



بهبود جذب عناصر معدنی کالوس گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) تحت تنش شوری با کاربرد نانولوله‌های کربنی چندجداره

رویا رضوی زاده^{۱*}، فاطمه ادب آوازه^۲

۱ گروه زیست‌شناسی، دانشگاه پیام نور، ۱۹۳۹۵۳۶۹۷ تهران، ایران (razavi.roya@pnu.ac.ir)

۲ گروه زیست‌شناسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

نتایج و بحث

نتایج نشان داد که تنش شوری به‌طور معنی‌دار وزن خشک کالوس را حدود ۶۳/۵ درصد نسبت به شاهد کاهش داد. در مقابل، MWCNTs موجب افزایش قابل‌توجه وزن خشک در شرایط شور و غیرشور شد. به‌طوریکه که در ترکیب با شوری، حدود پنج برابر بهبود نسبت به تیمار شوری به‌تنهایی مشاهده گردید (جدول ۱). بررسی عناصر معدنی نیز نشان داد که تنش شوری موجب کاهش معنی‌دار غلظت کلسیم، منگنز و روی شد. در حالی‌که سدیم به میزان قابل‌توجهی افزایش یافت. هرچند مقادیر منیزیم، آهن و مولیبدن نیز تحت تنش شوری کاهش یافتند، این کاهش از نظر آماری معنی‌دار نبود. کاربرد MWCNTs جذب عناصر را در هر دو شرایط شور و غیرشور بهبود داد. در شرایط بدون تنش شوری، MWCNTs موجب افزایش معنی‌دار کلسیم (۱۹/۵ درصد)، آهن (۶۱/۹ درصد)، منیزیم (۱۷/۲ درصد)، منگنز (۲۱ درصد)، فسفر (۲۸/۵ درصد) و روی (۳/۲ درصد) نسبت به شاهد شد. تحت تنش شوری نیز MWCNTs موجب افزایش معنی‌دار آهن (۶۷/۹ درصد)، منیزیم (۷/۱ درصد)، فسفر (۱۶/۴ درصد) و روی (۱۶/۹ درصد) نسبت به تیمار شوری به‌تنهایی گردید.

جدول ۱. تأثیر MWCNTs بر وزن خشک و جذب عناصر معدنی در کالوس گوجه‌فرنگی تحت تنش شوری

روى	کلسیم	آهن	پتاسیم	منیزیم	منگنز	مولیبدن	سدیم	فسفر	وزن خشک	NaCl
	(mg L ⁻¹)	(g)	(mM)							
۰	۴۰۷/۷ ^b	۱۲/۰۹ ^b	۵۴۰/۱۰۷ ^b	۳۷۳/۱۴ ^c	۴۶/۴۲ ^b	۰/۶۷ ^{ab}	۵۷۵/۳۵ ^d	۱۰/۱۹ ^b	۰/۱۸۴ ^b ± ۰/۱	۰
۱۰۰	۴۷۸/۳ ^a	۱۹/۵۷ ^a	۵۴۷۵/۱۹ ^{ab}	۴۳۷/۴۷ ^a	۵۶/۱۸ ^a	۰/۶۹ ^a	۶۵۱/۵۰ ^c	۱۳/۰۹ ^a	۰/۲۹۸ ^a ± ۰/۱	۱۰۰
۱۰۰	۳۸۵/۳ ^c	۱۱/۵۹ ^b	۵۵۴۲/۴۳ ^a	۳۶۶/۰۵ ^c	۳۸/۸۸ ^c	۰/۵۸ ^b	۱۰۶۷/۸ ^a	۱۰/۹۳ ^b	۰/۰۶۷ ^c ± ۰/۱	۱۰۰
۱۰۰	۳۹۳/۵ ^c	۱۹/۴۶ ^b	۴۸۳۶/۹۹ ^c	۳۹۱/۹۹ ^b	۳۹/۷ ^c	۰/۶۴ ^{ab}	۹۶۶/۵۶ ^b	۱۲/۷۳ ^b	۰/۳۴ ^a ± ۰/۲	۱۰۰

