فصلنامه علوم محیطی، دوره نوزدهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰

۳۹-۵۶

تأثیر تلقیح باکتری و قارچ میکوریز آربسکولار بر برخی ویژگی‌های مورفولوژیکی نهال‌های داغداغان (*Celtis caucasica* L.) تحت تنش خشکی (مطالعه موردی: لرستان)

امین حیدرپور منفرد[۱*]، محمد رضا پورمجیدیان [۱]، فرهاد رجالی [۲]، سید محمد حجتی [۱] و پروین رامک [۳]

[۱] گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی ومنابع طبیعی ساری، ساری، ایران
[۲] موسسه تحقیقات خاک وآب، سازمان تحقیقات آموزش وترویج کشاورزی، کرج، ایران
[۳] مرکز تحقیقات کشاورزی ومنابع طبیعی لرستان، خرم آباد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۲۸ تاریخ پذیرش:۱۳۹۸/۱۰/۲۵

حیدرپور منفرد، ا، م.ر. پورمجیدیان، ف. رجالی، س.م. حجتی و پ. رامک. ۱۴۰۰. تأثیر تلقیح باکتری و قارچ میکوریز آربسکولار بر برخی ویژگی‌های مورفولوژیکی نهال‌های داغداغان (*Celtis caucasica* L.) تحت تنش خشکی (مطالعه موردی: لرستان). فصلنامه علوم محیطی. ۱۹(۲): ۳۹-۵۶.

سابقه و هدف: شرایط نامساعد محیطی سبب ایجاد تنش در گیاهان و اختلال در رشد و نمو و بقای آن‌ها می‌شود. امروزه کاربرد میکروارگانیسم-های خاکزی بویژه قارچها و باکتری‌های محرک رشد که با انجام فرآیندهای مختلف زیستی در رشد گیاه و چرخه عناصر غذایی خاک دخالت دارند جهت کاهش آثار سوء تنش‌های محیطی توصیه می‌گردد.

مواد و روش‌ها: به‌منظور بررسی اثر تنش خشکی و کاربرد نهاده‌های زیستی بر ویژگی‌های رویشی گیاه داغداغان (رویش قطری و رویش ارتفاعی، طول ریشه، وزن تر و خشک ریشه و اندام هوایی و کلونیزاسیون نهال)، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل (فاکتورهای قارچ در دو سطح تلقیح قارچ میکوریز آربسکولار و شاهد بدون تلقیح، باکتری در چهار سطح تلقیح سودوموناس، آزسپیریلوم، ازتوباکتر و شاهد و تنش خشکی در سه سطح ظرفیت مزرعه (۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و در ۴ تکرار در گلخانه اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان لرستان اجرا و از روش تجزیه واریانس فاکتوریل برای مقایسه ویژگی‌های اندازه‌گیری شده و برای دسته‌بندی آن‌ها از آزمون چندگانه دانکن در سطح ۰/۰۵ استفاده شد.

نتایج و بحث: در این پژوهش نتایج تجزیه واریانس تلقیح سطح‌های مختلف میکروارگانیسم‌ها و تنش خشکی بر صفات رویشی نهال‌های داغداغان در سطح پنج درصد با اختلاف معنی‌دار، بهبود مقادیر اندازه‌گیری شده و تأثیر فزاینده و مثبت برخی از تیمارها مشاهده شد، در میان صفات مورد آزمایش، نهال‌های شاهد که معرف شرایط عادی جنگل‌ها در عدم حضور میکروارگانیسم‌ها است کمترین مقدار را از نظر آماری در مقایسات میانگین داشتند. بهترین عملکرد تیمارها در رویش قطری نهال داغداغان در سه سطح تنش خشکی با تلقیح سودوموناس - گلوموس موسه و ازتوباکتر - گلوموس موسه بویژه در تنش متوسط با مقادیر ۰/۵۴ و ۰/۵۲ میلی‌متر به‌دست آمد. همچنین بیشترین میزان رویش ارتفاعی در هر سه سطح تنش خشکی بویژه در تنش متوسط با تلقیح سودوموناس - گلوموس موسه و ازتوباکتر - گلوموس موسه به ترتیب با میانگین ۲۱/۵۵ و ۲۰/۵۵ سانتی‌متر و در سطح برگ برای تنش خشکی کم به همراه سودوموناس - گلوموس موسه و سپس ازتوباکتر - گلوموس موسه به ترتیب

* Corresponding Author: *Email Address*. a. heidarpour@sanru.ac.ir
http://dx.doi.org/10.52547/envs.31318

با میانگین ۱۱۶ و ۱۱۴/۷۵ سانتی‌متر مربع به‌دست آمد. بیشترین طول ریشه در تنش خشکی متوسط با تلقیح سودوموناس و ازتوباکتر، در وزن تر ریشه تحت تنش خشکی متوسط همراه با تلقیح ازتوباکتر و سودوموناس به ترتیب با میانگین ۱۶/۷۹۱۶ و ۱۶/۷۹۴۱ گرم حاصل شد. بیشترین وزن خشک ریشه در تنش خشکی زیاد برای تیمارهای ازتوباکتر و سودوموناس، برای وزن تر و خشک اندام هوایی در تنش خشکی متوسط با تلقیح سودوموناس - قارچ و ازتوباکتر - قارچ حاصل شد. بالاترین درصد کلونیزاسیون نیز در تنش خشکی کم با عملکرد بهتر سودوموناس - قارچ و ازتوباکتر - قارچ به ترتیب با میانگین ۴۴/۱۷۵ و ۴۲/۶۷۵ درصد مشاهده شد.

نتیجه‌گیری: عامل‌های میکروبی، قارچی و برهم‌کنش آن‌ها، کلونیزاسیون ریشه‌ها، ویژگی‌های رشدی گیاه و جذب آب توسط گیاه را افزایش داده و در نتیجه سبب افزایش تحمل گیاه نسبت به شرایط تنش خشکی شده است.

واژه‌های کلیدی: آزوسپریلیوم، باکتری‌های محرک رشد، تنش‌های محیطی، سودوموناس، میکوریز آربسکولار.

مقدمه

از نظر زیست‌شناسی تنش را شرایطی می‌توان توصیف کرد که در اثر ورود تقاضای بیشتر در گیاه، سبب ناپایداری فعالیت‌های آن می‌شود و بعد از برطرف شدن این شرایط گیاه دوباره به حالت اولیه برمی‌گردد (Laxa *et al*., 2019). در بیشتر موارد تنش در ارتباط با رشد یعنی تجمع زیست‌توده و یا فرآیندهای اولیه اسیمیلاسیون[1] (تغییر و تبدیل عناصر) نظیر جذب دی‌اکسید کربن و مواد معدنی مرتبط با رشد کلی گیاه اندازه‌گیری می‌شود (Frolov *et al*., 2017; He *et al*., 2017). خشکی از جمله رایج‌ترین تنش‌ها و مهمترین عامل محدودکننده در تولید گیاهان می‌باشد و در گیاه به حالتی گفته می‌شود که سلول‌ها و بافت‌ها در معرض شرایط غیرمساعد رطوبتی قرار گرفته، گیاه پژمرده شده و آماس طبیعی خود را از دست داده باشد. کاهش سرعت تقسیم سلولی، تغییر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، کاهش محتوای کلروفیل و فتوسنتز، کاهش جذب عناصر غذایی به‌وسیله ریشه و همچنین کاهش انتقال آن از ریشه به اندام هوایی در نتیجه تنش رطوبتی گزارش شده است (Abduelafez *et al*., 2011; Tavili *et al*., 2011). تنش خشکی در مرحله‌های مختلف رشد منجر به کاهش وزن تر و خشک اندام هوایی، کاهش ارتفاع گیاه و قطر ساقه می‌شود (Osmolovskaya *et al*., 2018).

فن‌آوری زیستی خاک از طریق به‌کارگیری موجودات زنده خاکزی بر عملکرد گیاه تأثیرگذار است، بنابراین می‌توان در مورد خاک‌های فقیر از لحاظ مواد آلی و عناصر غذایی مانند غالب خاک‌های ایران، از این علم بهره گرفت. امروزه استفاده از میکروارگانیسم‌های خاکزی و بویژه باکتری‌های محرک رشد که با انجام فرآیندهای مختلف زیستی در رشد گیاه و چرخه عناصر غذایی خاک دخالت دارند به‌طور روزافزونی افزایش یافته است (Ahemad and Kibret, 2014). توانایی میکروارگانیسم در تولید و رهاسازی متابولیت‌های مختلف مؤثر بر رشد و سلامت گیاه به‌عنوان یکی از مهمترین عامل‌های در حاصلخیزی خاک در نظر گرفته می‌شود، این متابولیت‌ها را مواد فعال زیستی می‌نامند. یکی از استراتژی‌های مقابله با خشکی که مدتی است مورد توجه قرار گرفته است، تلقیح گیاهان با انواع مختلفی از باکتری‌ها و قارچ‌های مفید خاکزی می‌باشد. این باکتری‌ها با استفاده از یک یا چند مکانیسم خاص به‌طور مستقیم و یا غیرمستقیم موجب بهبود سنجه‌های رشد و نمو گیاه می‌گردند (Fahad *et al*., 2015; Bashan and de-Bashan, 2010).

