

سنتز نانوکمپوزیت اسید سینامیک و بررسی اثرات آن بر ترکیبات اسمولیتی ریشه و شاخص‌های فیتوشیمیایی گیاه نعناع فلفلی (*Mentha piperita* L.) تحت تنش شوری

زهرا سپهری جوان و سید مهدی رضوی*

گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۶، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۲/۱۳)

چکیده

مطالعه حاضر به منظور سنتز نانوکمپوزیت اسید سینامیک و درک بهتر رفتار آن در کنترل شوری در گیاهان نعناع فلفلی انجام شد. بدین منظور سه عامل، تنش شوری با غلظت‌های مختلف سدیم کلراید شامل صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر، اسید سینامیک با غلظت ۵۰ میکرومولار و نانوکمپوزیت اسید سینامیک بر پایه کربوکسی متیل سلولز با غلظت ۵۰ میکرومولار در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که با بیشتر شدن سطح شوری، محتوای ترکیبات سازگارکننده محلول (۳۰/۵۵٪ پرولین و ۳۶/۲٪ گلايسین بتائین) و شاخص‌های فیتوشیمیایی (۶/۵۱ تا ۱۰۸/۳٪) افزایش نشان دادند. در حالی که کاربرد اسید سینامیک و اسید سینامیک نانوکمپوزیت این صفات حیاتی را به طور قابل توجهی افزایش داد. ۷ تا ۲۷/۰۱٪ افزایش در ترکیبات سازگارکننده محلول و ۲۷/۹ تا ۱۷۴/۳٪ افزایش در شاخص‌های فیتوشیمیایی به وجود آمد. نانوکمپوزیت، به عنوان یک محرک زیستی، به طور قابل توجهی تحمل نعناع فلفلی را در شرایط شوری افزایش داد. در واقع اسید سینامیک و اسید سینامیک نانوکمپوزیت به عنوان یک تنظیم‌کننده رشد گیاه در شرایط شور عمل کردند. نتایج نشان داد که نانوکمپوزیت در بهبود شاخص‌های بیوشیمیایی و فیتوشیمیایی بسیار مؤثرتر از اسید سینامیک است. دلیل آن می‌تواند انحلال‌پذیری بالا، جذب و انتقال بهتر و سریع‌تر نانوکمپوزیت نسبت به خود ماده باشد. این ماده و نانوکمپوزیت حاوی آن یک مسیر نوآورانه را در تحقیقات نشان دادند که می‌تواند با موفقیت عملکرد گیاهان را برای مقابله با شوری بهبود بخشد.

واژه‌های کلیدی: تنش، کربوکسی متیل سلولز، گیاهان دارویی، نانوکمپوزیت‌ها

مقدمه

مختلف کاربرد دارد (Hassid et al., 2024). در صنعت داروسازی به صورت دمنوش یا دارو برای درمان اختلالات و بیماری‌های مختلف از جمله نفخ معده و روده، اختلالات دستگاه گوارش، بیماری‌های کبدی، عفونت‌های مجاری ادراری، سنگ کلیه، اسهال خونی، برونشیت، سرطان‌ها، فشار خون بالا، زردی، تب، سردرد، دردهای قاعدگی، اسپاسم، سرماخوردگی و حالت تهوع کاربرد دارد (Juric et al., 2021).

گیاه نعناع فلفلی (*Mentha piperita*) از خانواده نعناعیان (Lamiaceae) مهمترین گیاه تجاری این تیره بوده خواص دارویی فراوانی دارد (Hudz et al., 2023). این گیاه از جمله گیاهان معطر دارویی است که در صنایع مختلف کاربرد وسیعی دارد. در صنایع غذایی به عنوان طعم‌دهنده و چاشنی در غذاهای مختلف، نوشیدنی‌ها، لبنیات، آدامس‌ها و شکلات‌های

(*al.*, 2024). از طرفی نمک باعث افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و در نتیجه تنش اکسیداتیو می‌شود و پراکسیداسیون لیپیدی در غشاهای تیلاکوئید رخ می‌دهد که باعث آسیب شدید به غشاء می‌شود (Aliakbarpour *et al.*, 2020). این آسیب اکسیداتیو ناشی از تنش شوری با افزایش ROS به دنبال کاهش سرعت فتوسنتز رخ می‌دهد. این عوامل بر عملکرد گیاه از جمله متابولیسم گیاه تأثیر می‌گذارد و به ساختار گیاه آسیب می‌رساند و در نهایت منجر به مرگ گیاه می‌شوند (Massange-Sanchez *et al.*, 2021).

اسید سینامیک یک ترکیب آلی، یک اسید فنولیکی و یک فنیل پروپانویید پایه که با دامیناسیون و تجزیه فنیل آلانین در گیاهان در پاسخ به شرایط تنش‌زا تولید شده و فعالیت آنتی‌اکسیدانی دارد. اولین مولکول مسیر فنیل پروپانوییدی است و منبع مشتقات اسید هیدروکسی سینامیک مانند کافئیک، کوماریک، سیناپیک و فرولیک است. اسید سینامیک در آب نامحلول است. این ماده در تحمل شوری در گیاهان نقش چشمگیری دارد (Sepehry Javan *et al.*, 2024).

فناوری نانو، فناوری ساخت و تولید ابزار و موادی در اندازه نانومتر است. این فناوری می‌تواند راه‌حلی برای افزایش ارزش محصولات کشاورزی و مشکلات زیست‌محیطی ارائه دهد، چرا که نانو مواد به خاطر اندازه کوچک (۱-۱۰۰ نانومتر) ویژگی‌های منحصر به فردی را نشان می‌دهند (Haris *et al.*, 2023). استفاده از نانو مواد با خواص فیزیکوشیمیایی منحصر به فرد و اثرات سودمند، تکنیک جدیدی است که می‌تواند رشد و بهره‌وری گیاه را تحت طیف وسیعی از شرایط محیطی افزایش دهد. نانو مواد محصولات مقرون به صرفه و سازگار با محیط‌زیست هستند که می‌توانند جایگزین مواد معمولی در کشاورزی شوند (Ghassemi-Golezani *et al.*, 2023). نانوذرات، کارایی کاتالیزورهای شیمیایی را بطور چشمگیری بهبود می‌بخشند. نانوکاتالیزورها کارایی واکنش‌های شیمیایی را افزایش می‌دهند و از تولید مواد زائد در واکنش‌ها جلوگیری می‌نمایند. امروزه در نقل و انتقال دارو برای رسیدن به عوامل بیماری‌زا از نانوذرات استفاده می‌شود. نانوذرات در تولید

(Mahendran and Rahman, 2020; Nemati *et al.*, 2021). در صنایع آرایشی و بهداشتی به دلیل بوی تند و اثر خنک‌کنندگی اسانس آن، در تهیه خمیر دندان، دهان شویه، سرم‌های جوان‌ساز پوست، کرم‌های لایه بردار و مرطوب‌کننده کاربرد دارد (Hudz *et al.*, 2023). بوی تند آن به ترکیباتی که در اسانس اندام‌های هوایی گیاه موجود هستند مربوط می‌شود اسانس نعنای فلفلی حاوی چندین ترکیب فعال زیستی شامل منتول، منتون، منتوفوران، کاریوفیلین و متیل استات است که ترکیبات اولیه را تشکیل می‌دهند، همچنین درصد کمتری از کاروتن‌ها، فلاونوئیدها (اریوسیتترین، هسپریدین و کامپفرول)، تانن‌ها و پلی‌فنل‌ها هم دیده می‌شود (Akbarpour *et al.*, 2022). نعنای فلفلی به دلیل داشتن ریشه‌های سطحی، نیاز به آبیاری بیشتری با فواصل کوتاه دارد و بسیار حساس به شوری است بنابراین کاشت آن در زمین‌های شور با توجه به شرایط اقلیمی که در چندین دهه اخیر به وجود آمده و شوری روز به روز در حال افزایش است با مشکل مواجه می‌باشد (Nemati *et al.*, 2021).

تنش شوری، منجر به کاهش عملکرد گیاهان زراعی و در نتیجه کاهش بهره‌وری محصول در مناطقی می‌شود که تحت تنش هستند، بنابراین تنش شوری تهدیدی جهانی برای کشاورزی محسوب می‌شود (El Sabagh *et al.*, 2020). تنش شوری از مخرب‌ترین تنش‌ها است زیرا به دنبال این تنش علاوه بر تنش اکسیداتیو و اسمزی، تنش یونی نیز ایجاد می‌شود. این تنش از جمله تنش‌هایی است که به شدت رشد و عملکرد محصولات زراعی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (El Sabagh *et al.*, 2021). در تنش شوری، به دلیل انباشت نمک زیاد، میزان فشار اسمزی محلول خاک از فشار اسمزی موجود در سلول‌های گیاهی بالاتر می‌رود در نتیجه قدرت و توانایی گیاهان برای جذب آب و مواد معدنی از جمله Ca^{2+} و K^{+} محدود می‌شود. این اثرات اولیه تنش شوری باعث بروز اثرات ثانویه‌ای نیز در گیاهان تحت تنش می‌شود از جمله این اثرات اختلال در عملکرد غشای سلولی، اختلال در جذب، کاهش متابولیسم سیتوسولی و کاهش انبساط سلولی است (Jing *et al.*, 2021).

