Research Article

Agricultural Engineering., 44(2) (2021)
DOI: 10.22055/AGEN.2021.36868.1602

ISSN (P): 2588-526X
ISSN (E): 2588-5944

Evaluation of root mycorrhizal colonization and uptake of some microelements by *Zea mays* root treated with some organic compounds and microbial inoculation

M. Ahmadzadeh[1], E. Sedaghati[2*], R. Sabri-Riseh[2], A. Rahimi[3], N. Hatami[4] and A.A. Mohammadi Mirik[3]

1. M.Sc. of Plant Pathology, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Iran.
2. Associate professor of the Plant Pathology Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Iran.
3. Professor of Agronomy, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Iran.
4. Assistant professor, Department of Agriculture, Payame Noor University, Tehran, Iran.

Received: 8March 2021 Accepted: 24 July 2021

Abstract

Introduction Rising global demand for food, along with the limitation of arable land, has posed a significant challenge on agricultural researchers to find solutions to overcome this issue. Given that the development of agricultural lands is not practically possible, most attention should be focused on increasing the production yield per unit area. One of the basic approaches to increase crop yield is the consumption of chemical fertilizers, although their application has detrimental effects on humans, soil and the environment. However, organic fertilizers can be considered as a suitable solution to solve this problem. Organic compounds and biomass are the main features of soil fertility and productivity. Applying organic fertilizers such as living compounds (bacteria, yeast, Azolla) and non-living compounds (compost tea, amino acids, humic acid and fulvic acid) can increase soil organic substances. Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) are considered as beneficial microorganisms promoting plant growth by establishing a symbiotic relationship with plants. The colonization of plant roots by these fungi increases plant resistance to biotic and abiotic stresses, enhances the plant growth through increasing elements uptake, the improvement of the water flow of plants, and the protection of the plants against diseases. Due to the importance of some food products, such as maize, investigating various aspects of mycorrhizal fungi application and their effect on these products is essential.

Materials and Methods to investigate the effects of some organic compounds and microorganisms on the colonization of AMF and the concentration of some elements, a factorial experiment in greenhouse conditions was conducted in a completely randomized design at three replications for 3 months. The factors included mychorhizal inoculation consisted of *Funneliformis mosseae* (FM), *Rhizophagus intraradices* (RI), *Rhizophagus irregalaris* (RIr), and organic growth enhancers (Azolla, *P. fluorescens* VUPf5, amino acid complex, humic acid, yeast, bacterial siderophore and compost tea).

Results and Discussion the results showed that the highest root mycorrhizal colonization percentage by *Funneliformis mosseae* (*FM*) was observed in bacterial (93%), humic acid (90%) and Azola (76%) treatments. The use of Azola and humic acid and compost tea showed the highest *R. intraradices* (*Ir*) root colonization with 96 and 82%, respectively. The highest effect of the treatments on *R. irregalaris* (*Rir*) root colonization was observed regarding Azola (96%) and compost tea (90%), respectively. According to the results, the prominent increase in root colonization by three mycorrhizal species was observed in Azola, humic acid, compost tea and bacterial treatments. In addition, the results showed that some compounds increased the

concentration of nutrients in the roots and shoots of the treated plants. According to the results, all mycorrhizal species significantly increased the amount of phosphorus in the shoot under the compost tea treatment. Also, the treatment of amino acid combined with *R. irregaluris* caused an increase in the concentration of iron, compared to the control. The use of *R. intraradices* along with amino acid increased manganese concentration in the plant aboveground organs by 2.87 times compared to the control. Simultaneous application of siderophore and *RI*, *FM* and *Rir* increased the zinc concentration by 2.16, 2.55 and 1.81 times compared to the control, respectively. The highest uptake of phosphorus, zinc and manganese was observed by *R. intraradices* soil inoculation and the maximum iron concentration was obtained in plants inoculated with *R. irregaluris*. The mean comparison of different treatments revealed no significant differences between non-mycorrhiza and mycorrhiza-treated samples, while in comparison with the control, their differences were substantial. Overall, co-treatment of mycorrhizal fungi and Azolla, bacterial and humic acid caused the most significant increase in the mycorrhizal root colonization and the compost tea, amino acid complex and siderophore treatments had the highest impact on the nutrient content of the plant.

Conclusion: In the present study, all treatments had an additive effect on root colonization. However, Azolla, bacteria, humic acid and tea compost treatments caused the most mycorrhizal colonization. These treatments utilized with mycorrhizal fungus had a favourable effect on the growth factors of corn by increasing the rate of colonization. Also, this study revealed that all three species of mycorrhizal fungi increased the concentration of elements and the effect of these fungi along with compost tea, amino acid complex and bacterial siderophore increased colonization and nutrient content in the shoots compared to the control group.

Keywords: Arbuscular mycorrhizal fungi, elements content, root colonization, synergistic effect

مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی) جلد ۴۴ شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰

مقاله پژوهشی

بررسی کلونیزاسیون میکوریزی ریشه و برداشت برخی عناصر غذایی توسط ریشه در گیاه ذرت تیمار شده با برخی ترکیبات آلی و مایه زنی میکروبی

معصومه احمد زاده[۱]، ابراهیم صداقتی[۲*]، روح الله صابری ریسه[۲]، اصغر رحیمی[۳]، نرگس حاتمی[۴]، علی اکبر محمدی میریک[۳]

۱- کارشناسی ارشد بیماری شناسی گیاهی، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، ایران.

۲- دانشیار بیماری شناسی گیاهی، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، ایران

۳- دانشیار زراعت، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، ایران

۴- استادیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه پیام نور، ایران

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۸

پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۰۵/۰۲

کلمات کلیدی:

کلونیزاسیون ریشه،

قارچ میکوریز آربوسکولار،

محتوای عناصر،

هم‌افزایی

* عهده‌دار مکاتبات

Email: sedaghati@vru.ac.ir

چکیده

قارچ‌های میکوریز آربوسکولار با برقراری رابطه همزیستی با گیاهان باعث رشد بهینه آن‌ها می‌شوند. با توجه به نقش مهم برخی محصولات مانند ذرت در تأمین نیاز غذایی، بررسی جنبه‌های مختلف تأثیر قارچ‌های میکوریز بر روی این محصولات حائز اهمیت است. در این پژوهش، به‌منظور بررسی کارایی برخی ترکیبات و ارگانیسم‌ها بر کلونیزاسیون قارچ‌های میکوریز آربوسکولار و محتوی برخی عناصر ذرت، آزمایشی در شرایط گلخانه به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار به مدت ۳ ماه با فاکتور قارچ در سه سطح *Funneliformis mosseae* (FM)، (RI) *Rhizophagus intraradices*، *Rhizophagus irregalaris* (RIr)، و فاکتور تقویت‌کننده‌های آلی در هفت سطح (آزولا، باکتری *Pseudomonas fluorescens* VUPf5، کمپلکس آمینواسید، اسید هیومیک، مخمر، بیولوگ سیدروفور باکتریایی و چای کمپوست) انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد که بالاترین درصد کلونیزاسیون میکوریزایی توسط گونه FM به ترتیب در تیمارهای باکتری، اسید هیومیک و جلبک مشاهده گردید. تیمارهای جلبک، اسید هیومیک و چای کمپوست در گونه RI و جلبک و چای کمپوست در گونه RIr بیشترین تأثیر را بر روی درصد کلونیزاسیون داشتند. با توجه به نتایج حاصل، بیشترین افزایش درصد کلونیزاسیون ریشه در سه گونه میکوریزایی تحت تاثیر تیمار با جلبک، اسید هیومیک، چای کمپوست و باکتری به دست آمد. طبق نتایج به‌دست‌آمده، همه گونه‌های قارچ میکوریز مورد استفاده به‌صورت معنی‌داری باعث افزایش محتوی فسفر شدند و میزان فسفر در اندام هوایی تحت تأثیر تیمار تلفیقی چای

کمپوست و میکوریز به میزان ٦٩/٥٪ افزایش یافت. تیمار کمپلکس آمینواسید همراه با گونه *R. irregaluris* غلظت آهن را نسبت به شاهد ٨/٠٧ برابر افزایش داد. کاربرد *R. intraradices* به همراه کمپلکس آمینواسید باعث افزایش ٨٧/ ٢ برابری غلظت منگنز نسبت به شاهد شد. همچنین، کاربرد هم‌زمان سیدروفور و RI، FM و RIr به ترتیب باعث افزایش ٢/١٦، ٢/٠٥ و ١/٨١ برابری غلظت عنصر روی نسبت به شاهد شد. به‌طورکلی کاربرد هم‌زمان قارچ‌های میکوریز همراه با تیمارهای، آزولا، باکتری و هیومیک اسید بیشترین تاثیر رابر افزایش کلونیزاسیون ریشه توسط گونه‌های میکوریزی و تیمارهای چای کمپوست،کمپلکس آمینواسید و سیدروفور بیشترین تاثیر را در افزایش محتوی عناصر غذایی نشان دادند.