باکتری‌های محرک رشد به دو روش مستقیم و غیر مستقیم، روی رشد گیاه و میزان تولید در واحد سطح تأثیر می‌گذارند. در حالت مستقیم با استفاده از مکانیسم‌های افزایش انحلال عناصر غذایی کم محلول، تولید سیدروفورهای کمپلکس‌کننده آهن، تولید ACC – دآمیناز[2]، تولید هورمون‌های رشد گیاهی، سنتز آنتی‌بیوتیک‌ها و همچنین تثبیت نیتروژن، در افزایش رشد و عملکرد گیاه ایفای نقش می‌کنند (Ahemad and Kibret, 2014; Vyas and Gulati, 2009). در حالت غیر مستقیم نیز با استفاده از مکانیسم‌های مختلف آنتاگونیسمی، اثرهای مضر بیمارگرهای گیاهی را خنثی یا تعدیل نموده و بدین طریق موجب افزایش رشد گیاه می‌شوند. رقابت برای

جذب مواد و گرفتن جایگاه‌های مناسب جهت فعالیت پاتوژن‌ها، تولید آنتی‌بیوتیک و ترکیبات قارچ‌کش، تولید آنزیم‌های لیتیک و تولید سیانید هیدروژن، از مهمترین مکانیسم‌های مورد استفاده در این روش می‌باشند (Fahad *et al*., 2015; Patil *et al*., 2011). از میان این باکتری‌ها، آزوسپیریلوم و ازتوباکتر به‌دلیل توانایی در برقراری ارتباط با گیاهان، توجه بیشتری را به خود جلب کرده‌اند (Gagne-Bourgue *et al*., 2013; Ma *et al*., 2011).

ازتوباکتر یک باکتری آزادزی با توانایی تثبیت نیتروژن هوا می‌باشد. ازت تثبیت شده به‌صورت ترشح آمونیوم در ریزوسفر در حضور ریشه‌های مویین و به‌عنوان ماده غذایی قابل جذب برای گیاهان مورد استفاده قرار می‌گیرد (Bianco and Defez, 2011). بررسی محققان نشان می‌دهد، باکتری‌هایی مانند ازوتوباکتر که دارای رابطه همیاری با گیاه میزبان می‌باشند (Sturz and Christie, 2003; Zaidi and Mohammad, 2006)، افزون بر تثبیت نیتروژن مولکولی، از تشدید تنش اسمزی که در اثر افزودن کودهای شیمیایی به زمین‌های خشک اتفاق می‌افتد جلوگیری به عمل می‌آورند. یکی از دلیل‌های کاهش یا عدم رشد گیاه در شرایط تنش‌های غیر زنده‌ای چون خشکی، تجمع اتیلن در بافت‌ها است که مکانیسم اصلی به‌کار گرفته شده توسط باکتری‌های محرک رشد در تسهیل و ترفیع رشد گیاه، کاهش میزان اتیلن می‌باشد (Aroca *et al*., 2013; Bhattacharyya and Jha, 2012).

آزوسپیریلوم نیز به‌عنوان باکتری محرک رشد گیاه از جمله مفیدترین میکروارگانیسمی است که غیر از تثبیت نیتروژن مولکولی قادر به تولید اکسین‌هایی نظیر ایندول استیک اسید می‌باشد. این هورمون موجب افزایش تولید تارهای کشنده ریشه و افزایش جذب عناصر غذایی از خاک می‌گردد و به روش‌های مختلف همچون بهبود توان جذب عناصر غذایی در گیاه میزبان، سبب بهبود رشد و عملکرد به شیوه‌ای کاملاً زیستی می‌شود (Bashan *et al*., 2014; Singh *et al*., 2012). آزوسپیریلوم و گونه‌های سودوموناس در محیط ریشه توانایی ساخت و ترشح مقداری مواد بیولوژیکی فعال مانند اسید نیکوتینیک، اسید پنتوتنیک، بیوتین، ویتامین B، اکسین و جیبرلین را دارد که در افزایش سطح تماس ریشه و بهبود همزیستی‌های مفید با گیاهان میزبان در مرحله‌های مختلف رشد به رشد بهتر گیاه بویژه در شرایط تنش‌های محیطی کمک می‌کنند (Saikia *et al*., 2010; Parmar and Dufresne, 2011).

افزون بر آن، اثرهای سودآوری قارچ‌های میکوریزی، تأثیر بر رشد گیاه، بهبود وضع تغذیه گیاه میزبان، جذب عناصر غذایی، تولید هورمون‌های محرک رشد گیاه، تولید سیدروفورها، افزایش فراهمی عناصر کم مصرف بویژه آهن، ارتباط هم‌افزایی با ریزسازواره‌های حل‌کننده فسفات‌های آلی و معدنی نامحلول، بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی خاک، افزایش مقاومت به تنش‌های محیطی مانند خشکی، آلودگی خاک به سموم و یا فلزهای سنگین، کنترل زیستی برخی عامل‌های بیماری‌زای گیاهی و به‌طور کلی افزایش عملکرد گیاه میزبان می‌باشد (Copetta *et al*., 2006). همزیستی میکوریز آربوسکولار در مقاومت گیاه به خشکی، نتیجه تجمع مجموع اثرهای سلولی، فیزیولوژیک، تغذیه‌ای و فیزیکی می‌باشد (Marinkovic *et al*., 2013).

انشعابات میسلیومی قارچ‌ها قادرند نقش مهمی را در جذب و انتقال آب ایفا کنند. یکی از دلیل‌های مهم حمایت میکوریز[۳] در شرایط تنش خشکی از گیاه میزبان، افزایش جذب عناصر غذایی در خاک و تغذیه بهتر گیاه است (Johnson and Hummel, 1985). بررسی‌های اکوفیزیولوژیک اثبات کرده‌اند که همزیستی با قارچ میکوریز آربسکولار اغلب سرعت حرکت آب به درون، در طول و خارج از گیاه میزبان را تغییر می‌دهد و همچنین اثرهایی بر آبگیری بافت و فیزیولوژی گیاه دارد. مطالعات دیگر نشان داده‌اند که همزیستی میکوریز آربسکولار می‌تواند با تنظیم پتانسیل اسمزی در گیاه، اثر تنش خشکی را کاهش دهد (Aliasgharzad *et al*., 2006). چه‌بسا انتقال آب از طریق هیف‌ها عامل افزایش جذب آب به وسیله گیاهان میکوریزی می‌باشد. سطح اضافی ایجاد شده به‌وسیله هیف‌های برون ریشه‌ای عامل افزایش جذب آب به‌وسیله گیاهان میکوریزی است. افزون بر آن، افزایش سطح ایجاد شده به‌وسیله هیف‌های برون ریشه‌ای در

واقع یک مسیر مستقیم برای جذب و انتقال آب به ریشه‌ها را فراهم می‌کند (Wu and Xia, 2006).

با توجه به موقعیت ایران که از نظر اقلیمی در منطقه خشک و نیمه خشک قرار دارد و بحران آب در این منطقه، استفاده گیاهان سازگار به شرایط خشکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. توانایی گیاه برای سازش به تنش‌های محیطی بستگی به نوع، شدت و مدت تنش و همچنین گونه گیاهی و مرحله وقوع تنش دارد (Yordanov and Tsoev, 2000). داغداغان با نام علمی *Celtis australis* L. از تیره Ulmaceae، گیاهی با پوست تنه خاکستری رنگ، برگ‌های تخم مرغی با نوک باریک و دندانه‌های اره‌ای و میوه شفت با یک هسته مشبک است (Ghahraman, 1987). جنس *Celtis* در مجموع دارای ۶۰ تا ۷۰ گونه در جهان است (Whittemore, 2005). داغداغان از گونه‌های بومی ایران، درختی نورپسند، گرما دوست و طالب خاک‌های عمیق و غنی است ولی در تمام خاک‌ها رشد می‌کند (Ali Ahmad Korruri *et al*., 2000)، منطقه انتشار آن در نواحی خشک و استپی کشور، در زاگرس و البرز و در ارتفاعات ۸۰۰ تا ۲۷۰۰ متری از سطح دریا است. امروزه در شهرهای بزرگ به‌منظور ایجاد فضای سبز و کمربند سبز در اطراف شهرها از این گونه استفاده می‌شود (Sabeti, 2007). هدف اصلی این تحقیق، بررسی میزان اثرگذاری تلقیح قارچ میکوریز آربسکولار و تعدادی باکتری در سه سطح از تنش خشکی کم (۴۰ درصد)، متوسط (۶۰ درصد) و زیاد (۸۰ درصد) بر بهبود برخی ویژگی‌های مورفولوژیکی و رشدی و نیز مقاومت نهال داغداغان (*Celtis caucasica* L.) به تنش خشکی بوده است.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در سال ۱۳۹۸ - ۱۳۹۷ در محل اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان لرستان اجرا شد و تأثیر قارچ میکوریز آربسکولار به همراه با باکتری‌های سودوموناس (*Pseudomonas*)، آزسپیریلوم (*Azospirillum*) و ازتوباکتر (*Azotobacter*) بر ویژگی‌های رشدی نهال‌های داغداغان تحت تنش خشکی مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور، نهال‌های یک‌ساله و با مورفولوژی یکسان حاصل از بذر پایه‌ی مادری یکسان، هدف‌گذاری شدند. نهال‌های داغداغان با متوسط ارتفاع ۷۰ - ۵۰ سانتی‌متر، حداقل قطر ۱ - ۰/۵ سانتی‌متر و تعداد برگ حداقل تا ۳۰ عدد از نهالستان وابسته به اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان لرستان انتخاب گردید (سعی شد نهال‌های انتخابی به‌طور متوسط از نظر ارتفاع، قطر، شادابی، تعداد برگ و ... مشابه یکدیگر باشند). سپس نهال‌ها به گلخانه منابع طبیعی استان لرستان منتقل و به مدت بیست روز جهت سازگاری با شرایط جدید در آن‌جا نگهداری شدند.