سلول‌های هدف استفاده کردیم. با توجه به نوآوری پژوهش، با استفاده از این نانوکمپوزیت، در آینده می‌توان کودهایی تهیه کرد که هم تولیدشان آسان و کم هزینه باشد و هم عملکرد گیاهان در خاک‌های شور و رشد آنها را بهبود بخشد، از طرفی سلامت مصرف‌کنندگان را به خطر نیندازد.

مواد و روش‌ها

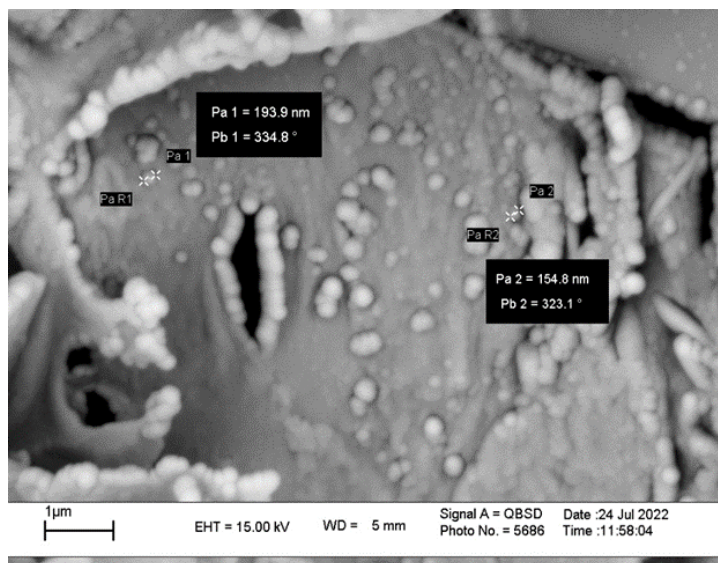
سنتر و مشخصه یابی نانوکمپوزیت اسید سینامیک: ابتدا محلول CMC با غلظت ۰/۴ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر تهیه شد. سپس محلول حاصل اولتراسیون شد. این عمل جهت کاهش ویسکوزیته و شکست پلیمر انجام گرفت. از طرفی محلول استوک اسید سینامیک با غلظت ۲ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر تهیه شد. سپس محلول اسید سینامیک تهیه‌شده قطره قطره به CMC در حال استرینگ در دمای ۶۵°C اضافه شد. محلول حاصل از این مرحله با شدت ۲۰ KHz به مدت ۳۰ دقیقه سونیکاسیون شد. سپس سانتریفیوژ با دور ۸۰۰۰ به مدت ۱۰ دقیقه انجام گرفت. محلول رویی حاصل از سانتریفیوژ (سوپرناتانت) در پتری‌دیش ریخته شد تا در دمای آزمایشگاه خشک شود. بعد از خشک‌شدن، ماده با کاردک جمع‌آوری شده در داخل میکروتیوپ برای انجام مشخصه‌یابی DLS، SEM و TGA ارسال شد تا مشخصات نانوکمپوزیت سنتز شده بررسی شود (Sepetry Javan *et al.*, 2024). بررسی نتایج نشان‌دهنده سنتر نانوکمپوزیت اسید سینامیک بر پایه کربوکسی متیل سلولز بود. برای اطمینان از تشکیل نانوکمپوزیت حاصل از پیوستن دو ماده اسید سینامیک و کربوکسی متیل سلولز، قدم اول تعیین اندازه نانوذرات به وسیله آنالیز DLS (پراکندگی دینامیکی نور) بود. نتایج حاصل از این آنالیز نشان داد که میانگین اندازه اجزای نانوکمپوزیت ۱۲/۷ نانومتر بود و بیشترین تعداد اجزا با اندازه ۱۱ نانومتر را شامل شد.

نتایج تجزیه و تحلیل SEM (میکروسکوپ الکترونی روبشی) (مدل JEM-1011; JEOL Ltd، ژاپن) نشان داد که نانوذرات کروی شکل بودند و توزیع گسترده داشتند (شکل ۱).

کمپوزیت‌ها، موجب پیوند مستحکم‌تری بین ماده زمینه و ذرات شده و استحکام کمپوزیت‌ها را افزایش می‌دهند (Nie *et al.*, 2021).

کربوکسی متیل سلولز (CMC)، یکی از مشتقات مهم سلولز است که از واکنش بین سلولز با هیدروکسید سدیم و اسید کلرواستیک به وجود می‌آید. CMC به دلیل کیفیت قابل توجه آن از نظر تجدیدپذیری، زیست‌تخریب‌پذیری و غیرسمی بودن آن، یکی از متداول‌ترین مشتقات سلولز است که در صنایع پزشکی، کشاورزی و محیط‌زیست کاربرد دارد. CMC در آب حلالیت بسیار بالایی دارد (Pinto *et al.*, 2022). از خواص عمده این ماده که آن را برای استفاده در تحقیقات زیست‌شناختی حائز اهمیت می‌سازد: حلالیت بالای آن، سرعت جابجایی بالای آن، ویسکوزیته در محلول، زیست‌تخریب‌پذیری، قابلیت تجدیدپذیری، پایداری در برابر اکسایش، گرما و عوامل محیطی دیگر است (Seddiqi *et al.*, 2021; Pinto *et al.*, 2022). از CMC معمولاً به عنوان یک تثبیت‌کننده و ناقل در سنتر نانوکمپوزیت‌ها استفاده شده است زیرا مقرون به صرفه است و از نظر زیست‌محیطی ایمن و قابل قبول است (Salem *et al.*, 2022).

این مطالعه با هدف بررسی این موضوع که چگونه اسید سینامیک و اسید سینامیک نانوکمپوزیته می‌توانند به گیاه نعنای فلفلی در سازگاری با تنش شوری کمک کنند، با هدف گسترده‌تر استفاده از این یافته‌ها برای بهبود تحمل به نمک در سایر گونه‌های گیاهی در کشاورزی و صنعت انجام گرفت. بر اساس دانش ما، این اولین گزارشی است که اثر اسید سینامیک و نانوکمپوزیت حاوی آن بر تحمل به شوری گیاه نعنای فلفلی با بررسی شاخص‌های فیتوشیمیایی و بررسی تغییرات ترکیبات اسمولیتی در ریشه را تعیین می‌کند. با توجه به اهمیت گیاه نعنای فلفلی در صنایع دارویی و کشاورزی، استفاده گسترده غذایی از آن و حساسیت بالای گیاه به شوری، بر آن شدیم تا راه‌حلی برای مقابله با تنش شوری گیاهان پیدا کنیم. به‌طور خاص از یک نانوکمپوزیت اسید سینامیک مبتنی بر CMC استفاده کردیم و از توانایی CMC برای رساندن سریع مواد به



شکل ۱- آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی

مساوی خاک با بافت رسی لومی (۴/۵ کیلوگرم) منتقل (جدول ۱) که هفته ای یک بار با محلول هوگلند آبیاری شدند. پس از ۲۰ روز، یعنی در مرحله ۱۲-۱۴ برگی، تیمار گیاهان آغاز شد. تیمارهای آزمایشی شامل چهار سطح شوری صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی مولار نمک (NaCl)، نانوکمپوزیت اسید سینامیک در غلظت ۵۰ میکرومولار، اسید سینامیک در غلظت ۵۰ میکرومولار و شاهد بودند. چهار هفته پس از اعمال تیمار، گلدان‌ها برای انجام سنجش‌ها به آزمایشگاه منتقل شدند (شکل ۳).

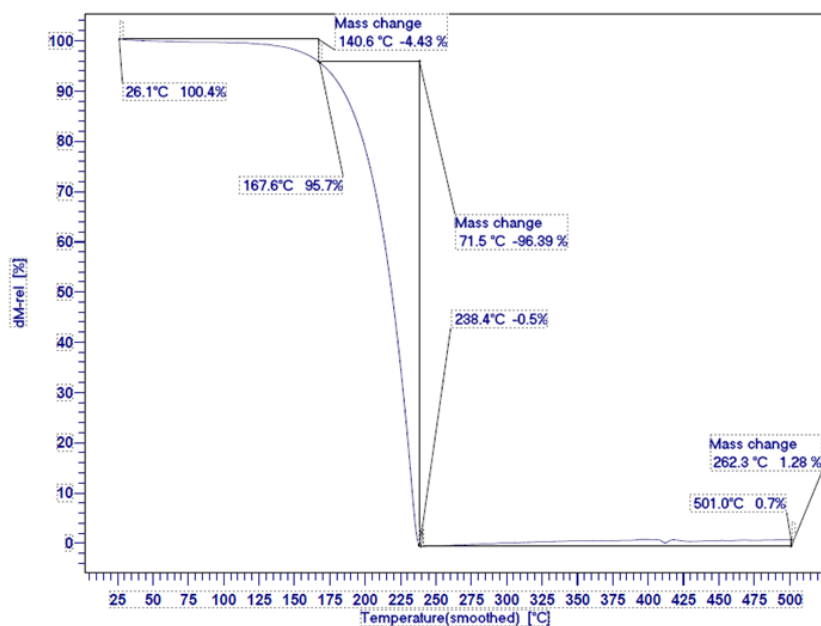
سنجش املاح سازگارکننده محلول (ترکیبات اسمولیتی)،

سنجش پرولین ریشه: ۰/۳ گرم از ریشه‌های گیاه نعنای فلفلی با ۶ میلی لیتر اسید سولفوسالسیلیک ۳٪ به وسیله نیتروژن مایع در حمام یخ ساییده شد سپس در سانتریفیوژ یخچال‌دار (مدل Hermle Z216 MK، آلمان) سانتریفیوژ شد. مقدار ۱ میلی لیتر از فاز رویی با ۱ میلی لیتر اسید استیک و ۱ میلی لیتر نین‌هیدرین مخلوط شد و مخلوط حاصل پس از حرارت‌دهی در بن‌ماری مجدد در حمام یخ با ۲ میلی لیتر تولوئن مخلوط شد. از مخلوط حاصل پس از انجام ورتکس فاز رویی جدا شده و در طول موج ۵۲۰ نانومتر میزان جذب آن با دستگاه اسپکتروفوتومتر (دستگاه PG، مدل T80⁺، آمریکا) ثبت شد (Forlani and Funck, 2020).