مقدمه

افزایش نیاز به غذا همراه با محدودیت اراضی مستعد و قابل‌کشت، پژوهش‌گران بخش کشاورزی را با چالش بزرگی روبه‌رو نموده است. بر این اساس، در شرایطی که عملاً توسعه اراضی کشاورزی مقدور نیست، افزایش عملکرد در واحد سطح موردتوجه قرارگرفته است. از مؤلفه‌های اساسی افزایش عملکرد محصولات، مصرف بیش‌تر انواع نهاده‌ها، به‌ویژه کودهای شیمیایی است که کاربرد بی‌رویه آن‌ها مشکلاتی را برای انسان، خاک و محیط‌زیست ایجاد می‌کند. استفاده از کودهای آلی می‌تواند افزون بر کاهش مصرف کودهای شیمیایی و هزینه‌های آن‌ها، در حفظ سلامت محیط‌زیست نیز می‌باشد و استفاده از کودهای زیستی به غنی‌سازی خاک منطقه ریشه کمک می‌کند. مواد آلی و توده زیستی عامل اصلی حاصلخیزی خاک هستند و برای حفظ حاصلخیزی و قابلیت تولید خاک، مقدار آن‌ها باید در سطح مناسبی حفظ شود (۱). این کودها حامل باکتری‌ها و قارچ‌هایی هستند که علاوه بر افزایش فراهمی زیستی عناصر معدنی از طریق تثبیت زیستی نیتروژن، محلول کردن فسفر و پتاسیم و مهار عوامل بیماری‌زا، با تولید هورمون‌های تنظیم‌کننده رشد گیاه، عملکرد گیاهان زراعی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. یکی از راه‌های افزایش ماده آلی خاک، استفاده از کودهای آلی از قبیل ترکیبات زنده (باکتری، چای کمپوست، مخمر، آزولا) و ترکیبات غیرزنده (بیولوگ سیدروفور[1]، آمینواسیدها، هیومیک و فولویک اسید) است (۲). کودهای زیستی تنها به مواد آلی حاصل از کودهای دامی و پسماندهای گیاهی گفته نمی‌شود بلکه تولیدات حاصل از فعالیت ریز-جاندارانی که در ارتباط با تثبیت نیتروژن و یا فراهم کردن فسفر و سایر عناصر غذایی در خاک فعالیت می‌کنند نیز شامل می‌شوند (۳).

قارچ‌های میکوریز آربوسکولار[2] ازجمله میکروارگانیسم‌های مفید ریزوسفری می‌باشند. این گروه قارچی با ایجاد رابطه همزیستی در ریزوسفر گیاهان نقش مهمی در بهبود رشد گیاهان ایفا می‌نمایند (۴). تاکنون تحقیقات زیادی در خصوص نقش قارچ‌های میکوریز بر فاکتورهای رویشی و زایشی گیاه ذرت و تأثیر آن‌ها بر میزان جذب آب و عناصر غذایی مختلف صورت گرفته است (۵). این قارچ می‌تواند مواد آلی موردنیاز خود را از گیاه دریافت کرده و در مقابل در جذب عناصر غذایی بی‌تحرک مانند فسفر، مس، روی، منگنز، آهن و غیره از خاک به گیاه کمک کند و باعث انتقال مواد غذایی به ریشه‌های کلونیزه شده می‌شوند (۶). از دیگر میکروارگانیسم‌های مفید باکتری‌های کمکی میکوریز[3] می‌باشد که دارای مکانیسم‌هایی مانند تولید فاکتورهای رشدی هستند که ممکن است جوانه‌زنی اسپور قارچی و رشد میسیلیومی را افزایش داده و انشعابات و کلونیزاسیون ریشه را ارتقاء دهند (۷). استفاده از ورمی کمپوست علاوه بر افزایش جمعیت و فعالیت میکروارگانیسم‌های مفید خاک (قارچ‌های میکوریز و میکروارگانیسم‌های حل‌کننده فسفات) باعث افزایش دسترسی گیاهان به عناصر غذایی موردنیازشان می‌شود (۸).

مخمرها به دلیل دارا بودن قندها، آمینواسیدها و اسیدهای نوکلئیک، ویتامین‌ها و مواد معدنی نقش تغذیه‌ای و حفاظتی مفیدی داشته و همچنین به علت داشتن ترکیبات مولد تنظیم‌کننده‌های رشد مانند اکسین، ژیبرلین و سایتوکنین به‌عنوان محرک رشد برای گیاهان تلقی می‌شوند. در مطالعه انجام شده توسط فراسیا و همکاران[4] تأثیر *R. mucilaginosa* (مخمر خاک) بر روی رشد میسلیومی *F. mosseae* و *Gigaspora rosea* افزایش طول هیف‌های هر دو قارچ در حضور

۱- سیدروفورها کلا تها یا ترکیبات آلی با وزن ملکولی پایین هستند که توسط میکروارگانیسمهای مفید از جمله باکتری های هوازی و قارچ ها تولید می شوند.

2- Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF)
3- Mycorrhiza helper bacteria (MHB)
4- *Fracchia et al.*

مخمر و ترشحات آن بررسی‌شده است (۹). همچنین، اثر محرک دو گونه جلبک مانند *Nostoc muscorum* و *Ulva lactuca* روی توسعه قارچ‌های AMF و تأثیر آن‌ها بر رشد باقلا در حضور ریزوبیوم در سطح پایینی از کودهای نیتروژن و فسفر در گلدان در گلخانه موردمطالعه قرار گرفت است. استفاده از هر دو جلبک همراه با قارچ‌های میکوریز و مایه تلقیح ریزوبیوم منجر به افزایش در طول ریشه در ۴۵ روز بعد از کاشت در گیاه شده، و هر دو زی توده از دو گونه جلبک اضافه‌شده به خاک باعث ارتقاء رشد دیگر موجودات زنده و فعالیت آنزیم‌های خاک و افزایش عناصر غذایی موردنیاز گیاهان شدند (۱۰). این جلبک‌ها نه‌تنها حاوی مواد محرک AMF می‌باشند بلکه به توسعه قارچ در گیاهان عالی کمک می‌کنند (۱۱). تحریک رشد ریشه و اندام هوایی و افزایش انشعابات و توسعه ریشه‌های موبین ذرت توسط هیومیک اسید اثبات شده است و همچنین درصد همزیستی گیاه ذرت با قارچ میکوریز را به دلیل تغییرات مورفولوژیکی ریشه افزایش می‌دهد (۱۲). با توجه به اهمیت همزیستی میکوریزی در کاهش مصرف کودهای شیمیائی و سطح زیرکشت گیاه ذرت، لزوم تحقیقات در زمینه تأثیر و کاربرد قارچ‌های میکوریزی آشکار می‌شود. با توجه به اینکه تاکنون تحقیقات کمی در خصوص تأثیر ترکیبات زنده و غیرزنده آلی روی گیاه ذرت صورت گرفته است، این تحقیق با هدف بررسی کارایی و تأثیر برخی از این ترکیبات بر درصد کلونیزاسیون سه گونه قارچ میکوریز آربوسکولار و جذب عناصر غذایی مانند آهن، روی، فسفر و منگنز توسط گیاه ذرت انجام گردید.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی اثر ترکیبات زنده و غیرزنده بر کلونیزاسیون قارچ میکوریز آربوسکولار و جذب برخی عناصر غذایی، آزمایشی در شرایط گلخانه به‌صورت فاکتوریل با طرح پایه بلوک‌ای کاملاً تصادفی در سه تکرار به مدت ۳ماه انجام شد در این آزمایش، تمام محاسبات آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام شد. رسم نمودارها و جداول نیز توسط نرم‌افزارهای Excel و Word صورت گرفت. در مرحله نخست تجزیه واریانس جهت صفات اندازه‌گیری شده انجام و پس‌ازآن مقایسه میانگین صفات موردمطالعه با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال یک درصد انجام شد. تیمارهای آزمایش سه گونه قارچ میکوریز آربوسکولار (FM)*Funneliformis mosseae*[1]، *Rhizophagus intraradices*[2] (RI) و *Rhizophagus. irregularis*[3](RIr) وگروه شاهد (بدون قارچ) بودند. گونه‌های قارچی از آزمایشگاه بیماری شناسی دانشگاه رفسنجان تهیه و جهت اطمینان از نوع گونه، شناسایی مورفولوژیکی (رنگ اسپور، شکل، تزئینات سطح، اندازه و ساختار دیواره) و شناسایی مولکولی (تعیین توالی از ناحیه S r DNA۱۸) انجام گرفت. ترکیبات زنده مانند باکتری *Pseudomonas flurescens* VUPF5 ، مخمر *Issatchenkia orientalis*، چای کمپوست (برای تهیه محلول چای‌کمپوست ترکیب ورمی‌کمپوست۲۵۰ گرم، عصاره جلبک دریایی ۵۰ میلی‌لیتر و ملاس چغندرقند ۵۰ سی سی به مدت ۲۴ ساعت در ۵ لیتر آب قرار گرفته و به خوبی هم خورد و با پمپ هوا، هوادهی شد و درنهایت چای‌کمپوست (۱۳)، آزولا (C/N 10) و ترکیبات غیرزنده، مانند کمپلکس آمینواسید (آمینواسید پودری ٪۵۰، آمینواسپارک)، اسید هیومیک (Humax 95Wsj, HJ Biotech Inc.) و سیدروفور باکتریایی نیز از دانشگاه ولیعصر تهیه گردید.

