فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول... ..... ۱

۱-۱- مقدمه ۱

۱-۲- هدف‌های پژوهش ۴

فصل دوم.... ..... ۵

۲-۱- پسته ۵

۲-۱-۱- تاریخچه ۵

۲-۱-۲- ارزش غذایی پسته ۶

۲-۱-۳ گیاهشناسی پسته ۷

۲-۱-۴- سطح زیر کشت پسته ۸

۲-۱-۵- پسته قزوینی (*P. vera* cv. Qazvini)..... ۸

۲-۲- تنش کادمیوم و اثرات آن ۹

۲-۲-۱- اثرات کادمیوم ۹

۲-۲-۲- کلات کادمیوم ۱۰

۲-۲-۳- سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی گیاهان در مقابل تنش ۱۰

۲-۲-۴- تحرک، جذب و انتقال کادمیوم در گیاه..... ۱۱

۲-۲-۵- تاثیر کادمیوم بر رشد گیاه ۱۲

۲-۳- میکوریز ۱۴

۲-۳-۱- اثرات همزیستی میکوریز بر مقاومت به تنش کادمیوم ۱۶

۲-۳-۱-۱- اثر تنش کادمیوم بر همزیستی میکوریزی ۱۶

۲-۳-۱-۲- اثر میکوریز بر پارامترهای رویشی..... ۱۶

۲-۳-۱-۳- اثر میکوریز بر تنظیم‌کننده‌های اسمزی ۱۸

۲-۳-۱-۴- اثر میکوریز بر پارامترهای فتوسنتزی..... ۱۹

۲-۳-۱-۵- اثر میکوریز بر تغذیه گیاه ۱۹

عنوان **صفحه**

۲-۳-۱-۶- اثر میکوریز بر شاخص‌های تنش ۲۱
۲-۳-۲- اثر همزیستی میکوریز بر پسته ۲۲

فصل سوم ۲۵

مواد و روش ها ۲۵
۳-۱- نوع طرح آزمایشی و محل انجام آزمایش ۲۵
۳-۲- گونه و قارچ مورد استفاده ۲۵
۳-۳- تهیه خاک ۲۶
۳-۴- جوانه‌زنی بذر ۲۷
۳-۵- اعمال تیمارها ۲۷
۳-۶- اندازه گیری پارامترها ۲۷
۳-۶-۱- پارامترهای رویشی ۲۷
۳-۶-۲- پارامترهای اکوفیزیولوژیکی ۲۸
۳-۶-۲-۱- اندازه‌گیری فلورسانس کلروفیل ۲۸
۳-۶-۳- ۲- اندازه‌گیری رنگدانه‌های برگ ۲۹
۳-۶-۴- تنظیم‌کننده‌های اسمزی ۳۰
۳-۶-۴-۱- پرولین ۳۰
۳-۶-۴-۲- قندهای محلول ۳۰
۳-۶-۴-۳- سوکروز ۳۰
۳-۶-۴-۴- پروتئین محلول کل ۳۱
۳-۶-۵- شاخص‌های تنش ۳۱
۳-۶-۵-۱ اندازه گیری فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز ۳۱
۳-۶-۵-۲ مالون‌دی‌آلدهید ۳۲
۳-۶-۵-۳- پراکسید هیدروژن ۳۲
۳-۶-۶- عناصر غذایی ۳۲
۳-۶-۷- اندازه گیری درصد آلودگی در ریشه‌ها ۳۳
۳-۶-۸- تجزیه آماری ۳۴

عنوان | صفحه

فصل چهارم ۳۵

نتایج ۳۵

۴-۱- پارامترهای رویشی ۳۵
۴-۱-۱- وزن تر و خشک شاخساره ۳۵
۴-۱-۲- طول سیستم ریشه‌ای ۳۷
۴-۱-۳- وزن تر و خشک ریشه ۳۷
۴-۱-۴- ارتفاع ساقه ۳۸
۴-۱-۵- تعداد برگ ۳۹
۴-۱-۶- سطح برگ ۴۰
۴-۱-۷- درصد ریزش برگ ۴۱
۴-۱-۸- علائم ظاهری سمیت کادمیوم ۴۳
۴-۲- رنگیزه‌های گیاهی ۴۴
۴-۲-۱- کلروفیل a و b و کل ۴۴
۴-۲-۲- آنتوسیانین ۴۵
۴-۳- فلورسانس کلروفیل ۴۷
۴-۳-۱- F_v/F_m ۴۷
۴-۳-۲- PI ۴۸
۴-۴- تنظیم کننده‌های اسمزی ۴۹
۴-۴-۱- پرولین ۴۹
۴-۴-۲- قندهای محلول ۵۰
۴-۴-۳- مجموع قندهای محلول ۵۰
۴-۴-۴- ساکارز ۵۲
۴-۴-۵- مجموع پروتئینهای محلول ۵۳
۴-۵- عناصر ۵۴
۴-۵-۱- فسفر ۵۴

عنوان **صفحه**

۴-۵-۲- پتاسیم ۵۵
۴-۵-۳- منیزیم ۵۶
۴-۵-۴- کلسیم ۵۸
۴-۵-۵- آهن ۵۹
۴-۵-۶- روی ۶۰
۴-۵-۷- منگنز ۶۳
۴-۵-۸- کادمیوم ۶۵
۴-۶- شاخص‌های تنش ۶۷
۴-۶-۱- مالون‌دی‌آلدهید ۶۷
۴-۶-۲- پراکسید هیدروژن ۶۸
۴-۶-۳- سوپراکسیددیسموتاز ۷۰
۴-۷- آلودگی ریشه ۷۱
۴-۸- بحث ۷۰
۴-۸-۱- پارامترهای رویشی ۷۰
۴-۸-۲- رنگیزه های گیاهی ۷۶
۴-۸-۳- فلورسانس کلروفیل (F_v/F_m و شاخص عملکرد) ۷۹
۴-۸-۴- تنظیم کننده های اسمزی ۸۰
۴-۸-۵- عناصر ۸۴
۴-۸-۶- شاخص‌های تنش ۹۳
۴-۸-۷- آلودگی میکوریزی ۹۶

