بوم‌شناسی کاربردی/ سال چهاردهم / شماره دوم / ۱٤۰٤/ صفحات ۳۹ تا ۵۵

# پاسخ مورفولوژیکی و ساختاری ریشه نهال ارغوان (*Cercis siliquastrum* L.) به عملکرد قارچ *Glomus mosseae* و نانولوله‌های کربنی‌چنددیواره در شرایط تنش خشکی

افروز هواسی[۱]، جعفر حسین زاده[۲*]، مهدی حیدری[۲] و جواد میرزایی[۲]

(تاریخ دریافت: ۱٤۰٤/۰۹/۰۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۱٤۰٤/۱۱/۱۸)

## چکیده

**تنش خشکی، عامل اصلی محدودکننده استقرار نهال‌های چوبی در اکوسیستم‌های نیمه‌خشک زاگرس است که با کاهش کارایی ریشه، موفقیت برنامه‌های احیایی را تهدید می‌کند. این پژوهش برای نخستین بار، اثرات ترکیبی قارچ میکوریزی *Glomus mosseae* نانولوله‌های‌کربنی چنددیواره (MWCNTs) بر صفات مورفولوژیکی و ساختاری ریشه نهال‌های ارغوان (*Cercis siliquastrum* L.) را تحت تنش خشکی بررسی کرد. تیمارها در قالب طرح کاملاً تصادفی با ساختار فاکتوریل ۳×۲×۳ و سه تکرار برای هر سلول آزمایشی شامل سه سطح تنش خشکی (۱۰۰، ٦۰ و ۲۰ درصد ظرفیت زراعی)، دو سطح قارچ (تلقیح و عدم تلقیح) و سه سطح MWCNTs (۰، ۵۰ و ۱۰۰ mg $L^{-1}$) اجرا شدند. برهم‌کنش‌های تنش× قارچ بر قطر و تراکم بافت ریشه و تنش× قارچ× MWCNTs بر تراکم بافت ریشه (P<۰/۰۱) معنی‌دار بود. در تنش شدید (۲۰ ٪) حجم ۷۱٪، وزن‌تر ٦۸٪، وزن خشک ٦۵٪ و طول ریشه ۲٦٪ کاهش یافت. تلقیح قارچ، افزایش ٤۹٪ حجم، ٤۸٪ وزن تر، ۳۹٪ وزن خشک و ۱٦٪ طول ریشه ایجاد کرد. MWCNTs در غلظت ۱۰۰mg $L^{-1}$ نیز ۵۲ ٪ وزن خشک، ۳۸ ٪ وزن تر، ۲۷٪ حجم و ۲۱٪ طول ریشه را بهبود بخشید. به طور کلی، کاربرد همزمان قارچ میکوریزی و MWCNTs با افزایش کارایی جذب ریشه، رشد نهال‌های ارغوان را تحت تنش خشکی ارتقا داد و به عنوان راهبرد نوین هم‌افزا، پتانسیل بالایی برای احیای جنگل‌های زاگرس دارد.**

**واژه‌های کلیدی: تراکم بافت ریشه، حجم ریشه، نانوفناوری زیستی، معماری سیستم ریشه، تحمل به کم‌آبی.**

۱. علوم جنگل، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

۲. گروه علوم جنگل، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: j.hoseinzadeh@ilam.ac.ir



[ Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-09 ]

[ DOI: 10.47176/ijae.14.2.11943 ]

## مقدمه

مناطق نیمه‌خشک ایران، به‌ویژه دامنه‌های زاگرس، با چالش‌های شدیدی از جمله تنش خشکی مواجه هستند که استقرار و بقای گونه‌های بومی چوبی مانند ارغوان (*C. siliquastrum* L.) را تهدید می‌کند (٤١). ارغوان با ایجاد پوشش گیاهی پایدار، نقش مؤثری در تثبیت خاک، کاهش فرسایش و بهبود ساختار خاک ایفا کرده و با افزایش ظرفیت نگهداری آب و ایجاد شرایط میکروکلیمایی مساعد، فشار تنش‌های محیطی بر سایر گونه‌های گیاهی در مناطق خشک و نیمه‌خشک را کاهش می‌دهد (١٣). با توجه به اهمیت اکولوژیکی و ارزش اقتصادی این گونه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مطالعه اثر ترکیبی قارچ مایکوریزا و نانولوله‌های کربنی و نقش آن‌ها در تقویت تحمل گیاه در برابر تنش خشکی بسیار ضروری است. تنش خشکی با اختلال در تعادل اسمزی و کاهش جذب عناصر غذایی، عملکردهای فیزیولوژیکی و ریخت‌شناسی گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (٢٣و ٣٢). ریشه، به‌عنوان نخستین اندامی که مستقیماً با کم‌آبی مواجه می‌شود، نقش کلیدی در جذب آب و مواد معدنی دارد و کارایی آن به‌طور مستقیم بر توان استقرار و بقا در شرایط کم‌آبی اثر می‌گذارد (٧ و٢٢). شاخص‌های ریشه‌ای همچون طول ریشه (Root length)، حجم ریشه (Root Volume)، تراکم بافت ریشه (Root Tissue Density)، حجم مخصوص ریشه (Special Root Mass) و تراکم حجم ریشه (Root Mass Density) معیارهای مهم توصیف‌کننده کارایی جذب آب و سازگاری ساختاری گیاهان با تنش‌های غیرزیستی هستند (٨ و ١٥). در نهال‌های چوبی، از جمله گونه‌های بومی زاگرس نظیر ارغوان، کاهش ظرفیت زراعی خاک (Field Capacity) منجر به کاهش این شاخص‌ها و کاهش قدرت استقرار می‌شود (٤١).

در سال‌های اخیر، استفاده از فناوری‌های زیستی–نانویی مانند قارچ‌های میکوریزی آربسکولار( Arbuscular Mycorrhizal Fungi) و نانولوله‌های کربنی چنددیواره به‌عنوان رویکردی مؤثر در تعدیل اثرات خشکی مطرح شده است (٣٠). قارچ‌های AMF مانند *Glomus mosseae* با گسترش شبکه‌ی هیف‌های خارجی در ریزوسفر، سطح مؤثر جذب آب و عناصر غذایی، به‌ویژه فسفر و پتاسیم، را افزایش می‌دهند و از این طریق توان سازگاری گیاه را در برابر کم‌آبی تقویت می‌کنند. این هم‌زیستی منجر به بهینه‌سازی فرآیندهای تغذیه‌ای و حفظ تعادل اسمزی شده و رشد و پایداری عملکرد گیاه را تثبیت می‌کند (٢٩). تحت تنش خشکی، تلقیح قارچ میکوریزا وزن خشک ریشه را در گونه ارغوان، (٤١) و نسبت ریشه به ساقه در آکاسیا (*Acacia gerrardii*)، (٣٥) در نهال‌های چوبی بهبود بخشیده است. همچنین مطالعات نشان داده‌اند که تلقیح نهال‌های *A. albida* و *cork oak* با *G. mosseae* موجب افزایش، حجم و وزن خشک ریشه و بهبود انتقال آب در سیستم ریشه می‌شود (٣١ و ٢١). علاوه بر اثرات فیزیولوژیکی، در نهال‌های درختی *Cunninghamia lanceolata* تلقیح با قارچ‌های میکوریز آربوسکولار منجر به تحریک تشکیل ریشه‌های جانبی، افزایش شاخه‌زایی ثانویه و افزایش تراکم ریشه شد که همگی به‌عنوان شاخص‌های کلیدی بهبود بهره‌وری آب در گیاهان چوبی شناخته می‌شوند (٣٦).

نانولوله‌های کربنی چنددیواره نیز با داشتن سطح ویژه‌ی بالا و پایداری شیمیایی، می‌توانند جذب آب و عناصر و تقسیم سلول‌های مریستمی را در ریشه بهبود بخشند. در غلظت‌های بهینه، نانولوله‌های کربنی چنددیواره باعث افزایش طول، سطح و حجم ریشه می‌شوند (٣٣، ٣٧ و ٤٢). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که کاربرد نانولوله‌های کربنی‌چنددیواره مسیرهای آبی و انتقال یون‌ها را فعال کرده و ضمن حفظ پتانسیل آبی، از کوچک شدن سلول‌ها جلوگیری می‌کند (٢٠ و ١٤). برخی مطالعات نیز اثر هم‌زمان AMF و نانولوله‌های کربنی‌چنددیواره را در افزایش تعداد ریشه‌های جانبی و حجم کل ریشه نشان داده‌اند که بیانگر هم‌افزایی زیستی- نانویی در تقویت سامانه ریشه–خاک است (١).

اگرچه اثرات مثبت قارچ‌های میکوریزی و نانولوله‌های کربنی به‌صورت جداگانه بر گیاهان مختلف اثبات شده است(٩ و ١٩)، اما شناخت پاسخ‌های گونه‌های جنگلی بومی به ترکیب همزمان



[ Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-09 ]

[ DOI: 10.47176/ijae.14.2.11943 ]

**جدول ۱. نتایج مربوط به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک گلدان‌ها**

| کربن آلی (C) (٪) | نیتروژن (N) (٪) | پتانسیم (K) ($mg.kg^{-1}$) | فسفر(P) ($mg.kg^{-1}$) | بافت خاک | اسیدیته (pH) | شوری (EC) ($dS.m^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱/۳ | ۰/۱۲ | ۳۲۰ | ۷/۲ | لومی – رسی | ۷/۲۲ | ۰/٤ |

این دو فناوری (زیستی و نانویی) در شرایط تنش شدید، یک خلأ پژوهشی محسوب می‌شود. این مطالعه برای نخستین بار پاسخ‌های ریشه‌ای نهال ارغوان به‌عنوان یک گونه کلیدی و در معرض تهدید در جنگل‌های زاگرس، را به کاربرد توأم قارچ *G. mosseae* و نانولوله‌های کربنی چنددیواره تحت سطوح مختلف خشکی بررسی کرده است. از آنجا که شکست در استقرار نهال‌های بومی یکی از چالش‌های اصلی طرح‌های احیای جنگل‌های زاگرس در شرایط کم‌آبی است، شناسایی راهکارهایی برای بهبود کارایی سیستم ریشه‌ای در مراحل اولیه رویش اهمیت ویژه‌ای دارد. در این راستا، استفاده تلفیقی از قارچ‌های میکوریزای آربسکولار و فناوری‌های نوین نانویی می‌تواند به‌عنوان رویکردی کم‌هزینه و پایدار برای افزایش بقا و استقرار نهال‌ها در اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک مطرح شود. به طور مشخص این تحقیق به دنبال پاسخ به فرضیه‌های زیر است: ۱) تنش خشکی باعث کاهش قابل توجه صفات مورفولوژیکی و ساختاری ریشه نهال‌های ارغوان می‌شود؛ ۲) تلقیح با قارچ *G. mosseae* عملکرد ریشه و شاخص‌های جذب آب را در شرایط تنش خشکی بهبود می‌بخشد؛ ۳) کاربرد نانولوله‌های کربنی‌چنددیواره و اثر ترکیبی آن با AMF موجب افزایش رشد، حجم و تراکم ریشه‌ها و تقویت مقاومت نهال‌ها در برابر خشکی می‌شود.

