روابط خاک و گیاه / سال سیزدهم / شماره دوم / تابستان ۱۴۰۱ / صفحات ۸۱-۶۷

مقاله پژوهشی

# تأثیر باکتری‌های محرک رشد بر عملکرد و ویژگی‌های مورفولوژیک ریشه جو در شرایط مختلف رطوبتی

اسماعیل کریمی[1*]، ناصر علی‌اصغرزاد[2]، سید بهمن موسوی[1] و علی اصغر علیلو[3]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۵/۱۶)

## چکیده

**باکتری‌های محرک رشد گیاهان می‌توانند موجب تغییر ویژگی‌های ریشه شده و عملکرد گیاهان را به‌ویژه در شرایط تنش رطوبتی افزایش دهند. برای بررسی این موضوع آزمایشی گلدانی با مایه‌زنی سه سویه مختلف از باکتری *باسیلوس سیمپلکس* (سویه‌های ۲-۳۱، ۳-۴۲ و ۴-۵۱)، دو سطح رطوبتی شامل ۸۰ و ۵۰ درصد گنجایش مزرعه و دو رقم جو کویر و دشت اجرا شد. نتایج نشان دادند که مایه‌زنی با باکتری‌های مذکور به طور میانگین باعث افزایش ۲۸ درصدی عملکرد بیولوژیک جو در شرایط تنش رطوبتی در مقایسه با شاهد شدند. اثر باکتری‌ها در افزایش عملکرد بیولوژیک وابسته به رقم بوده و باکتری *Bacillus simplex* 31-2 در رقم کویر و باکتری *B. simplex* 42-3 در رقم دشت بیش‌ترین تأثیر معنی‌دار را داشت. بررسی روابط بین ویژگی‌های ریشه با عملکرد بیولوژیک جو نشان داد که همبستگی خطی بین آن‌ها وجود داشت به طوری که بیش‌ترین مقادیر ضریب تبیین ($R^2$) با صفات وزن تازه ریشه (۸۴٪)، حجم ریشه (۸۳٪) و سطح ریشه (۸۱٪) به‌دست آمد. با توجه به ارتباط بین صفت ریشه با عملکرد بیولوژیک جو و نقش باکتری *B. simplex* 31-2 در افزایش ۱۲۱ درصدی سطح ریشه در شرایط تنش رطوبتی به نظر می‌رسد که تأثیر بر صفات ریشه از مکانیسم‌های مهم این باکتری در افزایش عملکرد باشد. ولی عدم تأثیرپذیری ویژگی‌های ریشه در مقایسه با افزایش عملکرد بیولوژیک گیاه توسط مایه‌زنی با باکتری *B. simplex* 42-3 احتمالاً بیانگر بهبود در سایر فرآیندهای فیزیولوژیک است. در کل می‌توان نتیجه گرفت که باکتری‌های جنس *باسیلوس* بر تعدیل اثر منفی تنش رطوبتی در جو مؤثر بوده و این باکتری‌ها می‌توانند به‌عنوان کاندیدای مؤثر در تهیه کودهای زیستی مطرح باشند.**

**واژه‌های کلیدی:** اکسین، باسیلوس، گنجایش مزرعه، سطح ریشه، وزن خشک ریشه.

## مقدمه

کمبود آب مهم‌ترین عامل محدودکننده تولید در مقیاس جهانی به‌شمار می‌رود و مدل‌های آب و هوایی بر اساس افزایش دما و کاهش بارندگی‌های فصلی، احتمال وقوع خشکسالی‌ها را شدیدتر از گذشته پیش‌بینی می‌کنند (۹). ریشه گیاهان نقش مهمی در جذب آب ایفا می‌کند،

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه

۲- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۳- گروه ژنتیک و مهندسی تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: sm_ka80@yahoo.com



[ Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-07-17 ]

[ DOR: 20.1001.1.27835014.1401.13.2.6.6 ]

[ DOI: 10.47176/jspi.13.2.20531 ]

از این‌رو شناخت ویژگی‌های ریشه می‌تواند برای مدیریت بهینه منابع محیطی مختلف سودمند واقع شود (۱، ۲۰ و ۲۶). ویژگی‌های ریخت‌شناسی ریشه مانند قطر ریشه، سطح ریشه، تراکم طول ریشه و تراکم وزن آن می‌توانند عملکرد ریشه را به‌طور مستقیم متأثر ساخته و رشد اندام‌های هوایی را تقویت می‌کند (۳۴). همچنین گیاهانی که طول ریشه اصلی، تعداد ریشه‌های جانبی، تراکم طول ریشه و نسبت ریشه به اندام هوایی بیش‌تری دارند در مقایسه با گیاهان بدون این ویژگی‌ها شرایط خشکی را بهتر تحمل می‌کنند (۳۰). سیستم ریشه‌ای عمیق‌تر با سهولت دسترسی به منابع آب یکی دیگر از عوامل مهم در جذب آب از خاک در شرایط تنش رطوبتی به شمار می‌رود (۱۱).

باکتری‌های محرک رشد نقش شناخته‌شده‌ای در بهبود مقاومت گیاهان به تنش رطوبتی در خاک دارند. آن‌ها می‌توانند با تولید هورمون‌های گیاهی مانند اسید آبسیزیک و ایندول-۳-استیک اسید، تولید ACC-دآمیناز برای کاهش سطح اتیلن در ریشه، تحمل سیستمیک ناشی از متابولیت‌های و اگزوپلی-ساکاریدهای باکتریایی در مدیریت تنش‌های زیستی و غیرزیستی به گیاهان کمک کنند (۳۵). باکتری‌های محرک رشد می‌توانند کشسانی دیواره اولیه سلول‌های ریشه را بهبود ببخشند که این تغییر یکی از شیوه‌های افزایش تحمل کمبود آب به‌شمار می‌رود (۱۰). تلقیح گیاه نخود فرنگی با *سودوموناس فلورسنس* تولیدکننده ACC-دآمیناز با افزایش طول ریشه به افزایش جذب آب از خاک در شرایط تنش خشکی کمک می‌کند (۳۶). تلقیح با ریزوباکتری‌های مولد ACC-دآمیناز باعث افزایش طول ریشه، وزن ریشه و تعداد ریشه‌های جانبی گندم نسبت به شاهد بدون مایه‌زنی شده و در نتیجه رشد و عملکرد آن را در شرایط تنش خشکی بهبود بخشید (۱۷). در شرایط کنترل‌شده، تلقیح همزمان *باسیلوس B-۲۳* مولد ACC دآمیناز، *سودوموناس P-۶* و *مزوریزوبیوم سیسیر* با ارقام نخود کابلی و دسی در شرایط تنش رطوبتی ضمن افزایش درصد جوانه‌زنی، طول ریشه، طول ساقه و وزن تازه گیاهچه‌های نخود را نیز در مقایسه با شرایط بدون مایه‌زنی افزایش داد (۲۰). ناصری و همکاران (۲۰) گزارش کردند که مایه‌زنی باکتری *سودوموناس پوتیدا* و قارچ *فانلایفورمیس موسا* در دو رقم گندم کراس سبلان و ساجی می‌تواند ویژگی‌های ریشه آن‌ها مانند وزن تازه، وزن خشک، حجم، سطح، طول مخصوص (نسبت طول ریشه به جرم آن)، تراکم طول (مجموع طول ریشه در واحد حجم خاک)، چگالی بافت ریشه، تراکم حجم (وزن ریشه در واحد حجم خاک)، چگالی سطح (سطح ریشه در واحد حجم خاک) و تعداد و طول ریشه‌های بذری و گره‌ای را به‌طور معنی‌داری در شرایط متفاوت تغذیه‌ای تغییر دهد. تنش‌های محیطی مانند تنش خشکی باعث افزایش همیاری بین میکروب‌های مفید ریزوسفری و گیاهان شده و نتیجه این تعامل افزایش مقاومت گیاهان میزبان به تنش رطوبتی با مکانیسم‌های متعددی از جمله اثر بر ویژگی‌های ریشه شده است (۲۴ و ۳۵). این همیاری یکی از راهکارهای اجتناب از خشکی در گیاهان در معرض تنش بوده که به وفور در گیاهان خانواده گرامینه (گندمیان) نیز گزارش شده است (۳۳). با توجه به آنچه که اشاره شد در این پژوهش تلاش شد تا تأثیر باکتری‌های محرک رشد گیاه که برای اولین بار از ریشه گرامینه‌های وحشی منطقه هشترود جداسازی شده بودند، بر بهبود ویژگی‌های ظاهری ریشه گیاه جو زراعی و ارتباط آن‌ها با عملکرد این گیاه در شرایط تنش رطوبتی مورد بررسی قرار گیرد.

