فصلنامه (علمی – پژوهشی)

زیست شناسی تکوینی

سال چهاردهم، شماره ۲، بهار ۱۴۰۱ ص. ۱۶-۱

مقاله پژوهشی

تاثیر نانو ذرات سیلیکون و سلنیوم بر افزایش رشد و بهره وری گیاه نعناع فلفلی(*Mentha piperita* L.) تحت تنش شوری

وحیدرضا جلالی[۱*]، مهدی جواهری[۲]

[۱] دانشیار دانشکده کشاورزی شیروان، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران.

[۲] دانشجوی دکتری علوم باغبانی و مهندسی فضای سبز، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

[*] (نویسنده مسئول مکاتبات): v.jalali@uk.ac.ir

تاریخ دریافت: اسفند ۱۴۰۰ تاریخ پذیرش: فروردین ۱۴۰۱

چکیده

شوری آب آبیاری یکی از معضلات فزاینده در مسیر تولیدات کشاورزی و باغی است که پژوهشگران باید راهکارهای مختلف مواجه با این مشکل را تعیین و دراختیار بهره‌برداران قرار دهند. در همین راستا سیلیکون و سلنیوم به دلیل نقش مثبت و قابل توجه آنها چه از لحاظ ساختاری و چه به عنوان کوفاکتور آنزیم‌های مرتبط با متابولیسم آنتی‌اکسیدان‌های مختلف، می‌توانند نقش موثری در افزایش تحمل‌پذیری گیاهان در شرایط تنش شوری ایفا نمایند. بدین منظور آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی شامل چهار سطح شوری و سه منبع کودی از ترکیبات سیلیکون و سلنیوم در اندازه معمولی و نانو در دانشکده کشاورزی شیروان، دانشگاه بجنورد انجام پذیرفت. تجزیه و تحلیل آماری نشان داد که اثر اصلی تنش شوری طبق انتظار، بر تمامی صفات مورد بررسی (به جز درصد اسانس) در گیاه نعنا فلفلی اثر کاهنده و معنی‌دار داشت. در این متغیرها اگرچه اثر اصلی نوع منبع کودی از لحاظ آماری معنی دار نگردید، اما مصرف سطوح مختلف عناصر سیلیکون و سلنیوم (در اندازه نانو)، موجب افزایش ۵/۷، ۱۱/۶، ۲/۲ و ۶ درصدی وزن تر و خشک ریشه، قطر گیاه و شاخص کلروفیل نسبت به تیمار شاهد گردیدکه نشان دهنده تاثیر مثبت کاربرد همزمان این دو عنصر در تخفیف اثر تنش شوری بود. همچنین اثرات اصلی شوری و منبع کودی بر متغیرهای طول و عرض برگ، وزن تر و خشک ساقه، تعداد شاخه فرعی، تعداد برگ وشاخص سطح برگ معنی‌دار بود بطوریکه شوری مقادیر این متغیرها را به ترتیب ۱۸/۲، ۱۳/۲، ۲۴/۲، ۱۵/۵، ۲۸/۵، ۳۹/۱ و ۱۹ درصد نسبت به شاهد کاهش داد. در همه این شاخص‌ها، کاربرد عناصر سیلیکون و سلنیوم در اندازه نانو، همواره اثرگذاری بیشتری نسبت به اندازه معمولی این عناصر داشت که به عنوان یک راهکار مدیریتی در شرایط تنش شوری باید مورد توجه قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: آب شور، اسانس، نانوکود، نعناعیان، ویژگی‌های رویشی.

مقدمه

شوری یکی از عوامل محیطی است که بر بهره‌وری منابع و تولید محصول تأثیر می‌گذارد و علاوه بر آن، یکی از گسترده‌ترین شرایط پیش‌روی کشاورزی در ایران و سرتاسر جهان است [۱]. تنش شوری مستقیماً بر جذب مواد مغذی تأثیر گذاشته و تحت تأثیر شوری، گیاهان ممکن است دستخوش تغییرات مورفولوژیکی همانند کاهش سطح برگ، یا تغییرات بیوشیمیایی همانند کاهش پتانسیل اسمزی گردند. علاوه بر این، در شرایط تنش شوری تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن رخ می‌دهد که می‌تواند باعث آسیب به غشاها، پروتئین‌ها، لیپیدها و حتی DNA شود. به همین دلیل، گیاهان آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی مختلفی را برای دفاع در برابر استرس اکسیداتیو تولید می‌کنند [۲].

نانوذرات به دلیل اندازه کوچک آنها، دارای خواص فیزیکی و شیمیایی هستند که به طور قابل توجهی با ذرات معمولی که مقیاس بزرگتری دارند، متفاوت هستند[۳]. کاربرد انواع مختلف نانوذرات (NPs) در محصولات متفاوت بسته به گونه، مقدار مصرف و نوع نانوذرات، متفاوت ارزیابی شده است. در برخی موارد، هنگامی که غلظت‌های پایین NPs (کمتر از ppm ۱۰۰) به خاک، شاخ و برگ یا بذر گیاهان اعمال شده، پاسخ‌های مؤثری در القاء و تجمع برخی متابولیت‌ها یا فیتوکمیکال‌ها ایجاد کرده است که می‌توانند در دسته آنتی اکسیدان‌ها یا ترکیبات دفاعی قرار گیرند [۴].

خوشبختانه نانوتکنولوژی نتایج امیدوارکننده‌ای را در زمینه‌های مختلف علم از جمله کشاورزی ایجاد کرده است. بنابراین، کاربرد نانوتکنولوژی در کشاورزی به ویژه استفاده از نانوذرات (ذرات ۱۰۰-۱ نانومتر)، که شبیه مولکول‌های بیولوژیکی مانند پروتئین‌ها بوده و قادر به عبور از غشای سلولی هستند، می‌تواند گزینه مناسبی باشد [۵].

در دهه‌های اخیر، محلول پاشی نانوکودها به روشی کارآمد برای غلبه بر مشکل شوری خاک و آب تبدیل شده است. فناوری نانو یکی ازآخرین دستاوردهای کشاورزی دقیق است که پیش‌بینی می‌شود بهره‌وری محصول را برای برآورده کردن نیازهای غذایی فزاینده افزایش دهد [۶].

تحقیقات بر روی رفتار نانو موادی همچون نانوسیلیس در گیاهان و مکانیسم برهمکنش این ترکیب و میزان تأثیر کاربرد آن در کشاورزی پنجره‌های امیدبخشی را باز نموده است [۷]. در همین زمینه،Liang و همکاران (۲۰۰۶) گزارش نمودند که Si ترکیبی خنثی نیست، بلکه به عنوان یک حصار فیزیکی یا مکانیکی در گیاهان عمل می‌کند [۸]. سیلیکون (Si) نه تنها در دیواره سلولی رسوب می‌کند، بلکه به طور فعال در فعالیت‌های متابولیکی و فیزیولوژیکی، به‌ویژه در گیاهانی که تحت تنش‌های محیطی قرار دارند، شرکت می‌کند. به طور کلی، اثر بهبودبخشی منابع سیلیکون بسته به ژنوتیپ گونه‌های گیاهی و نیز اندازه ذرات کاربردی، متفاوت است [۹].

سلنیوم (Se) به دلیل نقش آن به عنوان کوفاکتور آنزیم‌های مرتبط با متابولیسم آنتی‌اکسیدانی، برای سلامت انسان ضروری است، با این حال در گیاهان، Se نیز تأثیر مثبتی بر ظرفیت آنتی‌اکسیدانی دارد [۱۰]. ثابت شده است که نانوذرات سلنیوم (Se NPs) می‌توانند به عنوان محرک در گیاهان عمل کنند، سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی آنها را بهبود بخشند و بنابراین، توانایی آنها را برای تحمل استرس افزایش دهند [۱۱]. نانوذرات سلنیوم دارای خواص بیولوژیکی منحصربفرد و سمّیت کم بوده در مقابل، بر اساس تحقیقات صورت گرفته، شکل توده‌ای آن (به دلیل استرس اکسیداتیو) دارای اثر سمی کاملاً ملموسی برای گیاهان مخصوصاً در غلظت‌های بالا است [۱۲]. به عنوان مثال مشاهده شد که استفاده از سلنات با غلظت کم ۱۰mg/l موجب بروز اثرات منفی بر ظرفیت فتوسنتزی و رشد گونه *Nicotiana tabacum* گردید، در حالی که این عنصر به شکل نانوذرات حتی در غلظت‌های بسیار بالاتر (۱۰۰ mg/l)، هیچ اثر منفی نداشته است[۱۳]. بنابراین، کاربرد سلنیوم در محصولات زراعی ممکن است گزینه خوبی باشد و با توجه به ویژگی‌های آن در نتیجه اندازه آن، نتایج بهتری نسبت به آنچه به صورت غیرنانو و در اندازه‌های معمولی مشاهده می‌شود، انتظار داشت. با این حال، اطلاعات کافی در مورد استفاده از نانوذرات Se-NP و تأثیر آنها بر تحمل تنش غیرزیستی وجود ندارد. با توجه به نکات فوق و از آنجایی که تاکنون تحقیق مستقلی در ارتباط با بررسی اثر منابع و اندازه‌های مختلف ترکیبات سلنیوم- سیلیکون بر گیاه نعنا فلفلی گزارش نشده است، این تحقیق با هدف بررسی اثر منابع مختلف نانوذره سلنیوم و سیلیکون بر عمده‌ترین صفات رشدی گیاه نعنا فلفلی انجام شد. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند در تعیین

میزان اثرگذاری این مواد در شکل‌های مختلف و نیز میزان تعدیل تنش شوری در حضور و عدم حضور این ترکیبات قابل توجه باشد.

مواد و روش‌ها

کشت گیاهان و اعمال تیمارها

ابتدا ریزوم‌هایی به‌طول تقریبی ۱۰ سانتی‌متر تهیه و در گلدان‌هایی با ابعاد ۳۰×۲۰، حاوی بستر کشت مناسب شامل خاکبرگ، ماسه بادی و خاک رس به نسبت (۱:۱:۱) کشت گردید. پس از کاشت ریزوم‌ها، گلدان‌ها در گلخانه دانشکده کشاورزی شیروان، دانشگاه بجنورد قرار گرفتند. با گذشت یک ماه پس از کاشت و استقرار کامل گیاهان، به منظور اعمال تنش شوری، آبیاری به طور منظم با سطوح شوری مشخص شده انجام شد. طرح مورد استفاده در این پژوهش فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی و در سه تکرار بود. فاکتور اول شوری آب آبیاری بود که در چهار سطح شوری مختلف آب آبیاری (آب شهر، ۱، ۲ و ۴ دسی زیمنس‌متر) که از باغات پسته سبزوار با شوری ۹ dS/m تهیه شده بود، اعمال گردید. نمونه آب پس از انتقال به آزمایشگاه با استفاده از آب مقطر تا سطوح مورد اشاره رقیق و پس از آن مورد استفاده واقع شد.