آنالیز TGA (آنالیز وزن سنجی حرارتی) (مدل NETZSCH DSC 204F1، آلمان) اطلاعاتی در مورد پوشش‌های نانوذرات و خلوص برخی از نانوذرات ارائه می‌دهد. نمودار به دست آمده از آنالیز TGA، درصد کاهش وزن در نانو در دمای ۱۴۰/۶ °C مقدار ۴/۴۳٪، در ۷۱/۵C مقدار ۹۶/۳۹٪ و در ۲۶۲/۳C مقدار ۱/۲۸٪ کاهش را نشان داد. درصد کاهش وزن در نانوکمپوزیت بیشتر از اسید سینامیک و کمتر از CMC شد در واقع الگوی کاهش در نانو دقیقاً مابین اسید سینامیک و CMC به دست آمد. این نتایج نشان داد که اسید سینامیک با CMC ترکیب شده و یک نانوکمپوزیت را تشکیل داده است (شکل ۲).

کشت نعنای فلفلی: پس از تهیه ریزوم‌های نعنای فلفلی،

این گیاهان در گلدان‌هایی به قطر ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۳ سانتی‌متر با مقادیر مساوی خاک (۴ کیلوگرم) در گلخانه‌ای با نور کافی و تهویه مناسب با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد که دمای بهینه برای رشد نعنای فلفلی محسوب می‌شود کشت شدند و در ۳۰ روز اول یک روز در میان آبیاری (با ۲۵۰ میلی لیتر آب بنا بر ظرفیت زراعی که به دست آمد) شدند. دمای روزانه گلخانه در محدوده بهینه رشد نعنای (۲۵°C) بود. در مرحله شش برگی، گیاهچه‌ها به گلدان‌های پلاستیکی پر از خاک به قطر ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۳ سانتی‌متر با مقادیر



شکل ۲- آنالیز وزن سنجی حرارتی

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده برای کشت گیاه نعناع فلفلی

نمونه	pH	هدایت الکتریکی (dsm^{-1})	ازت کل	کربن آلی	آهک	فسفر	پتاسیم تبادلی	بیکربنات کلر	سدیم کلسیم	منیزیم
مقدار	۷/۴۹	۰/۷۰۴	۰/۵۲	۶/۱۶	۵/۸۲	۱۲/۳۴	۲۳۵/۴	۱۰	۹۸۵	۴۸
				(%)		(mg.kg^{-1})			(meq l^{-1})	

بافت خاک: رسی لومی، شن و ماسه: ۳۱/۵۸، سیلت: ۴۰، رس: ۲۸/۴۱



شکل ۳- نمونه‌هایی از گلدان‌های آماده برای انتقال به آزمایشگاه جهت انجام سنجش‌ها

میزان جذب محلول رویی در طول موج ۷۶۰ نانومتر ثبت شد. PVP باعث رسوب تانن شد و جذبی که از محلول رویی گرفته شد در واقع جذب کل فنل بدون تانن بود. برای اندازه‌گیری کل تانن میزان جذب فنل بدون تانن از میزان جذب کل فنل کم شد (Campobenedetto et al., 2021).

سنجش کل فلاونوئید: با روش رنگ‌سنجی آلومینیوم کلراید، میزان کل فلاونوئید سنجش شد. در ابتدا مقدار ۰/۲ گرم از نمونه تازه گیاهی در ۱۰ میلی‌لیتر متانول عصاره‌گیری شد و به ۵۰۰ میکرولیتر از عصاره حاصل، ۴/۵ میلی‌لیتر آب مقطر افزوده شد. مقدار ۳۰۰ میکرولیتر سدیم نیتريت ۵٪ به محلول حاصل اضافه و پس از پنج دقیقه، ۵۰۰ میکرولیتر آلومینیوم کلراید ۱۰٪ اضافه شد. در آخرین مرحله ۲ میلی‌لیتر آب مقطر و ۲ میلی‌لیتر سدیم هیدروکسید ۱ مولار افزوده شد و جذب نمونه‌ها در طول موج ۵۱۰ نانومتر ثبت گردید. غلظت کل فلاونوئید با منحنی استاندارد کاتچین محاسبه شد (Kiani et al., 2021).

سنجش کل فنل: مقدار ۰/۱ گرم از بافت تازه گیاهی با ۱۰ میلی‌لیتر اتانول ۹۶٪ عصاره‌گیری گردید و عصاره به دست آمده به مدت ۲۴ ساعت در تاریکی قرار داده شد. به محلول به دست آمده مقدار ۵۰۰ میکرولیتر فولین ۵۰٪، ۱ میلی‌لیتر اتانول ۹۶٪ و ۱ میلی‌لیتر کربنات سدیم ۵٪ افزوده شد. جذب نمونه‌ها بعد از ۶۰ دقیقه قرارگرفتن در تاریکی، در طول موج ۷۲۵ نانومتر خوانده شد. از منحنی استاندارد گالیک اسید برای محاسبه غلظت کل فنل استفاده شد (Kiani et al., 2021).

این پژوهش با استفاده از آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح تصادفی با سه تکرار انجام شد. نتایج توسط نرم‌افزار آماری SPSS 21 محاسبه شد. میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند متغیره دانکن با سطح معنی‌داری $P < 0/05$ مقایسه شد.

نتایج و بحث

بررسی تأثیر نانوکمپوزیت بر املاح سازگارکننده محلول در ریشه گیاه نعنای فلفلی تحت تنش شوری، سنجش پرولین آزاد: در پژوهش حاضر میزان پرولین آزاد ریشه‌های گیاه نعنای

سنجش گلايسين بتائين ریشه: مقدار ۲۵۰ میلی‌گرم از ریشه گیاهی به وسیله نیتروژن مایع در هاون چینی ساییده شد و با ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر هموژنیزه شد. به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵°C انکوبه شد و سپس نمونه‌ها فیلتر و با ۰/۵ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۲ نرمال مخلوط شدند. مقدار ۰/۲۵ میلی‌لیتر از محلول به دست آمده به لوله آزمایش منتقل شد و به مدت یک ساعت در حمام یخ قرار گرفت. مقدار ۰/۱ میلی‌لیتر معرف واگنر (KI-I₂) به محلول اضافه شد. ترکیب حاصل ورتکس گردید و به مدت ۳۰ دقیقه در سانتریفیوژ یخچال‌دار با دور ۱۰۰۰۰ در دقیقه سانتریفیوژ شد. سپس نمونه‌های به دست آمده به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۴°C (داخل یخچال) انکوبه شدند. کریستال‌های حاصل در ۴ میلی‌لیتر ۱ و ۲ دی‌کلرواتان حل شدند. به مدت ۲۴ ساعت توسط شیکر در دمای اتاق هم‌زده شدند. جذب محلول حاصل در طول موج ۳۶۰ نانومتر اندازه‌گیری شد و با منحنی استاندارد گلايسين بتائين مقایسه گردید (Bates et al., 1973).

سنجش‌های فیتوشیمیایی، سنجش کل آنتوسیانین: مقدار ۰/۱ گرم از نمونه تازه گیاهی در هاون چینی با ۱۰ میلی‌لیتر متانول اسیدی به صورت کامل ساییده شده و عصاره‌گیری انجام شد و عصاره به دست آمده به مدت ۲۴ ساعت در تاریکی در دمای ۲۵°C قرار داده شد. سپس سانتریفیوژ عصاره حاصل با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه انجام گرفت. در طول موج ۵۵۰ نانومتر جذب محلول رویی حاصل ثبت شد. غلظت کل آنتوسیانین، با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد:

$$A = \varepsilon bc$$

که در این فرمول؛ A: میزان جذب نمونه، ε : ضریب خاموشی آنتوسیانین (۳۳۰۰۰ سانتی‌متر بر مول)، b: عرض کووت و c: غلظت آنتوسیانین نمونه است (Dabravolski and Isayenkov, 2023).