حدود۵۰۰ کیلوگرم خاک(EC=۱/۳ و pH=۷) از الک چهار میلی‌متری عبور داده و با استفاده از اتوکلاو در دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس (بخار مرطوب) به مدت

1- NCBI code: KU136404
2- NCBI code: EU232659-1
3- NCBI code: HF968841-1

۶۰ دقیقه در کیسه‌های کنفی استریل شد. بذر ذرت رقم SC750 پس از ضدعفونی با محلول نیم درصد هیپوکلریت سدیم در گلدان‌هایی که با مخلوط خاک و ماسه به نسبت ۲:۱ پرشده بودند کاشته شدند و هم‌زمان با جوانه‌زنی بذور ۲۰۰ گرم از مایه تلقیح خالص قارچ در هر گلدان مورد استفاده قرار گرفت. برای تلقیح باکتری جدایه *P. flurescens VUPF5* روی محیط کشت *آگار* غذایی غنی شده (آگار غذایی غنی شده با ۰/۳ گرم ساکازر در هر لیتر محیط کشت) کشت شد و پس از ۲۴ تا ۴۸ ساعت رشد در دمای ۲۸ درجه سلسیوس، سوسپانسیون‌های باکتریایی با غلظت 10^{10} *CFU/ml* بر اساس روش اسپکتروفتومتری (۰/۵=OD۰ در طول‌موج ۵۴۰ برابر با 10^{10}*CFU/ml* می‌باشد) تهیه شد و به میزان ۲۰ سی‌سی در هر گلدان مورد استفاده قرار گرفت. سوسپانسیون مخمر با جمعیت 4×10^{10} *CFU/ml* تهیه و برای تلقیح آزمایش‌های گلخانه به میزان ۲۰ سی سی در هرگلدان مورد استفاده قرارگرفت. ۴۰ میلی‌لیتر عصاره چای کمپوست ، ۱۲ میلی‌لیتر عصاره آزولا (۱۴)، یک گرم از کمپلکس آمینواسید، ۲۰ سی‌سی اسیدهیومیک و یک گرم سیدروفور (به پیشنهاد شرکت پرشین بنیان آریا تولید کننده کودهای بیولوگ سیدروفوری و محل تهیه سیدروفور) در هر گلدان استفاده شد، گلدان‌ها در گلخانه در دمای۳±۲۷ درجه سلسیوس قرار داده شدند (۱۵). سه ماه پس از کاشت، بررسی همزیستی میکوریزایی و تعیین درصد کلونیزاسیون ریشه‌ی گیاه ذرت، رنگ‌آمیزی ریشه‌ها بر اساس روش فیلیپس و هایمن انجام گردید (۱۶). بر اساس روش فوق، ابتدا ریشه‌ها را در زیرآب شسته و به قطعات یک سانتی‌متری برش داده شدند و برای شفاف‌سازی[1] به مدت ۴۵ دقیقه در محلول هیدروکسید پتاسیم (KOH) ۱۰ درصد در بن ماری در حال جوش قرار گرفتند. سپس، حداقل سه بار با آب مقطر شستشو داده شدند تا پتاس آن‌ها به‌خوبی خارج گردد و به مدت سه الی پنج دقیقه در محلول اسیدکلریدریک (HCL) یک درصد قرار گرفتند تا اسیدی شوند. پس‌ازاین مرحله نباید ریشه‌ها را با آب شستشو داد زیرا برای رنگ‌آمیزی اسید موردنیاز است. برای رنگ‌آمیزی، ریشه‌ها داخل محلول ٪ ۰/۰۵ تریپان بلو در لاکتوگلیسرول به مدت ۱۰ دقیقه در بن ماری در حال جوش قرار گرفتند سپس شستشو شدند و درنهایت جهت رنگ بری، در لاکتوگلیسرول قرار گرفتند. درصد کلونیزاسیون ریشه‌ها بر اساس روش بیرمن و لیندرمن تعیین شد (۱۷). سپس، ۳۰ قطعه یک سانتی‌متری از ریشه‌های رنگ‌آمیزی شده هر نمونه به‌صورت تصادفی انتخاب شدند و هر قطعه ریشه بر روی لام حاوی محلول لاکتوفنل در زیر میکروسکوپ بررسی شد. میزان کلونیزاسیون با برآورد درصد طولی از ریشه که دارای ساختمان‌های قارچی (وزیکول، آربوسکول و هیف) بودند، نسبت به‌کل طول ریشه محاسبه گردید.

قسمت دوم آزمایش، اندازه‌گیری عناصر غذایی آهن، روی، منگنز و فسفر در تیمارهای مختلف بود. برای اندازه‌گیری این عناصر، ابتدا اندام‌های هوایی گیاه ذرت در تیمارهای مختلف به مدت ۷۲ ساعت در آون با دمای ۷۲ درجه‌ی سلسیوس قرار گرفتند تا خشک شوند. سپس، ۰/۵گرم از نمونه‌ی خشک و آسیاب شده در بوته چینی ریخته شد. نمونه‌ها در داخل کوره ابتدا به مدت نیم ساعت با درجه‌ی حرارت ۲۵۰ درجه‌ی سلسیوس و سپس به مدت سه ساعت در درجه حرارت ۵۵۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند تا به‌صورت خاکستر درآیند. پس از خنک شدن کوره، نمونه‌ها از کوره خارج شده و هضم نمونه‌ها با استفاده از اسیدکلریدریک ۲ نرمال به انجام شد (۱۸). غلظت عناصر غذایی غلظت عناصر غذایی آهن، منگنز و روی در عصاره با استفاده از دستگاه جذب اتمی (GBC Avanta ساخت کشور استرالیا) و فسفر با استفاده از روش آمونیوم مولیبدات و اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۷۰ نانومتر (UV/VIS Spectrometer PG Instruments Ltd) اندازه‌گیری شد (۱۹).

1- C learing

نتایج و بحث

کلونیزاسیون ریشه‌ی گیاه ذرت، پس از رنگ‌آمیزی ریشه‌ها مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱) نتایج نشان داد درصد کلونیزاسیون ریشه در گونه‌های مختلف میکوریز اختلاف معنی‌داری نداشت، درحالی‌که تأثیر تیمار و اثر متقابل تیمار و گونه میکوریز بر درصد کلونیزاسیون معنی‌دار بود. بالاترین میزان کلونیزاسیون میکوریزایی در گونه *F. mosseae* (FM) به ترتیب در تیمارهای باکتری (۹۳ ٪)، اسید هیومیک (۹۰٪) و آزولا (۷۶٪) مشاهده گردید. همچنین، تیمارهای جلبک و اسید هیومیک با ۹۰٪، و چای کمپوست با ۸۲٪ در گونه *R. intraradices* (IR) به ترتیب بیشترین تأثیر را بر درصد کلونیزاسیون داشتند. همچنین، در گونه *R. irregularis* (Rir) تیمارهای جلبک (۹۶٪) و چای کمپوست (۹۰٪) به ترتیب بیشترین درصد کلونیزاسیون را باعث شدند. با توجه به نتایج فوق، تیمارهای جلبک، اسید هیومیک، چای کمپوست و باکتری بیشترین تأثیر را بر افزایش درصد کلونیزاسیون سه گونه میکوریزایی داشتند.

اثر متقابل تیمار و گونه میکوریزایی بر درصد کلونیزاسیون ریشه معنی‌دار بود، به‌طوری‌که تیمار جلبک و *Rir* با ۹۶/۶۶ درصد بیشترین درصد کلونیزاسیون و تیمار سیدروفور و RI با ۴۵ درصد کمترین میزان کلونیزاسیون را به خود اختصاص داد (جدول ۱، شکل ۲).

عصاره جلبک دریایی عمدتاً به دلیل داشتن مواد افزایش‌دهنده‌ی متابولیسم سلولی مانند تنظیم‌کنندگان رشد گیاهی (اکسین، سیتوکنین، ژیبرلین)، اسمولیت‌های ارگانیک (مانند بتائین)، آمینواسیدها، عنصرهای معدنی و ویتامین‌ها به‌عنوان محرک زیستی عمل می‌کند (۲۰). وجود محرک‌های فعال زیستی در عصاره جلبک دریایی، رشد و توسعه گیاهان را تنظیم می‌کند. با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام‌شده روی گیاهان مختلف، استفاده از عصاره جلبک موجب بهبود جوانه‌زنی، رشد ریشه و کیفیت برگ می‌شود (۲۱؛ ۲۲).

