

اثر کاربرد کود زیستی مایکوروت بر کمیت و کیفیت اسانس *Thymus vulgaris* L. در کشت مخلوط با *Cicer arietinum* L.

مهديه احمدوند^۱، عبدالله جوانمرد^{۲*}، محمد حقانی نیا^۳ و محمدرضا مرشدلو^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آگرواکولوژی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

۲- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

پست الکترونیک: a.javanmard@maragheh.ac.ir

۳- دانشجوی دکترای آگروتکنولوژی- آکولوژی گیاهان زراعی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

۴- دانشیار، گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

تاریخ پذیرش: اسفند ۱۴۰۰

تاریخ اصلاح نهایی: اسفند ۱۴۰۰

تاریخ دریافت: آبان ۱۴۰۰

چکیده

سیستم‌های کشت مخلوط و کاربرد کودهای زیستی نقش بسزایی در بهبود کمیت و کیفیت محصولات دارند. در این راستا، پژوهشی برای ارزیابی اثر کود زیستی مایکوروت بر صفات کمی و کیفی آویشن باغی (*Thymus vulgaris* L.) در کشت مخلوط با نخود زراعی (*Cicer arietinum* L.)، به صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی در دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه در سال زراعی ۱۳۹۹ اجرا شد. تیمارها شامل کشت خالص آویشن، کشت خالص آویشن تلقیح شده با قارچ، کشت خالص نخود، کشت خالص نخود تلقیح شده با قارچ، کشت مخلوط یک ردیف نخود + یک ردیف آویشن (۱:۱)، الگوی کشت ۱:۱ تلقیح شده با قارچ، کشت دو ردیف نخود + یک ردیف آویشن (۲:۱) و الگوی کشت ۲:۱ تلقیح شده با قارچ بودند. نتایج نشان داد، بیشترین عملکرد دانه (۷۵۱/۴۰ کیلوگرم در هکتار) و عملکرد بیولوژیک (۱۶۴۵/۶ کیلوگرم در هکتار) نخود در کشت خالص نخود با کاربرد قارچ میکوریزا حاصل شد که تفاوت معنی داری با تیمار ۲:۱ با مصرف میکوریزا نداشت. علاوه بر این، بیشترین عملکرد ماده خشک آویشن (۱۸۹/۴۷ گرم در مترمربع) نیز به کشت خالص با کاربرد قارچ میکوریزا تعلق داشت. همچنین، بیشترین درصد (۱/۶۹٪) و عملکرد اسانس (۳/۳۱ گرم در مترمربع) در الگوی کشت مخلوط ۱:۱ تلقیح شده با قارچ میکوریزا در چین اول بدست آمد. براساس آنالیز شیمیایی اسانس تیمول، گاما-تریپنن و پارا-سیمن ترکیب‌های غالب اسانس بودند. بیشترین درصد تیمول و گاما-تریپنن در الگوی کشت مخلوط ۱:۱ تلقیح شده با میکوریزا حاصل شد. همچنین بیشترین مقادیر شاخص‌های زراعی (نسبت برابری زمین، نسبت برابر سطح زیرکشت و زمان، نسبت برابر سطح برداشت و کارایی استفاده از زمین) و شاخص‌های اقتصادی (سودمندی کشت، سودمندی اقتصادی کشت مخلوط و شاخص بهره‌وری سیستم) به ترتیب در الگوهای کشت ۲:۱ و ۱:۱ همراه با کاربرد کود زیستی مایکوروت بدست آمد. به طور کلی نتایج نشان داد که کود زیستی مایکوروت در کشت مخلوط به ویژه در الگوی کشت ۱:۱ به بهبود کمیت و کیفیت اسانس آویشن باغی منجر شد.

واژه‌های کلیدی: تیمول، کشاورزی پایدار، کود زیستی، درصد اسانس، عملکرد دانه.

مقدمه

امروزه با توجه به اهمیت حفظ سلامتی و مشخص شدن عوارض جانبی داروهای شیمیایی، گیاهان دارویی به عنوان گزینه‌ای ارزشمند برای جانشینی آنتی‌بیوتیک‌های شیمیایی محسوب می‌شوند (Sharma et al., 2020). از این رو، تولید گیاهان دارویی و فرآورده‌های حاصل از آن روندی افزایشی داشته، زیرا این گیاهان دارای متابولیت‌های ثانویه مفیدی بوده و در ترکیب‌های آنها خواص زیست‌فعال و بیوشیمیایی زیادی وجود دارد که در صنایع مختلف دارویی، شیمیایی، آرایشی و غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Sharma et al., 2020). یکی از گیاهان دارویی باارزش، آویشن باغی (*Thymus vulgaris* L.) است. این گیاه متعلق به خانواده نعناعیان (Lamiaceae) و دارای ساختار بوته‌ای، ساقه مستقیم، علفی یا چوبی و چندساله می‌باشد که ارتفاع آن با توجه به شرایط اقلیمی بین ۲۰ تا ۵۰ سانتی‌متر متفاوت است (Shmeit et al., 2020). اسانس آویشن باغی نه تنها در صنایع غذایی کاربرد زیادی دارد، بلکه یک آنتی‌بیوتیک قوی بوده و ترکیب‌های موجود در آن دارای خواص ضدعفونی‌کننده، خلط‌آور، ضد میکروب، ضد قارچ و ضد انگل هستند. همچنین در درمان سرفه، برونشیت، گلودرد، به عنوان ضدنفخ، تقویت‌کننده دستگاه هاضمه و آرام‌بخش بکار می‌رود (Oliviero et al., 2016). مهمترین ترکیب‌های اسانس آویشن شامل تیمول، کارواکرول، گاما-ترینن و پارا-سیمن می‌باشد. فعالیت‌های ضد باکتریایی اسانس آن به علت داشتن وجود گروه‌های هیدروکسیل در تیمول و کارواکرول و شرکت کردن گروه هیدروکسیل در تشکیل پیوندهای هیدروژنی است (Golubkina et al., 2020).

