19th Iranian Soil Science Congress
02-04 December, 2025
نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذر ۱۴۰۴
مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management
دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran
۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

جداسازی و غربال‌گری قارچ‌های حل کننده روی از ریزوسفر گیاهان، خاک شور و لجن دریاچه ارومیه با استفاده از ترکیبات نامحلول روی

رقیه واحدی[۱]، میرحسن رسولی صدقیانی[۲*]، یوبرت قوستا[۳]، ابراهیم سپهر[۴]، محسن برین[۵]، ادیت هممر[۶]

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول مقاله: m.rsadaghiani@urmia.ac.ir

[۱] دانشجوی دکتری گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ایران

[۲،۴] استاد گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ایران

[۳] دانشیار گروه گیاه‌پزشکی دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ایران

[۵] دانشیار گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ایران

[۶]دانشیار، گروه اکولوژی، دانشگاه لوند، سوئد

چکیده

این پژوهش به منظور جداسازی و غربال‌گری قارچ‌های حل کننده ترکیبات کم محلول روی از خاک، گیاه و لجن اراضی شور حاشیه دریاچه ارومیه انجام گرفت. از ۱۱۰ نمونه خاک و لجن، ۲۵ جدایه بر اساس توان تشکیل هاله شفاف در محیط جامد حاوی ترکیبات کم محلول روی شامل اکسید روی، کربنات روی و فسفات روی غربال‌گری و جداسازی شدند. نتایج نشان داد که نوع منابع کم محلول روی بر انحلال روی توسط جدایه‌ها تاثیر گذاشت. محدوده‌ی شاخص کارایی حلالیت روی در اکسید روی ۱۰۷/۶۹- ۲۱۰، کربنات روی ۱۰۸/۳۳-۲۰۸/۳۳ و فسفات روی ۱۰۵/۸۹-۲۴۰ متغییر بود. بر اساس نتایج به‌دست آمده، جدایه‌های خالص شده می‌توانند به عنوان راهکار زیست‌سازگار در تولید کودهای زیستی حاوی روی به‌کار روند.

