

## کاربرد میکروارگانیسیم‌های مفید خاک در اکوسیستم‌های جنگلی

مریم تیموری\*

\* استادیار پژوهش، موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران  
(رایانامه نویسنده مسئول: mteimouri@riftr-ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۲۴

### چکیده

استفاده از کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها در جنگل‌های صنعتی برای افزایش رشد درختان جنگلی به‌منظور تأمین نیازهای روزافزون انسان امروزی منجر به تخریب زمین و کاهش تنوع زیستی می‌شود که تبعات اقتصادی - اجتماعی فراوانی را به‌دنبال دارد. میکروارگانیسیم‌های خاک نقش مهمی در گردش مواد غذایی، نگهداری ساختمان خاک و تنظیم رشد گیاهان دارند. کاربرد ریزوباکتری‌های افزایش دهنده رشد، قارچ‌های اندومیکوریزی و اکتومیکوریزی در افزایش رشد درختان در نهالستان‌ها و عرصه‌های جنگلی ثابت شده است و می‌توانند با هزینه کمتر به‌منظور تسریع رشد درختان مورد استفاده قرار گیرند، بدون آنکه آسیب‌های زیست محیطی و تبعات بعدی آن وجود داشته باشد. توصیه می‌شود به‌منظور بالا بردن کارایی میکروارگانیسیم‌ها در افزایش رشد درختان علاوه بر تولید انبوه و استفاده از مایه تلقیح‌های متشکل از چندین میکروارگانیسیم مفید بومی و نیز توجه به شرایط آب و هوایی، اقلیمی و خصوصیات خاک، قوانینی توسط دولت‌ها و نیز سازمان‌های بین‌المللی برای تشویق استفاده از مایه تلقیح‌های میکروبی وضع شود.

**واژه‌های کلیدی:** باکتری، توسعه پایدار، قارچ، نهالستان، همزیستی.

## بیان مسئله

غذایی باعث افزایش رشد گیاهان شده و با ترشح مواد مختلف به پاسخ‌های دفاعی گیاه در برابر تنش‌های زنده و غیرزنده کمک می‌کنند. میکروارگانیسم‌ها همزمان نقش‌های مثبت و منفی در خاک بازی می‌کنند. اما انواع مفید به دلیل افزایش رشد گیاهان، تجزیه بقایای مواد آلی و سمیت‌زدایی از مواد سمی مانند حشره‌کش‌ها اهمیت بیشتری دارند.

### میکروبیولوژی خاک

خاک محیط بسیار پیچیده‌ای است که انواع بسیار متنوعی از میکروارگانیسم‌ها در آن وجود دارند. میکروبیولوژی خاک علم مطالعه میکروارگانیسم‌های خاک و فرآیندهای آنها می‌باشد که با بیوشیمی خاک ارتباط بسیار نزدیکی دارد. در میکروبیولوژی خاک بیشتر به ویروس‌ها، باکتری‌ها، قارچ‌ها و پروتوزوئرهاي خاک پرداخته می‌شود، اما می‌تواند دربر گیرنده سایر موجودات مانند نماتدها، کرم‌ها و بندپایان نیز باشد. امروزه علم میکروبیولوژی در ارتباط نزدیک با سایر علوم خاک، شیمی و اکولوژی بوده و سعی در شناخت عملکرد میکروارگانیسم‌ها در خاک دارد.

### میکروارگانیسم‌های مفید خاک

خاک به شکل فیزیکی سطح زمین را می‌پوشاند

اکوسیستم‌های جنگلی حدود ۳۰ درصد از مساحت کره زمین را دربر می‌گیرند و بر اساس برآوردهای انجام شده بیش از ۳ تریلیون درخت در سطح زمین وجود دارد. اکوسیستم‌های جنگلی علاوه بر عملکردهای طبیعی خود از جمله تأمین آب و هوای سالم، انسان امروزی به شدت برای تأمین نیازهای خود به منابع جنگلی وابسته است. برای تأمین نیازهای روزافزون جمعیت جهانی و به منظور بالابردن سرعت رشد گونه‌های جنگلی که در تأمین مواد اولیه مورد نیاز انسان اهمیت بالایی دارند. از کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها در مقادیر بالا استفاده می‌شود که منجر به تخریب زمین و کاهش تنوع زیستی می‌شود که در دراز مدت علاوه بر از بین بردن منابع، منجر به آسیب به سلامتی انسان و سایر موجودات خواهد شد.

خاک دارای انواع متفاوتی از میکروارگانیسم‌ها، حشرات و سایر بی‌مهرگان است که ارتباط نزدیکی با یکدیگر و با گیاهان دارند. میکروارگانیسم‌های خاک موجودات بی‌نظیری هستند، زیرا باعث افزایش حاصلخیزی خاک، افزایش رشد گیاهان و کاهش اثرات تنش‌های زنده و غیرزنده می‌گردند. میکروارگانیسم‌های مفید خاک با بهبود جذب مواد

ریزوباکترهای افزایش‌دهنده رشد گیاهان، قارچ‌های اکتومیکوریزی و اندومیکوریزی پرداخته شده است.