نخود زراعی با نام علمی *Cicer arietinum* L. گیاهی دو لپه، یک‌ساله و مهمترین گیاه خانواده حبوبات (Leguminosae) است که نقش مهمی در رفع کمبود پروتئین دارد (Kaur & Prasad, 2021). در سال ۱۳۹۸ سطح زیرکشت نخود در کشور ۵۷۹۳۲۶ هزار هکتار و با تولید ۲۸۵۷۵۹ تن و متوسط عملکرد ۹۹۸ کیلوگرم در هکتار بوده است. این گیاه با توانایی تثبیت نیتروژن جوی از طریق

همزیستی با باکتری ریزوبیوم می‌تواند منجر به کاهش مصرف کود نیتروژن شده و باعث بهبود ساختمان و تهویه خاک، کاهش فرسایش و افزایش حاصلخیزی خاک گردد (Semba et al., 2021). نخود حاوی اسیدهای آمینه ضروری مانند آرژنین، لوسین، ایزولوسین، لایسین، والین، ترئونین، میتونین و سیستئین، فنیل‌آلانین و تیروزین می‌باشد. این گیاه با داشتن ۲۴٪ پروتئین، نزدیک به ۱/۶ میلیون تن از پروتئین تولید شده در جهان را به خود اختصاص داده که نقش مؤثری در تأمین جیره غذایی انسان و تغذیه دام دارد (Kaur & Prasad, 2021).

کاربرد روزافزون کودهای شیمیایی در سطح زیاد و به مدت طولانی آثار زیان‌باری به همراه داشته، به طوری که امروزه روند رو به افزایش تخریب منابع، آشکار شدن پیامدهای زیست محیطی و عدم دستیابی به ثبات اقتصادی، علوم کشاورزی را به سمت استفاده از کشاورزی پایدار در بوم‌نظام‌های زراعی سوق داده است (Madawala, 2021). کاربرد کودهای بیولوژیکی راهکار مطلوب برای غلبه بر این مشکلات و گام مهمی در جهت نیل به اهداف کشاورزی پایدار می‌باشد (Amani Machiani et al., 2021). از جمله این کودها می‌توان به قارچ‌های میکوریزا آرباسکولار اشاره کرد که قادرند با ایجاد یک شبکه گسترده، سطح ویژه مؤثر ریشه‌ها را افزایش و امکان دسترسی به حجم وسیعی از خاک را نسبت به ریشه گیاهانی که با قارچ میکوریزا کلونیزه نشده‌اند، فراهم کنند (Assis et al., 2020). براساس تحقیقات پیشین، قارچ‌های میکوریزا منجر به تغییرات قابل توجهی در کمیت و کیفیت متابولیت‌های ثانویه می‌شوند (Merlin et al., 2020). Almeida و همکاران (۲۰۲۰) در ارزیابی همزیستی قارچ میکوریزا با گیاه بابونه آلمانی (*Matricaria chamomilla* L.) دریافتند که قارچ میکوریزا موجب افزایش عملکرد ماده خشک، بهبود عملکرد اسانس و ترکیب‌های اسانس شد. نتایج Amani Machiani و همکاران (۲۰۲۱) نیز نشان داد که تلقیح با قارچ میکوریزا منجر به افزایش کمیت و کیفیت اسانس آویشن باغی (*Thymus vulgaris* L.) گردید، به طوری که اسانس آویشن

Rhizophagus intraradices Funneliformis mosseae) و *Claroideoglobus etunicatum*) بر کمیت و کیفیت اسانس آویشن باغی (*Thymus vulgaris* L.) و برخی صفات نخود زراعی (*Cicer arietinum* L.) در کشت مخلوط اجرا شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و شش تیمار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه با ارتفاع از سطح دریا ۱۴۷۷ متر، طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۱۶ دقیقه شرقی و عرض ۳۷ درجه و ۲۴ دقیقه شمالی در سال زراعی ۱۳۹۹ اجرا شد. تیمارها شامل کشت خالص آویشن، کشت خالص آویشن تلقیح شده با قارچ، کشت نخود، کشت خالص نخود تلقیح شده با قارچ، کشت مخلوط یک ردیف نخود + یک ردیف آویشن (۱:۱)، الگوی کشت ۱:۱ تلقیح شده با قارچ، کشت دو ردیف نخود + یک ردیف آویشن (۲:۱) و الگوی کشت ۲:۱ تلقیح شده با قارچ بودند. هر کرت شامل ۱۰ خط کاشت به طول چهار متر با فواصل ردیفی ۴۰ سانتی‌متر و فاصله روی ردیف ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. کود زیستی مورد استفاده در این تحقیق با نام تجاری مایکوروت که ترکیبی از سه گونه *Funneliformis* *Rhizophagus intraradices mosseae* و *Claroideoglobus etunicatum* بود از شرکت زیست‌فناور پیشتاز واریان تهیه گردید. قبل از کاشت از خاکی که حاوی هیف‌های قارچ میکوریزا، بقایای ریشه و اسپور بود، در داخل خطوط کاشت و زیر نشاءها به مقدار ۱۰۰ گرم در هر کرت استفاده شد. به منظور آماده‌سازی زمین برای کاشت، در اوایل پاییز ۱۳۹۸ شخم نیمه عمیق توسط گاواهن برگردان‌دار انجام و در بهار، بعد از شخم سطحی، برای نرم کردن خاک از دو نوبت دیسک عمود بر هم استفاده شد. پیش از اجرای آزمایش، سه نمونه خاک