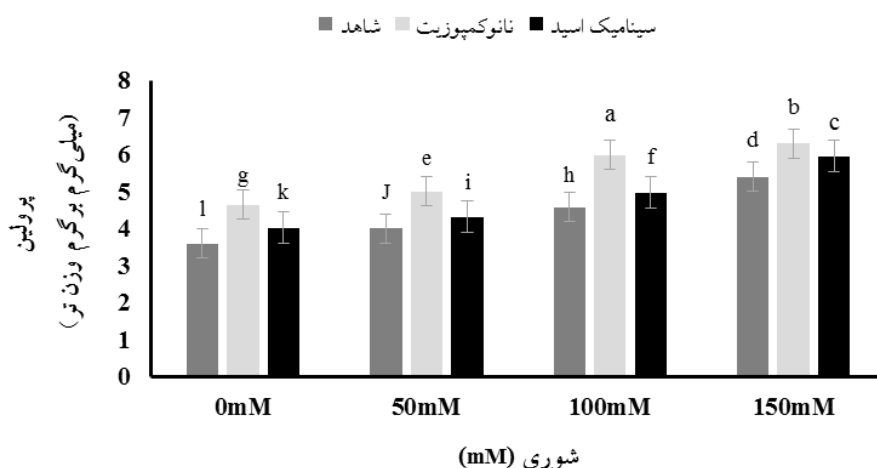
سنجش کل تانن: مقدار ۱ میلی‌لیتر از عصاره متانولی گیاه که در سنجش آنتوسیانین استخراج شد و با ۱۰۰ میلی‌گرم پلی‌وینیل پیرولیدین (PVP) مخلوط گردید و در دمای ۴°C به مدت ۱۵ دقیقه قرار داده شد. سپس سانتریفیوژ مخلوط حاصل با دور ۳۰۰۰ در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه انجام گرفت.

فلغلی تحت تیمارهای مختلف شوری، اسید سینامیک و نانوکمپوزیت اسید سینامیک بررسی شد. مقایسه میانگین داده‌ها معنی‌دار بودن تغییرات پرولین آزاد بین تیمارهای مذکور را نشان داد. تیمار شوری به‌طور معنی‌داری باعث افزایش پرولین نسبت به گروه شاهد شد، به‌طوری‌که در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار به ترتیب ۱۱/۵۴، ۲۱/۰۱ و ۳۰/۵۵٪ افزایش برای پرولین مشاهده شد. بیشترین افزایش مربوط به شوری ۱۵۰ میلی‌مولار بود. با اعمال تیمار اسید سینامیک و اسید سینامیک نانوکمپوزیته، پرولین افزایش بیشتری یافت. بیشترین اثر تعدیل‌کنندگی بر غلظت پرولین آزاد تحت تنش شوری، مربوط به تیمار نانو در شوری ۱۰۰ میلی‌مولار (۲۷/۰۱٪) شد. تیمار نانوکمپوزیت اسید سینامیک در شوری ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار به ترتیب ۱۸/۸۵، ۲۷/۰۱ و ۱۴/۰۶٪ افزایش نشان داد. تیمار اسید سینامیک در شوری ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار به ترتیب ۸/۷۱، ۶/۹۵ و ۱۰/۳۴٪ افزایش نشان داد (شکل ۴). میزان پرولین آزاد در برگ‌های گیاه نعنای فلغلی تحت تیمارهای مختلف شوری، اسید سینامیک و نانوکمپوزیت اسید سینامیک توسط Sepehry Javan و همکاران (۲۰۲۴) مورد سنجش قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده برای میزان ریشه‌های نعنای فلغلی همسو با نتایج به‌دست آمده با میزان پرولین برگ‌های گیاه نعنای فلغلی تحت تیمارهای مختلف شوری، اسید سینامیک و اسید سینامیک نانوکمپوزیته بود (Sepehry Javan et al., 2024). پرولین ترکیب سازگارکننده محلول بوده و در گیاهانی که تحت تنش شوری هستند میزان این ماده افزایش می‌یابد تا تحمل به شوری را در گیاهان افزایش دهد و گیاهان را به شرایط شور سازگار کند. نانوذرات با تغییر سطوح اسیدهای آمینه مثل پرولین و گلیسین بتائین، تحمل گیاه را به تنش شوری افزایش می‌دهند و در نتیجه شوک اسمزی حاصل از تنش NaCl ناشی از سمیت یونی Na^+ و Cl^- را به حداقل می‌رسانند (Dilnawaz et al., 2023; Raza et al., 2023).

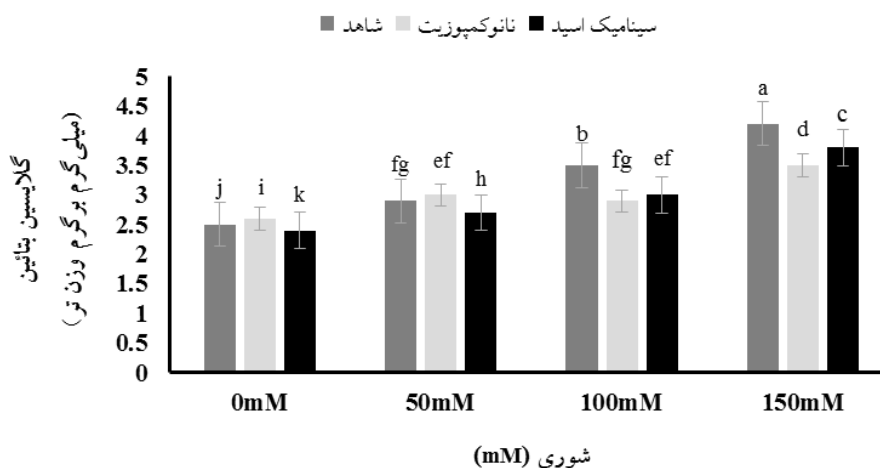
گلیسین بتائین: میزان گلیسین بتائین در برگ‌های گیاه نعنای فلغلی تحت تیمارهای مختلف شوری، اسید سینامیک و

نانوکمپوزیت اسید سینامیک توسط Sepehry Javan و همکاران (۲۰۲۴) مورد سنجش قرار گرفت. در پژوهش حاضر میزان گلیسین بتائین ریشه‌های گیاه نعنای فلغلی تحت تیمارهای مذکور بررسی شد. مقایسه میانگین داده‌ها، معنی‌دار بودن تغییرات گلیسین بتائین بین تیمارهای مختلف شوری، نانوکمپوزیت اسید سینامیک و اسید سینامیک را نشان داد. تیمار شوری به‌طور معنی‌داری باعث افزایش گلیسین بتائین نسبت به گروه شاهد شد، به‌طوری‌که در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار به ترتیب ۱۷/۸، ۲۹/۲ و ۳۶/۲٪ افزایش برای گلیسین بتائین مشاهده شد. بیشترین افزایش مربوط به شوری ۱۵۰ میلی‌مولار بود. با اعمال تیمار اسید سینامیک و اسید سینامیک نانوکمپوزیته، گلیسین بتائین در شوری ۵۰ میلی‌مولار افزایش یافت اما در شوری ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار کاهش یافت. تیمار نانوکمپوزیت در شوری ۵۰ میلی‌مولار ۷٪ افزایش و در شوری ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار به ترتیب ۲۲/۱۸ و ۱۹/۱۵٪ کاهش نشان داد. تیمار اسید سینامیک در شوری ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار به ترتیب ۶/۳۶، ۲۰/۲۵ و ۱۴٪ کاهش نشان داد (شکل ۵).

تجمع املاح سازگارکننده محلول یا مواد اسمولیتی مانند گلیسین بتائین و پرولین یکی از حیاتی‌ترین راهبردهای گیاهان برای مقابله با تنش شوری است. در واقع گیاهان در شرایط شور این املاح را برای تنظیم پتانسیل اسمزی درون سلول‌ها سنتز می‌کنند. همچنین مشخص شده که میزان این املاح با افزایش غلظت شوری به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، که نشان می‌دهد این ترکیبات با عمل به عنوان اسمولیت با تنش‌های غیرزیستی مختلف مبارزه می‌کنند (Dilnawaz et al., 2023). بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که نانوذرات با تغییر سطوح املاح مانند اسیدهای آمینه پرولین و گلیسین بتائین، تحمل گیاه را به تنش شوری افزایش می‌دهند و در نتیجه شوک اسمزی حاصل از تنش NaCl ناشی از سمیت یونی Na^+ و Cl^- را به حداقل می‌رسانند (Dilnawaz et al., 2023; Raza et al., 2023). در تحقیقات انجام‌شده بر روی گیاه *Brassica napus* گزارش شده است که تیمار این



شکل ۴- تغییرات پرولین آزاد در ریشه گیاه نعنای فلفلی تحت تیمارهای مختلف نانوکمپوزیت اسید سینامیک، اسید سینامیک و غلظت‌های مختلف شوری. ستون‌ها بیانگر میانگین سه تکرار، بارهای عمودی بیانگر انحراف معیار و حروف متفاوت تفاوت معنی‌دار براساس آزمون دانکن در سطح احتمال $P < 0/05$ را نشان می‌دهد.