## مواد و روش‌ها

این پژوهش به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار برای هر ترکیب تیماری در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه ایلام از بهمن ۱٤۰۲ تا مهر ۱٤۰۳ اجرا شد. فاکتورهای آزمایش شامل سه سطح تنش خشکی (۲۰، ٦۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی)، دو سطح قارچ میکوریز آربسکولار *G. mosseae* (با و بدون تلقیح) و سه غلظت نانولوله‌های کربنی چنددیواره (۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) بودند، که در مجموع ٥٤ گلدان (۳ تکرار × ۱۸ تیمار) مورد بررسی قرار گرفتند (کیفیت خاک در جدول ۱ ارائه شده است).

### آماده‌سازی بذر و بستر کاشت

بذور گونه ارغوان از رویشگاه طبیعی ارغوان، واقع در تنگه ارغوان ایلام ("۲۰'۳۸ °٤٦ تا "۳۷'۳۸ °٤٦ طول شرقی و "٤۷'۲۸ °۳۳ تا "۲٤'۲۸ °۳۳ عرض شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۱۳٦۰ متر)، در اوایل آبان‌ماه جمع‌آوری شدند. حدود هشت پایه مادری سالم، متقارن و شاداب انتخاب و میوه‌های رسیده از تاج درختان برداشت گردید. پس از جداسازی غلاف‌ها، بذرها استخراج، شسته و تا زمان کشت در دمای ٤ درجه سانتیگراد نگهداری شدند. پیش از کاشت، بذرها یک دقیقه با قارچ‌کش کاربندازیوم (۲ گرم در ۱۰۰۰ میلی‌لیتر آب) ضدعفونی شدند و سپس سه بار با آب مقطر شسته شدند. پیش‌تیمار بذر ارغوان با روش رایج در نهالستان‌های مورد مطالعه برای این گونه به مدت ۷۲ ساعت در آب ولرم انجام شد.

### پرایمینگ بذر با نانولوله‌های‌کربنی

نانولوله‌های‌کربنی چنددیواره‌کربنی (Multi Walled Carbon NanoTubes, MWCNTs) با خلوص بالای ۹۵ درصد، قطر خارجی ۲۰ تا ۳۰ نانومتر و طول ۱ تا ۵ تا میکرومتر از شرکت «پیشگامان نانو مواد ایران» تهیه شد. برای آماده‌سازی محلول‌های تیمار، سوسپانسیون‌های آبی نانولوله‌ها در سه غلظت ۰ (شاهد)، ۵۰، ۱۰۰ و میلی‌گرم در لیتر آماده شد. به منظور پخش یکنواخت نانولوله‌های کربنی در آب و جلوگیری از تجمع ذرات،



[ Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-09 ]

[ DOI: 10.47176/ijae.14.2.11943 ]

هر سوسپانسیون با دستگاه آلتراسونیک در فرکانس ٤٠ کیلوهرتز و توان ١٠٠ وات به مدت ٣٠ دقیقه تیمار شد تا محلولی همگن حاصل گردد (١٦). در ادامه، بذرها در هر یک از سوسپانسیون‌های آماده‌شده (بر اساس گروه‌های غلظتی) قرار داده شدند و به مدت ٢٤ ساعت در دمای اتاق بر روی شیکر اوربیتال با سرعت ١٠٠ دور در دقیقه نگهداری شدند تا تماس کامل و یکنواخت بین سطح بذر و نانولوله‌ها برقرار شود. علاوه بر تیمار پرایمینگ بذر، پس از استقرار نهال‌ها در مرحله‌ی چندبرگی، محلول نانولوله‌های کربنی چنددیواره در همان غلظت‌های مورد آزمایش (٠، ٥٠ و ١٠٠ میلی‌گرم در لیتر) به‌صورت محلول‌پاشی برگی اعمال شد؛ به طوریکه هر گلدان حدود ١٠ میلی‌لیتر از محلول نانولوله‌های کربنی چنددیواره به کمک افشانه‌ی دستی با فشار یکنواخت اسپری گردید تا تمام سطح برگ‌ها به‌طور همسان مرطوب شود. عملیات محلول‌پاشی در ساعات اولیه‌ی صبح و بدون تابش مستقیم خورشید انجام گرفت تا جذب نانولوله‌ها از طریق روزنه‌های برگ به حداکثر برسد (٢ و ٤٠).

### تهیه بستر و تلقیح قارچ

بستر کاشت از ترکیب حجمی ٢ واحد خاک + ١ واحد ماسه‌بادی + ١ واحد کود دامی پوسیده تهیه شد (خاک بستر کاشت از منطقه جنگلی مجاور گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه ایلام تهیه شد). به‌منظور حفظ شرایط نزدیک به محیط طبیعی رشد نهال‌های جنگلی، خاک مورد استفاده به‌طور کامل استریل نشد و کلیه تیمارها از خاک با منبع یکنواخت استفاده کردند؛ وزن کل بستر در هر گلدان١/٨ کیلوگرم بود. قارچ به میزان ٧٠ گرم برای هر گلدان (معادل٣/٨٩ ٪ وزن کل بستر) با خاک گلدان مخلوط گردید. قارچ *G. mosseae* از شرکت زیست‌فناور توران (شاهرود) تهیه شد؛ مایه تلقیح شامل خاک استریل، ریشه، هیف و اسپور با تراکم حداقل ٧٠ اسپور در هر گرم خاک بود. برای هر گلدان تلقیحی در زمان کاشت بذر، ٧٠ گرم مایه قارچ اندومیکوریز *G. mosseae* در ناحیه ریزوسفر مخلوط گردید. در تیمار شاهد، همین مقدار بستر استریل جایگزین شد (٣٤). بذرهای ارغوان پس از تیمارهای اولیه و کاشت در گلدان‌های پلاستیکی ٢ کیلوگرمی، در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه ایلام تحت شرایط دمای روز ( ٥ ± ٢٥درجه سانتیگراد) و رطوبت نسبی (١٠ ± ٣٥درصد) نگهداری شدند تا جوانه‌زنی و استقرار اولیه نهال‌ها کامل شود. پس از مشاهده رشد یکنواخت و تشکیل برگ‌های نخستین (مرحله ٤ تا ٦ برگی)، گلدان‌ها به فضای آزاد مجاور گلخانه (منطقه آزمایش بیرونی) منتقل گردیدند تا نهال‌ها در شرایط طبیعی قرار گیرند و سازگاری تدریجی با تغییرات دما و رطوبت محیط خارج حاصل شود. مراقبت‌ها از نظر آبیاری، کنترل آفات، و برخورد با بارندگی احتمالی تا پایان دوره تیمارها ادامه یافت.

### اعمال تنش‌خشکی

به‌منظور ایجاد تنش‌خشکی، پس از استقرار نهال‌ها، گلدان‌ها در سه سطح رطوبتی معادل ١٠٠، ٦٠ و ٢٠ درصد از ظرفیت زراعی خاک نگهداری شدند. ظرفیت زراعی (FC) به روش وزنی تعیین و گلدان‌ها به‌طور روزانه توزین و آب موردنیاز برای حفظ رطوبت در سطوح تعیین‌شده افزوده گردید. نمونه‌برداری و اندازه‌گیری‌ها ٩٠ روز پس از آغاز اعمال تیمار خشکی انجام شد.

### اندازه‌گیری صفات ریشه‌ای

پس از اتمام تنش، نهال‌های ارغوان از خاک خارج و ریشه‌ها با جریان آب ملایم شسته شدند. وزن تر ریشه ها توسط ترازوی دیجیتال با دقت یک‌هزارم وزن گردید. پس از اندازه‌گیری پارامترهای مربوط به ریشه، ریشه‌های مورد آزمایش در داخل دستگاه آون در دمای ٧٠ درجه سانتی‌گراد به مدت ٤٨ ساعت گذاشته، سپس توسط ترازوی دیجیتال با دقت یک هزارم گرم وزن شدند. طول ریشه‌ها پس از قرار دادن آنها در آب جهت شناور شدن توسط خط‌کش اندازه‌گیری شدند. قطر ریشه اصلی با کولیس اندازه‌گیری شد. سایر صفات ریشه با استفاده از معادلات ارائه‌شده در جدول ٢ محاسبه گردید.



[ Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-09 ]

[ DOI: 10.47176/ijae.14.2.11943 ]

**جدول۲. معادلات محاسبه صفات ریشه‌ای**

| منابع | شرح نمادها | فرمول | معادله |
|---|---|---|---|
| | A حجم ریشه، B حجم آب و ریشه، C حجم آب خالص | (A = B - C) | حجم ریشه |
| (۱۱) | SRMحجم مخصوص ریشه، DRW وزن خشک ریشه، SV حجم خاک | $SRM = \frac{DRW}{SV}$ | حجم مخصوص ریشه |
| (۲٤) | RTD تراکم بافت ریشه،DRW وزن خشک ریشه،RV حجم ریشه | RTD = DRW × RV | تراکم بافت ریشه |
| (۱۰) | RMD تراکم حجم ریشه، FRW وزن تر ریشه، SV حجم خاک | $RMD = \frac{FRW}{SV}$ | تراکم حجم ریشه |
| (۱۱و ۱۸) | RWC محتوی آب نسبی ریشه، FRW وزن تر ریشه، DRW وزن خشک ریشه | $RWC = \frac{FRW - DRW}{DRW}$ | محتوی آب نسبی ریشه |

پیش از انجام تحلیل واریانس، داده‌ها از نظر نرمال بودن با استفاده از آزمون شاپیرو–ویلک و همگنی واریانس‌ها با آزمون بارتلت مورد بررسی قرار گرفتند. سپس با استفاده از تحلیل واریانس سه‌طرفه (Three-way ANOVA) متناسب با طرح فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و با بهره‌گیری از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲٦ تحلیل شدند. در مواردی که اثر تیمارها معنی‌دار بود، مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. ترسیم نمودارهای ستونی با نرم‌افزار Excel 2016 انجام گرفت و نمودارهای مقایسه میانگین‌ها، صرف‌نظر از معنی‌داری یا عدم معنی‌داری اثرات آماری، به‌منظور نمایش الگوی کلی پاسخ تیمارهای ترکیبی ارائه شدند.