شکل ۱- تصویری از میکروارگانیسم‌های مختلف خاک

ریزوباکترهای افزایش‌دهنده رشد گیاهان (PGPR)<sup>۱</sup>

در محیط‌های طبیعی، رشد و تولید گیاهان به کمیت و تعادل آب، مواد معدنی، هوا، نور، گرما و نیز اثرات مثبت و منفی میکروارگانیسم‌های ریزوسفر بستگی دارد. میکروارگانیسم‌های خاک نقش مهمی در گردش مواد غذایی، نگهداری ساختمان خاک و تنظیم رشد گیاهان دارند. اصطلاح ریزوباکترهای افزایش‌دهنده رشد گیاهان اولین بار توسط Kloepper در سال ۱۹۸۰ و به دنبال استفاده از سودوموناس‌های فلورسانت برای افزایش رشد گیاهان استفاده شد. از آن زمان تاکنون این اصطلاح برای باکتری‌هایی که به شکل طبیعی در خاک وجود دارند و قادر به بهبود رشد و

و رابط بین اجزای تشکیل دهنده آن اعم از جامد (سنگ‌ها و بقایای مواد زیستی مرده)، مایع (آب) و گاز (هوای موجود در بین ذرات خاک) بوده و به عنوان پایه و اساس اکوسیستم‌های زمینی شناخته می‌شود. خاک حاوی انواع بسیار متنوعی از میکروارگانیسم‌ها مانند قارچ‌ها، باکتری‌ها و آرکی‌ها بوده که در عملکرد اکوسیستم نقش دارند (شکل ۱). بر اساس برآوردهای انجام شده، هر گرم خاک دارای  $10^{11}$  باکتری، ۵۰۰۰۰-۶۰۰۰۰ گونه باکتریایی و ۲۰۰ متر هیف قارچی است (Van Der Heijden *et al.*, 2008).

عمده میکروارگانیسم‌های خاک برای گیاهان و خاک مفید هستند. ارتباط مستقیم آنها با ریشه گیاهان باعث جذب مواد غذایی از خاک، تجزیه مواد آلی و نیز ممانعت از فعالیت بیماری‌زاهای گیاهی می‌گردد. خاک هم‌چنین دارای انواع میکروارگانیسم‌های مضر بوده که با حمله به گیاهان و یا زندگی انگلی باعث کاهش بهره‌وری آنها می‌گردند. وجود میکروارگانیسم‌های مفید خاک باعث سلامت خاک و ممانعت از رشد انواع مضر می‌گردد (Glick, 2018). در این نوشته به سه گروه مهم از میکروارگانیسم‌های مفید خاک یعنی

<sup>۱</sup> Plant growth promoting rhizobacteria

سلامت گیاهان هستند به کار می‌رود. این باکتری‌ها عمدتاً در ریزوسفر، بخشی از خاک که تحت تأثیر ریشه گیاه و ترشحات آن قرار دارد، یافت می‌شوند. جنس‌های مختلف باکتریایی از جمله *آزوسپیریوم*، *ریزوبیوم*، *ازتوباکتر*، *آرتروباکتر*، *باسیلوس* و *سودوموناس* جزء ریزوباکترهای افزایش دهنده رشد گیاهان قرار می‌گیرند.

این باکتری‌ها از طریق تولید هورمون‌های گیاهی، تثبیت ازت، سنتز کلاته کننده‌های آهن مانند سیدروفور، محلول کردن مواد معدنی مانند فسفر، پتاسیم و افزایش در دسترس بودن آنها به شکل مستقیم باعث افزایش رشد گیاهان می‌شوند. این باکتری‌ها با ممانعت از رشد بیماریزاهای گیاهی از طریق تولید آنتی‌بیوتیک، تولید متابولیت‌های ضد قارچی، حذف آهن از ریزوسفر، القاء مقاومت سیستماتیک، تولید مواد تجزیه کننده دیواره قارچ و رقابت برای اتصال به ریشه گیاهان به شکل غیرمستقیم باعث افزایش رشد گیاهان می‌شوند. به علاوه PGPR قادرند باعث مقاومت

گیاهان در برابر تنش‌های محیطی شوند. نقش مثبت ریزوباکترهای افزایش دهنده رشد ابتدا در محصولات کشاورزی ثابت شد و امروزه در برخی از کشورها کاربرد زیادی در بهبود رشد محصولات زراعی مختلف دارد. در مطالعات متعددی نقش مثبت آنها در اکوسیستم‌های دیگر مانند جنگل نیز ثابت شده است. مطالعات نشان داده است که از این باکتری‌ها می‌توان برای احیای زمین‌های تخریب شده، بهبود کیفیت خاک، حذف آلوده کننده‌ها از خاک و نیز مقابله با تغییرات آب و هوایی استفاده کرد.

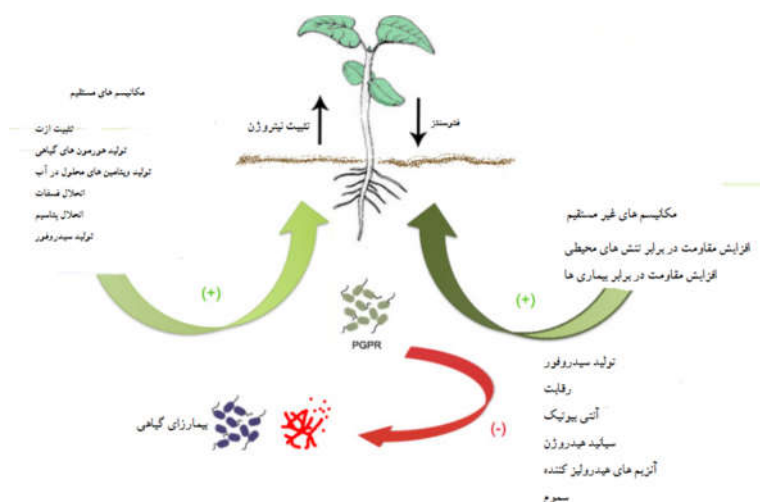
بر اساس واکنش متقابل PGPR با گیاهان، آن‌ها به دو گروه همزیست که درون گیاه زندگی می‌کنند و آزاد که بیرون سلول‌های گیاه زندگی می‌کنند تقسیم‌بندی می‌شوند. از شناخته شده‌ترین انواع باکتری‌های همزیست می‌توان ریزوبیوم‌ها (شکل ۲-الف) و فرانکیاها (شکل ۲-ب) را نام برد که به ترتیب با گیاهان خانواده لگومینوز و درختانی مانند توسکا رابطه همزیستی ایجاد می‌کنند.