فصل پنجم ۹۷

۵-۱- نتیجه گیری ۹۷
۵-۲- پیشنهادات ۹۸

منابع ۹۹

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۴-۱- تاثیر برهمکنش سطوح مختلف کادمیوم (۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر) و همزیستی میکوریز بر وزن تر شاخساره (الف)، وزن خشک شاخساره (ب)، اثر ساده میکوریز بر وزن تر شاخساره (ج) و وزن خشک شاخساره (د) ۳۶

شکل ۴-۲-اثر ساده سطوح مختلف کادمیوم (۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر) در گیاهان میکوریز و بدون میکوریز بر طول سیستم ریشه‌ای..... ۳۷

شکل ۴-۳- اثر ساده همزیستی میکوریز بر وزن خشک ریشه ۳۷

شکل ۴-۴-اثر متقابل همزیستی میکوریز و سطوح مختلف کادمیوم (۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر) (الف) و اثر ساده میکوریز بر ارتفاع ساقه (ب) ۳۸

شکل ۴-۵- اثر متقابل سطوح مختلف کادمیوم (۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر) و همزیستی میکوریز (الف) و اثر ساده میکوریز (ب) بر تعداد برگ ۳۹

شکل ۴-۶-اثر ساده سطوح مختلف کادمیوم (۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر) (الف) و اثر ساده همزیستی میکوریز بر سطح برگ (ب)..... ۴۰

شکل ۴-۷-اثر متقابل همزیستی میکوریز و سطوح مختلف کادمیوم (۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر) (الف) و اثر ساده میکوریز بر درصد ریزش برگ (ب)..... ۴۱

تصویر ۴-۱- علائم ظاهری سمیت کادمیوم در دانهال‌های پسته قزوینی ۴۳

شکل ۴-۸- اثرات ساده همزیستی میکوریز و سطوح مختلف کادمیوم (۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۶ میلیگرم بر لیتر) بر کلروفیل a (الف و ب) و اثرات متقابل میکوریز و کادمیوم بر کلروفیل b (ج) و کلروفیل کل (د) ۴۵

شکل ۴-۹- اثرات متقابل میکوریز و کادمیوم (۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر) (الف) و اثر ساده میکوریز (ب) بر محتوای آنتوسیانین برگ..... ۴۶

شکل ۴-۱۰- اثرات متقابل میکوریز و کادمیوم (۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر) (الف) و اثر ساده میکوریز (ب) بر میزان F_v/F_m ۴۷

عنوان **صفحه**

شکل ۴-۱۱- اثرات متقابل میکوریز و کادمیوم (۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر) (الف) و اثر ساده میکوریز (ب) بر میزان شاخص PI ۴۸

شکل ۴-۱۲- اثرات متقابل میکوریز و کادمیوم (۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر) (الف)، اثر ساده میکوریز (ب) و اثر ساده کادمیوم (ج) بر میزان پرولین برگ ۴۹

شکل ۴-۱۳- اثر ساده کادمیوم (۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر) بر میزان قند محلول برگ (الف)، اثر متقابل میکوریز و کادمیوم (ب) و اثر ساده میکوریز (ج) بر میزان قند محلول ریشه ۵۱

شکل ۴-۱۴- اثر ساده کادمیوم (۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر) بر میزان ساکارز برگ (الف)، اثر متقابل میکوریز و کادمیوم (ب) و اثر ساده میکوریز (ج) بر میزان ساکارز ریشه ۵۲

شکل ۴-۱۵- اثر ساده کادمیوم بر میزان پروتئین برگ (الف)، اثر ساده کادمیوم (ب) و میکوریز (ج) بر میزان پروتئین ریشه ۵۳

شکل ۴-۱۶- اثر متقابل کادمیوم (۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر) و همزیستی میکوریز (الف) و اثر ساده میکوریز بر میزان فسفر برگ (ب)، اثر متقابل کادمیوم و میکوریز (ج) و اثر ساده میکوریز بر فسفر ریشه ۵۵

شکل ۴-۱۷- اثر ساده همزیستی میکوریز بر میزان پتاسیم برگ ۵۵

شکل ۴-۱۸- اثرات ساده کادمیوم (۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر) (الف) و همزیستی میکوریز (ب) بر میزان منیزیم برگ، اثر ساده کادمیوم (ج) و اثر ساده میکوریز (د) بر محتوای منیزیم ریشه و اثرات متقابل همزیستی میکوریز و سطوح مختلف کادمیوم (ه) و اثر ساده میکوریز (و) بر میزان منیزیم ساقه ۵۷

شکل ۴-۱۹- اثرات ساده کادمیوم (۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر) بر میزان کلسیم برگ (الف)، اثرات متقابل همزیستی میکوریز و سطوح مختلف کادمیوم (ب) و اثر ساده میکوریز (ج) بر میزان کلسیم ریشه ۵۹

عنوان **صفحه**

شکل ۴-۲۰- اثرات متقابل همزیستی میکوریز و سطوح مختلف کادمیوم (۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر) (الف) و اثر ساده میکوریز (ب) بر میزان آهن برگ و اثر متقابل میکوریز و کادمیوم (ج) و اثر ساده میکوریز (د) بر محتوای آهن ریشه. ۶۰

شکل ۴-۲۱- اثرات ساده میکوریز (الف) و کادمیوم (۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر) (ب) و اثرات متقابل میکوریز و کادمیوم (ج) و اثر ساده میکوریز (د) بر میزان روی ساقه..... ۶۱

شکل ۴-۲۲- اثرات متقابل همزیستی میکوریز و سطوح مختلف کادمیوم (۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر) (الف) و اثر ساده میکوریز (ب) بر میزان منگنز برگ، اثرات متقابل میکوریز و کادمیوم (ج) و اثر ساده میکوریز (د) بر محتوای منگنز ریشه و اثرات متقابل میکوریز و کادمیوم (ه) و اثر ساده میکوریز (د) بر میزان منگنز ساقه ۶۴