واژگان کلیدی: شوری، قارچ‌های حل کننده روی، لجن، دریاچه ارومیه

مقدمه

شوری خاک یکی از چالش‌های عمده کشاورزی در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است (Ouzemou *et al.*, 2025). تجمع نمک‌های محلول در خاک باعث کاهش قابلیت جذب آب و مواد مغذی توسط گیاهان شده و تنش‌های شوری، رشد و عملکرد آن‌ها را به طور قابل توجهی محدود می‌کند. علاوه بر این، شوری خاک معمولاً باعث کاهش دسترسی گیاهان به ریزمغذی‌های ضروری مانند روی می‌شود، زیرا این عنصر در خاک‌های شور اغلب به‌شکل ترکیبات نامحلول باقی می‌ماند و برای گیاهان قابل دسترس نیست. روی از عناصر کم‌مصرف مهمی می‌باشد که نه تنها برای رشد بهینه و عملکرد مناسب گیاهان زراعی لازم است، بلکه برای انسان‌ها، جانوران و میکروارگانیسم‌ها نیز در تمام مراحل زندگی آن‌ها حیاتی می‌باشد (Shaikh and Saraf, 2017). این عنصر برای تولید فیتوهورمون‌ها، کلروفیل، سنتز نشاسته (Rehman *et al.*, 2018)، متابولیسم و اکسیداسیون کربوهیدرات‌ها و نیتروژن، سنتز پروتئین، فتوسنتز، مقاومت در برابر تنش و بیماری‌ها و تشکیل دانه گرده در گیاهان مورد نیاز است (Cakmak, 2008; Gurmani *et al.*, 2012). علاوه براین، به عنوان کوفاکتور بیش از ۳۰۰ نوع آنزیم در سلول‌های گیاهی فعالیت دارد (Younas *et al.*, 2023). کمبود روی در انسان در رده چهارم مهم‌ترین عناصر غذایی کم‌مصرف قرار دارد (Sangeetha *et al.*, 2022) و بیش از دو میلیارد نفر در جهان تحت تأثیر این کمبود هستند (Devi et al., 2014). به همین دلیل، سوء تغذیه ناشی از کمبود روی در انسان عمدتاً به فقدان آن در خاک مرتبط است. در ایران، بیش از ۵۶ درصد از خاک‌های زراعی دارای غلظت روی قابل استخراج (با استفاده از عصاره‌گیرDTPA) کمتر از ۰/۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم هستند و تنها ۳۱ درصد از خاک‌ها حاوی بیش از ۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم روی قابل جذب می‌باشند (Shahbazi and Besharati, 2013). عواملی نظیر pH بالا، غلظت بالای کلسیم، میزان کم ماده آلی، کاربرد بیش از حد کودهای فسفاته، غلظت‌های بالای بی‌کربنات در آب آبیاری، روی کل کم، نوع و مقدار آنیون‌ها در محلول خاک، حامل‌های روی، کانی‌های خاک (Alloway, 2008)، طبیعت آهکی و رس خاک مسئول اصلی کاهش زیست فراهمی روی در اکثر این خاک‌ها می‌باشند (Alloway, 2009). در سال‌های اخیر، تمرکز پژوهشگران بر توسعه و بهینه‌سازی کودهای روی با کارایی بالا و مقرون به صرفه بوده تا با افزایش قابلیت دسترسی گیاهان به این عنصر، وضعیت زیست‌فراهمی آن نیز بهبود یابد (Hussain *et al.*, 2020). اگرچه ترکیبات محلول روی نظیر سولفات روی به‌طور گسترده در سیستم‌های کشاورزی به‌عنوان کودهای مکمل مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما پایداری پایین، تحرک زیاد در خاک و مستعد بودن به شست‌وشو یا تثبیت توسط کاتیون‌ها و کانی‌های خاک باعث کاهش راندمان زیستی آن‌ها می‌شود (Hefferon *et al.*, 2019). در مقابل، ترکیبات نامحلول روی مانند اکسید روی، کربنات روی و فسفات روی، اشکال غالب این عنصر در خاک‌های زراعی به‌ویژه در شرایط قلیایی و شور محسوب می‌شوند، اما به‌دلیل انحلال‌پذیری محدود، توسط گیاهان جذب نمی‌گردند (Choudhary *et al.*, 2024). بهره‌گیری از میکروارگانیسم‌های توانمند در حل این ترکیبات می‌تواند راهکاری مؤثر برای افزایش قابلیت زیستی روی در خاک‌های شور باشد. تلقیح گیاهان با میکروارگانیسم‌های محرک رشد گیاه به عنوان یک روش مؤثر و سازگار با محیط زیست برای بهبود فراهمی عناصر غذایی به‌ویژه در خاک‌های شور معرفی شده است. از جمله میکروارگانیسم‌های محرک رشد گیاه، قارچ‌های حل‌کننده روی نامحلول می‌باشد (Kumar *et al.*, 2019). توانایی این میکروارگانیسم‌ها در تحمل شرایط نامساعد از جمله شوری، pH بالا و دمای متغیر از عوامل مهم استقرار و گسترش میکروارگانیسم‌ها در خاک‌های تحت تأثیر نمک است. همچنین، از آن‌جایی که قارچ‌ها در تنش‌های محیطی به سرعت سازگار می‌شوند (Hmad and Gargouri, 2024)، لذا استفاده از آن‌ها به‌عنوان مایه تلقیح، راهکاری مؤثر برای احیای اراضی شور و افزایش بهره‌وری کشاورزی در چنین مناطقی محسوب می‌شود. قارچ‌ها از طریق سه مکانیسم اصلی شامل: تولید اسیدهای آلی (مانند اسیدهای استیک، فوماریک، گلیوکسیلیک و ایتاکونیک) که با کاهش pH محیط موجب تخریب پیوندهای شیمیایی کانی‌ها و آزادسازی عناصر معدنی می‌شوند، تشکیل کمپلکس‌های آلی یا ترشح لیگاندهایی که به تجزیه ساختار کانی‌ها کمک می‌کنند، و در نهایت توسعه ریسه‌های میسلیومی به درون ذرات معدنی که باعث خرد شدن مکانیکی و افزایش سطح تماس آن‌ها می‌گردد، می‌توانند به آزادسازی روی از ترکیبات نامحلول آن در خاک کمک کنند (Fomina and Skorochod, 2020). علاوه بر این، پلیمرهایی نظیر ملانین‌های قارچی و سایر ترکیبات فنلی با گروه‌های فعال شامل کربوکسیل، فنولیک، هیدروکسیل الکلی، کربونیل و متوکسیل، پتانسیل بالایی برای اتصال به یون‌های فلزی دارند و در افزایش جذب و پایداری عناصر کم‌مصرف

در خاک مؤثرند (Fomina *et al*., 2014; Fomina and Skorochod., 2020). توانایی تولید سیدروفور و اسیدهای آلی، در بسیاری از قارچها نیز در شرایط کمبود روی گزارش شده است (Fomina *et al*., 2006; Sebesta *et al*., 2020).