شکل ۲- تشکیل گرهک توسط (الف) ریزوبیوم و (ب) فرانکیا که تثبیت ازت در آن صورت می‌گیرد.

رشد از طریق ۱- سنتز موادی که مستقیماً توسط گیاه جذب می‌شوند، ۲- متحرک‌سازی مواد غذایی، ۳- القاء مقاومت به تنش در گیاهان و ۴- جلوگیری از فعالیت عوامل بیماری‌زای گیاهی به رشد گیاهان کمک می‌کنند (شکل ۳).

مکانیسم‌های افزایش رشد گیاهان توسط ریزوباکترهای افزایش دهنده رشد مکانیسم‌هایی که باعث رشد گیاهان توسط ریزوباکترهای افزایش‌دهنده رشد می‌شود در شکل ۳ آورده شده است. ریزوباکترهای افزایش‌دهنده

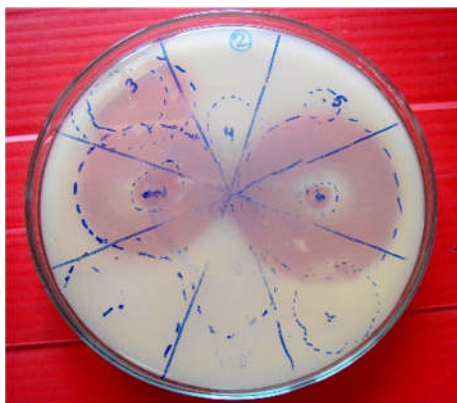


شکل ۳- مکانیسم‌های مستقیم و غیرمستقیم که باعث افزایش رشد گیاهان می‌شوند.

می‌شود. ازت برای تشکیل اسیدهای آمینه و پروتئین‌ها ضروری است. فرآیندی که توسط آن

ازت به‌عنوان مهم‌ترین ماده غذایی محدود کننده رشد گیاهان، توسط باکتری‌ها تأمین

باکتری‌های خاک قادرند ترکیبات نامحلول فسفر را به شکل محلول و قابل استفاده برای گیاهان تبدیل کنند که تحت نام کلی میکروارگانسیم‌های محلول‌کننده فسفات از آنها نام برده می‌شود. توانایی انحلال فسفات در جنس‌های میکروکوکوس، سودوموناس، باسیلوس و فلاوی-باکتریوم ثابت شده است. میکروارگانسیم‌های محلول‌کننده با ایجاد یک ناحیه (هاله) شفاف در اطراف کلنی خود شناسایی می‌شوند (شکل ۴). به علاوه میکروارگانسیم‌های خاک قادر به معدنی کردن ترکیبات آلی دارای فسفر نیز هستند. فرآورده‌های معدنی شدن به کمک واکنش‌های آنزیمی صورت می‌گیرد.



شکل ۴- هاله شفاف در اطراف کلنی که نشان دهنده انحلال فسفات است.

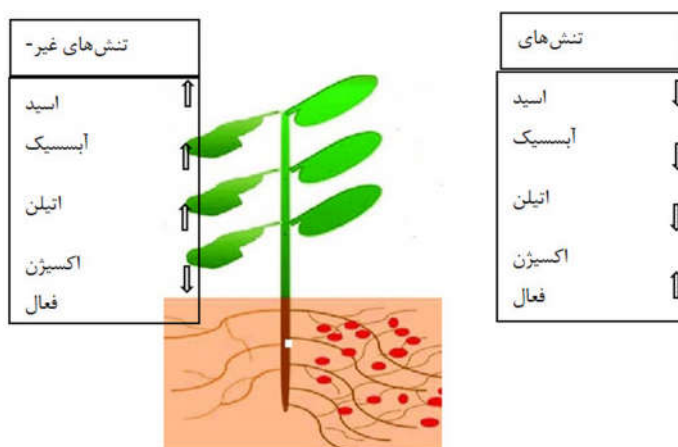
آهن نقش مهمی در عملکرد صحیح موجودات زنده دارد و کمبود آن باعث کاهش رشد، کاهش سنتز DNA و RNA و تغییر شکل سلول‌ها

ازت جو وارد ساختمان ترکیبات آلی می‌شود و از آن تحت عنوان فرآیند تثبیت ازت نام برده می‌شود، فقط توسط میکروارگانسیم‌های تک سلولی (پروکاریوت) صورت می‌گیرد. تثبیت ازت به شکل آزاد و یا در همزیستی با گیاهان دیگر صورت می‌گیرد. ازتوباکتر، بیژرینکا، گلوکونواستوباکتر، آزوسپریلیوم، هرباسپریلیوم بشکل آزاد و ریزوبیوم‌ها در همزیستی با گیاهان خانواده لگومینوز مانند انواع بقولات و فرانکیا در همزیستی با درختانی مانند توسکا ازت را تثبیت می‌کنند (شکل ۳). هورمون‌های گیاهی مانند اکسین، سیتوکینین، جیبرلین و اتیلن نیز توسط طیف وسیعی از باکتری‌ها از جمله باسیلوس‌ها و استرپتومیسس‌ها تولید و در تنظیم رشد گیاهان دخالت دارند.

