیل آب، گیاهان نمی‌توانند آب خاک را جذب کنند و به همین دلیل دچار پژمردگی می‌شوند که این پدیده را در اصطلاح خشکی فیزیولوژیکی می‌گویند. تا اواخر قرن نوزدهم کاهش رشد گیاهان تحت تنش شوری را به کاهش جذب آب نسبت می‌دادند. اکنون نشان داده شده است که بیشتر گیاهان از نظر اسمزی تحت شرایط شوری سازگاری پیدا می‌کنند و شیب جریان آب را از راههای مختلف به سمت گیاه نگه می‌دارند [۷۲].

-آثار ویژه یونی

دومین مشکلی که برای گیاهان در معرض تنش شوری وجود دارد، سمیت یون‌ها و اثرهای آنها بر فرایندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی است. سمیت یون‌های Na^+ و Cl^- سبب اختلال در فرایندهای فیزیولوژیک و کاهش رشد می‌شود [۷۳].

-برهم خوردن عناصرغذایی

از جمله ویژگی‌های خاک‌های شور، پایین بودن فعالیت یون‌های غذایی و نسبت بالای سدیم به کلسیم (Na^+/Ca^{++})، سدیم به پتاسیم(Na^+/K^+)، منیزیم به کلسیم(Mg^{++}/Ca^{++})، کلر به نیترات(Cl^-/NO_3^-)، در محلول خاک می‌باشد. که نسبت بالای سدیم و کلر به سایر یون‌ها موجب اختلال در فرایندهای سلولی می‌شود که شدت این اختلال در بین گونه‌های مختلف گیاهی و ارقام داخل یک گونه متفاوت است. شوری با اثر بر غلظت عناصرغذایی قابل دسترس در خاک و یا جذب و توزیع عناصرغذایی در داخل گیاه سبب عدم تعادل غذایی در گیاه می‌شود [۲، ۷۰]. عمده مطالعات انجام شده با گیاهان مختلف نشان داده است که شوری سبب کاهش غلظت نیتروژن، فسفر، کلسیم، منیزیم و پتاسیم بافت‌های گیاهی شده است [۷۱، ۱۷۳]. اثرهای شوری بر مقدار جذب عناصر کم‌مصرف به طور کامل شناخته نشده است به طوری که در برخی گیاهان، شوری موجب افزایش غلظت عناصر کم مصرف ودر برخی دیگر موجب کاهش غلظت آن‌ها شده است. نتایج برخی مطالعات نیز نشان می‌دهد شوری هیچ تأثیری بر غلظت عناصر کم مصرف در گیاهان نداشته است [۷۱].

ج- خسارت اکسیداتیو

تنش‌های زیستی و غیر زیستی منجر به خسارت اکسیداتیو می‌شود. در شرایط تنش، تولید گونه‌های اکسیژن فعال[1](ROS) تولید می‌شود. گونه‌های فعال اکسیژنی بر حیات موجود زنده اثرهای مثبت و منفی بسیاری می‌گذارند.

1-Reactive Oxygen Species (ROS)

این گونه‌ها از یک طرف در شرایط تنش می‌تواند با ارسال پیام‌های ضروری و انتقال سیگنال‌های مهم برای عملکرد و بقای گیاه، مفید باشند و از طرف دیگر بسیار واکنش پذیر و به طور بالقوه مخرب می‌باشند. در نتیجه سلول‌ها باید توازن درستی میان اثر مفید و تنش اکسیداتیو گونه‌های فعال اکسیژنی برقرار کنند. گلوتاتیون[1] (GSH)، مرکز کنترل این تعادل بین اثر مفید و اخسارت اکسیداتیو ROS ها است. گلوتاتیون، آنتی‌اکسیدانت تری پپتید، با وزن مولکولی کم است که در مرکز سلول حضور دارد [۸۱].

-اکسیدانت‌ها

در شرایط تنشهای محیطی گونه‌های اکسیژن فعال نظیر رادیکالهای سوپراکسید[2] ($O_2^{\bullet-}$)، هیدروکسیل[3] ($OH^{\bullet-}$) و آب اکسیژنه[4] (H_2O_2) افزایش می‌یابد. ممکن است این گونه‌های فعال اکسیژنی از عوامل خارجی مانند قرار گرفتن در معرض اوزن تولید شوند ولی قسمت اعظم آن‌ها، نتیجه‌ی فعالیت اکسیژن محیطی در داخل سلول‌های گیاهی هستند. ROS ها با تخریب پیوندهای مولکولی، ترکیبات حساس به اکسایش را اکسید می‌کنند و در نهایت، محصولات سمی و رادیکال‌های آزاد تولید می‌کنند. برای مثال، سوپراکسید با اینکه واکنش‌پذیری متوسطی دارد می‌تواند هم به عنوان سم در داخل سلول فعالیت کند و همچنین می‌تواند رادیکال‌های هیدروژن پراکسید و هیدروکسیل تولید کند [۸۱]. علاوه بر این هیدروژن پراکسید تولید شده از انباشتگی سوپراکسید، از واکنش اوزن با آب نیز تشکیل می‌شود. هیدروژن پراکسید می‌تواند به راحتی از غشاءهای زیستی عبور کند و باعث ایجاد خسارت شود [۸۱].آسیب‌های فراوانی توسط ROSها به سلول وارد می‌شود. پروتئین‌ها و فعالیت آنزیم‌ها در حضور گونه‌های فعال اکسیژنی آسیب می‌بینند. پیوندهای دی سولفیدی نقش بسیار مهمی در ساختمان پروتئین‌ها بازی می‌کند.

