کارایی برخی از گونه‌های قارچی در انحلال فسفات و رهاسازی پتاسیم و آهن از فلوگوپیت و موسکویت

صفورا ناهیدان [۱*]، نساء احدی [۲]، سمیرا عبدالرحیمی [۳]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۷ تاریخ پذیرش:۱۴۰۱/۰۲/۰۳)

چکیده

استفاده از ریزجانداران کارآمد می‌تواند درتأمین عناصر ضروری فسفر، پتاسیم و آهن برای گیاهان سودمند باشد. در پژوهش حاضر، توانایی آزادسازی این عناصر از کانی‌های نامحلول توسط چندین گونه‌ی قارچی شامل *Trichoderma asperellum*، *T. atroviride*، *T. brevicompactum*، *T. citrinoviride*، *T. harzianum*، *T. koningii*، *T. viridescens* و *Alternaria* sp. و *Aspergillus niger* ارزیابی شد. بدین منظور، قارچ‌های نامبرده در سه تکرار به محیط کشت مایع الکساندروف دارای تری‌کلسیم فسفات (منبع فسفر) و موسکویت یا فلوگوپیت (منبع پتاسیم و آهن) افزوده و به مدت ۱۰ روز در شرایط بهینه نگهداری شدند. نتایج نشان داد که گونه‌های قارچی در مقایسه با شاهد قادر به آزادسازی پتاسیم بیشتر به میزان ۱۰۳ تا ۳۸۹ درصد از کانی فلوگوپیت و ۲۱/۵ تا ۱۷۸ درصد از کانی موسکویت بودند. در بین گونه‌های قارچی، بیشترین آزادسازی پتاسیم توسط *Aspergillus niger* و *T. koningii* از فلوگوپیت و کمترین آن توسط *T. atroviride* از موسکویت دیده شد. بیشترین مقدار آهن محلول در حضور قارچ *T. citrinoviride* و *Aspergillus niger* در محیط کشت دارای فلوگوپیت اندازه‌گیری شد. بیشترین افزایش فسفر محلول توسط گونه‌های *Aspergillus niger* (در حضور دو کانی)، *Alternaria* sp.، *T. citrinoviride*، *T. coningii* و *T. viridescens* در حضور فلوگوپیت در مقایسه با شاهد مشاهده شد. گونه‌های قارچی، هدایت الکتریکی را افزایش دادند که نشان‌دهنده آزادسازی عناصر از منابع نامحلول توسط قارچ‌ها است. همچنین بین مقدار فسفر، پتاسیم و آهن با pH رابطه منفی و معنی‌داری مشاهده شد که نشان‌دهنده آن است که احتمالا گونه‌های قارچی با تولید اسیدهای آلی و معدنی توانسته‌اند منجر به آزادسازی عناصر از منابع نامحلول آن‌ها شوند. در مجموع، نتایج نشان داد که گونه‌های قارچی، توانایی انحلال تری‌کلسیم فسفات و آزادسازی پتاسیم و آهن بیشتری را از فلوگوپیت در مقایسه با موسکویت در شرایط درون شیشه‌ای دارند. بنابراین، استفاده از این ریزجانداران درتأمین عناصر ضروری گیاه می‌تواند امیدوارکننده باشد.

واژه های کلیدی: فلوگوپیت، موسکویت، تری‌کلسیم فسفات، قارچ

ناهیدان ص.، احدی ن.، عبدالرحیمی س. ۱۴۰۲. کارایی برخی از گونه‌های قارچی در انحلال فسفات و رهاسازی پتاسیم و آهن از فلوگوپیت و موسکویت. تحقیقات کاربردی خاک. جلد۱۱، شماره ۱. صفحه: ۱۱۲-۱۲۴.

۱- استادیار گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- دانشجوی دکتری گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۳- دانشجوی دکتری گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

* پست الکترونیک: s.nahidan@basu.ac.ir

مقدمه

از میان عناصر غذایی ضروری، نیاز به فسفر در گیاهان به گونه‌ی چشمگیری فراوان است. این عنصر، جزء اصلی مولکول‌های زیستی سلول مانند اسیدهای نوکلئیک، کوآنزیم‌ها، فسفوپروتئین‌ها و فسفولیپدها است و در ترابری ویژگی‌های ژنتیکی و فرآیند سوخت و ساز سلولی کارایی ویژه دارد (Jahandideh *et al.*, 2019). نقش‌های فراوان فسفر در سیستماتیک گیاهی سبب شده که بیشینه مصرف کودی را پس از کودهای نیترونه به خود اختصاص دهد. اما با وجود استفاده‌ی فراوان کودهای فسفره در اراضی کشاورزی، همواره راندمان آن‌ها ناچیز بوده و کمبود آن در گیاهان به چشم می‌خورد (Ezawa *et al.*, 2002). این مسئله به دلیل غیرمتحرک شدن فسفر در اثر تشکیل فسفات‌های آهن و آلومینیوم در خاک‌های اسیدی یا فسفات‌های کلسیم و منیزیم در خاک‌های قلیایی می‌باشد (Hao *et al.*, 2002). علاوه بر فسفر، پتاسیم نیز یکی از عناصر اصلی مورد نیاز گیاه است که در ساخت بسیاری از آنزیم‌های مهم و اثر بخش در فعالیت‌های زیستی گیاه نقش دارد. علاوه بر این، پتاسیم نقش مهمی در فتوسنتز، تقسیم و رشد سلول و ساخت پروتئین‌ها ایفا می‌کند (Saber & Zanaty, 1981). همانند فسفر میزان پتاسیم نیز در خاک‌ها فراوان است اما بیش از ۹۸٪ آن در ساختمان کانی‌های سیلیکاتی قرار دارد که غیر قابل استفاده گیاه است و تنها ۱ تا ۲ ٪ آن به شکل تبادلی و محلول وجود دارد که می‌تواند توسط گیاه به راحتی جذب گردد (Martin & Sparks, 1985).

آهن به عنوان عنصری کم‌مصرف و ضروری برای گیاه شناخته شده است. این عنصر نقش بسزایی در بسیاری از فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه از جمله فرآیندهای اکسایش و کاهش، فتوسنتز و تثبیت ازت دارد (Shenker & chen, 2005). با وجود مقدار زیاد آهن در خاک، به دلیل آهکی بودن، بالا بودن pH و شوری خاک، کمبود آن در گیاهان بروز می‌کند. کمبود آهن، مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر عملکرد و کیفیت محصولات کشاورزی سراسر جهان می‌باشد. در سیستم‌های تولید، برای رفع کمبود آهن، از نمک‌های معدنی سولفات آهن و کلات‌های مصنوعی مانند Fe-EDTA، Fe-DTPA استفاده می‌شود. ترکیبات سولفاته آهن معمولا دارای ناخالصی‌های فلزات سنگین بوده و به دلیل شرکت در واکنش‌های رسوب در خاک کارایی بالایی ندارند. علی‌رغم تأثیر قابل توجه کلات‌های مصنوعی در رفع کمبود آهن گیاه، به دلیل هزینه زیاد نسبت به ترکیبات سولفاته، استفاده از آن‌ها اقتصادی نیست (Jones, 2020).