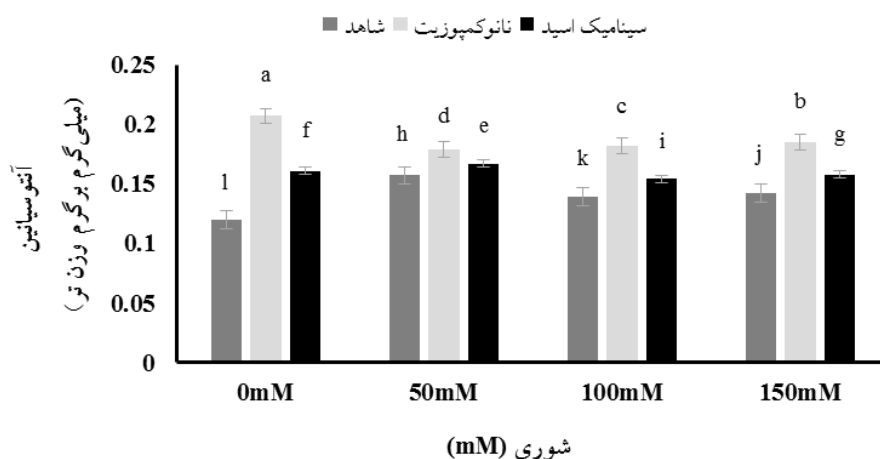


شکل ۵- تغییرات گلاسیسین بتائین در ریشه گیاه نعنای فلفلی تحت تیمارهای مختلف نانوکمپوزیت اسید سینامیک، اسید سینامیک و غلظت‌های مختلف شوری. ستون‌ها بیانگر میانگین سه تکرار، بارهای عمودی بیانگر انحراف معیار و حروف متفاوت تفاوت معنی‌دار براساس آزمون دانکن در سطح احتمال $P < 0/05$ را نشان می‌دهد.

فولرن باعث بهبود محتوای اسیدآمینو و کاهش تنش شوری در گیاهچه گندم شد (Shafiq *et al.*, 2019). نتایج، افزایش پرولین و گلاسیسین بتائین را در پاسخ به تیمار با اسید سینامیک و اسید سینامیک نانوکمپوزیت نشان داد که با یافته‌های سایر محققین مطابقت دارد.

بررسی ترکیبات فیتوشیمیایی در گیاه نعنای فلفلی تحت تنش شوری، کل آنتوسیانین: مقایسه میانگین داده‌ها، معنی‌دار

گیاه با نانوذرات روی تحت تنش شوری، اثرات مضر نمک را از طریق بیوستنز اسمولیت و تنظیم یون کاهش می‌دهد (Farouk and Al-Amri, 2019). در مطالعه دیگری که روی *Medicago sativa* که یک گیاه حساس به نمک است، انجام شد، محلول‌پاشی نانوذرات پتاسیم با افزایش محتوای پرولین تحمل نمک را بهبود بخشید (El-Sharkawy *et al.*, 2017). در تحقیق دیگری، پیش‌تیمار بذر گندم با نانوذرات پلی‌هیدروکسی



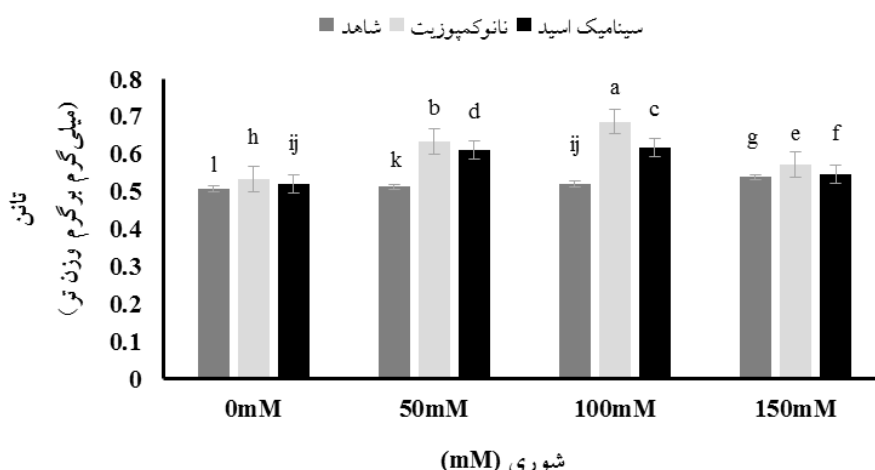
شکل ۶- تغییرات میزان کل آنتوسیانین در گیاه نعنای فلفلی تحت تیمارهای مختلف نانوکمپوزیت اسید سینامیک، اسید سینامیک و غلظت‌های مختلف شوری. ستون‌ها بیانگر میانگین سه تکرار، بارهای عمودی بیانگر انحراف معیار و حروف متفاوت تفاوت معنی‌دار براساس آزمون دانکن در سطح احتمال $P < 0.05$ را نشان می‌دهد.

بیشترین افزایش مربوط به شوری ۱۵۰ میلی‌مولار بود. با اعمال تیمار اسید سینامیک و نانوکمپوزیت حاوی آن، کل تانن افزایش بیشتری یافت. بیشترین افزایش تانن، مربوط به تیمار نانو در شوری ۱۰۰ میلی‌مولار (۳۱/۸۶٪) بود. تیمار نانو در شوری ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار به ترتیب ۲۱/۸۱، ۳۱/۸۶ و ۶/۱۱٪ افزایش نشان داد. تیمار اسید سینامیک در شوری ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار به ترتیب ۱۹/۳، ۱۸/۸۱ و ۱/۸۵٪ افزایش نشان داد (شکل ۷).

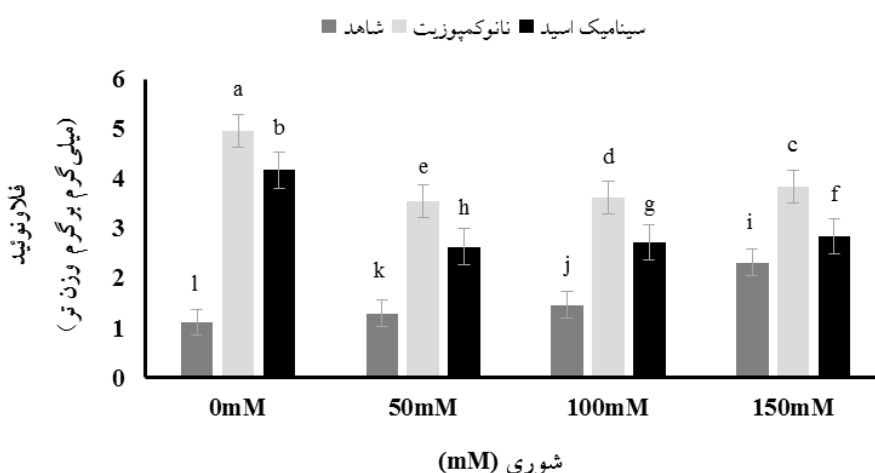
کل فلاونوئید: مقایسه میانگین داده‌ها، معنی‌دار بودن تغییرات کل فلاونوئید بین تیمارهای مختلف شوری، نانوکمپوزیت اسید سینامیک و اسید سینامیک را نشان داد. تیمار شوری به‌طور معنی‌داری باعث افزایش فلاونوئید نسبت به گروه شاهد شد، به‌طوری‌که در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار به ترتیب ۱۶/۲۱، ۳۱/۵ و ۱۰۸/۳٪ افزایش برای فلاونوئیدها مشاهده شد. بیشترین افزایش مربوط به شوری ۱۵۰ میلی‌مولار بود. با اعمال تیمار اسید سینامیک و نانو آن، فلاونوئید افزایش بیشتری یافت. بیشترین افزایش کل فلاونوئید، مربوط به تیمار نانو در شوری ۵۰ میلی‌مولار (۱۷۴/۳٪) بود. تیمار نانوکمپوزیت در شوری ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار به ترتیب ۱۷۴/۳، ۱۴۷/۷ و ۶۶/۴۴٪ افزایش نشان

بودن تغییرات کل آنتوسیانین بین تیمارهای مختلف شوری، نانوکمپوزیت اسید سینامیک و اسید سینامیک را نشان داد. تیمار شوری به‌طور معنی‌داری باعث افزایش کل آنتوسیانین نسبت به گروه شاهد شد، به‌طوری‌که در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار به ترتیب ۳۰/۸، ۱۵/۸ و ۱۸/۳۳٪ افزایش برای آنتوسیانین‌ها مشاهده شد. بیشترین افزایش مربوط به شوری ۵۰ میلی‌مولار بود. با اعمال تیمار اسید سینامیک و نانوکمپوزیت، کل آنتوسیانین افزایش بیشتری یافت. بیشترین افزایش آنتوسیانین، مربوط به تیمار نانو کمپوزیت در شوری ۱۰۰ میلی‌مولار (۳۰/۹٪) بود. تیمار نانوکمپوزیت اسید سینامیک در شوری ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار به ترتیب ۱۴، ۳۰/۹ و ۳۰/۳٪ افزایش نشان داد. تیمار اسید سینامیک در شوری ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار به ترتیب ۷/۶۴، ۱۰/۸ و ۱۱/۳٪ افزایش نشان داد (شکل ۶).