متحرک‌سازی مواد غذایی باعث افزایش در دسترس بودن آنها برای گیاهان از طریق تثبیت و ممانعت از آبشویی آنها می‌شود. فسفر، پس از ازت دومین عنصر ضروری است که بایستی توسط گیاه جذب شود. میزان انحلال این عنصر در خاک کم است. فسفر موجود در کودها بلافاصله پس از اضافه شدن به خاک به شکل نامحلول درآمده و از دسترس گیاه خارج می‌شود. حدود ۵ تا ۱۰ درصد

تنش‌های غیرزنده مانند خشکی، دمای خیلی بالا و پایین، شوری و تنش اکسیداتیو از مهم‌ترین عواملی هستند که باعث کاهش رشد گیاهان می‌شوند. باکتری‌های افزایش‌دهنده رشد قادرند باعث افزایش مقاومت گیاهان به انواع تنش‌های محیطی شوند. گونه‌های مختلف *سودوموناس* قادرند با افزایش جذب یون‌های منیزیم، پتاسیم و کلسیم، کاهش جذب یون سدیم و افزایش تولید هورمون اکسین باعث مقاومت گیاه به تنش خشکی و شوری شوند. مکانیسم‌های اصلی مقاومت به تنش‌های غیر زنده در شکل ۵ آورده شده است.

می‌گردد. آهن در خاک عمدتاً به‌شکل نامحلول و غیرقابل استفاده برای گیاهان است. باکتری‌های افزایش‌دهنده رشد گیاهان قادرند با ترشح سیدروفور و به دام انداختن یون‌های آهن ۳ ظرفیتی، آهن مورد نیاز گیاهان را تأمین نمایند. سیدروفورها علاوه بر فراهم کردن آهن، با ممانعت از دسترسی عوامل بیماریزا به آهن مورد نیاز در مقاومت به بیماری در گیاهان نیز نقش دارند. تولید سیدروفور در باکتری‌هایی مانند *سودوموناس*، *استرپتومایسس* و *فیلوباکتریوم* ثابت شده است (Ferreira et al., 2019).



شکل ۵- مکانیسم‌های افزایش مقاومت به تنش‌های غیرزنده در صورت وجود (راست) و عدم وجود (چپ) باکتری‌های افزایش‌دهنده رشد گیاهان. پیکان‌های رو به بالا و پایین به ترتیب نشان‌دهنده افزایش و کاهش هستند.

مانند *سودوموناس* و *باسیلوس* با تولید آنتی‌بیوتیک از رشد عوامل بیماریزا به‌صورت مستقیم ممانعت می‌کنند. در حالی که انواع دیگر قادرند با تولید آنزیم‌هایی مانند کیتیناز و بتا-گلوکوناز و با تجزیه

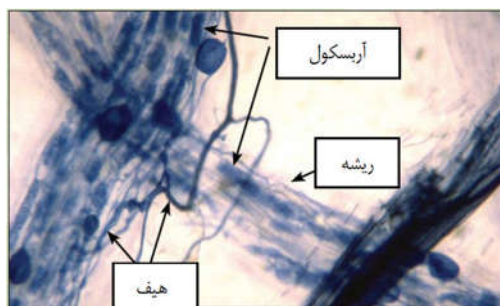
جلوگیری از بیماری‌های گیاهی توسط باکتری‌ها به‌صورت مستقیم با ممانعت از رشد عوامل بیماریزا و یا غیرمستقیم با رقابت با عوامل بیماریزا و کاهش بیماریزایی صورت می‌گیرد. برخی از باکتری‌ها



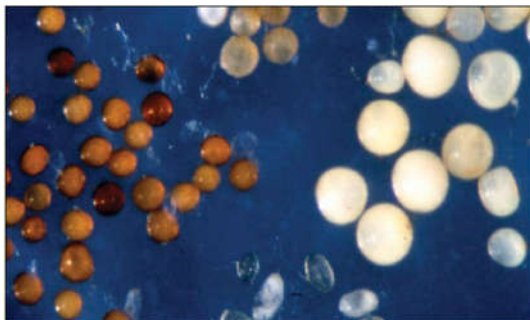
۸۶ درصد گیاهان خاکی وجود دارد، گیاهان می‌توانند مواد غذایی مورد نیاز خود را به‌دست آورند. همزیستی میکوریزی به دو نوع اصلی اندومیکوریز و اکتومیکوریز تقسیم‌بندی شده است (Frac et al., 2016).

### همزیستی میکوریزی آربسکولار

قدمت همزیستی میکوریزی آربسکولار به ۴۰۰ میلیون سال پیش برمی‌گردد. این همزیستی تقریباً در ۹۰ درصد گونه‌های گیاهی شامل گیاهان گلدار، بریوفیت‌ها و سرخس‌ها وجود دارد. این همزیستی منجر به تشکیل وزیکول، آربسکول و هیف در ریشه گیاهان و نیز اسپور و هیف در خاک می‌شود (شکل‌های ۶ و ۷).