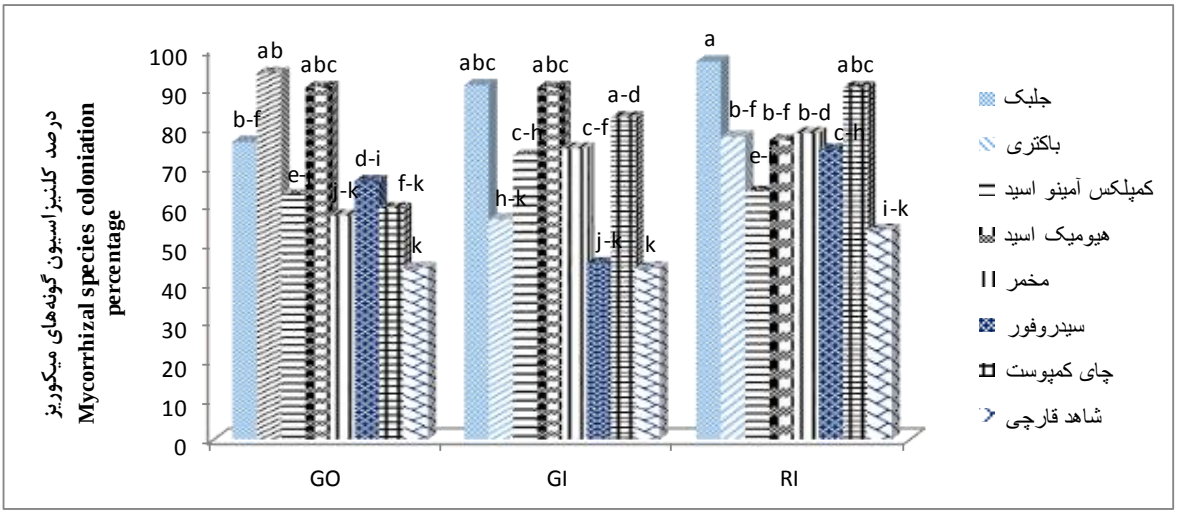
جدول(۱) نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارها بر میانگین مربعات کلونیزاسیون قارچی ریشه

Table (1) Variance analysis results of mycorrhizal colonization

Colonization % کلونیزاسیون (٪)	df	Sources of changes منبع تغییرات
421.26 ns ۴۲۱/۲۶ns	2 ۲	Mycorrhizae میکوریز
1593.52** ۱۵۹۳/۵۲**	7 ۷	Treatments تیمارها
452.48** ۴۵۲/۴۸**	14 ۱۴	× Mycorrhizae Treatments تیمارها * میکوریز
92.43 ۹۲/۴۳		Error خطا
13.45 ۱۳/۴۵		CV

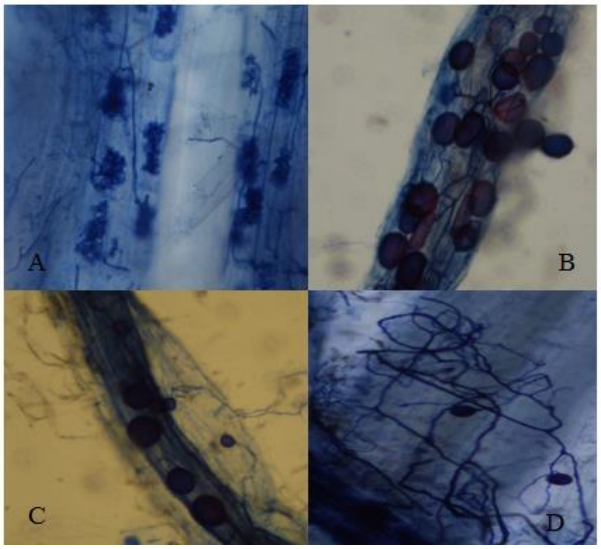
** معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، ns تفاوت غیر معنی‌دار

significant at P≤0.01, ns insignificant difference



شکل(۱) مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف بر کلونیزاسیون قارچ‌های میکوریز در گیاه ذرت

Figure (1) Mean Comparison of the effect of different treatments on mycorrhizal fungi colonization in Zea mays plant (FM: *Funneliformis mosseae*; RI: *Rhizophagus intraradices*; RIr: *Rhizophagus irregalaris*)



شکل(۲) اندام‌های برون و درون ریشه‌ای قارچ‌های میکوریز آربوسکولار. A :آربوسکول، B: وزیکول، C: وزیکول و ریسه‌های داخلی، D: میسلیوم خارجی و اسپور

Figure (2) External and intra-root organs of arbuscular mycorrhizal fungi. A: Arbuscular, B: vesicles, C: internal vesicles and filaments, D: external mycelium and spores

در بررسی های انجام شده، کاربرد عصاره جلبک دریایی قرمز و سبز در گیاهان پاپایا و گل ساعتی در حضور گونه‌های *G.margarita* و*Glomus caledonius* ، منجر به افزایش توسعه شبکه هیفی، رشد گیاهان و درصد کلونیزاسیون میکوریزایی گردید. مانیتول یکی از ترکیبات موجود در عصاره جلبک قهوه‌ای است که بر رشد هیفی و درصد کلونیزاسیون میکوریزایی تأثیر دارد (۱۱).

اسید هیومیک می‌تواند به‌طور مستقیم اثرات مثبتی بر رشد گیاه بگذارد، بدین‌صورت که موجب تحریک رشد قسمت هوایی و ریشه گیاه می‌شود، بااین‌حال اثر آن روی ریشه

برجسته‌تر است. علاوه بر این، اسید هیومیک با افزایش نفوذپذیری سلول‌های ریشه به جذب بهتر مواد غذایی و رشد بیشتر گیاه کمک می‌نماید. همچنین، ثابت‌شده است که این ترکیب با تولید بیشتر اسیدهای نوکلئیک و اسیدهای آمینه میزان تکثیر سلولی را در کل گیاه، به‌خصوص در ریشه‌ها، افزایش می‌دهد (۲۳). از طرف دیگر، اسید هیومیک با افزایش طول و حجم سیستم ریشه‌ای، تعداد انشعابات ریشه و میزان سطح تارهای کشنده، باعث افزایش جذب آب و عناصر غذایی همچون پتاسیم، نیتروژن و آهن می‌شود (۲۴). اسید هیومیک و فولویک دارای اثر تحریک‌کنندگی بر توسعه هیف‌های برون ریشه‌ای قارچ‌های میکوریز آربوسکولار و کلونیزاسیون میکوریزایی ریشه در محیط هیدروپونیک هستند (۲۵). مشخص شده است که استفاده از غلظت‌های ۲۰ و ۸۰ میلی‌گرم بر لیتر اسید هیومیک باعث افزایش اسپورزایی *G. proliferum* در کشت درون شیشه‌ای گیاه قافی[1] گردید (۲۶). بنابراین، می‌توان چنین نتیجه گرفت که کاربرد اسید هیومیک و گونه‌های قارچ میکوریز آربوسکولار به‌صورت هم‌افزایی باعث بهبود شرایط رشد گیاهان می‌شوند.

چای کمپوست حاوی تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی نظیر ژیبرلین است که باعث افزایش رشد ریشه شده (۲۷) و دارای اثرات مثبت بر توسعه ریشه اولیه و رشد گیاه با کاربرد برگی و خاکی می‌باشد (۲۸). افزودن ورمی‌کمپوست به خاک سبب تخلخل و پوکی خاک می‌شود که تخلخل مناسب خاک باعث بهبود توسعه ریشه و درنتیجه افزایش حجم ریشه می‌شود (۲۹). از طرف دیگر، این ترکیب دارای اجزای فعال زیستی است که برای رشد ریشه مفید بوده و منجر به افزایش رشد ریشه، افزایش زی‌توده و افزایش نمو گیاه می‌شود (۹). لازم به ذکر است که میزان تاثیرکمپوست و یا ورمی کمپوست بر رشد گیاه بستگی به منبع مواد مورداستفاده، نقش میکروارگانیسم‌ها و محتوای عناصر غذایی برای کمپوست و یا آماده‌سازی ورمی کمپوست دارد (۳۰). به نظر می‌رسد بیشترین تأثیر ورمی کمپوست به علت اثر مواد مغذی موجود در آن است که موجب تحریک قارچ می‌شود(۳۱).

باکتری‌های کمکی میکوریز از طریق مکانیسم‌هایی شامل تولید فاکتورهای رشدی، ممکن است موجب افزایش جوانه‌زنی اسپور قارچی، رشد میسیلیومی، انشعابات و درصد کلونیزاسیون ریشه شوند و همچنین می‌توانند تنش‌های ناشی از خاک به‌وسیله‌ی سم‌زدایی مواد آنتاگونیست را کاهش دهند (۷). افزایش پذیرش میکوریز توسط سلول‌های ریشه‌های کلونیزه شده با باکتری، افزایش طول لوله تندش اسپورهای جوانه‌زده، جهت‌دهی به حرکت لوله تندش به سمت ریشه‌های کلونیزه شده با باکتری بر اساس مواد مترشحه از ریشه انجام می‌پذیرد (۳۲). کاربرد هم‌زمان قارچ میکوریز آربوسکولار و باکتری‌های محرک رشد گیاه، یکی از استراتژی‌های مؤثر برافزایش اثرات هر دو عامل است.

قسمت دوم نتایج پژوهش مربوط به نقش این تیمارها از طریق کلونیزاسیون بر جذب برخی عناصر در گیاه بود (جدول ۲). نتایج حاصل از مقایسه میانگین اثرات سه گونه قارچ میکوریز آربوسکولار بر غلظت فسفر، آهن، روی، منگنز و اثرات متقابل تیمارهای زنده و غیرزنده همراه با گونه‌های قارچی در گیاه ذرت در جدول ۳ آورده شده است. تلقیح بذور با قارچ‌های میکوریز موجب افزایش غلظت عناصر خصوصاً فسفر در گیاه ذرت گردیده است.