کشت گلخانه‌ای به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار فاکتور و در چهار تکرار اجرا گردید. فاکتورهای آزمایش شامل ۱- فاکتور قارچ در دو سطح تلقیح قارچ میکوریز آربسکولار و شاهد (بدون تلقیح)، ۲- باکتری در چهار سطح تلقیح با سودوموناس، آزسپیریلیوم، ازتوباکتر و شاهد (بدون تلقیح) و ۳- تنش خشکی در سه سطح ظرفیت مزرعه (۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد) مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق ۹۶ نهال در کل آزمایش استفاده گردید. قارچ میکوریز آربسکولار *Glomus mossea* و باکتری PGPR سودوموناس، آزسپیریلوم و ازتوباکتر از مؤسسه تحقیقات آب و خاک کل کشور تهیه شد. در آغاز کشت گلخانه‌ای، در هر یک از گلدان‌ها یک نهال داغداغان کاشته شد. در این مرحله نهال‌های گونه‌های داغداغان در گلدان همراه با عوامل زیستی شامل مایه تلقیح قارچ ریشه (میکوریز آربسکولار) و باکتری PGPR سودوموناس، آزسپیریلوم و ازتوباکتر کشت شدند. به‌منظور اعمال تیمار قارچ میکوریزی آربسکولار، مقدار ۵۰ تا ۶۰ گرم زادمایه در اطراف ریشه‌های نهال پخش و روی آن‌ها با خاک پوشانده شد. همچنین به‌منظور تلقیح باکتری‌ها با ریشه نهال‌ها، ریشه نهال‌ها به محلول باکتری آغشته و کشت انجام شد.

بعد از کشت و تلقیح قارچ و باکتری‌ها با ریشه نهال‌های داغداغان، نهال‌ها در شرایط گلخانه‌ای در محل اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان لرستان که با نور طبیعی نیاز گیاهان را تأمین می‌کند، نهال‌ها به‌مدت شش ماه نگهداری

شدند. در آغاز برای اعمال تیمار کم آبی ظرفیت مزرعه کشت تعیین شد و آنگاه میزان ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد ظرفیت مزرعه بر پایه عدد به‌دست آمده محاسبه گردید. ملاک آبیاری دوباره، مشاهده خشکی سطح بستر کشت بود و در هر دوره آبیاری میزان محاسبه شده به‌کار برده می‌شد. برای برآورد میزان آب مورد استفاده گیاه، تبخیر سطحی نیز با آبیاری و توزین دوره‌ای گلدان‌های شاهد بدون گیاه محاسبه گردید. قبل از کاشت، ارتفاع و قطر نهال‌ها اندازه‌گیری شد و در دوره کاشت، اندازه‌گیری‌ها هر ۳۰ روز یک‌بار تکرار شد تا نهال‌های مورد نظر رشد طبیعی خود را طی کنند، گیاهان در گلخانه با شرایط طبیعی در دمای حداکثر و حداقل به ترتیب ۲۸ و ۱۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری گردید. طی این مدت، تا ۷۰ درصد رطوبت ظرفیت مزرعه، آبیاری گلدان‌ها با آب مقطر انجام شد. به‌منظور جلوگیری از رقابت بین ریشه‌ها یا تنش ناشی از محدودیت حجم ریشه‌ها در این فضا، نیاز کودی در طول دوره داشت با استفاده از کود کاملاً محلول در آب NPK تأمین شد.

در پایان فصل رشد، ارتفاع نهال‌ها با استفاده از متر از یقه تا جوانه انتهایی نهال و رویش قطر یقه نهال‌ها با استفاده از کولیس دیجیتالی اندازه‌گیری شد. سپس رویش قطری و رویش ارتفاعی از طریق ارزیابی میزان رشد در آخر دوره منهای میزان رشد در اول دوره محاسبه و طول ریشه اصلی توسط متر اندازه‌گیری شد. جهت ارزیابی سطح برگ، سطح ۳ برگ کاملاً توسعه یافته از بالاترین قسمت هر نهال با استفاده از دستگاه Leaf Area Meter تعیین گردید. به‌منظور اندازه‌گیری وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه، پس از شستشوی نهال‌ها، اندام‌های مختلف (ریشه، ساقه و برگ) از هم جدا و وزن تر آن‌ها اندازه‌گیری شد. سپس اندام‌های مختلف نهال به مدت ۴۸ ساعت در دستگاه آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک و سپس توزین شدند. جهت ارزیابی درصد کلونیزاسیون ریشه‌ها براساس روش برمن و لیندرمن انجام گرفت. براساس این روش ۱۰۰ قطعه یک سانتی‌متری از ریشه‌های رنگ‌آمیزی شده به‌منظور ارزیابی درصد کلونیزاسیون ریشه توسط قارچ‌های AM به‌صورت تصادفی انتخاب شدند. میزان کلونیزاسیون با برآورد طولی از ریشه که به ساختمان‌های قارچی آلوده بودند محاسبه شد و میانگین کلونیزاسیون ریشه برای این صد قطعه تعیین شد. پنج طبقه براساس میزان کلونیزاسیون برای همزیستی میکوریزی تعریف شده است (Giovannetti and Mosse, 1980). اگر کلونیزاسیون صفر تا پنج درصد باشد، همزیستی در طبقه یک قرار می‌گیرد و به همین ترتیب کلونیزاسیون‌های ۶ تا ۲۵ درصد، ۲۶ تا ۵۰ درصد، ۵۱ تا ۷۵ درصد و ۷۶ تا ۱۰۰ درصد همزیستی میکوریزی به ترتیب در طبقه‌های دو، سه، چهار و پنج قرار می‌گیرد. در نهایت تجزیه واریانس داده‌ها توسط نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۲ انجام شد. برای مقایسه میانگین متغیرهای اندازه‌گیری شده نیز از آزمون چند دامنه‌ای دانکن[۴] در سطح ٪۵ استفاده گردید.

نتایج و بحث

میزان رویش قطری

مطابق با جدول تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای خشکی، نهاده‌های زیستی و اثر متقابل تیمارهای خشکی × نهاده‌های زیستی بر رویش قطری نهال داغداغان در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). از نظر آماری نتایج مقایسه میانگین نشان داد تیمار آزوسپریلیوم - گلوموس‌موسه و سودوموناس - گلوموس‌موسه در میزان ۸۰ درصد ظرفیت خاک به میزان ۰/۴۶ و ۰/۴۵ میلی‌متر و در تنش متوسط (۶۰ درصد) ۰/۵۴ و ۰/۵۱ میلی‌متر و در شرایط ۴۰ درصد ظرفیت مزرعه با ۰/۴۱ و ۰/۳۸ میلی‌متر بیشترین میزان رویش قطری را در مقایسه با نهال‌های شاهد داشته و از نظر آماری در یک گروه قرار گرفتند. در مجموع عملکرد تیمارها بر نهال‌ها در تنش متوسط همراه با تلقیح میکروارگانیسم‌های نام‌برده از بهترین عملکرد برخوردار بوده و نهال‌های شاهد که معرف شرایط عادی نهال‌ها هستند در هر سه سطح تنش و تلقیح کمترین رویش قطری را داشته‌اند (جدول ۳).

جدول ۱- تجزیه واریانس تیمارهای مختلف بر ویژگی‌های رشدی نهال داغداغان

Table 1. The analysis of variance of different treatments on growth properties of *Celtis australis* L.

منابع تغییرات Source of variation	df	میانگین مربعات Mean of squares								
		رویش قطری Diameter growth (mm)	رویش ارتفاعی Height growth (cm)	سطح برگ Leaf area (cm^2)	طول ریشه Root length (cm)	وزن تر ریشه Fresh root weight (g)	وزن خشک ریشه Dry root weight (g)	وزن تر هوایی Fresh body weight (g)	وزن خشک هوایی Dry body weight (g)	کلونیزاسیون Colonization
میکروارگانیسم‌ها Bioinoculants	7	0.064*	90.126*	*576.725	297.593ns	48.777*	17.560*	23.569*	9.958*	182.029ns
تنش خشکی × میکروارگانیسم‌ها Bioinoculants × Drought stress	14	0.005*	22.202*	*317.582	38.618 *	3.197*	1.151*	1.898*	0.802*	*111.692
تنش خشکی Drought stress	2	0.003*	28.919ns	11.010ns	7.723*	2.332*	0.839*	1.068*	0.451*	*0.346
کل Total	96									

* معنی‌داری در سطح ۵ درصد، ns: عدم معنی‌داری

* significance at 5 % probability levels , ns: not significance

جدول ۲-مقایسه میانگین متغیرهای اندازه‌گیری شده نهال داغداغان تحت تأثیر تیمارهای خشکی و نهاده‌های زیستی

Table 2. Mean of measured variables of *Celtis australis* L. under the influence of drought treatments and biological inputs

سطوح خشکی Drought levels	میکروارگانیسم‌ها Bioinoculants	رویش قطری Diameter growth (mm)	رویش ارتفاعی Height growth (cm)	سطح برگ Leaf area (cm^2)	طول ریشه Root length (cm)	وزن تر ریشه Fresh root weight (g)	وزن خشک ریشه Dry root weight (g)	وزن تر هوایی Fresh body weight (g)	وزن خشک هوایی Dry body weight (g)	کلونیزاسیون Colonization
	سودوموناس - گلوموس موسه (*G. mossea- Pseudomonas*)	0.45a	16.83a	112.75a	37.55b	16.12a	9.67a	14.63b	9/51a	40/2a
	ازتوباکتر - گلوموس موسه (*G. mossea- Azotobacter*)	0.47b	16.41a	108.75a	36.57b	16.05a	9.63a	14.52a	9/44b	39/12b
	آزوسپریلیوم - گلوموس موسه (*G. mossea- Azospirillum*)	0.46a	16.1b	104a	35.52a	15.75a	9.45a	14.40a	9/36b	38/5bc
ظرفیت ۸۰درصد (زیاد)	گلوموس موسه (*G. mossea*)	0.45c	15.52a	102.25b	38.9b	16.63a	9.98a	14.25c	9/26c	37/1a
	سودوموناس (*Pseudomonas*)	0.43c	14.77b	97.5a	41.33a	16.75a	10.05a	14.12b	9/18a	31/12c
80% Capacity	ازتوباکتر (*Azotobacter*)	0.42b	14.60c	91.25b	40.55b	16.79b	10.07a	13.97c	9/08c	29/77d
(High)	آزوسپریلیوم (*Azospirillum*)	0.42c	14.12d	87b	39.26b	16.65a	9.99b	13.51c	8/78c	26/69d
	شاهد (Control)	0.39c	13.89e	82a	32.53b	15.42b	9.25b	12.81c	8/33c	26/42e
	سودوموناس - گلوموس موسه (*G. mossea- Pseudomonas*)	0.54a	21.55a	116a	32.25b	13.49a	8.09a	16.06a	10/44a	41/68a
	ازتوباکتر - گلوموس موسه (*G. mossea- Azotobacter*)	0.52b	20.55a	114.75a	31.12b	12.94a	7.76a	15.62b	10/15b	40/18b
	آزوسپریلیوم - گلوموس موسه (*G. mossea- Azospirillum*)	0.51a	18.86b	112a	29.10a	12.5a	7.5a	15.36b	9/98b	38/82bc
ظرفیت ۶۰درصد(متوسط)	گلوموس موسه (*G. mossea*)	0.51c	18.36a	108b	32.82b	14a	8.4a	14.99c	9/74c	37/70a
	سودوموناس (*Pseudomonas*)	0.49c	18.19b	104a	35.62a	15a	9a	14.82b	9/63a	33/57c
60% Capacity	ازتوباکتر (*Azotobacter*)	0.48b	8.67c	102b	33.77b	14.54b	8.72a	14.34c	9/32c	30/80d
(Medium)	آزوسپریلیوم (*Azospirillum*)	0.47c	15.84d	100.5b	33.5b	14.07a	8.44b	14.07c	9/14c	28/68d