نسبت به عدم مصرف ۵/۸٪ افزایش یافت. آنان بیان کردند که بالاترین میزان ارتفاع بوته، قطر کانوی و عملکرد ماده خشک آویشن با کاربرد قارچ میکوریزا بدست آمد. از آنجا که مصرف مواد شیمیایی روی کمیت و کیفیت ترکیب‌های مؤثره گیاهان دارویی اثرهای منفی دارد، بهره‌گیری از اصول اکولوژیک مانند کشت مخلوط به‌عنوان یک راهکار مهم علمی و اقتصادی در مدیریت تولید گیاهان دارویی موضوعی ضروریست (Weisany et al., 2021). استفاده از لگوم‌ها در کشت مخلوط، به‌عنوان یک روش مؤثر برای جبران محدودیت‌های ناشی از کمبود نیتروژن در خاک و افزایش تولید مورد توجه قرار گرفته‌اند (Raza et al., 2021). کشت مخلوط موجب استفاده کارآمد از منابع محیطی، حاصلخیزی خاک، کاهش مصرف سموم و کودها، افزایش تنوع و تولید در واحد سطح نسبت به کشت خالص می‌گردد (Zhou et al., 2021). تحقیقات نشان داده که کشت مخلوط می‌تواند سبب بهبود کمیت و کیفیت گیاهان دارویی گردد (Weisany et al., 2021). عملکرد و ترکیب‌های اسانس گشنیز (*Coriandrum sativum*) تحت تأثیر الگوهای کشت مخلوط با سویا و قارچ *Glomus intraradices* قرار گرفت. به‌طوری که ترکیب‌های limonene, coriander ether, apiole, myristicin و n-dihydrocarvone در نتیجه تلقیح با قارچ میکوریز و کشت مخلوط افزایش معنی‌داری پیدا کردند ولی قارچ *Glomus intraradices* ترکیب‌های cis-sabinol و phytol اسانس گشنیز را در کشت‌های خالص و مخلوط کاهش داد (Weisany et al., 2021). همچنین درصد و عملکرد اسانس، میزان فنل و درصد آنتی‌اکسیدان زرین گیاه (*Dracocephalum kotschy* Boiss.) در کشت مخلوط با لوبیا معمولی افزایش یافت (Hosseini & Hamzei, 2021).

با توجه به تفکر کشاورزی پایدار بر لزوم استفاده از کودهای زیستی و اهمیت تولید آویشن و نخود در تأمین بخش قابل توجهی از نیاز غذایی، پروتئینی و دارویی کشور، پژوهشی با هدف ارزیابی اثر کود زیستی مایکوروت

به صورت تصادفی از قسمت‌های مختلف محل اجرای آزمایش انتخاب و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن اندازه‌گیری گردید (جدول ۱).

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 1. Physical and chemical properties of the experimental soil

Soil texture	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Organic matter (g.kg ⁻¹)	EC (dS.m ⁻¹)	pH	Field capacity (%)	Exchangeable potassium (mg.kg ⁻¹)	Available phosphorus (mg.kg ⁻¹)	Total nitrogen (g.kg ⁻¹)
clay loam	56	16.5	27.5	0.63	1.18	8.16	27.1	570.85	7.39	0.89

خطوط میانی با حذف اثرهای حاشیه‌ای انجام گردید. علاوه بر این، برداشت آویشن در زمان گلدهی و در دو چین (۱۵ تیر و ۱۵ مهرماه) انجام شد. پس از تعیین وزن تر بوته‌های برداشت شده، آنها را در محیط سایه تا ثابت شدن وزن نگهداری و بعد عملکرد ماده خشک گیاهان محاسبه شد. برای استخراج اسانس نمونه‌های آویشن، از کلونجر استفاده شد. اسانس‌گیری به مدت سه ساعت از اندام‌های هوایی آویشن انجام شد. اسانس‌های استخراج شده با سولفات سدیم خشک آب‌گیری و داخل ویال شیشه‌ای در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد تا زمان آنالیز نگهداری شد. بعد از اسانس‌گیری، درصد و عملکرد اسانس طبق روابط زیر محاسبه گردید.

بر اساس نتایج آنالیز خاک ۶۵ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات تریپل قبل از کاشت و ۴۵ کیلوگرم در هکتار اوره به صورت سرک (به عنوان نیتروژن استارتر) به خاک اضافه شد. نشاءهای آویشن و بذرهای نخود در یازدهم فروردین‌ماه در عمق پنج سانتی‌متری خاک کاشته شدند. مبارزه با علف‌های هرز به صورت منظم و به طور دستی انجام شد. قبل از برداشت نخود، ۱۰ بوته از هر کرت به طور تصادفی برای اندازه‌گیری ارتفاع بوته، تعداد غلاف در بوته، دانه در غلاف، دانه در بوته و وزن صد دانه انتخاب شدند. همچنین در مرحله گلدهی نخود، از هر کرت ریشه ۱۰ بوته به طور کامل از خاک خارج و تعداد و وزن خشک گره‌ها تعیین شد. برداشت نهایی نیز در مساحتی برابر ۲ مترمربع از

رابطه ۱ $100 \times (\text{وزن خشک نمونه } 40 \text{ گرم}) / \text{وزن اسانس} = \text{درصد اسانس}$

رابطه ۲ $\text{درصد اسانس} \times \text{ماده خشک کل (گرم در مترمربع)} = \text{عملکرد اسانس}$

پس از آن به تدریج دما با سرعت ۳ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه افزایش یافت تا به دمای ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد رسید. سپس به مدت ۲۰ دقیقه در این دما نگهداری شد. هلیوم به عنوان گاز حامل با سرعت جریان یک میلی‌لیتر بر دقیقه استفاده شد. ولتاژ یونیزاسیون ۷۰ الکترون ولت، روش یونیزاسیون EI و دمای یونیزاسیون ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد بود. محفظه تزریق در حالت تقسیم (نسبت تقسیم ۱:۳۰) تنظیم شد و محدوده جذب جرمی از ۴۰ تا ۴۰۰ m/z بود.