## نتایج

نتایج تحلیل واریانس نشان‌دهنده تأثیر معنی‌دار تنش‌خشکی (۱۰۰٪ ظرفیت زراعی، ۵۰٪ ظرفیت زراعی و ۲۰٪ ظرفیت زراعی)، تلقیح قارچ میکوریزای آربوسکولار*G. mosseae* (بدون تلقیح و تلقیح‌شده) و کاربرد نانولوله‌های‌کربنی چنددیواره در سه سطح غلظت (کنترل، ۵۰ میلی‌گرم در لیتر و ۱۰۰میلی‌گرم در لیتر، اعمال‌شده از طریق آبیاری خاکی) بر صفات ریشه‌ای نهال ارغوان در سطح احتمال P <۰/۰۱ است. این صفات شامل طول ریشه (RL)، وزن‌تر ریشه (Fresh Root weight)، وزن خشک ریشه (Dry root weight)، حجم ریشه (RV)، حجم مخصوص ریشه (SRM)، تراکم بافت ریشه (RTD) و تراکم حجم ریشه (RMD) می‌باشند. اثرات مستقل تنش خشکی، قارچ میکوریزی و نانولوله‌های کربنی، همچنین برهم‌کنش‌های آن‌ها، بر محتوای آب ریشه (Relative Water Content) از لحاظ آماری غیرمعنی‌دار ($p$>۰/۰۵) بود. اثرات متقابل دوطرفه و سه‌تایی عمدتاً غیرمعنی‌دار بودند ($p$ >۰/۰۵)، به جز اینکه اثر متقابل تنش‌خشکی × قارچ گلوموس‌موسه بر قطر ریشه (RD) و تراکم بافت ریشه (RTD) ($p$<۰/۰۱)، و اثرات متقابل سه‌تایی تنش‌خشکی× قارچ گلوموس‌موسه × نانولوله‌های‌کربنی چنددیواره بر تراکم بافت ریشه (RTD) ($p$ <۰/۰۱) معنی‌دار بود. جدول شماره ۳ خلاصه نتایج تحلیل واریانس را برای تمام صفات ارائه می‌دهد.

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تنش خشکی موجب کاهش معنی‌دار قطر ریشه (RD)، نهال‌های ارغوان شد ($p$<۰/۰۱). بیشترین مقدار قطر ریشه در شرایط بدون تنش (۱۰۰٪ ظرفیت زراعی) مشاهده گردید، در حالی‌که با افزایش شدت تنش به ٦۰٪ و ۲۰٪ ظرفیت زراعی، قطر ریشه به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. تلقیح نهال‌ها با قارچ میکوریزای آربوسکولار *G. mosseae* اثر افزایشی معنی‌داری بر قطر ریشه در تمام سطوح تنش داشت. همچنین، کاربرد نانولوله‌های کربنی



[ Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-09 ]

[ DOI: 10.47176/ijae.14.2.11943 ]

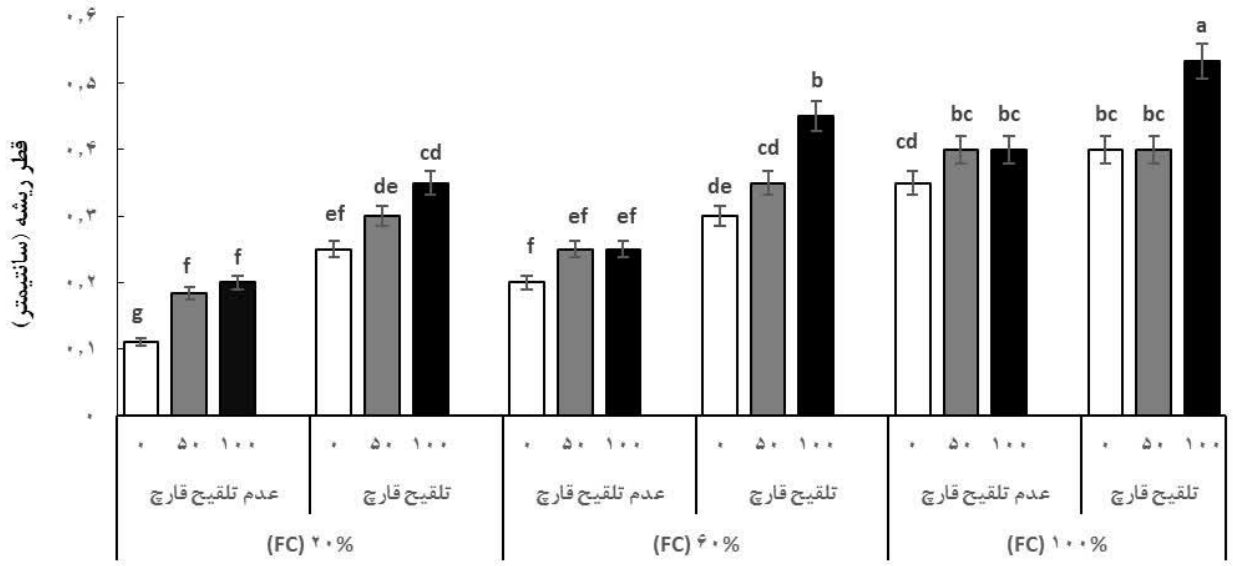
جدول ۳. تحلیل واریانس اثرات تنش خشکی، قارچ *G. Mosseae* و نانولوله‌های کربنی بر صفات ریشه‌ای در نهال ارغوان

| | میانگین مربعات | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| منابع تغییرات | محتوای آب ریشه(RWC) | قطر ریشه (RD)(میلیمتر) | طول ریشه (RL) (سانتیمتر) | وزن تر ریشه (FRW) (گرم) | وزن خشک ریشه (DRW) (گرم) | حجم ریشه (RV) (سانتیمتر مکعب) | حجم مخصوص ریشه (SRM) (گرم بر سانتیمتر مکعب) | تراکم بافت ریشه (RTD) (گرم بر سانتیمتر مکعب) | تراکم حجم ریشه (RMD) (گرم بر سانتیمتر مکعب) |
| تنش خشکی | ۱/۷۲ns | ۰/۱۵ ** | ۱۳۵۶/۹٤ ** | ٦۳۲/٤۰ ** | ٤۵/۰۳ ** | ٤٦٦/۱٦ ** | ۱۳/۹۰ ** | ۲۲۱۱۲/۱۸ ** | ۱۹۵/۱۸ ** |
| قارچ | ۰/۰۰۱ns | ۰/۱٦ ** | ۳٦۰/۳۷ ** | ۲۲٦/٤۱ ** | ۱۳/۳۹ ** | ۱۷٦/۰٤ ** | ٤/۱۳ ** | ۷٦۷۰/۹۱ ** | ٦۹/۸۸ ** |
| نانو لوله کربنی | ۰/۲۲ns | ۰/۰٤ ** | ۲۰۸/۵۳ ** | ۵٤/۳٦ ** | ٤/۰٦ ** | ۲۱/۷۹ ** | ۱/۲۵ ** | ۲۳۷۹/۱۳ ** | ۱٦/۷۷ ** |
| تنش خشکی × قارچ | ۱/۰۸ns | ۰/۰۰۸ ** | ٤۸/۰۱ ns | ۳۲/۰۰ ns | ۲/۱۸ ns | ۲۲/۱٦ ns | ۰/۳۷ ns | ۳٤۹۷/۸۵ ** | ۹/۸۷ ns |
| تنش خشکی × نانو لوله کربنی | ۰/٤۰ns | ۰/۰۰۱ ns | ٤۰/۵۳ ns | ۲۲/۲۵ ns | ۰/۹۵ ns | ۵/۳۵ ns | ۰/۲۹ ns | ۱۱۱۰/٦۹ ns | ٦/۸۷ ns |
| قارچ × نانو لوله کربنی | ۰/۱۳ns | ۰/۰۰۹ ns | ۱۰/۵۱ ns | ۳۰/۹٦ ns | ۱/۱۹ ns | ۳/۲۹ ns | ۰/۳۷ ns | ۹۸۹/۹۸ ns | ۹/۵۵ ns |
| تنش خشکی× قارچ × نانو لوله کربنی | ۱/۱۲ns | ۰/۰۰۱ ns | ۹/۸۸ ns | ۱٤/۹۳ ns | ۱/۳۰ ns | ٤/٤۷ ns | ۰/٤۰ ns | ۱۲۷۱/٦۱ ** | ٤/٦۱ ns |
| خطا | ۳/۲۷ | ۰/۰۰۱ | ٤٤/۷۷ | ۱۰/۲۹ | ۰/۹۵ | ۱۳/٦۵ | ۰/۲۹ | ٤٤۵/۷۷ | ۳/۱۷ |

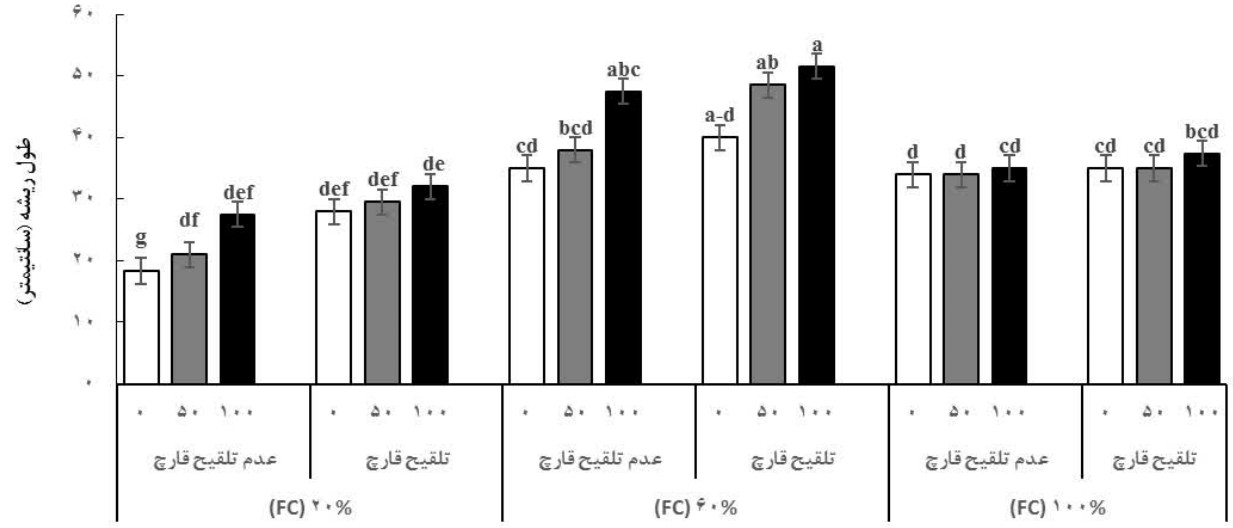
ns و ** به ترتیب نشان دهنده عدم معناداری و معناداری در سطح ۱٪ می باشد.