ادامه جدول ۲–مقایسه میانگین متغیرهای اندازه‌گیری شده نهال داغداغان تحت تأثیر تیمارهای خشکی و نهاده‌های زیستی

Table 2. Mean of measured variables of *Celtis australis* L. under the influence of drought treatments and biological inputs

سطوح خشکی Drought levels	میکروارگانیسم‌ها Bioinoculants	رویش قطری Diameter growth (mm)	رویش ارتفاعی Height growth (cm)	سطح برگ Leaf area (cm^2)	طول ریشه Root length (cm)	وزن تر ریشه Fresh root weight (g)	وزن خشک ریشه Dry root weight (g)	وزن تر هوایی Fresh body weight (g)	وزن خشک هوایی (gr) Dry body weight	کلونیزاسیون Colonizatio
	شاهد (Control)	0.47^{c}	14.59^{e}	98.75^{a}	26.97^{b}	12.07^{b}	7.24^{b}	13.63^{c}	$8/86^{c}$	$28/68^{e}$
	سودوموناس - گلوموس موسه (*G. mossea- Pseudomonas*)	0.41^{a}	14.19^{a}	120.75^{a}	26.90^{b}	11.65^{a}	6.99^{a}	12.92^{a}	$8/4^{a}$	$44/17^{a}$
	ازتوباکتر - گلوموس موسه (*G. mossea- Azotobacter*)	0.39^{b}	13.74^{a}	118^{a}	24.33^{b}	11.24^{a}	6.74^{a}	12.77^{b}	$8/30^{b}$	$42/67^{b}$
	آزوسپریلیوم - گلوموس موسه (*G. mossea- Azospirillum*)	0.38^{a}	12.91^{b}	115.25^{a}	22.90^{a}	10.93^{a}	6.56^{a}	12.4^{b}	$8/06^{b}$	$41/92^{bc}$
ظرفیت ۴۰درصد (کم)	گلوموس موسه (*G. mossea*)	0.36^{c}	12.48^{a}	112.75^{b}	29.72^{b}	12.25^{a}	7.35^{a}	12.11^{c}	$7/87^{c}$	$39/82^{a}$
	سودوموناس (*Pseudomonas*)	0.34^{c}	11.70^{b}	109.25^{a}	32.65^{a}	13.02^{a}	7.81^{a}	11.77^{b}	$7/65^{a}$	33^{c}
40% Capacity	ازتوباکتر (*Azotobacter*)	0.31^{b}	10.83^{c}	107^{b}	30.47^{b}	12.50^{b}	7.50^{a}	11.38^{c}	$7/40^{c}$	$31/95^{d}$
(Low)	آزوسپریلیوم (*Azospirillum*)	0.28^{c}	10.25^{d}	106.25^{b}	28.37^{b}	12.15^{a}	7.29^{b}	11.14^{c}	$7/24^{c}$	$30/7^{d}$
	شاهد (Control)	0.26^{c}	9.77^{e}	103^{a}	22.77^{b}	10.23^{b}	6.14^{b}	10.79^{c}	$7/01^{c}$	$29/95^{e}$

*مقادیر دارای حروف مشترک در هر ستون فاقد تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال 5 درصد براساس آزمون آماری دانکن می‌باشند.

*Values in each column followed by similar letters are not significantly different at 5% probability level, using Duncan's Multiple Range Test.

میزان رویش ارتفاعی

مطابق با نتایج تجزیه واریانس اثر سطح‌های مختلف تیمارهای تنش خشکی، میکروارگانیسم‌ها و اثر متقابل خشکی × میکروارگانیسم‌ها بر میزان رویش ارتفاعی نهال داغداغان در سطح ۵ درصد معنی‌دار بوده است (جدول ۱). همینطور نتایج مقایسه میانگین نشان داد تیمار سودوموناس - گلوموس موسه، ازتوباکتر - گلوموس موسه و گلوموس موسه به ترتیب با میزان ۲۱/۵۵، ۲۰/۵۵ و ۱۸/۳۶ سانتی‌متر در تنش متوسط بیشترین مقدار را داشته و در دو سطح تنش دیگر نسبت به سایر تیمارها، بیشترین تأثیر را در بهبود رویش ارتفاعی نهال‌ها داشته و از نظر آماری نیز در یک گروه قرار گرفتند. نهال‌های شاهد در ظرفیت کم خاک (۴۰ درصد) نسبت به سایرین کمترین میزان رویش ارتفاع (۹/۷۷ سانتی‌متر) را داشته است (جدول ۳).

میزان سطح برگ

نتایج تجزیه واریانس تأثیر نهاده‌های زیستی و اثر متقابل خشکی × نهاده‌های زیستی بر سطح برگ نهال داغداغان در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد، در حالیکه اثر تیمارهای خشکی در سطح ۵ درصد معنی‌دار نگردید (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نیز بیشترین میزان سطح برگ نهال داغداغان را در تنش خشکی کم با تلقیح سودوموناس - گلوموس موسه، ازتوباکتر - گلوموس موسه، آزوسپریلیوم - گلوموس موسه، سودوموناس و شاهد به ترتیب ۱۲۵/۷۵، ۱۱۸، ۱۱۵/۲۵، ۱۰۹/۲۵ و ۱۰۳ سانتی‌مترمربع بیشترین مقدار را دارا بوده و از نظر آماری نیز در یک گروه قرار گرفتند. نهال شاهد در تنش خشکی با ظرفیت ۸۰ درصد با میزان ۸۲ سانتی‌مترمربع کمترین مقدار سطح برگ را نسبت به سایر تیمارها داشته است (جدول ۳).

میزان طول ریشه

نتایج تجزیه واریانس دوطرفه نشان داد، تأثیر تیمارهای خشکی و اثر متقابل خشکی × نهاده‌های زیستی بر طول ریشه نهال داغداغان در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد اما اثر تیمار نهاده‌های زیستی در سطح ۵ درصد بر این صفت معنی‌دار نگردید (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین نشان داد بیشترین طول ریشه نهال داغداغان در تنش خشکی با ظرفیت ۸۰ درصد با تلقیح سودوموناس و آزوسپریلیوم - گلوموس موسه با مقدار ۴۱/۳۳ و ۳۵/۵۲ سانتی‌متر بیشترین تأثیر را بر رشد

ریشه نهال داغداغان داشته و از نظر آماری نیز در یک گروه قرار گرفته است. کمترین میزان طول ریشه مربوط به نهال شاهد در تنش با ظرفیت ۴۰ درصد به میزان ۲۲/۷۷ سانتی‌متر مشاهده گردید (جدول ۳).

میزان وزن تر و خشک ریشه

با توجه به نتایج تجزیه واریانس، تأثیر تیمارهای خشکی، نهاده‌های زیستی و اثر متقابل تیمارهای خشکی × نهاده‌های زیستی بر وزن تر و خشک ریشه نهال داغداغان در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد، بالاترین وزن تر ریشه داغداغان تحت تنش خشکی ۸۰ درصد ظرفیت سودوموناس - گلوموس موسه، ازتوباکتر - گلوموس موسه، آزروسپریلیوم - گلوموس موسه، گلوموس موسه، سودوموناس و آزوسپریلیوم با مقدار ۱۶/۱۲، ۱۶/۰۵، ۱۵/۷۵، ۱۶/۶۳، ۱۶/۷۵ و ۱۶/۶۵ گرم بیشترین مقدار وزن تر ریشه را داشته و از نظر آماری نیز در یک گروه قرار گرفتند و نهال شاهد در مجموع کمترین میزان وزن تر ریشه را داشته است این مقدار در شرایط تنش ۴۰ درصد کمترین مقدار خود یعنی ۱۰/۲۳ گرم بوده است (جدول ۳). برای وزن خشک ریشه نیز مطابق با جدول مقایسه میانگین بیشترین وزن خشک ریشه نهال داغداغان در تنش خشکی زیاد برای تیمارهای سودوموناس - گلوموس موسه، ازتوباکتر - گلوموس موسه، آزوسپریلیوم - گلوموس موسه، گلوموس موسه، سودوموناس و ازتوباکتر به ترتیب با ۹/۶۷، ۹/۶۳، ۹/۴۵، ۹/۹۸، ۱۰/۰۵، ۱۰/۰۷ گرم بیشترین مقدار وزن خشک ریشه را داشته و از نظر آماری در یک گروه قرار گرفتند. کمترین میزان وزن خشک ریشه هم مربوط به نهال شاهد بویژه در تنش ظرفیت ۴۰ درصد با مقدار ۶/۱۴ گرم مشاهده شد (جدول ۳).