شناسایی ترکیب‌های اسانس

برای شناسایی ترکیب‌های اسانس از دستگاه کروماتوگرافی گازی متصل شده به طیف‌سنجی جرمی (GC/MS) مدل Agilent 5977A ساخت کشور آمریکا، با ستون HP-5 MS (۵٪ فیل متیل پلی سیلوکسان، به طول ۳۰ متر، قطر داخلی ۰/۲۵ میلی‌متر و ضخامت ماده جاذب ۰/۲۵ میکرومتر) استفاده شد. برای برنامه‌ریزی دمایی آون، ابتدا دما در عرض ۵ دقیقه به ۶۰ درجه سانتی‌گراد رسید،

زمان بازداری آنها با زمان بازداری استانداردهای خالص (تیمول، سیمن و ترپینن) تزریق شده انجام گردید. علاوه بر این، برای ارزیابی کشت مخلوط نسبت به کشت خالص، از شاخص‌های نسبت برابری زمین (LER: Land Equivalent Ratio)، نسبت برابر سطح زیرکشت و زمان (ATER: Area Time Equivalent Ratio)، نسبت برابر سطح برداشت (AHER: Area Harvest Equivalent Ratio)، کارایی استفاده از زمین (LUE: Land Utilization Ratio System)، شاخص بهره‌وری سیستم (SPI: System Efficiency Index)، سودمندی کشت مخلوط (IA: Intercropping advantage)، و شاخص برتری مالی کشت مخلوط (MAI: Monetary advantage intercropping) استفاده شد.

نسبت برابری زمین براساس سطح زیر کشت محاسبه می‌گردد و توسط آن مشخص می‌شود که برای بدست آوردن محصول حاصل از یک هکتار کشت مخلوط، چه مقدار زمین به صورت کشت خالص نیاز است تا همان مقدار محصول برداشت شود (Gitari et al., 2020).

$$LER = (Y_{ti}/Y_{tm}) + (Y_{si}/Y_{sm})$$

زیرکشت و زمان بیانگر کارایی تبدیل انرژی نورانی به شیمیایی بر حسب واحد زمان و سطح زیر کشت می‌باشد (Gitari et al., 2020).

$$ATER = (Y_{ti}/Y_{tm} \times t_i) + (Y_{si}/Y_{sm} \times t_s)/t$$

برای نشان دادن کارایی یا بازده مصرف منابع محیطی که به صورت زیر محاسبه شد (Gitari et al., 2020).

$$AHER = (Y_{ti}/Y_{tm} \times n_i) + (Y_{si}/Y_{sm} \times n_i)$$

برای محاسبه شاخص بازداری پیک‌ها، مخلوطی از هیدروکربن‌های آلیفاتیک (C8-C40) تحت شرایط تحلیلی بالا به دستگاه GC تزریق گردید و از نرم‌افزار Chemstation استفاده شد. محاسبه و شناسایی ترکیب‌های اسانس به وسیله شاخص‌های بازداری خطی آنها و مقایسه آن با شاخص‌های موجود در کتاب مرجع (Adams, 2007) و با استفاده از طیف‌های جرمی ترکیب‌های استاندارد و استفاده از اطلاعات موجود در کتابخانه رایانه‌ای انجام شد. برای جداسازی ترکیب‌ها، از دستگاه کروماتوگرافی گازی مدل Agilent 7990B ساخت کشور آمریکا با آشکارساز یونیزاسیون شعله‌ای (FID) و ستون VF-5MS استفاده شد. دمای تزریق و آشکارساز به ترتیب روی ۲۳۰ و ۲۴۰ سانتی‌گراد تنظیم شده بودند. گاز هلیوم با سرعت جریان یک میلی‌لیتر بر دقیقه و نسبت تقسیم ۱:۲۴ استفاده شده بود. نمونه‌های اسانس به نسبت ۱:۱۰۰ در هگزان رقیق‌سازی و به میزان ۱ میکرولیتر تزریق شدند. کمی کردن ترکیب‌های اسانس با استفاده از نرمال‌سازی سطح پیک و بدون استفاده از ضرایب اصلاح انجام شد (Morshedloo et al., 2018). در نهایت، شناسایی ترکیب‌های اصلی اسانس با مقایسه

رابطه ۳

در این رابطه، Y_{si} و Y_{ti} به ترتیب عملکرد آویشن و نخود در کشت مخلوط و Y_{sm} و Y_{tm} به ترتیب عملکرد آویشن و نخود در کشت خالص است. نسبت برابر سطح

رابطه ۴

در این رابطه، t_i طول دوره رشد آویشن، t_s طول دوره رشد نخود و t طول دوره رشد در کشت مخلوط می‌باشد. علاوه بر این، نسبت برابر سطح برداشت شاخصی است

رابطه ۵

واقعی و ATER کمتر از عدد حقیقی سودمندی کشت مخلوط را نشان می‌دهد، پس بهتر است میانگین این دو شاخص برای ارزیابی کشت مخلوط استفاده گردد (Yilmaz *et al.*, 2015).

$$\text{LUE (\%)} = [(\text{LER} + \text{ATER}) / 2] \times 100$$

سودمندی مالی استفاده شد (Gitari; Yilmaz *et al.*, 2015, 2020).

$$\text{SPI} = (\text{Y}_{\text{sm}} / \text{Y}_{\text{tm}}) \text{Y}_{\text{ti}} + \text{Y}_{\text{si}}$$

$$\text{IA} = \text{IA}_t + \text{IA}_s$$

$$\text{IA}_t = \text{AYL}_t \times \text{P}_t$$

$$\text{IA}_s = \text{AYL}_s \times \text{P}_s$$

$$\text{MAI} = (\text{Y}_{\text{ti}} \times \text{P}_t + \text{Y}_{\text{si}} \times \text{P}_s) \times (\text{LER} - 1 / \text{LER})$$

آمد که تفاوت معنی‌داری با کشت خالص نخود و الگوی ۱:۱ با کاربرد میکوروت نداشت (جدول ۳). به‌طور میانگین کاربرد میکوروت منجر به افزایش ۴۴ درصدی ارتفاع بوته نخود در همه تیمارها نسبت به عدم مصرف آن شد. همچنین کمترین ارتفاع بوته نخود (۲۹/۴۴ سانتی‌متر) به کشت خالص نخود بدون کاربرد میکوروت تعلق داشت (جدول ۳).