شکل ۴-۲۳- اثرات متقابل همزیستی میکوریز و سطوح مختلف کادمیوم (۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر) (الف) و اثر ساده میکوریز (ب) بر میزان کادمیوم برگ، اثرات متقابل میکوریز و کادمیوم (ج) و اثر ساده میکوریز (د) بر محتوای کادمیوم ریشه و اثرات متقابل میکوریز و کادمیوم (ه) و اثر ساده میکوریز (د) بر میزان کادمیوم ساقه (میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک). ۶۶

شکل ۴-۲۴- اثرات متقابل همزیستی میکوریز و سطوح مختلف کادمیوم (۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر) (الف) و اثر ساده میکوریز (ب) بر میزان مالون‌دی‌آلدهید برگ و اثرات متقابل میکوریز و کادمیوم (ج) و اثر ساده میکوریز (د) بر محتوای مالون‌دی‌آلدهید ریشه (میکرومول بر گرم وزن تازه)..... ۶۸

شکل ۴-۲۵- اثرات متقابل همزیستی میکوریز و سطوح مختلف کادمیوم (۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر) (الف) و اثر ساده میکوریز (ب) بر میزان پراکسید هیدروژن برگ و اثرات متقابل میکوریز و کادمیوم (ج) و اثر ساده میکوریز (د) بر محتوای پراکسید هیدروژن ریشه (میکرومول بر گرم وزن تازه). ۶۹

شکل ۴-۲۶- اثرات متقابل همزیستی میکوریز و سطوح مختلف کادمیوم (۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر) بر میزان سوپراکسیددسموتاز برگ..... ۷۰

عنوان **صفحه**

شکل ۴-۲۷- اثرات متقابل همزیستی میکوریز و سطوح مختلف کادمیوم (۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر) (الف) و اثر ساده میکوریز (ب) بر میزان پراکسید هیدروژن برگ و اثرات متقابل میکوریز و کادمیوم (ج) و اثر ساده میکوریز (د) بر محتوای پراکسید هیدروژن ریشه.. ۷۱

تصویر ۴-۲- آلودگی دانهال‌های پسته قزوینی به میکوریز آربسکولار (*Glomus mosseae*) در سطوح مختلف کادمیوم (میلی‌گرم بر لیتر)..... ۷۲

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱: ترکیبات غذایی و ویتامین‌های موجود در ۱۰۰ گرم مغز پسته خام (بی نام، ۱۳۸۵)....۷

جدول ۳-۱: ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک استفاده شده. ۲۶

جدول ۴-۱- نتایج تجزیه واریانس مربوط به پارامترهای رویشی دانهال‌های پسته رقم قزوینی تحت تنش کادمیوم ۴۲

ادامه جدول ۴-۱- نتایج تجزیه واریانس مربوط به پارامترهای رویشی دانهال‌های پسته رقم قزوینی تحت تنش کادمیوم ۴۲

جدول ۴-۲- نتایج تجزیه واریانس مربوط به کلروفیل و کارتنوئید دانهال‌های پسته رقم قزوینی تحت تنش کادمیوم ۴۵

جدول ۴- ۳- نتایج تجزیه واریانس مربوط به فلورسانس کلروفیل دانهال‌های پسته رقم قزوینی تحت تنش کادمیوم ۴۸

جدول ۴- ۴- نتایج تجزیه واریانس مربوط به پرولین و مجموع قندهای محلول دانهال‌های پسته رقم قزوینی تحت تنش کادمیوم ۵۱

جدول ۴- ۵- نتایج تجزیه واریانس مربوط به ساکارز و مجموع پروتئین‌های محلول دانهال‌های پسته تحت تنش کادمیوم ۵۴

جدول ۴- ۷- نتایج تجزیه واریانس مربوط به فسفر برگ، ریشه و ساقه دانهال‌های پسته رقم قزوینی تحت تنش کادمیوم ۵۶

جدول ۴-۶ نتایج تجزیه واریانس مربوط به پتاسیم برگ، ریشه و ساقه دانهال‌های پسته رقم قزوینی تحت تنش کادمیوم.....۵۶

جدول ۴- ۸- نتایج تجزیه واریانس مربوط به منیزیم برگ، ریشه و ساقه دانهال‌های پسته رقم قزوینی تحت تنش کادمیوم.....۵۸

عنوان **صفحه**

جدول ۴- ۹- نتایج تجزیه واریانس مربوط به کلسیم برگ، ریشه و ساقه دانهال‌های پسته رقم قزوینی تحت تنش کادمیوم ۶۲

جدول ۴-۱۰ نتایج تجزیه واریانس مربوط به آهن برگ، ریشه و ساقه دانهال‌های پسته رقم قزوینی تحت تنش کادمیوم..... ۶۲

جدول ۴- ۱۱- نتایج تجزیه واریانس مربوط به روی برگ، ریشه و ساقه دانهال‌های پسته رقم قزوینی تحت تنش کادمیوم ۶۲

جدول ۴-۱۲- نتایج تجزیه واریانس مربوط به منگنز برگ، ریشه و ساقه دانهال‌های پسته رقم قزوینی تحت تنش کادمیوم ۶۵

جدول ۴-۱۴- نتایج تجزیه واریانس مربوط به مالون‌دی‌آلدهید و پراکسید هیدروژن دانهال‌های پسته رقم قزوینی تحت تنش کادمیوم..... ۷۰

جدول ۴- ۱۵- نتایج تجزیه واریانس مربوط به فعالیت سوپراکسیددسموتاز و درصد آلودگی ریشه دانهال‌های پسته رقم قزوینی تحت تنش کادمیوم ۷۱

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

پسته گیاهی است که از دیرباز در نقاط مختلف ایران مورد کشت و پرورش قرار گرفته است. جنگل‌های وحشی و خودروی پسته در ناحیه شمال شرقی ایران و نواحی هم‌مرز با ترکمنستان و افغانستان پیشینه‌ای باستانی دارد و تصور می‌رود که درخت پسته حدود ۴-۳ هزار سال قبل در ایران اهلی شده و مورد کشت و کار قرار گرفته است (پناهی و همکاران، ۱۳۸۰).