[ DOI: 10.47176/ijae.14.2.11943 ]
[ Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-09 ]




**شکل۱. مقایسه میانگین تیمارهای اثرات تنش‌خشکی، قارچ*G. mosseae* و نانولوله‌های کربنی چند دیواره بر قطر ریشه در نهال ارغوان . میانگین هایی که در هر ستون دارای حرف مشترک می‌باشند، بر مبنای آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح خطای پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند**




**شکل۲. مقایسه میانگین تیمارهای اثرات تنش‌خشکی، قارچ*G. mosseae* و نانولوله‌های کربنی چند دیواره بر طول ریشه در نهال ارغوان. میانگین هایی که در هر ستون دارای حرف مشترک می‌باشند، بر مبنای آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح خطای پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.**

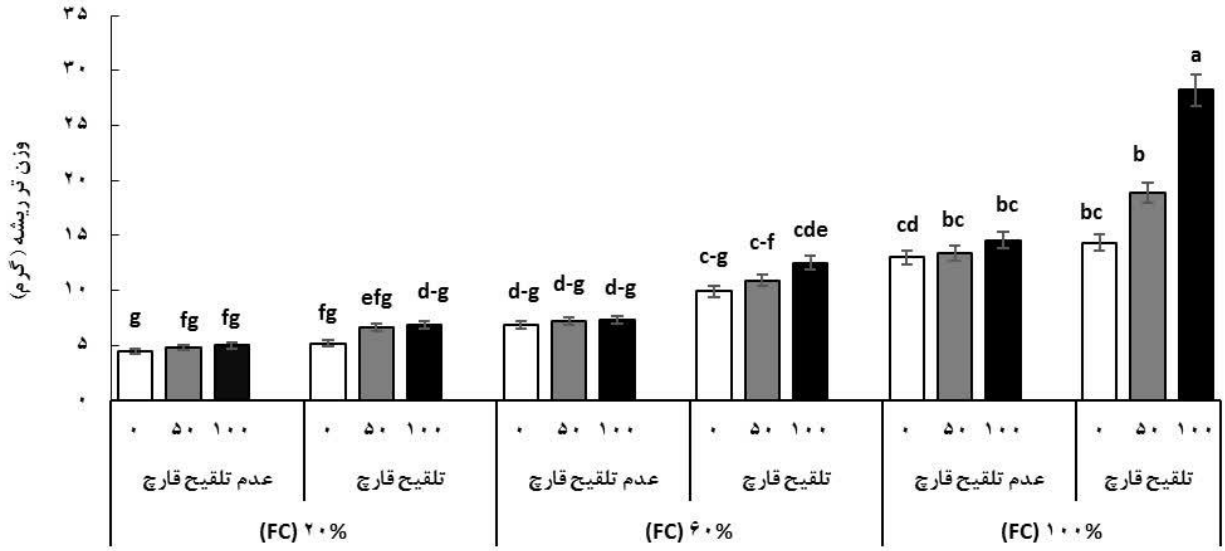
چنددیواره اثر مثبت و وابسته به غلظت نشان داد، به‌طوری‌که غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر بیشترین افزایش قطر ریشه را نسبت به تیمار شاهد ایجاد کرد (شکل ۱).

همان‌طور که در نتایج شکل ۲ مشاهده می‌شود، تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار طول ریشه (RL) شد ($p$<۰/۰۱)، به‌گونه‌ای



[ Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-09 ]

[ DOI: 10.47176/ijae.14.2.11943 ]




**شکل۳. مقایسه میانگین تیمارهای اثرات تنش‌خشکی، قارچ*G. mosseae* و نانولوله‌های کربنی چند دیواره بر وزن تر ریشه در نهال ارغوان. میانگین هایی که در هر ستون دارای حرف مشترک می‌باشند، بر مبنای آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح خطای پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.**

که کمترین مقدار طول ریشه در شرایط تنش شدید (۲۰٪ ظرفیت زراعی) ثبت گردید. در مقابل، تلقیح با قارچ *G .mosseae* موجب افزایش معنی‌دار طول ریشه نسبت به تیمارهای بدون تلقیح شد. کاربرد نانولوله‌های کربنی چنددیواره نیز تأثیر افزایشی مشخصی بر طول ریشه داشت، به‌طوری‌که غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر بیشترین مقدار طول ریشه را در اغلب سطوح تنش ایجاد کرد، در حالی که غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر اثر افزایشی ملایم‌تری نشان داد.

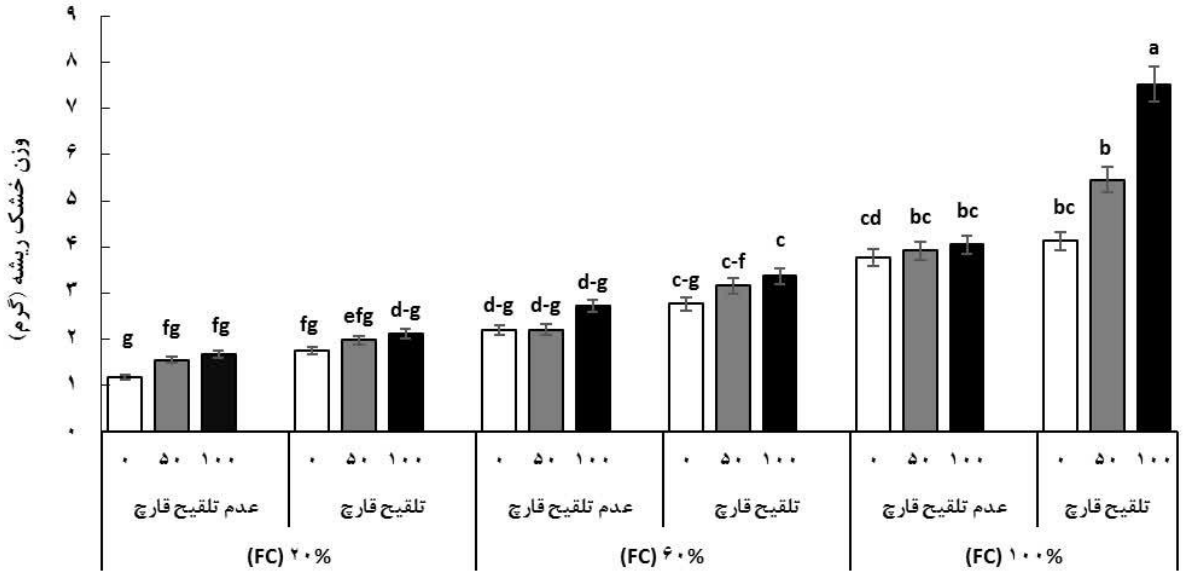
وزن تر ریشه (FRW) به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تنش خشکی کاهش یافت ($p<$۰/۰۱). بیشترین مقدار وزن تر ریشه در تیمار شاهد و کمترین مقدار آن در شرایط تنش شدید مشاهده شد. تلقیح میکوریزی سبب افزایش معنی‌دار وزن تر ریشه در مقایسه با تیمارهای غیرتلقیح‌شده گردید. همچنین، تیمار نانولوله‌های کربنی چنددیواره، به‌ویژه در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، موجب بهبود معنی‌دار وزن تر ریشه شد و توانست بخشی از اثرات منفی تنش خشکی را جبران کند (شکل ۳).

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که وزن خشک ریشه (DRW) به‌شدت تحت تأثیر تنش خشکی قرار گرفت و با افزایش شدت تنش، کاهش معنی‌داری یافت ($p<$۰/۰۱). در مقابل، تلقیح با قارچ *G. mosseae* باعث افزایش معنی‌دار وزن خشک ریشه در تمامی تیمارهای آبیاری شد. کاربرد نانولوله‌های کربنی نیز اثر افزایشی مشخصی بر وزن خشک ریشه داشت، به‌طوری‌که تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر بالاترین مقادیر وزن خشک ریشه را نسبت به سایر سطوح نشان داد (شکل ٤).