## مواد و روش‌ها

### انتخاب باکتری‌ها

در این پژوهش سه باکتری محرک رشد گیاه از جنس *باسیلوس* با اسامی *Bacillus simplex* 42-3, *Bacillus simplex* 31-2 *Bacillus simplex* 56-1، استفاده شدند. باکتری‌های مذکور که از ریزوسفر گرامینه‌های علفی و غیرزراعی منطقه هشترود واقع در استان آذربایجان‌شرقی جداسازی و شناسایی ژنتیکی شده‌اند در مجموعه باکتریایی آزمایشگاه بیولوژی خاک دانشگاه مراغه نگهداری می‌شوند (۱۲). برای ارزیابی مقاومت باکتری‌های



[ Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-07-17 ]
[ DOR: 20.1001.1.27835014.1401.13.2.6.6 ]
[ DOI: 10.47176/jspi.13.2.20531 ]

**جدول ۱.** برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش گلدانی.

**Table 1.** Some physical and chemical characteristics of the soil used in pot experiment.

| Soil texture | Field capacity (%w/w) | $pH_e$ | $EC_e$ (dS $m^{-1}$) | TNV (%) | Zn | Fe | K | P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Available concentration (mg $kg^{-1}$) | | | |
| Sandy loam | 23 | 7.9 | 0.65 | 15 | 0.93 | 5.4 | 330 | 17 |

مورد بررسی به تنش خشکی، محیط کشت آگار مغذی حاوی پلی‌اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ تهیه شده و باکتری‌ها به‌صورت نقطه‌ای در آن‌ها کشت شدند. برای تهیه محیط کشت مذکور پلی‌اتیلن گلیکول با غلظت ۲۵ درصد به صورت مجزا اتوکلاو شد و پس از تهیه محیط کشت آگار مغذی، بر روی این محیط کشت در زیر هود میکروبی ریخته شده و به مدت ۱۰ ساعت نگه‌داری شد. پس از مدت زمان مذکور که پلی‌اتیلن گلیکول جذب محیط آگار مغذی شد، مایع رویی دور ریخته شده و محیط کشت حاصل مورد استفاده قرار گرفت. ظروف کشت باکتری‌ها به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۳۰ درجه سلسیوس نگهداری شده و رشد کلنی‌ها به‌صورت چشمی مورد ارزیابی قرار گرفت (۳۳).

میزان تولید اکسین توسط باکتری‌ها با استفاده از معرف سالکوکسی (۷) و فعالیت آنزیم ACC-دآمیناز با استفاده از سوبسترای ۱-آمینوسیکلوپروپان ۱- کربوکسیلیک (ACC) و اندازه‌گیری آلفا-کتوبوتیرات تولید شده در طول موج ۵۴۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد (۱۳).

**پژوهش‌های گلخانه‌ای**

به‌منظور بررسی تأثیر مایه‌زنی باکتری‌های مورد استفاده بر عملکرد جو در شرایط تنش رطوبتی، آزمایشی گلدانی به‌صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در گلخانه پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه انجام شد. تیمارهای این پژوهش شامل دو سطح رطوبتی (۸۰ و ۵۰ درصد گنجایش مزرعه)، چهار سطح باکتریایی (مایه‌زنی باکتریایی *B. simplex* با سویه‌های ۲-۳۱، ۳-۴۲ و ۱-۵۶ و عدم مایه‌زنی) و دو رقم جو (کویر و دشت) بود. خاک مورد استفاده در کشت گلدانی با ویژگی‌های درج شده در جدول (۱) با اتوکلاو استریل شده و بذور جو گندزدایی شده (به مدت ۱۰ دقیقه در وایتکس ۲ درصد و سپس ۴۰ ثانیه در الکل ۷۰ درصد) پس از مایه‌زنی با باکتری‌ها در این بستر کشت شدند. رشد گیاه در شرایط دمای ۲۸ درجه سلسیوس، رطوبت نسبی ۶۰ درصد و شدت نور ۳۰۰۰ لوکس انجام شد. تنظیم رطوبت گلدان‌ها پس از تعیین رطوبت گنجایش مزرعه‌ای خاک مورد استفاده، بر اساس تیمارهای تنش آبی این پژوهش به‌صورت وزنی و با ترازو انجام شد و پس از ظهور گیاهچه‌ها، یکسان‌سازی تعداد بوته‌ها در تمامی گلدان‌ها انجام شد. آزمایش تا مرحله رسیدگی بذور جو ادامه یافت.

**اندازه‌گیری عملکرد بیولوژیک و ویژگی‌های ریشه گیاه جو**

اندام هوایی گیاه در مرحله رسیدگی دانه با کد زادکس ۹۸ (ساقه، سنبله و برگ) به‌صورت کف‌بر برداشت شده و در دمای ۶۰ تا ۷۰ درجه سلسیوس در آون خشک شده و با ترازوی دقیق توزین شد. سپس خاک گلدان‌ها به‌آرامی با شستشوی ملایم خاک با آب شهری خارج شده و ریشه‌ها در درون الک دو میلی‌لیتری، با آب شهری کاملاً تمیز شسته شده و آب اضافی ریشه‌ها با دستمال کاغذی دولایه گرفته شد. وزن تازه ریشه‌ها با ترازوی دقیق تعیین شده و حجم ریشه‌ها با روش جابجایی سیال (آب) به‌دست آمد. وزن خشک ریشه‌ها پس از قرار گرفتن آن‌ها در آون با دمای ۷۰ درجه سلسیوس با ترازو تعیین شده و سایر ویژگی‌های ریشه به شرح زیر محاسبه شدند (۲):

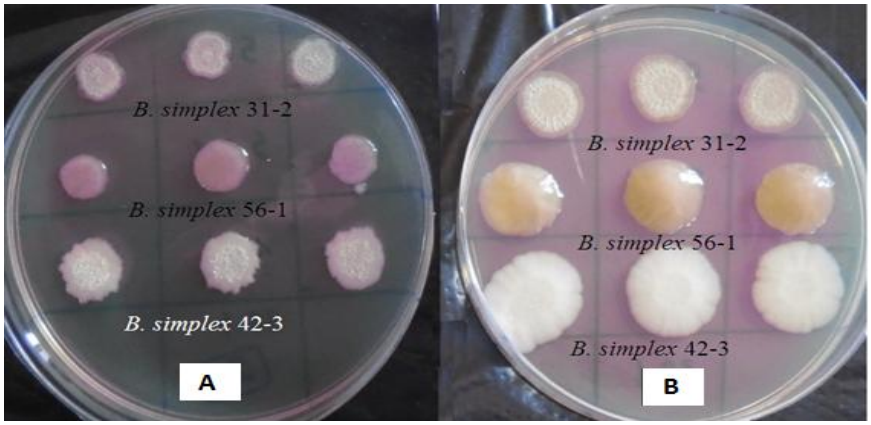
= چگالی بافت ریشه[1] (g $cm^{-3}$)

(۱) حجم ریشه ($cm^{-3}$) ÷ وزن خشک ریشه (g)

1. Root tissue density



[ Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-07-17 ]
[ DOR: 20.1001.1.27835014.1401.13.2.6.6 ]
[ DOI: 10.47176/jspi.13.2.20531 ]




**شکل ۱.** ارزیابی توانایی رشد باکتری‌ها مورد بررسی در محیط کشت آگار مغذی همراه با پلی‌اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ (A) و بدون آن (B) پس از ۳۶ ساعت؛ باکتری‌ها در سه تکرار در یک ردیف کشت شده‌اند.

**Fig. 1.** Assessing the growth ability of the studied bacteria on nutrient agar culture medium including polyethylene glycol 6000 (A) and without it (B) after 36 hours; Bacteria were cultured in three replications in the row.