کل تانن: مقایسه میانگین داده‌ها، معنی‌دار بودن تغییرات کل تانن بین تیمارهای مختلف شوری، نانوکمپوزیت اسید سینامیک و اسید سینامیک را نشان داد. تیمار شوری به‌طور معنی‌داری باعث افزایش تانن نسبت به گروه شاهد شد، به‌طوری‌که در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار به ترتیب ۱/۱۸، ۲/۷۶ و ۶/۵۱٪ افزایش برای تانن‌ها مشاهده شد.



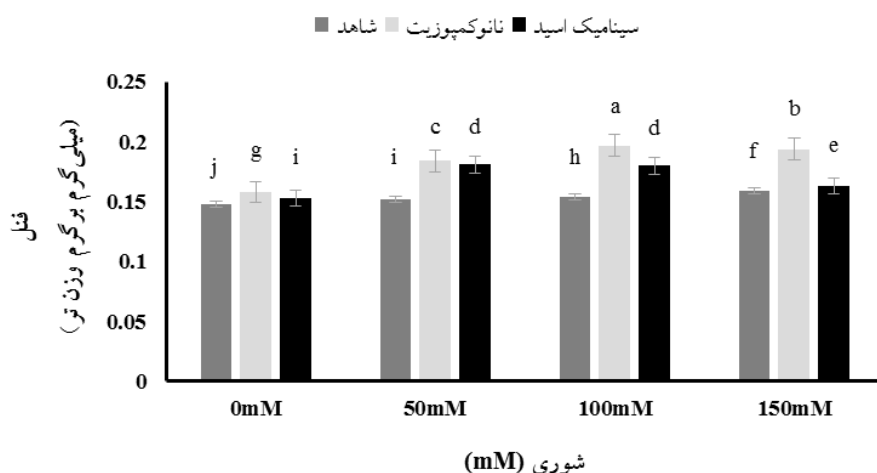
شکل ۷- تغییرات میزان کل نیتروژن در گیاه نعنای فلفلی تحت تیمارهای مختلف نانوکمپوزیت اسید سینامیک، اسید سینامیک و غلظت‌های مختلف شوری. ستون‌ها بیانگر میانگین سه تکرار، بارهای عمودی بیانگر انحراف معیار و حروف متفاوت تفاوت معنی‌دار براساس آزمون دانکن در سطح احتمال $P < 0.05$ را نشان می‌دهد.



شکل ۸- تغییرات میزان کل فلاونوئید در گیاه نعنای فلفلی تحت تیمارهای مختلف نانوکمپوزیت اسید سینامیک، اسید سینامیک و غلظت‌های مختلف شوری. ستون‌ها بیانگر میانگین سه تکرار، بارهای عمودی بیانگر انحراف معیار و حروف متفاوت تفاوت معنی‌دار براساس آزمون دانکن در سطح احتمال $P < 0.05$ را نشان می‌دهد.

۷/۴۳٪ افزایش برای فنل‌ها مشاهده شد. بیشترین افزایش مربوط به شوری ۱۵۰ میلی‌مولار بود. با اعمال تیمار اسید سینامیک و نانوکمپوزیت، فنل افزایش بیشتری یافت. بیشترین افزایش فنل، مربوط به تیمار نانو در شوری ۱۰۰ میلی‌مولار (۲۷/۹٪) بود. تیمار نانوکمپوزیت حاوی اسید سینامیک در شوری ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار به ترتیب ۲۱/۱، ۲۷/۹ و ۲۲٪ افزایش نشان داد. تیمار اسید سینامیک در شوری ۵۰، ۱۰۰

داد. تیمار اسید سینامیک در شوری ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار به ترتیب ۱۰۳/۷، ۸۶/۳ و ۲۲/۹۷٪ افزایش نشان داد (شکل ۸). کل فنل: مقایسه میانگین داده‌ها، معنی‌دار بودن تغییرات کل فنل بین تیمارهای مختلف شوری، نانوکمپوزیت اسید سینامیک و اسید سینامیک را نشان داد. تیمار شوری به‌طور معنی‌داری باعث افزایش فنل کل نسبت به گروه شاهد شد، به‌طوری‌که در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار به ترتیب ۲/۷، ۴/۱ و



شکل ۹- تغییرات میزان کل فنل در گیاه نعنای فلفلی تحت تیمارهای مختلف نانوکمپوزیت اسید سینامیک، اسید سینامیک و غلظت‌های مختلف شوری. ستون‌ها بیانگر میانگین سه تکرار، بارهای عمودی بیانگر انحراف معیار و حروف متفاوت تفاوت معنی‌دار براساس آزمون دانکن در سطح احتمال $P < 0.05$ را نشان می‌دهد.

سینامیک (ماده اولیه مسیر فنیل پروپانوئیدی و پیش‌ساز ترکیبات فنلی) اسید سینامیک وارد مسیر فنیل پروپانوئیدی شده و میزان ترکیبات فنلی را افزایش می‌دهد (Mohagheghian and Ehsan Pour, 2021). در نتیجه، نانوکمپوزیت اسید سینامیک احتمالاً با افزایش محتوای این متابولیت‌های ثانویه، اثرات شوری را بر گیاهان نعنای فلفلی کاهش داده‌اند. ریزساختارهای روی سطوح برگ شامل منافذ کوتیکولی و روزنه است. بررسی نفوذ دو گروه از ذرات معلق در آب با اندازه‌های مختلف به برگ‌های *Vicia faba* نشان داد که ذرات با اندازه نانو به راحتی می‌توانند از طریق منافذ روزنه‌ای وارد برگ‌ها شوند. هنگامی که نانوذرات در سلول‌های گیاهی جذب می‌شوند، پلاسمودسمات‌ها به این مواد اجازه انتقال سلول به سلول را در داخل گیاه می‌دهند (Talebi, 2024). پلاسمودسمات‌ها کانال‌های نانومقیاسی (۵۰ تا ۶۰ نانومتر) هستند که از دیواره‌های سلولی گیاه عبور می‌کنند و امکان تماس و انتقال سلول به سلول را فراهم می‌کنند. در نتیجه اندازه کوچک نانوذرات، کودهای نانومقیاس ممکن است بتوانند به انواع سطوح گیاهی و سیستم‌های حمل‌ونقل دسترسی داشته باشند و در نتیجه در تحویل مواد مغذی نقش مؤثرتری داشته باشند (Hu and Xianyu, 2021). علاوه بر این،

و ۱۵۰ میلی‌مولار به ترتیب ۱۹/۱، ۱۶/۸۸ و ۲/۵۲٪ افزایش نشان داد (شکل ۹).

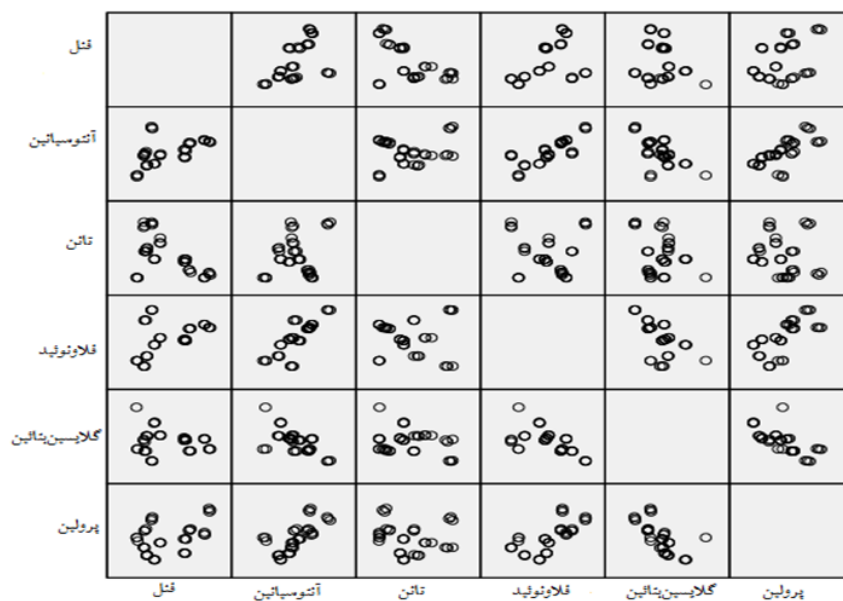
ترکیبات فنلی گسترده‌ترین متابولیت‌های ثانویه در قلمرو گیاهی هستند و نقش‌های متعددی در سیگنال‌دهی، انتقال اکسین، دفاع گیاه، مهار رادیکال‌های آزاد اکسیژن و کاهش یا مهار اکسیداسیون لیپید ایفا می‌کنند. در بین انواع آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی، فنل‌ها و فلاونوئیدها با تجمع در بافت‌های مختلف گیاهان به طور قابل توجهی به عنوان جاذب کننده رادیکال‌های آزاد برای تحمل تنش شوری عمل می‌کنند (Das et al., 2019).

در واقع پلی‌فنل‌ها و فلاونوئیدها آنتی‌اکسیدان‌هایی با وزن مولکولی کم می‌باشند که می‌توانند به‌طور مؤثر رادیکال‌های آزاد مضر را از بین ببرند. در پژوهشی که توسط محققان و احسان‌پور گزارش شد در گیاه تنباکو شوری باعث افزایش کل فنل، آنتوسیانین و فلاونوئید نسبت به نمونه شاهد شد که با تیمار اسید سینامیک نیز افزایش چشمگیری مشاهده شد (Mohagheghian and Ehsan Pour, 2021). در نتایج ما نیز تنش شوری باعث افزایش محتوای کل فنل، آنتوسیانین و فلاونوئید در برگ شد، در حالی‌که بیشترین مقدار در تیمار با نانوکمپوزیت مشاهده شد. به نظر می‌رسد که با تیمار اسید

جدول ۲- جدول ضریب همبستگی و سطح معناداری عوامل مختلف بررسی شده در تحقیق.