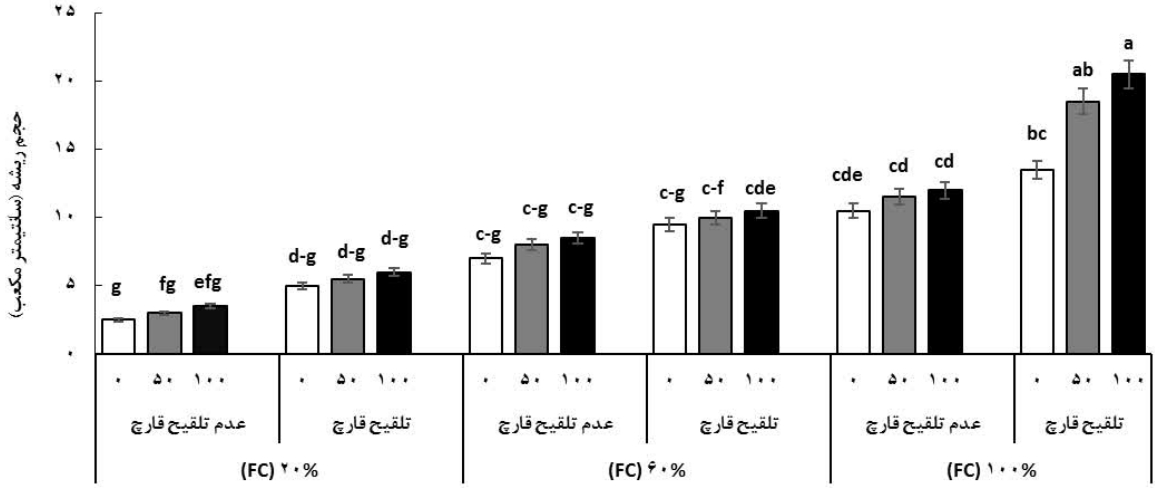
تنش خشکی موجب کاهش معنی‌دار حجم ریشه (RV) نهال‌ها شد ($p<$۰/۰۱)، به‌گونه‌ای که کمترین مقدار حجم ریشه در شرایط تنش شدید ثبت گردید. تلقیح میکوریزی اثر مثبتی بر افزایش حجم ریشه داشت و در اغلب سطوح تنش مقادیر بالاتری نسبت به تیمارهای بدون قارچ مشاهده شد. علاوه بر این، نانولوله‌های کربنی چنددیواره اثر افزایشی وابسته به دوز بر حجم ریشه نشان دادند و غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر بیشترین مقدار حجم ریشه را ایجاد کرد (شکل ۵).



[ Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-09 ]
[ DOI: 10.47176/ijae.14.2.11943 ]




شکل ٤. مقایسه **میانگین تیمارهای اثرات تنش‌خشکی، قارچ*G. mosseae* و نانولوله‌های کربنی چند دیواره بر وزن خشک ریشه در نهال ارغوان. میانگین هایی که در هر ستون دارای حرف مشترک می‌باشند، بر مبنای آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح خطای پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند**



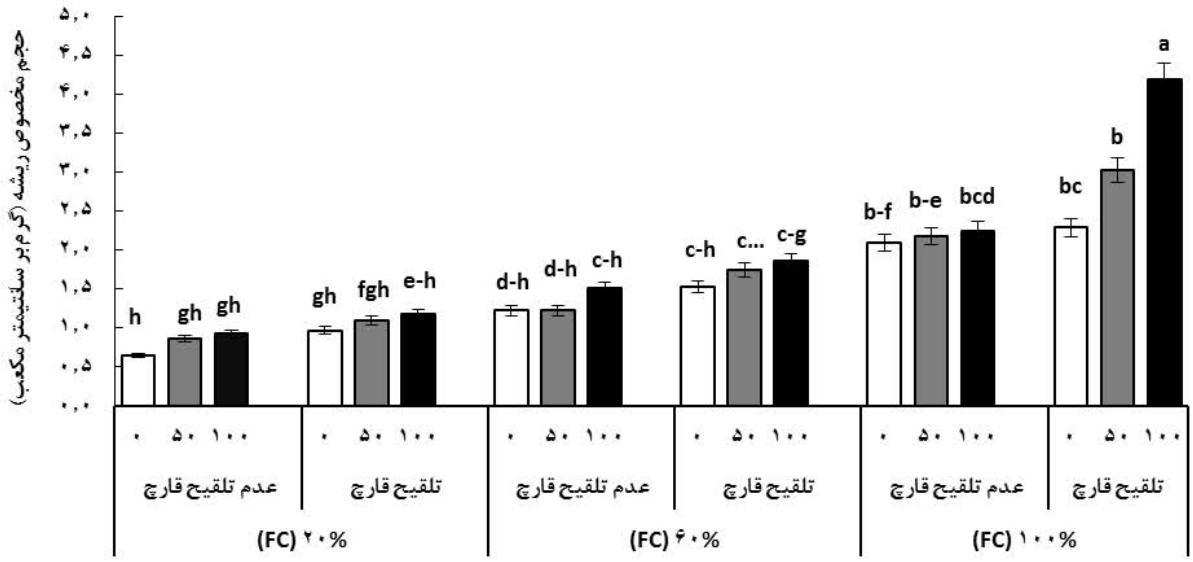

**شکل۵. مقایسه میانگین تیمارهای اثرات تنش‌خشکی، قارچ*G. mosseae* و نانولوله‌های کربنی چند دیواره بر حجم ریشه در نهال ارغوان. میانگین هایی که در هر ستون دارای حرف مشترک می‌باشند، بر مبنای آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح خطای پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند**

بر اساس نتایج شکل ٦، حجم مخصوص ریشه (SRM) تحت تأثیر تنش خشکی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت ($p$<۰/۰۱)، تلقیح قارچ *G. mosseae* منجر به افزایش معنی‌دار حجم مخصوص ریشه در مقایسه با تیمارهای بدون تلقیح گردید. کاربرد نانولوله‌های کربنی نیز باعث افزایش حجم مخصوص ریشه شد و بالاترین مقدار این صفت در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم



[ Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-09 ]

[ DOI: 10.47176/ijae.14.2.11943 ]




**شکل٦. مقایسه میانگین تیمارهای اثرات تنش‌خشکی، قارچ*G. mosseae* و نانولوله‌های کربنی چند دیواره بر حجم مخصوص ریشه در نهال ارغوان. میانگین هایی که در هر ستون دارای حرف مشترک می‌باشند، بر مبنای آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح خطای پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.**

در لیتر مشاهده شد، در حالی‌که تیمار شاهد کمترین مقدار را نشان داد.

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تنش خشکی موجب کاهش معنی‌دار تراکم حجم ریشه (RMD) شد ($p<$۰/۰۱). تلقیح با قارچ میکوریزا باعث افزایش معنی‌دار این صفت گردید، که نشان‌دهنده بهبود توسعه ریشه در شرایط تلقیح‌شده است. کاربرد نانولوله‌های کربنی چنددیواره نیز تأثیر مثبتی بر تراکم حجم ریشه داشت و غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر بیشترین مقدار تراکم حجم ریشه را ایجاد کرد (شکل ۷).

تراکم بافت ریشه (RTD) به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تنش خشکی قرار گرفت و با افزایش شدت تنش کاهش یافت($p<$۰/۰۱). تلقیح میکوریزی اثر افزایشی معنی‌داری بر تراکم بافت ریشه داشت و این افزایش در حضور نانولوله‌های کربنی تشدید شد. نتایج نشان داد که برهم‌کنش سه‌تایی تنش خشکی × قارچ × نانولوله‌های کربنی چنددیواره برای این صفت معنی‌دار است ($p<$۰/۰۱)، به‌طوری‌که بیشترین مقدار تراکم بافت ریشه در تیمار همزمان تلقیح قارچی و کاربرد نانولوله‌های کربنی در شرایط بدون تنش مشاهده شد.

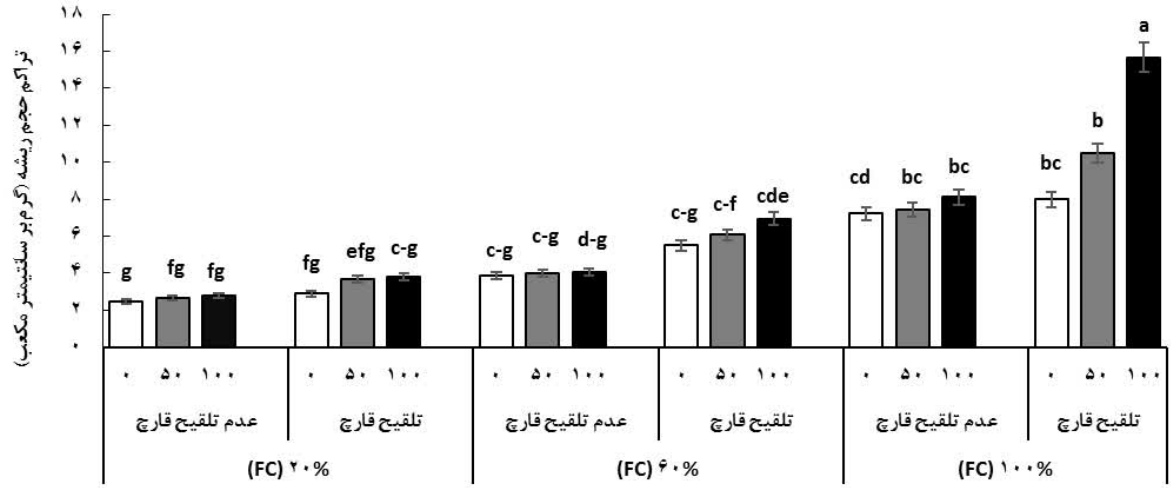
به‌طور کلی، نتایج شکل‌های ۱ تا ۸ نشان داد که تنش خشکی رشد و توسعه ریشه را محدود می‌کند، در حالی‌که تلقیح با قارچ *G. mosseae* و کاربرد نانولوله‌های کربنی چنددیواره، به‌ویژه در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، توانستند اثرات منفی تنش خشکی را به‌طور معنی‌داری تعدیل کنند.