فاکتور دوم شامل منابع مختلف کودی و در سه سطح عدم مصرف کود(T1)، مصرف کود سلنیوم و سیلیکون به شکل معمولی و در غلظتهای به ترتیب ۲۵ و ۵۰ mg/l (T2) بود و درنهایت سطح سوم شامل کودهای نانو سیلیکون و نانو سلنیوم با همان غلظتها بود که بطور مرتب در طول دوره و هر دو روز یکبار محلولپاشی گردید. در پایان آزمایش صفات رویشی عمده گیاه نعنا فلفلی مورد ارزیابی قرار گرفت. در همین راستا صفات وزن تر ساقه، برگ و ریشه بلافاصله پس از برداشت با ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ گرم توزین شد. اندام‌های مذکور پس از ۴۸ ساعت قرارگیری در آون (در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد)، خشک شده و مجدداً توزین و ثبت گردید.

جهت اندازه‌گیری سطح برگ از دستگاه سطح برگ سنج دیجیتالی Portable Laser Leaf Area Meter مدل CI-202 استفاده گردید. برای اندازه‌گیری طول و عرض برگ و ارتفاع ساقه و بوته از خط‌کش فلزی استفاده شد. اندازه‌گیری شاخص کلروفیل گیاه به کمک دستگاه اسپد انجام شد و قطر ساقه نیز توسط کولیس اندازه‌گیری گردید. برای استخراج اسانس از اندام هوایی گیاه از دستگاه کلونجر استفاده و بر اساس روش ارائه شده توسط Mehrafarin و همکاران (۲۰۱۷) اقدام گردید [۱۴].

اندازه‌گیری‌های فوق در آزمایشگاه تحقیقاتی گیاهان دارویی دانشکده کشاورزی شیروان انجام پذیرفت. در انتها اقدام به تجزیه و تحلیل آماری نتایج آزمایشگاهی در محیط نرم‌افزار SPSS16 شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از روش چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۰/۰۵ انجام گرفت. رسم نمودارها هم به کمک نرم افزار Excel 2013 ترسیم شد.

نتایج

شاخص وزن تر ریشه

اعمال تنش شوری در غلظت‌های مختلف بر وزن تر ریشه، باعث کاهش چشم‌گیر رشد این اندام شد. نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی شوری در سطح ۱% بر شاخص وزن تر ریشه معنی‌دار بوده است. همچنین اثر مصرف کودهای مختلف و اثر متقابل مصرف کود و تنش شوری از لحاظ آماری معنی دار نبوده است (جدول ۱). این نتایج نشان می‌دهد که میزان شاخص وزن تر ریشه تحت تاثیر تنش شوري قرار گرفته است. مقایسه میانگین سطوح مختلف شوري، نشان می‌دهد که با بالا رفتن میزان شوری آب آبیاری در محیط ریشه، میزان وزن تر ریشه به طور معنی‌داری کاهش می‌یابد (شکل 1A). بیشترین وزن ریشه در گلدان، در تیمار شاهد (آب شهر با شوری dS/m ۰/۶) بدست آمد و به همین ترتیب کمترین وزن این شاخص در سطح شوری dS/m ۴ مشاهده شد. همچنین بین تیمار شوری ۲ و dS/m ۴ اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. در ادامه افزایش سطوح شوری موجب کاهش ۱۱، ۴ و ۱۷/۵ درصدی وزن تر ریشه به ترتیب در تیمارهای ۱، ۲ و dS/m ۴ نسبت به شاهد گردید.

شاخص وزن خشک ریشه

در بررسی اثر شوری و منابع مختلف کودی بر وزن خشک ریشه گیاه نعنا فلفلی، مشخص گردید که تیمار شوری در سطح ۵%

باعث کاهش معنی‌داری بر این شاخص شد ولی اثر اصلی منابع مختلف کودی و همچنین اثر متقابل منابع مختلف کودی و شوری معنی دار نبود (جدول ۱). مقایسه میانگین بین سطوح مختلف شوری نشان داد که وزن خشک ریشه تا شوری ۲ dS/m از لحاظ آماری اختلاف ندارند ولی با افزایش شوری در سطح ۴ dS/m، این فاکتور به شدت کاهش می‌یابد بطوریکه کاهش وزن خشک ریشه در تیمار ۴ dS/m نسبت به شاهد به میزان ۱۲/۵ % بوده است. در حالیکه درصد کاهش وزن خشک ریشه در شوری‌های ۱ و ۲ dS/m نسبت به شاهد به ترتیب ۱/۱ و ۴/۴ درصد بدست آمد که از لحاظ آماری این اختلافات معنی‌دار نبودند (شکل ۱B).

شاخص قطر ساقه

اثر تنش شوری بر قطر ساقه اثری کاهشی بود به طوری که این اثر در سطح ۵% موجب کاهش معنی‌دار فاکتور قطر ساقه گردید. همانطور که در جدول تجزیه واریانس (جدول ۱) مشخص است، در مورد این فاکتور، اثر اصلی منابع مختلف کودی و همچنین اثر متقابل منابع مختلف کودی و شوری معنی‌دار نشد. مقایسه میانگین عملکرد فاکتور قطر ساقه در سطوح مختلف شوری نشان داد که افزایش شوری موجب بروز روندی کاهشی در قطر ساقه گیاه گردد. بر اساس شکل ۱C، مشخص می شود که کمترین کاهش قطر گیاه نسبت به شاهد در تیمار با شوری dS/m ۱ (با ۳/۲ درصد کاهش نسبت به شاهد) و بیشترین کاهش قطر نیز در سطح شوری ۴ dS/m با ۱۶/۹ درصد کاهش نسبت به شاهد محاسبه گردید.

شاخص ارتفاع بوته

جدول ۱، تجزیه واریانس تاثیرات اصلی منابع مختلف کودی و تنش شوری و همچنین اثر متقابل این دو تیمار را بر شاخص ارتفاع بوته نشان می دهد. بررسی داده‌های جدول نشان می دهد که تنها اثر اصلی تنش شوری با احتمال ۹۹ درصد توانسته است تاثیری معنی‌دار بر شاخص ارتفاع بوته گیاه نعنا فلفلی داشته باشد. در همین راستا اقدام به مقایسه میانگین این فاکتور در سطوح مختلف شوری گردید. همانطور که در شکل ۱D نمایان است، شوری موجب تحمیل روندی کاهنده بر فاکتور ارتفاع بوته گیاه نعنا فلفلی شده است. بیشترین ارتفاع بوته در تیمار شاهد و به اندازه ۵۱/۳ سانتیمتر بدست آمد، در حالیکه در تیمار شوری ۴ dS/m، ارتفاع با ۳۱ درصد کاهش نسبت به شاهد، به ۳۵/۳ سانتیمتر رسید. همچنین تیمارهای شوری ۱ و ۲ dS/m به ترتیب با ۱۱/۵ و ۱۷ درصد کاهش نسبت به شاهد، با یکدیگر در یک دسته قرار گرفتند.

شاخص وزن تر برگ

شاخص وزن تر برگ، یکی از مهمترین شاخصهای گیاهی در مورد نعنا فلفلی است که بدان پرداخته شد. با درنظر گرفتن جدول ۱، مشخص گردید که از بین تاثیرات اصلی منابع مختلف کودی و تنش شوری و همچنین اثر متقابل این دو تیمار بر شاخص وزن تر برگ، تنها اثر اصلی تنش شوری با احتمال ۹۹ درصد توانسته است تاثیری معنی‌دار بر این شاخص داشته باشد. در ادامه اقدام به مقایسه میانگین این فاکتور در سطوح مختلف شوری گردید (شکل ۱E). همانطور که از شکل ۱E بر می‌آید، شوری موجب کاهش معنی‌دار وزن تر برگ گیاه نعنا فلفلی شده است. بیشترین وزن تر برگ در تیمار شاهد و به اندازه ۳۴/۵ گرم در هر گلدان بدست آمد، اما در بالاترین سطح تنش شوری (تیمار شوری ۴ dS/m)، وزن تر برگ با ۲۸ درصد کاهش نسبت به شاهد، به ۲۴/۸ گرم رسید. همچنین تیمارهای شوری ۱ و ۲ dS/m با ۶/۷ و ۲۸ درصد کاهش نسبت به شاهد روند کاهشی خود را حفظ نمودند. لازم به ذکر است که از لحاظ آماری بین تیمارهای ۲ و ۴ dS/m هم اختلاف معنی‌داری مشاهده نگردید. همچنین اختلاف معنی داری بین تیمار شاهد و شوری ۱ dS/m مشاهده نشد.

شاخص وزن خشک برگ

شاخص وزن خشک برگ نیز همانند شاخص وزن تر آن، یکی از مهمترین شاخص‌های گیاهی در مورد نعنا فلفلی است که در این آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. با درنظر گرفتن جدول ۱، مشخص گردید که از بین تاثیرات اصلی منابع مختلف کودی و تنش شوری و همچنین اثر متقابل منابع مختلف کودی × تنش شوری، اثر اصلی تنش شوری در سطح احتمالاتی ۱ درصد، تاثیری معنی‌دار بر این شاخص داشته است. مقایسه میانگین

فاکتور شوری بر شاخص وزن خشک برگ در شکل ۱F نشان داده شده است. با درنظر گرفتن این شکل، مشخص می‌گردد که شوری موجب کاهشی معنی‌دار بر وزن خشک برگ گیاه نعنا فلفلی شده است. تیمار شاهد واجد بیشترین وزن خشک برگ گیاه و به مقدار۹/۵ گرم در هر گلدان بود، کمترین وزن خشک برگ گیاه در بالاترین سطح تنش شوری (تیمار شوری dS/m ۴)، به مقدار ۷/۷ گرم و با ۱۸ درصد کاهش نسبت به شاهد بدست آمد. همانند شاخص وزن تر برگ، تیمارهای شاهد و شوری dS/m ۱ در یک گروه قرار داشتند، همچنین تیمارهای شوری ۲ و dS/m ۴ هم اختلاف معنی داری با یکدیگر نداشته و در یک گروه قرار گرفتند.