1 -Glutathione(GSH)
2 - Superoxide($O_2^{\bullet}$)
3 -Hydroxyl radicals($OH^{\bullet-}$)
4 - Hydrogen peroxide(H_2O_2)

وقتی ROS با غشاءسلولی واکنش می‌دهد، ساختار غشاءها را از بین برده و با تولید ترکیبات سمی از پراکسیداسیون لیپید، باعث آسیب به سلول می‌شود. آسیب به DNA نیز می‌تواند ناشی از فعالیت رادیکال‌های فعال باشد. از آثار تنش اکسیداتیو در گیاه می‌توان به کاهش فتوسنتز و عملکرد، نشت الکترولیت، پیری زودرس وبافت مردگی(نکروز) اشاره کرد [۸۱].

-آنتی اکسیدانت

تعادل بین ROS ها با مجموعه‌ای از آنتی‌اکسیدانت‌ها برقرار می‌شود [۸۱]. آنتی‌اکسیدانت‌ها سیستم دفاعی درسلول‌های گیاهی است که شامل آنتی‌اکسیدانت‌های آنزیمی مانند سوپراکسید دسموتاز[1](SOD) ، کاتالاز[2](CAT) ،آسکوربات پراکسیداز[3](APX) ، گلوتاتیون پراکسیداز[4](GPX)، گلوتاتیون اس ترنسفراز[5] (GST) و گلوتاتیون ریداکتاز[6] (GR) و آنتی‌اکسیدانت‌های غیر آنزیمی مانند آسکوروبات،گلوتاتوین(GSH) و توکوفرول_آلفا است که بیشترین حذف کننده آسکوربات پراکسیداز است [۵۵، ۸۱]. آنتی‌اکسیدانت‌های گیاهی را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم بندی کرد [۱۳۹]:

۱) ترکیبات محلول در چربی و وابسته به غشاء نظیر آلفاتوکوفرول، بتا کاراتن و ترکیبات فنلی
۲) ترکیبات کاهش دهنده محلول در آب از قبیل اسکوربات و گلوتاتیون
۳) آنزیم‌های پالاینده نظیر سوپراکسید دسموتاز، کاتالاز، پراکسیداز و گلوتاتیون ردوکتاز

اولین خنثی کننده ROS های تولید شده آسکوربات است و آنتی‌اکسیدانت غالب غشاء سلولی، توکوفرول-الفا است [۸۱].

1 -Superoxide dismutase(SOD)
2 -Catalase(CAT)
3 -Ascorbate peroxidase(APX)
4 -Glutathione peroxidase(GPX)
5 -Glutathione S-transferases (GST)
6 -Gluthathione reductase (GR)

گلوتاتیون به صورت مستقیم ROS های تولید شده را به وسیله‌ی آنزیم‌های کاتالاز و گلوتاتیون پراکسیداز، سم‌زدایی می‌کند.گلوتاتیون نقش کلیدی در سیستم دفاعی گیاه در برابر تنش اکسیداتیو دارد و به عنوان بستره‌ی ساخت فیتوکلاتین‌ها در حفاظت سلول در برابر فلزات سنگین نقش دارد. گلوتاتیون تری‌پپتیدی است که از سه آمینواسید، سیستئین[۱]، گلوتامات[۲] و گلیسین[۳] تشکیل شده است. آنزیم کلیدی تنظیم مسیر ساخت سیستئین، آدنوزین پنتا فسفو سولفو رداکتاز[۴] است که در شرایط تنش اکسیداتیو فعالیت آن افزایش می‌یابد. این آنزیم چرخه‌ی گلوتاتیون-آسکوربات[۵] را فعال کرده و تولید گلوتاتیون را افزایش می‌دهد. در نتیجه ظرفیت مقابله با تنش بهبود می‌یابد [۸۱].