شکل ۶- ساختارهای همزیستی میکوریزی آربسکولار تشکیل شده در درون ریشه گیاه



شکل ۷- اسپور قارچ‌های میکوریزی جدا شده از خاک

دیواره سلولی قارچ‌ها مانع از رشد عوامل بیماریزا گردند. در جنگل‌داری از *Bacillus thuringiensis* *subsp. kurstaki* HD-1 به صورت گسترده برای کنترل لارو پروانه‌ها استفاده می‌شود. ریزوباکترهای افزایش‌دهنده رشد با رقابت برای مواد غذایی، کاهش تماس بین عامل بیماریزا و ریشه گیاه و تداخل با مکانیسم‌هایی بیماریزایی به‌شکل غیر مستقیم مانع از ایجاد بیماری در گیاهان می‌شوند (Ferreira et al., 2019).

### قارچ‌های افزایش‌دهنده رشد گیاهان (PGPF)

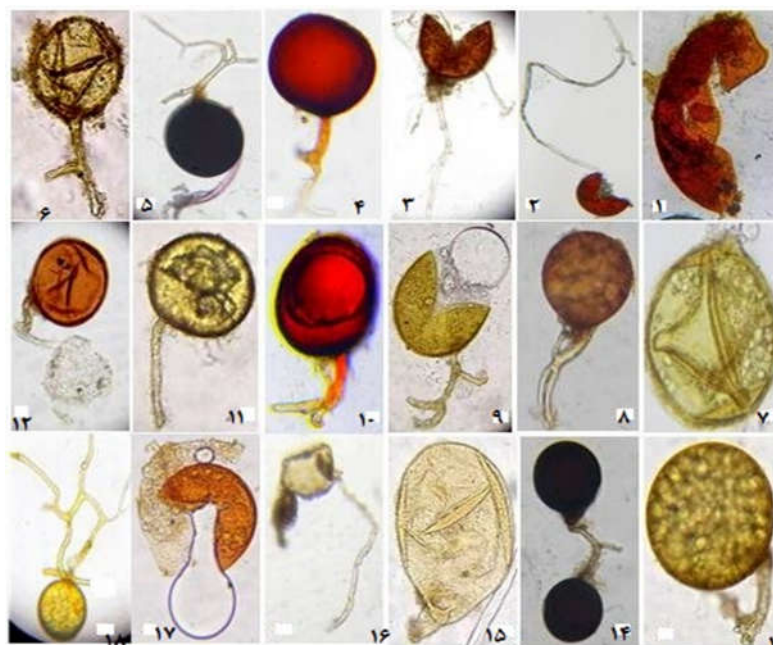
خاک دارای انواع متفاوتی از قارچ‌های مفید و بیماریزا است که قادرند در تمام مراحل رشد گیاه بر آنها تأثیر بگذارند. گونه‌های قارچی مانند آلترناریا، آسپرژیلوس، آتروپازیدیوم، کاندیدا، کلادسیپوریوم و پنی‌سیلیوم در خاک‌های مختلف از جمله خاک‌های کشاورزی و نواحی جنگلی یافت می‌شوند.

اصطلاح میکوریز که از دو کلمه یونانی "میکو" به معنی قارچ و "ریز" به معنی ریشه تشکیل شده است، برای اولین بار در سال ۱۸۸۵ توسط آلبرت فرانک گیاه‌شناس و بیماری‌شناس آلمانی برای همزیستی بین قارچ و ریشه گیاهان استفاده شد. از طریق همزیستی میکوریزی که در



تنش‌زای زنده و غیرزنده از طریق تغییرات مرفولوژیک و فیزیولوژیک نیز می‌شود. قارچ‌های میکوریزی آربسکولار نقش مهمی در حفظ و بهبود ساختار خاک با تشکیل شبکه‌ای از هیف‌ها و نگه داشتن ذرات خاک در کنار یکدیگر دارند که منجر به افزایش استقرار گیاهان می‌شود. اغلب قارچ‌های میکوریزی آربسکولار به زیرشاخه گلومرومیکوتینا از شاخه موکورومیکوتا تعلق دارند (شکل ۸). چهار رده از قارچ‌های میکوریزی آربسکولار تحت عنوان گلومرال، آرکتوسپورال، پاراگلومرال و دایورسیپورال در مجموع دارای ۲۵ جنس هستند که قادر به تشکیل همزیستی میکوریزی هستند.

این نوع همزیستی یک مثال کلاسیک از همزیستی همیاری است که باعث رشد و توسعه هر دو طرف موجود در رابطه همزیستی می‌شود. شبکه‌ای از میسلیم‌های قارچی به درون ریشه گیاه نفوذ و باعث جذب مواد غذایی می‌شوند که در حالت عادی در دسترس گیاه نیستند. مهمترین اثر قارچ‌های میکوریزی آربسکولار افزایش جذب فسفر در گیاه میزبان است. افزایش رشد در گیاهان به واسطه همزیستی با قارچ‌های میکوریزی آربسکولار ناشی از افزایش جذب آب و مواد غذایی از خاک اطراف گیاه و نیز محافظت گیاهان از عوامل بیماری‌زا می‌باشد. همزیستی میکوریزی باعث افزایش مقاومت گیاهان میکوریزی به عوامل



شکل ۸- تصاویر اسپور قارچ‌های میکوریزی آربسکولار. ۱: *Entrophospora colombiana*، ۲: *Pacispora robiginia*، ۳: *Acaulospora tuberculata*، ۴، ۱۰ و ۱۲: *Glomus deserticola*، ۵ و ۱۴: *G. constrictum*، ۶، ۷، ۸، ۱۳ و ۱۵: *G. intraradices*، ۹: *A. scrobiculata*، ۱۱: *G. clarum*، ۱۶: *Glomus sp.*، ۱۷: *P. franciscana* و ۱۸: *G. versiforme*