تحلیل عناصر نشان داد که شوری موجب افزایش تجمع یون‌های سدیم و کاهش سطوح منیزیم، کلسیم و روی شد. این الگو بیانگر اختلالات یونی تحت تنش شوری است، جایی که تجمع بیش از حد Na^+ با جذب کاتیون‌های دوظرفیتی ضروری که نقش مستقیم در فعال‌سازی آنزیم‌ها، پایداری غشا، سیگنال‌دهی سلولی و تنظیم واکنش‌های ردوکس دارند مانند Mg^{2+} و Ca^{2+} تداخل ایجاد کرده و یکپارچگی غشا را مختل می‌کند. نتایج این پژوهش نشان داد که MWCNTs توانایی بهبود جذب عناصر ضروری را در شرایط شور و غیرشور دارند. این بهبود با گزارش‌های پیشین مطابقت دارد که نشان می‌دهند نانومواد می‌توانند از طریق تعدیل انتقال‌دهنده‌های غشایی، ایجاد منافذ موقتی یا افزایش نفوذپذیری غشا، جذب و انتقال یون‌ها را بهبود دهند (Seddighinia et al., 2019). افزایش آهن، کلسیم و فسفر در حضور شوری نشان می‌دهد که MWCNTs تا حدی هموستازی یونی مختل‌شده را بازیابی کرده و اثرات مضر تجمع Na^+ را کاهش داده‌اند. این بازیابی تعادل یونی همراه با افزایش دسترسی عناصر ضروری، محیط مناسب‌تری برای انجام فرایندهای متابولیکی و افزایش زیست‌توده ایجاد کرده و احتمالاً عامل اصلی بهبود وزن خشک کالوس تحت تیمارهای حاوی MWCNTs است (Hu et al., 2021). بنابراین، MWCNTs می‌توانند به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای تعدیل اثرات منفی شوری و تقویت تغذیه گیاهی در شرایط تنش مطرح شوند.

منابع

Hao, Y., Yu, Y., Sun, G., Gong, X., Jiang, Y., Lv, G., Zhang, Y., Li, L., Zhao, Y., Sun, D., Gu, W., Qian, C. (2023). Effects of multi-walled carbon nanotubes and nano-silica on root development, leaf photosynthesis, active oxygen and nitrogen metabolism in maize. *Plants*, 12: 1604. <https://doi.org/10.3390/plants12081604>

Hu, X., Chen, L., Huang, Y., Wei, L. (2021). Multi-walled carbon nanotubes mitigate the toxicity of salt stress in wheat seedlings through regulation of antioxidant systems and ion balance. *Plant Growth Regulation*, 94: 29–41. <https://doi.org/10.1007/s10725-020-00648-0>

Maqbool, M., Ishtiaq, M., Mazhar, M.W., Casini, R., Mahmoud, E.A., Elansary, H.O. (2023). Enhancing bioactive metabolite production in *Aerva sanguinolenta* callus cultures through silver nanoparticle and salicylic acid elicitation. *Sustainability*, 15: 10395. <https://doi.org/10.3390/su151310395>

Seddighinia, Z., Ghorbanpour, M., Hatami, M. (2019). Multi-walled carbon nanotubes improve tolerance of cucumber (*Cucumis sativus*) to salt stress via modulating oxidative stress and osmotic adjustment. *Plant Physiology and Biochemistry*, 145: 135–143. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.10.005>

Wani, A.K., Khan, Z., Sena, Akhtar, N., Alreshdi, M.A., Yadav, K.K., Alkahtani, A.M., Wani, A.W., Rahayu, F., Tafakresnanto, C., Latifah, E., Hariyono, B., Arifin, Z., Eltayeb, L.B. (2024) Carbon nanotubes in plant dynamics: Unravelling multifaceted roles and phytotoxic implications. *Plant Physiology and Biochemistry*, 210: 1086–1108. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108628>

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی اثرات متقابل نانولوله‌های کربنی چندجداره (MWCNTs) و تنش شوری بر رشد و جذب عناصر معدنی کالوس گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) انجام شد. برای القای کالوس، ریزنمونه‌های ساقه در محیط MS کامل حاوی ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر نفتالین استیک اسید (NAA) و ۲/۵ میلی‌گرم بر لیتر بنزین آمینو پورین (BAP) کشت داده شدند و سپس کالوس‌های هم‌سن به مدت ۲۱ روز در معرض تنش شوری (۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار NaCl) و MWCNTs (۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) قرار گرفتند. نتایج نشان داد تنش شوری موجب کاهش چشمگیر وزن خشک و ایجاد اختلال در تعادل یونی، به‌ویژه افزایش تجمع سدیم و کاهش کلسیم، منیزیم و روی شد. در مقابل، کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر MWCNTs به‌طور معنی‌داری وزن خشک کالوس را افزایش داد و جذب عناصر معدنی از جمله کلسیم، منیزیم، آهن، روی و فسفر را بهبود بخشید. تحت شرایط شور نیز این نانومواد توانستند بخشی از اثرات منفی تجمع سدیم را از طریق بهبود هموستازی یونی تعدیل کنند. این نتایج نشان می‌دهد که MWCNTs در غلظت مناسب می‌توانند نقش مؤثری در بهبود رشد و وضعیت تغذیه‌ای بافت‌های گیاهی تحت تنش شوری ایفا کنند.