د- خسارت اکسیداتیو ناشی از شوری

در شرایط تنشهای محیطی نظیر شوری، گونه‌های اکسیژن فعال نظیر رادیکالهای سوپراکسید، هیدروکسیل و آب اکسیژنه افزایش می‌یابد [۵۵، ۱۳۳]. این گونه‌ها منجر به تخریب و آسیب به لیپیدها، پروتئینها و اسیدهای نوکلئیک سلول شده و در نهایت سوخت و ساز سلولی را دچار اختلال می‌کنند [۵۵]. واکنش رادیکال‌های آزاد اکسیژن با اسیدهای چرب و پراکسیداسیون چربی غشای سلولی موجب تخریب دیواره سلولی و تولید آلدهیدها و بویژه مالون د آلدهید می‌شود. افزایش بیش از اندازه غلظت ROS در شرایط تنش شوری در گیاهان باعث اختلال در فرایند انتقال الکترون در کلروپلاست و میتوکندری شده و در نهایت، بر فرایندهایی نظیر تنفس تأثیر منفی دارد [۵۵].

ط- پاسخ آنتی‌اکسیداتیو گیاه در برابر تنش شوری

نتیجه‌ی برخی مطالعات نشان می دهد که تحمل گیاه در برابر تنش شوری معمولاً وابسته به سیستم آنتی-اکسیدانت کارآمد است [۱۰۸، ۱۰۹].

1 -Cysteine
2 -Glutamate
3 -Glycine
4 -Adenosine 5´- phosphosulfate
5 -Ascorbate-glutathione cycle

آنزیم سوپراکسید دسموتاز در کلروپلاست‌ها، میتوکندری، پراکسی زوم‌ها و دیواره سلولی موجب کاتالیز شدن سوپراکسیدها به شکل اکسیژن مولکولی و پراکسید هیدروژن می‌شود [۲۳] . کاتالاز عمدتاً در پراکسی‌زوم‌ها و میتوکندری قرار گرفته در حالیکه گویاکول پراکسیداز در سیتوپلاسم، غشاء و دیواره سلولی وجود دارد. گلوتاتیون در گیاهان به وفور یافت می‌شود و ترکیب مفیدی برای حذف رادیکال‌ها، تولید فیتوکلاتین‌ها می‌باشد[۹۳]. کاتالاز و گویاکول پراکسید، پراکسید هیدروژن تولید شده را به آب و اکسیژن تبدیل می کند [۲۳]. آسکوربات پراکسیداز از پراکسید به عنوان گیرنده الکترون استفاده می کند و از این طریق از اثرهای مخرب این گونه‌ها کاسته می‌شود [۱۸۱].

۵- برهمکنش شوری و کادمیم

یکی از مشکلات برخی خاک‌های شور، افزایش قابلیت جذب کادمیم است [۸۳]. در میان فلزات سنگین، کادمیم دارای اهمیت ویژه‌ای است، زیرا به راحتی جذب ریشه گیاه شده و سمیت آن برای گیاهان تا ۲۰ برابر بیشتر از سایر فلزات سنگین است [۵]. خاک، منبع اصلی ورود کادمیم به داخل گیاه است. به طور کلی قابلیت استفاده کادمیم خاک تحت تأثیر مقدار و منشأ کادمیم، پ-هاش، مقدار ماده آلی، مقدار و نوع رس، رقابت سایر عناصر بویژه روی، ظرفیت تبادل کاتیونی و شوری می‌باشد [۶، ۳۴]. با وجود اینکه پ-هاش مهمترین عامل کنترل کننده غلظت کادمیم خاک محسوب شده و به نظر می‌رسد در خاک‌های آهکی و قلیایی، غلظت کادمیم محلول خاک ناچیز باشد، اما نتایج مطالعات متعددی [۳۴، ۱۱۹] نشان داده است که نقش شوری در افزایش حلالیت کادمیم، می‌تواند مهمتر از نقش پ-هاش باشد. نتایج آزمایش‌های برخی محققان [۳۴، ۱۱۹، ۱۳۴، ۱۶۲] نشان می‌دهد شوری و یا یون کلرید، نقش مؤثری در افزایش حلالیت کادمیم خاک و جذب آن به وسیله گیاه دارد. افزایش جذب کادمیم در شرایط شور، در بسیاری از غلات گزارش شده است [۱۳۴]. در خاک‌های شور، به دلایل متعددی از جمله تشکیل کمپلکس‌های کادمیم و کلر و نیز تبادل سدیم با کادمیم در محل‌های جذب سطحی ذرات جامد خاک، حلالیت کادمیم و قابلیت جذب آن به وسیله گیاه افزایش می‌یابد. این مشکل به ویژه در خاک‌های حاوی غلظت‌های زیاد کادمیم (به عنوان مثال، در زمین‌های

کشاورزی که مقادیر زیاد کودهای فسفاته حاوی ناخالصی کادمیم مصرف شده است)، دارای اهمیت است [۹۲].