دریاچه ارومیه به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین و شورترین دریاچه‌های جهان، از اهمیت بالایی در مطالعات اکولوژیک میکروبی برخوردار است. میکروارگانیسم‌های سازگار با شرایط شور، به‌دلیل قابلیت‌های زیست‌فناوری متنوع، پتانسیل بالایی برای کاربرد در کشاورزی پایدار دارند. بهره‌گیری از قارچهای بومی سازگار با شرایط خاک و اقلیم منطقه، در توسعه کودهای زیستی مؤثر و پایدار اهمیت ویژه‌ای دارد. در این راستا، مطالعه حاضر به منظور جداسازی و غربالگری اولیه سویه‌های بومی با توانایی انحلال ترکیبات نامحلول روی، از نمونه‌های خاک شور، لجن و ریزوسفر گیاهان زراعی، غیرزراعی و دارویی حاشیه دریاچه ارومیه انجام شده است.

مواد و روش‌ها

- منطقه مورد مطالعه

تعداد ۱۱۰ نمونه خاک از اراضی شور، لجن و ریزوسفر گیاهان موجود در حاشیه دریاچه ارومیه واقع در استان آذربایجان غربی، ایران تهیه شد.

-جداسازی و خالص سازی قارچ‌های حل کننده روی نامحلول

برای جداسازی قارچ‌های حل کننده روی نامحلول، از محیط کشت جامد تریس- مینیمال سالت (TMS) حاوی فسفات روی ($Zn_3(PO_4)_2$) استفاده شد (Fasim, 2002). برای این منظور سوسپانسیون نمونه‌های خاک، به روش تهیه سری‌های رقت، با آب مقطر استریل از رقت 10^{-4} تا 10^{-10} رقیق شدند. پس از تهیه سری‌های رقت، مقدار ۱۰۰ میکرولیتر از هر رقت با تکنیک کشت پخش بر روی محیط کشت TMS جامد تلقیح شد. پس از ۷۲-۹۶ ساعت انکوباسیون در دمای ۲۸ درجه‌سانتی‌گراد، میکروارگانیسم‌هایی که در اطراف آن‌ها محیط کشت هاله شفاف مشاهده شد به عنوان سویه‌های حل‌کننده روی نامحلول جداسازی گردید. خالص‌سازی قارچها در محیط کشت پتتیتو دکستروز آگار (PDA) انجام شد. بدین ترتیب ۴۸۵ جدایه قارچ خالص و جداسازی شد.

- ارزیابی نیمه‌کمی انحلال روی نامحلول در جدایه‌های خالص‌سازی‌شده

برای تعیین بررسی توانایی نیمه‌کمی انحلال روی توسط جدایه‌های قارچها، ابتدا جدایه‌های قارچها در محیط کشت PDA رشد داده شدند. سپس هر یک از قارچهای رشد کرده در محیط کشت به ابعاد کوچک قطر ۰/۵×۰/۵ سانتی‌متر با استفاده از Cork Borer برش‌های دایره‌ای داده شدند. سپس تمامی برش‌ها بصورت جداگانه در محیط کشت جامد TMS حاوی ۰/۱ درصد ترکیبات نامحلول روی (اکسید روی (ZnO)، کربنات روی ($ZnCO_3$) و فسفات روی ($Zn_3(PO_4)_2$)) در سه تکرار کشت شدند. پس از ۱۰ روز انکوباسیون در دمای ۲۸ درجه‌سانتی‌گراد، قطر کلنی رشد یافته قارچها (Colony Diameter) و همچنین قطر هاله شفاف (Halo Diameter) حاصل از انحلال روی اندازه‌گیری شدند و میزان شاخص حلالیت روی (ZSI) و شاخص کارایی حلالیت روی (ZSE) نیز از روابط ۱ و ۲ تعیین گردید (Gandhi and Muralidharan, 2016).

$$\text{Zinc solubilization index (ZSI)} = \frac{\text{colony diameter + halo zone diameter}}{\text{Colony diameter}} \quad (۱)$$

$$\text{Zinc solubilization efficiency (ZSE)} = \frac{Diameter\ of\ solubilization\ halo\ zone}{Colony\ diameter} \quad (۲)$$

طرح آزمایشی و آنالیز آماری

در این پژوهش برای ارزیابی توان انحلال روی توسط جدایه‌ها از منابع نامحلول روی (اکسید روی، کربنات روی و فسفات روی) از طرح کاملا تصادفی با سه تکرار انجام شد. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین داده‌ها در سطح احتمال پنج درصد به روش دانکن از نرم افزار SPSS و رسم نمودار با نرم‌افزار Excel اجرا شد.