شاخص کلروفیل (اسپد)

جدول ۱ نشان می دهد که در بررسی اثرات اصلی منابع مختلف کودی و تنش شوری و همچنین اثر متقابل منابع مختلف کودی و شوری بر شاخص کلروفیل (اسپد)، تنها اثر اصلی تنش شوری در سطح ۱ درصد توانسته است تاثیری قابل توجه بر میزان محتوی کلروفیل گیاه نعنا فلفلی داشته باشد. مقایسه میانگین این شاخص بر اساس روش دانکن هم نشان داد که افزایش شوری در بالاترین سطح (شوری dS/m ۴) موجب کاهش ۲۲ درصدی این شاخص نسبت به شاهد شد(شکل ۱G). به همین ترتیب کاهش شاخص کلروفیل در سطوح شوری ۱ و dS/m ۲ به ترتیب ۱۰/۹ و ۱۱/۸ درصد بدست آمد. با در نظر داشتن شکل ۱G، مشخص شد که تیمارهای ۱ و dS/m ۲ با یکدیگر اختلاف آماری معنی‌داری ندارند.

شاخص درصد اسانس

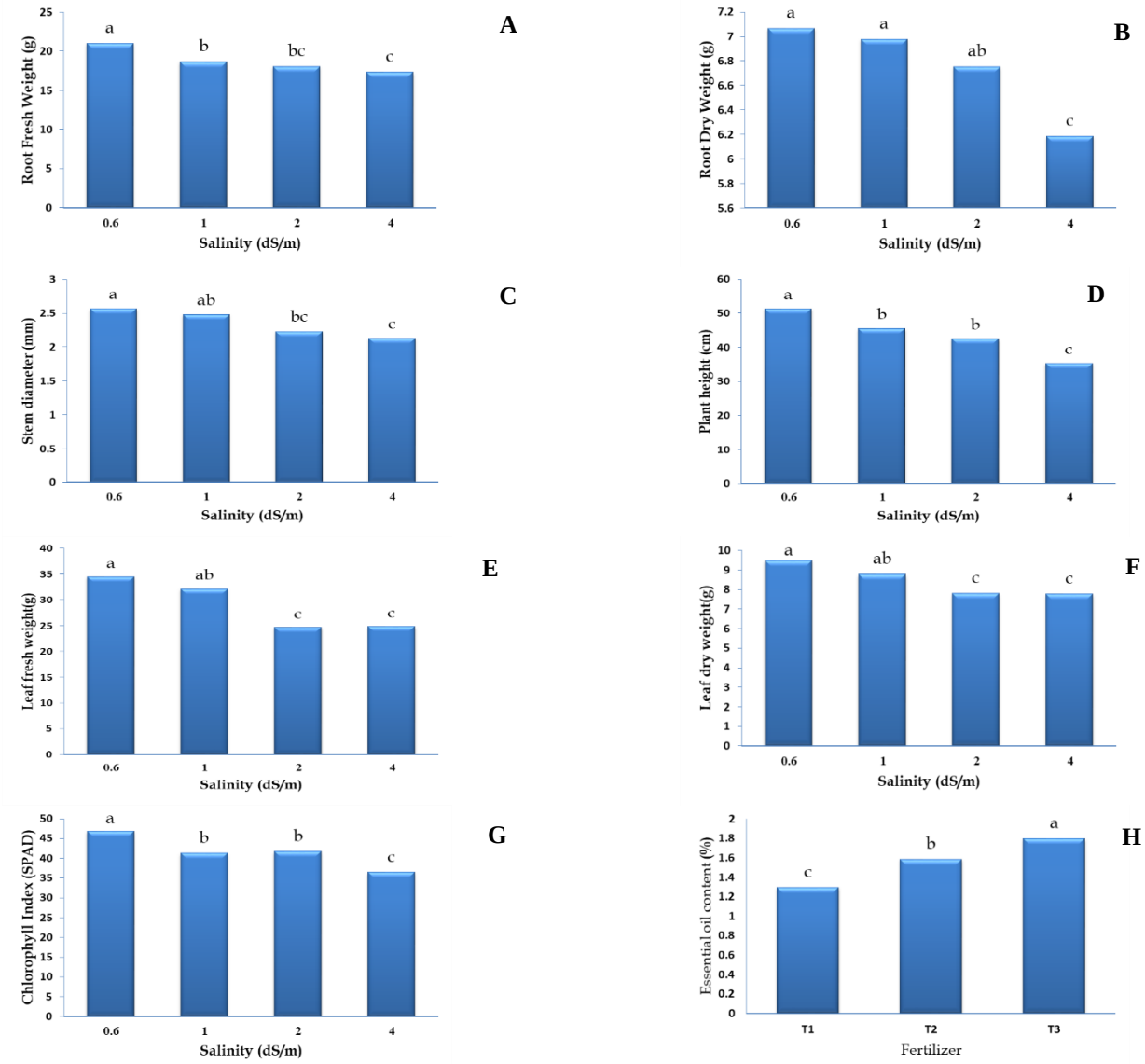
درصد اسانس یکی از مهمترین فاکتورهای زراعی در مطالعات گیاهان دارویی است. نتایج نشان داد که در بررسی اثرات اصلی منابع مختلف کودی و تنش شوری و همچنین اثر متقابل منابع مختلف کودی و شوری بر شاخص درصد اسانس، تنها اثر اصلی منابع مختلف کودی با احتمال ۹۹ درصد بر میزان شاخص درصد اسانس معنی‌دار بوده است (جدول ۱). شکل ۱H نیز افزایش معنی‌دار میزان اسانس در تیمار کودی نانو را نسبت به کودهای غیرنانو و تیمار عدم مصرف کود به وضوح نشان می‌دهد. بیشترین میزان استحصال اسانس در تیمار مصرف کود نانو با میانگین ۱/۸ درصد بدست آمد در حالیکه میزان این فاکتور در تیمار مصرف کود به شکل غیرنانو، به میزان ۱/۵۸ درصد (۲۲درصد کاهش نسبت به تیمار مصرف کود نانو) مشاهده گردید. در تیمار عدم مصرف کود میزان شاخص درصد اسانس با ۳۸/۵ درصد کاهش نسبت به تیمار مصرف کود نانو، به میزان ۱/۳ درصد اسانس کاهش یافت.

شاخص طول برگ

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۱، مشخص گردید که اثرات اصلی تیمارهای تنش شوری و منابع مختلف کودی بر شاخص طول برگ در سطح احتمالاتی ۹۹ درصد معنی‌دار هستند. اما در عین حال اثر متقابل منابع مختلف کودی × شوری بر شاخص طول برگ از لحاظ آماری معنی دار نبود.

مقایسه میانگین متغیر طول برگ متأثر از سطوح مختلف شوری در شکل ۲A نشان داده شده است. همانطور که از شکل برمی‌آید، افزایش شوری موجب کاهش معنی دار فاکتور طول برگ گیاه نسبت به شاهد گردیده است. بالاترین طول برگ گیاه در تیمار شاهد و به میزان ۴/۴ سانتیمتر بدست آمد. افزایش شوری موجب کوتاه شدن طول برگ گیاه گردید. بعنوان نمونه در شوری dS/m ۴، متوسط طول برگ گیاه به کمترین مقدار ممکن یعنی ۳/۵۸ سانتیمتر رسید که این عدد نسبت به شاهد کاهش ۱۸/۲ درصدی را موجب گردید. همچنین از لحاظ آماری، تیمار شاهد و شوری dS/m ۱ در یک گروه قرار گرفتند (فاقد اختلاف آماری) و به همین ترتیب تیمار ۲ و dS/m ۴ هم در گروه دیگر جای گرفتند.

بر خلاف تاثیر کاهنده تیمار شوری بر طول برگ گیاه، فاکتور منبع کودی موجب افزایش معنی‌دار این شاخص گردید (شکل ۲B). با در نظر گرفتن شکل، مشخص می‌گردد که بیشترین طول برگ گیاه نعنا فلفلی در تیمار مصرف کود نانو بوده (با متوسط طول۴/۳۵ سانتیمتر) و کمترین طول برگ گیاه نعنا فلفلی نیز در تیمار عدم مصرف کود (۳/۷ سانتیمتر) بوده است. به همین ترتیب درصد کاهش طول برگ گیاه نعنا فلفلی در تیمار عدم مصرف کود و مصرف کود غیرنانو به میزان ۱۸/۳ و ۹/۱۶ درصد بدست آمد.



شکل ۱ - مقایسه میانگین سطوح تیمارهای مختلف بر فاکتور وزن تر ریشه (A)، وزن خشک ریشه (B)، قطر ساقه (C)، ارتفاع بوته(D)، وزن تر برگ (E)، وزن خشک برگ (F)، شاخص اسپد (G) و درصد اسانس (H).

شاخص عرض برگ

متغیر عرض برگ هم تحت تاثیر تیمارهای تنش شوری و منابع مختلف کودی قرار گرفت. نتایج ارائه شده در جدول ۱، نشان داد که اثرات اصلی تیمارهای تنش شوری و منابع مختلف کودی بر شاخص عرض برگ در سطح احتمال ۹۹% دارای تفاوت معنی‌دار می‌باشد. همچنین نتایج این جدول در مورد شاخص عرض برگ حاکی از عدم معنی‌داری اثر متقابل منابع مختلف کودی × شوری بر این شاخص بود. شکل ۲C و ۲D به ترتیب مقایسه میانگین عملکرد فاکتور عرض برگ را در سطوح مختلف شوری و همچنین منابع مختلف کودی نشان می‌دهند. از شکل ۲C به وضوح مشخص است که افزایش شوری موجب کاهش عرض برگ گیاه نسبت به شاهد گردید. بطوریکه بیشترین عرض برگ در تیمار شاهد و به میزان ۲/۶۳ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد و کمترین عرض برگ در تیمار شوری ۴ dS/m، و به میزان ۲/۰۵ سانتی‌متر بدست آمد. به همین ترتیب درصد کاهش عرض برگ گیاه در تیمارهای ۱ و ۲ dS/m به ترتیب ۳/۹ و ۹/۲ درصد نسبت به شاهد محاسبه شد.

در مورد فاکتور عرض برگ گیاه نیز باید به اثر مثبت و افزایشی منابع مختلف کودی علی‌الخصوص کودهای در ابعاد نانو اشاره کرد (شکل ۲D). با توجه به شکل ۲D، فاکتور منبع کودی نقشی

کاملاً افزایشی بر شاخص عرض برگ نعنا فلفلی داشته است. در این حالت بیشترین عرض برگ گیاه نعنا فلفلی در تیمار مصرف کود نانو بوده (با میانگین ۲/۶ سانتی‌متر) و کمترین عرض برگ گیاه نعنا فلفلی هم در تیمار عدم مصرف کود (۲/۱۵ سانتی‌متر) مشاهده شد. درصد کاهش این شاخص برای تیمارهای کودی غیر نانو و عدم مصرف کود نسبت به شاهد به ترتیب برابر ۱۱ و ۲۲/۱ درصد محاسبه گردید.