(۲) ۰/۸۹ × وزن ریشه (g) = طول ریشه[1] (m) = سطح ریشه[2] ($cm^2$)

(۳) $^{0/5}$(طول ریشه (cm) × π × حجم ریشه ($cm^{-3}$))۲ = قطر ریشه[3] (mm)

(۴) $^{0/5}$(π × طول ریشه (m)) ÷ وزن تازه ریشه (g) × ۴) = تراکم سطح ریشه[4] ($cm^2\ cm^{-3}$)

(۵) (π × طول ریشه (m) × قطر ریشه (mm))

داده‌های به‌دست آمده پس از آزمون نرمال بودن، با استفاده از نرم‌افزار MSTATC تجزیه آماری شدند. مقایسه میانگین داده‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

## نتایج و بحث

### ارزیابی مقاومت به کم‌آبی در باکتری‌ها

بر اساس ارزیابی‌های چشمی از اشکال کلنی باکتری‌ها، اگرچه تنش رطوبتی باعث کاهش رشد باکتری‌ها شد ولی هر سه باکتری توانستند در شرایط تنش رطوبتی رشد قابل قبولی داشته باشند (شکل ۱). بر اساس بررسی‌های انجام شده توسط کریمی و همکاران (۱۲)، این باکتری‌ها در زمره قوی‌ترین تولیدکنندگان بیوفیلم باکتریایی هستند. بیوفیلم میکروبی یک عامل محافظتی در برابر شرایط نامطلوب محیطی مانند تنش رطوبتی محسوب می‌شود؛ لذا رشد آن‌ها در این شرایط قابل توجیه هست.

بر اساس نتایج به‌دست آمده، هر سه باکتری توانایی تولید اکسین و آنزیم ACC- دآمیناز را داشتند و میزان تولید آن‌ها از لحاظ آماری در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (داده‌ها نشان داده نشده‌اند). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیش‌ترین میزان تولید اکسین (۳۲/۲ میلی‌گرم در لیتر) توسط باکتری *B. simplex* 31-2 صورت گرفت در حالی‌که بیش‌ترین فعالیت ACC -دآمینازی (۱/۲واحد) در باکتری *B. simplex* 56-2 مشاهده شد (جدول ۲). بیش از ۸۰ درصد باکتری‌های ریزوسفری قادر به تولید هورمون اکسین هستند. افزایش اندازه، وزن و شمار انشعابات ریشه از مواردی هستند که متأثر از اکسین بوده و بنابراین با قرار گرفتن حجم بیش‌تری از خاک در اختیار گیاه، میزان دسترسی به عناصر در آن و نهایتاً عملکرد گیاه افزایش می‌یابد (۱۵). معدودی از باکتری‌های محرک رشد آنزیم ACC-دآمیناز تولید می‌کنند و این آنزیم می‌تواند ACC را به کتوبوتیرات و آمونیوم تبدیل کرده و میزان تولید اتیلن را در گیاهان در حال رشد و یا در معرض تنش کاهش دهد.

1. Root length
2. Root surface
3. Root diameter
4. Root surface area density

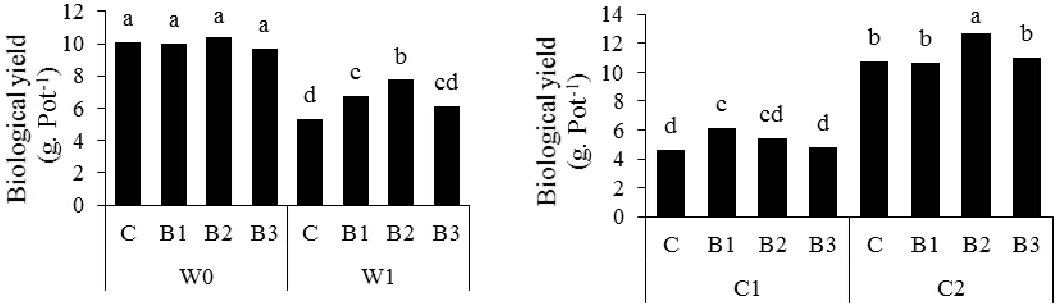


[ Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-07-17 ]
[ DOR: 20.1001.1.27835014.1401.13.2.6.6 ]
[ DOI: 10.47176/jspi.13.2.20531 ]

**جدول ۲.** توانایی تولید اکسین و فعالیت ACC دآمینازی باکتری‌های مورد بررسی؛ میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

**Table 2.** Auxin production and ACC deaminase activity of the studied bacteria; Means within a column with at least one similar letter are not significantly different at the probability level of 5% based on Duncan test.

| Bacteria | Auxin production ($mg\ L^{-1}\ 3days^{-1}$) | ACC deaminase activity ($\mu mol\ \infty$-ketobotyrate $36h^{-1}$) |
|---|---|---|
| B1: *B. simplex* 31-2 | 32.2a | 0.79c |
| B2: *B. simplex* 56-1 | 7.2c | 1.22ab |
| B3: *B. simplex* 42-3 | 15.4b | 0.9bc |




**شکل ۲.** تأثیر مایه‌زنی باکتریایی بر عملکرد بیولوژیک جو؛ C1 و C2 به‌ترتیب بیانگر ارقام کویر و دشت جو، W0 و W1 به‌ترتیب بیانگر سطوح تنش رطوبتی ۸۰ و ۵۰ درصد گنجایش مزرعه، C تیمار بدون مایه‌زنی باکتریایی، B1 باکتری *B. simplex* 31-2، B2 باکتری *B. simplex* 56-1 و B3 باکتری *B. simplex* 42-3، است؛ میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

**Fig. 2.** The effect of bacterial inoculation on the biological yield of barley; C1 and C2 represent the Dasht and Kavir barley cultivars, respectively, W0 and W1 express moisture stress levels of 80 and 50% of field capacity, respectively, C shows treatment without bacterial inoculation, B1: *B. simplex* 31-2, B2: *B. simplex* 56-1 and B3: *B. simplex* 42-3; Means with at least one similar letter are not significantly different based on Duncan test at the probability level of 5%.

کلونیزاسیون ریشه گیاهان با چنین باکتری‌هایی با کاهش سطح تولید اتیلن از تأثیر سوء تنش‌های محیطی مانند خشکی جلوگیری می‌کند (۱۵). شوارتز و همکاران (۲۶) گزارش کردند که مایه‌زنی نهال درخت هلو با باکتری *باسیلوس سیمپلکس* سویه 30N-5 با توان تولید آنزیم یاد شده، موجب تغییرات مورفولوژیک و معماری ریشه این نهال و افزایش رشد اندام‌های هوایی آن شده است.

## پژوهش‌های گلخانه‌ای

### عملکرد بیولوژیک جو

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد که اثر برهم‌کنش رقم × باکتری ($p\leq0.05$) و اثر برهم‌کنش رطوبت خاک × رقم ($p\leq0.01$) بر عملکرد بیولوژیک جو معنی‌دار شدند (جدول ۲). بر اساس نتایج مقایسه میانگین، رقم کویر در مقایسه با رقم دشت در هر دو سطح رطوبتی خاک عملکرد بیولوژیک کم‌تری داشت (شکل ۲). این نتیجه با یافته‌های پاک‌نژاد و همکاران (۲۱) همخوانی دارد که گزارش کرده‌اند در شرایط تنش خشکی آخر فصل زراعی، عملکرد ماده خشک رقم دشت ۴۴ درصد بیش‌تر از رقم کویر شد. تنش رطوبتی باعث کاهش ۵۰ درصدی عملکرد بیولوژیک هر دو رقم جو شد (شکل ۲). اثر مایه‌زنی باکتریایی بر عملکرد بیولوژیک جو در شرایط بدون تنش معنی‌دار نبود اما در شرایط تنش رطوبتی، باکتری‌های B1، B2 و B3 به‌ترتیب توانستند باعث افزایش ۲۶، ۴۵ و ۱۴ درصدی عملکرد بیولوژیک آن در مقایسه با تیمار شاهد در همان سطح تنش رطوبتی شوند. عملکرد باکتری‌ها در این خصوص وابسته به رقم جو بود؛ در رقم کویر باکتری B1 و در رقم دشت باکتری B2 مؤثرتر عمل کرد (شکل ۲).



[ Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-07-17 ]
[ DOR: 20.1001.1.27835014.1401.13.2.6.6 ]
[ DOI: 10.47176/jspi.13.2.20531 ]

**تأثیر تیمارهای آزمایشی بر ویژگی‌های ریشه جو**

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳) نشان داد که اثر برهم‌کنش سه‌جانبه رطوبت × رقم × باکتری بر ویژگی‌های ریشه معنی‌دار نشد. در حالی‌که اثر برهم‌کنش رطوبت × باکتری بر چگالی بافت، وزن خشک، رطوبت وزنی، طول، سطح، قطر و چگالی سطح ریشه در سطح یک درصد معنی‌دار شد ولی اثر آن بر حجم و وزن تازه ریشه معنی‌دار نبود. اثر برهم‌کنش رقم × باکتری بر وزن خشک، طول و سطح ریشه در سطح احتمال یک درصد و بر حجم، قطر و چگالی ریشه در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شده ولی اثر آن بر صفات چگالی بافت، وزن تازه و رطوبت وزنی ریشه معنی‌دار نشد.

نتایج مقایسه میانگین ویژگی‌های ریشه در شکل‌های (۳، ۴ و ۵) ارائه شده است. ریشه‌ها نقش حیاتی در جذب آب و عناصر غذایی دارند. بنابراین اطلاع از ویژگی‌های جذب و انتقال مواد توسط ریشه می‌تواند برای گزینش گیاه مناسب و اصلاح آن در شرایط رطوبتی مختلف مؤثر واقع شود. بروز اختلالات متابولیسمی و کاهش رشد قسمت‌های مختلف گیاه مانند ریشه نتیجه وقوع تنش‌های محیطی مانند کم‌آبی است (۷). تنش کم‌آبی در مرحله اول بر زیست‌توده ریشه گیاه موثر است (۱۶) چرا که با کاهش شدت فتوسنتز و کاهش سهم ریشه از آسیمیلات‌ها، وزن تازه و خشک ریشه نیز کاهش می‌یابد (۱۴). از این رو کاهش ۵۴/۶ درصدی وزن خشک ریشه تک بوته جو در تیمار تنش رطوبتی نسبت به شرایط نرمال رطوبتی دور از انتظار نیست (شکل ۳). دومین تغییر حاصل از اختلالات متابولیسمی از نظر مورفولوژی بر قطر ریشه‌های ریز، طول، سطح ویژه و چگالی بافت ریشه بود. بر این اساس ۲۵ درصد کاهش در طول، ۱۶ درصد در سطح، ۲۲ درصد کاهش در چگالی سطح، ۵ درصد افزایش در قطر و ۱۸ درصد افزایش در رطوبت وزنی ریشه مشاهده شد (شکل ۳). چگالی بافت ریشه در شرایط تنش رطوبتی، ۲۱ درصد افزایش یافت (شکل ۴). سومین مورد از تغییرات در سطح سلولی و بافتی بوده و مربوط به قطر آوندهای چوبی ریشه‌ها است که در این پژوهش به‌دلیل محدودیت امکانات بررسی نشدند. با این‌حال تغییر در قطر آوندهای چوبی یکی از دلایل تغییر در چگالی بافتی ریشه عنوان شده است (۳۱). وزن خشک ریشه در شرایط نرمال رطوبتی در اثر مایه‌زنی باکتریایی ۳۹ درصد کاهش یافت ولی در شرایط تنش رطوبتی، باکتری‌ها تأثیری بر این صفت نداشتند (شکل ۳). طول ریشه در اثر مایه‌زنی با باکتری‌های B1 و B3 به‌ترتیب در شرایط نرمال رطوبتی ۹۸ و ۲۵ درصد و در شرایط تنش رطوبتی ۱۱۸ و ۸۱ درصد نسبت به تیمارهای شاهد نظیر سطوح رطوبتی مورد بررسی افزایش یافت (شکل ۳). اثر باکتری B2 بر این صفت معنی‌دار نبود. سطح ریشه در اثر مایه‌زنی با باکتری‌های B1 و B3 به‌ترتیب در شرایط نرمال رطوبتی ۱۰۶ و ۴۶ درصد و در شرایط تنش رطوبتی ۱۲۳ و ۱۰۰ درصد نسبت به تیمارهای شاهد نظیر سطوح رطوبتی افزایش یافت (شکل ۳). چگالی سطح ریشه در اثر مایه‌زنی با باکتری‌های B1 و B3 به‌ترتیب در شرایط نرمال رطوبتی ۸۸ و ۳۷ درصد و در شرایط تنش رطوبتی ۱۲۳ و ۹۰ درصد نسبت به تیمارهای شاهد نظیر سطوح رطوبتی افزایش یافت (شکل ۳). قطر ریشه هر چند از تیمار مایه‌زنی باکتریایی به‌طور معنی‌داری متأثر نشد ولی بیش‌ترین مقادیر آن در هر دو شرایط رطوبتی در باکتری B3 مشاهده شد (داده نشان داده نشده است).

تأثیر مایه‌زنی باکتریایی در شرایط نرمال و تنش رطوبتی بر چگالی بافت ریشه نسبت به تیمارهای شاهد معنی‌دار بود به‌طوری که باکتری‌های B1 و B2 به‌طور میانگین ۱۲ درصد و باکتری B3 ۲۷/۵ درصد باعث افزایش این صفت در شرایط نرمال رطوبتی شد. در حالی‌که در شرایط تنش رطوبتی تنها مایه‌زنی با باکتری B3 توانست ۲۰ درصد این صفت را در مقایسه با شاهد افزایش دهد (شکل ۵). به باور متخصصان، وزن زیاد ریشه الزاماً به معنی فعالیت بیش‌تر ریشه نیست و عاملی که باعث تشدید فعالیت ریشه می‌شود، وجود ریشه‌های ریز است (۱۴) که اثر تیمارهای آزمایشی از این لحاظ را می‌توان در ویژگی‌هایی مانند قطر، چگالی سطح و سطح ریشه در رطوبت‌های مختلف مشاهده کرد (شکل ۴). افزایش سطح



[ Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-07-17 ]
[ DOR: 20.1001.1.27835014.1401.13.2.6.6 ]
[ DOI: 10.47176/jspi.13.2.20531 ]

[ DOI: 10.47176/jspi.13.2.20531 ] [ DOR: 20.1001.1.27835014.1401.13.2.6.6 ] [ Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-07-17 ]



**جدول ۳.** تجزیه واریانس اثر تیمارهای تنش رطوبتی، مایه‌زنی باکتریایی و رقم، و آثار برهمکنش آنها بر ویژگی‌های ریشه و عملکرد جو.