نتایج و بحث

از ۱۱۰ نمونه‌های خاک ریزوسفری از مناطق مختلف دریاچه ارومیه، ۴۸۵ جدایه قارچ خالص‌سازی شد. غربال‌گری اولیه بر اساس توانایی نیمه‌کمی انحلال روی بر روی جدایه‌های قارچها انجام شد. در مجموع برروی ۲۵ جدایه برتر آنالیز نیمه‌کمی قارچها انجام گرفت. در بررسی توانایی نیمه‌کمی انحلال ترکیبات نامحلول روی بر روی ۲۵ جدایه قارچ، نتایج شاخص حلالیت و شاخص کارایی حلالیت روی نشان داد بین جدایه‌ها از نظر شاخص‌های ذکر شده در سطح احتمال ۰/۱ درصد احتلاف معنی‌داری وجود داشت (جدول ۱ و ۲).

جدول ۱- تجزیه واریانس ارزیابی شاخص حلالیت روی در حضور منابع مختلف روی کم محلول

منابع تغیر	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		اکسید روی	کربنات روی	فسفات روی
تیمار	۲۴	۰/۳۰۹***	۰/۳۰۶***	۰/۵۰۷***
خطا	۵۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۲
کل	۷۴	-	-	-

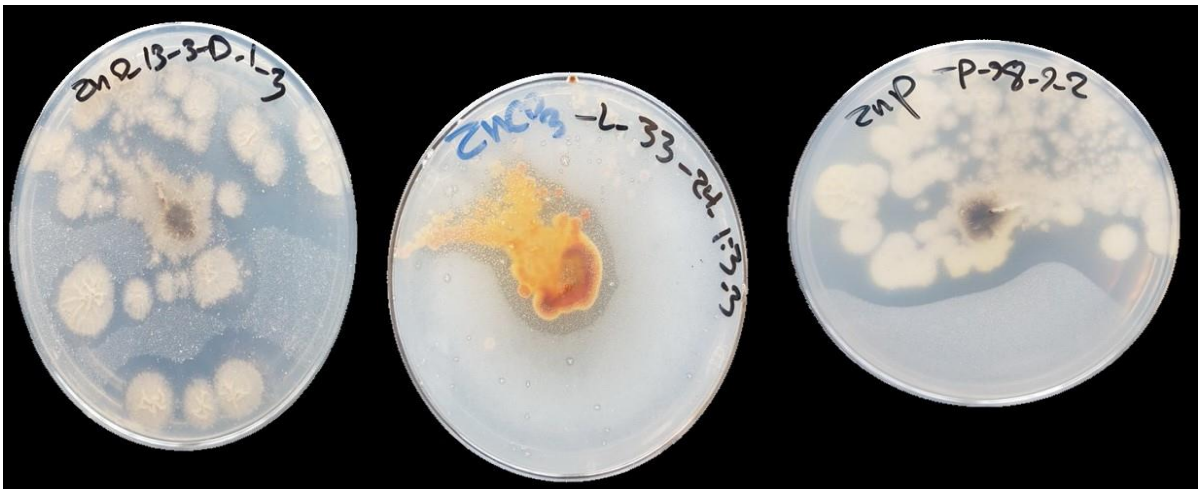
*** معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۱ درصد (p<۰/۰۰۱)

جدول ۲- تجزیه واریانس ارزیابی شاخص کارایی حلالیت روی در حضور منابع مختلف روی کم محلول

منابع تغیر	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		اکسید روی	کربنات روی	فسفات روی
تیمار	۲۴	۳۰۹۴/۳۸۷***	۳۰۵۷/۸۹۲***	۵۰۶۵/۳۵۸***
خطا	۵۰	۵/۳۱۱	۰/۹۲۳	۱۶/۷۳۳
کل	۷۴	-	-	-

*** معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۱ درصد (p<۰/۰۰۱)

با توجه به نتایج مقایسه میانگین مشخص شد که تنوع منابع نامحلول روی در محیط کشت TMS بر رفتار انحلال این ترکیبات توسط جدایه‌های قارچ تاثیر گذاشته است (شکل-۱). همچنین، نتایج مقایسه میانگین نشان داد که جدایه ZnSF4 و ZnSF12 بالاترین شاخص حلالیت و شاخص کارایی روی را داشتند. ZnSF4 و ZnSF12 در منبع اکسید روی (۳/۰۸ و ۳/۱۰)، ZnSF12 در منبع کربنات روی (۳/۰۸) و ZnSF4 در منبع فسفات روی (۳/۴) دارای بالاترین شاخص حلالیت روی بودند. جدایه‌های ZnSF2، ZnSF5، ZnSF7،ZnSF11 و ZnSF14 در رتبه‌های بعدی شاخص های حلالیت و کارایی روی قرار داشتند (جدول ۳).