فلزات سنگین به‌طور قراردادی به عناصری با خصوصیات فلزی (انعطاف‌پذیر، هادی و پایدار مانند کاتیون‌ها، لیگاندهای اختصاصی و غیره) گفته می‌شود که عدد اتمی آن‌ها بیشتر از ۲۰ باشد. طبق تعاریف دیگر، فلزات سنگین، فلزاتی هستند که وزن مخصوص آن‌ها بیشتر از ۵ گرم در سانتی‌متر مکعب باشد. عناصر سنگینی مثل مس، آهن، منگنز، نیکل و روی برای رشد گیاه ضروی هستند، اما اگر غلظت آن‌ها از حدی فراتر رود، ایجاد سمیت می‌کنند. فلزات سنگین آلاینده معمول شامل نیکل، سرب، جیوه، مس، کروم، و کادمیوم هستند که نقش بیولوژیکی آن‌ها ناشناخته است و خاصیت سمیت بالایی برای گیاهان دارند. به‌صورت کاملا تئوری، هر ۱۰۰۰ کیلوگرم خاک معمولی حاوی ۲۰۰ گرم کروم، ۸۰ گرم نیکل، ۱۶ گرم سرب، ۰/۵ گرم جیوه و ۰/۲ گرم کادمیوم می‌باشد. بنابراین، به آسانی نمی‌توان دلیل افزایش مقدار فلزات سنگین را به صورت قطعی تعیین کرد (کافی و همکاران، ۱۳۹۱ ;Benavides *et al*., 2005). در بین فلزات سنگین، کادمیوم دارای اهمیت ویژه‌ای است، زیرا به‌راحتی توسط گیاه جذب شده و سمیت آن برای گیاه ۲ تا ۲۰ برابر سایر فلزات

سنگین می‌باشد. نیمه‌عمر متوسط بیولوژیک کادمیوم ۱۸ سال در محیط زیست و ۱۰ سال در بدن انسان گزارش شده است (کریمیان، ۱۳۷۷ و Salt *et al*., 1995). کادمیوم یکی از فلزات سنگین دوظرفیتی است که در طبیعت بیشتر در سنگ‌های معدنی همراه با روی یافت می‌شود. این عنصر از طریق فعالیت‌های معدن‌کاوی، استخراج و پردازش سنگ‌های معدنی روی، آب‌کاری فلزات، استفاده از سوخت‌های فسیلی، کودهای فسفاته و حشره‌کش‌ها در کشاورزی و از طریق فاضلاب‌های شهری و صنعتی وارد خاک می‌شود (Robinson *et al*., 2000; Kirkham, 2006). تاکنون نشان داده شده که کادمیوم موجب بسیاری از تغییرات مرفولوژیکی، فیزیولوژیکی، بیوشیمایی و ساختاری در گیاهان مثل مهار رشد و جوانه‌زنی، کاهش جذب عناصر غذایی، زرد شدن برگ و نکروزه شدن آن‌ها، تغییر ساختار سلول به‌ویژه کلروپلاست و تسریع پیری می‌شود (Benavides *et al*., 2005; Mishra *et al*., 2009). متوسط جهانی غلظت کادمیوم کل در خاک ۰/۰۶ تا ۱/۱ میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش شده است (Kabata-Pendis and Pendis, 2000). متوسط مقدار کادمیوم در خاک‌های ایران قابل مقایسه با متوسط جهانی است. متوسط غلظت کادمیوم در خاک‌های مناطق مرکزی ایران ۱/۶۷ میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش شده است (Amini *et al*., 2005). غلظت مجاز کادمیوم کل از ۱ تا ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک است. به‌طور معمول غلظت کادمیوم در گیاه بین ۰/۰۳ تا ۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم و حد بحرانی برای سمیت ۵ تا ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم وزن خشک می‌باشد (Carinly, 1995; Kebller *et al*., 2005).

میکوریز به همزیستی متقابل بین برخی قارچ‌ها و ریشه گیاهان اطلاق می‌شود. این قارچ‌ها به درون بافت ریشه گیاهان میزبان نفوذ می‌کنند و با فرستادن اندام مکنده به داخل و بین سلول‌های میزبان، برخی از مواد آلی مورد نیاز خود را به‌دست می‌آورند و متقابلا در جذب آب و مواد معدنی، انحلال مواد نامحلول و معدنی کردن مواد آلی خاک اطراف ریشه و جذب آن‌ها به‌وسیله ریشه و بیوسنتز برخی از هورمون‌ها و انتقال آن‌ها به گیاه میزبان کمک می‌کنند (Peterson and Farquhar, 1994). قارچ‌های میکوریز به لحاظ توانایی گیاه در جذب مواد غذایی (Asghari *et al*., 2005)، حفظ فعالیت آنزیم‌ها (Rabie, 2005) و افزایش غلظت کلروفیل (Colla *et al*., 2008)، خطرات ناشی از تنش‌ها را کاهش داده و باعث افزایش تحمل گیاهان در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی می‌شوند. تلقیح گیاهان با قارچ‌های میکوریز آربسکولار، باعث مقاومت به تنش‌های ناشی از خشکی، شوری، حمله پاتوژن‌ها و فلزات سنگین می‌شود (Ouziad *et al*., 2004). قارچ‌های میکوریز آربوسکولار، ارتباط مستقیمی بین خاک و ریشه‌های گیاه برقرار می‌کند، به این ترتیب کارایی گیاه‌پالایی را از طریق تاثیر بر قابلیت دسترسی فلزات سنگین و افزایش تحمل