شاخص وزن تر ساقه

در ادامه بررسی‌های اثر تیمارهای تنش شوری و منابع مختلف کودی بر فاکتورهای زراعی گیاه نعنا فلفلی، تاثیر اصلی و متقابل این تیمارها بر شاخص وزن تر ساقه مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۱، مشخص گردید که اثرات اصلی تیمارهای تنش شوری و منابع مختلف کودی بر شاخص وزن تر ساقه و در سطح احتمالاتی ۹۹ درصد معنی‌دار می‌باشند. در عین حال اثر متقابل منابع مختلف کودی و شوری بر این شاخص معنی دار نشد. مقایسه میانگین عملکرد فاکتور وزن تر ساقه در سطوح مختلف شوری نشان داد که افزایش شوری موجب کاهش وزن تر ساقه گیاه نسبت به شاهد گردید. بر اساس شکل 2E، مشخص می‌شود که بیشترین وزن تر ساقه گیاه در تیمار شاهد و به‌میزان ۶۷/۵ گرم در هر گلدان بدست آمد. در حالیکه با افزایش شوری به dS/m ۴، میزان عملکرد به کمترین مقدار ممکن یعنی ۵۱/۱۷ گرم (۲۴/۲ درصد کاهش نسبت به شاهد) کاهش یافت. به همین ترتیب درصد کاهش وزن تر ساقه در تیمارهای ۱ و dS/m ۲ به ترتیب ۱۲/۵ و ۱۹/۲ درصد نسبت به شاهد بوده‌اند.

بر خلاف فاکتور شوری، فاکتور منبع کودی نقشی کاملا افزایشی بر شاخص وزن تر ساقه نعنا فلفلی داشته است (شکل 2F). بر اساس این شکل بیشترین وزن تر ساقه نعنا فلفلی در تیمار مصرف کود نانو بوده (با میانگین ۶۱/۵ گرم) و کمترین وزن تر ساقه هم مربوط به تیمار عدم مصرف کود (۵۴/۵ گرم) بوده است. درصد کاهش این شاخص برای تیمارهای کودی غیر نانو و عدم مصرف کود نسبت به شاهد به ترتیب برابر ۶/۵ و ۱۲/۹درصد محاسبه گردید.

شاخص وزن خشک ساقه

همانند فاکتور وزن تر ساقه، فاکتور وزن خشک ساقه نیز متاثر از سطوح تیمارهای تنش شوری و منابع مختلف کودی قرار گرفت. بر این اساس و با درنظر گرفتن نتایج ارائه شده در جدول ۱، مشخص گردید که اثرات اصلی تیمارهای تنش شوری و منابع مختلف کودی بر شاخص وزن خشک ساقه در سطح احتمالاتی ۹۹ درصد معنی‌دار می‌باشند. همانند شاخص وزن تر، اثر متقابل منابع مختلف کودی × شوری بر این شاخص معنی دار نبود.

شکل 2G، مقایسه میانگین عملکرد متغییر وزن خشک ساقه را در سطوح مختلف شوری نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن این شکل به وضوح مشخص است که افزایش شوری موجب کاهش معنی دار وزن خشک ساقه گیاه نسبت به شاهد گردیده است. بر این اساس بالاترین وزن خشک ساقه گیاه در تیمار شاهد و به میزان ۱۹/۳۴ گرم در هر گلدان بدست آمد. در حالیکه با افزایش شوری در شوری dS/m ۲، میزان عملکرد به کمترین مقدار ممکن یعنی۱۶/۳ گرم (۱۵/۵ درصد کاهش نسبت به شاهد) رسید. البته میزان عملکرد در بالاترین سطح شوری هم با اختلافی ناچیز نسبت به شوری dS/m ۲ به میزان ۱۶/۵ گرم بدست آمد که از لحاظ آماری در یک گروه قرار دارند (فاقد اختلاف آماری). درصد کاهش وزن خشک ساقه به ترتیب برابر ۹/۵ و ۱۴/۷ درصد در تیمارهای ۱ و dS/m ۴ نسبت به شاهد بوده‌اند.

در مورد این متغییر هم همانند وزن‌تر ساقه، فاکتور منبع کودی موجب افزایش معنی‌دار شاخص وزن‌خشک ساقه نعنا فلفلی گردید (شکل 2H). همانطور که از شکل برمی‌آید، بیشترین وزن‌خشک ساقه نعنا فلفلی در تیمار مصرف کودنانو بوده (با میانگین ۱۸/۳۵ گرم) و کمترین وزن خشک ساقه هم مربوط به تیمار عدم مصرف کود (۱۶/۸۴ گرم) بوده است. هر چند بین تیمار مصرف کود به شکل نانو و غیرنانو اختلاف معنی‌داری مشاهد نشد، ولی استفاده از کود نانو باعث افزایش ۶/۵ درصد وزن خشک ساقه گردید.

شاخص تعداد شاخه فرعی

نتایج تجزیه واریانس که در جدول ۱ گزارش شده است، نشان داد که متغیر تعداد شاخه فرعی هم تحت تاثیر تیمارهای تنش شوری

و منابع مختلف کودی قرار گرفت. براساس نتایج ارائه شده در این جدول، مشخص می‌گردد که اثرات اصلی تیمارهای تنش شوری و منابع مختلف کودی بر شاخص تعداد شاخه فرعی به ترتیب در سطح احتمال ۹۹% و ۹۵% دارای تفاوت معنی‌دار می‌باشد. در عین حال نتایج این جدول در مورد شاخص تعداد شاخه فرعی حاکی از عدم معنی‌داری اثر متقابل منابع مختلف کودی × شوری می‌باشد.

مقایسه میانگین عملکرد فاکتور تعداد شاخه فرعی در سطوح مختلف شوری در شکل 2I نشان داده شده است. با توجه شکل، اثر کاهنده شوری بر این فاکتور به وضوح مشخص است بطوریکه با افزایش شوری، میانگین تعداد شاخه های فرعی از ۷/۷ در تیمار شاهد به ۵/۵ عدد در تیمار dS/m ۴، رسیده است. هرچند از لحاظ آماری تیمارهای شاهد و dS/m ۲، در یک گروه و تیمارهای ۲ و dS/m ۴، در یک گروه دیگر قرار گرفته‌اند، لیکن درصد کاهش تعداد شاخه های جانبی نسبت به شاهد برای تیمارهای ۱، ۲ و dS/m ۴ به ترتیب برابر ۸/۵، ۲۷/۱ و ۲۸/۵ درصد بوده است.

بر خلاف تیمار شوری، فاکتور تعداد شاخه فرعی گیاه نسبت به منابع مختلف کودی علی‌الخصوص کودهای در ابعاد نانو، واکنشی مثبت و افزایشی ارائه کرد (شکل 2J). با توجه به شکل 2J، مشخص می‌گردد که بیشترین تعداد شاخه فرعی گیاه نعنا فلفلی در تیمار مصرف کود نانو بوده (با میانگین تعداد ۶/۹) و کمترین تعداد شاخه فرعی گیاه نعنا فلفلی هم در تیمار عدم مصرف کود (تعداد ۶/۲) مشاهده شد. درصد کاهش این شاخص برای تیمارهای کودی غیر نانو و عدم مصرف کود نسبت به شاهد به ترتیب برابر ۲/۶ و ۱۰/۶ درصد محاسبه گردید.

شاخص تعداد برگ

در گیاهان دارویی، تعداد برگ یکی از مهمترین شاخصه‌های عملکرد گیاه محسوب می‌شود. به همین دلیل در این بخش، تاثیر سطوح تیمارهای تنش شوری و منابع مختلف کودی بر این فاکتور مورد ارزیابی قرار گرفت. بر این اساس با درنظر داشتن نتایج ارائه شده در جدول ۱، مشخص گردید که اثرات اصلی تیمارهای تنش شوری و منابع مختلف کودی به ترتیب بر شاخص تعداد برگ در سطح احتمالاتی ۹۹ و ۹۵ درصد معنی‌دار می‌باشند. همچنین اثر متقابل منابع مختلف کودی × شوری بر این شاخص معنی‌دار نبود.

شکل 2K، مقایسه میانگین عملکرد متغیر تعداد برگ را در سطوح مختلف شوری نشان می‌دهد. همانطور که از شکل برمی‌آید، با افزایش شوری، تعداد برگ روندی کاهشی به خود گرفته است. بیشترین تعداد برگ در تیمار شاهد و به تعداد متوسط ۱۴۰/۸ در هر گلدان شمارش شد. در حالیکه در بالاترین سطح تنشی وارده (شوری dS/m ۴)، تعداد برگ‌ها به کمترین مقدار ممکن یعنی ۸۵/۷ عدد (۳۹/۱ درصد کاهش نسبت به شاهد) رسید. روند کاهشی تعداد برگ‌ها به صورت درصد کاهش در تیمارهای ۱ و dS/m ۲ به ترتیب برابر ۱۰ و ۳۶/۸ درصد نسبت به شاهد محاسبه گردید.

تیمار منبع کودی بر خلاف تیمار تنش شوری، موجب افزایش معنی‌دار شاخص تعداد برگ گیاه نعنا فلفلی گردید (شکل 2L). با درنظر داشتن شکل 2L، بیشترین تعداد برگ گیاه نعنا فلفلی در تیمار مصرف کود نانو بوده (با میانگین تعداد ۱۱۹/۸ عدد در گلدان) و کمترین تعداد برگ گیاه هم مربوط به تیمار عدم مصرف کود (با میانگین تعداد ۱۰۱/۸ عدد در گلدان) بوده است. به عبارت دیگر مصرف کود به شکل غیر نانو و نانو به ترتیب موجب افزایش ۸/۱ و ۱۷/۶ درصدی تعداد برگ گیاه نسبت به تیمار عدم مصرف کود شده است.