با توجه به اینکه همواره کمبود عناصر غذایی ضروری گیاه از جمله فسفر، پتاسیم و آهن در زمین‌های کشاورزی به چشم می‌خورد، نیاز به شناخت راه‌کارهای مناسب و اثربخش در بازیابی این عناصر به منظور افزایش باروری گیاه ضروری است. در دو دهه‌ی گذشته، استفاده از ریزجانداران سودمند خاک برای رفع نیاز گیاه به عناصر غذایی و بهبود کمیت و کیفیت محصولات کشاورزی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است (Sarikhani *et al.*, 2013). از میان ریزجانداران سودمند خاک، قارچ‌ها با توجه به توانایی آن‌ها در ساخت متابولیت‌های گسترده‌ای مانند مواد کلاته کننده و اسیدهای آلی، ایجاد هیف و دسترسی بهتر به مناطق دورتر خاک و همچنین پایداری بیشتر آن‌ها در برابر تنش‌های زیست محیطی، مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند (Gaind, 2016). اسیدهای آلی ترشح شده از قارچ‌ها می‌توانند با واکنش‌های تبادل لیگاندی و یا با کلاته کردن فلزها منجر به تخریب کانی‌ها شوند (Bolan *et al.*, 1994). کارایی یک اسید آلی برای تخریب کانی به ویژگی‌های شیمیایی آن اسید مانند فراوانی گروه‌های کربوکسیل و جایگاه گروه‌های هیدروکسیل، ثابت پایداری کمپلکس اسید آلی- فلز، غلظت اسید، غلظت و گونه فلزها در محلول و pH محلول، بستگی دارد (Whitelaw, 1999). از میان شاخه‌های گوناگون قارچ‌ها، برخی از جنس‌های شاخه‌ی آسکومایکوتا، مانند *تریکودرما*، *آسپرژیلوس* و *آلترناریا* جزء قارچ‌های متداول خاک بوده و در خاک ریزوسفری به فراوانی یافت می‌شوند. این قارچ‌ها، نقش چشم‌گیری در افزایش بهره وری محصول، مبارزه با عوامل بیماری‌زای گیاهی، مقاومت گیاه در برابر تنش‌های محیطی و افزایش توان جذب عناصر غذایی برای گیاه ایفا کرده‌اند (Aletaha *et al.*, 2018; Yuvaraj & Ramasamy, 2020; Zin & Badaluddin, 2020). پژوهش‌هایی نیز گزارش کرده‌اند که این قارچ‌ها، نقش مهمی در آزادسازی عناصر غذایی از منابع غیرقابل دسترس خاک را دارند. در این باره لودی و همکاران (Lodi *et al.*, 2021) بیان کردند که قارچ *آسپرژیلوس* به کمک کاهش اسیدته و تولید پلی

ساکاریدهای خارج سلولی و ایجاد کمپلکس‌هایی با یون‌های همراه پتاسیم سبب رهاسازی پتاسیم موجود در کانی فلدسپار شده است. همچنین احدی و همکاران (Ahadi *et al.*, 2021) بیان کردند که گونه‌هایی از قارچ‌های اندوفیت *آسپرژیلوس* و *آلترناریا* با کاهش pH محیط کشت، باعث انحلال فسفر نامحلول از منبع خاک فسفات شدند. رویی ژیا و همکاران (Rui-Xia *et al.*, 2015) نیز گزارش کردند که قارچ *تریکودرما* دارای توانایی افزایش قابلیت دسترسی فسفر، آهن، منگنز، مس و روی برای گیاه گوجه فرنگی بوده و علت این مسئله را به توانایی این قارچ از طریق اسیدی کردن محیط به دلیل تولید اسیدهای آلی، کلاته کردن به‌وسیله تولید سیدروفورها، اکسیداسیون و احیاء و هیدرولیز فسفر آلی توسط آنزیم فیتاز نسبت دادند. ناهیدان و همکاران (Nahidan *et al.*, 2019) نیز مشاهده کردند که گونه‌هایی از قارچ *تریکودرما* دارای توان انحلال فسفات و آزادسازی پتاسیم از کانی بیوتیت در شرایط درون شیشه‌ای هستند. در پژوهش حاضر نیز، توان انحلال فسفر از تری‌کلسیم فسفات توسط گونه‌هایی از *تریکودرما*، *آسپرژیلوس* و *آلترناریا* در محیط کشت حاوی کانی‌های موسکویت و فلوگوپیت مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، کارایی قارچ‌های ذکر شده در آزادسازی پتاسیم و آهن از این کانی‌ها ارزیابی شد. موسکویت و فلوگوپیت به ترتیب کانی‌های میکایی دی و تری‌اکتاهدرال هستند و در ساختمان خود دارای پتاسیم و آهن قابل توجهی می‌باشند. این کانی‌ها در اکثر خاک‌های ایران به ویژه مناطق خشک و نیمه خشک یافت می‌شوند (Nourouzi & Khademi, 2009). در صورتی‌که پتاسیم و آهن غیرتبادلی و ساختمانی این کانی‌ها، سریع‌تر آزاد شده و در اختیار گیاه قرار گیرند، می‌توانند جایگزین مناسبی برای کودهای شیمیایی باشند. از آن‌جایی که ریزجانداران در هوادیدگی زیستی کانی‌ها نقش ویژه‌ای دارند، بنابراین هدف از پژوهش حاضر یافتن قارچ‌های کارآمد در آزادسازی عناصر ضروری گیاه از کانی‌ها و استفاده از آن‌ها در افزایش تولید محصولات کشاورزی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

گونه‌های قارچ مورد استفاده

در این پژوهش، هفت گونه قارچ *تریکودرما* شامل *Trichoderma asperellum*، *T. atroviride*، *T. brevicompactum*، *T. citrinoviride*، *T. harzianum*، *T. koningii*، *T. viridescens* و دو قارچ اندوفیت و غیر بیماریزای جدا شده از درخت گردو شامل *Alternaria* sp. و *Aspergillus niger*، از کلکسیون قارچی گروه گیاه‌پزشکی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینای همدان اخذ شد. برای تکثیر گونه‌های قارچی از محیط کشت PDA[1] استفاده شد.

پیش تیمار اولیه فلوگوپیت و موسکویت قبل از استفاده در محیط‌های کشت

کانی‌های فلوگوپیت و موسکویت از معادنی در همدان تهیه شدند. تجزیه عنصری فلورسانس پرتو ایکس (XRF) این کانی‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به غنی بودن کانی‌های میکایی از پتاسیم قابل دسترس، قبل از انجام آزمایش، فرآیند پیش تیمار اسید شویی بر روی این کانی‌ها اعمال شد. با انجام این کار، توانایی قارچ‌ها در آزادسازی پتاسیم غیرقابل دسترس کانی‌ها بررسی خواهد شد. بدین منظور، ۰/۴ گرم از پودر کانی در ۳۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۰/۱ مولار به مدت ۳۰ دقیقه در ۱۵۰ دور در دقیقه تکان داده شد. بعد از سانتریفیوژ نمودن در ۶۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۵ دقیقه، محلول رویی دور ریخته شد. مجدداً کانی در ۳۰ میلی‌لیتر آب مقطر تکان داده و پس از سانتریفیوژ مجدد، محلول رویی آن دور ریخته شد. کانی جمع‌آوری شده به مدت ۱ شب در دمای ۸۰ درجه سلسیوس خشک گردید (Sarikhani, *et al.*, 2016).