غلظت فسفر اندام هوایی

نتایج ارائه‌شده در جدول ۳ نشان داد که گونه‌های مختلف میکوریز تأثیر معنی‌داری بر محتوای عنصر فسفر گذاشتند. در بین گونه‌های مورداستفاده در آزمایش، گونه *R. intraradices* بیشترین تأثیر را بر درصد افزایش محتوای فسفر داشت و گونه‌های *F. mosseae* و *R. irregularis* در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.

اثر متقابل میکوریز و تیمار به‌صورت معنی‌داری باعث افزایش محتوای فسفر در گیاه ذرت گردید به‌طوری‌که بر اساس نتایج مشاهده‌شده (جدول۳)، چای کمپوست توأم با *R. intraradices* میزان فسفر اندام هوایی را به میزان

1- Lunularia cruciate

۲/۲۸ برابر افزایش داد. تیمارهای سیدروفور و کمپلکس آمینواسید در جایگاه‌های بعدی قرار داشتند. در سطحی پایین‌تر، جلبک، مخمر، سیدروفور و اسید هیومیک در گونه *F. mosseae* به‌طور معنی‌داری بر فسفر اندام هوایی در مقایسه با شاهد تأثیرگذار بود.

کمترین میزان افزایش فسفر مربوط به تیمار مخمر بود که فقط ۰/۱۲ برابر افزایش نشان داد. مقایسه میانگین محتوای فسفر در تیمارهای مختلف نشان داد که در شرایط عدم کاربرد میکوریز، تیمارهای جلبک، باکتری و سیدروفور منجر به افزایش محتوای فسفر اندام‌های هوایی شدند. در ارتباط با تیمار میکوریزی، همه گونه‌های مورداستفاده به‌طور معنی‌داری باعث افزایش محتوای فسفر شده و از این لحاظ اختلاف معنی‌داری بین آن‌ها مشاهده نشد.

در بین عناصر غذایی، مهم‌ترین نقش قارچ‌های میکوریز آربوسکولار جذب فسفر با استفاده از گسترش میسیلیوم‌های خارج ریشه‌ای و افزایش سطح جذب است (۳۳). فسفر بعد از نیتروژن مهم‌ترین عنصر غذایی است که کمبود آن می‌تواند رشد گیاهان را محدود کند. فسفر جز اصلی اسید نوکلئیک، فسفولیپیدها، فسفوپروتین و دی کلئوتیدها می‌باشد. فسفر هم‌چنین در فرایند ذخیره و انتقال انرژی، فتوسنتز، تنظیم بعضی از آنزیم‌ها و انتقال کربوهیدرات‌ها نقش ایفا می‌کند (۳۴).

پژوهش‌گران در رابطه با افزایش غلظت فسفر در گیاهان میکوریز نسبت به گیاهان بدون میکوریز چند مکانیسم بیان کردند.

۱- ازآنجایی‌که انتشار فسفات در خاک بسیار کند بوده و در مقابل، سرعت جذب آن توسط ریشه گیاهان بسیار بالا می‌باشد، محیط اطراف ریشه به‌سرعت از فسفات تخلیه می‌گردد و پیوسته بر وسعت این ناحیه از خاک افزوده می‌شود. استقرار میکوریز روی ریشه گیاهان میزبان باعث می‌گردد که هیف‌های قارچ به سمت ورای ناحیه تخلیه فسفر گسترش‌یافته، بنابراین ریشه‌های میکوریزی نسبت به ریشه‌های بدون میکوریز، به حجم بیشتری از خاک دسترسی پیدا می‌کنند (۴).

۲-ریشه گیاهان میکوریز از طریق افزایش تراوش پروتون، ریزوسفر را اسیدی کرده و باعث متحرک شدن فسفر و افزایش جذب آن در خاک‌های آهکی می‌گردد (۳۵).

جدول(۲) نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارها بر (میانگین مربعات) فسفر، آهن، روی، منگنز اندام های هوایی گیاه

Table (2) variance analysis results (mean squared) of treatments effect on phosphorus, iron, zinc, manganese of the plant aboveground **organs**

Mean Squares میانگین مربعات					
Mn	Zn	Fe	P	df	Sources of changes
21212.58**	4339.24**	25822.65**	1.35**	3	Mycorrhiza
۲۱۲۱۲/۵۸**	۴۳۳۹/۲۴**	۲۵۸۲۲/۶۵**	۱/۳۵**	۳	*میکوریز*
5160.65**	675.19**	4076.15**	3.24**	7	Treatment
۵۱۶۰/۶۵**	۶۷۵/۱۹**	۴۰۷۶/۱۵**	۳/۲۴**	۷	*تیمار*
3614.53**	341.64**	4334.811**	0.34**	21	Treatment × mycorrhizal
۳۶۱۴/۵۳**	۳۴۱/۶۴**	۴۳۳۴/۸۱۱**	۰/۳۴**	۲۱	*میکوریز * تیمار*
236.58	81.30	154.54	0.03		Error
۲۳۶/۵۸	۸۱/۳۰	۱۵۴/۵۴	۰/۰۳		*خطا*
10.49	14.26	12.43	12.30		CV
۱۰/۴۹	۱۴/۲۶	۱۲/۴۳	۱۲/۳۰		

* معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

*significant at P≤0.01

۳- میکوریز آنزیم فسفاتاز تولید می‌کند که می‌تواند فسفر آلی را به شکل قابل‌جذب آن تبدیل نماید (۳۶).

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، چای کمپوست توأم با گونه *R. intraradices* میزان فسفر اندام هوایی را در سطح یک درصد به‌طور معنی‌دار متأثر کرد. در پژوهشی که انجام شد میکروارگانیسم‌های حل‌کننده فسفر در چای کمپوست باعث افزایش حلالیت فسفر و فراهمی بیشتر فسفر و درنتیجه افزایش جذب آن توسط گیاه شدند (۳۷). در تحقیق دیگر استفاده از ۵۰۰ میلی‌لیتر بر لیتر چای کمپوست و ۱۷۰ گرم بر لیتر کود شیمیایی NPK باعث افزایش فسفر و نیتروژن اندام هوایی سورگوم شد (۳۸). افزایش جذب فسفر با کاربرد ورمی کمپوست توسط پانت و همکاران[1] (۳۹) گزارش‌شده که اظهار کرده‌اند مصرف ورمی کمپوست غنی‌شده با *Azotobacter chroococcum* باعث افزایش فسفر اندام هوایی برنج شد. همچنین، پانت و همکاران (۲۸) در بررسی خود بیان کردند محلول‌پاشی چای کمپوست هوادهی نشده سبب افزایش نیتروژن، فسفر و پتاسیم اندام هوایی شلغم شد.

غلظت آهن اندام هوایی

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر طبق جدول ۳ گونه‌های میکوریزی تأثیر معنی‌داری بر محتوای عنصر آهن اندام هوایی گیاه ذرت داشتند و در بین گونه‌های بکار برده شده *R. irregularis* بیشترین تأثیر را بر درصد افزایش این عنصر داشت. کاربرد میکوریز توأم با ترکیبات زنده و غیرزنده به‌طور معنی‌داری باعث افزایش میزان عنصر آهن شدند. به‌طوری‌که تیمار کمپلکس آمینواسید با گونه *R. irregularis* با افزایش ۸ برابری نسبت به شاهد بیشترین اثر را بر افزایش این عنصر سبب شد. مقایسه میانگین محتوای عنصر آهن در گیاه ذرت در تیمارهای مختلف نشان داد که تیمارهایی مانند سیدروفور، کمپلکس آمینواسید، جلبک در شرایط عدم کاربرد میکوریز با کاربرد میکوریز به‌تنهایی در یک سطح معنی‌دار قرار گرفتند و اختلافشان نسبت به شاهد چشمگیر بود.

برخی از پژوهشگران معتقدند ریشه‌های میکوریزی با اسیدی کردن محیط توسط ترشح پروتون، با احیای ترکیبات آهن باعث افزایش میزان آهن محلول و قابل‌جذب (آهن دو ظرفیتی) برای گیاه می‌شود (۴۰). بهرامی و همکاران[2] (۴۱). علت کاهش آهن در شاخسار و ریشه گیاهان غیر میکوریزی را غیر محلول شدن آهن یا ترکیب شدن با بنیان‌های شیمیایی و غیر متحرک شدن یا رقابت با سایر عناصر بیان کردند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر، کاربرد قارچ‌های میکوریز سبب افزایش آهن در گیاهان میکوریزی در برخی تیمارها نسبت به گیاهان بدون میکوریزی شد که این افزایش به دلیل تولید سیدروفور توسط قارچ میکوریز است سیدروفور ها مولکول‌هایی با وزن مولکولی کم هستند که در شرایط کمبود آهن توسط تعدادی از ریزاندام واره‌ها تولید و ترشح‌شده و با آهن موجود در خاک، تولید کمپلکس آهن- سیدروفور می‌نمایند و موجب افزایش جذب آهن می‌گردند (۴۲؛ ۴۳). آمینواسیدها تأثیر زیادی در کلاته کردن عناصر ریزمغذی در گیاهان دارند که در این حالت، جذب و انتقال مواد ریزمغذی موردنیاز گیاه را به‌راحتی انجام می‌دهند و همچنین باعث تسهیل جذب آن‌ها می‌شوند.