۱-۲-۲-تنش کادمیم

الف-کادمیم در خاک

کادمیم یکی از مضرترین فلزات سمی برای موجودات زنده است [۱۷۷]. بیشینه مجاز غلظت کادمیم کل در خاک‌های کشاورزی کشورهای مختلف، متفاوت بوده و به ترتیب در آمریکا ۱/۶، در انگلستان و آلمان ۳، در لهستان ۱-۳، در استرالیا ۵ و در سوئد ۰/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم است [۸۹]. این عنصر با روی و جیوه هم‌گروه بوده و کمتر به شکل خالص یافت می‌شود. آلووی (۱۹۹۵) گزارش داد که یون آزاد Cd^{2+} بیشتر از گونه‌های خنثی و آنیونی جذب سطحی کلوئیدهای خاک می‌شود [۲۰]. از منابع ورودی کادمیم به خاک می‌توان به، هوادیدگی مواد مادری، کودهای فسفاته، کودهای حیوانی و نهشت‌های جوی اشاره کرد [۲۰]. امروزه غلظت فلزات سنگین مانند کادمیم در خاک به واسطه‌ی فعالیت‌های زمین‌شناسی، انسانی و صنعتی افزایش پیدا کرده است [۱۷۲]. کادمیم از منابع مختلف وارد خاک می‌شود ولی در زمین‌های کشاورزی، کادمیم موجود در کودهای فسفره، یکی از مهمترین منابع آلودگی خاک به این عنصر سمی است [۵]. نقش کودهای فسفره، در آلودگی خاک‌های زراعی با کادمیم، در بسیاری از منابع ذکر گردیده است [۵، ۱۱۹، ۱۲۰، ۱۶۱، ۱۷۹]. منابع دیگر کادمیم که سبب آلودگی خاک‌ها می‌شوند، عبارتند از استخراج معدن و در معرض هوا قرار گرفتن سنگ‌های معدنی سولفیدی حاوی روی [۱۲۱]. مقدار قابل توجهی کادمیم به صورت ناخالصی در کودهای شیمیایی فسفره وجود داشته که منشأ آن‌ها از سنگ معدن است [۳]. غلظت کادمیم در خاک‌های آلوده شده توسط معدن تا ۷۵۰ میلی‌گرم درکیلوگرم گزارش شده است [۱۲۱]. قابلیت استفاده کادمیم خاک برای گیاه، بستگی به فعل و انفعالات فیزیکی، شیمیایی و زیستی داشته که حلالیت و شکل کادمیم را در محلول خاک، به ویژه ریزوسفر، کنترل می‌کنند [۵۷]. عوامل زیستی مؤثر بر قابلیت استفاده کادمیم خاک شامل جنس یا رقم گیاه، فعالیت ریشه، الگوی گسترش ریشه و موجودات زنده مرتبط با ریشه (نظیر قارچ مایکوریزا) می‌باشند. برخی عوامل غیر زیستی که قابلیت استفاده کادمیم را در محلول خاک

کنترل می‌کنند عبارتند از: پ-هاش خاک، مقدار رس، کربنات‌ها، اکسیدهای آهن و آلومینیوم، وضعیت اکسایش و کاهش، نوع و مقدار ماده‌آلی، لیگاندهای کمپلکس کننده، درصد رطوبت خاک و اعمال مدیریتی (شامل تناوب زراعی، مواد اصلاحی نظیر کودهای فسفاته، کودهای حیوانی، لجن فاضلاب و آهک دهی) [۶۹، ۱۳۷].

ب-کادمیم در گیاه

ارقام گیاهی از نظر توانایی در جذب، انباشت و مصرف عناصر سمی متفاوت می‌باشند. آلووی (۱۹۹۰) گزارش داد که کاهو، اسفناج، کرفس، کلم، برنج و سیب‌زمینی دارای قدرت انباشت زیاد کادمیم هستند. غلظت معمول کادمیم در گیاهان ۲/۴-۰/۱ میلی‌گرم در کیلوگرم است [۲۰]. کادمیم به راحتی توسط گیاه جذب شده وانباشتگی آن در اندام‌های گیاه سبب مسمومیت و در نهایت اختلال در سوخت و ساز می‌شود [۱۰۴]. کادمیم همچنین از طریق زنجیره‌ی غذایی وارد بدن انسان می‌شود و انباشت آن در بدن، پیامد های نامطلوبی بر سلامت انسان دارد [۱۷۷]. هر چند سازوکارهای مسمومیت کادمیم شناخته شده نیست، احتمال می‌رود که این عنصر باعث ایجاد یا تشدید کمبود آهن و روی در گیاه می‌شود [۳۵]. محققان متعددی گزارش کردند که نشانه‌های مسمومیت کادمیم به نشانه‌های کلروز کمبود آهن شباهت داشته و گیاهان حاوی تیمار کادمیم مقدارآهن کمتری را جذب کردند [۳۵، ۱۴۳]. برخی مطالعات نشان دادند که کادمیم، منجر به کمبود کلسیم، منیزیم و آهن و کاهش محتوای کلروفیل و در نهایت کاهش در نرخ فتوسنتز گیاه شده است [۷۶]. نشانه‌های عمومی ناشی از جذب مقدار اضافی کادمیم در گیاه را کاهش و توقف رشد ریشه، تداخل با جذب و انتقال غیر طبیعی عناصر غذایی، کاهش مقدارکلروفیل، زرد برگی و رنگ قرمز مایل به قهوه‌ای و اختلاف در فعالیت‌های آنزیمی به ویژه آنزیم‌های دخیل در فتوسنتز اعلام نمودند [۲۰].