آزمون کمی توان قارچ‌ها در رهاسازی پتاسیم و آهن و انحلال فسفات نامحلول

برای سنجش توانایی رهاسازی عناصر پتاسیم و آهن و انحلال فسفات نامحلول توسط جدایه‌های قارچی، از محیط کشت مایع الکساندروف حاوی کانی‌های میکایی فلوگوپیت یا موسکویت و تری کلسیم فسفات استفاده شد (جدول ۲). بدین منظور، قطعاتی به قطر ۵ میلی‌متر از میسیلیوم‌های جوان قارچی رشد یافته در محیط کشت

1 .Potato Dextrose Agar

PDA به درون ظروف سترون شده‌ی حاوی ۲۵ میلی‌لیتر از محیط کشت‌های تهیه شده قرار داده و به همراه تیمار شاهد (تیمار بدون قارچ) در سه تکرار در دمای ۲۸ درجه سلسیوس به مدت ۱۰ روز در تاریکی نگهداری شدند. سپس، کل محتویات درون هر ظرف با سرعت ۵۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۵ دقیقه سانتریفیوژ و سپس با کاغذ صافی واتمن صاف گردید. از سوسپانسیون‌های حاصل به مقدار ۲ میلی‌لیتر برداشته و پس از چندین بار رقیق‌سازی، مقدار فسفر در مایع صاف رویی به روش وانادات مولیبدات در طول موج ۴۳۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (Deaker *et al*., 2011). پتاسیم و آهن آزاد شده از کانی‌ها به ترتیب توسط فلیم‌فتومتر (مدل Jenway, PFP7.) و دستگاه جذب اتمی (مدل Varian SpectrAA 220) مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. در نهایت pH و هدایت الکتریکی (EC) محیط‌کشت نیز اندازه‌گیری شد.

آنالیز آماری

این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی در سه تکرار انجام شد. در این آزمایش، فاکتور اول، گونه‌های قارچی (۱۰ سطح) و فاکتور دوم، کانی‌های میکایی (۲ سطح) در نظر گرفته شد. آنالیز داده‌ها با نرم افزار SAS و ترسیم نمودارها با نرم افزار Excel انجام گرفت. مقایسات میانگین نیز توسط آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

جدول ۱- تجزیه عنصری کانی‌های میکایی مورد استفاده در این آزمایش با استفاده از فلورسانس پرتو ایکس (درصد)

Table 1. Elemental analysis of micaceous minerals used in the experiment using XRF (%)

Mineral type	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	CaO	Fe_2O_3	MnO	P_2O_5	TiO_2	LOI*
Muscovite	0.64	0.08	33.99	48.44	9.98	0.17	1.67	0.06	0.03	0.06	4.5
Phlogopite	0.45	22.54	14.62	42.24	9.27	4.12	4.21	0.11	0.04	0.56	0.9

* کاهش وزن در دمای بالا

* Loss on Ignition

جدول۲- ترکیبات محیط کشت الکساندروف مورد استفاده در این پژوهش ($g\ L^{-1}$)

Table 2. Compositions of Aleksandrov culture medium used in this study ($g\ L^{-1}$)

$Ca_3(PO4)_2$	Mica	$CaCO_3$	$MgSO_4.7H_2O$	Glucose
2	2	0.1	0.5	5

نتایج و بحث

تأثیر گونه‌های قارچی بر pH

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی نوع قارچ و نوع کانی و اثر متقابل آن‌ها بر pH محیط کشت معنی‌دار شد (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها حاکی از آن بود که گونه‌های قارچی باعث کاهش pH محیط کشت در حضور هر دو کانی در مقایسه با شاهد شدند. از بین گونه-های قارچی، کمترین مقدار pH در محیط کشت حاوی قارچ *Aspergillus niger* و کانی فلوگوپیت (۲/۸۷) و بیشترین مقدار آن در محیط کشت حاوی قارچ *T. brevicompactum* و کانی موسکویت (۵/۹۴) اندازه‌گیری شد (شکل ۱). این کاهش pH محیط کشت توسط قارچ-ها، می‌تواند به دلیل تولید اسیدهای آلی و معدنی توسط این ریزجانداران به منظور انحلال منابع نامحلول عناصر باشد (Gaind, 2016; Zhang *et al*., 2018). همچنین گایند (Gaind, 2016) بیان کرد که کاهش pH محیط کشت توسط *Aspergillus niger* در اثر جذب آمونیوم توسط سلول و آزادسازی هیدروژن نیز اتفاق می‌افتد. با جذب آمونیوم توسط سلول به منظور ساخت آمینواسیدها و تبدیل آن به آمونیاک، pH درون سیتوپلاسم به دلیل افزایش غلظت هیدروژن کاهش یافته و بنابراین هیدروژن اضافه به بیرون از سلول پمپاژ می‌گردد.

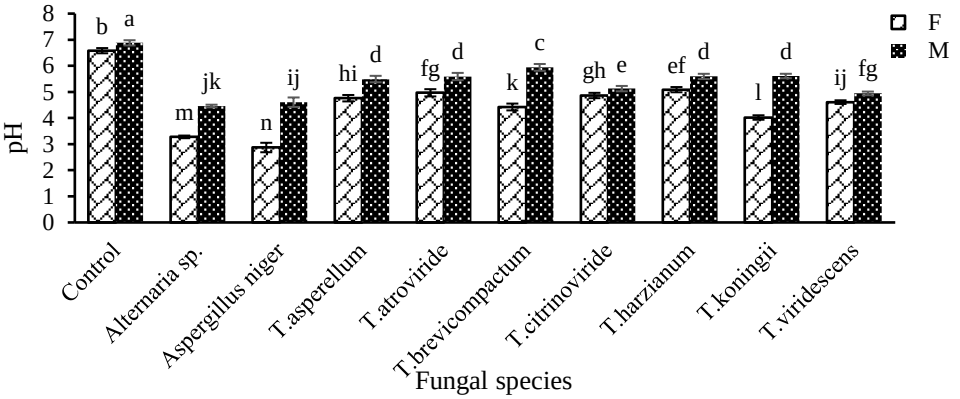
جدول ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر قارچ و کانی بر ویژگی‌های اندازه گیری شده

Table 3. Analysis of variance (mean squares) of fungi and mineral effect on measured parameters

Sources of variation	df	pH	EC	P	K	Fe
Fungi species (F)	9	2.86***	2.26***	412***	0.998***	0.129***
Mineral type (M)	1	15.2***	0.413***	481***	5.08***	3.42***
F*M	9	0.498***	0.356***	66.5***	0.169***	0.055***
Error	40	0.009	0.003	2.93	0.017	0.007
Coefficient of variation (%)	-	1.89	5.05	1.86	12.06	16.94