جدول ۱- تجزیه واریانس صفات زراعی منتخب نعنا فلفلی متاثر از سطوح مختلف شوری و ترکیب‌های مختلف کودی

درجه آزادی	میانگین مربعات						
	وزن تر ریشه	وزن خشک ریشه	قطر ساقه	شاخص کلروفیل	درصد اسانس	ارتفاع بوته	وزن تر برگ
3	22.9^{**}	1.4^{*}	$.3^{*}$	177.5^{**}	$.04^{ns}$	398.3^{**}	190.5^{**}
2	2.1^{ns}	1.6^{ns}	$.2^{ns}$	12^{ns}	$.27^{**}$	22.4^{ns}	208.3^{ns}
6	$.15^{ns}$	$.5^{ns}$	$.01^{ns}$	4.5^{ns}	$.01^{ns}$	16.5^{ns}	15.3^{ns}
24	1.7	$.4^{ns}$	.08	12.6	.038	15.1	16.0

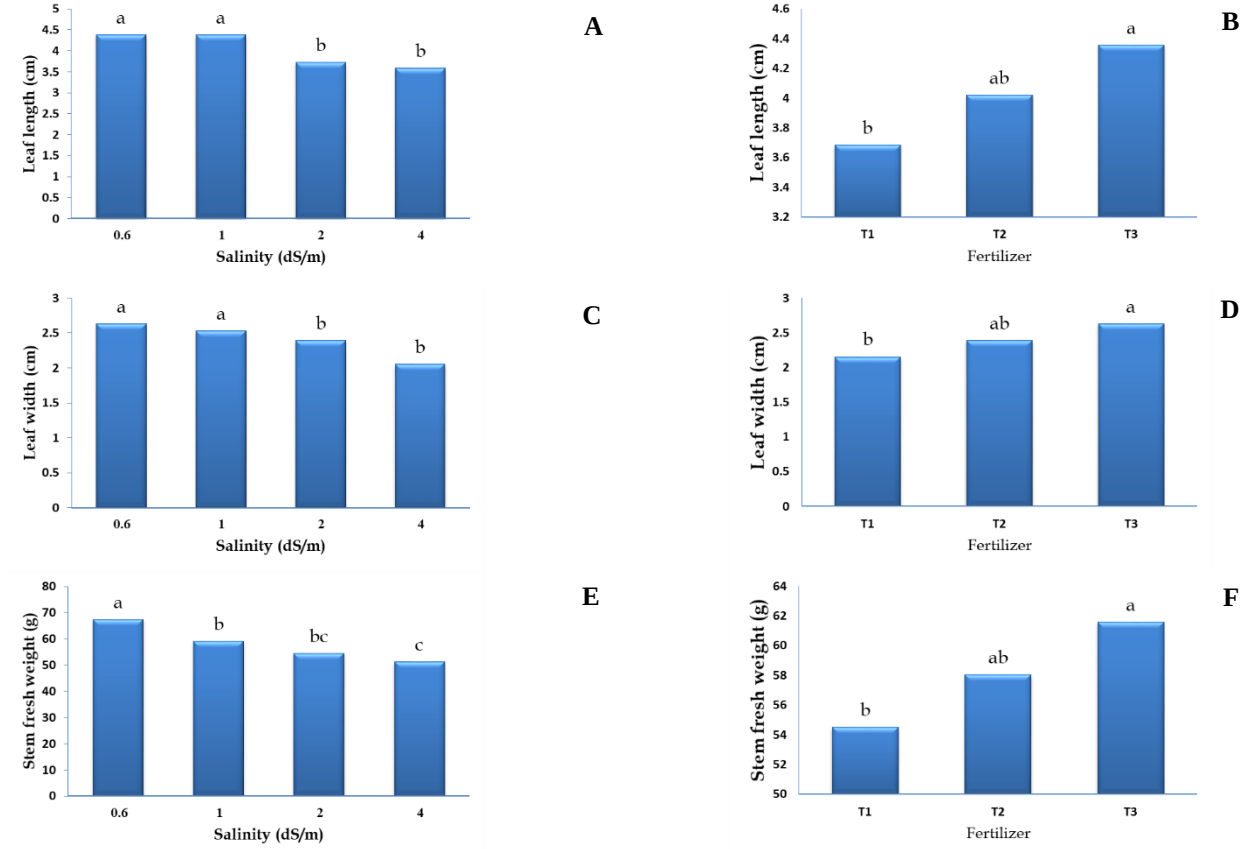
Ns، * و **: به ترتیب بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار، تفاوت در سطح احتمال ۵ % و ۱ % می‌باشد.

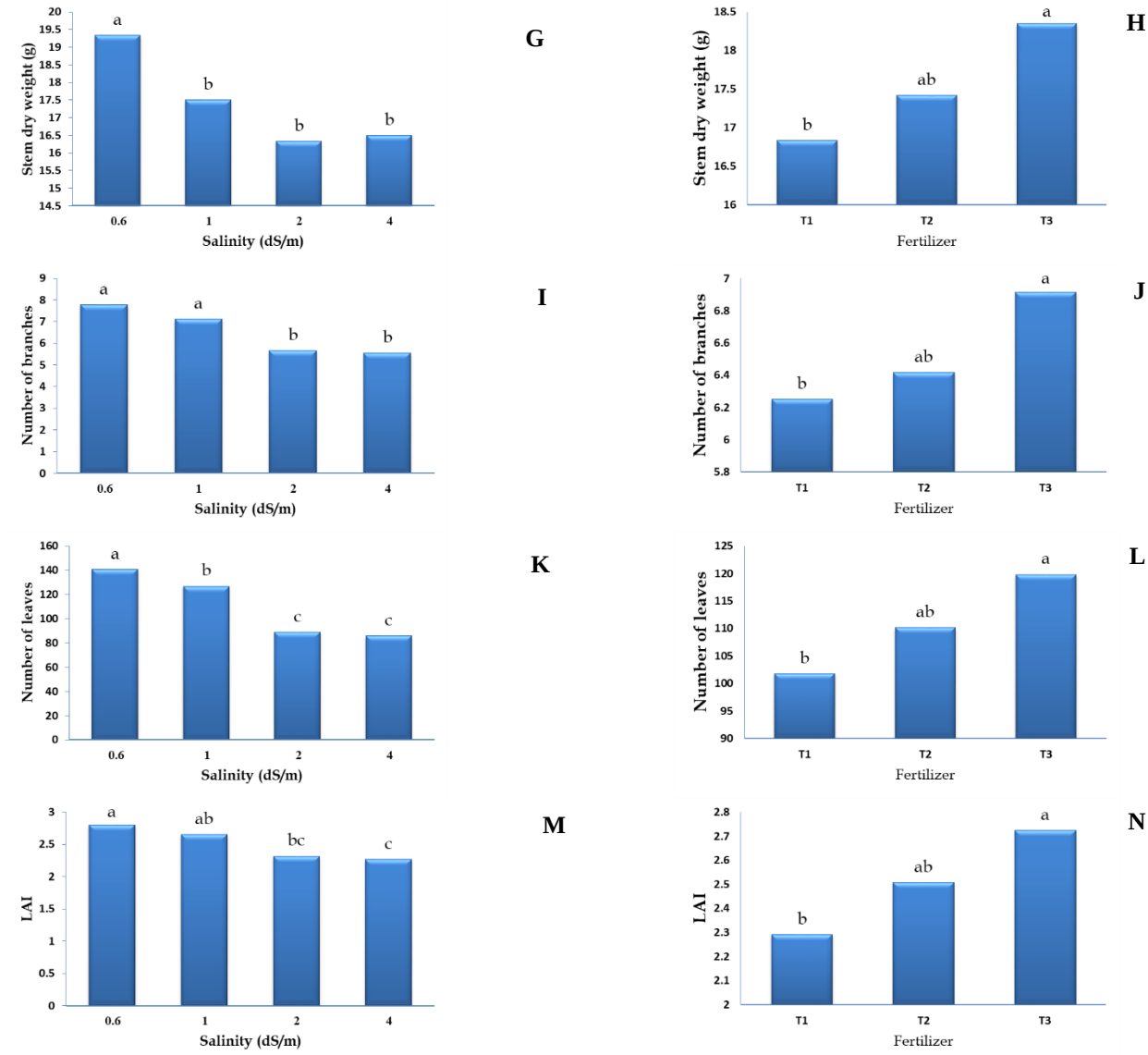
شاخص سطح برگ (LAI)

از آنجایی که شاخص سطح برگ یا LAI می‌تواند بر روی تبادلات مهم ماده و انرژی همانند کنترل میزان تابش نور خورشید، میزان تنفس و همچنین نرخ فتوسنتز نقش داشته باشد، لذا در این پژوهش اثر تیمارهای تنش شوری و منابع مختلف کودی بر شاخص سطح برگ(LAI) گیاه نعنا فلفلی، و همچنین اثر متقابل این تیمارها بر روی شاخص سطح برگ مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۱، مشخص گردید که اثرات اصلی تیمارهای تنش شوری و منابع مختلف کودی بر شاخص سطح برگ و به ترتیب در سطح احتمالاتی ۹۹ و ۹۵ درصد معنی دارد می‌باشند. در عین حال اثر متقابل منابع مختلف کودی و شوری بر این شاخص معنی دار نگردید.

مقایسه میانگین شاخص سطح برگ در سطوح مختلف شوری نشان داد که افزایش شوری موجب کاهش شاخص سطح برگ نسبت به شاهد گردید. بر اساس شکل ۲M، مشخص می‌شود که بیشترین شاخص سطح برگ گیاه در تیمار شاهد و به میزان ۲/۸ در هر گلدان بدست آمد. در حالیکه با افزایش شوری به ۴ dS/m، میزان شاخص سطح برگ به کمترین مقدار ممکن یعنی۲/۲۶ (۱۹ درصد کاهش نسبت به شاهد) رسید. به همین ترتیب درصد کاهش شاخص سطح برگ در تیمارهای ۱ و dS/m ۲ به ترتیب ۵/۳ و ۱۷/۲ درصد نسبت به شاهد محاسبه گردید.

فاکتور منبع کودی بر خلاف فاکتور شوری، موجب بروز روندی افزایشی در شاخص سطح برگ نعنا فلفلی گردید (شکل ۲N). بر اساس شکل ۲N، بیشترین شاخص سطح برگ نعنا فلفلی در تیمار مصرف کود نانو بوده (با میانگین۲/۷۲) و کمترین شاخص سطح برگ هم مربوط به تیمار عدم مصرف کود (۲/۲۹) بوده است. درصد کاهش این شاخص برای تیمارهای کودی غیر نانو و عدم مصرف کود نسبت به شاهد به ترتیب برابر ۹/۴ و ۱۸/۹ درصد محاسبه گردید.





شکل ۲- مقایسه میانگین سطوح تیمارهای مختلف شوری و منبع کود بر فاکتور طول برگ (۲A,B)،عرض برگ (۲C,D)، وزن تر ساقه(۲E,F)، وزن خشک ساقه (۲G,H)،تعداد شاخه فرعی (۲I,J)، تعداد برگ (۲K,L) وشاخص سطح برگ (۲M,N).