ج-نقش کادمیم بر جذب سایر فلزات

کادمیم با دو سیستم بر جذب بسیاری از فلزات اختلال ایجاد می‌کند.یکی، سیستم مشابه کلسیم (Ca-like) و دیگری سیستم مشابه آهن(Fe-like) است. اثر کادمیم بر گروه اول اثر بازدارندگی غیر رقابتی و بر گروه دوم اثر بازدارندگی رقابتی است [۱۶۳].

-نقش کادمیم بر جذب فلزات قلیایی(Ca-like)

فلزات قلیایی به صورت یونی جذب می‌شوند و هر کدام دارای ناقل‌های ویژه خود هستند. از آنجایی که این فلزات تک‌ظرفیتی هستند و کادمیم دو ظرفیتی است نمی‌توانند ناقل‌های مشترک داشته باشند، بنابراین اثر کادمیم بر فلزات قلیایی اثر بازدارندگی غیر رقابتی[1] است. جذب کلسیم تحت تأثیر جذب پتاسیم است [۵۲، ۶۶]. اثر جذب کادمیم بر کلسیم مشابه اثر آن بر پتاسیم و غیر رقابتی است [۱۶۳].

-نقش کادمیم بر جذب فلزات قلیایی خاکی و فلزات خاکی(Fe-like)

تیمار کادمیم سیستم انتقال فلزات قلیایی خاکی (به جز منیزیم) به برگ را نیز دچار اختلال می‌کند. کادمیم بیشتر بر انباشت این فلزات اثر می‌گذارد و اثر کمی بر انتقال آنها می‌گذارد. جذب و انتقال Mg^{2+} از سایر فلزات قلیایی خاکی جداست [۱۵۳]. در میان فلزات قلیایی خاکی کادمیم کمترین اثر را بر Ba^{2+} دارد [۱۸۰]. قسمت عمده Cd^{2+} وارد سیمپلاست نمی‌شود و در دیواره سلولی جایگزینی Ca^{2+} می‌شود و پیوندهای کادمیمی ایجاد می‌کند. به نظر می‌رسد که سیستم انتقالی کادمیم مشابه کلسیم است. تئوری انتقال Al^{3+} ، مشابه Fe^{2+}، Ni^{+} و Cu^{2+} است. Fe^{2+} و Al^{3+} به صورت کلات منتقل می‌شوند [۳۲]. بنابراین به دلیل تشابه به سیستم انتقال آهن و آلومنیوم ، اثر کادمیم بر آنها مشابه بوده و از انباشتگی سیترات درون آوند چوبی جلوگیری می‌کند. کادمیم با Fe^{2+}، Al^{3+} ، Cu^{2+} و Zn^{2+} دارای کانال‌های انتقال مشابه است بنابراین اثر کادمیم بر این گروه فلزات اثر بازدارندگی رقابتی[2] است [۱۶۳].

1 -non-competitive inhibition
2 -Competitive inhibition

د-خسارت اکسیداتیو ناشی از کادمیم

کادمیم یکی از فلزات سنگین گسترده در محیط زیست است که برای موجودات زنده بسیار سمی است. کادمیم عمدتا" توسط تشکیل کمپلکس با پروتئین‌های کاربردی، جایگزینی با یون‌های فلزی ضروری غشاء پلاسمایی و تغییر سیستم آنتی‌اکسیدان و در نهایت تولید رادیکال‌های فعال اکسیژنی، گیاه را دچار خسارت اکسیداتیو کرده و بسیاری از فرایندهای سلولی را دچار اختلال می‌کند [۷۴]. نتایج مطالعات اخیر نشان میدهد اختلال شدید ناشی از انباشتگی فلزات سنگین در بافت‌های گیاه به دلیل انباشتگی گونه‌های اکسیژن فعال است [۱۶۹]. این رادیکال‌ها با لیپیدها، رنگدانه‌ها و اسیدهای نوکلئیک واکنش داده و موجب پراکسیداسیون لیپیدها، آسیب دیدن غشاءسلولی و غیر فعال شدن آنزیم‌ها شده و در نتیجه، حیات سلول را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در واقع یکی از پیامدهای سمیت کادمیم در گیاه، ایجاد خسارت اکسیداتیو نظیر تخریب لیپیدها و پروتئینها می‌باشد [۵۵، ۱۳۳].