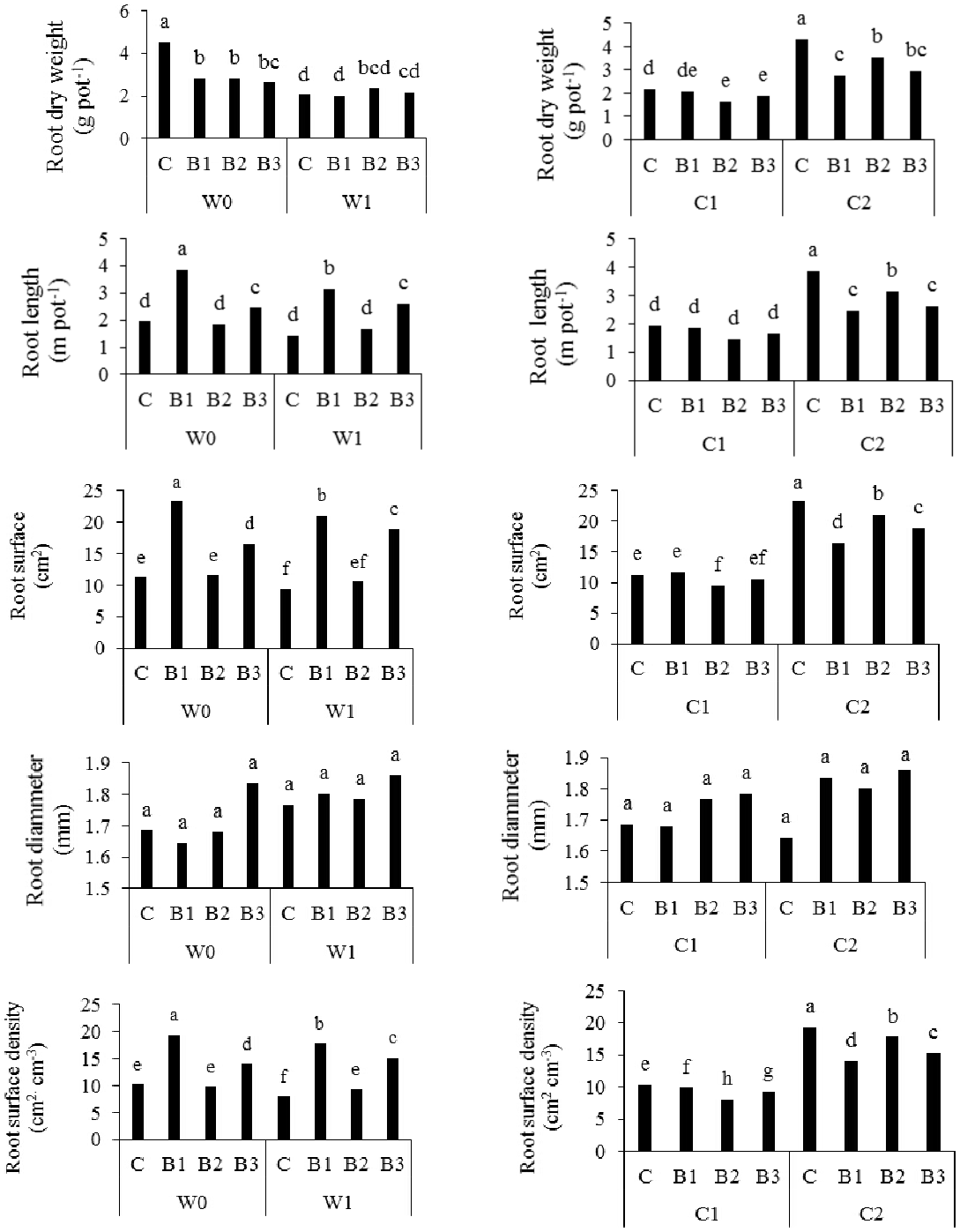
**Table 3.** Analysis of variance of the effects of moisture stress, bacterial inoculation and cultivar treatments, and their interactions on root characteristics and barley yield.

| Source of variation | df | Mean of square | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Root tissue density | Root volume | Root fresh weight | Root dry weight | Root water content | Root length | Root surface | Root diameter | Root surface area density | Biological yield |
| Bacteria | 3 | $9.95^{**}$ | $0.70^{ns}$ | $1.08^{ns}$ | $1.98^{**}$ | $3045^{**}$ | $8.31^{**}$ | 23.397 | $0.054^{**}$ | $19.4^{*}$ | $4.57^{*}$ |
| Moisture stress | 1 | $1.05^{ns}$ | $30.53^{ns}$ | $39.24^{**}$ | $12.71^{**}$ | $78^{ns}$ | $53.28^{**}$ | $361.13^{**}$ | $0.00^{ns}$ | $249.8^{**}$ | $154.04^{**}$ |
| Barley cultivar | 1 | $25.62^{**}$ | $121.8^{**}$ | $126.75^{**}$ | $25.37^{**}$ | $2257^{*}$ | $106.37^{**}$ | $1022^{**}$ | $0.037^{*}$ | $628.6^{**}$ | $437.96^{**}$ |
| Moisture stress × Bacteria | 3 | $6.14^{**}$ | $1.09^{ns}$ | $2.77^{ns}$ | $2.77^{**}$ | $2233^{**}$ | $11.61^{**}$ | $36.6^{**}$ | $0.04^{**}$ | $33.56^{**}$ | $2.31^{ns}$ |
| Barley cultivar × Bacteria | 3 | $1.17^{ns}$ | $2.64^{*}$ | $2.82^{ns}$ | $1.44^{**}$ | $1134^{ns}$ | $6.04^{**}$ | $33.3^{**}$ | $0.02^{*}$ | $21.19^{*}$ | $3.65^{*}$ |
| Moisture stress × Barley cultivar | 1 | $33.29^{**}$ | $2.25^{ns}$ | $1.07^{ns}$ | $0.46^{ns}$ | $7815^{**}$ | $1.92^{ns}$ | $0.30^{ns}$ | $0.14^{**}$ | $0.12^{ns}$ | $13.01^{**}$ |
| Moisture stress × Barley cultivar × Bacteria | 3 | $1.00^{ns}$ | $1.08^{ns}$ | $1.46^{ns}$ | $0.11^{ns}$ | $546^{ns}$ | $0.48^{ns}$ | $5.56^{ns}$ | $0.01^{ns}$ | $4.24^{ns}$ | $1.53^{ns}$ |

$^{ns}$ $^{*}$ و $^{**}$ به‌ترتیب بیانگر اثر غیرمعنی‌دار، و معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد است.

$^{ns,*}$ and $^{**}$ stand for non-significant and significant effects at 5 and 1% probability levels, respectively.

Source of variation: منبع تغییر، df: درجه آزادی، Mean of square: میانگین مربعات، Root tissue density: چگالی بافت ریشه، Root volume: حجم ریشه، Root wet weight: وزن تازه ریشه، Root dry weight: وزن خشک ریشه، Root water content: درصد رطوبت وزنی ریشه، Root length: طول ریشه، Root surface: سطح ریشه، Root diameter: قطر ریشه، Root surface area density: تراکم سطح ریشه، Biological yield: عملکرد بیولوژیک، Bacteria: باکتری، Moisture stress: آب خاک، Barley cultivar: رقم جو.

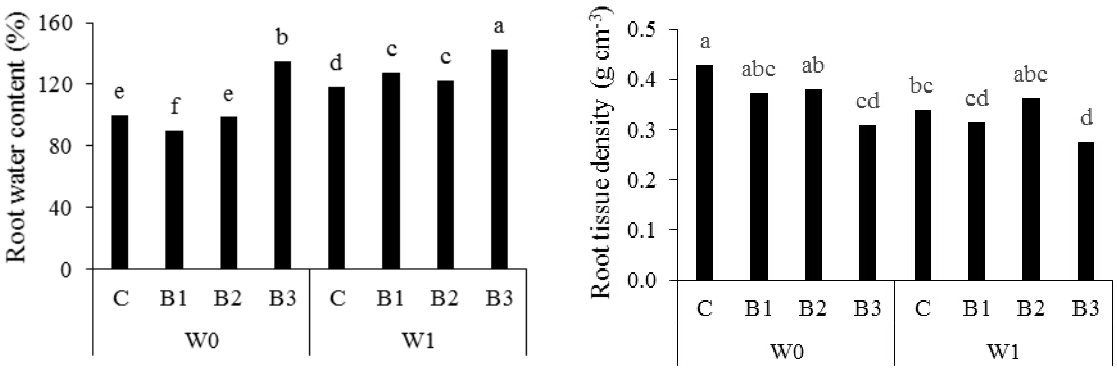



**شکل ۳.** تأثیر مایه‌زنی باکتریایی بر ویژگی‌های ریشه جو؛ C1 و C2 به‌ترتیب بیانگر ارقام کویر و دشت جو، W0 و W1 به‌ترتیب بیانگر سطوح تنش رطوبتی ۸۰ و ۵۰ درصد گنجایش مزرعه، C تیمار بدون مایه‌زنی باکتریایی، B1 باکتری *B. simplex* 31-2، B2 باکتری *B. simplex* 56-1 و B3 باکتری *B. simplex* 42-3 است؛ میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

**Fig. 3.** The effect of bacterial inoculation on barley root characteristics; C1 and C2 represent the Dasht and Kavir barley cultivars, respectively, W0 and W1 express moisture stress levels of 80 and 50% of field capacity, respectively, C shows treatment without bacterial inoculation, B1: *B. simplex* 31-2, B2: *B. simplex* 56-1 and B3: *B. simplex* 42-3; Means with at least one similar letter are not significantly different based on Duncan test at the probability level of 5%.