محتوای منگنز اندام هوایی

نتایج تجزیه واریانس (جدول۳) نشان داد اثرات کمپلکس آمینواسید توأم با هر سه گونه قارچ، میزان منگنز اندام هوایی را به‌طور معنی‌داری افزایش داد. بعدازآن تیمار سیدروفور با *R. intraradices* و تیمار باکتری با *R. intraradices* در یک سطح بر این صفت معنی‌دار بود. بیشترین میزان منگنز اندام هوایی در گونه *R. intraradices* با تیمار کمپلکس آمینواسید با ۲/۸۷ برابر و کمترین آن در تیمار چای کمپوست با افزایش ۴۷ درصدی در مقایسه با شاهد نشان داده شد. در شرایط عدم کاربرد میکوریز، تیمارهای باکتری، سیدروفور، کمپلکس

1- Pant *et al.*

2- Bahrami *et al.*

آمینواسید و چای کمپوست با تیمارهای توأم با میکوریز در یک سطح قرارگرفته و اختلافشان با شاهد معنی‌دار بود.

عنصر منگنز در سنتز قند و ساختمان پروتئین‌ها، بافت‌های مریستمی گیاه و اکسیداسیون آب (عنصر دهنده الکترون در فتوسیستم ۲) نقش دارد (۴۴). طبق نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش ما میزان منگنز در گیاهان ذرت میکوریزی نسبت به گیاهان بدون میکوریزی در برخی تیمارها افزایش یافت که ممکن است به علت تخلیه بیشتر منگنز از خاک در اثر افزایش سطح جذب ریشه و نفوذ ریسه‌های نازک قارچی در حفرات ریز خاک باشد.

غلظت روی اندام هوایی

با توجه به نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳)، تیمارهای سیدروفور و کمپلکس آمینواسید با هر سه گونه قارچی بیشترین میزان جذب عنصر روی را در گیاه میکوریز نسبت به فاقد میکوریز در سطح احتمال یک درصد و در مقایسه با شاهد نشان دادند. میزان افزایش عنصر روی در گونه‌های قارچی توأم با سیدروفور به میزان۲/۲، ۲ و ۱/۸ برابر به ترتیب در *R. intraradices* ، *F. mosseae* و *R. irregularis* در مقایسه با شاهد بودند.

طبق جدول ۳، در بین تیمارهای مختلف در شرایط عدم کاربرد میکوریز، تیمارهای اسید هیومیک و باکتری با بعضی از تیمارهای توأم با میکوریز مانند مخمر در یک سطح قرارگرفته و اختلاف معنی‌داری نداشتند.

عنصر روی یکی از عناصر کم‌مصرف در گیاه است که نقش مهمی در تولید اکسین و سنتز پروتئین،کربوهیدرات‌ها، تنظیم متابولیسم ساکاریدها، اسید نوکلئیک بیوسنتز کلروفیل و متابولیسم لیپید دارد با توجه به نتایج به‌دست‌آمده میزان روی در گیاهان میکوریزی بیشتر از گیاهان بدون میکوریز بود که علت آن می‌تواند ترکیب‌های آمینواسیدی و اسیدهای کربوکسیلیک تراوش شده توسط ریشه گیاهان میکوریزی باشد. همچنین کمپلکس پدید آمده از این ترکیب‌ها و عنصر روی، منجر به افزایش سرعت پخش شدن و جذب بیشتر این عنصر شده است (۴۵). در پژوهشی دیگر، افزایش میزان عناصر میکرو نظیر روی، مس، منگنز و آهن در گیاهچه‌های میکوریزی به تشکیل همزیستی ریشه و افزایش سطح جذب عناصر غذایی از ریزوسفر خاک نسبت دادند (۴۶). از طرف دیگر، گسترده شدن ریشه‌سطحی و اثر متقابل آن با میکوریز ممکن است برای جذب عناصر با تحرک کمتر همچون فسفر، پتاسیم و روی که تمایل به تجمع در سطح خاک دارند، مهم‌تر باشد (۴۷).

جدول(۳) تأثیر تیمارهای مختلف بر غلظت عناصر در اندام هوایی گیاه ذرت

Table (3) The effect of different treatments on the concentration of elements in *Zea mays aboveground organs*

	Treatments تیمارها	Mn (mg kg^{-1})	Zn (mg kg^{-1})	Fe (mg kg^{-1})	P (%)
GI	Azolla آزولا	164.87^{ef} ۱۶۴/۸۷^{ef}	61.47^{el} ۶۱/۴۷^{el}	99.74^{gh} ۷۴ / ۹۹^{gh}	1.75^{cg} ۱/۷۵^{cg}
	Bacteria باکتری	196.2^{bcd} ۱۹۶/۲^{bcd}	73.36^{ai} ۷۳/۳۶^{ai}	139.56^{c} ۱۳۹/۵۶^{c}	1.65^{gi} ۱/۶۵^{gi}
	Amino Acid Complex کمپلکس آمینو اسید	236.5^{a} ۲۳۶/۵^{a}	81.27^{ad} ۸۱/۲۷^{ad}	151.97^{c} ۱۵۱/۹۷^{c}	1.83^{bg} ۱/۸۳^{bg}
	Acid Humic هیومیک اسید	182.3^{ce} ۱۸۲/۳^{ce}	72.53^{bi} ۷۲/۵۳^{bi}	123.97^{d} ۱۲۳/۹۷^{d}	1.50^{ci} ۱/۵۰^{ci}

	Yeast مخمر	159.93^{efg} ۱۵۹/۹۳^{efg}	76.57^{af} ۷۶/۵۷^{af}	137.46^{cd} ۱۳۷/۴۶^{cd}	1.71^{ch} ۱/۷۱^{ch}
	Sidrophore سیدروفور	212.66^{ab} ۲۱۲/۶۶^{ab}	89.9^{a} ۸۹/۹^{a}	153.13^{c} ۱۵۳/۱۳^{c}	2.14^{ab} ۲/۱۴^{ab}
	Compost tea چای کمپوست	115.46^{cde} ۱۱۵/۴۶^{cde}	70.4^{bj} ۷۰/۴^{bj}	112^{efg} ۱۱۲^{efg}	2.39^{a} ۲/۳۹^{a}
	Control کنترل	155.3^{eh} ۱۵۵/۳^{eh}	62.4^{el} ۶۲/۴^{el}	95.1^{ghi} ۹۵/۱^{ghi}	1.44^{jl} ۱/۴۴^{jl}
GM	Azolla آزولا	158.96^{efg} ۱۵۸/۹۶^{efg}	75.3^{ag} ۷۵/۳^{ag}	132.4^{cd} ۱۳۲/۴^{cd}	1.93^{be} ۱/۹۳^{be}
	Bacteria باکتری	164.53^{efg} ۱۶۴/۵۳^{efg}	64.56^{dl} ۶۴/۵۶^{dl}	71.7^{jkl} ۷۱/۷^{jkl}	1.46^{fl} ۱/۴۶^{fl}
	Amino Acid Complex کمپلکس آمینو اسید	203.73^{bc} ۲۰۳/۷۳^{bc}	81.1^{ad} ۸۱/۱^{ad}	56.6^{kj} ۵۶/۶^{kj}	1.85^{bf} ۱/۸۵^{bf}
	Acid Humic هیومیک اسید	156.1^{efg} ۱۵۶/۱^{efg}	55.3^{in} ۵۵/۳^{in}	64.27^{kl} ۶۴/۲۷^{kl}	1.85^{bf} ۱/۸۵^{bf}
	Yeast مخمر	161.73^{efg} ۱۶۱/۷۳^{efg}	73.76^{ai} ۷۳/۷۶^{ai}	113.13^{efg} ۱۱۳/۱۳^{efg}	2.02^{bc} ۲/۰۲^{bc}
	Sidrophore سیدروفور	162.2^{efg} ۱۶۲/۲^{efg}	86.8^{ab} ۸۶/۸^{ab}	155.2^{bc} ۱۵۵/۲^{bc}	21^{bcd} ۲۱^{bcd}
	Compost tea چای کمپوست	121.8^{ij} ۱۲۱/۸^{ij}	47.86^{lo} ۴۷/۸۶^{lo}	65.73^{jkl} ۶۵/۷۳^{jkl}	1.56^{ei} ۱/۵۶^{ei}
	Control کنترل	59.63^{i} ۵۹/۶۳^{i}	74.26^{ah} ۷۴/۲۶^{ah}	47.7l^{lo} ۴۷/۷۱^{lo}	1.09^{jl} ۱/۰۹^{jl}
RI	Azolla آزولا	168.73^{def} ۱۸۶/۷۳^{def}	65.8^{cl} ۶۵/۸^{cl}	176.3^{b} ۱۷۶/۳^{b}	1.5^{fl} ۱/۵^{fl}
	Bacteria باکتری	123.2^{ij} ۱۲۳/۲^{ij}	67.9^{ck} ۶۷/۹^{ck}	78.46^{gkl} ۷۸/۴۶^{gkl}	1.69^{ch} ۱/۶۹^{ch}
	Amino Acid Complex کمپلکس آمینو اسید	208.76^{bc} ۲۰۸/۷۶^{bc}	84.03^{abc} ۸۴/۰۳^{abc}	222.5^{a} ۲۲۲/۵^{a}	1.78^{cg} ۱/۷۸^{cg}
	Acid Humic هیومیک اسید	146.86^{fl} ۱۴۶/۸۶^{fl}	63.86^{dl} ۶۳/۸۶^{dl}	107.13^{fg} ۱۰۷/۱۳^{fg}	1.62^{ci} ۱/۶۲^{ci}
	Yeast مخمر	165.93^{def} ۱۶۵/۹۳^{def}	57.06^{gm} ۵۷/۰۶^{gm}	98.56^{gh} ۹۸/۵۶^{gh}	1.64^{di} ۱/۶۴^{di}
	Sidrophore سیدروفور	148.46^{fl} ۱۴۸/۴۶^{fl}	80.06^{ae} ۸۰/۰۶^{ae}	139.93^{cd} ۱۳۹/۹۳^{cd}	1.64^{ci} ۱/۶۴^{ci}
	Compost tea چای کمپوست	122.9^{ij} ۱۲۲/۹^{ij}	62.1^{el} ۶۲/۱^{el}	142.2^{c} ۱۴۲/۲^{c}	1.50^{fl} ۱/۵۰^{fl}
	Control کنترل	114.9^{jk} ۱۱۴/۹^{jk}	53.83^{jn} ۵۳/۸۳^{jn}	64.75^{jkl} ۶۴/۷۵^{jkl}	1.27^{lk} ۱/۲۷^{lk}