## همزیستی اکتومیکوریزی

تأمین ازت مورد نیاز گیاهان به‌عنوان یکی از عناصر مهم محدود کننده رشد در بسیاری از اکوسیستم‌های جنگلی به‌ویژه در نیمکره شمالی دارند. این قارچ‌ها قادرند ریشه‌های جانبی گیاه میزبان را کلنیزه کرده و ساختارهای میسلومی درهم تنیده که در اطراف سلول‌های اپیدرمی ریشه نفوذ می‌کنند را تشکیل دهند. این ساختارها به عنوان شبکه هارتیگ نامیده شده (شکل ۹) و سطح بسیار وسیعی برای تبادل مواد غذایی بین دو طرف رابطه همزیستی فراهم می‌کنند. مواد آلی از گیاه به قارچ منتقل شده و در عوض مواد غذایی مورد نیاز که قارچ‌ها به آن دسترسی دارند از طریق قارچ به گیاه منتقل می‌شود.

قارچ‌های اکتومیکوریزی در سرتاسر جهان در همزیستی با ریشه بیشتر درختان جنگلی یافت می‌شوند و نقش اساسی در عملکرد اکوسیستم‌های جنگلی دارند. با تشکیل یک رابطه همزیستی مفید، در ۸۰ تا ۹۰ درصد درختان جنگلی نواحی معتدله و سرد، این قارچ‌ها نقش مهمی در فرآیندهای خاک جنگل از جمله تجزیه مواد آلی، گردش عناصر و ترسیب کربن دارند. قارچ‌های اکتومیکوریزی قادر به جذب و تأمین عناصر پرمصرف گیاه از جمله فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیوم، گوگرد و کم مصرف مانند آهن، روی، مس و منگنز هستند. قارچ‌های اکتومیکوریزی با توانایی بالا در تجزیه ترکیبات آلی پیچیده، نقش مهمی در چرخه و



شکل ۹- در اثر همزیستی اکتومیکوریزی ساختار سیستم ریشه‌ای گیاه به‌شدت تغییر می‌کند. ریشه‌ها کوتاه و ضخیم شده و با توده‌ای از هیف‌های قارچی پوشیده می‌شوند. در ریشه‌های اکتومیکوریزی، تارهای کشنده مشاهده نمی‌شوند و جذب مواد غذایی که در حالت عادی برعهده تارهای کشنده است را قارچ انجام می‌دهد. در اطراف ریشه‌ها توده درهم تنیده‌ای از هیف‌های قارچی دیده می‌شود.

همزیستی اکتومیکوریزی، خصوصیات مانده گیاه میزبان، دامنه آب و هوایی، خصوصیات رشدی میسلیموم‌ها و توانایی جذب مواد غذایی از خاک در بین قارچ‌های اکتومیکوریزی بسیار متفاوت است.



قارچ‌های اکتومیکوریزی گروه متنوعی از آسکومیست‌ها و بازیدیومیست‌ها را دربر می‌گیرند (شکل ۱۰) که شامل بیش از ۲۰۰۰۰ گونه قارچی هستند. با وجود ساختار و عملکرد یکسان در



شکل ۱۰- تصویری از انواع قارچ‌ها که قادر به ایجاد رابطه همزیستی اکتومیکوریزی هستند.

جدول ۱ مواردی از نتایج تلقیح گونه‌های جنگلی با انواع متفاوتی از ریزوباکترهای افزایش دهنده رشد آورده شده است.

برای افزایش رشد درختان از مایه‌تلقیح‌های باکتریایی که ممکن است از یک گونه یا مخلوطی از آنها تشکیل شده باشد استفاده می‌شود. تولید مایه‌تلقیح با نمونه‌برداری و جداسازی باکتری‌ها از ریزوسفر درختان در رویشگاه‌های طبیعی شروع می‌شود. پس از جداسازی توانایی آن‌ها برای افزایش رشد و ممانعت از رشد بیماریزاهای گیاهی

کاربرد میکروارگانیسم‌های مفید خاک در اکوسیستم‌های جنگلی

#### کاربرد PGPR در اکوسیستم‌های جنگلی

تحقیق در زمینه استفاده از PGPR در اکوسیستم‌های جنگلی بسیار کمتر از کشاورزی بوده است. تحقیق در مورد اثرات PGPR بر روی درختان جنگلی از دهه ۱۹۸۰ آغاز شد. از نتایج مطالعات انجام شده بر روی درختان می‌توان در توسعه جنگل‌های صنعتی و نیز احیاء جنگل‌های تخریب‌شده در سرتاسر جهان استفاده کرد. در

بررسی می‌شود. مایه‌تلقیح‌های کنسرسیومی، مخلوطی از چند گونه، به‌علت واکنش متقابل بین سویه‌ها و محاسن ناشی از آن، به مایه‌تلقیح‌های متشکل از یک گونه برتری دارند. پس از انتخاب، سویه‌ها در محیط مایع رشد داده شده و باکتری‌ها با استفاده از سانتریفیوژ و یا فیلتراسیون جدا می‌شوند. در مقیاس تجاری مایه‌تلقیح به‌شکل مایع و یا جامد وجود دارد. عواملی مانند اسیدپتت خاک، زنده‌مانی طولانی مدت مایه‌تلقیح، محیط کشت استفاده شده برای تهیه مایه‌تلقیح و اختصاصی بودن میزبان در نتایج حاصل از تلقیح اهمیت دارند.