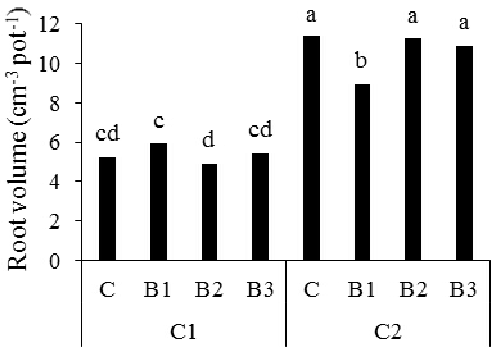


[ Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-07-17 ]
[ DOR: 20.1001.1.27835014.1401.13.2.6.6 ]
[ DOI: 10.47176/jspi.13.2.20531 ]




**شکل ۴.** تأثیر مایه‌زنی باکتریایی بر درصد رطوبت وزنی و چگالی بافت ریشه جو؛ C1 و C2 به‌ترتیب بیانگر ارقام کویر و دشت جو، W0 و W1 به‌ترتیب بیانگر سطوح تنش رطوبتی ۸۰ و ۵۰ درصد گنجایش مزرعه، C تیمار بدون مایه‌زنی باکتریایی، B1 باکتری *B. simplex* 31-2، B2 باکتری *B. simplex* 56-1 و B3 باکتری *B. simplex* 42-3، است؛ میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

**Fig. 4.** The effect of bacterial inoculation on barley root moisture content and tissue density; C1 and C2 represent the Dasht and Kavir barley cultivars, respectively, W0 and W1 express moisture stress levels of 80 and 50% of field capacity, respectively, C shows treatment without bacterial inoculation, B1: *B. simplex* 31-2, B2: *B. simplex* 56-1 and B3: *B. simplex* 42-3; Means with at least one similar letter are not significantly different based on Duncan test at the probability level of 5%.




**شکل ۵.** تأثیر مایه‌زنی باکتریایی بر حجم ریشه جو؛ C1 و C2 به‌ترتیب بیانگر ارقام کویر و دشت جو، W0 و W1 به‌ترتیب بیانگر سطوح تنش رطوبتی ۸۰ و ۵۰ درصد گنجایش مزرعه، C تیمار بدون مایه‌زنی باکتریایی، B1 باکتری *B. simplex* 31-2، B2 باکتری *B. simplex* 56-1 و B3 باکتری *B. simplex* 42-3، است؛ میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

**Fig. 5.** The effect of bacterial inoculation on barley root volume; C1 and C2 represent the Dasht and Kavir barley cultivars, respectively, W0 and W1 express moisture stress levels of 80 and 50% of field capacity, respectively, C shows treatment without bacterial inoculation, B1: *B. simplex* 31-2, B2: *B. simplex* 56-1 and B3: *B. simplex* 42-3; Means with at least one similar letter are not significantly different based on Duncan test at the probability level of 5%.

ریشه‌ها از طریق افزایش سطح جذب آب و عناصر غذایی می‌تواند کارآیی جذب آب و عناصر غذایی را افزایش دهد (۲). گیاه برای تأمین آب مورد نیاز خود در شرایط تنش رطوبتی با تغییر معماری ریشه سعی در جذب آب از مناطق دورتر و منافذ ریزتر خاک دارد. بنابراین وجود ریشه‌های باریک و طویل که دارای سطح ویژه بیش‌تری نیز هستند در این شرایط با کارایی بیش‌تری عمل می‌کنند. بنابراین مایه‌زنی باکتری‌های محرک رشد، با تغییر معماری ریشه به نفع گسترش طول ریشه و



[ Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-07-17 ]
[ DOR: 20.1001.1.27835014.1401.13.2.6.6 ]
[ DOI: 10.47176/jspi.13.2.20531 ]

افزایش سطح ریشه، موجب افزایش جذب آب توسط ریشه گیاه می‌شوند (۴). تغییرات فیتوهورمونی ناشی از مایه‌زنی باکتری‌های محرک رشد موجب افزایش تعداد ریشه‌های جانبی و ریشه‌های موئین (۵) و همچنین افزایش سطح، وزن خشک و طول ریشه شده (۲۹) که موجب فراهمی بیشتر آب و عناصر غذایی می‌شود. مشابه نتایج این پژوهش در خصوص تغییرات ساختاری ریشه ناشی از مایه‌زنی باکتریایی، تلقیح گیاه دارویی بادرشبی با *سودوموناس* و میکوریزا با افزایش تراکم و طول ریشه‌های موئین و سطوح جذبی ریشه باعث افزایش جذب پتاسیم و افزایش غلظت این عنصر در گیاه شده است (۲۳).

رقم کویر در مقایسه با رقم دشت به لحاظ ویژگی‌های ریشه دارای ۱۱۸ درصد حجم ریشه، ۹۸ درصد وزن خشک، ۹۸ درصد طول ریشه، ۱۰۶ درصد سطح ریشه، ۸۸ درصد چگالی سطح ریشه و نهایتاً ۱۳۲ درصد عملکرد بیولوژیک بیش‌تری بود (شکل‌های ۳، ۴ و ۵) اگرچه میانگین قطر ریشه دو رقم تفاوت معنی‌داری نداشت. با توجه به این تفاوت‌های ذاتی ارقام، تأثیر باکتری B1 تنها در رقم دشت بر حجم ریشه منفی بوده و باعث کاهش ۲۲ درصدی آن شد. وزن خشک ریشه در رقم کویر تحت تأثیر مایه‌زنی باکتریایی قرار نگرفت ولی در رقم دشت مایه‌زنی باکتریایی توانست به‌ترتیب باعث کاهش ۳۶، ۱۸ و ۳۲ درصدی وزن خشک ریشه توسط باکتری‌های B1، B2 و B3 شود. طول ریشه در ارقام کویر و دشت در اثر مایه‌زنی با باکتری B1 به‌ترتیب ۵ و ۳۷ درصد، با باکتری B2 به‌ترتیب ۲۶ و ۱۸ درصد و با باکتری B3 به ترتیب ۱۴ و ۳۲ درصد کاهش یافت. سطح ریشه در ارقام کویر و دشت در اثر مایه‌زنی با باکتری B1 به‌ترتیب صفر و ۲۹ درصد، با باکتری B2 به‌ترتیب ۱۷ و ۱۰ درصد و با باکتری B3 به ترتیب ۶ و ۱۹ درصد کاهش یافت. قطر ریشه در رقم کویر تحت تأثیر مایه‌زنی باکتریایی قرار نگرفت ولی قطر ریشه رقم دشت در اثر مایه‌زنی با باکتری‌های B1، B2 و B3 به ترتیب ۱۲، ۱۰ و ۱۳ درصد کاهش یافت. چگالی سطح ریشه در رقم کویر توسط باکتری‌های B1 و B3 تغییر نیافت ولی توسط باکتری B2، ۲۲ درصد کاهش یافت. چگالی سطح ریشه در رقم کوهدشت توسط باکتری‌های B1 و B3 به‌ترتیب به میزان ۲۷ و ۲۱ درصد کاهش یافت اما تحت تأثیر باکتری B1 قرار نگرفت. گیاه هنگام مواجه با تنش خشکی برای اینکه توانایی جذب ریشه‌ها را افزایش دهد ماده خشک بیشتری را به سیستم ریشه‌ای اختصاص می‌دهد؛ در نتیجه تغییراتی در ویژگی‌های مورفولوژیک ریشه‌ها مانند افزایش طول ریشه در واحد وزن ریشه (طول مخصوص ریشه) ایجاد می‌شود (۲۵). مشخص شده است که در پاسخ به تنش رطوبتی، در برخی از گرامینه‌ها قطر ریشه افزایش یافته ولی چگالی بافتی آن به دلیل تغییرات ساختاری در مقیاس سلول کاهش می‌یابد (۱۹). لذا با توجه به عدم وجود تغییر معنی‌دار در حجم ریشه (شکل ۵) در پژوهش حاضر، تغییرات مشاهده شده در چگالی بافت ریشه (شکل ۴) را می‌توان یکی از دلایل احتمالی در کاهش وزن خشک ریشه در اثر مایه‌زنی باکتریایی عنوان کرد.