گیاه تحت تاثیر قرار می‌دهند (Gaur and Adholela, 2004). گزارش شده است که قارچ‌های میکوریز آربوسکولار در بهبود وضعیت تغذیه‌ای در ریزوسفر گیاه موثر هستند و با تجمع فلزات به شکل غیرسمی در ریشه‌های گیاه و میسیلیوم‌های برون‌ریشه‌ای، به تثبیت گیاهی[1] کمک می‌کنند (Gohre and Paszkowski, 2006). حساسیت گیاهان به فلزات سنگین به یک سری مکانیسم‌های فیزیولوژیکی و ملکولی مربوط به هم بستگی دارد که شامل جذب و تجمع فلزات از طریق اتصال به تراوشات خارج سلولی و دیواره سلولی، اتصال یون‌های داخل سلول به مواد مختلف مثلا اسیدهای آلی، اسیدهای آمینه، فریتین‌ها، فیتوکلاتین‌ها، متالوتیونین‌ها و پاسخ‌های کلی حفاظتی در برابر تنش‌های بیوشیمیایی از قبیل القای آنزیم‌های آنتی‌اکسیداتیو و فعال‌سازی یا تغییر سوخت‌وساز گیاهی و بازسازی ساختارهای سلولی تخریب شده می‌باشد (Benavides *et al*., 2005). مکانیسم‌هایی که قارچ میکوریز آربوسکولار برای کاهش تنش فلزات سنگین برای گیاهان به‌کار می‌برد، شامل کلات شدن و غیر پویایی فلزات سنگین در میسیلیوم‌های خارجی، بهبود تغذیه معدنی به‌ویژه فسفر، تغییر pH ریزوسفر و غیره می‌باشد (Joner *et al*., 2000; Christie *et al*., 2004; Gonzalez-Guerrero, 2005). مکانیسم‌های دیگر تحمل فلزات سنگین، ممکن است شامل رقیق‌شدگی از طریق افزایش رشد ساقه یا ریشه، دفع به داخل گرانول‌های پلی‌فسفات[2] و قسمت‌بندی آن‌ها در داخل پلاستید[3]ها و دیگر اندامک‌های غشادار باشد (Galli *et al*., 1994). علاوه بر این، قارچ‌های میکوریز آربوسکولار، جذب فلزات توسط گیاهان را از خاک و انتقال آن به ریشه و اندام هوایی تحت تاثیر قرار می‌دهد که به نوع فلز، گیاه و گونه قارچ بستگی دارد (Li and Feng, 2001). به‌طور کلی نتایج نشان داده که فاکتور انتقال کادمیوم از خاک به ریشه بیشتر از انتقال کادمیوم از ریشه به اندام هوایی بوده و بخش اعظم کادمیوم در ریشه‌های گیاه و در ریسه‌ها و میسیلیوم‌ها ذخیره شده و از انتقال آن به اندام هوایی تا حدود زیادی جلوگیری به عمل آمده که نوعی مکانیسم برای کاهش اثرات سمی کادمیوم در اندام هوایی بوده و در نیل به هدف گیاه‌پالایی کادمیوم و تثبیت در ریشه‌های گیاه موثر است (ملک‌زاده و همکاران، ۱۳۹۰).

به‌دلیل کمبود منابع آبی، در آینده می‌بایست از آب‌های صنعتی یا فاضلاب‌های شهری برای آبیاری باغات استفاده نمود که دارای برخی عناصر سنگین از جمله کادمیوم هستند. در این راستا میزان کادمیوم موجود در آب فاضلاب خوابگاه عرفان مورد تجزیه قرار گرفت که میزان کادمیوم موجود در آن ۰/۴۳۲ میلی‌گرم بر لیتر بود که این میزان بالاتر از حد بحرانی کادمیوم برای گیاه

[1] phytostabilization
[2] Polyphosphate granules
[3] Plastid

است.

۱-۲- هدف‌های پژوهش

۱- بررسی نقش میکوریز آربوسکولار در ایجاد مقاومت به سمیت کادمیوم در دانهال‌های پسته رقم قزوینی

۲- بررسی اثر کادمیوم بر همزیستی میکوریز آربوسکولار

۳- بررسی اثر کادمیوم بر رشد دانهال‌های پسته

۱-۳- فرضیه‌های پژوهش

۱- کاربرد قارچ میکوریز آربوسکولار باعث افزایش جذب عناصرغذایی در دانهال‌های پسته می‌شود.

۲- همزیستی قارچ میکوریز آربوسکولار باعث افزایش مقاومت دانهال‌های پسته به تنش کادمیوم می‌شود.

فصل دوم
مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده

۲-۱- پسته

۲-۱-۱- تاریخچه

پسته از ادوار باستان در زندگی ایرانیان حائز اهمیت فراوان بوده است. نام این درخت در پارسی قدیم، پیستاکا، در پارسی میانه، پیستاک و در پارسی متأخر، پسته تلفظ شده است (ابریشمی، ۱۳۷۳). نام درخت پسته در زبان‌های یونانی و لاتین و سایر زبان‌های اروپایی و نیز زبان‌های عربی، ترکی، روسی، ژاپنی و غیره مأخوذ از وجه تسمیه ایرانی این درخت است. در مورد زادگاه درخت پسته نظریه‌های متفاوتی وجود دارد، این درخت به گفته‌ای بومی آسیای مرکزی و به گفته‌ای دیگر، بومی آسیای غربی و آسیای صغیر است (پناهی و همکاران، ۱۳۸۱). طبق نظر کارادو[1]، دانشمند فرانسوی پسته بومی ایران و سوریه است. هم اکنون گونه‌های خودرویی از پسته، در اغلب مناطق گرم و خشک لبنان، فلسطین، سوریه، ایران، عراق، ترکیه، هند، جنوب اروپا و در نواحی آسیای مرکزی و آفریقای شمالی کم و بیش دیده می شوند. مبدأ اولیه این درخت محدوده سرزمینی است که رویشگاه‌های پسته در آن واقع بوده است. مطابق مستندات تاریخی موجود، چنین محدوده‌ای در قلمرو فرهنگی ایران بوده و در شمال شرقی آن واقع شده است. سرزمینی که بعدها پارت و سپس خراسان نام گرفت رویشگاه اصلی و اولیه درختان پسته بوده است. انتقال درختان پسته از خراسان به سایر نواحی پسته خیز ایران و سایر مناطق جهان، بعد از اسلام انجام

[1] Carado

شده و در این میان، ناحیه قم، قدیمی‌ترین منطقه است. سابقه مستند پسته‌کاری در نواحی یزد، اردکان، اصفهان، نائین، نطنز، اردستان و کاشان متجاوز از ۳ تا ۴ قرن نمی باشد (ابریشمی، ۱۳۷۳).