تعداد غلاف در بوته، دانه در غلاف و دانه در بوته نخود

نتایج حاصل (جدول ۲) حکایت از آن داشت که تعداد غلاف در بوته، دانه در غلاف و تعداد دانه در بوته نخود در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بود. به‌طوری که بیشترین تعداد غلاف در بوته (۱۶/۳۲) در کشت خالص نخود با مصرف میکوروت بدست آمد که تفاوت معنی‌داری با الگوهای کشت ۱:۱ و ۱:۲ تلقیح شده با میکوروت نداشت. همچنین کمترین تعداد غلاف در بوته (۹/۷۶) به الگوی کشت ۱:۱ بدون کاربرد میکوروت تعلق داشت. بیشترین تعداد دانه در

نتیجه بیانگر این است که در طول دوره کشت مخلوط چند بار می‌توان گیاه را به‌صورت خالص کاشت یا برداشت کرد. کارایی استفاده از زمین، از طریق دو شاخص LER و ATER محاسبه شد. به‌دلیل اینکه LER بیش از اندازه

رابطه ۶

همچنین برای تعیین سودمندی اقتصادی از شاخص‌های بهره‌وری سیستم کشت مخلوط، سودمندی کشت مخلوط و

رابطه ۷

رابطه ۸

رابطه ۹

SPI, IA, IA_t, IA_s, AYL_t, AYL_s, MAI, P_t و P_s به‌ترتیب شاخص بهره‌وری سیستم، شاخص سودمندی کشت مخلوط، سودمندی کشت مخلوط آویشن، سودمندی کشت مخلوط نخود، شاخص برتری مالی مخلوط و قیمت محصول آویشن و نخود هستند. در نهایت پس از اطمینان از نرمال بودن داده‌ها، تجزیه واریانس توسط نرم‌افزار آماری SAS (9.2) و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ انجام شد.

نتایج

صفات نخود

ارتفاع

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) بیانگر تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ بین تیمارهای مختلف از لحاظ ارتفاع بوته نخود است. بیشترین ارتفاع بوته نخود (۴۳/۲۲ سانتی‌متر) در تیمار ۲:۱ با کاربرد قارچ‌های میکوریزا بدست

درصدی تعداد گره نخود نسبت به عدم کاربرد قارچ شد.

عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) بیانگر این است که اثر تیمارهای مختلف بر عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه نخود در سطح احتمال ۱٪ معنی دار گردید. بیشترین عملکرد بیولوژیک (۱۶۴۵/۶ کیلوگرم در هکتار) و بیشترین عملکرد دانه (۷۵۱/۴۰ کیلوگرم در هکتار) در کشت خالص نخود با کاربرد مایکوروت حاصل شد که تفاوت معنی داری با الگوی کشت ۲:۱ تلقیح شده با قارچ نداشت (جدول ۳). همچنین، نتایج نشان داد براساس میانگین کلیه تیمارها، کاربرد قارچ میکوریزا موجب افزایش ۲۸ درصدی عملکرد دانه و ۱۵ درصدی عملکرد بیولوژیک نخود نسبت به عدم مصرف آن شد. همچنین، کمترین عملکرد بیولوژیک (۱۲۹۵/۷۹ کیلوگرم در هکتار) و عملکرد دانه نخود (۴۶۶/۷۹ کیلوگرم در هکتار) به الگوی کشت ۱:۱ بدون مصرف مایکوروت مربوط بود (جدول ۳).

شاخص برداشت

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان دهنده اثر معنی دار تیمارها در سطح احتمال ۵٪ بر شاخص برداشت نخود بود. بیشترین شاخص برداشت (۴۵/۶۴٪) به کشت خالص نخود با مصرف مایکوروت مربوط بود که تفاوت معنی داری با الگوهای کشت ۲:۱ + مایکوروت و کشت خالص نخود بدون مصرف قارچ نداشت (جدول ۳). همچنین کمترین شاخص برداشت (۳۶/۰۳٪) در الگوی کشت ۱:۱ بدون کاربرد مایکوروت مشاهده شد (جدول ۳).

غللاف (۱/۳۱) و بیشترین تعداد دانه در بوته (۲۱/۴۶) نیز به کشت خالص نخود با مصرف مایکوروت مربوط بود (جدول ۳). کمترین دانه در غلاف (۰/۹۲) و دانه در بوته (۸/۹۸) نخود هم در الگوی کشت ۱:۱ بدون مصرف مایکوروت مشاهده شد (جدول ۳).

وزن صد دانه

با توجه به تجزیه واریانس (جدول ۲)، وزن صد دانه نخود در سطح احتمال ۱٪ معنی دار شد. بیشترین (۵۲ گرم) وزن صد دانه در کشت خالص نخود با کاربرد مایکوروت بدست آمد که تفاوت معنی داری با الگوهای کشت ۱:۱ و ۲:۱ تلقیح شده نداشت (جدول ۳). به طور کلی کاربرد مایکوروت موجب افزایش ۱۱/۸ درصدی وزن صد دانه نخود نسبت به عدم کاربرد آن شد. کمترین وزن صد دانه نخود (۴۴/۶۷ گرم) هم به الگوی کشت ۱:۱ بدون کاربرد مایکوروت مربوط بود (جدول ۳).