شکل ۱ -تشکیل هاله شفاف اطراف کلنی قارچ‌ها در حضور منابع مختلف روی کم‌محلول

جدول ۳- ارزیابی نیمه‌کمی انحلال روی در حضور منابع مختلف روی کم محلول

	اکسید روی		کربنات روی		فسفات روی	
جدایه	ZSI	ZSE	ZSI	ZSE	ZSI	ZSE
ZnSF1	۲/۴۰ i	۱۴۰ i	۲/۲۲ k	۱۲۱/۴۳ k	۲/۶۵ ij	۱۶۴/۲۸ ij
ZnSF2	۲/۸۳ c	۱۸۳/۳۳ c	۲/۷۵ d	۱۷۵ d	۳/۰۰ d	۲۰۰ d
ZnSF3	۲/۴۰ i	۱۴۰ i	۲/۲۳ j	۱۲۳/۷۱ j	۲/۵۹ j	۱۵۸/۸۲ j
ZnSF4	۳/۰۸ a	۲۰۸/۳۳ a	۲/۸۰ c	۱۸۰ c	۳/۴ a	۲۴۰ a
ZnSF5	۲/۹۰ b	۱۹۰ b	۲/۸۸ b	۱۸۸/۸۸ b	۳/۲ b	۲۲۰ b
ZnSF6	۲/۵۵ g	۱۵۴/۵۵ g	۲/۵ h	۱۵۰ h	۲/۷۴ h	۱۷۴/۳۵ h
ZnSF7	۲/۷۸ d	۱۷۸/۴۸ d	۲/۷۵ d	۱۷۵ d	۲/۹۱ e	۱۹۰ e
ZnSF8	۲/۵۹ f	۱۵۸/۸۲ f	۲/۲۱ k	۱۲۱/۷۳ k	۲/۸۱ fg	۱۸۱/۸۱ fg
ZnSF9	۲/۴۷ h	۱۴۶/۶۷ h	۲/۳۶ i	۱۳۶/۳۶ i	۲/۶۱ j	۱۶۱/۵۳ j
ZnSF10	۲/۳۳ j	۱۳۳/۳۳ j	۲/۵۲ g	۱۵۲/۳۸ g	۲/۴۰ k	۱۴۰ k
ZnSF11	۲/۶۹ e	۱۶۸/۷۵ e	۲/۶۸ e	۱۶۸/۷۵ e	۲/۷۷ gh	۱۷۶/۴۸ gh
ZnSF12	۳/۱۰ a	۲۱۰ a	۳/۰۸ a	۲۰۸/۳۳ a	۲/۹۲ e	۱۹۱/۶۶ e
ZnSF13	۲/۳۳ j	۱۳۳/۳۳ j	۲/۵۳ g	۱۵۳/۸۵ g	۲/۷۱ hi	۱۸۰/۸۳ hi
ZnSF14	۲/۸۳ c	۱۸۳/۳۳ c	۲/۹ b	۱۹۰ b	۳/۰۸ c	۲۰۸/۳۳ c
ZnSF15	۲/۵۰ h	۱۵۰ h	۲/۵۵ f	۱۵۵/۵۵ f	۲/۸۷ ef	۱۸۷/۵۰ ef
ZnSF16	۲/۱۰ m	۱۱۰ m	۲/۱۶ l	۱۱۶/۰۳ l	۲/۱۳ lm	۱۱۳/۳۳ lm
ZnSF17	۲/۱۰ m	۱۱۰ m	۲/۱۳ m	۱۱۳/۳۳ m	۲/۱۸ l	۱۱۷/۸۵ l
ZnSF18	۲/۲۵ k	۱۲۵ k	۲/۱۱ no	۱۱۱/۱۱ no	۲/۱۷ lm	۱۱۶/۶۶ lm
ZnSF19	۲/۲۷ k	۱۲۶/۶۷ k	۲/۱۳ m	۱۱۳/۳۳ m	۲/۰۵ n	۱۰۵/۲۶ fg
ZnSF20	۲/۱۸ l	۱۱۷/۶۵ l	۲/۰۹ p	۱۰۹/۰۹ p	۲/۰۹ mn	۱۰۹/۰۹ mn
ZnSF21	۲/۰۸ m	۱۰۷/۶۹ m	۲/۰۸ p	۱۰۸/۳۳ p	۲/۱۱ lmn	۱۱۱/۱۱ lmn
ZnSF22	۲/۰۸ m	۱۰۸/۳۳ m	۲/۰۸ p	۱۰۸/۳۳ p	۲/۱۳ lm	۱۳۳/۳۳ lm
ZnSF23	۲/۱۸ l	۱۱۸/۱۸ l	۲/۱۰ op	۱۱۰ op	۲/۱۵ lm	۱۱۵/۳۹ lm
ZnSF24	۲/۱۰ m	۱۱۰ m	۲/۱۱ mn	۱۱۱/۷۶ mn	۲/۰۵ n	۱۰۵/۸۹ n
ZnSF25	۲/۲۰ l	۱۲۰ l	۲/۱۰ op	۱۱۰ op	۲/۱۵ lm	۱۱۵ lm