***: معنی داری در سطح احتمال ۰/۱ درصد

***: Significant at 0.1% probability level.

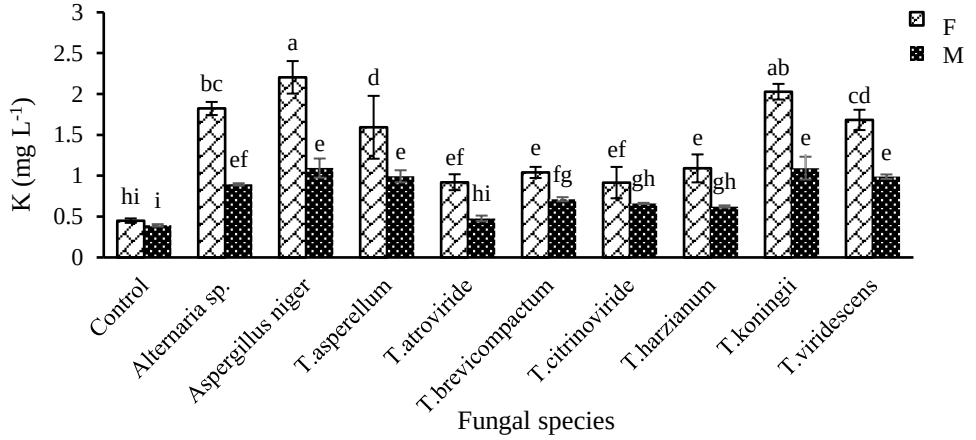


شکل ۱- تغییرات pH توسط گونه‌های قارچی در حضور فلوگوپیت (F) و موسکویت (M) (میانگین‌های دارای حروف مشترک، فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند).

Figure 1. pH changes by fungal species in the presence of phlogopite (F) and muscovite (M) (Means with common letters have no significant difference at 5% probability level).

تأثیر گونه‌های قارچی بر پتاسیم محلول

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی نوع قارچ و نوع کانی و اثر متقابل آن‌ها بر پتاسیم محلول معنی‌دار شد (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که گونه‌های قارچی قادر به آزادسازی پتاسیم به میزان ۱۰۳ تا ۳۸۹ درصد در محیط کشت دارای کانی فلوگوپیت و ۲۱/۵ تا ۱۷۸ درصد در محیط کشت دارای کانی موسکویت می‌باشند. در بین گونه‌های قارچی، بیشترین مقدار پتاسیم محلول در حضور قارچ *Aspergillus niger* (۲/۲۰ میلی گرم بر لیتر) و *T. koningii* (۲/۰۲ میلی گرم بر لیتر) در محیط کشت دارای کانی فلوگوپیت و کمترین مقدار آن در در حضور قارچ *T. atroviride* (۰/۴۷ میلی گرم بر لیتر) در محیط کشت دارای کانی موسکویت دیده شد (شکل ۲). از آن‌جایی که فلوگوپیت، کانی تری-اکتاهدرال و موسکویت، کانی دی‌اکتاهدرال می‌باشد و هوادیدگی فلوگوپیت سریع‌تر از موسکویت انجام می‌گیرد، پتاسیم موجود در فلوگوپیت قابلیت دسترسی بیشتری برای ریزجانداران خواهند داشت. بنابراین همان‌طور که در نتایج نیز قابل مشاهده است، قارچ‌ها، پتاسیم بیشتری را از فلوگوپیت نسبت به موسکویت آزاد کرده‌اند. در پژوهش‌های پیشین هم آزادسازی بیشتر پتاسیم از کانی-های تری‌اکتاهدرال نسبت به دی‌اکتاهدرال توسط ریزجانداران گزارش شده است (Pinzari *et al*., 2022; Sadeghi Azad *et al*., 2017, Ashrafi Saedloo *et al*., 2017; Eslami Seyyedmahaleh *et al*., 2017). در توجیه این مسئله دو دلیل عنوان شده است: ۱) در کانی موسکویت، موقعیت هیدروکسیل نسبت به ورقه‌های سیلیکات، مایل بوده و فاصله پروتون و پتاسیم هم زیادتر است، در نتیجه پتاسیم کمتر دفع می‌شود. در حالی که در فلوگوپیت، این موقعیت نرمال بوده و پروتون نزدیک پتاسیم بین لایه‌ای می‌باشد، در نتیجه پتاسیم بیشتر دفع می‌گردد. ۲) کاتیون غالب در ورقه اکتاهدرال کانی فلوگوپیت، آهن (II) و منیزیم و در کانی موسکویت، آلومینیوم می‌باشد. از آن‌جایی‌که حلالیت آهن و منیزیم نسبت به آلومینیوم بیشتر است، لذا یون پتاسیم در فلوگوپیت پایداری کمتری نسبت به موسکویت دارد.



شکل ۲- رهاسازی پتاسیم از فلوگوپیت (F) و موسکویت (M) توسط گونه‌های قارچی (میانگین‌های دارای حروف مشترک، فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند).

Figure 2. Release of potassium from phlogopite (F) and muscovite (M) by fungal species (Means with common letters have no significant difference at 5% probability level).

نتایج همچنین نشان داد که افزایش پتاسیم محلول در اثر تلقیح قارچی با کاهش pH محیط کشت همراه بوده است، بدین صورت که همبستگی منفی و معنی‌داری بین پتاسیم محلول و pH ($r= -۰/۸۰۷$، $P <۰/۰۰۱$) مشاهده گردید (جدول ۴). بنابراین این نتایج گویای آن است که کاهش pH در اثر تولید احتمالی اسیدهای آلی و معدنی از دلایل آزادسازی پتاسیم از کانی‌ها توسط گونه‌های قارچی مورد استفاده در این پژوهش می‌باشد. افزایش حلالیت کانی بوسیله قارچ‌ها به قدرت اسید ترشح شده و اثر آن بر pH بستگی دارد. کلاواتی و همکاران (Kalavati *et al.*, 2012) گزارش کردند که گونه‌هایی از قارچ *آسپرژیلوس* دارای توانایی آزادسازی پتاسیم از فلدسپار هستند. همچنین این قارچ‌ها با تولید اسیدهای آلی باعث کاهش قابل توجه pH محیط کشت مورد آزمایش شده بودند. رویی ژیا و همکاران (Rui-Xia *et al.*, 2015) مشاهده کردند که قارچ *Aspergillus nidulans* با بیان بیشتر ژن کدکننده آنزیم کربونیک انهیدراز در حضور کانی‌های پتاسیم‌دار فلدسپار، بیوتیت و ولاستونیت در مقایسه با کلرید پتاسیم قادر است اسید کربونیک بیشتری تولید و با کاهش pH به آزادسازی پتاسیم از کانی‌ها کمک نماید. ناهیدان و همکاران (Nahidan *et al.*,2019) نیز بیان کردند که گونه‌هایی از قارچ *تریکودرما* توانایی آزادسازی پتاسیم از منبع بیوتیت را دارند که این توانایی با کاهش pH محیط کشت همراه بوده است. اشرفی سعیدلو و همکاران (Ashrafi Saedloo *et al.*, 2017) نیز بیشترین افزایش پتاسیم محلول و کاهش pH را در تیمار تلقیح یافته با قارچ *آسپرژیلوس* در حضور کانی فلوگوپیت در مقایسه با فلدسپار و ایلیت گزارش کردند. در واقع اسیدهای ترشح شده توسط قارچ‌ها، با کاهش pH و سست کردن پیوندهای شیمیایی کانی‌ها، همچنین تشکیل کمپلکس با کاتیون‌های سطحی کانی‌ها، آزادسازی عناصر موجود در آن‌ها را تسریع می‌کنند (Lian *et al.*, 2008). علاوه بر تولید اسیدهای آلی و معدنی، تولید پلی ساکاریدهای خارج سلولی توسط ریزجانداران و ایجاد کمپلکس با یون‌های همراه پتاسیم در کانی‌ها (Sarikhani *et al.*, 2018)، همچنین اکسید شدن آهن (II) به آهن (III) در کانی‌ها می‌تواند بر تخریب کانی و آزادسازی پتاسیم ساختمانی آن‌ها تأثیرگذار باشد (Pnizari *et al.*, 2022). علاوه بر آن، لیان و همکاران (Lian *et al.*, 2008) بیان کردند که به غیر از تولید متابولیت‌های میکروبی، هیف قارچ‌ها می‌تواند از طریق نفوذ به درون کانی‌ها و تخریب مکانیکی آن‌ها، بر آزادسازی عناصر موثر باشد.