تعداد گره و وزن خشک گره

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای مختلف بر تعداد گره و وزن خشک گره نخود در سطح احتمال ۱٪ معنی دار شد (جدول ۲). بیشترین تعداد گره (۲۶/۰۸) و وزن خشک گره (۰/۶۲ گرم در مترمربع) در تیمار ۲:۱ با کاربرد مایکوروت حاصل شد (جدول ۳). همچنین کمترین تعداد گره (۱۷/۹۶) و کمترین وزن خشک گره (۰/۲۶) به کشت خالص نخود تلقیح نشده تعلق داشت (جدول ۳). علاوه بر این، نتایج بیانگر آن بود که قارچهای میکوریزا موجب افزایش ۴۳/۵ درصدی وزن خشک گره و ۲۱/۶

جدول ۲- تجزیه واریانس برخی صفات ارزیابی شده در نخود

Table 2. ANOVA of some properties evaluated in *Cicer arietinum*

Source of variations	df	Mean squares									
		Plant height	Number of pods per plant	Number of seed pods per plant	Number of seeds per plant	100-seed weight	Number of nodules	Nodule weight	Seed yield	Biological yield	Harvest index
Replication	2	18.79 ^{ns}	1.03 ^{ns}	0.0027 ^{ns}	2.78 ^{ns}	3442.02 ^{ns}	9.94 ^{ns}	0.03 ^{ns}	25083.92 ^{ns}	725.34 ^{ns}	92.43
Treatment	5	153.17 ^{**}	19.36 ^{**}	0.07 ^{**}	69.49 ^{**}	28.76 ^{**}	26.17 ^{**}	0.06 ^{**}	30431.71 ^{**}	50496.31 ^{**}	3441 [*]
Error	10	10.35	103.67	0.39	1.07	1.46	1.89	0.0004	2556.30	2313.11	9.79
C.V. (%)		8.93	5.20	5.75	7.09	2.49	6.32	4.91	8.29	3.29	7.66

ns, *, and **: not significant and significant at 5 and 1% probability levels, respectively.

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف بر صفات مورفوفیزیولوژیک نخود

Table 3. Means comparison of different treatments effects on morphophysiological traits of *Cicer arietinum*

Treatments	Plant Height (cm)	Number of pods per plant	Number of seed pods per plant	Number of seeds per plant	100-grain weight (g)	Number of nodules	Nodule weight (g)	Seed yield (kg.ha ⁻¹)	Biological yield (kg.ha ⁻¹)	Harvest index (%)
Monoculture	29.44b	12.04c	0.95d	11.44d	45.85b	17.96d	0.26e	585.09c	1462.50c	40.07abc
1:1	28.88b	9.76b	0.92d	8.98e	44.67b	19.63	0.31d	466.79d	1295.79d	36.03c
2:1	30.22b	11.86c	1cd	11.89d	46.46b	21c	0.35d	556.39cf	1395.91c	39.84bc
Monoculture + AMF	42.22a	16.32a	1.31a	21.46a	52a	21.67	0.47c	751.40a	1645.62a	45.64a
1:1 + AMF	42.11a	13.84b	1.08cb	15.04c	50.04a	24.08	0.56b	616.94cb	1553.81b	39.64cb
2:1 + AMF	43.22a	15.88a	1.19b	19.03b	51.25a	26.08	0.62a	691.76ab	1582.52ab	43.69ab
LSD	5.85	1.25	0.11	1.88	2.20	2.50	0.03	91.98	87.48	5.69

Monoculture- Chickpea monoculture, 1:1- Intercropping of 1 row chickpea+1 row thyme, 2:1- Intercropping of 2 rows chickpea+1 row thyme, AMF- Arbuscular mycorrhizal fungi. Means in each column followed by similar letter(s) are not significantly different at 5% probability level using LSD test.

جدول ۴- تجزیہ واریانس صفات کمی و کیفی *Thymus vulgaris*

Table 4. ANOVA of quantitative and qualitative traits of *Thymus vulgaris*

Source of variations	df	Mean squares						
		Plant height	Dry matter yield	Essential oil	Essential oil yield	ρ -Cymene	γ -Terpinene	Thymol
Replication	2	4.77	314.97	0.19	011	12.99	9.71**	121.09
Treatment	5	56.80**	2668.83**	0.32**	10.01**	27.84*	5.44	20.80**
Error a	10	0.99	28	0.003	0.17	2.01	1.32	5.82
Cuttings	1	924.26**	13021.85ns	0.50**	6.31**	2.37ns	2.27ns	26.60**
Treatments×Cutting	5	9.70**	77.36	0.03**	0.25**	5.02ns	2.30ns	22.76**
Error b	12	0.36	142.17	0.002	0.02	5.66	0.87	1.21
C.V. (%)		2.8	7.5	4.2	7.7	15.4	12.2	2.5

ns, *, and **: not significant and significant at 5 and 1% probability levels, respectively.

صفات مربوط به آویشن باغی
ارتفاع

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴) بیانگر تأثیر معنی‌دار تیمار، چین و تیمار × چین بر ارتفاع بوته آویشن باغی در سطح احتمال ۱٪ بود. بیشترین (۳۱/۴۹ سانتی‌متر) و کمترین (۱۳/۸۹ سانتی‌متر) ارتفاع بوته آویشن باغی به ترتیب در کشت خالص + مایکوروت در چین اول و تیمار ۲:۱ بدون مصرف مایکوروت در چین دوم بدست آمد (جدول ۵).

عملکرد ماده خشک آویشن باغی

بر اساس نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴) عملکرد ماده خشک آویشن باغی تحت تأثیر تیمارهای مختلف در سطح احتمال ۱٪ قرار گرفت. بیشترین عملکرد ماده خشک (۱۸۹/۴۷ گرم در مترمربع) در تیمار کشت خالص آویشن با کاربرد مایکوروت بدست آمد و بعد از آن الگوی کشت ۱:۱

تلقیح شده با مایکوروت قرار داشت. کمترین عملکرد ماده خشک آویشن باغی نیز در الگوهای ۱:۱ و ۲:۱ تلقیح نشده با مایکوروت مشاهده شد (جدول ۶). علاوه بر این، نتایج نشان داد کاربرد مایکوروت موجب افزایش ۲۸/۱ درصدی ماده خشک آویشن نسبت به عدم مصرف قارچ شد.