ه-پاسخ گیاه در مقابل با سمیت کادمیم

برخی از فلزات سنگین برای رشد گیاه ضروری هستند و برخی دیگرمانند کادمیم، با برهمکنش با پروتئین‌ها، دیواره سلولی و تولید ROS ها، منبع خسارت به گیاه هستند [۸۱]. گیاهان در مواجه با سمیت کادمیم پاسخ-های متعددی نشان می‌دهند از جمله کمپلکس کردن کادمیم با فیتوکلاتین‌ها در واکوئل، محبوس شدن این عنصر در دیواره سلولی، ممانعت از ورود کادمیم توسط غشاء پلاسمایی و تولید آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان می-باشد [۱۴۹]. از دیگر سازوکارهای مهم افزایش تحمل گیاه در برابر کادمیم، افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاهان است [۲۹، ۴۵]. که در این بین، اسید آسکوربیک و گلوتاتیون (گروه‌های سولفیدریل غیر پروتئنی) دو ترکیب آنتی‌اکسیدان بسیار مهم در گیاه می‌باشند [۶۲]. گلوتاتیون با تشکیل لیگاند مستقیم با فلزات سنگین و همچنین ساخت فیتوکلاتین‌ها نقش مهمی در سیستم دفاعی گیاه در برابر تنش اکسیداتیو بازی می‌کند [۸۱]. بر همین اساس، افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیداتیو گیاه می‌تواند نقش مهمی در کاهش خسارت ناشی از سمیت

کادمیم داشته باشد [۶۳، ۶۴]. یکی از ساز و کارهای افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیداتیو گیاه، استفاده از عناصر مفیدی نظیر سیلسیم می باشد [۵۴].

۱-۲-۳- تغذیه گیاه

یکی از مباحث اختصاصی تغذیه گیاهان، بررسی نقش عناصر مختلف در سوخت وساز(متابولیسم) و رشد و نمو گیاه است. اگر چه عناصر مختلفی در ساختار گیاه شرکت دارند، اما تنها ضرورت تعداد محدودی از آن-ها برای گیاه اثبات شده است. عناصر ضروری ممکن است در ساختار گیاه و یا برخی فرایندهای سوخت و سازی آن مورد نیاز باشد، به طوری که کمبود آن‌ها سبب بروز نارسایی‌هایی در گیاه می‌شود که اغلب به صورت علایمی بر اندام‌های مختلف یا کل گیاه ظاهر می‌شود. از طرفی، زیاد بودن برخی عناصر، سبب بروز اختلالاتی در رشد و نمو گیاه می‌شود. برخی عناصر(عناصر مفید) نیز به رشد گیاه کمک می‌کند، اما کمبودشان خسارتی وارد نمی‌کند. تشخیص عناصر ضروری، مفید یا سمی و نیز تعیین حدود کفایت یا سمیت آن‌ها از جمله مباحث تغذیه گیاه است [۷].

الف-نقش تغذیه گیاه در کاهش خسارت ناشی از تنش شوری

تغذیه متعادل گیاه در افزایش تحمل گیاهان به شوری مؤثر می‌باشد که ضمن کمک به رشد گیاه، با حفظ پایداری غشاءسلولی مانع از تجمع عناصر سمی نظیر بور و کلر در گیاه می‌شود [۱۵۴]. برخی عناصر غذایی نقش ویژه‌ای در کاهش سمیت یون‌های سدیم، کلر و بور و افزایش تحمل گیاه به شوری دارند. استفاده از ترکیبات حاوی کلسیم نظیر گچ به حفظ ساختار غشاءسلولی گیاهان در شرایط شور کمک می‌کند [۱۴۴، ۱۷۱]. شابالا و همکاران (۲۰۰۶) بیان کردند کلسیم، سمیت سدیم را از طریق کاهش جذب سدیم و افزایش جذب پتاسیم بهبود بخشیده است. این پژوهشگران نقش کلسیم در کاهش سمیت سدیم را ناشی از نقش این عنصر در حفظ ساختار غشاءسلولی و خاصیت انتخاب‌پذیری دانسته‌اند. همچنین حفظ ساختار غشاءسلولی از جذب آنیون‌های سمی نظیر کلر و بور نیز جلوگیری می‌کند [۱۵۴]. تونا و همکاران (۲۰۰۸) گزارش دادند هورمون‌های رشد نظیراسیدجیبرلیک با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت ، موجب افزایش تحمل

ذرت به شوری شود [۱۷۴]. بهبود وضعیت تغذیه روی و مس در خاک‌های شور نیز می‌تواند، با کاهش جذب سدیم، کلر و بور سبب افزایش رشد و کاهش خسارت ناشی از شوری شود [۱۵، ۷۸]. سید الاهل و محمود (۲۰۱۰) گزارش دادند محلول پاشی آهن و روی سبب افزایش مقدار اسانس ریحان در شرایط شور شد [۱۴۶].