در ایران، پسته وحشی در استان های کردستان، فارس، سیستان و بلوچستان، لرستان، کرمان، خراسان و اطراف یزد دیده می‌شود و به‌طور کلی پراکندگی این گونه‌ها شامل حوزه دریای مدیترانه و آسیای شرقی است. اولین ارقام پسته در ایران، از پرورش دادن و اهلی نمودن درختان پسته وحشی حاصل شده است که تعداد آن‌ها بسیار محدود بوده و از نظر شکل ظاهری با محصول پسته خودرو شباهت داشته است. به تدریج در نتیجه پیوند و جابجایی این ارقام و توجه باغداران به درشتی دانه های پسته، تا حدودی تحولی ایجاد شده و ارقام جدیدی به دست آمده است (پناهی و همکاران، ۱۳۸۱). تنوع در ارقام پسته ایران، از پسته گرگانی آغاز شد و سپس پسته سبزواری، قمی، سمنانی، کرمانی و غیره به ابتکار باغداران ایرانی به وجود آمد. خارج از قلمرو فرهنگی ایران، با سابقه‌ترین نواحی کشت و کار پسته سواحل آفریقایی مدیترانه، سرزمین تونس و همچنین سرزمین شام یا سوریه است (ابریشمی، ۱۳۷۳). کشت پسته به صورت تجاری به غیر از ایران، در کشورهای آمریکا، ترکیه، یونان، سوریه و ایتالیا نیز انجام می‌شود. آمریکا به‌عنوان دومین تولید کننده پسته دنیا محسوب می‌شود (حاج عبداللهی، ۱۳۷۹). سابقه کاشت درختان پسته در قاره آمریکا و استرالیا مربوط به قرن حاضر است و مبدأ اصلی آن کرمان بوده است (ابریشمی،۱۳۷۳).

۲-۱-۲- ارزش غذایی پسته

دانش امروز، مزایای پسته را از پاره‌ای جهات بر بسیاری از خوراکی های مقوی و مغذی از جمله خاویار، میگو، گوشت قرمز و سفید و غیره به اثبات رسانیده است. گذشته از داشتن مزایای تغذیه‌ای بالا، پسته از خشکبارهای معروف دنیاست که با طعم مخصوص به خود یکی از ترکیبات غذایی و خوراکی مهم محسوب می‌شود. مغز پسته به‌عنوان یکی از خوراکی‌های مطبوع و نیرو بخش از زمان‌های دور مورد استفاده انسان قرار گرفته و بعدها در ترکیب خوراکی‌هایی مانند انواع شکلات، بستنی، کیک، شیرینی و غیره وارد شده است. امروزه پسته به‌عنوان یک آجیل مطبوع و خوشمزه جزء فرهنگ مصرفی بسیاری از ملل قرار گرفته است. از پسته به‌عنوان آجیلی خون‌ساز یاد شده است (ابریشمی، ۱۳۷۳). مغز پسته منبع غنی از چربی، اسیدهای چرب، عناصری مثل کلسیم، منیزیم، پتاسیم و ویتامین‌هایی نظیر B1، B2 و B6 می‌باشد (Agar *et al*., 1998). هم‌چنین پسته مقدار فراوانی آهن قابل جذب در خون دارد و نیز در تقویت حافظه مؤثر است. مغز

پسته دارای ۲۵ تا۳۱ درصد پروتئین خالص و بیش از ۴۰ تا۵۰ درصد چربی است (Garcia *et al*., 1992). ویتامین ها و میزان کارتنوئید و املاح معدنی پسته نیز قابل توجه است. روغن پسته شامل اسیدهای چرب: پالمتیک ۹/۲ تا ۱۳/۴ درصد، استئاریک ۰/۵ تا ۱/۱ درصد، اولئیک ۵۶/۱ تا ۶۴ درصد، لینولئیک ۲۲/۶ تا ۳۱ درصد، لینولنیک ۰/۱ تا ۰/۴ درصد، میریستیک، آراشیدیک و هم-چنین مقدار کمی فیتوسترول است. ارزش غذایی و عناصر معدنی تشکیل‌دهنده مغز پسته در جدول ۲-۱ آمده است.

جدول 2-1: ترکیبات غذایی و ویتامین‌های موجود در ۱۰۰ گرم مغز پسته خام (بی نام، ۱۳۸۵).

نوع ماده	مقدار	نوع ماده	مقدار
آب	۲/۵۰ گرم	سدیم	۷/۶۸۰ میلی‌گرم
پروتئین	۲۱ گرم	روی	۲/۳۰ میلی‌گرم
چربی	۴۶ گرم	مس	۱/۳۲۰ میلی‌گرم
خاکستر	۳/۳۶ گرم	منگنز	۱/.۲۷ میلی‌گرم
فیبر	۱۰/۰۴ گرم	تیامین	۰/۸۴ میلی‌گرم
کربوهیدرات	۲۸ گرم	ویتامین ث	۲/۳۰ میلی‌گرم
پتاسیم	۱/۰۲ میلی‌گرم	ویتامین ای	۶/۶۹۹ میلی‌گرم
فسفر	۴۸۵ میلی‌گرم	نیاسین	۱/۴۲ میلی‌گرم
منیزیم	۱۲۰ میلی‌گرم	اسید پانتوتنیک	۰/۵۱ میلی‌گرم
کلسیم	۱۱۰ میلی‌گرم	ویتامین ب ۶	۱/۲۷ میلی‌گرم
آهن	۴/۲۰ میلی‌گرم	ویتامین آ	۲۶۲ واحد بین‌المللی