میزان وزن تر و خشک اندام هوایی

مطابق با نتایج تجزیه واریانس داده‌ها مشاهده گردید تأثیر تیمارهای خشکی، نهاده‌های زیستی و اثر متقابل تیمارهای خشکی × نهاده‌های زیستی بر وزن تر و خشک اندام هوایی نهال داغداغان در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نیز گویای آن است، بالاترین وزن تر اندام هوایی نهال داغداغان در تنش خشکی متوسط برای تیمار سودوموناس - گلوموس موسه با میزان ۱۶/۰۶ گرم مشاهده شد، به‌عبارتی این تیمار در ظرفیت آبی ۶۰ درصد بیشترین تأثیر را در افزایش وزن تر نهال داغداغان داشته است و کمترین میزان وزن تر اندام هوایی نهال داغداغان برای نهال‌های شاهد بویژه در تنش ۴۰ درصد ظرفیت با مقدار ۱۰/۷۹ گرم بوده است (جدول ۲). افزون بر آن، بیشترین وزن خشک اندام هوایی نهال داغداغان در تیمار خشکی متوسط با تلقیح سودوموناس - گلوموس موسه و تیمار سودوموناس بود که از نظر آماری در یک گروه قرار گرفتند. همینطور کمترین مقادیر از نظر آماری در تنش خشکی کم بویژه برای نهال شاهد و تیمار آزوسپریلیوم به ترتیب با میانگین ۷/۰۱ و ۷/۲۴ گرم نشان داده شد (جدول ۲).

درصد کلونیزاسیون

مطابق با نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای خشکی و اثر متقابل تیمارهای خشکی × نهاده‌های زیستی بر درصد کلونیزاسیون نهال داغداغان در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد، در حالیکه اثر نهاده‌های زیستی در سطح ۵ درصد بر این صفت معنی‌دار نگردید (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها از نظر آماری گویای آن است که بالاترین درصد کلونیزاسیون نهال داغداغان در تیمار خشکی با ظرفیت ۸۰ درصد با تلقیح سودوموناس - گلوموس موسه و گلوموس موسه به ترتیب ۴۰/۲ و ۳۷/۱ درصد بوده و در یک گروه آماری نیز قرار گرفته‌اند و کمترین میزان کلونیزاسیون برای نهال‌های شاهد بویژه در تنش خشکی با ظرفیت ۸۰ درصد با مقدار ۲۶/۴۲ درصد حاصل گردید (جدول ۳).

بنابر نتایج حاصل از این پژوهش بیشترین رویش قطری، بالاترین رویش ارتفاعی و بیشترین وزن تر و خشک اندام هوایی نهال داغداغان در تیمار خشکی متوسط به همراه تلقیح سودوموناس - قارچ و ازتوباکتر - قارچ حاصل شد. تنش خشکی سبب کاهش ارتفاع نهال‌های داغداغان گردید، با کاهش رشد سلول، رشد اندام‌ها محدود می‌شود و به همین دلیل است که اولین اثر محسوس کم آبی روی گیاهان را

می‌توان از طریق کاهش ارتفاع تشخیص داد. به‌طور کلی رشد سلولی حساس‌ترین عکس‌العمل گیاه به تنش خشکی می‌باشد و کاهش پتانسیل‌های آب به میزان ۰/۱ - مگاپاسکال منجر به کاهش محسوس رشد سلولی می‌شود (Bechtold, 2018). توقف رشد در طول شرایط تنش تا حد زیادی به شدت تنش بستگی دارد. تنش اسمزی ملایم به‌سرعت منجر به توقف رشد برگ‌ها و ساقه‌ها می‌شود. در حالیکه ریشه‌ها ممکن است به طویل شدن خود ادامه دهند (Sehgal et al., 2018). درجه توقف رشد ناشی از تنش اسمزی به مقیاس زمانی پاسخ بافت و میوه و چگونگی اعمال تیمار (سریع یا تدریجی) بستگی دارد (Nadeem *et al*., 2019).

در شرایط تنش خشکی به‌دلیل کاهش پتانسیل آب و پسابیدگی از طریق برهم زدن تعادل یونی و اثر یون‌های سمی بویژه یون سدیم، اختلال در جذب، احیاء و متابولیسم نیتروژن و پروتئین، بسته شدن جزئی یا کلی روزنه‌ها، تخریب غشای سلولی، کاهش تقسیم سلولی، کاهش کارایی فتوسنتز و در نهایت سمیت متابولیک، مورفولوژی و فیزیولوژی گیاه تحت تأثیر قرار خواهد گرفت (Rojas-Tapias *et al*., 2012; Zawoznik *et al*., 2011). افزون بر آن، تنش خشکی از طریق تأثیر بر تعادل هورمونی گیاه سبب کاهش هورمون‌های تحریک‌کننده رشد جیبرلین و اکسین و همچنین افزایش بازدارنده‌های رشدی بویژه آبسیزیک اسید می‌گردد (Andersen *et al*., 2015). آبسیزیک اسید نقش مهمی در کاهش رشد گیاه بویژه ارتفاع ساقه گیاه دارد. با افزایش تنش خشکی از فشار تورژسانس وارد شده بر دیواره سلولی کاسته می‌شود و یکی از فاکتورهای مهم در رشد و توسعه سلولی بویژه سلول‌های قسمت مریستمی ایجاد فشار تورژسانس برای رشد می‌باشد (Awari and Mate, 2015; Li *et al*., 2018).

کاهش وزن تر و خشک گیاه تحت شرایط تنش خشکی امری ثابت شده است که دلیل این امر نیز وجود شرایط اسمزی در منطقه ریشه، کاهش میزان جذب آب توسط گیاه، کاهش رشد و به‌طور کلی کاهش وزن گیاه می‌باشد (Emadi *et al*., 2009). از دلایل کاهش وزن تر و خشک گیاه داغداغان در شرایط تنش خشکی زیاد بدون کاربرد میکروارگانیسم‌های زیستی می‌تواند این باشد که در شرایط تنش همراه با کاهش ظرفیت بیوشیمیایی برای کربن‌گیری و محدودیت انتشار گازی، انتقال مواد فتوسنتزی تحت تأثیر قرار گرفته که موجب اشباع شدن برگ‌ها از این مواد و در نتیجه محدود شدن فرآیند فتوسنتز و کاهش وزن تر و خشک گیاه می‌شود. بنابراین کاهش فتوسنتز گیاهان تحت تنش را می‌توان ناشی از تأثیر منفی تنش بر دستگاه فتوسنتزی، میزان کلروفیل و یا اثر توأم هر دو عامل دانست (Nadeem *et al*., 2014). در اصل زمانی که گیاهان با تنش خشکی رو به رو می‌شوند، میزان جذب آب توسط ریشه کاهش یافته و در نتیجه بیوسنتز آبسزیک اسید در آن‌ها افزایش می‌یابد که از طریق آوند چوبی به بخش‌های هوایی گیاه منتقل شده و در نهایت بسته شدن روزنه‌ها را سبب می‌گردد (Talaat *et al*., 2015).

همچنین رشد سلول‌های برگ به خشکی حساس می‌باشد. خشکی آثار مخربی بر بافت پارانشیم نردبانی و فضای بین سلولی برگ دارد که این خود سبب کاهش سطح برگ می‌گردد. تحت تنش خشکی ابتدا برگ‌های مسن مورد تأثیر قرار گرفته و به تدریج علائم سوختگی در آن‌ها ظاهر می‌گردد و سطح برگ کاهش پیدا می‌کند. با کاهش سطح برگ، میزان جذب نور کاهش یافته و ظرفیت فتوسنتزی گیاه نیز کاهش می‌یابد که این فرآیند سبب کاهش تولید اسیمیلات لازم برای رشد می‌گردد. با توجه به اینکه یکی از آثار تنش خشکی در گیاه جلوگیری از جذب آب و ایجاد تنش خشکی است به همین دلیل پتانسیل آب جهت آماس سلول‌ها کاهش و در نتیجه سطح برگ و وزن تر و خشک گیاه کاهش می‌یابد (Greenvay and Munns, 1980; Munns, 2002).

افزون بر آن با کوچک شدن و ریزش برگ‌ها منبع تولید اسیمیلات‌ها در گیاه کاهش می‌یابد. بنابراین مقدار موادی که به سلول‌ها می‌رسد به مراتب کاهش چشم‌گیری پیدا

می‌کند. این دلایل به نوبه خود تعداد و اندازه سلول‌ها را کاهش داده و در نتیجه وزن تر و خشک گیاه در این شرایط به شدت کاهش می‌یابد (Kumar, 1984). بر این اساس می‌توان گفت که گیاهان تلقیح شده با باکتری ازتوباکتر و آزسپیریلوم وضعیت آبی بهتری را نشان دادند و امکان بیشتری برای تداوم فتوسنتز و تولید اسیدهای آلی جهت تأمین ساختارهای کربنی و انرژی برای تنظیم اسمزی داشته‌اند. در نتیجه با حفظ رطوبت بیشتر از یک طرف و جذب دی‌اکسیدکربن بیشتر از طرف دیگر میزان اسیمیلات تولیدی خود را بالا نگه داشته‌اند. افزایش جذب یون‌هایی نظیر NO^{3-}، NH^{4+}، PO_4^{3-} و K^+ به واسطه حضور آزوسپیریلوم می‌تواند دلیل اصلی افزایش وزن خشک اندام‌های هوایی باشد (Jay *et al*., 2013; Anna *et al*., 2013).