## بحث

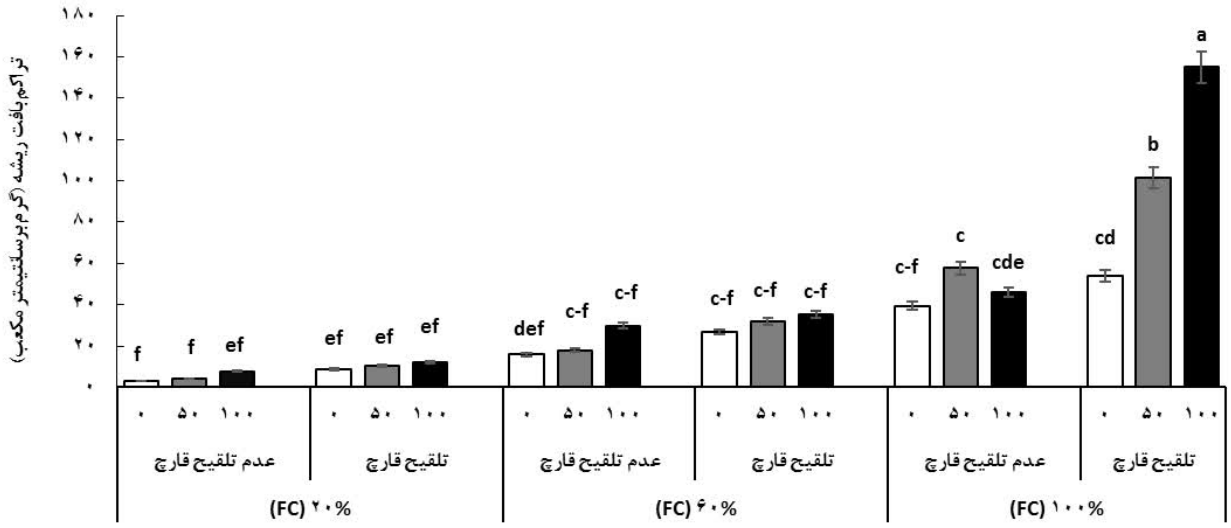
نتایج این پژوهش نشان داد که تنش خشکی تأثیر منفی و معنی‌داری بر تمامی صفات مورفولوژیکی و ساختاری ریشه نهال ارغوان دارد، به‌طوری‌که با کاهش رطوبت خاک از ۱۰۰٪ به ۲۰٪ ظرفیت زراعی، طول، قطر، حجم و وزن تر و خشک ریشه به‌طور چشمگیری کاهش یافت. بیشترین شدت اثر تنش در سطح ۲۰٪ ظرفیت زراعی مشاهده شد، جایی که کاهش بیش از ۷۰٪ در حجم ریشه و بیش از ٦۰٪ در زیست‌توده ریشه ثبت گردید. این کاهش شدید نشان‌دهنده حساسیت بالای ریشه ارغوان به



[ Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-09 ]
[ DOI: 10.47176/ijae.14.2.11943 ]




**شکل۷. مقایسه میانگین تیمارهای اثرات تنش‌خشکی، قارچ*G. mosseae* و نانولوله‌های کربنی چند دیواره بر تراکم حجم ریشه در نهال ارغوان. میانگین هایی که در هر ستون دارای حرف مشترک می‌باشند، بر مبنای آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح خطای پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.**




**شکل۸. مقایسه میانگین تیمارهای اثرات تنش‌خشکی، قارچ*G. mosseae* و نانولوله‌های کربنی چند دیواره بر تراکم بافت ریشه در نهال ارغوان. میانگین هایی که در هر ستون دارای حرف مشترک می‌باشند، بر مبنای آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح خطای پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.**

محدودیت رطوبتی و اختلال در فرآیندهای رشد و توسعه سلولی ریشه است. کاهش رشد ریشه در شرایط خشکی به‌طور گسترده در گونه‌های چوبی و گیاهان مناطق نیمه‌خشک گزارش شده است و عمدتاً به محدود شدن فشار تورژسانس، کاهش تقسیم و طویل‌شدن سلولی و افت تخصیص کربن به اندام‌های زیرزمینی نسبت داده می‌شود (٤ و ٦). کاهش شدید حجم ریشه (RV) و وزن خشک ریشه (DRW) در شرایط تنش شدید، بیانگر محدود شدن توسعه فضایی ریشه و کاهش زیست‌توده‌ای گیاه در اندام‌های زیرزمینی است؛ وضعیتی که به‌طور مستقیم توان جذب آب و پایداری نهال در مراحل اولیه استقرار را کاهش می‌دهد. در اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک، چنین کاهش‌هایی یکی از



[ Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-09 ]
[ DOI: 10.47176/ijae.14.2.11943 ]

عوامل اصلی افزایش تلفات نهال پس از کاشت محسوب می‌شود (۲۳).

زاهدی و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که در نهال‌های درختی، تنش خشکی منجر به کاهش قابل توجه قطر، حجم و زیست‌توده ریشه شده و این پاسخ به‌عنوان راهبردی حفاظتی برای کاهش مصرف آب و حفظ بقا تفسیر می‌شود. نتایج حاضر نیز با این یافته‌ها هم‌خوانی داشته و نشان می‌دهد که ارغوان همچون بسیاری از گونه‌های چوبی، رشد ریشه را در پاسخ به تنش کم‌آبی محدود می‌کند.

تلقیح قارچ *G. mosseae* اثر مثبت و معنی‌داری بر تمامی صفات ریشه‌ای نشان داد و توانست اثرات منفی تنش خشکی را به‌طور مؤثری تعدیل کند. افزایش طول، حجم و زیست‌توده ریشه در گیاهان تلقیح‌شده، حتی در شرایط کم‌آبی شدید، مؤید بهبود توان جذب آب و مواد غذایی در ریشه است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که میکوریزهای آربوسکولار از طریق افزایش سطح جذب مؤثر، توسعه شبکه هیفی خارج‌ریشه‌ای و بهبود تغذیه فسفری، تحمل گیاه به خشکی را افزایش می‌دهند (۳ و ۳٤). افزایش طول ریشه (RL) در نهال‌های تلقیح‌شده نشان می‌دهد که همزیستی میکوریزی می‌تواند راهبرد جستجوی آب در عمق و افق‌های مختلف خاک را تقویت کند؛ ویژگی‌ای که در خاک‌های کم‌عمق و ناهمگون مناطق زاگرسی یک مزیت اکولوژیکی مهم برای استقرار نهال محسوب می‌شود (٤). مطابق گزارش راپارینی و پنوئلاس (۲۰۱۳)، همزیستی میکوریزی همچنین سبب تنظیم بهتر وضعیت آبی و حفظ رشد ریشه تحت شرایط تنش می‌شود. نتایج این تحقیق نیز تأیید می‌کند که *G. mosseae* می‌تواند نقش کلیدی در بهبود رشد و پایداری ریشه ارغوان در شرایط خشکی ایفا کند. نتایج حاضر با یافته‌های گزارش‌شده در درختان چوبی مانند *Paulownia elongata* همخوانی دارد، که قارچ‌های آربوسکولار وزن خشک ریشه را ۳۰–۵۰٪ تحت تنش‌خشکی افزایش می‌دهند، این افزایش عمدتاً از طریق بهبود کارایی هیدرولیکی ریشه (مانند افزایش هدایت هیدرولیکی تا ۲۰٪) و کاهش استرس اکسیداتیو (۳) صورت می‌گیرد.

کاربرد نانولوله‌های کربنی چنددیواره، به‌ویژه در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، موجب بهبود معنی‌دار رشد و ساختار ریشه شد. این پاسخ وابسته به غلظت نشان می‌دهد که نانولوله‌های کربنی در دوزهای بهینه می‌توانند به‌عنوان محرک رشد ریشه عمل کنند. این بهبودها می‌تواند ناشی از تحریک رشد ثانویه از طریق تنظیم مسیر انتقال اکسین باشد؛ به‌طوری‌که در گونه *Arabidopsis thaliana* گزارش شده است نانولوله‌های کربنی با تسهیل جابه‌جایی اکسین، موجب افزایش رشد رویشی و تمایز آوندی می‌شوند (۳۸). افزایش حجم و وزن خشک ریشه در تیمارهای حاوی نانولوله‌های کربنی بیانگر افزایش ظرفیت جذب آب و عناصر غذایی و بهبود تشکیل بافت‌های ریشه‌ای فعال است؛ عواملی که می‌توانند تحمل نهال به خشکی و شوک انتقال از نهالستان به عرصه طبیعی را افزایش دهند. همچنین مطالعات انجام‌شده روی گیاهان زراعی نظیر ذرت (*Zea mays*)، گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) و تنباکو (*Tobacco*) نشان داده‌اند که نانولوله‌های کربنی با افزایش نفوذپذیری دیواره سلولی، القای بیان ژن‌های مرتبط با تقسیم سلولی و انتقال آب، و بهبود جذب آب و عناصر غذایی، رشد گیاه را به‌طور معنی‌داری ارتقا می‌دهند(۱٦و ۱۷). افزون بر این، بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک در حضور نانولوله‌های کربنی گزارش شده است که می‌تواند به‌ویژه در نهال‌های چوبی، از جمله ارغوان، نقش مهمی در تقویت استقرار و رشد اولیه داشته باشد (۱۲). همچنین ریکو و همکاران (۲۰۱۱) بیان کردند که نانومواد کربنی در غلظت‌های کنترل‌شده می‌توانند جذب آب و عناصر غذایی در *A. thaliana* تقویت کرده و در نتیجه باعث افزایش رشد ریشه تحت شرایط تنش شوند. یافته‌های حاضر با این گزارش‌ها هم‌راستا بوده و کارایی MWCNTs را در بهبود تحمل به خشکی تأیید می‌کند. این نتایج با مطالعات مروری پیشین همخوانی دارد که نشان می‌دهند نانولوله‌های کربنی در غلظت‌های پایین تا متوسط (کمتر از ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر) به‌عنوان محرک رشد و عامل کاهش‌دهنده تنش اکسیداتیو عمل می‌کنند، در حالی‌که در غلظت‌های بالاتر می‌توانند اثرات سمی بر رشد گیاه اعمال کنند



[ Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-09 ]

[ DOI: 10.47176/ijae.14.2.11943 ]

(۳۸). اگرچه در برخی مطالعات، سمیت نانولوله‌های کربنی در غلظت‌های بالا گزارش شده است، اما در پژوهش حاضر بیشترین اثر مثبت در غلظت $100\ mg\ L^{-1}$ مشاهده شد که همچنان در بازه غلظت‌های پایین تا متوسط و کمتر از آستانه‌های سمی گزارش‌شده قرار دارد. به نظر می‌رسد پاسخ گیاه به نانولوله‌های کربنی به‌شدت وابسته به گونه گیاهی، شرایط تنشی و برهم‌کنش با عوامل زیستی نظیر قارچ‌های مایکوریزایی باشد؛ به‌گونه‌ای که تلقیح با *G. mosseae* می‌تواند اثرات بالقوه منفی نانومواد را تعدیل و نقش آن‌ها را به‌عنوان محرک رشد در شرایط تنش خشکی تقویت کند.