شاخص حلالیت روی (ZSI) و شاخص کارایی حلالیت روی (ZSE)

قارچ‌های محرک رشد گیاه (PGPF) از بسیاری جهات به میزبان خود سود می‌رسانند و باعث افزایش رشد، تجمع زیست‌توده و جذب عناصر مغذی و همچنین ایجاد مقاومت در برابر تنش‌های مختلف می‌شوند (Chitnis et al. 2020). با توجه به اینکه ریزوسفر گیاهانی که در مناطق شور رشد کرده‌اند، استراتژی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی متنوعی را برای بقا در محیط‌های شور تکامل داده‌اند (Khan et al. 2009) و روابط همزیستی با قارچ‌های تحمل‌کننده نمک برقرار کرده‌اند که به رشد و نمو آن‌ها کمک می‌کند (Yasmeen et al. 2019). لذا جداسازی این نوع از قارچ‌ها و استفاده از این آن‌ها برای به حداقل رساندن تأثیر تنش‌های غیرزیستی به طور گسترده به عنوان یک استراتژی موفق برای بازیابی بهره‌وری کشاورزی در محیط‌های چالش‌برانگیز شناخته شده است. جداسازی این جدایه‌های قارچی از محیط‌های شور نه تنها رشد، عملکرد و مقاومت گیاه به تنش را افزایش می‌دهند، بلکه می‌توانند فیتوهورمون‌ها و متابولیت‌های ثانویه نیز تولید کنند (Sheng et al. 2008). علاوه بر این، آن‌ها می‌توانند ساختار ریشه‌ها را نیز تغییر دهند، فتوسنتز را تقویت کنند و مواد محافظ اسمزی را تجمع دهند. این ویژگی‌ها باعث می‌شوند که قارچ‌ها به رشد و بقای گیاهان در محیط‌های طبیعی و با شوری بالا کمک کنند (Sheng et al. 2008). پیش از این، محققان طیف متنوعی از قارچ‌های جدا شده از گیاهان را شناسایی کرده‌اند که همگی ویژگی‌های متمایزی از رشد گیاه مانند تثبیت نیتروژن، حل کردن روی و فسفات، سنتز سیدروفور، تولید ایندول-۳-استیک اسید (IAA) و ACC دآمیناز را نشان دادند که منجر به افزایش رشد گیاهان در محیط‌های طبیعی و تنش‌زا شدند (Chitnis et al., 2020; Rehman et al., 2022). Sayer و Gadd (1997) نشان دادند که جدایه‌های قارچی مورد بررسی، توانایی رشد و حل‌کردن هر سه ترکیب فسفات‌روی، اکسیدروی و تری‌کلسیم‌فسفات را دارند، به‌طوری‌که این ترکیبات به‌صورت بلور در محیط کشت ظاهر شده و ناحیه‌ای روشن به‌دلیل حل‌شدن آن‌ها در اطراف پرگنه مشاهده گردید. در این مطالعه، نقش مثبت اسیدهای آلی نظیر اسیدسیتریک و اسیداگزالیک، که توسط گونه‌های قارچی تولید می‌شوند، در حل‌کردن ترکیبات نامحلول روی تأیید شد. Shaikh و Saraf (2017a) در تحقیقات خود، میکروارگانیسم‌های حل کننده روی را از خاک‌های ریزوسفری گیاهان زراعی مختلف جداسازی کردند. نتایج نشان داد که از هفت جدایه براساس از نظر توانایی رشد گیاه و حل کنندگی روی، سه جدایه برتر مربوط به قارچ بودند. جدایه‌ی MSS-ZF3 توانایی قابل توجهی به عنوان خصوصیات محرک رشد نشان داد. همچنین بهترین بهینه‌سازی با غلظت ۰/۱ درصد ZnO، دکستروز به عنوان منبع کربن، سولفات آمونیوم به عنوان منبع نیتروژن، pH (۶- ۶/۵) بهینه و دمای بهینه (۲۸-۳۰ درجه سانتی‌گراد) برای این دو جدایه گزارش شد. در مطالعه حاضر آن‌ها گزارش کردند که بهینه سازی شرایط رشد برای میکروارگانیسم‌های حل کننده روی نشان داد که از این میکروارگانیسم‌ها می‌توان برای غنی‌سازی زیستی استفاده کرد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که قارچ‌های جداسازی‌شده از لجن، ریزوسفر گیاهان و خاک‌های شور اراضی حاشیه دریاچه ارومیه، توانایی حل‌کردن ترکیبات نامحلول روی مانند اکسید، کربنات و فسفات روی را دارند. میزان آزادسازی روی (به‌صورت نیمه‌کمی) در بین منابع مختلف روی تفاوت داشت. این تفاوت می‌تواند ناشی از نوع و تنوع زیستی جدایه‌ها و همچنین شرایط محیطی باشد. از آنجا که جدایه‌های مورد بررسی از مناطق شور حاشیه دریاچه ارومیه جداسازی شده‌اند و در محیط کشت TMS رشد کرده‌اند، به نظر می‌رسد توانایی تحمل شرایط تنش شوری را دارا هستند. بنابراین، می‌توان از آن‌ها به‌عنوان گزینه‌هایی مناسب بعد از کشت گلخانه‌ای برای تولید کودهای زیستی استفاده کرد. بهره‌گیری از این قارچ‌های بومی می‌تواند ضمن بهبود دسترسی گیاه به ریزمغذی‌ها و افزایش حاصلخیزی خاک، در توسعه کشاورزی پایدار و کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی نقش مؤثری ایفا کند.