همبستگی بین صفات مورد مطالعه

جدول شماره ۲، همبستگی صفات مورد مطالعه در این تحقیق را نشان می‌دهد. بر اساس این جدول همبستگی بین تعداد شاخه های فرعی با تعداد برگ، شاخص سطح برگ، طول و عرض برگ، وزن تر و خشک برگ، کلروفیل، و وزن خشک و تر ریشه در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار به دست آمد. همچنین همبستگی بین تعداد شاخه‌های فرعی با قطر ساقه در سطح ۹۵ % معنی‌دار شد و نهایتا رابطه‌ای معنی‌دار بین این فاکتور و میزان اسانس مشاهده نشد.

همبستگی بین شاخص سطح برگ با تمامی پارامترهای مورد مطالعه به جز قطر ساقه، وزن خشک ساقه و اسانس، در سطح ۹۹ % معنی‌دار بود. همبستگی بین تعداد برگ با تمامی پارامترهای موردمطالعه مثبت و در سطح ۹۹ % (به جز شاخص کلروفیل که در سطح ۵ % معنی دار بود) معنی دار گردید. در مورد فاکتور عرض برگ هم مشاهده شد که همبستگی بین این فاکتور با تمامی پارامترهای موردمطالعه مثبت و در سطح ۹۹ % (به جز ارتفاع بوته که در سطح ۹۵ % معنی دار بود) معنی دار گردید.

همبستگی بین طول برگ با تمامی پارامترهای موردمطالعه به جز شاخص اسپد مثبت و در سطح ۹۹ % معنی‌دار گردید. همبستگی بین طول برگ با وزن تر ریشه نیز در سطح ۹۵ % معنی‌دار بود. وزن خشک ساقه هیچ همبستگی معنی‌داری با وزن خشک ریشه، وزن خشک برگ و شاخص سطح برگ نداشت. همبستگی وزن خشک ساقه با شاخص کلروفیل در سطح ۹۵ % معنی دار بود و همبستگی این شاخص با سایر پارامترهای مورد مطالعه در سطح ۹۹ % معنی‌دار گردید. وزن تر ساقه به جز اسانس با سایر پارامترهای مورد مطالعه همبستگی معنی‌دار در سطح ۹۹ % داشت.

وزن خشک برگ با وزن خشک ساقه، وزن خشک ریشه، اسانس و شاخص کلروفیل هیچ نوع همبستگی نداشت. همبستگی وزن خشک برگ با ارتفاع بوته و تعداد شاخه‌های جانبی در سطح ۹۵ % معنی دار بود و همبستگی این شاخص با سایر فاکتورهای مورد مطالعه در سطح ۹۹ % معنی دار بود. وزن تر برگ به غیر از شاخص کلروفیل، با سایر متغیرهای مورد بررسی همبستگی معنی‌دار در در سطح ۹۹ % ارائه نمود. همبستگی بین ارتفاع بوته با عرض برگ، قطر ساقه و وزن خشک برگ در سطح ۹۵ % معنی دار بود، همچنین این شاخص هیچ نوع همبستگی معنی‌داری با درصد اسانس نداشت. در ادامه همبستگی ارتفاع بوته با مابقی متغیرهای مورد بررسی در سطح در سطح ۹۹ % معنی دار بود.

متغییر اسانس همبستگی معنی‌داری در سطح ۹۹ % با تعداد برگ، طول و عرض برگ، وزن خشک ساقه، وزن تر برگ و قطر ساقه داشت. همچنین شاخص کلروفیل با متغیرهای تعداد برگ و شاخص سطح برگ در سطح ۹۵ % و با شاخصهای تعداد شاخه‌های جانبی، وزن تر وخشک ساقه، وزن تر وخشک ریشه، ارتفاع بوته و عرض برگ در سطح ۹۹ % همبستگی معنی‌داری داشت. قطر ساقه همبستگی معنی داری با شاخص سطح برگ، شاخص کلروفیل، وزن تر و خشک ریشه ارائه نکرد. به همین ترتیب همبستگی بین قطر ساقه با ارتفاع بوته و تعداد شاخه های جانبی در سطح ۹۵ % و با مابقی فاکتورهای مورد بررسی، در سطح ۹۹ % معنی دار بود. همبستگی وزن خشک ریشه بجز متغیر وزن خشک ساقه، وزن خشک برگ؛ میزان اسانس و قطر ساقه، با مابقی متغیرها در سطح ۹۹ % معنی دار گردید. نهایتاً همبستگی وزن تر ریشه نیز با قطر ساقه و میزان اسانس همبستگی معنی داری نداشت. به جز طول برگ (در سطح ۹۵ %) سایر متغیرهای مورد اشاره همبستگی مثبت و معنی دار در ۹۹ % با متغیر وزن تر ریشه داشتند.

جدول ۲- همبستگی آماری بین صفات مورد مطالعه در تحقیق

	وزن تر ریشه	وزن خشک ریشه	قطر ساقه	اسپد	اسانس	ارتفاع بوته	وزن تر برگ	وزن خشک برگ	وزن تر ساقه	وزن خشک ساقه	طول برگ	عرض برگ	LAI	تعداد شاخه جانبی	تعداد برگ
تعداد برگ	.691**	.484**	.574**	.411*	.434**	.677**	.707**	.568**	.816**	.656**	.705**	.577**	.601**	.761**	1
تعداد شاخه جانبی	.556**	.459**	.405*	.468**	.312	.626**	.610**	.390*	.600**	.472**	.597**	.484**	.703**	1	.761**
LAI	.645**	.583**	.370**	.302	.262	.562**	.709**	.429**	.588**	.318	.546**	.634**	1	.703**	.601**
عرض برگ	.477**	.599**	.673**	.488**	.507**	.423*	.729**	.553**	.600**	.451**	.524**	1	.634**	.484**	.577**
طول برگ	.375*	.554**	.546**	.267	.507**	.588**	.780**	.557**	.672**	.469**	1	.524**	.546**	.597**	.705**
وزن خشک ساقه	.498**	.279	.532**	.420*	.499**	.470**	.565**	.290	.642**	1	.469**	.451**	.318	.472**	.656**
وزن تر ساقه	.751**	.587**	.580**	.574**	.304	.738**	.662**	.605**	1	.642**	.672**	.600**	.588**	.600**	.816**
وزن خشک برگ	.491**	.318	.545**	.273	.298	.335*	.712**	1	.605**	.290	.557**	.553**	.429**	.390*	.568**
وزن تر برگ	.509**	.489**	.715**	.255	.561**	.472**	1	.712**	.662**	.565**	.780**	.729**	.709**	.610**	.707**
ارتفاع بوته	.676**	.450**	.295*	.583**	.185	1	.472**	.335*	.738**	.470**	.588**	.423*	.562**	.626**	.677**
اسانس	.137	.288	.554**	.260	1	.185	.561**	.298	.304	.499**	.507**	.507**	.262	.312	.434**
اسپد	.558**	.550**	.289	1	.260	.583**	.255	.273	.574**	.420*	.507**	.488**	.370**	.468**	.411*
قطر ساقه	.262	.259	1	.289	.554**	.295*	.715**	.545**	.580**	.532**	.546**	.673**	.302	.405*	.574**
وزن خشک ریشه	.445**	1	.259	.550**	.288	.450**	.489**	.318	.587**	.279	.554**	.599**	.583**	.459**	.484**
وزن تر ریشه	1	.445**	.262	.558**	.137	.676**	.509**	.491**	.751**	.498**	.375*	.477**	.645**	.556**	.691**

* و ** : به ترتیب بیانگر معنی دار بودن همبستگی در سطح ۵ و ۱ % است.

بحث

بعد از تنش خشکی، شوری مهمترین عامل منفی در کاهش وزن تر و خشک ریشه و اندام هوایی گیاه محسوب می‌شود. در این پژوهش نیز تنش شوری باعث کاهش معنی‌دار وزن تر و خشک ریشه گردید. هرچند آستانه تحمل گیاه به تنش شوری بین ۲ تا ۳ dS/m گزارش شده است، و گیاه تا این حد از شوری را می‌تواند تحمل نماید، اما اثر عمومی شوری که همان کاهش پتانسیل اسمزی و نهایتاً کاهش پتانسیل آب می‌باشد، نقشی کاهنده در رشد ریشه‌ها خواهد داشت. با توجه به شکل ۱A، مشخص می‌گردد که کاهش وزن ریشه در شوری‌های بالاتر از حد آستانه، کاهشی معنی‌دار نسبت به سطوح پایین شوری داشته است. این نتایج با یافته‌های Ghorbani و همکاران [۱۵]، basiri و همکارن[۱۶]، Danaee و Abdossi [۱۷]همخوانی دارد. اگرچه تیمارهای کودی تاثیری معنی‌دار از لحاظ آماری بر افزایش وزن تر و خشک ریشه نداشتند، اما نباید تاثیر مثبت و افزایشی این فاکتور (مخصوصا کود در ابعاد نانو) را از نظر دور داشت. تحقیقات متعددی نشان داده که کاربرد ترکیب‌های سیلیسیوم به دلیل جایگاه ساختاری و تغذیه‌ای که بر رشد گیاه دارد، می‌تواند نقش موثری در افزایش مقاومت گیاهان در مقابل تنش‌های زیستی و غیرزیستی و نیز تاثیر مثبت در تغذیه گیاهان ایفا نماید. از این رو گیاهان شوری را بهتر تحمل نموده و به عبارت دیگر کاربرد این عنصر در ابعاد نانو، موجب کاهش اثرهای منفی در رشد و نمو گیاه و ادامه حیات آن خواهد شد. بر اساس داده‌ها، استفاده از منبع کود نانو باعث افزایش ۵/۷ و ۱۱/۶ درصدی وزن تر و خشک ریشه نسبت به تیمار شاهد گردید. در همین راستا نتایج Zare و همکاران [۱۸]، نیز نشان داد که شوری به طور معنی‌داری شاخص‌های رشد ریشه گیاه ذرت را نسبت به شاهد کاهش داد و تیمار گیاه با سیلیکون و نانو سیلیکون سبب کاهش آثار منفی شوری و موجب افزایش میزان شاخص های رشد شد. Ahmadi و همکاران [۱۹] نیز بیان نمودند که کاربرد تیمار نانو اکسید سیلیکون عملکرد گیاه ارزن را نسبت به تیمار عدم مصرف سیلیسیوم افزایش داد در حالیکه سیلیکات سدیم هیچ تاثیر معنی داری را نشان نداد که این نتایج در راستای نتایج پژوهش حاضر است.