پرولین	گلایسین بتائین	فلاونوئید	تانن	آنتوسیانین	فنل		
۰/۴۰۴	۰/۱۴۳	۰/۴۳۱	۰/۹۰۲	۰/۵۲۷	۱	ضریب همبستگی	فنل
۰/۰۱۴	۰/۰۰۵	۰/۰۰۹	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱		سطح معناداری	
۰/۷۰۵	-۰/۶۴۵	۰/۸۱۲	۰/۴۲۹	۱	۰/۵۲۷	ضریب همبستگی	آنتوسیانین
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۹	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	سطح معناداری	
۰/۴۳۸	-۰/۲۰۴	۰/۳۵۹	۱	۰/۴۲۹	۰/۹۰۲	ضریب همبستگی	تانن
۰/۰۰۸	۰/۰۳۱	۰/۰۳۲		۰/۰۰۹	۰/۰۰۰	سطح معناداری	
۰/۶۷۶	-۰/۵۷۸	۱	۰/۳۵۹	۰/۸۱۲	۰/۴۳۱	ضریب همبستگی	فلاونوئید
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰		۰/۰۳۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۹	سطح معناداری	
-۰/۶۹۴	۱	-۰/۵۷۸	-۰/۲۰۴	-۰/۶۴۵	-۰/۱۴۳	ضریب همبستگی	گلایسین بتائین
۰/۰۰۰		۰/۰۰۰	۰/۰۳۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۵	سطح معناداری	
۱	-۰/۶۹۲	۰/۶۷۶	۰/۴۳۸	۰/۷۰۵	۰/۴۰۴	ضریب همبستگی	پرولین
	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۸	۰/۰۰۰	۰/۰۱۴	سطح معناداری	

همبستگی در سطح ۰/۰۵ و کمتر از آن (≤ ۰/۰۵) معنادار است.



شکل ۱۰- نمودار مربوط به رگرسیون پارامترهای سنجش شده

شوری افزایش داده است (Ranjbar et al., 2023; Haeri et al., 2023). سازگاری با شرایط تنش‌زا یک امر ظریف و پیچیده است مکانیسمی که شامل تعداد زیادی متابولیت، ژن و مکانیسم‌های تنظیمی است. گیاهان سیگنال‌های تنش را با استفاده از اجزای مختلف از جمله کینازها،

از آنجایی که نانوکمپوزیت‌ها حلالیت، واکنش‌پذیری و فراهم‌زیستی بهتری نسبت به همتایان مولکولی خود دارند، می‌توان بیان کرد که در مقایسه با اسید سینامیک، اسید سینامیک نانوکمپوزیته بهتر و سریع‌تر توسط گیاه نفع‌افلفلی جذب شده، با تعدیل اثرات منفی نمک، تحمل این گیاه دارویی را به تنش

اسمولیت‌هایی که شاخص تنش شوری بودند در تیمار با نانو افزایش نشان دادند. در سنجش‌های تکمیلی به وسیله GC-MS که بر روی اسانس گیاهان نعنای فلفلی تحت تیمارهای مذکور انجام گرفت مقدار اسانس و کیفیت آن در نمونه‌های تیمار شده با نانوکمپوزیت افزایش نشان داد. به طوری که برخی از متابولیت‌ها مثل منتول و کاریوفیلین افزایش چندین برابری در مقایسه با شاهد نشان دادند. در جواب به نتیجه کاربردی این پژوهش بایستی گفت که یک روش سریع و ساده سنتر کودهای نانوکمپوزیتی از منابع طبیعی است که می‌تواند جایگزین کودهای مضر شیمیایی شود. در این میان، تأثیر نانوکمپوزیت اسید سینامیک بیشتر از خود اسید سینامیک بود. دلیل آن ممکن است انحلال‌پذیری بالا، جذب و انتقال بهتر و سریع‌تر نانوکمپوزیت نسبت به اسید سینامیک باشد. به طور خلاصه، این مطالعه گزارشی بود از یک روش سریع و ساده سنتر نانوکمپوزیت از منابع طبیعی که به راحتی در دسترس هستند. بنابراین، این ماده و نانوکمپوزیت حاوی آن یک مسیر نوآورانه را در تحقیقات نشان دادند که می‌تواند با موفقیت عملکرد گیاه نعنای فلفلی را برای مقابله با شوری بهبود بخشد.

هورمون‌ها، ناقل‌های یون، فاکتورهای رونویسی و Ca^{2+} شناسایی و انتقال می‌دهند (Bao et al., 2024). مولکول‌های حسگر می‌توانند باعث تغییرات ساختاری در پروتئین‌ها و سایر ترکیبات مهم، تغییر در سیالیت غشاهای، جداسازی رشته‌های اسید نوکلئیک و غیره شوند. چنین تغییراتی می‌تواند بر روند رونویسی تأثیر بگذارد و منجر به کنترل ژن‌های سازگار با تنش شود (Llanes et al., 2020). استفاده از نانوذرات برای تحویل ژن برای انتقال سریع سیگنال‌ها و ایجاد واکنش‌های مربوط به تحمل تنش، بینش‌های مهمی را در مورد مطالعات آینده در این زمینه، براساس حداقل اطلاعات ارائه‌شده را فراهم می‌کند. جدول مربوط به ضرایب همبستگی (جدول ۲) و رگرسیون بین عوامل مختلف مورد استفاده در این تحقیق در زیر آورده شده است (شکل ۱۰).

نتیجه‌گیری

در بررسی شاخص‌های بیوشیمیایی و فیتوشیمیایی نعنای فلفلی شوری تأثیر منفی بر روی این شاخص‌ها گذاشت اما تیمار اسید سینامیک و اسید سینامیک نانوکمپوزیت این شاخص‌ها را بهبود بخشید طبق نتایج بدست آمده در واقع نانوکمپوزیت تحمل گیاهان به تنش شوری را افزایش داد چرا که میزان

منابع

- Akbarpour, V., Motaharinezhad, M., & Bahmanyar, M. (2022). Investigation of morpho-physiological properties of peppermint (*Mentha piperita* L.) affected by carbon sources of ethanol and methanol. *Journal of Horticultural Science*, 36(1), 29-41. <https://doi.org/10.22067/jhs.2022.61778.0>
- Aliakbarpour, F., Vaziri, A., & Mohseni, M. (2020). Green synthesis of Au-Ag nanoparticles using *Mentha piperita* and effects of Au-Ag alloy nanoparticles on the growth of *Mentha piperita* under salinity stress. *Journal of Plant Process and Function*, 9, 47-58. <https://civilica.com/doc/1367522>
- Bao, Y., Chen, J., Zhang, Y., Fernie, A. R., Zhang, J., Huang, B., Zhu, F., & Cao, F. (2024). Emerging role of jasmonic acid in woody plant development. *Advanced Agrochem*, 3(1), 26-38. <https://doi.org/10.1016/j.aac.2023.11.002>
- Bates, L., Waldren, R. A., & Teare, I. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205-207. <https://doi.org/10.1007/bf00018060>
- Campobenedetto, C., Mannino, G., Beekwilder, J., Contartese, V., Karlova, R., & Bertea, C. M. (2021). The application of a biostimulant based on tannins affects root architecture and improves tolerance to salinity in tomato plants. *Scientific Reports*, 11(1), 354. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79770-5>
- Dabravolski, S. A., & Isayenkov, S. V. (2023). The role of anthocyanins in plant tolerance to drought and salt stresses. *Plants*, 12(13), 2558. <https://doi.org/10.3390/plants12132558>
- Das, A. B., Goud, V. V., & Das, C. (2019). Phenolic compounds as functional ingredients in beverages. In Value-added ingredients and enrichments of beverages. *Elsevier*, 285-323. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816687-1.00009-6>
- Dilnawaz, F., Misra, A. N., & Apostolova, E. (2023). Involvement of nanoparticles in mitigating plant's abiotic stress. *Plant Stress*, 10, 100280. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100280>