منابع

1. Airin, A. A., Arafat, M. I., Begum, R. A., Islam, M. R., Seraj, Z. I. (2023). Plant growth-promoting endophytic fungi of the wild halophytic rice Oryza coarctata. Annals of Microbiology, 73(1), 36.
2. Alloway, B.J. (2008). Zinc in Soils and Crop Nutrition. 2nd Ed. International Zinc Association (IZA) and International Fertilizer Industry Association (IFA), Brussels, Belgium and Paris, France,128p.
3. Alloway, B. (2009). Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. *Environmental* Geochemistry and Health, 31, 537–548.
4. Cakmak, I. (2008). Enrichment of cereal grains with zinc: agronomic or genetic biofortification. Plant and Soil, 302, 1–17.
5. Chitnis, V. R., Suryanarayanan, T. S., Nataraja, K. N., Prasad, S. R., Oelmüller, R., Shaanker, R. U. (2020). Fungal endophyte-mediated crop improvement: the way ahead. Frontiers in Plant Science, 11, 561007.
6. Choudhary, S., Saharan, B. S., Gera, R., Kumar, S., Prasad, M., Gupta, A., Duhan, J. S. (2024). Molecular characterization and validation of zinc solubilization potential of bacteria isolated from onion (*Allium cepa* L.) rhizosphere. The Microbe, 4, 100145.
7. Fasim, F., Ahmed, N., Parsons, R. Gadd, G.M. (2002). Solubilization of zinc salts by bacterium isolated by the air environment of tannery. FEMS Microbiology Letters, 213(1), 1–6.
8. Fomina, M., Burford, E.P., Gadd, G.M. (2006). Fungal dissolution and transformation of minerals: Significance for nutrient and metal mobility. In: Gadd, G.M. (Ed.), Fungi in Biogeochemical Cycles. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 236–266.
9. Fomina, M., Gadd, G.M. (2014). Biosorption current perspectives on concept, definition and application. Bioresource Technology, 160, 3–14.
10. Fomina, M., Skorochod, I. (2020). Microbial interaction with clay minerals and its environmental and biotechnological implications. Minerals, 10 (10), 861.
11. Gandhi, A., Muralidharan, G. (2016). Assessment of zinc solubilizing potentiality of Acinetobacter sp. isolated from rice rhizosphere. European Journal of Soil Biology, 76, 1–8.
12. Gurmani, A.R., Khan, S.U., Andaleep, R., Waseem, K. and Khan, A. (2012). Soil application of zinc improves growth and yield of tomato. International Journal of Agriculture and Biology, 14, 91–9.
13. Hefferon, K. 2019. Biotechnological approaches for generating zinc-enriched crops to combat malnutrition. Nutrients, 11, 253.
14. Hmad, I. B., and Gargouri, A. (2024). Halophilic filamentous fungi and their enzymes: potential biotechnological applications. Journal of Biotechnology, 381, 11-18.
15. Hussain, A., Zahir, Z.A., Ditta, A., Tahir, M.U., Ahmad, M., Mumtaz, M.Z., Hayat, K. and Hussain, S. (2020a). Production and implication of bio-activated organic fertilizer enriched with zinc-solubilizing bacteria to boost up maize (*zea mays* l.) production and biofortification under two cropping seasons. Agronomy, 10, 39.
16. Khan, M. A., Ansari, R., Ali, H., Gul, B., Nielsen, B. L. (2009). Panicum turgidum, a potentially sustainable cattle feed alternative to maize for saline areas. Agriculture, ecosystems and environment, 129(4), 542-546.
17. Kumar, P. and Sharma, P.K. (2020). Soil Salinity and Food Security in India. Frontiers in Sustainable Food System, 4:533781.
18. Ouzemou, J.-E., Laamrani, A., El Battay, A., & Whalen, J. K. (2025). Predicting Soil Salinity Based on Soil/Water Extracts in a Semi-Arid Region of Morocco. Soil Systems, 9(1), 3.
19. Rehman, A., Farooq, M., Ozturk, L., Asif, M. and Siddique, K.H.M. 2018. Zinc nutrition in wheat-based cropping systems. Plant Soil. 422: 283-315.
20. Rehman B, Javed J, Rauf M et al (2022) ACC deaminase-producing endophytic fungal consortia promotes drought stress tolerance in M.oleifera by mitigating ethylene and H_2O_2. Frontiers in Plant Science, 13, 1–22.
21. Sahbazi, K., Besharati, H. (2013). Overview of agricultural soil fertilitystatus of Iran. Journal of Land Management, 1, 1–15.
22. Sangeetha, V. J., Dutta, S., Moses, J. A., Anandharamakrishnan, C., (2022). Zinc nutrition and human health: overview and implications. Efood, 3(5), e17.
23. Sayer, A. J., and Gadd, M. G. (1997). Solubilization and transformation of insoluble inorganic metal compounds to insoluble metal oxalates by *Aspergillus niger*. Mycological Research, 101(6), 653-661.
24. Šebesta, M., Urík, M., Bujdoš, M., Kolenčík, M., Vávra, I., Dobročka, E., Kim, H., Matúš, P. (2020). Fungus *Aspergillus niger* processes exogenous zinc nanoparticles into a biogenic oxalate mineral. Journal of Fungi, 4(6), 210.