بنابر نتایج حاصل از این پژوهش، بیشترین سطح برگ و بالاترین درصد کلونیزاسیون نهال داغداغان در تیمارهای خشکی کم به همراه تلقیح سودوموناس - قارچ و ازتوباکتر - قارچ حاصل شد. اثرات هم‌افزایی قارچ‌های میکوریزی و باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد بر درصد کلونیزاسیون ریشه گیاهان از طریق سازوکارهای مختلف می‌باشد. این سازوکارها شامل تأثیر بر میزان تمایل و پذیرش ریشه نسبت به قارچ، رشد و جوانه‌زنی اسپورها و همچنین تغییر ترشحات ریشه‌ای در محیط ریزوسفر می‌باشد (Saadat *et al*., 2009). در پژوهشی گزارش گردید که تلقیح همزمان گیاه ذرت با قارچ میکوریز آربوسکولار و باکتری سودوموناس فلورسنس، میزان کلونیزاسیون ریشه را افزایش داده است که با نتایج حاصل از این پژوهش مطابقت دارد. همچنین بیان کردند که تیمار تنش خشکی و استفاده از میکروارگانیسم حل‌کننده فسفات توانست درصد کلونیزاسیون ریشه را نسبت به تیمار آبیاری طبیعی و عدم استفاده از میکروارگانیسم حل‌کننده فسفات به‌طور معنی‌داری افزایش دهد (Ghorchiani *et al*., 2011).

رشد برگ‌ها نسبت به سایر قسمت‌های گیاه نسبت به تنش حساس‌تر است و با شروع تنش، اولین پاسخ گیاه کاهش سطح برگ است تا بدین وسیله از تبخیر و هدرروی آب جلوگیری کند و این عمل با ترشح هورمون‌هایی که عامل تقسیم سلولی و گسترش سطح برگ هستند، صورت می‌گیرد. با کاهش سطح برگ، تولید فراورده‌های گیاهی کاهش می‌یابد (Bethlenfalvay *et al*., 1988). گزارش شده است که تنش خشکی اسیمیلاسیون قند در ساقه‌های گیاهان میکوریزی شده را افزایش می‌دهد. افزایش تولید قند در گیاهان میکوریزی می‌تواند سبب افزایش بالقوه سطح برگ شود. نتایج تحقیق Nezarat and Gholami (2009) نشان داد، کاربرد باکتری سودوموناس میزان سطح برگ ذرت را در مقایسه با گیاهان تلقیح نشده افزایش داده است، که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد.

بالاترین طول و وزن تر ریشه نهال داغداغان در تیمار خشکی متوسط به همراه تیمارهای سودوموناس و ازتوباکتر مشاهده گردید. به‌نظر می‌رسد کاهش ویژگی‌های رشدی اندام هوایی و زیرزمینی گیاه داغداغان تحت تأثیر تیمارهای خشکی به‌دلیل اثر بازدارندگی آن روی تقسیم سلولی و توسعه نقطه رویش، جوانه‌ها و مریستم‌های انتهایی باشد. از سوی دیگر تجمع بالای نمک تحت تنش خشکی در برگ‌ها، افزایش میزان تعرق و کاهش سطح برگ را به‌همراه دارد (Hamayun *et al*., 2010). باکتری‌های محرک رشد با تولید سیدروفورها و مواد کلات‌کننده میزان فراهمی عناصر کم مصرف در شرایط تنش خشکی را افزایش می‌دهند که این مسئله سبب می‌شود تا گیاهان دامنه وسیعی از تنش‌های محیطی را تحمل نمایند (Hayat *et al*., 2010; Cheng *et al*., 2007). یکی از مهمترین مکانیسم‌های رشد گیاه به‌وسیله باکتری‌های محرک رشد، تغییر در ریخت‌شناسی و فیزیولوژی سیستم ریشه گیاه است. این باکتری‌ها موجب گسترش ریشه‌ها، افزایش تعداد ریشه‌های جانبی و ریشه‌های موئین و همچنین حجم و وزن ریشه‌ها می‌شوند که این امر موجب افزایش سطح ریشه، افزایش دسترسی به آب و عناصر غذایی و در نتیجه موجب بهبود وضعیت آبی گیاه می‌شود (Askary *et al*., 2009). در واقع می‌توان بیان نمود که باکتری، آب و مواد غذایی بیشتری را به‌صورت بهینه در اختیار گیاه قرار می‌دهد، بنابراین میزان

ساخت رنگیزه‌ها را افزایش و انتقال آب و مواد فتوسنتزی را در گیاه تسهیل می‌نماید. تقویت رشد اندام هوایی گیاهان تحت شرایط تنش توسط باکتری‌ها می‌تواند مربوط به افزایش جذب آب به دلیل افزایش نفوذپذیری غشاء و یا به دلیل افزایش دسترسی ترکیبات آلی محلول باشد که در نتیجه تراوش ریشه گیاه تولید می‌شود. ریشه‌ها ترکیبات قابل حل در آب مانند قندها و اسیدهای آلی را آزاد می‌کنند که به مصرف میکروارگانیسم‌ها می‌رسند. اگرچه با اطمینان نمی‌توان گفت کدام یک از این سنجه‌ها به‌طور کامل با تحمل به خشکی همبستگی دارد، ولی این سنجه‌ها درجات مختلفی از همبستگی با تحمل به خشکی را نشان می‌دهند (Borzoei *et al*., 2012; Mishra *et al*., 2010).

پژوهش‌ها نشان داده است، تلقیح گیاهان با آزوسپیریلوم و ازتوباکتر سبب افزایش حجم ریشه می‌شود که این توسعه با افزایش هورمون‌های رشد و همچنین تراوش پروتونی در ارتباط است (Safapour *et al*., 2012; Karthikeyan *et al*., 2007). تراوش پروتونی به‌دلیل همیاری آزوسپیریلوم با گیاه سبب بهبود جذب آب و املاح توسط گیاه تلقیح شده با آزوسپیریلوم می‌شود (Mahfouz and Sharaf-Eldin, 2007). از طرفی دیگر ممکن است، افزایش تحمل به خشکی در ارقام تلقیح شده با باکتری به‌دلیل افزایش پروتئین محلول در بخش هوایی و پروتئین کل ریشه در تیمارهای تحت تنش خشکی باشد. به‌نظر می‌رسد باکتری‌های محرک رشد با کمک به تثبیت نیتروژن موجب افزایش تولید پروتئین در شرایط تنش خشکی شده و بدین دلیل توانستند تا حدی آثار نامطلوب تنش خشکی را تخفیف دهند (Hamidi *et al*., 2006; Hardoim *et al*., 2008).

همچنین بررسی محققان نشان داده است که باکتری‌های محرک رشد افزون بر توانایی تثبیت نیتروژن به تولید مواد گوناگون تحریک‌کننده رشد نظیر ایندول استیک اسید، جیبرلین‌ها و ویتامین‌ها کمک می‌کنند که این ترکیبات موجب افزایش تولید تارهای کشنده ریشه، افزایش جوانه‌زنی، افزایش تراکم و طول ریشه‌های موئین و در نتیجه بهبود رشد گیاه می‌شوند (Ashrafuzzaman *et al*., 2009; Cakmaci *et al*., 2005). به‌نظر می‌رسد که ایندول استیک اسید به همراه سیتوکینین که توسط ازتوباکتر تولید می‌شود از طریق رشد ریشه‌های جانبی و افزایش وزن برگ و ریشه سبب افزایش مواد پرورده شده که به نوبه خود سبب افزایش رشد رویشی و افزایش سهم اندام‌های زایشی می‌گردد (Ojaghloo *et al*., 2007). تأثیر باکتری‌های محرک رشد بر افزایش پارامترهای رویشی نظیر طول اندام هوایی و ریشه، سطح برگ و وزن تر و خشک اندام‌های گیاهی با نتایج به‌دست آمده روی گیاه برنج (Ng *et al*., 2012; Baset Mia *et al*., 2012; Kumar Sahoo *et al*., 2014)، ذرت (Bano and Fatima, 2009) و گندم (Upadhyay *et al*., 2009) مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

براساس نتایج پژوهش حاضر، می‌توان با تلقیح قارچ‌های میکوریز در شرایط خشکی موجب بهبود تغذیه گیاه و افزایش جذب عناصر غذایی و در نهایت کاهش اثرات منفی خشکی بر رشد گیاه گردید. همچنین عوامل میکروبی، قارچی و برهم‌کنش آن‌ها، درصد کلونیزاسیون ریشه‌ها، ویژگی‌های رشدی گیاه و جذب آب توسط گیاه را افزایش داده و در نتیجه سبب افزایش تحمل گیاه نسبت به شرایط نامساعد محیطی در تنش خشکی می‌شود. با توجه به پیامدهای افزایش گرمایش جهانی و تنش خشکی در برخی مناطق دنیا بویژه در جنگل‌های زاگرس، همچنین لزوم توجه بیشتر مردم و مسئولان به افزایش کمیت و کیفیت جنگل‌های کشور، از نتایج این مطالعه و مطالعات مشابه می‌توان در تخصیص بهینه منابع برای دست‌یابی هرچه بیشتر به اهداف موردنظر اقدام نمود.

پی‌نوشت‌ها

[1] Assimilation
[2] ACC Deaminase
[3] Mycorrhiza
[4] Duncan Compare Means Test

منابع

Abduelafez, I., Moragues, M., Elamari, A.A., Buchleiter, G. and Stromberger, M., 2011. Growth promotion of winter wheat under drought stress by ACC deaminase positive bacteria. Annual Meeting of the Soil Science Society of America, October 16-19. San Antonio, TX. USA.

Ahemad, M. and Kibret, M., 2014. Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective. Journal of King Saud University – Science. 26, 1-20.

Ali Ahmad Korruri, S., Khoshnevis, M., Matinzade, M. and Moraghebi F., 2000. Ecological and environmental studies of *Juniperus polycarpus* stand in Iran. 1th National Conference of Northern Forests Management and Sustainable Development, 6 September, Ramsar, Iran. 327-357. (In Persian with English abstract).

Aliasgharzad, N., Neyshabouri, M.R. and Salimi, G., 2006. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and *Bradyrhizobium japonicum* on drought stress of soybean. Biologia. 61, 324-328.

Andersen, M.N., Asch, F., Wu, Y., Jensen, C.R., Næsted, H., Mogensen, V.O. and Koch, K.E., 2015. Soluble invertase expression is an early target of drought stress during the critical, abortion-sensitive phase of young ovary development in maize. Plant Physiology. 130, 591–604.