در بررسی‌های ویژگی مربوط به قطر ساقه مشخص گردید که قطر، وزن تر و وزن خشک ساقه نیز متاثر از منبع کودی و تنش شوری واکنش نشان می‌دهند، بطوریکه افزایش شوری باعث کاهش معنی‌دار در هر سه این شاخص‌ها شده است، در حالیکه نوع منبع کودی (علی‌الخصوص کود نانو) تاثیر مثبتی بر ویژگی‌های قطر گیاه نعنا فلفلی داشته است که البته تاثیر افزایشی منبع کودی در مورد قطر ساقه، علی رغم افزایش ۲/۲ درصدی قطر گیاه نسبت به تیمار شاهد، از لحاظ آماری معنی‌دار نگردید اما تاثیر افزایشی منبع کود بر وزن تر و خشک ساقه از لحاظ آماری در سطح احتمالاتی ۹۹ درصد معنی‌دار گردید. Neysanian و همکاران [۲۰] با بکارگیری سطوح مختلف نانوسلنیوم گزارش نمودند که وزن تمامی اندام‌های هوایی با مصرف ۴ mg/l نانو سلنیوم افزایش بیش از ۵۵ درصدی نسبت به شاهد داشته است.

بررسی داده‌های پژوهش حاضر نشان داد که محتوای کلروفیل کل در شرایط تنش شوری به طور معنی‌داری نسبت به شاهد کاهش می‌یابد اما محلول پاشی با نانو سلنیوم و نانو سیلیکون موجب بهبود شاخص کلروفیل در گیاه نعنا فلفلی گردید. هرچند این افزایش از لحاظ آماری معنی دار نبود اما در تیمار کودی نانو، مقدار افزایش شاخص کلروفیل نسبت به شاهد در حدود ۶ درصد مشاهده شد. Danaee و Abdossi [۱۷] بیان نمودند که استفاده از تیمار نانو سیلیکون در غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر باعث افزایش محتوای کلروفیل به میزان ۱۴/۸۷ میلی گرم در هر گرم وزن تر گیاه به دست آمد.

تنش شوری به دلیل تاثیر بر عوامل روزنه ای و کاهش ورود دی اکسید کربن به سلول‌ها، کاهش سطح برگ، کاهش جذب نیتروژن به عنوان عنصر معدنی مهم در سنتز کلروفیل و کاهش فعالیت‌های فیتوشیمیایی موجب کاهش کلروفیل در گیاه می‌گردد. کاربرد سیلیکون و نانو سیلیکون ازطریق سمیت‌زدایی رادیکال‌های آزاد القا شده و بهبود سیستم دفاعی گیاه، موجب کنترل اثرهای منفی تنش شوری و بهبود میزان کلروفیل می‌شود. همچنین استفاده از سیلیکون در شرایط تنش شوری از طریق افزایش کارایی فتوسیستم II موجب افزایش محتوای کلروفیل و فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان در گوجه فرنگی گردید [۲۱]. در

همین راستا استفاده از غلظت‌های مناسب نانو سلنیوم ممکن است جذب این ترکیب به وسیله گیاه در خاک را بهبود ببخشد و این غلظت بهینه سلنیوم، ممکن است نقش مهمی را در افزایش رنگدانه‌ها به وسیله افزایش ظرفیت آنتی اکسیدانی و تأخیر پیری بافت برگی بازی کند. این افزایش ممکن است به توانایی سلنیوم در حفاظت آنزیمهای کلروپلاستی و موثر بودن بر وضعیت اکسیداسیون احیای برگ‌ها مرتبط باشد که نهایتاً افزایش محتوای کلروفیل و سبزینگی گیاه را باعث گردد [۲۲]. Ashraf وهمکاران بیان نمودند که کاربرد 20mg/L سلنیوم در گیاه ذرت موجب کاهش آسیب اکسیداتیو به دلیل غلظت بالای مالون دی آلدئید (MDA) و H_2O_2 در سلول شده و در نهایت میزان رشد و کلروفیل را افزایش داد [۲۳].

تنش شوری تاثیر معنی‌داری بر شاخص درصد اسانس نداشت. هرچند میزان اسانس در بالاترین سطح (شوری dS/m ۴) مقداری نسبت به شاهد افزایش نشان داد (۱/۶ درصد) ولی این افزایش از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. در عین حال تنها اثر اصلی منابع مختلف کودی با احتمال ۹۹ درصد بر میزان شاخص درصد اسانس معنی‌دار بوده است. بیشترین میزان اسانس در تیمار کودی نانو سلنیوم+ نانو سیلیسیوم بدست آمد و کمترین میزان اسانس هم با ۳۸/۵ درصد کاهش در تیمار عدم مصرف کود (و به میزان ۱/۲۹ درصد) حاصل شد. بر اساس گزارش Vatankhah و همکاران شوری موجب افزایش بازده اسانس شد که البته در شوری‌های بالا (dS/m ۱۰) کاهش اسانس در گیاه مشاهده شد[۲۴]. تحقیقات اندکی در مورد نقش نانو سیلیکون و نانو سلنیوم بر محتوی اسانس گیاه منتشر شده است. به عنوان نمونه Danaee و Abdossi [۱۷]. عنوان داشتند که بیشترین افزایش درصد اسانس به میزان ۱/۷۵ % در تیمار نانوسیلیکون بدست آمده است. در تحقیق دیگری Rostami و همکاران [۲۵] بیان داشتند که استفاده از نانو کودها (بویژه نانو کود آهن) می‌تواند باعث افزایش میزان و ترکیبات اصلی اسانس (منتول و منتون) و بیوماس نعنا فلفلی تحت تنش شوری شود. Nazerieh و همکاران [۲۶] ابراز داشتند که محتوای پرولین در گیاهانی که نانو سلنیوم و البته در مقادیر کم (۲ mg/l) دریافت داشته‌اند، بیشتر از شاهد بود. همچنین نانو سلنیوم باعث تحریک فعالیت آنزیم فنیل آلانین شد.

سایر شاخص‌های موفولوژیک گیاه نعنا فلفلی هم در سطح مختلف شوری، نسبت به کاربرد عناصر مفید سلنیوم و سیلیکون به‌ویژه در ابعاد نانو واکنش مثبت و قابل توجهی نشان دادند. شاخص‌های وزن تر وخشک برگ، تعداد برگ، طول و عرض برگ، تعداد شاخه‌های فرعی و نهایتاً شاخص سطح برگ از جمله این ویژگی‌هایی بودند که حتی با وجود تنش شوری آب آبیاری، توانستند افزایش معنی داری از لحاظ آماری پیدا کنند. به عبارت دیگر حتی در صورت ضرورت استفاده از آب‌های کم کیفیت و لب شور، کاربرد دو عنصر غذایی مفید سلنیوم و سیلیکون می‌توانند تاثیر تعدیل کننده قابل توجهی در شرایط تنش داشته باشند.

در همین راستا Neysanian و همکاران [20] (۲۰۲۱) در تحقیقی بر روی گیاه گوجه فرنگی گزارش نمودند که کاربرد ۲ و ۴ mg/l نانو سلنیوم باعث افزایش رشد و تعداد جوانه های جانبی بر روی ساقه گیاه گردید.

Ghasemian و همکاران [۲۷] در تحقیقی به بررسی پتانسیل نانوذرات سلنیوم (Se-NPs) در کاهش اثرات نامطلوب تنش شوری بر رشد، فیزیولوژی و بیان ژن در گیاه بادرنجبویه پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که محلول پاشی Se-NPs رشد گیاه بادرنجبویه را در غلظت‌های مختلف شوری بهبود بخشید، که مؤثرترین آن ۵۰ میلی‌گرم در لیتر بود. آنها نهایتاً نتیجه‌گیری نمودند که غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم Se-NPs ضمن کاهش اثرات نامطلوب شوری در گیاه، مسیر بیوسنتز rosmarinic acid به عنوان یک متابولیت ثانویه را تسریع می‌نماید.

Babajani و همکاران [۲۸] عنوان داشتند که تیمارهای مخلوط نانو سلنیوم و روی منجر به افزایش شدید زیست توده، فعال شدن جوانه‌های جانبی و تحریک در توسعه ریشه های جانبی در گیاه بادرنجبویه شد. Morales-Espinoza و همکاران [۲۹] در تحقیقی به بررسی تاثیر نانوذرات Se در رشد، پاسخ آنتی اکسیدانی و کیفیت میوه گوجه فرنگی تحت استرس NaCl پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که به استثنای تعداد خوشه‌ها، در بقیه متغیرهای ارزیابی شده تفاوت معنی‌داری بین تیمارها رشدی نسبت به شاهد مشاهده شد. بهترین تیمار ۱۰

میلی‌گرم در لیتر از Se NPs بود که تأثیر مثبتی بر وزن میوه، توسعه برگ‌ها و زیست توده هوایی داشت. همچنین هیچ آسیبی به دلیل سمیت نانوذرات Se مشاهده نشد.

نکته قابل توجه در این تحقیق ارجحیت استفاده از فرم نانوکود نسبت به اندازه معمولی آن می‌باشد. بطوریکه در شاخص‌های مختلف زراعی همانند وزن تر و خشک ساقه، طول و عرض برگ، تعداد شاخه فرعی، تعداد برگ و شاخص سطح برگ(LAI) استفاده از نانو کود باعث افزایش معنی‌دار این شاخص‌ها از لحاظ آماری گردید. در شاخص‌های وزن تر و خشک ریشه، ارتفاع بوته، شاخص وزن تر و خشک برگ، شاخص کلروفیل (اسپد)، درصد اسانس و قطر ساقه نیز استفاده از نانو کود باعث افزایش این متغیرها نسبت به شاهد گردید هرچند این از افزایش از لحاظ آماری معنی‌دار نبود.