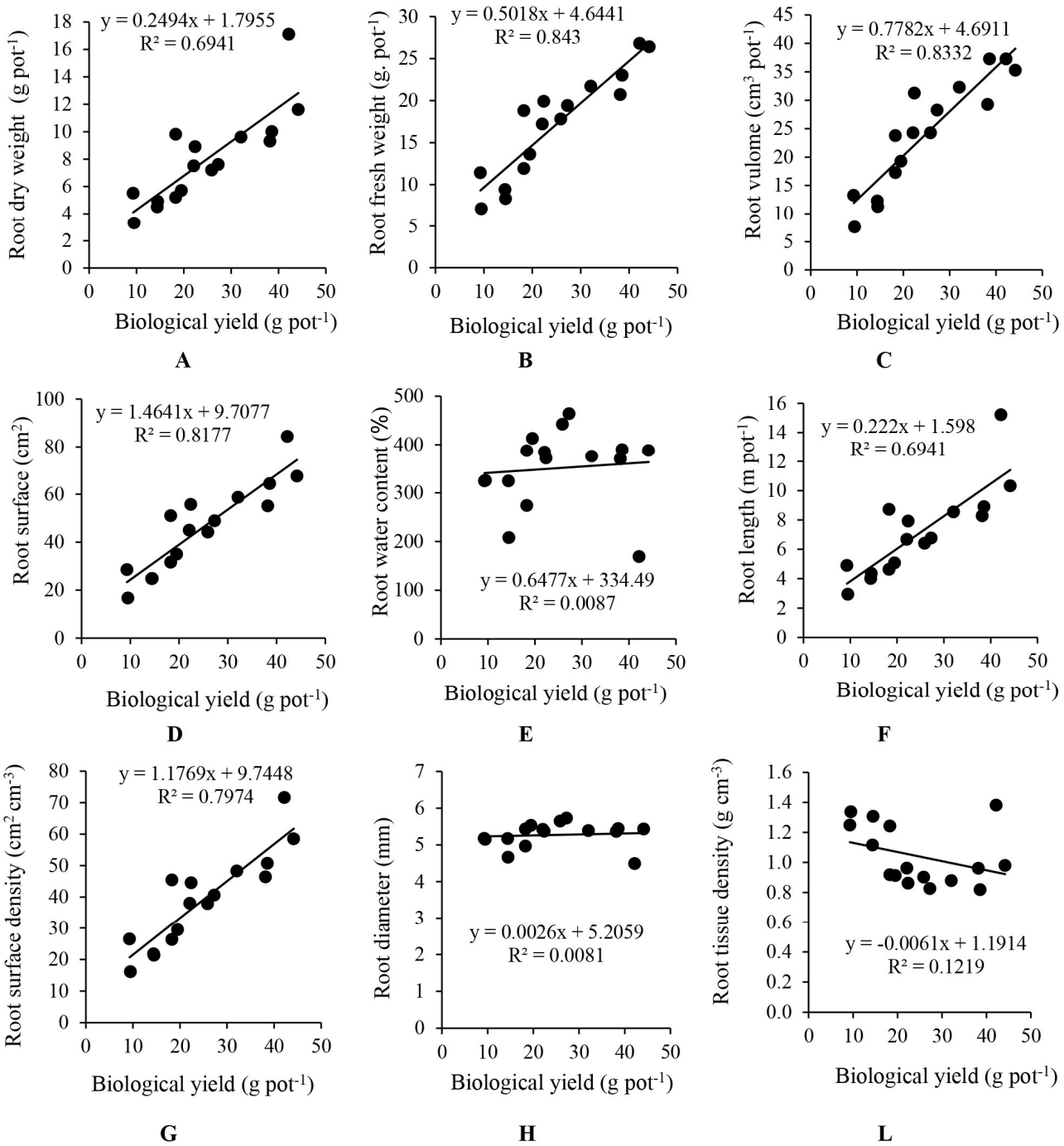
بررسی روابط بین ویژگی‌های ریشه با عملکرد بیولوژیک جو نشان داد (شکل ۶) که همبستگی خطی بین آن‌ها وجود دارد. کم‌ترین ضریب تبیین ($R^2$) با صفات درصد رطوبت وزنی ریشه و قطر ریشه به‌ترتیب با مقادیر ۰/۰۰۸۷ و ۰/۰۰۸۱ بوده ولی بقیه صفات ریشه دارای همبستگی قوی با این صفت بودند، بیش‌ترین همبستگی با ویژگی‌های وزن تازه ریشه ($R^2$ =۰/۸۴)، حجم ریشه ($R^2$ =۰/۸۳) و سطح ریشه ($R^2$ =۰/۸۱) مشاهده شد.

## نتیجه‌گیری کلی

یافته‌های این پژوهش نشان داد که اغلب ویژگی‌های ریشه از مایه‌زنی با باکتری‌های مورد استفاده تأثیر می‌پذیرند. علاوه بر اینکه روند یکسانی در تأثیر باکتریایی مشاهده نشد نوع رقم جو نیز در اثرپذیری از باکتری‌ها به‌شدت تأثیرگذار بود. بنابراین به نظر می‌رسد پژوهش‌های بنیادی در مورد تعامل این میکروب‌ها



[ Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-07-17 ]
[ DOR: 20.1001.1.27835014.1401.13.2.6.6 ]
[ DOI: 10.47176/jspi.13.2.20531 ]




**شکل ۶.** روابط رگرسیونی بین عملکرد بیولوژیک با ویژگی‌های ریشه جو شامل وزن خشک ریشه (A)، وزن تازه ریشه (B)، حجم ریشه (C)، سطح ریشه (D)، درصد رطوبت وزنی ریشه (E)، طول ریشه (F)، چگالی سطح ریشه (G)، قطر ریشه (H) و چگالی بافت ریشه (L)؛ تمامی مدل‌های رگرسیونی در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار هستند.

**Fig. 6.** Regression relationships between barley biological yield and root characteristics including root dry weight (A), root fresh weight (B), root volume (C), root surface (D), root water content (E), root length (F), root surface density (G), root diameter (H) and root tissue density (L); All regression models are significant at the probability level of 5%.



[ Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-07-17 ]
[ DOR: 20.1001.1.27835014.1401.13.2.6.6 ]
[ DOI: 10.47176/jspi.13.2.20531 ]

با گیاهان در راستای دستیابی به الگوی کلی مورد نیاز باشد. برای اینکه بتوان به لحاظ اقتصادی از فواید مایه‌زنی با این باکتری‌ها بهره‌مند شد، لازم است تعامل میان پژوهشگران فیزیولوژی گیاهی و بیولوژی خاک در خصوص معرفی ارقام و گزینش آن‌ها در راستای بهره‌مندی از کشاورزی پایدار تقویت شود. علاوه بر این با توجه به محدودیت محیط رشد ریشه در آزمایش‌های گلدانی نسبت به شرایط مزرعه‌ای، ضروری است که پژوهش‌های مزرعه‌ای برای بررسی پاسخ گیاهان مایه‌زنی شده با باکتری‌های این پژوهش تکرار شوند.

## سپاسگزاری

بدین وسیله از همکاری صمیمانه آزمایشگاه‌های شیمی، حاصلخیزی و بیولوژی خاک دانشگاه مراغه در انجام کارهای آزمایشگاهی تشکر و قدردانی می‌شود.