- El-Sharkawy, M., Elbashbeshe, T., Mahmoud, E., & Missaoui, A. M. (2017). Response of Alfalfa under salt stress to the application of potassium sulfate nanoparticles. *American Journal of Plant Sciences*, 08(08), 1751-1773. <https://doi.org/10.4236/ajps.2017.88120>
- El Sabagh, A., Hossain, A., Barutçular, C., Iqbal, M. A., Islam, M. S., Fahad, S., & Erman, M. (2020). Consequences of salinity stress on the quality of crops and its mitigation strategies for sustainable crop production: An outlook of arid and semi-arid regions. *Environment, Climate, Plant and Vegetation Growth*, 503-533. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49732-3_20
- El Sabagh, A., Islam, M. S., Skalicky, M., Ali Raza, M., Singh, K., Anwar Hossain, M., & Ratnasekera, D. (2021). Salinity stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) in the changing climate: Adaptation and management strategies. *Frontiers in Agronomy*, 3, 661932. <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.661932>
- Farouk, S., & Al-Amri, S. M. (2019). Exogenous zinc forms counteract NaCl-induced damage by regulating the antioxidant system, osmotic adjustment substances, and ions in canola (*Brassica napus* L. cv. Pactol) plants. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19, 887-899. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00087-y>
- Forlani, G., & Funck, D. (2020). A specific and sensitive enzymatic assay for the quantitation of L-proline. *Frontiers in Plant Science*, 11, 582026. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.582026>
- Ghassemi-Golezani, K., Rahimzadeh, S., & Farhangi-Abriz, S. (2023). Nanomaterials and nanocomposites exposures to plants: An overview. *Nanomaterials and Nanocomposites Exposures to Plants: Response, Interaction, Phytotoxicity and Defense Mechanisms*, 19-41. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2419-6_2
- Haeri Moghaddam, N., Hashamdar, S., Hamblin, M. R., & Ramezani, F. (2023). Effects of electrospun nanofibers on motor function recovery after spinal cord injury: A systematic review and metaanalysis. *World Neurosurg*, 181, 96-106. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2023.10.065>
- Haris, M., Hussain, T., Mohamed, H. I., Khan, A., Ansari, M. S., Tauseef, A., & Akhtar, N. (2023). Nanotechnology—A new frontier of nano-farming in agricultural and food production and its development. *Science of The Total Environment*, 857, 159639. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159639>
- Hassid, A., Salla, M., Krayem, M., Khaled, S., Hassan, H., & El Khatib, S. (2024). A review on the versatile applications of plant-based essential oils in food flavoring, culinary uses and health benefits. *Discover Food*, 5, (130). <https://doi.org/10.20944/preprints202406.2073.v1>
- Hu, J., & Xianyu, Y. (2021). When nano meets plants: A review on the interplay between nanoparticles and plants. *Nano Today*, 38, 101143. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2021.101143>
- Hudz, N., Kobylinska, L., Pokajewicz, K., Horcinova Sedlackova, V., Fedin, R., Voloshyn, M., Myskiv, I., Brindza, J., Wiczorek, P. P., & Lipok, J. (2023). *Mentha piperita*: Essential oil and extracts, their biological activities, and perspectives on the development of new medicinal and cosmetic products. *Molecules*, 28, 7444. <https://doi.org/10.3390/molecules28217444>
- Jing, T., Li, J., He, Y., Shankar, A., Saxena, A., Tiwari, A., & Eissa, M. A. (2024). Role of calcium nutrition in plant physiology: Advances in research and insights into acidic soil conditions-A comprehensive review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 108602. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108602>
- Juric, T., Micic, N., Potkonjak, A., Milanov, D., Dodic, J., Trivunovic, Z., & Popovic, B. M. (2021). The evaluation of phenolic content, in vitro antioxidant and antibacterial activity of *Mentha piperita* extracts obtained by natural deep eutectic solvents. *Food Chemistry*, 362, 130226. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130226>
- Kiani, R., Arzani, A., & Mirmohammady Maibody, S. (2021). Polyphenols, flavonoids, and antioxidant activity involved in salt tolerance in wheat, *Aegilops cylindrica* and their amphidiploids. *Frontiers in Plant Science*, 12, 646221. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.646221>
- Llanes, A., Palchetti, M. V., Vilo, C., & Ibanez, C. (2021). Molecular control to salt tolerance mechanisms of woody plants: recent achievements and perspectives. *Annals of Forest Science*, 78, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s13595-021-01107-7>
- Mahendran, G., & Rahman, L. U. (2020). Ethnomedicinal, phytochemical and pharmacological updates on Peppermint (*Mentha× piperita* L.)—A review. *Phytotherapy Research*, 34, 2088-2139. <https://doi.org/10.1002/ptr.6664>
- Massange-Sanchez, J. A., Sanchez-Hernandez, C. V., Hernandez-Herrera, R. M., & Palmeros-Suarez, P. A. (2021). The biochemical mechanisms of salt tolerance in plants. *Plant Stress Physiology-Perspectives in Agriculture*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.101048>
- Mohagheghian, E., & EhsanPour, A. (2021). Effect of cinnamic acid on the activity of phenylalanine ammonialyase (PAL) and tyrosine ammonialyase (TAL) enzymes and some physiological characteristics of tobacco plant (*Nicotiana rustica* L.) under salinity stress in vitro culture. *Sillul va Baft*, 12, 88-102. <https://doi.org/10.52547/jct.12.2.88>
- Nemati Lafmejani, Z., Jafari, A. A., Moradi, P., & Moghadam, A. L. (2021). Application of chelate and nano-chelate zinc micronutrient on morpho-physiological traits and essential oil compounds of peppermint (*Mentha piperita* L.). *Journal of Medicinal Plants and By-Product*, 10(Special), 21-28. <https://doi.org/10.22092/JMPB.2020.125992.1109>

- Nie, K., Wang, X., Deng, K., Hu, X., & Wu, K. (2021). Magnesium matrix composite reinforced by nanoparticles—a review. *Journal of Magnesium and Alloys*, 9(1), 57-77. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.08.018>
- Pinto, E., Aggrey, W. N., Boakye, P., Amenuvor, G., Sokama-Neuyam, Y. A., Fokuo, M. K., & Erzuah, M. S. (2022). Cellulose processing from biomass and its derivatization into carboxymethylcellulose: A review. *Scientific African*, 15, e01078. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e01078>
- Ranjbar, M., Khakdan, F., Ghorbani, A., Zargar, M., & Chen, M. (2023). The variations in gene expression of GAPDH in *Ocimum basilicum* cultivars under drought-induced stress conditions. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 119187-119203. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30549-x>
- Raza, A., Charagh, S., Salehi, H., Abbas, S., Saeed, F., Poinern, G. E., Siddique, K. H., & Varshney, R. K. (2023). Nano-enabled stress-smart agriculture: Can nanotechnology deliver drought and salinity-smart crops? *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*, 2, 189-214. <https://doi.org/10.1002/sae2.12061>
- Salem, S. S., Hashem, A. H., Sallam, A. A. M., Doghish, A. S., Al-Askar, A. A., Arishi, A. A., & Shehabeldine, A. M. (2022). Synthesis of silver nanocomposite based on carboxymethyl cellulose: Antibacterial, antifungal and anticancer activities. *Polymers*, 14(16), 3352. <https://doi.org/10.3390/polym14163352>
- Seddiqi, H., Oliaei, E., Honarkar, H., Jin, J., Geonzon, L. C., Bacabac, R. G., & Klein-Nulend, J. (2021). Cellulose and its derivatives: Towards biomedical applications. *Cellulose*, 28(4), 1893-1931. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03674-w>
- Sepehry Javan, Z., Razavi, S. M., Khalofah, A., & Ghorbani, A. (2024). The ameliorating effects of cinnamic acid-based nanocomposite against salt stress in peppermint. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(32), 45055-45073. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34158-0>
- Shafiq, F., Iqbal, M. Ali, M., & Ashraf, M. A. (2019). Seed pre-treatment with polyhydroxy fullerene nanoparticles confer salt tolerance in wheat through upregulation of H₂O₂ neutralizing enzymes and phosphorus uptake. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19, 734-742. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00073-4>
- Talebi, S. M. (2024). Uptake of nanomaterials by plants and translocation within plants. In *Microbiome and Nano-Cross-Talk*. Elsevier, 19-41. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18822-0.00002-5>

Synthesis of cinnamic acid nanocomposite and investigation of its effects on root osmolality compounds and phytochemical parameters of peppermint (*Mentha piperita* L.) plant under salt stress

Zahra Sepehry Javan, Seyed Mehdi Razavi*

Department of Biology, Faculty of Science, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
(Received: 2025/01/05, Accepted: 2025/05/03)

Abstract

The present study was conducted to synthesize a cinnamic acid nanocomposite and better understand its behavior in salinity control in peppermint plants. For this purpose, three factors, salinity stress with different concentrations of sodium chloride, including 0, 50, 100, and 150 mg/liter; cinnamic acid with a concentration of 50 μ M; and cinnamic acid nanocomposite based on carboxymethyl cellulose with a concentration of 50 μ M were considered. The results showed that with increasing salinity levels, the content of soluble compounds (30.55% proline and 36.2% glycine betaine) and phytochemical parameters (6.51 to 108.3%) increased. The application of cinnamic acid and its nanocomposite increased these vital parameters significantly. There was a 7 to 27.01% increase in soluble compounds and a 27.9 to 174.3% increase in phytochemical parameters. As a biostimulant, the nanocomposite significantly increased peppermint tolerance under salinity conditions. Cinnamic acid and nanocomposite containing it acted as a plant growth regulator in saline conditions. The results showed that nanocomposite is more effective than cinnamic acid in improving biochemical and phytochemical parameters. The reason for this is the high solubility, better and faster absorption and transfer of nanocomposite compared to the material itself. This material and the nanocomposite containing it showed an innovative path in research that can successfully improve the performance of plants to cope with salinity.

Keywords: Stress, Carboxymethyl cellulose, Medicinal plants, Nanocomposites

Corresponding author, Email: razavi694@gmail.com