جدول ۱- نتایج حاصل از تلقیح گونه‌های درختی با باکتری‌های افزایش دهنده رشد

گونه جنگلی	باکتری	شرایط کاشت	اثرات تلقیح
راش و کاج	آگروباکتریوم و رادیوباکتر	گلخانه	افزایش ۲۳ و ۱۵ درصدی زی‌توده راش و کاج
کاج سیاه و سفید	آرتروباکتر و سودوموناس فلورسانس	گلخانه	افزایش زی‌توده و رشد طولی
Douglas Fir	آرتروباکتر و سودوموناس آنروفسیانس	گلخانه و عرصه	افزایش زی‌توده و رشد طولی تا ۶۸ درصد
بلوط	آزوسپریلیوم برازیلنسیس	گلخانه	افزایش رشد ریشه تا ۷۰ درصد
زبان گنجشک	آزوسپریلیوم کروکوکوم	محفظه رشد	افزایش زی‌توده ۱۳ تا ۲۶ درصد
اکالیپتوس	آزوسپریلیوم کروکوکوم و باسیلوس مگاتریوم	گلدان	افزایش زی‌توده تا ۴۴ درصد
مانگرو	باسیلوس لیکنیفورمیس و فیلوباکتریوم	گلخانه	دو برابر شدن میزان ازت و افزایش تعداد برگ‌ها

مطالعه بر روی قارچ‌های اکتومیکوریزی ثابت شده است که زنده‌مانی و رشد نهال‌هایی که با قارچ‌های اکتومیکوریزی تلقیح شده بودند در عرصه افزایش یافته و باعث عملکرد مطلوب اکوسیستم‌های جنگلی می‌گردد. در شکل ۱۱ اثرات تلقیح قارچ‌های اکتومیکوریزی بر نهال‌های درختان جنگلی آورده شده است.

### کاربرد همزیستی میکوریزی در اکوسیستم‌های جنگلی

از قارچ‌های میکوریزی به‌عنوان کود زیستی برای افزایش رشد گیاه که ناشی از توانایی آنها در افزایش جذب فسفر، ازت، مواد معدنی و آب توسط گیاهان است استفاده شده است. اولین بار Fortin در سال ۱۹۶۶ تلقیح قارچ‌های اکتومیکوریزی را به نهال‌ها در نهالستان‌های جنگلی مطرح کرد. با



الف

ب

شکل ۱۱- الف: اثر تلقیح قارچ میکوریزی بر *Douglas-fir* (چپ) و مقایسه آن با گیاه کنترل (راست) و ب: ریشه درخت کاج (*Loblolly pine*) با تلقیح (راست) و بدون تلقیح (سمت چپ) قارچ اکتومیکوریزی

میکوریزی سالم می‌شود. انتخاب صحیح گونه گیاهی- قارچ، قارچ‌های دارای سرعت رشد بالا، تهیه مایه تلقیح از کشت‌های تازه و نوع مایه تلقیح، حفظ زنده‌مانی قارچ‌ها در طی مراحل نگهداری و انتقال، حفظ قدرت آلوده‌کنندگی مایه تلقیح برای چندین ماه در در موفقیت برنامه‌های میکوریزی در نهالستان‌ها اهمیت دارد.

خاک، اسپور و میسلیم‌های قارچی سه منبع مهم برای تهیه مایه تلقیح قارچ‌های اکتومیکوریزی هستند. یکی از معایب استفاده از خاک به‌عنوان مایه تلقیح، عدم امکان کنترل گونه‌های قارچی موجود در مایه تلقیح و یا وجود میکروارگانیسم‌های مضر است. به‌علاوه مقدار زیادی خاک برای تلقیح در نهالستان لازم است. استفاده از نهال‌های میکوریزی یا اضافه کردن قطعات ریشه‌های گیاه

در انتخاب موثرترین گونه قارچی عوامل آب و هوایی مانند دما، رطوبت، خصوصیات خاک مانند بافت و نفوذپذیری خاک، وجود تنش‌های غیرزنده مانند ترکیبات سمی و فلزات آلوده‌کننده و چرخه گردش عناصر اهمیت دارند. عوامل دیگری مانند اختصاصی بودن رابطه گیاه/ قارچ، سلامت و زی-توده گیاه نیز نقش دارند. به‌علاوه فراوانی، کارایی، قدرت رقابت، سرعت رشد و خوش‌خوراکی قارچ برای سایر موجودات نیز باید در نظر گرفته شود.

### کاربرد قارچ‌های میکوریزی در نهالستان و عرصه‌های جنگلی

تولید نهال‌های سالم و قوی از مهمترین نگرانی‌های کارکنان و مدیران نهالستان‌ها در سرتاسر دنیا است. تلقیح نهال‌ها در نهالستان‌ها قبل از کاشت در عرصه، باعث ایجاد یک سیستم



همزیستی میکوریزی در گیاهان مناطق خشک و تخریب شده باعث می‌شود که درختان جوان به‌ویژه در مراحل اولیه استقرار و قبل از تشکیل یک سیستم ریشه‌ای کارآمد بتوانند در برابر تنش‌های غیرزنده (خشکی، گرما و کمبود مواد غذایی) مقاومت کرده و احتمال موفقیت برنامه‌های احیاء افزایش یابد.