## منابع مورد استفاده

1. Abrishamchi, P., Ganjeali, A., Sakeni, H., 2013. Evaluation of morphological traits, proline content and antioxidant enzymes activity in chickpea genotypes (*Cicer arietinum* L.) under drought stress. *Iranian Journal of Pulses Research* 3(2): 17–30. (in Persian with English abstract)
2. Akhavan, S., Shabanpour, M., Isfahani, M., 2012. The effect of soil density and texture on the growth of roots and shoots of wheat. *Journal of Water and Soil* (*Agricultural Science and Technology*) 26 (3): 735–727. (in Persian with English abstract)
3. Amerian, M.R., Yousefsani, M.S., Koocheki, A., 2014. Effects inoculation of mycorhizae species and irrigation levels impacts on growth criteria, yield and water use efficiency of corn (*Zea Mays* L.). *Agroecology* 6(1): 152–161. (in Persian with English abstract)
4. Askary, M., Mostajeran, A., Amooaghaei, R., Mostajeran, M., 2009. Influence of the coinoculation *Azospiriilum brasilense* and *Rhizobium meliloti* plus 2, 4-d on grain yield and NPK content of *Triticum aestivum* (cv. Baccros and Mahdavi). *Pakistan Journal of Biological Sciences* 5: 296–307.
5. Bauhus, J., Messier, C., 1999. Evaluation of fine root length and diameter measurements obtained using RHIZO image analysis. *Agronomy Journal* 91: 142–147.
6. Begum, N., Hu, Z., Cai, Q., Lou, L., 2019. Influence of PGPB inoculation on HSP70 and HMA3 gene expression in switch grass under cadmium stress. *Plants* 8: 504–8018.
7. Bent, E., Tuzan, S., Chanway, C.P., Enebak, S., 2000. Alteration in plant growth and in root hormone levels of lodgeplepines inoculated with rhizobacteria. *Canadian Journal of Microbiology* 47: 793–800.
8. Bodner, G.S., Robles, M.D., 2017. Enduring a decade of drought: Patterns and drivers of vegetation change in a semi-arid grassland. *Journal of Arid Environments* 136: 1–14.
9. Dimkpa, C., Weinand, T., Asch, F., 2009. Plant-rhizobacteria interactions alleviate abiotic stress conditions. *Plant Cell and Environment* 32: 1682–1694.
10. Ganjeali, A., Kafi, M., Bagheri, A., 2007. Approaches from root studies on chickpea (*Cicer arietinum* L). *Journal of Agricultural Sciences* 13(1): 179–189. (in Persian with English abstract)
11. Garnett, T., Conn, V., Kaiser, B.N., 2009. Root based approaches to improving nitrogen use efficiency in plants. *Plant, Cell and Environment* 32(9): 1272–1283.
12. Karimi, E., Aliasgharzad, N., Neyshabouri, M.R., Esfandyari, E., 2019. Isolation, molecular identification and assessing plant growth promoting activities of biofilm forming bacteria from gramineae rhizosphere in north west of Iran. *Journal of Soil Applied Research* 7(2): 14–28. (in Persian with English abstract)
13. Khan, L.A., Lee, I.J., 2016. Indol acetic acid and ACC deaminase from endophytic bacteria improves the growth of *Solanum lycopersicum*. *Electronic Journal of Biotechnology* 21: 58–64.
14. Kim, Y.C., Glick, B., Bashan, Y., Ryu, C.M., 2013. Enhancement of plant drought tolerance by microbes. In: Aroca, R. (Ed.), Plant Responses to Drought Stress. Springer–Verlag, Berlin, pp. 383–413.
15. Kroon, H., Visser, E.J.W., 2003. Root Ecology. Springer–Verlag, Berlin, 397 p.
16. Kumar, J.C., Saraf, M., 2015. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): A review. *Journal of Agricultural Research and Development* 5: 0108–0119.
17. Lambers, H., Atkin, O.K., Millenaar, F.F., 2002. Respiratory patterns in roots in relation to their functioning. In: Waisel, Y., Eshel, A., Kafkaki, K. (Eds.), Plant Roots. The Hidden Half. Marcel Dekker, New York, pp. 521–552.
18. Lozano, Y.M., Aguilar-Trigueros, C.A., Flaig, I.C., Rillig, M.C., 2020. Root trait responses to drought are more heterogeneous than leaf trait responses. *Functional Ecology* 34: 2224–2235.
19. Musters, P.A.D., Bouten, W., 2000. A method for identifying optimum strategies of measuring soil water contents



[ Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-07-17 ]
[ DOR: 20.1001.1.27835014.1401.13.2.6.6 ]
[ DOI: 10.47176/jspi.13.2.20531 ]

for calibrating a root mater uptake model. *Journal of Hydrology* 227: 273–286.
20. Naseri, R., Barari, M., Zarea, M.J., Khavazi, K., Tahmasebi, Z., 2016. Studying morphological characteristics of seminal and adventitious root systems of durum and bread wheat cultivars. *Journal of Crop Ecophysiology* 10(2): 477–492 (in Persian with English abstract)
21. Pakneghad, F., Fatemirika, Z., Ilkaydehno, M.N., 2017. Investigation end season drought effect on yield and yield components of ten barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars in Karaj region. *Environmental Stress in Crop Science* 10(3): 391–401. (in Persian with English abstract)
22. Rahimzadeh, S., Sohrabi, Y., Heidari, G.R., Eivazi, A.R., Hosseini S.M.T., 2013. Effect of biofertilizers on macro and micro nutrients uptake and essential oil content in *Dracocephalum Moldavica* L. *Iranian Journal of Field Crops Research* 11(1): 179–190. (in Persian with English abstract)
23. Reich, P.B., 2014. The world-wide 'fast–slow' plant economics spectrum: A traits manifesto. *Journal of Ecology* 102: 275–301.
24. Robin, A.H.K., Uddin, M.J., Afrin, S., Paul, P.R., 2014. Genotypic variation in root traits of wheat varieties at phytomer level. *Journal of Bangladesh Agricultural University* 12(1): 45–54.
25. Schwartz, A.R., Ortiz, I., Maymon, M., Herbold, C.W., Fujishige, N.A., Vijanderan, J.A., Villella, W., Hanamoto, K., Diener, A., Sanders, E.R., DeMason, D.A., Hirsch, A.M., 2013. *Bacillus simplex*—a little known PGPB with anti-fungal activity—alters pea legume root architecture and nodule morphology when coinoculated with *Rhizobium leguminosarum* bv. viciae. *Agronomy* 3: 595–620.
26. Shaban, M., Mansourifar, S., Ghobadi, M., Ashrafi Parchin, R., 2012. Effect of drought stress and starter nitrogen fertilizer on root characteristics and seed yield of four chickpea (*Cicer Arietinum* L.) genotypes. *Seed and Plant Production Journal* 27-2(4): 451–470. (in Persian with English abstract)
27. Shaharoona, B., Arshad, M., Zahir, Z.A., Khalid, A., 2006. Performance of *Pseudomonas* spp. containing ACC deaminase for improving growth and yield of maize (*Zea mays* L.) in the presence of nitrogenous fertilizer. *Soil Biology and Biochemistry* 38(9): 2971–2975.
28. Shaharoona, B., Naveed, M., Arshad, M., Zahir, Z.A., 2008. Fertilizer-dependent efficiency of *Pseudomonas* for improving growth, yield and nutrient use efficiency of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Microbial Biotechnology* 79: 147–155.
29. Shakir, M.A., Asghari, B., Arshad, M., 2012. Rhizosphere bacteria containing ACC deaminase conferred drought tolerance in wheat grown under semi-arid climate. *Journal of Soil Environment* 31: 108–112.
30. Sharma, P., Khanna, V., Kumar, P., 2013. Efficacy of aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC)-deaminase-producing rhizobacteria in ameliorating water stress in chickpea under axenic conditions. *African Journal of Microbiological Research* 7: 5749–5757.
31. Singh, G., Sekhon, H.S., Kolar, J.S., 2005. Pulses. Agrotech Publishing Academy. Udaipur, India, 329 p.
32. Sperry, J.S., Stiller, V., Hacke, U.G., 2003. Xylem hydraulics and soil-plant-atmosphere continuum opportunities and unresolved issues. *Agronomy Journal* 95: 1362–1370.
33. Verslues, P.E., Bray, E.A., 2004. LWR1 and LWR2 are required for osmoregulation and osmotic adjustment in Arabidopsis. *Plant physiology* 136(1): 2831–2842.
34. Volaire, F., 2018. A unified framework of plant adaptive strategies to drought: Crossing scales and disciplines. *Global Change Biology* 24: 2929–2938.
35. Xia, J., Liu, M. Y., Jia, S.F., 2005**.** Water security problem in north China: Research and perspective. *Pedosphere* 15: 563–575.
36. Zahir, Z.A., Munir, A., Asghar, H.N., Shahroona, B., Arshad, M., 2008. Effectiveness of rhizobacteria containing ACC-deaminase for growth promotion of peas (*P. sativum*) under drought conditions. *Journal of Microbiology and Biotechnology* 18: 958–963.
37. Zhou, G., Zhou, X., Nie, Y., Bai, S. H., Zhou, L., Shao, J, Fu, Y., 2018. Drought-induced changes in root biomass largely result from altered root morphological traits: Evidence from a synthesis of global field trials. *Plant, Cell and Environment* 41: 2589–2599.

[ Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-07-17 ]
[ DOR: 20.1001.1.27835014.1401.13.2.6.6 ]
[ DOI: 10.47176/jspi.13.2.20531 ]