ب-نقش تغذیه گیاه در کاهش خسارت ناشی از فلزات سنگین

فلزات سنگین نظیر کادمیم، با عناصر غذایی ضروری برای گیاه وارد رقابت شده و منجر به کاهش غلظت چندین عنصر پرمصرف در گیاه می‌شود [۱۵۸].بنابراین به نظر می‌رسد ممکن است بتوان اثر رقابتی منفی و مخرب فلزات سنگین را با تغذیه بهینه کاهش داد. برخی مطالعات نشان دادند که تغذیه گوگرد اثر سمیت کادمیم را در چغندرقند بهبود بخشید [۴۲، ۱۴۱]. پانکویک و همکاران (۲۰۰۰) نشان دادند که با تغذیه نیتروژن، اثر بازدارندگی کادمیم بر فتوسنتز کاهش پیدا کرد [۱۳۸]. همچنین آندون و همکاران (۲۰۰۵) گزارش دادند که تغذیه آمونیوم سولفات توانست اثر بازدارندگی و مخرب کادمیم را در گیاه نخود کاهش دهد [۱۷۶]. یاسن و همکاران (۲۰۰۷) بیان کردند که افزایش ترکیبات آلی به خاک آلوده منجر به کاهش تجمع و انتقال کادمیم، روی و سرب در گیاه مورد نظر، شد [۱۸۲]. لیو و همکاران (۲۰۱۱) نیز گزارش کردند که تغذیه منیزیم باعث کاهش خسارت اکسیداتیو ناشی از کادمیم در گیاه برنج شد [۱۱۱].

۱-۲-۴-سیلسیم در خاک

سیلسیم دومین عنصر فراوان پوسته زمین (۲۷/۷درصد) و همچنین یکی از عناصر مهم تشکیل‌دهنده ساختمان کانی‌های رسی در بیشتر خاک‌ها می‌باشد. سیلسیم به صورت اسید سیلیسیلیک در محلول خاک وجود دارد. غلظت معمول آن در محلول خاک، بین ۰/۱تا ۰/۶ میلی‌مولار است [۱۰۹]. عنصر سیلسیم معمولاً به صورت سیلسیم بی‌شکل ($SiO_2.nH_2O$) و یا اسید سیلسیک (H_4SiO_4) قابل جذب است [۱۰۲].

الف-جذب سیلسیم توسط گیاه

در مورد گیاهان عالی سه نوع جذب برای سیلسیم وجود دارد: جذب فعال، غیر فعال، پس زدنی[1]. جذب فعال تحت تأثیر فرایند تبخیر و تعرق است و عموماً در گیاهان خانواده گندمیان جگن دیده می‌شود. در برخی گیاهان دو لپه‌ای همانند خیار، خربزه و توت فرنگی جذب سیلسیم به صورت غیر فعال است و با افزایش سیلسیم محلول در محیط، غلظت آن در گیاه نیز افزایش می‌یابد. در گوجه فرنگی و سویا جذب به صورت پس‌زدنی است، در این حالت علاوه بر جذب، دفع سیلسیم نیز از گیاه اتفاق می‌افتد [۸۷]. جذب سیلسیم به وسیله گیاه تحت تأثیر عواملی نظیر، حضور سایر عناصر غذایی، تبخیر و تعرق، بازدارنده‌های متابولیکی، نور و ساختمان فیزیولوژیک ریشه گیاه قرار می‌گیرد [۱۰۲].

ب-عوامل مؤثر بر جذب سیلسیم توسط گیاه

-حضور سایر عناصر غذایی

جذب سیلسیم بوسیله گیاه عمدتاً به شکل اسید مونوسیلسیلیک بدون بار است، به همین دلیل رقابت آن با سایر عناصر بر محل‌های جانشینی غشاء ریشه ناچیز است. اما به دلایلی که چندان مشخص نیست، مقدار زیاد نیتروژن در محلول غذایی می‌تواند بر جذب سیلسیم توسط ریشه اثر منفی داشته باشد [۱۰۲]. تاکاهشی (۱۹۸۲) گزارش کردند فسفر اثر منفی بر جذب سیلسیم توسط گیاه دارد [۱۷۰].

-تبخیر و تعرق

از آنجایی که قسمت اعظم سیلسیم به صورت غیر فعال جذب می‌شود، جذب این عنصر وابستگی زیادی به تبخیر و تعرق دارد. به گونه‌ای که افزایش تبخیر و تعرق باعث افزایش چشم‌گیر جذب سیلسیم به وسیله گیاه می‌شود [۱۰۲].

1 -Rejective

-بازدارنده‌های متابولیکی

معمولاً جذب سیلسیم بوسیله سیانید سدیم و سولفید هیدروژن کاهش می‌یابد [۱۲۷]. تأثیر بازدارنده‌های متابولیکی بر جذب سیلسیم توسط ریشه بیشتر از شاخساره است [۱۰۲].

-نور

با توجه به این‌که جذب سیلسیم عمدتا ً غیر فعال و وابسته به تبخیر و تعرق است پس با افزایش نور، نرخ تبخیر و تعرق نیز افزایش یافته و در نتیجه موجب جذب بیشتر توسط گیاه می‌شود [۱۰۲].