CONTROL (non mycorrhiza inoculatation)	Azolla آزولا	90.14^{k} ۹۰/۱۴^{k}	50.4^{kn} ۵۰/۴^{km}	68.6^{gkl} ۶۸/۶^{gkl}	1.54^{ei} ۱/۵۴^{ei}
	Bacteria باکتری	133.5^{gi} ۱۳۳/۵^{gi}	60.1^{fm} ۶۰/۱^{fm}	53.16^{kl} ۵۳/۱۶^{kl}	1.54^{ei} ۱/۵۴^{ei}
	Amino Acid Complex کمپلکس آمینو اسید	126.33^{hij} ۱۲۶/۳۳^{hij}	38.53^{nop} ۳۸/۵۳^{nop}	65.6^{l} ۶۵/۶^{l}	0.96^{kl} ۰/۹۶^{kl}
	Acid Humic هیومیک اسید	90.06^{k} ۹۰/۰۶^{k}	56.86^{gm} ۵۶/۸۶^{gm}	47.23^{ijk} ۴۷/۲۳^{ijk}	1.35^{ei} ۱/۳۵^{ei}
	Yeast مخمر	89.9^{k} ۸۹/۹^{k}	30.86^{op} ۳۰/۸۶^{op}	73.17^{jkl} ۷۳/۱۷^{jkl}	0.82^{l} ۰/۸۲^{l}
	Sidrophore سیدروفور	116.33^{jk} ۱۱۶/۳۳^{jk}	42.6^{mp} ۴۲/۶^{mp}	66.03^{jkl} ۶۶/۰۳^{jkl}	1.57^{hj} ۱/۵۷^{hj}
	Compost tea چای کمپوست	105.1^{jk} ۱۰۵/۱^{jk}	33.03^{op} ۳۳/۰۳^{op}	46.7^{l} ۴۶/۷^{l}	0.92^{kl} ۰/۹۲^{kl}
	Control کنترل	56.46^{i} ۵۶/۴۶^{i}	28.43^{op} ۲۸/۴۳^{op}	24.53^{m} ۲۴/۵۳^{m}	0.73^{l} ۰/۷۳^{l}

تیمارهایی که دارای حروف مشترک می‌باشند، در سطح یک درصد با یکدیگر اختلاف معنی‌دار ندارند.

Treatments by the same letter are not significantly different at P≤0.01

لی و همکاران[1](۴۸) در یک آزمایش گلخانه‌ای میزان جذب فسفر و عناصر غذایی کم‌مصرف Cu، Zn، Fe، Mn در گیاه ذرت را بررسی کردند که تحت تأثیر قارچ میکوریز آربوسکولار، غلظت آهن اندام هوایی گیاه، زمانی که عنصر غذایی کم‌مصرف افزوده نشده بود، افزایش‌یافته است. اما در سطوح بالای عناصر غذایی کم‌مصرف، غلظت آهن کاهش‌یافته است. آنان عنوان کردند که مقدار ریسه‌های تولیدشده در قارچ، تحت تأثیر برهمکنش فسفر و عناصر کم‌مصرف است. بالاترین مقدار ریسه در خاکی که میزان فسفر آن پایین بود و بدون افزودن عناصر غذایی کم‌مصرف به دست آمد درحالی‌که کمترین مقدار ریسه در مقادیر بالای فسفر و عناصر غذایی کم‌مصرف به دست آمد.

در پژوهش حاضر، بر اساس مقایسه میانگین تیمار باکتری بر جذب آهن اندام هوایی توأم با گونه قارچ *R. intraradices* در سطح یک درصد در مقایسه با شاهد معنی‌دار بود. در یک بررسی کاربرد توأم *Azospirillum* و *Azotobacter* باعث افزایش معنی‌دار آهن در ذرت شد (۴۹). کوهلر و همکاران[2](۵۰) گزارش کردند باکتری *Pseudomonas mendocina* و قارچ میکوریز آربوسکولار *R. intraradices* علاوه بر افزایش فعالیت آنزیم فسفاتاز، باعث افزایش آهن برگ کاهو شدند.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر اگرچه تمامی تیمارها اثرات متفاوتی بر کلونیزاسیون ریشه نشان دادند، اما تیمارهای آزولا، باکتری، هیومیک اسید و چای کمپوست بیشترین میزان کلونیزاسیون میکوریزی را نشان دادند. تیمارهای استفاده شده در آزمایش همراه با قارچ میکوریز توانست با افزایش میزان کلونیزاسیون بر فاکتورهای رویشی گیاه ذرت تأثیر مطلوب داشته باشد. نتایج کلی این آزمایش حاکی از افزایش غلظت عناصر توسط هر سه گونه‌ی قارچ میکوریز است و تاثیر این قارچ‌ها همراه با تیمارهای چای کمپوست،کمپلکس آمینواسید و سیدروفور در مقایسه با شاهد افزایش میزان کلونیزاسیون و میزان محتوای عنصر غذایی در اندام های هوایی را نشان می‌دهد.

1- Li *et al.*

2- Kohler *et al.*

References

1. Pedra, F., Polo, A., Ribeiro, A. and Domingues, H., 2007. Effects of municipal solid waste compost and sewage sludge on mineralization of soil organic matter. Soil biology and biochemistry, 39(6): 1375-1382.

2. Dhanapal, S. and Sekar, D.S., 2013. Humic acids and its role in plant tissue culture at low nutrient level. Journal of Academia and Industrial Research (JAIR), 2(6): 338.

3. S. Ranjan, S. Sow, S. R. Choudhury, S. Kumar, and M. Ghosh, 2020. Biofertilizer as a Novel Tool for Enhancing Soil Fertility and Crop Productivity: A Review. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 653–665.

4. Smith, S.E. and Read, D.J., 2010. Mycorrhizal symbiosis. Academic press.

5. Sylvia, D.M. and Williams, S.E., 1992. Vesicular- arbuscular mycorrhizae and environmental stress. Mycorrhizae in sustainable agriculture, 54: 101-124.

6. Sadhana, B., 2014. Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) as a biofertilizer-a review. Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci, 3(4): 384-400.

7. Frey- Klett, P., Garbaye, J. and Tarkka, M., 2007. The mycorrhiza helper bacteria revisited. New phytologist, 176(1): 22-36.

8. Arancon, N.Q., Edwards, C.A., Bierman, P., Metzger, J.D., Lee, S. and Welch, C., 2003. Effects of vermicomposts on growth and marketable fruits of field-grown tomatoes, peppers and strawberries: the 7th international symposium on earthworm ecology· Cardiff· Wales· 2002. Pedobiologia, 47(5-6): 731-735.

9. Fracchia, S., Godeas, A., Scervino, J.M., Sampedro, I., Ocampo, J.A. and Garcıa-Romera, I., 2003. Interaction between the soil yeast *Rhodotorula mucilaginosa* and the arbuscular mycorrhizal fungi *Glomus mosseae* and Gigaspora rosea. Soil Biology and Biochemistry, 35(5): 701-707.

10. De Caire, G.Z., De Cano, M.S., Palma, R.M. and De Mule, C.Z., 2000. Changes in soil enzyme activities following additions of cyanobacterial biomass and exopolysaccharide. Soil Biology and Biochemistry, 32(13): 1985-1987.