۲-۱-۳- گیاه‌شناسی پسته

پسته یکی از محصولات باغی ایران است. جنس پسته (*Pistacia*) از خانواده *Anacardiaceae*، شامل ۱۳ گونه می‌باشد که در این جنس تنها گونه *Pistacia vera* دارای خشک‌میوه خندان بوده و دارای اهمیت تجاری باغبانی است. دیگر گونه‌های این جنس به صورت وحشی می‌رویند و برخی به‌عنوان پایه برای پسته تجاری استفاده می‌شوند (Kafkas *et al* ., 2001). اعتقاد بر این است که قدیمی‌ترین گونه موجود در این جنس، گونه Vera می‌باشد و احتمالا دیگر گونه‌ها از آن مشتق شده‌اند (Zohary, 1952). دو مرکز تنوع برای گونه های جنس پسته در نظر گرفته می‌شود که یکی شامل ناحیه مدیترانه، شمال آفریقا و کشورهای خاورمیانه می‌باشد و دیگری شامل قسمت‌های شرق کوه‌های زاگرس و کوه‌های قفقاز از کریمه تا دریای خزر می‌باشد (Zohry, 1972).

درختان و درختچه‌های به طول ۸-۳ متر، برگ‌ها شانه‌ای فرد، خزان‌پذیر، دارای دمبرگ طویل،

برگچه‌های دارای دمبرگ و یا بدون دمبرگ، تعداد برگچه ۷-۳ عدد و به‌ندرت تکی، برگچه‌ها کشیده یا تخم‌مرغی شکل و دارای نوک کوتاه، برگچه‌ی انتهایی مساوی یا بزرگتر از برگچه‌های جانبی، محور برگ فاقد بال هستند. گل‌آذین نر به صورت پانیکول، به طول ۸-۵ سانتیمتر، پرچم‌ها به تعداد ۶-۵ عدد، بساک‌ها تخم‌مرغی شکل، طول بساک‌ها بزرگتر از میله پرچم، گل دارای ۵-۳ پوشش پریگون است. گل‌آذین ماده به‌صورت پانیکول، بزرگتر از گل‌آذین نر، گل دارای ۴-۲ پوشش پریگون، تخمدان تخم‌مرغی شکل، دارای خامه کوتاه، کلاله سه شاخه است. میوه از نوع شفت، میان‌بر گوشتی، درون‌بر استخوانی شکوفا و یا ناشکوفا است (کریمی، ۱۳۸۹).

۲-۱-۴- سطح زیر کشت پسته

پسته به‌عنوان یک محصول استراتژیک جایگاه خاصی را در بین تولیدات دارا می‌باشد. این محصول بخش عمده‌ای از صادرات غیرنفتی را تشکیل می‌دهد. سطح زیر کشت پسته در ایران در سال ۱۳۸۹ حدود ۴۳۱ هزار هکتار و در حوزه عمل ۲۵ سازمان جهاد کشاورزی کشت شده که ۸۸ درصد آن درختان بارور و ۱۲ درصد بقیه نهال بوده است. استان کرمان با ۷۳/۶ درصد سطح بارور پسته کشور مقام اول را دارا است و دو استان یزد و خراسان رضوی به ترتیب با ۸/۴ و ۶/۱ درصد مقام‌های دوم و سوم سطح بارور را به خود اختصاص داده‌اند. سه استان مزبور جمعا ۸۸/۱ درصد سطح بارور پسته کشور و سایر استان‌های پسته کار ۱۱/۹ درصد سهم در سطح بارور این محصول را داشته‌اند. میزان تولید پسته کشور حدود ۱۹۲ هزار تن می‌باشد. استان کرمان با ۴۶/۵ درصد تولید پسته کشور در جایگاه نخست قرار گرفته است. استان‌های سمنان، خراسان رضوی، یزد، سیستان بلوچستان و تهران به ترتیب با ۱۴/۸، ۱۲/۲، ۹/۶، ۳/۴ و ۳/۳ درصد سهم در تولید این محصول مقام‌های دوم تا ششم را به خود اختصاص داده‌اند. شش استان مزبور جمیعا ۸۹/۷ درصد پسته کشور را تولید کرده‌اند. عملکرد پسته آبی ۵۰۷/۱ کیلوگرم و پسته دیم ۱۵۸/۹ کیلوگرم در هکتار می‌باشد. بیشترین عملکرد پسته آبی با ۳۱۴۱/۲ کیلوگرم متعلق به استان سمنان بوده و کمترین آن با ۲۷۶/۱ کیلوگرم در هکتار به استان لرستان تعلق دارد. پسته بارور دیم فقط در استان مشهد کشت شده است (بی‌نام، ۱۳۸۹).

۲-۱-۵- پسته قزوینی (*P. vera* cv. Qazvini)

زادگاه این رقم، شهرستان قزوین است و به پسته کله‌بزی شهرت دارد. این رقم از ارقام دیرگل و خیلی زودرس محسوب می‌شود. میوه در این رقم بادامی‌شکل، و هر اونس آن دارای ۳۶-۳۵ عدد خشک‌میوه می‌باشد که از هر ۱۰۰ گرم آن، ۵۵-۵۴ گرم مغز حاصل می‌شود. تعداد میوه در هر

خوشه زیاد می‌باشد و میزان ناخندانی و پوکی در آن بالاست. از ویژگی‌های دیگر این رقم می‌توان به قدرت رشد متوسط، تاج گسترده و تناوب باردهی بسیار پایین اشاره کرد دانهال‌های این رقم به همراه رقم بادامی ریز زرند به‌دلیل مقاومت بیشتر به شوری برای پایه‌ی ارقام تجاری پسته استفاده می‌شود (کریمی، ۱۳۸۹).