درصد و عملکرد اسانس

درصد و عملکرد اسانس آویشن باغی تحت تأثیر معنی‌دار اثرهای تیمار، چین و تیمار × چین در سطح احتمال ۱٪ قرار گرفتند. بالاترین درصد (۱/۶۹٪) و عملکرد اسانس (۳/۳۱ گرم در مترمربع) در الگوی کشت ۱:۱ تلقیح شده با مایکوروت و در چین اول بدست آمد (جدول ۵). کمترین درصد (۰/۹۳٪) و عملکرد اسانس (۱/۵۶ گرم در مترمربع) هم در کشت خالص آویشن بدون کاربرد مایکوروت در چین دوم مشاهده شد (جدول ۵).

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل تیمار × چین روی برخی صفات مورد ارزیابی *Thymus vulgaris*

Table 5. Means comparison of treatments × cutting interaction effects on some properties evaluated in *Thymus vulgaris*

Cuttings	Treatments	Plant height (cm)	Essential oil (%)	Essential oil yield (g.m ⁻²)	Thymol (%)
First cutting	Monoculture	23.03c	0.93gi	1.56e	41.09gf
	1:1	22.03cd	1.07ef	1.69ed	36.64i
	2:1	21.81d	1gf	1.55e	43.02dfe
	Monoculture + AMF	31.49a	1.39c	2.85b	43.11dce
	1:1 + AMF	29.57b	1.69a	3.31a	45.35a
	2:1 + AMF	28.7b	1.50b	2.73c	42.71dfe
Second cutting	Monoculture	15.30hg	0.81i	1.07g	40.24g
	1:1	14.23ji	0.99ghf	1.22gf	45.02bc
	2:1	13.89i	0.91i	1.08g	43.02dfe
	Monoculture + AMF	19e	1.06ef	1.86cd	43.11dce
	1:1 + AMF	17.19f	1.26d	1.97c	42.71dfe
	2:1 + AMF	16.20fg	1.12e	1.47ef	44.16dcb

Monoculture- Thyme monoculture, 1:1- Intercropping of 1 row chickpea+1 row thyme, 2:1- Intercropping of 2 rows chickpea+1 row thyme, AMF- Arbuscular mycorrhizal fungi. Means in each column followed by similar letter(s) are not significantly different at 5% probability level using LSD test.

ترکیب‌های اسانس

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان داد که تیمول تحت تأثیر معنی‌دار اثرهای تیمار، چین و برهم‌کنش تیمار× چین در سطح احتمال ۱٪ قرار گرفت ولی گاما-ترپین و پارا-سیمن تنها تحت تأثیر تیمار قرار گرفتند. بیشترین

درصد تیمول (۴۵/۳۵٪) در چین اول به الگوی کشت ۱:۱ و با کاربرد مایکوروت تعلق داشت (جدول ۵). علاوه‌براین، بیشترین درصد گاما-ترپین (۹/۱۳٪) و پارا-سیمن (۱۸/۲۰٪) به ترتیب در الگوهای کشت ۱:۱ و کشت خالص با کاربرد مایکوروت حاصل شد (جدول ۶).

جدول ۶- مقایسه میانگین عملکرد ماده خشک، پارا-سیمن و گاما-ترپین *Thymus vulgaris* در تیمارهای مختلف

Table 6. Means comparison of different treatments effects on dry matter yield, ρ -cymene, and γ -terpinene in *Thymus vulgaris*

Treatments	Dry matter yield (g.m ⁻²)	ρ -cymene (%)	γ -terpinene (%)
Monoculture	149.99c	15.92b	6.88bc
1:1	140.98d	12.46c	6.39c
2:1	136.22d	13.85c	7.56bc
Monoculture + AMF	189.47	18.20a	8ab
1:1 + AMF	175.91b	17ab	9.13a
2:1 + AMF	156.61c	16.84ab	7.81ab
LSD	6.80	1.82	1.47

Monoculture- Thyme monoculture, 1:1- Intercropping of 1 row chickpea+1 row thyme, 2:1- Intercropping of 2 rows chickpea+1 row thyme, AMF- Arbuscular mycorrhizal fungi. Means in each column followed by similar letter(s) are not significantly different at 5% probability level using LSD test.

شاخص‌های ارزیابی کشت مخلوط

شاخص‌های نسبت برابری زمین (LER)، نسبت برابر سطح زیرکشت (ATER)، برابر سطح برداشت (AHER) و کارایی استفاده از زمین (LUE)

برابر سطح زیرکشت و نسبت برابر سطح برداشت بیشتر از یک بودند. بالاترین شاخص‌های ATER (۱/۵۶) و AHER (۲/۷۷) نیز در الگوی کشت ۲:۱ همراه با مایکوروت مشاهده شد (جدول ۷).

شاخص‌های اقتصادی

بالاترین شاخص‌های سودمندی کل (۳/۹۴)، برتری مالی کشت مخلوط (۳۹۳/۹) و بهره‌وری سیستم (۳۳۱/۵) در الگوی ۲:۱ همراه با کاربرد قارچ میکوریزا مشاهده شد و بعد از آن الگوی ۱:۱ با کاربرد قارچ میکوریزا قرار داشت (جدول ۸).

نتایج نشان داد بالاترین نسبت برابری جزئی زمین نخود (۰/۹۰) و آویشن (۰/۸۳) به ترتیب در الگوهای کشت ۱:۱ و ۲:۱ با کاربرد کود زیستی مایکوروت حاصل شد. همچنین، بالاترین نسبت برابری زمین کل و بالاترین کارایی استفاده از زمین به ترتیب در الگوهای کشت ۲:۱ و ۱:۱ همراه با مایکوروت بدست آمد. علاوه‌براین، در تمامی الگوهای کشت مخلوط، مقادیر شاخص‌های نسبت

جدول ۷- مقادیر شاخص‌های نسبت برابری زمین، نسبت معادل سطح زیرکشت، نسبت معادل سطح برداشت و کارایی استفاده از زمین در الگوهای مختلف کشت

Table 7. Values of land equivalent ratio (LER), area time equivalent ratio (ATER), area harvest equivalent ratio (AHER), and land use efficiency (LUE) indices in different planting patterns

Treatments	LER _s	LER _t	LER _T	ATER	AHER	LUE
1:1	0.61	0.77	1.38	1.42	2.17	135.1
1:1 + AMF	0.80	0.83	1.63	1.44	2.68	154
2:1	0.72	0.65	1.37	1.47	2.57	146.3
2:1 + AMF	0.90	0.75	1.65	1.56	2.77	155.8

1:1- Intercropping of 1 row chickpea+1 row thyme, 2:1- Intercropping of 2 rows chickpea+1 row thyme, AMF- Arbuscular mycorrhizal fungi, LER_s- Partial land equivalent ratio of *Cicer arietinum*, LER_t- Partial land equivalent ratio of *Thymus vulgaris*, LER_T- Total land equivalent ratio.