11. Kuwada, K., Wamocho, L.S., Utamura, M., Matsushita, I. and Ishii, T., 2006. Effect of red and green algal extracts on hyphal growth of arbuscular mycorrhizal fungi, and on mycorrhizal development and growth of papaya and passionfruit. Agronomy journal, 98(5): 1340-1344.

12. Wright, D. and Lenssen, A.W., 2013. Humic and fulvic acids and their potential in crop production.

13. Khoram, G.A., Rahimi, A. and Torabi, B., 2016. Effect of humic acid fertilizer application and foliar spraying of compost tea and vermiwash on growth indices of safflower (*Carthamus tinctorius* L.).

14. Briceño-Domínguez, D., Hernández-Carmona, G., Moyo, M., Stirk, W. and van Staden, J., 2014. Plant growth promoting activity of seaweed liquid extracts produced from Macrocystis pyrifera under different pH and temperature conditions. Journal of Applied Phycology, 26(5): 2203-2210.

15. Afsharmanesh, R., Rahimi, A., Torabi, B. and Akhgar, A., 2016. Effects of vermi compost and compost tea application on the growth criteria of corn (Zea mays). Iranian Journal of Field Crops Research, 14(1), pp.185-199.(in Persian with English abstract)

16. Phillips, J.M. and Hayman, D.S., 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. Transactions of the British mycological Society, 55(1): 158-161.

17. Biermann, B. and Linderman, R.G., 1981. Quantifying vesicular- arbuscular mycorrhizae: a proposed method towards standardization. New Phytologist, 87(1): 63-67.

18. Chapman, B.M., Jones, D.R. and Jung, R., 1983. Processes controlling metal ion attenuation in acid mine drainage streams. Geochimica et Cosmochimica Acta, 47(11): 1957-1973.

19. H.D. Chapman and P.F. Pratt, 1961. Methods of analysis for soils, plants and waters "University of California, Los Angeles, 60-61: 150-179

20. Matysiak, K. and Adamczewski, K., 2006. Influence of bioregulator Kelpak on yield of cereals and other crops., Prog. Plant Protection/Post. Ochr. Roślin, 46(2): 102-108.

21. Craigie, J.S., 2011. Seaweed extract stimuli in plant science and agriculture. Journal of applied phycology, 23(3): 371-393.

22. Khan, W., Rayirath, U.P., Subramanian, S., Jithesh, M.N., Rayorath, P., Hodges, D.M., Critchley, A.T., Craigie, J.S., Norrie, J. and Prithiviraj, B., 2009. Seaweed extracts as biostimulants of plant growth and development. Journal of Plant Growth Regulation, 28(4): 386-399.

23. Liu, C., Cooper, R.J. and Bowman, D.C., 1998. Humic acid application affects photosynthesis, root development, and nutrient content of creeping bentgrass. HortScience, 33(6): 1023-1025.

24. Haghighi, M. and Kafi, M., 2010. Effect of humic acid on the accumulation of cadmium, nitrate and changes of nitrate reductase activity in lettuce.

25. Gryndler, M., Hršelová, H., Sudová, R., Gryndlerová, H., Řezáčová, V. and Merhautová, V., 2005. Hyphal growth and mycorrhiza formation by the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus claroideum* BEG 23 is stimulated by humic substances. Mycorrhiza, 15(7): 483-488.

26. Nobre, C.P., Huertas, O.C.T., Tardin, J.R.F., Saggin Júnior, O.J., Fonseca, H.M.A.C. and Berbara, R.L.L., 2013. Biostimulation of inoculation with *Glomus proliferum* and application of humic acid in the in vitro growth of Lunularia cruciata. Acta Botanica Brasilica, 27: 773-778.

27. Parida, A.K. and Das, A.B., 2005. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. Ecotoxicology and environmental safety, 60(3): 324-349.

28. Pant, A.P., Radovich, T.J., Hue, N.V. and Paull, R.E., 2012. Biochemical properties of compost tea associated with compost quality and effects on pak choi growth. Scientia horticulturae, 148: 138-146.

29. Zachmann, J.E. and Linden, D.R., 1989. Earthworm effects on corn residue breakdown and infiltration. Soil Science Society of America Journal, 53(6): 1846-1849.

30. Jack, A.L. and Thies, J.E., 2006. Compost and vermicompost as amendments promoting soil health. Biological approaches to sustainable soil systems, pp.453-466.

31. Cavender, N.D., Atiyeh, R.M. and Knee, M., 2003. Vermicompost stimulates mycorrhizal colonization of roots of Sorghum bicolor at the expense of plant growth. Pedobiologia, 47(1): 85-89.

32. Krishna, K.R. and Bagyaraj, D.J., 1984. Phenols in mycorrhizal roots of Arachis hypogaea. Experientia, 40(1): 85-86.

33. Ferrol, N., Azcón-Aguilar, C. and Pérez-Tienda, J., 2019. Arbuscular mycorrhizas as key players in sustainable plant phosphorus acquisition: An overview on the mechanisms involved. Plant Science, 280: 441-447.

34. Hu, Y. and Schmidhalter, U., 2005. Drought and salinity: a comparison of their effects on mineral nutrition of plants. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 168(4): 541-549.

35. Cui, M. and Caldwell, M.M., 1996. Facilitation of plant phosphate acquisition by arbuscular mycorrhizas from enriched soil patches: II. Hyphae exploiting root- free soil. New Phytologist, 133(3): 461-467.

36. Tarafdar, J.C. and Marschner, H., 1994. Phosphatase activity in the rhizosphere and hyphosphere of VA mycorrhizal wheat supplied with inorganic and organic phosphorus. Soil Biology and Biochemistry, 26(3), pp.387-395.

37. Loveland, P. and Webb, J., 2003. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review. Soil and Tillage research, 70(1): 1-18.

38. Gutiérrez-Miceli, F.A., García-Gómez, R.C., Rosales, R.R., Abud-Archila, M., Angela, O.L.M., Cruz, M.J.G. and Dendooven, L., 2008. Formulation of a liquid fertilizer for sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) using vermicompost leachate. Bioresource technology, 99(14): 6174-6180.

39. Pant, A.P., Radovich, T.J., Hue, N.V., Talcott, S.T. and Krenek, K.A., 2009. Vermicompost extracts influence growth, mineral nutrients, phytonutrients and antioxidant activity in pak choi (*Brassica rapa* cv. Bonsai, Chinensis group) grown under vermicompost and chemical fertiliser. Journal of the Science of Food and Agriculture, 89(14): 2383-2392.

40. Cairney, J.W.G. and Ashford, A.E., 1989. Reducing activity at the root surface in Eucalyptus pilularis–Pisolithus tinctorius ectomycorrhizas. Functional Plant Biology, 16(1): 99-105.

41. Bahrami, S., Ahmadi, M.A. and Hoseini, F.J., 2013. The effect of ectomycorrhiza and excess Mg on the growth and Ca, Mg, K, P, Fe, Na, Zn, Cu, Mn contents in Pistachio var. Fandoghy. Iranian journal of biology, 26(1): 70-81. (in Persian with English abstract)

42. Neilands, J.B., 1981. Iron absorption and transport in microorganisms. Annual review of nutrition, 1(1): 27-46.

43. Schmidt, W., Thomine, S. and Buckhout, T.J., 2020. Iron nutrition and interactions in plants. Frontiers in plant science, 10: 1670.

44. Shao, J.F., Yamaji, N., Shen, R.F. and Ma, J.F., 2017. The key to Mn homeostasis in plants: regulation of Mn transporters. Trends in Plant Science, 22(3): 215-224.

45. Faber, B.A., Zasoski, R.J., Burau, R.G. and Uriu, K., 1990. Zinc uptake by corn as affected by vesicular-arbuscular mycorrhizae. Plant and Soil, 129(2): 121-130.

46. Dutt, S., Sharma, S.D. and Kumar, P., 2013. Arbuscular mycorrhizas and Zn fertilization modify growth and physiological behavior of apricot (*Prunus armeniaca* L.). Scientia Horticulturae, 155: 97-104.

47. Grant, C.A., Flaten, D.N., Tomasiewicz, D.J. and Sheppard, S.C., 2001. The importance of early season phosphorus nutrition. Canadian Journal of Plant Science, 81(2): 211-224.

48. Li, L., Staden, J.V. and Jäger, A.K., 1998. Effects of plant growth regulators on the antioxidant system in seedlings of two maize cultivars subjected to water stress. Plant Growth Regulation, 25(2): 81-87.

49. Biari, A. Gholami, and H. A. Rahmani. 2008. Growth promotion and enhanced nutrient uptake of Maize (Zea mays L.) by application of plant growth promoting rhizobacteria in arid region of Iran. Journal of Biological Sciences, 8 (6): 1015–1020.

50. Kohler, J., Caravaca, F., Carrasco, L. and Roldan, A., 2007. Interactions between a plant growth-promoting rhizobacterium, an AM fungus and a phosphate-solubilising fungus in the rhizosphere of *Lactuca sativa*. Applied Soil Ecology, 35(3): 480-487.

© 2021 by the authors. Licensee SCU, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)