جدول ۴- همبستگی بین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده

Table 4. Correlation between the measured parameters

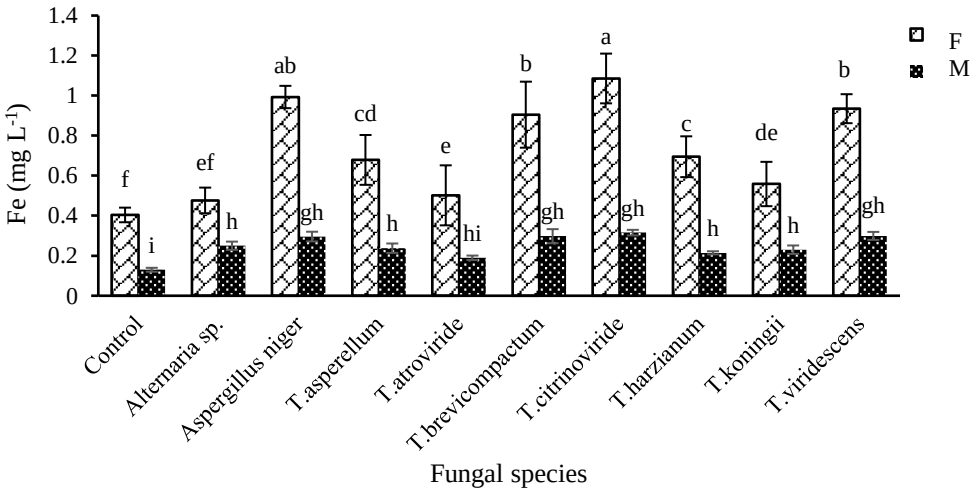
Parameters	pH	K	Fe	P	EC
pH	1	-0.807***	-0.575***	-0.723***	-0.779***
K		1	0.540***	0.642***	0.678***
Fe			1	0.409***	0.139^{ns}
P				1	0.742***
EC					1

ns و *** به ترتیب نشان‌دهنده غیر معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۱ درصد می‌باشد.

ns and *** denote non-significant and significant at 0.1% probability level, respectively.

تأثیر گونه های قارچی بر آهن محلول

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی نوع قارچ و نوع کانی و اثر متقابل آن‌ها بر آهن محلول در محیط کشت معنی‌دار شد (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین گونه‌های قارچی از نظر توانایی آزادسازی آهن از کانی فلوگوپیت دیده شد ولی چنین تفاوتی در حضور کانی مسکوویت مشاهده نشد. به هر جهت، از بین قارچ‌های مورد استفاده، بیشترین مقدار آهن محلول در حضور قارچ *T. citronviride* و *Aspergillus niger* در محیط کشت دارای کانی فلوگوپیت و کمترین مقدار آن در حضور قارچ *T. atroviride* در محیط کشت دارای کانی موسکویت دیده شد (شکل ۳). با توجه به این‌که مقدار آهن در فلوگوپیت بیشتر از موسکویت است (جدول ۱) و همچنین فلوگوپیت ساختمان ضعیف‌تری نسبت به موسکویت دارد (Hatami *et al.*, 2017) در نتیجه، با هوادیدگی بیشتر فلوگوپیت نسبت به موسکویت توسط قارچ‌ها، عناصر بیشتری از جمله آهن نیز آزاد می‌شود. مشابه با پتاسیم، همبستگی منفی و معنی‌داری بین pH و آهن محلول در محیط کشت مشاهده شد (r= -۰/۵۷۵، P <۰/۰۰۱). همچنین وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین پتاسیم و آهن (r= ۰/۵۴۰، P <۰/۰۰۱) بار دیگر گویای توان قارچ‌ها در گشایش کانی‌های میکایی در اثر کاهش pH می‌باشد (جدول ۴).



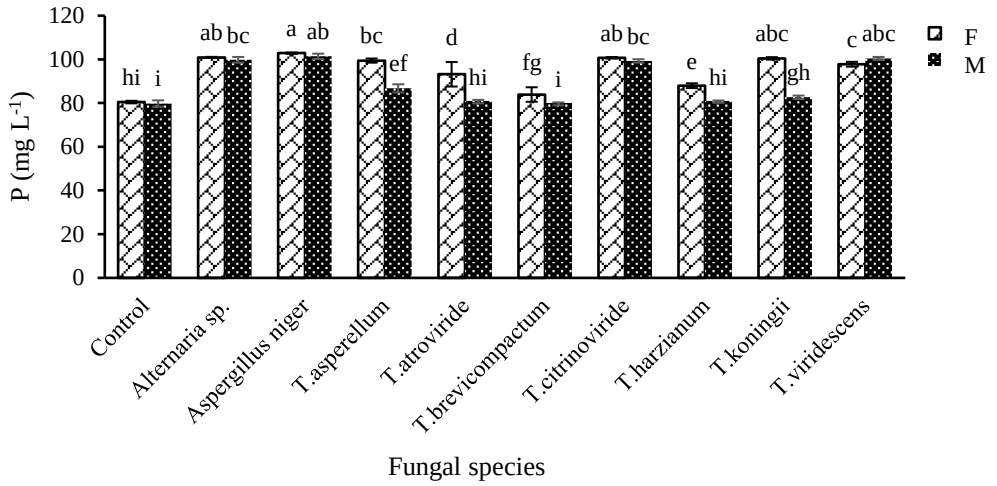
شکل ۳- رهاسازی آهن از فلوگوپیت (F) و موسکویت (M) توسط گونه‌های قارچی (میانگین‌های دارای حروف مشترک، فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند).

Figure 3. Release of iron from phlogopite (F) and muscovite (M) by fungal species (means with common letters have no significant difference at 5% probability level).