25. Shaikh, S.S. and Saraf, M.S. (2017a). Optimization of growth conditions for zinc solubilizing plant growth associated bacteria and fungi. Journal of Advanced Research in Biotechnology, 2(1), 9.
26. Shaikh, S. and Saraf, M. (2017). Biofortification of *Triticum aestivum* through the inoculation of zinc solubilizing plant growth promoting rhizobacteria in field experiment. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 9, 120–126.
27. Sheng, M., Tang, M., Chen, H., Yang, B., Zhang, F., Huang, Y. (2008). Influence of arbuscular mycorrhizae on photosynthesis and water status of maize plants under salt stress. Mycorrhiza, 18, 287-296.
28. Yasmeen, T., Tariq, M., Iqbal, S., Arif, M.S., Riaz, M., Shahzad, S.M., Ali, S., Noman, M. and Li, T., (2019). Ameliorative capability of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) against salt stress in plant. Plant Abiotic Stress Toler Agron Mol Biotechnol Approaches, 409–448.
29. Younas, N., Fatima, I., Ahmad, I.A., Ayyaz, M.K., (2023) Alleviation of zinc deficiency in plants and humans through an effective technique; biofortification: a detailed review. Acta Ecologica Sinica, 43(3),419–425.
30. Zhang, Y.Q., Sun, Y.X., Ye, Y.L., Karim, M.R., Xue, Y.F., Yan, P., Meng, Q.F., Cui, Z.L., Cakmak, I., Zhang, F.S. and Zou, C.Q. 2011. Zinc biofortification of wheat through fertilizer applications in different locations of China. Field Crops Research, 125, 1–7.

Isolation and screening of zinc-solubilizing fungi from plant rhizosphere, saline soil, and mud in Urmia Lake basin using insoluble zinc compounds

Roghayeh Vahedi[1], MirHassan Rasouli-Sadaghiani*[2], Youbert Ghosta[3], Ebrahim Sepehr[4], Mohsen Barin[5], Edith C. Hammer[6]

[1]PhD Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran
[2] Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran
[3]Associate Professor, Department of Plant Pathology, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran
[4] Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran
[5]Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran
[6]Associate Professor, Microbial Ecology, Department of Biology/Center for Environmental and Climate Science, Lund University, 223 62 Lund, Sweden
*Corresponding author, Email: **m.rsadaghiani@urmia.ac.ir**

Abstract

This study was performed to isolate and screen zinc-solubilizing fungi from saline soils, rhizosphere of plants, and mud in Urmia Lake basin. A total of 110 soil and mud samples collected, 25 fungal isolates were screened based on their ability to form clear halos on solid culture media. the solid culture medium was contained zinc compounds, including zinc oxide (ZnO), zinc carbonate ($ZnCO_3$), and zinc phosphate ($Zn_3(PO_4)_2$). The results indicated that the type of zinc sources influenced zinc solubilization by the isolates.The zinc solubilization efficiency index ranged from 107.69 to 210 for ZnO, 108.33 to 208.33 for $ZnCO_3$, and 105.89 to 240 for $Zn_3(PO_4)_2$. According to the results, the purified isolates isolates can be used as an eco-friendly solution in the production of zinc biofertilizers.

Keywords: Salin, Zinc solubilizing fungi, Mud, Urmia Lake