ج-نقش سیلسیم در گیاه

سیلسیم هنوز جزو عناصرغذایی ضروری برای گیاهان شناخته نشده است ولی برای بهبود رشد بسیاری از گونه‌های گیاهی، به ویژه گندمیان مانند برنج و نیشکر و بعضی از درختان مفید است و این تأثیر مفید سیلسیم بیشتر در گیاهان تحت تنش گزارش شده است [۱۶]. تغذیه بهینه سلسیم سبب افزایش رشد و توسعه حجمی و وزنی ریشه‌ها می‌شود که در نهایت سطح کل جذب کننده عناصر افزایش می‌یابد [۱۶۸]. سیلسیم اثر زیادی بر رشد و کیفیت میوه دارد، به طوری که در پرتغال سبب افزایش ۳۰ تا ۸۰ درصدی میوه‌ها شده و سرعت رسیدن میوه‌ها را نیز افزایش می‌دهد [۱۰۲]. نقش سیلسیم در کاهش اثرهای زیان‌بار تنش‌های مختلف غیر زیستی [۱۰۹] مانند سمیت منگنز، آلومنیوم، کادمیم و سایر فلزات سنگین،شوری، خشکسالی، سرما و انجماد و تنش‌های زیستی مانندتنش بیماری‌ها [۴۳، ۴۴، ۱۵۰] مؤثر بوده است. سیلسیم درافزایش فتوسنتز و استقامت اندام‌های گیاهی، کاهش نرخ تبخیر و تعرق و بهبود تحمل گیاه در برابر تنش‌های زیستی و غیر زیستی نقش دارد [۵۴] .اگر چه در مورد سازوکار تأثیر سیلسیم در گیاهان عالی اطلاعات کمی وجود دارد ولی نقش‌های کلیدی سیلسیم در کاهش تنش در گیاهان عالی شامل: (۱) تحریک سیستم آنتی‌اکسیدان گیاه، (۲) پیوند وایجاد کمپلکس با یون‌های فلزی سمی و رسوب دادن آن‌ها، (۳) غیر فعال کردن یون‌های فلزی سمی در محیط رشد،(۴) فرایند جذب و (۵) جایگزینی با یون‌های فلزی در گیاهان می‌باشد [۱۰۹]. سیلسیم با رسوب در پهنای برگ باعث افزایش استحکام برگ‌ها و نیز افزایش غلظت کلروفیل در واحد سطح برگ می‌شود

[۱۰۲]. با افزایش غلظت کلروفیل برگ، توانایی گیاه برای استفاده مؤثرتر از نور زیاد شده و می‌تواند شدت-های زیاد و کم نور را بهتر تحمل کند [۱۲].

د-نقش سیلسیم در کاهش تنش‌های غیر زیستی

بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که سیلسیم نقش مهمی در تنش‌های غیر زیستی مانند تنش ناشی از زیادبود نیتروژن [۱۰۲]، تنش ناشی از کمبود فسفر [۱۲۸]، تنش ناشی از سمیت سدیم [۳۱، ۹۵]، آهن [۵۴، ۱۳۶]، منگنز [۱۳۵] و آلومینیوم [۱۰۲] دارد. لوین (۱۹۵۳) گزارش کرد سیلسیم با رسوب در کوتیکول برگ و ایجاد لایه دوگانه سلولز - سیلسیم و در نتیجه، با کاهش تبخیر و تعرق می‌تواند آثار منفی کم‌آبی را کاهش دهد [۱۰۲]. فنگ و همکاران (۲۰۰۹) نیز بیان داشتند که سیلسیم به مقدار قابل توجهی فعالیت آنزیم‌های مربوط به چرخه‌ی آسکوربات-گلوتاتیون شامل آسکوربات پراکسیداز(APX)، دهیدروآسکوربات ریداکتاز[1](DHAR) و گلوتاتیون رداکتاز(GR) در کلروپلاست برگ خیار تحت تنش منگنز را افزایش داد و با کاهش غلظت پراکسید هیدروژن (H_2O_2) و پراکسیداسیون لیپید در کلروپلاست، فتوسنتز را بهبود بخشید [۶۰]. لیو و همکاران(۲۰۰۹) نیز گزارش کردند که سیلسیم در برگ خیار با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت SOD، GSH-Px[2]، APX، MDHAR[3]، GR، GSH، غلظت ترکیبات اکسیدانت شامل H_2O_2، $O_2^{\cdot-}$ و MDA[4] را کاهش داده و از این طریق توانست اثر منفی سرما (انجماد) را کاهش دهد [۱۱۱]. وارد و همکاران (۲۰۱۱) بیان داشتند که سیلسیم با جذب آلومنیوم آزاد و ایجاد مجتمع‌های آلومینوسیلیکات در دیواره سلولی و آپوپلاسم، اثر سمیت آلومینیوم را در گیاه صنوبر کاهش می‌دهد [۱۷۸].

1 - Dehydroascorbate reductase (DHAR)
2 - Glutathione peroxidase (GSH-Px)
3 - Mono dehydroascorbate reductase(MDHAR)
4 - Malondialdehyde (MDA)