۲-۲- تنش کادمیوم و اثرات آن

۲-۲-۱- اثرات کادمیوم

فرایند فتوسنتز نسبت به کادمیوم بسیار حساس است و کادمیوم باعث کاهش هدایت روزنه‌ای، کاهش مقدار کلروفیل برگ، کاهش انتقال الکترون در فتوسیستم I و II و اختلال در فعالیت آنزیم‌های دخیل درتثبیت CO_2 می‌شود. تحقیقات نشان داده اولین اثر کادمیوم بر گیاه، کاهش فتوسنتز است (Karataglis *et al*., 1991; Fisher *et al*., 1998). هم‌چنین کادمیوم باعث کاهش آسیمیلاسیون کربن، ایجاد تنش اکسیداتیو، تحریک بسته شدن روزنه‌ها، مختل شدن وضعیت آبی گیاه، بازدارندگی از سنتز کلروفیل، خسارت به نوک ریشه‌ها، کاهش جذب مواد غذایی، اختلال در فتوسنتز و جلوگیری از رشد گیاه می‌شود (Zhou and Qiu, 2005). تحرک کادمیوم با افزایش pH، کربنات و مواد آلی خاک کاهش می‌یابد. کادمیوم به‌راحتی در خاک جابجا می‌شود و حتی زمانی‌که غلظت کادمیوم در خاک کم است، ممکن است کادمیوم به‌راحتی توسط ریشه جذب شود و به اندام هوایی گیاه انتقال یابد که تجمع زیاد کادمیوم در اندام هوایی منبعی برای ورود کادمیوم به زنجیره‌ی غذایی انسان و حیوان است. این عنصر در نارسایی‌های کبد، ریه، استخوان، جریان خون، قلب و اندام‌های حیاتی مانند مغز و کلیه نقش دارد و بر هوش افراد نیز اثر سوء می‌گذارد (عبادی و همکاران، ۱۳۸۴ و Kabata-pendis and Pendis, 2000; Smith, 1996). کادمیوم می‌تواند جذب عناصر معدنی به‌وسیله‌ی گیاهان را از طریق اثر روی قابل دسترس بودن عناصر معدنی از خاک یا کاهش جمعیت میکروب‌های خاک تغییر دهد (Moreno *et al*., 1999). گیاهان کادمیوم را از محلول غذایی راحت‌تر از خاک جذب می‌کنند (Sanita di Toppi and Gabrielli, 1999). کلروز، پیچ‌خوردگی و کوچک ماندن برگ از علائم آشکار سمیت کادمیوم در گیاهان هستند. کلروز ممکن است در اثر کمبود آهن، کمبود فسفر یا کاهش انتقال منگنز نیز ظاهر شود. به طور کلی نشان داده شده که کادمیوم در جذب، انتقال و استفاده از چندین عنصر (Ca، Mg، P و K) و آب به‌وسیله گیاهان دخالت می‌کند (Das *et al*., 1997). هم‌چنین کادمیوم جذب نیترات و انتقال آن را از ریشه به شاخساره به‌وسیله‌ی ممانعت از فعالیت نیترات‌ردوکتاز در شاخساره کاهش می‌دهد (Hernandez *et al*., 1996). ممانعت محسوس از فعالیت نیترات‌ردوکتاز در

گیاهان *Silene cucubalus* نیز مشخص شده است. دیواره‌ی سلولی و غشای پلاسمایی و میکوریز به‌عنوان موانع مهم ورود کادمیوم هستند (Benavides *et al*., 2005).

۲-۲-۲- کلات کادمیوم

یکی از مکانیسم‌های عمومی برگشت‌پذیر برای سم‌زدایی فلزات سنگین در گیاهان و دیگر موجودات زنده، کلات فلز به‌وسیله‌ی لیگاند است و در بعضی از موارد کمپلکس فلز لیگاند مستقیما جانشین می‌شود. مطالعات زیادی نشان می‌دهد که واکوئل مکان اصلی تجمع تعدادی از فلزات سنگین شامل روی و کادمیوم است (Ernst *et al*., 1992). در فلزات، چندین اتصال لیگاندی در گیاهان تشخیص داده شده و شامل اسیدهای آلی، آمینواسیدها، پپتیدها و پلی‌پپتیدها هستند (Rauser, 1999). کلات‌های خارج سلولی اسیدهای آلی مثل سیترات و مالات در مکانیسم مقاومت به آلومینیوم اهمیت دارند. برای مثال، انتشار مالات در معرض آلومینیوم از نوک ریشه تراوش می‌شود که با تحمل به آلومینیوم در گندم همبستگی دارد (Delhaize and Ryan, 1995). بعضی از موتانت‌های مقاوم به آلومینیوم در آرابیدوبسیس انتشار اسیدهای آلی از ریشه‌ها را افزایش می‌دهند (Larsen *et al*., 1998).

۲-۲-۳- سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی گیاهان در مقابل تنش

گیاهان دو گروه از سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی دارند: آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مثل سوپراکسیددیسموتاز، آسکوربات پراکسیداز و کاتالاز، که می‌توانند رادیکال‌های سوپراکسید را به هیدروژن پراکسید، آب و اکسیژن تبدیل کنند درحالی‌که آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی مثل پرولین، آسکوربیک اسید و گلوتاتیون به‌طور مستقیم می‌توانند رادیکال‌های آزاد اکسیژن را سم‌زدایی کنند. این آنتی‌اکسیدان‌ها می‌توانند انواع مختلفی از گونه‌های فعال اکسیژن را مهار کنند. بنابراین سلول را در مقابل تنش اکسیداتیو حفظ می‌کنند (Xu *et al*., Halliwell and Gutteridge, 1986 ;2009). تجمع پرولین در شرایط تنش ممکن است به‌دلیل افزایش فعالیت آنزیم‌های درگیر در سنتز پرولین از قبیل اورنیتین آمینوترانسفراز و پرولین ردوکتاز و جلوگیری از فعالیت آنزیم پرولین کاتابولاز باشد (Madan *et al*., 1995). چهار دلیل برای افزایش تجمع پرولین در حین تنش پیشنهاد شده است که عبارت‌اند از: الف) تحریک سنتز آن از اسید گلوتامیک ب) کاهش انتقال آن از طریق آوند آبکش ج) جلوگیری از اکسیداسیون آن در طول تنش د) تخریب و اختلال در فرآیند سنتز پروتئین (Llamas *et al*., 2000).