مقدمه

شوری یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی محدودکننده رشد گیاه است که با برهم‌زدن تعادل یونی، مختل کردن جذب عناصر ضروری و ایجاد استرس اسمزی، فرآیندهای فیزیولوژیک را به‌شدت تحت‌تأثیر قرار داده و نهایتاً موجب کاهش رشد و عملکرد می‌شود. در چنین شرایطی، بهبود کارایی جذب عناصر غذایی و حفظ تعادل یونی یکی از راهبردهای اساسی برای افزایش پایداری و تولید گیاه به شمار می‌آید. هم‌زمان با این چالش‌ها، نانومواد کربنی به‌ویژه نانولوله‌های کربنی چندجداره طی سال‌های اخیر به‌عنوان ابزارهایی نوین برای تعدیل اثرات زیان‌بار شوری مطرح شده‌اند. گزارش‌ها نشان می‌دهد که این نانومواد از طریق افزایش نفوذپذیری غشا، بهبود جذب عناصر و تنظیم نسبت‌های یونی، می‌توانند باعث ارتقای رشد و متابولیسم گیاه تحت تنش شوند (Hao et al., 2023; Wani et al., 2024). با وجود این، بخش عمده تحقیقات در سطح گیاه کامل انجام شده و بررسی دقیق مکانیسم‌های تغذیه‌ای در یک سیستم کنترل‌شده هنوز محدود است.

کشت بافت گیاهی، به‌ویژه کشت کالوس، بستری کاملاً کنترل‌شده برای بررسی رفتار سلول‌های گیاهی بدون تداخل عوامل مزرعه‌ای فراهم می‌کند که در آن می‌توان تغییرات تغذیه‌ای و پاسخ‌های یونی را به‌صورت مستقیم و قابل تکرار بررسی کرد (Maqbool et al., 2023). یکنواختی ساختاری و متابولیسی کالوس، امکان مطالعه اثر نانولوله‌های کربنی بر جذب عناصر و تعادل یونی را بدون دخالت پیچیدگی‌های فیزیولوژی گیاه کامل فراهم می‌سازد و می‌تواند به روشن شدن سازوکارهای پایه‌ای دخیل در تعامل نانومواد و سلول‌های گیاهی کمک می‌کند.

بر همین اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر نانولوله‌های کربنی چندجداره بر وزن خشک و جذب عناصر معدنی در کالوس گوجه‌فرنگی تحت تنش شوری انجام شد. انتظار می‌رود نتایج این تحقیق بتواند مسیر توسعه راهکارهای مبتنی بر نانو فناوری را برای بهبود تغذیه و افزایش تحمل گیاهان زراعی در شرایط شور هموار کند و زمینه کاربرد مؤثر نانومواد در سامانه‌های کشت بافت و تولید گیاهان مقاوم را گسترش دهد.

مواد و روش‌ها

بذرهای گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum* L. var. Superchef) پس از استریل سطحی در محیط 1/2MS کشت و به مدت ۲۱ روز در اتاق رشد نگهداری شدند. برای القای کالوس، ریزنمونه‌های ساقه از گیاهچه‌های ۲۱ روزه به محیط کشت MS کامل حاوی ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر NAA و ۲/۵ میلی‌گرم بر لیتر BAP منتقل و کالوس‌ها هر سه هفته یک‌بار واکست شدند. برای بررسی اثر MWCNTs بر وزن خشک و جذب عناصر ضروری کالوس تحت تنش شوری، آزمایشی فاکتوریل ۲ × ۲ در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. این آزمایش شامل دو سطح از MWCNTs (۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) و دو سطح از NaCl (۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار) بود که به‌طور مستقیم به محیط MS حاوی ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر NAA و ۲/۵ میلی‌گرم بر لیتر BAP اضافه شدند. کالوس‌های هم‌سن به محیط‌های تیمار منتقل و پس از ۲۱ روز وزن خشک و عناصر ضروری پس از هضم اسیدی با ICP-OES تعیین شد. در این پژوهش، MWCNTs با قطر خارجی ۵–۱۵ نانومتر از شرکت پیشگامان نانومواد ایرانیان خریداری و محلول پایه پس از پراکنش اولتراسونیک تهیه شد. داده‌ها با استفاده از ANOVA دوطرفه تحلیل و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح $P \leq 0.05$ انجام شد.