در همین راستا مطالعات اخیر نشان داده است که زیست‌فراهمی و عملکرد Se در رشد و متابولیسم گیاهان مختلفی همانند فلفل(Sotoodehnia-Korani و همکاران[۳۰]، خربزه تلخ (Rajaee Behbahani و همکاران [۳۱]، توت فرنگی (Babajani و همکاران[۲۸]، گندم (Hu و همکاران[۳۲] و سورگوم دانه‌ای (Djanaguiraman و همکاران [۳۳] به طور قابل‌توجهی در قالب نانوذرات (nSe) در مقایسه با سایر اشکال طبیعی طبیعی مانند سلنات و سلنیت کارآمدتر است. اگرچه برخی منابع نشان داده‌اند که استفاده از غلظت‌های بالای nSe می‌تواند به طور بالقوه رشد و توسعه گیاه را به خطر بیندازد (Rajaee Behbahani و همکاران، [۳۱]؛ Babajani و همکاران [۲۸]. با این حال، مزایای اثبات شده یا سمیت بالقوه nSe برای گیاه هنوز مورد بحث است. بنابراین، بررسی های دقیق‌تری برای پرکردن شکاف‌های دانش ضروری است. علاوه بر این، نتایج ما نشان می‌دهد که پاسخ به nSe با نوع غیرنانویی آن متفاوت است. واکنش متمایز گیاه به فرم نانو غیرنانوی Se ممکن است تا حدی به سینتیک جذب متفاوت، صفات فیزیکوشیمیایی متفاوت و برهمکنش‌های مختلف با مولکول‌های زیستی نسبت داد. در این راستا، مکانیسم انتقال سلنیوم (انتقال فعال از طریق ناقل سولفات/فسفات) با مکانیسم انتقال nSe (نشر غیرفعال از طریق کانال‌های غشایی آکواپورین) صورت می‌گیرد نیز متفاوت است. علاوه بر این، به دلیل متابولیسم سریع nSe و تولید سلنومتیونین در گیاه گندم، ورود به سلول nSe در مقایسه با فرم غیرنانویی آن بسیار سریعتر صورت می‌گیرد [۳۲].

با عنایت به محدودیت منابع آب شیرین در اکثر نقاط کشور و نیز توجه فزآینده به گیاهان دارویی و محصولات جانبی آن، بر اساس داده‌های این پژوهش می‌توان محلولپاشی نانوسلنیوم و سیلیکون را برای کاهش اثرهای منفی تنش شوری در گیاه نعنا فلفلی توصیه کرد.

سپاسگزاری

استخراج نتایج مقاله از طرح تحقیقاتی (شماره ۴۰۲۵) صورت گرفته در مجتمع آموزش عالی شیروان بوده و هزینه این پژوهش از محل اعتبارات مجتمع تأمین گردیده است. نویسندگان کمال تشکر و قدردانی خود را از ریاست و معاونت پژوهشی مجتمع آموزش عالی شیروان به‌خاطر حمایت‌های مالی اعلام می‌دارند.

منابع

[1] Jalali V, and Asadi Kapoorchal S. Assessing four different macroscopic water uptake models for maize plant (ZEA mays L.) under salinity stress. Irrigation and Drainage 2021; 70(1): 70-83.

[2] Reddy PVL, Hernandez-Viezcas JA, Peralta-Videa JR, Gardea-Torresdey JL. Lessons learned: Are engineered nanomaterials toxic to terrestrial plants? Science of the Total Environment 2016; 568: 470–479.

[3] Rizwan M, Ali S, Qayyum MF, Ok YS, Adrees M, Ibrahim M et al. Effect of metal and metal oxide nanoparticles on growth and physiology of globally important food crops: A critical review. Journal of Hazardous Materials 2017; 322: 2–16.

[4] Juarez-Maldonado A, Ortega-Ortíz H, Pérez-Labrada F, Cadenas-Pliego G, Benavides-Mendoza A. Cu Nanoparticles absorbed on chitosan hydrogels positively alter morphological, production, and quality characteristics of tomato. Journal of Applied Botany and Food Quality 2016; 89: 183–189.

[5] Prasad R, Bhattacharyya A, and Nguyen QD. Nanotechnology in sustainable agriculture: Recent developments, challenges, and perspectives. Frontiers in Microbiology 2017; 8:1–13.

[6] Elemike EE, Uzoh IM, Onwudiwe DC, Babalola OO. The Role of Nanotechnology in the Fortification of Plant Nutrients and Improvement of Crop Production. Applied Sciences 2019; 9(3):499.

[7] Debnath N, Das S, Seth D, Chandra R, Bhattacharya SC, Goswami A. Entomotoxic effect of silica nanoparticles against *Sitophilus oryzae* (L.). Journal of Pest Science 2011; 84: 99–105.

[8] Liang Y, Zhang W, Qin C, Youliang L, Ruixing D. Effect of exogenous silicon (Si) on H^+-ATPase activity, phospholipids and fluidity of plasma membrane in leaves of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). Environmental and Experimental Botany 2006; 57:212–219.

[9] Kulikova ZL, Lux A. Silicon influence on maize (*Zea mays* L.) hybrids exposed to cadmium treatment. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 2010; 85:243–250.

[10] González-Morales S, Pérez-Labrada F, García-Enciso EL, Leija-Martínez P, Medrano-Macías J, Dávila-Rangel I.E, et al. Selenium and sulfur to produce allium functional crops. Molecules 2017; 22(4): 558.

[11] Hussein HA, Darwesh OM, Mekki BB. Environmentally friendly nano-selenium to improve antioxidant system and growth of groundnut cultivars under sandy soil conditions. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology 2019; 18.

[12] Gupta M, and Gupta S. An Overview of Selenium Uptake, Metabolism, and Toxicity in Plants. Frontiers in Plant Science 2017; 7: 1–14.

[13] Zsiros O, Nagy V, Párducz Á, Nagy G, Ünnep R, El-Ramady H et al. Effects of selenate and red Se-nanoparticles on the photosynthetic apparatus of Nicotiana tabacum. Photosynthesis Research 2019; 139: 449–460.

[14] Mehrafarin A, Naghdi Badi H, Mirzai Motlagh M, Salehi M, and Ghiasi Yekta M. Phytochemical and morphophysiological responses of dill (*Anethum graveolens* L.) to foliar application of potassium sulfate and methanol biostimulant. Journal of Medicinal Plants 2017; 16(64): 93-109.

[15] Ghorbani M, Movahedi Z, Kheiri A, Rostami M. Effect of salinity stress on some morpho-physiological traits and quantity and quality of essential oils in Peppermint (*Mentha piperita* L.). Environmental Stresses in Crop Sciences 2018; 11(2): 413-420.

[16] Basiri M, Ghamarnia H, ghobadi M. Effect of Different Deficit Irrigation and Salinity Management on leaf, shoot and root growth of (*Mentha piperita* L.). Water and Irrigation Management 2020; 10(1): 1-14.

[17] Danaee E, Abdossi V. Effects of silicon and nano-silicon on some morpho-physiological and phytochemical traits of peppermint (Mentha piperita L.) under salinity stress. Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research 2021; 37(1): 98-112.

[18] Zare H, Ghanbarzadeh Z, Behdad A, Mohsenzadeh S. Effect of silicon and nanosilicon on reduction of damage caused by salt stress in maize (*Zea mays*) seedlings. Iranian Journal of Plant Biology 2015; 7(26): 59-74.

[19] Ahmadi M, Astaraei A, Lakzian A and Emami H. Study of millet (*Panicum miliaceum*) response to humic acid, silicon and mycorrhiza application under saline-sodic irrigation water stress. Environmental Stresses in Crop Sciences 2021; 14(3): 823-836.

[20] Neysanian M, Ahmadvand R, Oraghi Ardebili Z, and Ebadi M. The effect of Selenium nanoparticles on some morphological and anatomical features of cherry tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.var. cerasiforme). Developmental Biology 2021; 13(3): 39-54.

[21] Haghighi M, and Pessarakli M. Influence of silicon and nano-silicon on salinity tolerance of cherrytomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) at early growth stage. Scientia Horticulturae 2013; 161: 111-117.

[22] Ragavan P, Ananth A, and Rajan MR, Impact of selenium nanoparticles on growth, biochemical characteristics and yield of cluster bean Cyamopsis tetragonoloba. International Journal of Environment, Agriculture Biotechnology 2017; 2(6).

[23] Ashraf MA, Akbar A, Parveen A, Rasheed R, Hussain I, Iqbal M. Phenological application of selenium differentially improves growth, oxidative defense and ion homeostasis in maize under salinity stress, Plant Physiology and Biochemistry 2018; 123:268-28.

[24] Vatankhah E, Kalantari B, and Andalibi B. Effects of methyl jasmonate and salt stress on physiological and phytochemical characteristics of peppermint (*Mentha piperita* L.). Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants 2017; 33(3): 449-465.

[25] Rostami G, Ghasemi Pirbalouti A, and Tehranifar A. The effect of sulfate and nano particles of iron and zinc on biomass, content and compositions of peppermint (*Mentha piperita* L.) essential oil under salt stress. Journal of Plant Research 2020; 33(3): 505-515.

[26] Nazerieh H, Oraghi ardebili Z, and Iranbakhsh A. Potential benefits and toxicity of

nanoselenium and nitric oxide in peppermint. Acta agriculturae Slovenica 2018; 111(2):357–368.

[27] Ghasemian S, Masoudian N, Saeid Nematpour F, et al. Selenium nanoparticles stimulate growth, physiology, and gene expression to alleviate salt stress in Melissa officinalis. Biologia 2021; 76: 2879–2888.

[28] Babajani A, Iranbakhsh A, Ardebili ZO and Eslami B. Differential growth, nutrition, physiology, and gene expression in Melissa officinalis mediated by zinc oxide and elemental selenium nanoparticles. Environmental Science and Pollution Research 2019; 26(24): 24430–24444.

[29] Morales-Espinoza MC, Cadenas-Pliego G, Pérez-Alvarez M, Hernández-Fuentes AD, Cabrera de la Fuente M, Benavides-Mendoza A, et al. Se Nanoparticles Induce Changes in the Growth, Antioxidant Responses, and Fruit Quality of Tomato Developed under NaCl Stress. Molecules 2019; 24, 3030.

[30] Sotoodehnia-Korani S, Iranbakhsh A, Ebadi M, Majd, A and Ardebili ZO. Selenium nanoparticles induced variations in growth, morphology, anatomy, biochemistry, gene expression, and epigenetic DNA methylation in Capsicum annuum; an in vitro study. Environmental Pollution 2020; 114727.

[31] Rajaee Behbahani S, Iranbakhsh A, Ebadi M, Majd A, and Ardebili ZO. Red elemental selenium nanoparticles mediated substantial variations in growth, tissue differentiation, metabolism, gene transcription, epigenetic cytosine DNA methylation, and callogenesis in bittermelon (Momordica charantia); an in vitro experiment. PloS one 2020; 15(7).

[32] Hu T, Li H, Li J, Zhao G, Wu W, Liu L, et al. Absorption and bio-transformation of Selenium nanoparticles by wheat seedlings (Triticum aestivum L). Frontiers in Plant Science 2018; 9: 597.

[33] Djanaguiraman M, Belliraj N, Bossmann S, Prasad PV. High temperature stress alleviation by selenium nanoparticle treatment in grain sorghum. ACS Omega 2018; 3(3): 2479–2491.