Anna, L.B., Alessandra, S., Claudia, E., Paola, C. and Maddalena, D.G., 2013. In vitro and in vivo inoculation of four endophytic bacteria on *Lycopersicon esculentum*. New Biotechnology. 30, 666–674.

Aroca, R., Ruiz-Lozano, J.M., Zamarreno, A.M., Paz, J.A., Garcia-Mina, J.M. and Pozo, M.J., 2013. Arbuscular mycorrhizal symbiosis influences strigolactone production under salinity and alleviates salt stress in lettuce plants. Journal of Plant Physiology. 170, 47-55.

Ashrafuzzaman, M., Hossen, F.A., Razi, I.M., Anamul, H.M., Zahurul, I.M., Shahidullah, S.M. and Sariah, M., 2009. Efficiency of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) for the enhancement of rice growth. African Journal of Biotechnology. 8, 1247-1252.

Askary, M., Mostajeran, A. and Amooaghaei, R., 2009. Influence of the co-inoculation *Azospirillum brasilense* and *Rhizobum meliloti* plus 24-D on grain yield and N P K content of *Triticum aestivum* (Cv Baccros and mahdavi). American-Eurasian Journal of Agriculture and Environment Science. 5, 296-307.

Awari, V.R. and Mate, S.N., 2015. Effect of drought stress on early seedling growth of chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes. International Journal of Life Sciences Research. 2, 356–361.

Bano, A. and Fatima, M., 2009. Salt tolerance in *Zea mays* (L.) following inoculation with Rhizobium and *Pseudomonas*. Biology and Fertility of Soils. 45, 405–413.

Bashan, Y. and de-Bashan, L.E., 2010. Chapter two—How the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* promotes plant growth–a critical assessment. Advances in Agronomy. 108, 77–136.

Bashan, Y., de-Bashan, L.E., Prabhu, S.R. and Hernandez, J.P., 2014. Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: formulations and practical perspectives (1998–2013). Plant Soil. 378, 1–33.

Bechtold, U., 2018. Plant life in extreme environments: How do you improve drought tolerance? Frontiers in Plant Science. 9, 543.

Bethlenfalvay, G.J., Brown, M.S., Ames, R.N. and Thomas, R.E., 1988. Effects of drought on host and endophyte development in mycorrhizal soybeans in relation to water use and phosphate uptake. Physiologia Plantarum. 11, 565-S71.

Bhattacharyya, P.N. and Jha, D.K., 2012. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. World Journal of Microbiology and Biotechnology. 28, 1327–1350.

Bianco, C. and Defez, R., 2011. Soil bacteria support and protect plants against abiotic stresses. In: Shanker, A. (Ed.), Abiotic Stress in Plants—Mechanisms and Adaptations. In TechOpen, Rijeka, Italy. pp. 143-170.

Borzoei, A., Kafe, M., Khazaei, H.R. and Mosavi Shelmani, M.A., 2012. Effects of saline irrigation water on root traits of two saline sensitive and resistance wheat cultivars and its relationship with grain yield in greenhouse condition. Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture. 8, 95-106.

Cakmaci, R., Akmakc, I.A., Figen, B., Adil, A., Fikrettin, S. and Ahin, B.C., 2005. Growth promotion of plants by plant growth promoting rhizobacteria under greenhouse and two different field soil conditions. Biochemistry. 38, 1482-1487.

Cheng, Z., Park, E. and Glick, B.R., 2007. 1-Aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase from *Pseudomonas* putida UW4 facilitates the growth of canola in the presence of salt. Canadian Journal of Microbiology. 53, 912-918.

Cooper, K.M., 1984. Physiology of VA mycorrhizal associations. In: VA Mycorrhiza, Powell, C. L., and D. J. Bagyaraj (eds). CRC Press, Boca Raton, Fl, pp. 155-186.

Copetta, A., Lingua, G., Berta, G., 2006. Effects of three AM fungi on growth, distribution of glandular hairs, and essential oil production in *Ocimum basilicum* L. var. Genovese. Mycorrhiza. 16, 485-494.

Emadi, A., Jones, R.J. and Brodsky, R.A., 2009. Cyclophosphamide and cancer: golden anniversary. Nature Reviews Clinical Oncology. 6, 638-647.

Fahad, S., Hussain, S., Bano, A., Saud, S., Hassan, S., Shan, D., Ahmed Khan, F., Khan, F., Chen, Y., Wu, C., Tabassum, M.A., Chun, M.X., Afzal, M., Jan, A., Tariq Jan, M. and Huang, J., 2015. Potential role of phytohormones and plant growth-promoting rhizobacteria in abiotic stresses: consequences for changing environment. Environmental Science and Pollution Research. 22, 4907–4921.

Fitter, A.H., 1985. Functioning of vesicular-arbuscular mycorrhizas under field conditions. New Phytology. 99, 257-265.

Frolov, A., Bilova, T., Paudel, G., Berger, R., Balcke, G.U., Birkemeyer, C. and Wessjohann, L.A., 2017. Early responses of mature *Arabidopsis thaliana* plants to reduced water potential in the agar-based polyethylene glycol infusion drought model. Journal of Plant Physiology. 208, 70–83.

Gagne-Bourgue, F., Aliferis, K.A., Seguin, P., Rani, M., Samson, R. and Jabaji, S., 2013. Isolation and characterization of indigenous endophytic bacteria associated with leaves of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) cultivars. Journal of Applied Microbiology. 2, 40-47.

Ghahraman, A., 1987. Plant systematic. Tehran University Press. 350 pp. (In Persian)

Ghorchiani, M., Akbari, G., Alikhani, H.A., Allahdadi, I. and Zarei, M., 2011. Effect of arbuscular mycorrhiza fungi and *Pseudomonas florescence* bacterium on the ear traits, chlorophyll content and yield of *Zea mays* L. under moisture stress conditions, Water and Soil Science. 21, 97-114

(In Persian with English abstract).

Giasson, P., Karam, A. and Jaouich, A., 2008. Arbuscular mycorrhizae and alleviation of soil stresses on plant growth. In: Siddiqui Z.A, Akhtar M. S. and Futai, K. (eds) Mycorrhizae: Sustainable Agriculture and Forestry. Springer, Dordrecht, The Netherlands, Pp. 99-134.

Giovannetti, M. and Mosse, B., 1980. An evaluation of techniques for measuring vesicular-arbescular mycorrhizal infection in roots. Journal of New Phytologist. 84, 489-500.

Greenvay, H. and Munns, R., 1980. Mechanism of salt tolerance of non-halophytes. Plant Physiology. 31, 149-190.

Hamayun, M., Khan, S.A., Khan, A.L., Shin, J.H. and Lee, I.J., 2010. Exogenous gibberellic acid reprograms soybean to higher growth, and salt stress tolerance. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 58, 7226–7232.

Hamidi, A., Ghalavand, A., Dehghan Shoar, M., Malakooti, M. and Chogan, R., 2006. Effects of plant growth promoting rhizobacteria on yield of forage corn. Journal of Research and production. 70, 16-22.

Hardoim, P.R., Van Overbeek, S.V. and Van Elsas, J.D., 2008. Properties of bacterial endophytes and their proposed role in plant growth. Trends in Microbiology. 16, 463–471.

Hayat, R., Ali, S., Amara, U., Khalid, R. and Ahmed, I., 2010. Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: a review. Annals of Microbiology. 60, 579–598.

He, F., Sheng, M. and Tang, M., 2017. Effects of rhizophagus irregularis on photosynthesis and antioxidative enzymatic system in *Robinia pseudoacacia* L. under drought stress. Frontiers in Plant Science. 8,183.

Jay, P.V., Janardan, Y., Kavindra, N.T. and Ashok, K., 2013. Effect of indigenous *Mesorhizobium* spp. and plant growth promoting rhizobacteria on yields and nutrients uptake of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under sustainable agriculture. Ecological Engineering. 51: 282–286.

Johnson, C.R. and Hummel, R.L., 1985. Influence of Mycorrhizal and drought stress on growth of poncirus X citrus seedlings. Horticultural Science. 20, 754-755.

Karthikeyan, B., Jaleel, C.A., Gopi, R. and Delveekasundarm, M., 2007. Alterations in seedling vigour and antioxidant enzyme activitvities in *Catharanthus roseus* under seed priming with native diazotrophs. Journal of Zhejiang University Science. 8, 453-457.

Kumar, D., 1984. The value of certain plant parameters as an index for salt tolerance in Indian mustard (*Brassica juncea* L.). Plant and Soil. 79, 261-272.

Laxa, M., Liebthal, M., Telman, W., Chibani, K. and Dietz, K.J., 2019. The Role of the plant antioxidant system in drought tolerance. Antioxidants. 8, 94, doi:10.3390/antiox8040094.

Li, P., Zhang, Y., Wu, X. and Liu, Y., 2018. Drought stress impact on leaf proteome variations of faba bean (*Vicia faba* L.) in the Qinghai–Tibet Plateau of China. 3 Biotech. 8, 110.

Ma, Y., Prasad, M.N.V., Rajkumar, M. and Freitas, H., 2011. Plant growth promoting rhizobacteria and endophytes accelerate phytoremediation of metalliferous soils. Biotechnology Advances. 29, 248-258.

Mahfouz, S.A. and Sharaf-Eldin, M.A., 2007. Effect of mineral vs biofertilizer on growth yield and essential oil content of fennel (*Foeniculum vulgare*). International Agrophysics. 21, 361-366.

Marinkovic, J., Dordevic, V., Balesevic-Tubic, S., Bjelic, D., Vucelic-Radovic, B. and Josic, D., 2013. Osmotic stress tolerance, PGP traits and RAPD analysis of *Bradyrhizobium japonicum* strains. Genetika. 45, 75–86.

Mishra, M., Kumar, U., Mishra, P.K. and Prakash, V., 2010. Efficiency of plant growth promoting rhizobacteria for the enhancement of *Cicerarietinum* L. growth and germination under salinity. Advances in Biological Research. 4, 92-96.

Munns, R., 2002. Comparative physiology of salt and water stress. Plant, Cell and Environment. 25, 239-250.