با توجه به این که قارچ‌های اندومیکریزی همزیست‌های اجباری هستند، رشد آنها فقط در ارتباط با گیاه میزبان یا تله امکان‌پذیر است. برای تولید مایه‌تلقیح قارچ‌های اندومیکوریزی بیشتر از روش‌های وابسته به خاک<sup>۱</sup> در گلدان مانند کشت تله<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. این روش استریل نبوده و اغلب با انواع دیگری از قارچ‌های اندومیکریزی، سایر میکروارگانیسم‌ها و عوامل بیماری‌زا آلوده می‌شوند. روش‌های دیگری نیز وجود دارد که به خاک وابسته نبوده و قارچ‌ها تحت شرایط استریل رشد داده می‌شوند، اما این روش‌ها گران‌تر بوده و به‌راحتی در اختیار همگان نیست. سیستم *In vitro* یا کشت اندام ریشه، روش دیگری است که برای تولید مایه‌تلقیح قارچ‌های اندومیکوریزی استفاده می‌شود. در این روش تغییر ژنتیکی گیاه توسط

میزبان دارای همزیستی اکتومیکوریزی به‌عنوان منبع مایه‌تلقیح موفقیت‌آمیز بوده است. مهم‌ترین حسن استفاده از اسپور عدم نیاز به استفاده از کشت‌های استریل و نیز سبک بودن مایه‌تلقیح است. استفاده از اسپور به‌عنوان مایه‌تلقیح دو عیب اصلی دارد ۱- در این روش مقدار زیادی اجسام میوه‌ای لازم است که ممکن است هر سال در دسترس نباشد. و ۲- موفقیت تلقیح به زنده بودن اسپور بستگی دارد. در مایه‌تلقیح‌های میسلیمی از هیف به‌عنوان مایه‌تلقیح در یک محیط یا سوبسترای مایع یا جامد استفاده می‌شود. استفاده از هیف به این دلیل که می‌توان گونه خاصی از قارچ را که قبلاً توانایی آن در افزایش رشد گیاهان ثابت شده است انتخاب کرد، به‌عنوان کارآمدترین نوع مایه‌تلقیح در نظر گرفته می‌شود. مهم‌ترین عیب استفاده از هیف به‌عنوان مایه‌تلقیح سرعت رشد پائین (به‌دلیل عدم وجود گیاه میزبان) و عدم سهولت تولید مقادیر زیادی از مایه‌تلقیح برای تلقیح در مقیاس وسیع در نهالستان‌ها است (Thapar, 1989).

از قارچ‌های اندومیکوریزی در برنامه‌های Renaturation و Afforestation برای احیاء مناطق تخریب شده استفاده می‌شود. وجود

<sup>1</sup> Soil based system

<sup>2</sup> Trap culture

- ۳- معرفی و تولید انبوه مایه‌تلقیح‌های میکروبی که باعث افزایش رشد درختان جنگلی می‌شوند.
- ۴- توجه به شرایط آب و هوایی، اقلیمی و خصوصیات خاک نهالستان و یا عرصه به‌هنگام استفاده از میکروارگانیسم‌های مفید
- ۵- بهبود فرآیند انتقال اطلاعات و یافته‌های
- باکتری *Agrobacterium rhizogenes* Conn. باعث می‌شود همه بافت‌های گیاه که ترانسفورمه شده‌اند به ریشه تبدیل شوند. هویج و پیچک صحرائی از اولین گیاهانی بودند که با *Agrobacterium rhizogenes* Conn ترانسفورمه شدند (Douds et al., 2000).

### توصیه ترویجی

- ۶- وضع قوانین توسط دولت‌ها و نیز سازمان‌های بین‌المللی برای تشویق استفاده از میکروارگانیسم‌ها
- ۷- بالابردن کارایی میکروارگانیسم‌ها در افزایش رشد درختان با انجام تحقیقات توسط محققان حوزه‌های مختلف
- به‌منظور افزایش کاربرد میکروارگانیسم‌های مفید در اکوسیستم‌های جنگلی موارد زیر توصیه می‌شود:
- ۱- استفاده از میکروارگانیسم‌های بومی هر منطقه به‌منظور بالابردن کارایی عملکرد آنها
- ۲- استفاده از مایه‌تلقیح‌های متشکل از چندین میکروارگانیسم مفید به‌جای مایه‌تلقیح‌های ساده

### منابع

- Douds, D.D., Gadkar, V. Jr. and Adholeya, A. 2000. Mass production of VAM fungus biofertilizer. In: Mukerji, K.J., Chamola, B.P. and Singh, J. (ed), Mycorrhizal biology. Kluwer Academic/Plenum Publishers, 197-215.
- Ferreira, M.J., Silva, H. and Cunha, A. 2019. Siderophore-producing rhizobacteria as a promising tool for empowering plants to cope with iron limitation in saline soils: A review. *Pedosphere*, 29 (4): 409-420.
- Fortin, J.A. 1966. Synthesis of mycorrhizae on explants of the root hypocotyl of *Pinus sylvestris*. *Canadian Journal of Botany*, 44: 1087-1092.
- Frac, M., Hannula, S.E., Belka, M. and Jędrzycka, M. 2016. Fungal biodiversity and their role in soil health, *Frontiers in Microbiology*. doi: 10.3389/fmicb.2018.00707.
- Glick, B.R. 2018. Soil microbes and sustainable Agriculture. *Pedosphere*, 28 (2): 167-169.
- Thapar, H.S. 1989. Role of mycorrhiza in forestry. In: Dhawan, V. (ed), *Applications of biotechnology in forestry and horticulture*. Springer, Boston, MA, 298-307.
- Van Der Heijden, M.G.A., Bardgett, R.D.N. and Van Straalen, M. 2008. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 11 (6): 296-310.