تأثیر گونه‌های قارچی بر فسفر محلول

نتایج تجزیه واریانس داده ها نشان داد که اثر اصلی نوع قارچ و نوع کانی و اثر متقابل آن‌ها بر فسفر محلول معنی-دار شد (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که گونه-های *T. atroviride*، *T. brevicompactum* و *T. harzianum* تنها در حضور کانی فلوگوپیت و سایر گونه-های قارچی در حضور دو کانی دارای پتانسیل آزادسازی فسفر از منبع تری‌کلسیم فسفات بودند. بیشترین افزایش فسفر محلول توسط گونه‌های *Aspegillus niger* (در حضور دو کانی)، *Alternaria* sp.، *T. citronviride*، *T. coningii* و *T. viridescens* در حضور فلوگوپیت در مقایسه با شاهد مشاهده شد. از بین گونه‌های قارچی، گونه‌های *T. asperellum*، *T. atroviride*، *T. brevicompactum*، *T. harzianum* و *T. coninjii* دارای توانایی بیشتری در انحلال تری‌کلسیم فسفات در محیط کشت دارای کانی فلوگوپیت در مقایسه با موسکویت بودند ولی در رابطه با سایر گونه‌های قارچی، تفاوت معنی‌داری در مقدار فسفر محلول در حضور دو کانی مشاهده نشد (شکل ۴). افزایش فسفر محلول در اثر تلقیح قارچی با کاهش pH محیط کشت همراه بود، بدین صورت‌که همبستگی منفی و معنی‌داری بین فسفر محلول و pH ($r= -۰/۷۲۳، P <۰/۰۰۱$) مشاهده گردید (جدول ۴). این نتایج با نتایج سایر پژوهشگران همخوانی دارد (Saravanakumar *et al.*, 2013; *Altomare et al.*, 1999). در حقیقت، pH یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر حلالیت فسفر است؛ بنابراین به نظر می‌رسد ریزجاندارانی که توانایی بیشتری در کاهش pH محیط کشت داشته‌اند، توان بیشتری نیز در انحلال فسفات نامحلول از منبع تری‌کلسیم فسفات دارند. سلوی و همکاران (Selvi *et al.*, 2017) کاهش pH محیط کشت از ۶/۵ به ۳/۲ توسط ریزجانداران ریزوسفری حل‌کننده فسفات نامحلول را به تولید اسیدهای آلی توسط این جدایه‌ها نسبت دادند. گایند (Gaind, 2016) کاهش pH محیط کشت و به همراه آن تولید اسید سوکسینیک و اسید فورمیک توسط قارچ *Aspergillus niger* و تولید اسید سیتریک توسط *T. harzianum* را در حضور کانی تری‌کلسیم فسفات مشاهده کردند. احدی و همکاران (Ahadi *et al.*, 2021) نیز کاهش pH محیط کشت حاوی خاک فسفات توسط برخی از قارچ‌های اندوفیت را گزارش نمودند. از بین قارچ-های بکاررفته در این پژوهش، بیشترین کاهش pH در حضور قارچ *Aspergillus terreus* و *Aspergillus calidoustus* مشاهده شد. علاوه بر تأثیر pH بر انحلال فسفات نامحلول، قارچ‌ها می‌توانند با کلاته کردن یون‌های کلسیم، آهن و آلومینیوم موجود در کانی‌های فسفره توسط گروه‌های هیدروکسیل و کروبوکسیل موجود در اسیدهای آلی، همچنین تبادلات لیگاندی باعث تخریب کانی‌ها و آزادشدن فسفر آن شوند. از مکانیسم‌های دیگر ریزجانداران حل‌کننده فسفات، تولید سیدروفور و آنزیم-های فسفاتاز و فیتاز است که منجر به افزایش قابلیت دسترسی فسفر می‌شود (Gaind, 2016; Sarikhani *et al.*, 2013).

از نتایج پژوهش حاضر همچنین برداشت می‌گردد که انحلال تری‌کلسیم فسفات توسط برخی از قارچ‌ها، در حضور کانی فلوگوپیت بیشتر از موسکویت است. با این حال، ساریخانی و همکاران (Sarikhani, *et al.*, 2016) مشاهده کردند که چندین گونه از باکتری‌های حل‌کننده فسفات، دارای توان بیشتر انحلال تری‌کلسیم فسفات در حضور کانی موسکویت نسبت به بیوتیت بودند. این پژوهشگران علت آن را به تولید احتمالی اسیدهای آلی بیش‌تر در شرایط کمبود پتاسیم نسبت دادند. با این حال، ناهیدان و همکاران (Nahidan *et al.*,2019) گزارش کردند که در حضور بیوتیت (منبع پتاسیم نامحلول) در مقایسه با کلرید پتاسیم (منبع پتاسیم محلول)، آزادسازی فسفر از تری‌کلسیم فسفات توسط گونه‌های *تریکودرما* کمتر انجام گرفت. در پژوهش حاضر نیز مشاهده گردید که پتاسیم محلول در محیط کشت حاوی فلوگوپیت بیشتر از موسکویت است. بنابراین، چنین به نظر می‌رسد که در محیط کشت دارای پتاسیم قابل دسترس بیشتر، توان انحلال تری‌کلسیم فسفات توسط قارچها بیشتر است و پتاسیم عاملی محدودکننده بر آزادسازی فسفر از منابع نامحلول آن توسط قارچها می‌باشد.



شکل۴- انحلال فسفات از تری کلسیم فسفات توسط گونه‌های قارچی در حضور فلوگوپیت (F) و موسکویت (M) (میانگین‌های دارای حروف مشترک، فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند).

Figure 4. Dissolution of phosphate from tricalcium phosphate by fungal species in the presence of phlogopite (P) and muscovite (M) (means with common letters have no significant difference at 5% probability level).

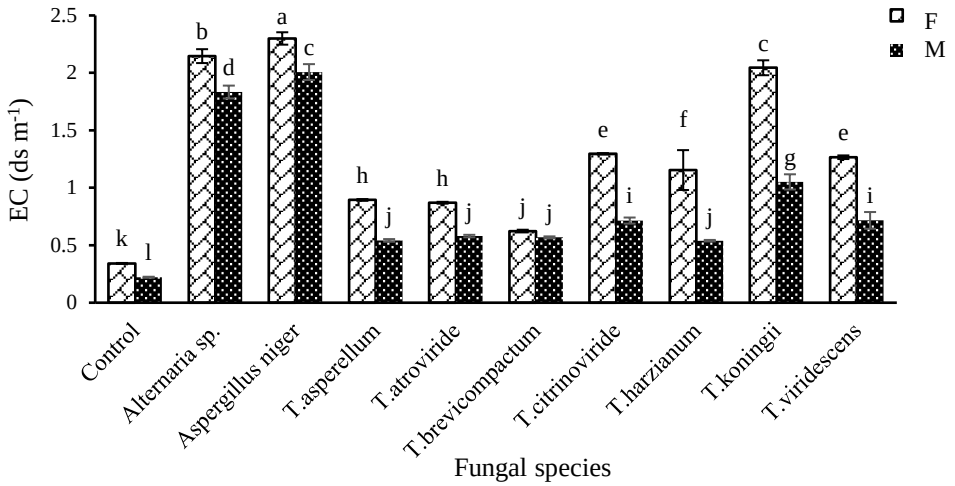
تأثیر گونه‌های قارچی بر هدایت الکتریکی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی نوع قارچ و نوع کانی و اثر متقابل آن‌ها بر هدایت الکتریکی محیط کشت معنی‌دار شد (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در هر دو محیط کشت دارای فلوگوپیت و موسکویت، قارچ‌ها هدایت الکتریکی را افزایش دادند، بدین صورت‌که بیشترین مقدار هدایت الکتریکی در محیط کشت دارای قارچ *Aspergillus niger* و کانی فلوگوپیت (۲/۳۰ دسی‌زیمنس بر متر) و کمترین مقدار آن در محیط کشت دارای قارچ‌های *T. harzianum*، *T. asperellum*، *T. brevicompactum* و *T. atroviride* و کانی موسکویت به ترتیب برابر ۰/۵۴۲، ۰/۵۳۹، ۰/۵۶۸ و ۰/۵۸۰ دسی‌زیمنس بر متر دیده شد (شکل ۵). همچنین همبستگی مثبت و معنی‌داری بین هدایت الکتریکی با پتاسیم (P <۰/۰۰۱، r= ۰/۶۷۸) و فسفر (P <۰/۰۰۱، r= ۰/۷۴۲) مشاهده گردید (جدول ۴). این نتایج گویای آن است که گونه‌های قارچی با آزادسازی فسفر و پتاسیم و احیانا یون‌های دیگری توانسته‌اند هدایت الکتریکی محیط کشت را افزایش دهند. احدی و همکاران (Ahadi *et al.*, 2021) نیز افزایش هدایت الکتریکی توسط قارچ‌های اندوفیت در محیط کشت حاوی خاک فسفات را مشاهده کردند. بیشترین مقدار هدایت الکتریکی توسط قارچ *Alternaria botrytis* اندازه‌گیری شد.