معنی‌دار بودن برهم‌کنش تنش خشکی × قارچ و برهم‌کنش سه‌تایی تنش × قارچ × نانولوله‌های کربنی بر تراکم بافت ریشه حاکی از وجود هم‌افزایی بین سازوکارهای زیستی و فناورانه است. افزایش تراکم بافت ریشه در تیمارهای توأم، حتی تحت تنش شدید، می‌تواند بیانگر تشکیل ساختارهای ریشه‌ای متراکم‌تر و مقاوم‌تر باشد. افزایش تراکم بافت ریشه (RTD) در تیمارهای توأم، حتی در شرایط تنش شدید، نشان‌دهنده تشکیل ساختارهای ریشه‌ای متراکم‌تر و مقاوم‌تر است که می‌توانند پایداری هیدرولیکی ریشه را حفظ کرده و حساسیت نهال به نوسانات شدید رطوبتی را کاهش دهند (۲٤). نتایج پورسل و رویز لوزانو (۲۰۰٤) در گیاه *Glycine max* و همچنین مطالعه‌ی وانگ و همکاران (۲۰۱۸) روی درختان زیتون (*Olea europaea*)، نشان داده‌اند که میکوریزای *G. mosseae* با ارتقای هدایت هیدرولیکی ریشه و افزایش بیان ژن‌های وابسته به آکواپورین ها، موجب بهبود استفاده از آب و مقاومت گیاه در برابر خشکی‌های شدید می‌شود. در ترکیب با نانومواد کربنی، این اثرات به شکل قابل توجهی تشدید شده و زمینه‌ی توسعه‌ی هم‌زیستی‌های هوشمند برای مدیریت تنش‌های آبی در گونه‌های زینتی و جنگلی را فراهم می‌سازد. معنی‌دار نبودن سایر برهم‌کنش‌ها (مانند تنش × نانولوله‌های کربنی) ممکن است به دلیل غلبه اثرات اصلی باشد، اما یافته‌ها بر پتانسیل کاربردی قابل توجه ترکیب قارچ *G. mosseae* و نانولوله‌های‌کربنی در بهبود سازگاری گیاهان تحت تنش‌خشکی تأکید دارند؛ به‌طوری‌که این برهم‌کنش می‌تواند هم‌زمان توان جذب آب، هدایت هیدرولیکی ریشه و کارایی فیزیولوژیکی گیاه را ارتقا دهد (۲٦). در مجموع، تنش خشکی باعث کاهش شدید رشد و کیفیت ساختار ریشه نهال ارغوان شد، اما تلقیح میکوریزی و کاربرد نانولوله‌های کربنی چنددیواره توانست این اثرات منفی را به‌طور چشمگیری تعدیل کند. هم‌افزایی این دو عامل، به‌ویژه در بهبود تراکم بافت ریشه، نشان‌دهنده پتانسیل بالای آن‌ها برای افزایش استقرار و بقاء نهال‌های ارغوان در مناطق خشک و نیمه‌خشک است.

## نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که ریشه نهال ارغوان نسبت به کاهش رطوبت خاک واکنش‌های ساختاری و کارکردی مشخصی از خود نشان می‌دهد که می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در استقرار و بقای این گونه در زیست‌بوم‌های خشک و نیمه‌خشک ایفا کند. تنش خشکی، به‌عنوان عامل محدودکننده اصلی، موجب تضعیف رشد ریشه و کاهش کارایی جذب آب شد و نهال‌ها را به سمت راهبردهای محافظه‌کارانه تخصیص زیست‌توده سوق داد که در نهایت پتانسیل استقرار آن‌ها را کاهش می‌دهد. در مقابل، تلقیح با قارچ میکوریزی آربوسکولار *G. mosseae* توانست به‌طور مؤثری پاسخ منفی ریشه به تنش خشکی را تعدیل کند. این هم‌زیستی با حفظ ساختار کارآمد ریشه و بهبود ویژگی‌های فیزیکی بافت ریشه، نقش مهمی در افزایش ظرفیت جذب آب و پایداری عملکرد ریشه در شرایط محدودیت رطوبتی ایفا نمود. یافته‌ها نشان می‌دهد که اصلاح معماری و تراکم بافت ریشه در نهال‌های تلقیح‌شده، یکی از سازوکارهای کلیدی افزایش تحمل به خشکی در این گونه چوبی است. کاربرد نانولوله‌های کربنی چنددیواره نیز به‌عنوان یک مداخله فناورانه نوین، موجب ارتقای پاسخ‌های رشدی ریشه شد و اثر آن وابسته به غلظت بود. نتایج حاکی از آن است که در غلظت بهینه، نانولوله‌های کربنی می‌توانند با بهبود ویژگی‌های ساختاری ریشه و افزایش کارایی جذب، نقش تعدیل‌کننده‌ای در برابر تنش کم‌آبی ایفا کنند، بدون آنکه نشانه‌ای



[ Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-09 ]

[ DOI: 10.47176/ijae.14.2.11943 ]

از اختلال یا سمیت در رشد نهال‌ها مشاهده شود. معنی‌دار بودن اثر متقابل *G. mosseae* و نانولوله‌های کربنی بر برخی شاخص‌های ساختاری ریشه، بیانگر وجود نوعی هم‌افزایی زیستی–نانویی در سامانه ریشه ارغوان است. این هم‌افزایی نشان می‌دهد که تلفیق هم‌زیستی‌های زیستی با فناوری‌های نانو می‌تواند با تقویت بهره‌وری هیدرولیکی ریشه، راهبردی کارآمد برای افزایش تحمل گونه‌های چوبی به خشکی فراهم آورد. افزایش معنی‌دار صفات کلیدی ریشه‌ای نظیر حجم ریشه، تراکم بافت ریشه و وزن خشک ریشه در تیمار تلقیح با *G. mosseae* همراه با کاربرد نانولوله‌های کربنی چنددیواره (به‌ویژه در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر)، بیانگر توان این رویکرد تلفیقی در بهبود توان جذب آب و پایداری هیدرولیکی نهال است. از دیدگاه مدیریتی، این پاسخ‌ها می‌توانند به افزایش بقا و استقرار نهال‌ها در مراحل اولیه کاشت در عرصه‌های تخریب‌شده زاگرس منجر شوند؛ مرحله‌ای که بیشترین تلفات نهال رخ می‌دهد. در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که بهبود عملکرد ریشه از طریق ترکیب قارچ‌های میکوریزی آربوسکولار و نانولوله‌های کربنی، می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد زیست‌فناورانه کم‌هزینه و مؤثر (با توجه به قیمت مناسب مایه تلقیح قارچی و هزینه معقول نانولوله‌های کربنی در بازار فعلی، و همچنین دوز بسیار پایین مصرفی نانولوله‌ها) برای افزایش شانس استقرار و بقای نهال‌های ارغوان در برنامه‌های احیایی و جنگل‌کاری مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌ویژه در اکوسیستم زاگرس، مورد توجه قرار گیرد. این راهبرد پتانسیل آن را دارد که با کاهش تلفات نهال‌ها و افزایش موفقیت عملیات استقرار، نقش مهمی در مدیریت پایدار جنگل‌های آسیب‌پذیر ایفا کند.

پژوهش‌های آینده لازم است بر تبیین مسیرهای مولکولی دخیل در این سازوکار تمرکز نمایند؛ از جمله بررسی بیان ژن‌های مرتبط با سیگنالینگ اکسین (IAA) و آنزیم‌های خنثی‌کننده گونه‌های فعال اکسیژن با بهره‌گیری از روش پی‌سی‌آر کمی با رونوشت‌برداری معکوس (Quantitative Reverse Transcription PCR) و واکنش زنجیره‌ای پلیمراز (Polymerase Chain Reaction). همچنین، ارزیابی جنبه‌های سمیت دوزهای بالاتر نانولوله‌های کربنی‌چنددیواره و مطالعات میدانی بلندمدت برای سنجش بقای نهال‌ها طی ۲ تا ۳ سال ضروری است.

## تشکر و قدردانی

از کارشناسان محترم آزمایشگاه‌های گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه ایلام، که با ارائه امکانات و همکاری در مراحل آزمایشگاهی این پژوهش یاری رساندند، صمیمانه قدردانی می گردد.

## منابع

1. Abdelhameed, R. E., Gahin, H., and Metwally, R. A., 2025. Kinetin and arbuscular mycorrhizal fungi: vital regulators of *Vicia faba* plants response and tolerance to drought stress. *BMC Plant Biology*, *25*(1): 1155.
2. Ahmadi-Majd, M., Mousavi-Fard, S., Rezaei Nejad, A., and Fanourakis, D., 2022. Carbon nanotubes in the holding solution stimulate flower opening and prolong vase life in carnation. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9(1): 15.
3. Augé, R. M., 2001. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*, 11(1): 3-42.
4. Comas, L. H., Becker, S. R., Cruz, V. M. V., Byrne, P. F., and Dierig, D. A., 2013. Root traits contributing to plant productivity under drought. *Frontiers in Plant Science*, *4*: 442.
5. FAO., 2018. *Cercis siliquastrum*: Distribution and ecology. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
6. Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N. S. M. A., Fujita, D. B. S. M. A., and Basra, S. M., 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *In Sustainable Agriculture*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 153-188.
7. García-Perez, J. L., Oliet, J. A., Villar-Salvador, P., and Guzmán, J. E., 2021. Root growth dynamics and structure in seedlings of four shade tolerant Mediterranean species grown under moderate and low light. *Forests*, *12*(11): 1540.



[ Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-09 ]

[ DOI: 10.47176/ijae.14.2.11943 ]

8. Ghalandari, S., Kafi, M., Goldani, M., and Bagheri, A., 2019. The effect of drought stress on some of morphological and physiological traits of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes. *Iranian Journal of Pulses Research*, *10*(1):114-125. (In Persian).
9. Ghildiyal, S. K., Sharma, C. M., and Gairola, S., 2010. Variation in morphological characters of mycorrhizal seedlings of various provenances of *Pinus roxburghii* Sargent. *New York Science Journal*, *3*: 1-8.
10. Hajabbasi, M. A., 2001. Tillage effects on soil compactness and wheat root morphology. *Journal of Agricultural Science and Technology*, *3*(1): 67-77. (In Persian).
11. Hasanabadi, T., Ardakani, M. R., Rejali, F., Paknejad, F., Eftekhari, S. A., and Zargari, K., 2010. Response of barley root characters to co-inoculation with *Azospirillum lipoferum* and *Pseudomonas fluorescens* under different levels of nitrogen. *American-Eurasian Journal of Agriculture and Environmental Science*, *9*(2): 156–162.
12. Hermes, P. H., Gabriela, M. P., Ileana, V. R., Fusaro, C., Fernando, L. V., Mariana, M. A., ... and Fabián, F. L., 2020. Carbon nanotubes as plant growth regulators: prospects. In Green nanoparticles: synthesis and biomedical applications. Cham: *Springer International Publishing*, pp. 77-115.
13. Heydari, M., Anbari, M., Karamshahi, A., Hajinia, S., Valkó, O., and Prévosto, B., 2025. Enhancing *Cercis siliquastrum* seedling quality to meet ecological challenges in afforestation: influence of the combined effects of light, water stress, and zeolite amendment. *Trees*, *39*(3): 44.
14. Hu, Y., Zhang, P., Zhang, X., Liu, Y., Feng, S., Guo, D., Nadezhda, T., Song, Z. and Dang, X., 2021. Multi-wall carbon nanotubes promote the growth of maize (*Zea mays*) by regulating carbon and nitrogen metabolism in leaves. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *69*(17): 4981-4991.
15. Huang, B. R., Taylor, H. M., and McMichael, B. L., 1991. Growth and development of seminal and crown roots of wheat seedlings as affected by temperature. *Environmental and Experimental Botany*, *31*(4): 471-477.
16. Khodakovskaya, M. V., De Silva, K., Biris, A. S., Dervishi, E., and Villagarcia, H., 2012. Carbon nanotubes induce growth enhancement of tobacco cells. *ACS Nano*, 6(3): 2128-2135.
17. Lahiani, M. H., Dervishi, E., Chen, J., Nima, Z., Gaume, A., Biris, A. S., and Khodakovskaya, M. V., 2013. Impact of carbon nanotube exposure to seeds of valuable crops. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 5(16): 7965-7973.
18. Lovelli, S., Perniola, M., Di Tommaso, T., Bochicchio, R., and Amato, M., 2012. Specific root length and diameter of hydroponically-grown tomato plants under salinity. *Journal of Agronomy*, 11(4): 101-106.
19. Lozano, Y. M., Aguilar-Trigueros, C. A., Flaig, I. C., and Rillig, M. C., 2020. Root trait responses to drought are more heterogeneous than leaf trait responses. *Functional Ecology*, *34*(11): 2224-2235.
20. Martinez-Ballesta, M. C., Chelbi, N., Lopez-Zaplana, A., and Carvajal, M., 2020. Discerning the mechanism of the multiwalled carbon nanotubes effect on root cell water and nutrient transport. *Plant Physiology & Biochemistry*, 146: 23-30.
21. Mirzaei, J., and Fazeli, A., 2013. The effects of *Glomus mosseae* on growth and physiology of *Acacia albida* Del. seedlings under drought stress. *Journal of Bio & Environmental Sciences*, 3(11): 54–60.
22. Parkash, V., Singh, S., Singh, M., Deb, S. K., Ritchie, G. L., and Wallace, R. W., 2021. Effect of deficit irrigation on root growth, soil water depletion, and water use efficiency of cucumber. *HortScience*, *56*(10): 1278-1286.
23. Passioura, J. B., and Angus, J. F., 2010. Improving productivity of crops in water-limited environments. *Advances in Agronomy*, *106*: 37-75.
24. Paula, S., and Pausas, J. G., 2011. Root traits explain different foraging strategies between resprouting life histories. *Oecologia*, *165*(2): 321-331.
25. Porcel, R., and Ruiz-Lozano, J. M., 2004. Arbuscular mycorrhizal influence on leaf water potential, solute accumulation, and oxidative stress in soybean plants subjected to drought stress. *Journal of Experimental Botany*, 55(403): 1743-1750.
26. Rajput, V.D., Singh, A., Minkina, T., Rawat, S., Mandzhieva, S., Sushkova, S., Shuvaeva, V., Nazarenko, O., Rajput, P., Komariah and Verma, K.K., 2021. Nano-enabled products: challenges and opportunities for sustainable agriculture. *Plants*, *10*(12): 2727.
27. Rapparini, F., and Peñuelas, J., 2013. Mycorrhizal fungi to alleviate drought stress on plant growth. In Use of microbes for the alleviation of soil stresses, volume 1, pp. 21-42. New York, NY: Springer New York.
28. Rico, C. M., Majumdar, S., Duarte-Gardea, M., Peralta-Videa, J. R., and Gardea-Torresdey, J. L., 2011. Interaction of nanoparticles with edible plants and their possible implications in the food chain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(8): 3485-3498.
29. Ruiz-Lozano, J. M., 2003. Arbuscular mycorrhizal symbiosis and alleviation of osmotic stress. New perspectives for molecular studies. *Mycorrhiza*, *13*(6): 309-317.
30. Sari, D., Ferroudj, A., Dávid, S., Mansour, H., Brevik, E.C., Solberg, S.Q. and Prokisch, J. 2024. Drought stress under a nano-farming approach: A review. *Egyptian Journal of Soil Science*, 64(1): 135-151.
31. Sebastiana, M., da Silva, A. B., Matos, A. R., Alcântara, A., Silvestre, S., and Malhó, R., 2018. Ectomycorrhizal inoculation with Pisolithus tinctorius reduces stress induced by drought in cork oak. *Mycorrhiza*, *28*(3): 247-258.



[ Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-09 ]

[ DOI: 10.47176/ijae.14.2.11943 ]

32. Seleiman, M.F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H.H. and Battaglia, M.L., 2021. Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, *10*(2): 259.
33. Singh, M.P., Gazali, A., Prakash, O., Pal, P., Singh, A.K., Prakash, A., Sarangi, P.K., Sahoo, U.K., Prasad, R. and Sonkar, S., 2025. Harnessing carbon nanotubes for enhanced plant growth and sustainable agriculture: opportunities and challenges. *Plant Nano Biology*, 100178.
34. Smith, S. E., and Read, D. J., 2010. Mycorrhizal symbiosis. *Academic Press*, pp. 85–88.
35. Suliman, K. H., Al-Barakah, F. N., Assaeed, A. M., Ahmed, E. H., Fragallah, S. A. D. A., Ibrahim, E. A., and El Naim, A. M., 2023. Assessment of Mycorrhizal Fungi Efficiency on *Acacia*'s Growth Performance under Water Stress. *World*, *11*(1): 30-38.
36. Tian, Y., Xu, J., Li, L., Farooq, T. H., Ma, X., and Wu, P., 2024. Effect of arbuscular mycorrhizal symbiosis on growth and biochemical characteristics of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) seedlings under low phosphorus environment. *PeerJ*, 12: e17138.
37. Tiwari, D. K., Dasgupta-Schubert, N., Villaseñor Cendejas, L. M., Villegas, J., Carreto Montoya, L., and Borjas García, S. E., 2014. Interfacing carbon nanotubes (CNT) with plants: enhancement of growth, water and ionic nutrient uptake in maize (*Zea mays*) and implications for nanoagriculture. *Applied Nanoscience*, *4*(5): 577-591.
38. Tripathi, D.K., Singh, S., Singh, S., Pandey, R., Singh, V.P., Sharma, N.C., Prasad, S.M., Dubey, N.K. and Chauhan, D.K., 2017. An overview on manufactured nanoparticles in plants: uptake, translocation, accumulation and phytotoxicity. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110: 2-12.
39. Wang, F., Adams, C. A., Shi, Z., and Sun, Y., 2018. Combined effects of ZnO NPs and Cd on sweet sorghum as influenced by an arbuscular mycorrhizal fungus. *Chemosphere*, *209*: 421-429.
40. Wu, M., Su, H., Li, C., Fu, Z., Wu, F., Yang, J., and Wang, L., 2023. Effects of foliar application of single-walled carbon nanotubes on carbohydrate metabolism in crabapple plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 194: 214-222.
41. Zahedi, M., Sarcheshmehpour, M., and Farahmand, H., 2022. Effect of native mycorrhizal fungi on morphological and physiological traits of judas tree (*Cercis siliquastrum*) and mesquite (*Prosopis cineraria*) seedlings under drought stress conditions. *International Journal of Horticultural Science and Technology*, *9*(4): 429-444.
42. Zhuzhukin, K. V., Evlakov, P. M., Grodetskaya, T. A., Gusev, A. A., Zakharova, O. V., Shuklinov, A. V., and Tomina, E. V., 2023. Effect of multi-walled carbon nanotubes on the growth and expression of stress resistance genes in birch. *Forests*, *14*(1):163.

[ Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-09 ]

[ DOI: 10.47176/ijae.14.2.11943 ]

IJAE
Iranian Journal of Applied Ecology

# Morphological and Structural Root Responses of *Cercis siliquastrum* L. Seedlings to Performance of *Glomus mosseae* and Multi-Walled Carbon Nanotubes Under Drought Stress

**Afrooz Havasi[1], Jaafar Hosseinzadeh[*2], Mehdi Heydari[2] and Javad Mirzaei[2]**

(Received: November 29-2025; Accepted: February 07-2026)

## Abstract

Drought stress is the primary limiting factor for establishing woody seedlings in semi-arid Zagros ecosystems, reducing root efficiency and threatening restoration success. This study examined the combined effects of *Glomus mosseae* and Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNTs) on the root morphological and structural traits of *Cercis siliquastrum* seedlings under drought conditions. Treatments were arranged in a completely randomized design (CRD) with a 3×2×3 factorial structure and three replications per treatment combination, including three drought levels (100%, 60%, 20% FC), two fungus levels (inoculated/uninoculated), and three MWCNT levels (0, 50, 100 mg $L^{-1}$). Significant interactions ($p$<0.01) were observed for stress × fungus on root tissue diameter and density, and for stress × fungus × MWCNTs on root tissue density. Under severe stress (20%), root volume, fresh weight, dry weight, and length decreased by 71%, 68%, 65%, and 26%, respectively. Fungal inoculation increased these parameters: volume (49%), fresh weight (48%), dry weight (39%), and length (16%). MWCNTs at 100 mg $L^{-1}$ improved dry weight (52%), fresh weight (38%), volume (27%), and length (21%). The combined application of fungus and MWCNTs enhanced seedling growth by improving root uptake efficiency, offering a promising strategy for Zagros forest restoration under drought conditions.

**Keywords:** Root tissue density, Root volume, Specific root volume, Multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs)

[ Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-09 ]

[ DOI: 10.47176/ijae.14.2.11943 ]

1 Forest Science Department, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran.
2 Forest Science Department, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran.
* Corresponding Author, Email: j.hoseinzadeh@ilam.ac.ir