Nadeem, M., Li, J., Yahya, M., Sher, A., Ma, C., Wang, X. and Qiu, L., 2019. Research progress and perspective on drought stress in legumes: a review. International Journal of Molecular Sciences. 20, 25-41, doi:10.3390/ijms20102541.

Nadeem, S.M., Ahmad, M., Zahir, Z.A., Javaid, A. and Ashraf, M., 2014. The role of mycorrhizae and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in improving crop productivity under stressful environments. Biotechnology Advances. 32, 429–448.

Nezarat, C. and Gholami, A., 2009. Effect of plant growth promoting rhizobacteria on agronomic traits of maize under water stress, 11th Iranian Soil Science Congress, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, 11th - 13th June, Gorgan, Iran. (In Persian).

Ojaghloo, F., Farah wash, F., Hasanzadeh, A. and Pouryousef, M., 2007. Effect of inoculation with bio fertilizers (*Azotobacter* and phosphate solvent bacteria) on yield and yield components of safflower. Journal of Agricultural Sciences. Islamic Azad university, Branch of Tabriz. 1, 64-75.

Osmolovskaya, N., Shumilina, J., Kim, A., Didio, A., Grishina, T., Bilova, T., Keltsieva, O.A., Zhukov, V., Tikhonovich, I. and Tarakhovskaya, E., 2018. Methodology of drought stress research: experimental setup and physiological characterization. International Journal of Molecular Sciences. 19, 4089.

Parmar, N. and Dufresne, J., 2011. Beneficial interactions of plant growth promoting rhizosphere microorganisms. Soil Biology. 28, 27-42.

Patil, N.B., Gajbhiye, M., Ahiwale, S.S., Gunjal, A.B. and Kapadnis, B.P., 2011. Optimization of Indole 3acetic acid (IAA) production by *Acetobacter diazotrophicus* L1 isolated from Sugarcane. International Journal of Environmental Sciences. 2, 295-302.

Rojas-Tapias, D., Moreno-Galván, A., Pardo-Díaz, S., Obando, M., Diego Rivera, D. and Ruth Bonilla, R., 2012. Effect of inoculation with plant growth-promoting bacteria (PGPB) on amelioration of saline stress in maize (*Zea mays*). Applied Soil Ecology (Microorganisms and the Sustainable Management of Soil). 61, 264–272.

Saadat, A., Savaghebi, G.H.R., Rejali, F., Khavazei, K. and Shirmardi, M., 2009. The evaluation of some plant growth promoting *Pseudomonas fluorescence* strains and arbuscular mycorrhizal fungi on root colonization of wheat (Cistan and Chamran cultivars).11th Iranian Soil Science Congress, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, 11th -13th June, Gorgan, Iran. (In Persian).

Sabeti, H., 2007. Forests, trees and shrubs of Iran. Yazd University Press, Yazd, Iran.

Safapour, M., Ardakani, M.R., Khaghani, S., Teymoori, M. and Hezaveh, H., 2012. The influence of mycorrhizal fungi and rhizobium bacteria on nutrient uptake and phytohormonal fluctuations of three red been (*Phaseolus vulgaris* L.) Genotypes.

Archives Des Sciences Journal. 5, 465-473.

Saikia, S.P., Dutta, S.P., Goswami, A., Bahau, B.S. and Kanjilal, P.B., 2010. Role of *Azospirillum* in the improvement of legumes. Microbes for Legume Improvement. 389-408. doi:10.1007/978-3-211-99753-6-16.

Sehgal, A., Sita, K., Siddique, K.H.M., Kumar, R. and Oliver, M.J., 2018. Drought or/and heat-stress effects on seed filling in food crops: Impacts on functional biochemistry, seed yields, and nutritional quality. Frontiers in Plant Science. 9, 1705.

Shirinbayana, S., Khosravi, H. and Malakouti, M.J., 2019. Alleviation of drought stress in maize (*Zea mays*) by inoculation with *Azotobacter* strains isolated from semi-arid regions. Applied Soil Ecology. 133, 138–145

Singh, A.K., Hamel, C., DePauw, R.M. and Knox, R.E., 2012. Genetic variability in arbuscular mycorrhizal fungi compatibility supports the selection of durum wheat genotypes for enhancing soil ecological services and cropping systems in Canada. Canadian Journal Microbiology. 58, 293-302.

Sturz, A.V. and Christie, B.R., 2003. The management of soil quality and plant disease with rhizobacteria. Soil and Tillage Research. 72, 107- 123.

Talaat, N.B., Ghoniem, A.E., Abdelhamid, M.T. and Shawky, B.T., 2015. Effective microorganisms improve growth performance, alter nutrients acquisition and induce compatible solutes accumulation in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants subjected to salinity stress. Plant Growth Regulation. 75, 281–295.

Tavili, A., Zare, S., Moosavi, S.A. and Enayati, A., 2011. Effects of seed priming on germination characteristics of *Bromus* species under salt and drought conditions. American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences. 10, 163–168.

Vyas, P. and Gulati, A., 2009. Stress tolerance and genetic variability of phosphate solubilizing *Pseudomonas fluorescens* from the cold deserts of the trans-Himalayas. Microbial Ecology. 58: 425-434.

Whittemore, A.T., 2005. genetic structure, lack of introgression and taxonomic status in the *celtis laevigata-c. reticulata complex* (Cannabaceae). Journal of Systematic Botany. 30, 809–817.

Wu, Q.S. and Xia, R.X., 2006. Arbuscular mycorrhizal fungi influence growth, osmotic adjustment and photosynthesis of *Citrus* under well-watered and water stress conditions. Journal of Plant Physiology. 163, 417-425.

Yordanov, V. and Tsoev, T., 2000. Plant responses to drought, acclimation and stress tolerance. Photosynthica. 38, 171-186.

Zaidi, A. and Mohammad, S., 2006. Co-inoculation effects of phosphate solubilizing micro- organisms and *Glomus fasciculatum* on green gram-bradyrhizobium symbiosis. Agricultural Science. 30, 223 -230.

Zawoznik, M.S., Ameneiros, M., Benavides, M.P., Vázquez, S. and Groppa, M.D., 2011. Response to saline stress and aquaporin expression in *Azospirillum*-inoculated barley seedlings. Applied Microbiology and Biotechnology. 90, 1389–1397.

Environmental Sciences Vol.19 / No.2 / Summer 2021

39-56

The impact of biological inputs on drought stress resistance in *Celtis caucasica* L. seedlings

Amin Heidarpour Monfared [1*], Mohammad Reza Pourmajidian [1], Farhad Rejali [2], Mohammad Hojati [1] and Parvin Ramak [3]

[1] Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran
[2] Soil and Water Research Institute, Agricultural Education and Extension Research Organization, Karaj, Iran
[3] Agricultural Researches and Natural Resources Center, Khoramabad, Iran

Received: 2019.10.20 Accepted: 2020.01.15

Heidarpour Monfared, A., Pourmajidian, M.R., Rejali, F., Hojati, M. and Ramak, P., 2021. The impact of biological inputs on drought stress resistance in *Celtis caucasica* L. Environmental Sciences. 19(2):39-56.

Introduction: Unfavorable environmental conditions result in stress in plants and so disrupt their growth and survival. Today, soil microorganisms, especially fungi and growth-promoting bacteria, involved in various biological processes in plant growth and soil nutrient cycling, are suggested to reduce the effects of environmental stress.

Materials and methods: In order to investigate the effect of drought stress and biological inputs on vegetative characteristics of *Celtis caucasica* (diameter and height growth, root length, fresh and dry weight of root and shoot, and seedling colonization), a factorial experiment (Mycorrhizal factors in two levels of inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and without inoculation (control), bacteria in four levels of Pseudomonas, Azpyrilum, Azotobacter and control treatments, and drought stress at three levels of field capacity (80, 60 and 40%)) was performed in a complete randomized block design and four replications in the greenhouse of the Natural Resources Office in Lorestan Province.

Results and discussion: The results showed that the highest diameter growth of *Celtis caucasica* L. seedlings was observed at moderate drought stress in Pseudomonas-fungi and Azotobacter-fungi treatments with an average of 0.554 and 0.525 mm, respectively. The highest height growth was observed at moderate drought stress in Pseudomonas-fungi and Azotobacter-fungi treatments with an average of 21.55 and 20.55 cm, respectively. The highest leaf area was observed at low drought stress in Pseudomonas-fungi and then with Azotobacter-fungi with

[*] Corresponding Author: a. heidarpour@sanru.ac.ir
http://dx.doi.org/10.52547/envs.31318

an average of 116 and 116.75 cm^2, respectively. The least of these traits was observed in high drought stress in the control group and azosperyllium treatment. The highest and lowest root length was observed at moderate drought stress in Pseudomonas and Azotobacter treatments, and at low drought stress in the control group and Pseudomonas-fungi treatments, respectively. The highest root fresh weight was observed at moderate drought stress in Azotobacter and Pseudomonas with an average of 16.7916 and 16.7941 g, respectively. The lowest values were obtained at low and moderate drought stress for the control group. The highest and lowest root dry weight was observed at high drought stress in Azotobacter and Pseudomonas treatments, and at low drought stress in control and Azospirillum-fungi treatments, respectively. The highest fresh and dry weight of shoot were obtained at moderate drought stress in Pseudomonas-fungi and Azotobacter-fungi treatments, and the lowest was observed at low drought stress in control and azosperyllium treatments. The highest percentage of colonization was observed in low drought stress in Pseudomonas-fungi and Azotobacter-fungi treatments with an average of 44.175 and 42.675%, respectively; and the lowest was observed at high drought stress in the control group with 26.42% and azosperyllium treatments, with 26.695%.

Conclusion: Microbial and fungal factors and their interactions increase root colonization, plant growth characteristics, and water uptake and thus increase plant tolerance to adverse environmental conditions such as drought stress.

Keywords: Azospirillum, Growth promoting bacteria, Arbuscular Mycorrhizae, Environmental stress, Pseudomonas