نتیجه گیری کلی

نتایج نشان داد که مقدار پتاسیم و آهن آزادشده توسط گونه‌های قارچی از کانی فلوگوپیت بیشتر از موسکویت بود. همچنین انحلال فسفات نامحلول توسط برخی از گونه‌های قارچی در حضور فلوگوپیت بیشتر از موسکویت انجام شد. نتایج نشان داد قارچ *Aspergillus niger* و *T. koningii*، توان بیشتری در آزادسازی پتاسیم از کانی‌ها داشتند. بیشترین مقدار آهن محلول در حضور قارچ *T. citrinoviride* و *Aspergillus niger* اندازه‌گیری شد. بیشترین افزایش فسفر محلول نیز توسط گونه‌های *Aspergillus niger*، *Alternaria* sp.، *T. citrinoviride*، *T. coningii* و *T. viridescens* مشاهده شد. بررسی pH، هدایت الکتریکی و عناصر محلول اندازه‌گیری شده نشان داد که قارچ‌های مورد استفاده با کاهش pH توانسته‌اند منجر به تخریب کانی‌ها و افزایش عناصر و هدایت الکتریکی در محیط کشت شوند. بنابر نتایج بدست آمده، قارچ‌های مورد استفاده در این پژوهش به دلیل کاهش pH و قابلیت رهاسازی پتاسیم و آهن بیشتر از فلوگوپیت، انحلال فسفات و افزایش هدایت الکتریکی، می‌توانند در

افزایش رشد و عملکرد گیاهان امیدوارکننده باشند. با توجه به فراوانی فلوگوپیت در خاک‌های کشور، می توان از این کانی به همراه قارچ‌های کارآمد جهت تأمین عناصری چون پتاسیم و آهن برای گیاهان استفاده کرد. به هر جهت، بررسی این مسئله نیاز به پژوهش‌های بیشتر و دقیق‌تری دارد.



شکل ۵- تغییرات هدایت الکتریکی توسط گونه‌های قارچی در حضور فلوگوپیت (F) و موسکویت (M) (میانگین‌های دارای حروف مشترک، فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند).

Figure 5. Changes in electrical conductivity by fungal species in the presence of phlogopite (F) and muscovite (M) (means with common letters, no significant difference at 5% probability level).

References

Ahadi N., Safari Sinegani A.A., and Aletaaha R. 2021. Evaluation of capability of fifteen isolates of mycorrhiza-like endophytic fungi on release of phosphorous from phosphorite mineral in the aquatic culture medium. *Applied Soil Research*, 9(2): 87-101. (In Persian)

Aletaha Maki R.S., Safari Sinegani A.A., and Zafari D. 2018. Evaluation of growth potential in inoculated spinach plants with *Piriformospora indica*, mycorrhizal and dark septate endophyte in drought stress. *Journal of Crops Improvement*, 20(2): 517-531. (In Persian)

Altomare C., Norvell W., Bjorkman. T., and Harman. G. 1999. Solubilization of phosphate and micronutrients by the plant growth promoting and biocontrol fungus *Trichoderma harzianum* Rifai 1295-22. *Applied Environmental Microbiology*, 65: 2926-2933.

Ashrafi Saeidloo S., and Rasouli Sadaghiani M. 2017. The role of silicate-solubilizing microorganisms on potassium release kinetics from K-bearing minerals. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(3), 639-649. (In Persian)

Bolan N.S., Naidu R., Mahimairaja S., and Baskaran S. 1994. Influence of low-molecular-weight organic acids on the solubilization of phosphates. *Biology and Fertility of Soils*, 18(4): 311-319.

Deaker R., Kecskés M.L., Rose M.T., Amprayn K., Krishnen G., Thi Kim Cuc T., Thuy Nga V., Thi Cong P., Thanh Hien N., and Kennedy I.R. 2011. Practical Methods for the Quality Control of Inoculant Biofertilisers. ACIAR Monograph No.147. Australian Centre for International Agricultural Research: Canberra, 101 p.

Eslami Seyyedmahaleh R., Landi A., Enayatizamir N., and Hojati S. 2017. Iron and potassium release from muscovite and vermiculite by some plant growth promoting bacteria. *Iranian Journal of Soil Research*, 30(4): 487-496. (In Persian)

Ezawa T., Smith. S.E., and Smith. F.A. 2002. P metabolism and transport in AM fungi. *Plant and Soil*, 244 (1-2):.221-230.

Gaind. S. 2016. Phosphate dissolving fungi: mechanism and application in alleviation of salt stress in wheat. *Microbiological research*, 193: 94-102.

Hatami. H., Karimi. A., Fotovat. A., and Lakzian. A. 2017. Study of potassium release kinetics from several mica minerals using ammonium acetate and tetraphenyl sodium borane extract extractors. *Journal of Soil and Water Research*, 47: 377-386. (In Persian)

Hao X., Cho C.M., Racz G.J., and Chang C. 2002. Chemical retardation of phosphate diffusion in an acid soil as affected by liming. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 64(3): 213-224.

Harman G.E., Howell C.R., Viterbo A., Chet I., and Lorito M. 2004. Trichoderma species-opportunistic, avirulent plant symbionts. *Nature reviews microbiology*, 2(1): 43-56.

Jahandideh A., Barani Motlagh M., Dordipoor E., Ghorbani Nasrabadi. R ., and Nazari, T. 2019. The effects of Co-application of humic acid and phosphorous fertilizer on vegetative growth indices and phosphorous availability in Canola. *Applied Soil Research*, 8: 68-78. (In Persian)

Jones J.D. 2020. Iron availability and management considerations: A 4R approach. *Crops and Soils*, 53(2): 32-37.

Kalavati P., Sharma M.C., and Modi H.A. 2012. Isolation of two potassium solubilizing fungi from ceramic industry soil. *Life Sciences Leaflets*, 5: 71-75.

Lian B., Wang B., Pan M., Liu C., and Teng H.H. 2008. Microbial release of potassium from K-bearing minerals by thermophilic fungus *Aspergillus fumigatus*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(1): 87-98.

Lodi L.A., Klaic R., Ribeiro C., and Farinas C.S., 2021. A green K-fertilizer using mechanical activation to improve the solubilization of a low-reactivity potassium mineral by *Aspergillus niger*. *Bioresource Technology Reports*, 15: 100711.

Martin H.W., and Sparks D.L. 1985. On the behavior of nonexchangable potassium in soils. *Communication in. Soil Science and Plant Analysis*, 16: 133-162.

Nahidan S., Hashemi S., and Zafari D. 2019. Evaluation of phosphate solubilizing and potassium releasing ability of some Trichoderma species under in-vitro conditions. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *50*(5): 1231-1242. (In Persian)

Nourouzi S., and khademi H. 2009. Potassium release from muscovite and phlogopite as influenced by selected organic acids. *Journal of Water and Soil*, 23: 263-273. (In Persian)

Pinzari F., Cuadros J., Jungblut A.D., Najorka J., and Humphreys-Williams E. 2022. Fungal strategies of potassium extraction from silicates of different resistance as manifested in differential weathering and gene expression. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 316: 168-200.

Rui-Xia L., Feng C., Guan P., Qi-Rong S., Rong L., and Wei S. 2015. Solubilization of phosphate and micronutrients by *Trichoderma harzianum* and its relationship with the promotion of tomato plant growth. *Plos One*, 25: 1-16.

Saber M.S.M., and Zanaty M.R. 1981. Effectivness of inoculation whit silicate bacteria in relation to the potassium content of plants using the intensive cropping technique. *Agricultural research review*, 59(4): 280-289.

Sadeghi S., Rasouli-Sadaghiani M., Barin M., Sepehr A., Dovlti B., and Vahed R. 2017. nfluence of K Solubilizing Fungi on Potassium Release from Silicate Minerals and some Growth Indices of Corn (Zea mays L.). *Applied Soil Research*, 6: 96-108. (In Persian)

Sarikhani M.R., Khoshru B., and Oustan S. 2016. Efficiency of some bacterial strains in potassium release from mica and phosphate solubilization under in vitro conditions. *Geomicrobiology Journal*, 33(9): 832-838.

Sarikhani M., Malbobi M.A., and Ebrahimi M. 2013. Phosphate-solubilizing bacteria: Isolation of phosphate-solubilizing bacteria and genes encoding phosphate-opening mechanism and genetics. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 1: 77-110. (In Persian)

Sarikhani M.R., Oustan S., Ebrahimi M., and Aliasgharzad N. 2018. Isolation and identification of potassium-releasing bacteria in soil and assessment of their ability to release potassium for plants. *European Journal of Soil Science*, 69: 1078-1086.

Saravanakumar K., Shanmuga V., and Kathiresan K. 2013. Effect of *Trichoderma* on soil phosphate solubilization and growth improvement of *Avicennia marina*. *Aquatic Botany*, 104: 101-105.

Selvi K.B., Paul J.J.A., Vijaya V., and Saraswathi K. 2017. Analyzing the Efficacy of Phosphate Solubilizing Microorganisms by Enrichment Culture Techniques. *Biochemistry and Molecular Biology*, 3: 1-7.

Shenker M., and Chen Y. 2005. Increasing iron availability to crops: fertilizers, organo-fertilizers, and biological approaches. *Soil Science and Plant Nutrition*, 51(1): 1-17.

Whitelaw M.A. 1999. Growth promotion of plants inoculated with phosphate-solubilizing fungi. *Journal of Advances in Agronomy*, 69: 99-151

Xiao. L., Lian. B., Dong. C., and Liu, F. 2016. The selective expression of carbonic anhydrase genes of *Aspergillus nidulans* in response to changes in mineral nutrition and CO_2 concentration. *Microbiology Open*, 5(1): 60-69.

Yuvaraj M., and Ramasamy M. 2020. Role of Fungi in Agriculture. *In*: Mirmajlessi S.M., and Radhakrishnan R. (Eds.), Biostimulants in Plant Science, *IntechOpen*, London, UK, pp. 89-100.

Zhang Y., Chen F.S., Wu X.Q., Luan F.G., Zhang L.P., Fang X.M., Wan S.Z., Hu X.F., and Ye J.R. 2018. Isolation and characterization of two phosphate-solubilizing fungi from rhizosphere soil of moso bamboo and their functional capacities when exposed to different phosphorus sources and pH environments. *Plos One*, 13(7): e0199625.

Zin N.A., and Badaluddin. N.A. 2020. Biological functions of *Trichoderma* spp. for agriculture applications. *Annals of Agricultural Sciences*, 65(2): 168-178.

Efficiency of Some Fungal Species in Phosphate Solubilization and Potassium and Iron Release from Phlogopite and Muscovite

Safoora Nahidan [1*], Nesa Ahadi [2], Samira Abduolrahimi[3]

(Received: 2021 December Accepted: 2022 April)

Abstract

Using efficient microorganisms can be beneficial for providing essential elements of phosphorus (P), potassium (K) and iron (Fe) to plants. In this study, the ability of some fungal species including *Trichoderma asperellum*, *T. atroviride*, *T. brevicompactum*, *T. citrinoviride*, *T. harzianum*, *T. koningii*, *T. viridescens*, *Alternaria* sp. and *Aspergillus niger* to release of these elements from insoluble minerals was evaluated. For this, the fungal species were added to Aleksandrov medium including tricalcium phosphate (P source) and muscovite or phlogopite (K and Fe source) and were incubated for 10-days under optimum conditions. The results showed that fungal species were able to release K from phlogopite by 103-389% and from muscovite by 21.5-178% compared to control. Among fungal species, the highest and lowest K release was observed by *Aspergillus niger* and *T. koningii* from phlogopite and by *T. atroviride* from muscovite, respectively. Also, the highest and lowest amount of soluble Fe was observed in medium with *T. citrinoviride* and *Aspergillus niger* in the presence of phlogopite and with *T. atroviride* in the presence of muscovite, respectively. The highest increase in soluble P was observed by *Aspergillus niger* (in the presence of both minerals), *Alternaria* sp., *T. citrinoviride*, *T. coningii* and *T.viridescens* in the presence of phlogopite compared to the control. Fungal species increased the electrical conductivity, indicating the release of elements from insoluble sources by the fungi species. There was also a significant negative relationship between P, K and Fe with pH, indicating that fungal species may have been able to release elements from the insoluble sources by producing organic and inorganic acids. In general, the fungal species have the ability to dissolve tricalcium phosphate and release more K and Fe from phlogopite than muscovite under *in-vitro* conditions. Thus, application of these microorganisms can be promising to provide the essential elements of plants.

Keywords: Phlogopite, Muscovite, Tricalcium phosphate, Fungi

Nahidan S., Ahadi N. and Abduolrahimi S. 2023. Efficiency of some fungal species in phosphate solubilization and potassium and iron release from phlogopite and muscovite. *Applied Soil Research*. 11(1):112-124.

1. Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
2. Ph.D. Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
3. Ph.D. Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
* Corresponding Author Email: s.nahidan@basu.ac.ir