جدول ۸- مقادیر شاخص‌های ارزیابی اقتصادی کشت مخلوط *Thymus vulgaris* و *Cicer arietinum* در الگوهای مختلف کشت

Table 8. Values of economic evaluation indices in *Cicer arietinum* and *Thymus vulgaris* intercropping in different planting patterns

Treatments	IA _t	IA _s	IA _T	SPI	MAI
1:1	1.76	0.59	2.35	260.5	163
1:1 + AMF	1.71	0.64	2.36	331	378
2:1	3.50	0.44	3.40	278.7	224.6
2:1 + AMF	3.01	0.39	3.94	331.5	393.9

1:1- Intercropping of 1 row chickpea+1 row thyme, 2:1- Intercropping of 2 rows chickpea+1 row thyme, AMF- Arbuscular mycorrhizal fungi, IA_s- Intercropping advantage for *Cicer arietinum*, IA_t- Intercropping advantage for *Thymus vulgaris*, IA_T- Total intercropping advantage.

بحث

ارتفاع بوته

ارتفاع گیاه به‌عنوان یکی از شاخص‌های مهم رشدی برای نشان دادن رشد محصول و جذب نیتروژن در مرحله رویشی گیاه به حساب می‌آید که عملکرد محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Jiang et al., 2020). در این پژوهش با کاربرد کود زیستی مایکوروت ارتفاع بوته آویشن در چین اول و دوم به ترتیب ۳۴/۲۳ و ۲۰/۶۶ درصد نسبت به عدم کاربرد افزایش پیدا کرد. همچنین ارتفاع بوته نخود در نتیجه همزیستی با این قارچ‌ها ۴۴ درصد افزایش یافت. افزایش ارتفاع تا حد زیادی به دسترسی گیاهان به رطوبت وابسته است، زیرا در شرایط کمبود رطوبت، تورژسانس سلولی کاهش و در نتیجه باعث کاهش رشد و نمو، تقسیم و طولی شدن سلول‌ها به‌ویژه در قسمت‌های هوایی گیاه می‌گردد. از این رو، قارچ میکوریز می‌تواند با افزایش سنتز

هورمون آبسزیزیک اسید در ریشه و انتقال آن به اندام‌های هوایی و کنترل باز و بسته شدن روزنه‌ها به حفظ تورژسانس سلول‌ها منجر شود (Varma et al., 2018). از سویی قارچ میکوریز می‌تواند با ازدیاد هورمون‌های محرک رشد گیاه از قبیل جیبرلین که در رشد طولی سلول‌ها به‌ویژه میانگره‌های ساقه نقش دارد و هورمون اکسین و سیتوکنین که در تقسیم سلولی مؤثر هستند موجب افزایش ارتفاع بوته‌ها گردد. در تطابق با این نتایج، پژوهشگران بیان کردند که کاربرد قارچ میکوریز (*Rhizophagus clarus*) منجر به افزایش ۴۱/۳ درصدی ارتفاع بوته نعناع (*Mentha crispa* L.) نسبت به شاهد گردید (Urcoviche et al., 2015). همچنین در پژوهش دیگری کاربرد قارچ میکوریز ارتفاع بوته ریحان (*Ocimum basilicum*) را ۲۷٪ نسبت به شاهد افزایش داد (Khaledian et al., 2021). علاوه بر این، ارتفاع بوته

میکوریزا را به افزایش حلالیت فسفر نامحلول و توسعه ریشه در گستره وسیعی از خاک و جذب مواد مغذی بیشتر (به ویژه فسفر که یک عنصر غیرمتحرک است) و افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی و میزان بالاتر فتوسنتز نسبت داد (Thokchom *et al.*, 2020). در تحقیق Erman و همکاران (۲۰۱۱) با بررسی اثر قارچ میکوریزا بر اجزای عملکرد نخود، مشاهده شد که کاربرد قارچ میکوریزا با تأثیر بر فعالیت میکروارگانیسم‌ها و همچنین جذب بیشتر مواد آلی و معدنی موجب افزایش اجزای عملکرد نخود از قبیل تعداد غلاف و تعداد دانه در بوته شد. همچنین در پژوهش دیگری با ارزیابی همزیستی میکوریزا با گیاه شوید (*Anethum graveolens* L.) گزارش شد که بیشترین تعداد چترک، دانه در چتر و دانه در بوته از تیمارهای تلقیح شده با میکوریزا بدست آمد (Gheidarlouei *et al.*, 2020). علاوه بر این، در کشت مخلوط به دلیل سایه‌اندازی، نخود بیشتر انرژی خود را صرف رشد رویشی کرده، در نتیجه انرژی کمتری برای تشکیل و رشد غلاف و دانه در غلاف باقی می‌ماند (Hamzei & Davoudian, 2019). اما در کشت خالص، عدم وجود رقابت بین‌گونه‌ای موجب شده بوته‌ها برای بدست آوردن آشیان‌های اکولوژیک یکسان در رقابت نباشند و تمامی منابع موجود در اختیار آن قرار گرفته و با ایجاد موازنه بین مواد فتوسنتزی حاصل و تسهیم آن بین قسمت‌های مختلف، سبب بهبود تعداد غلاف در بوته، دانه در غلاف و دانه در بوته می‌گردد (Dusa & Stan, 2013). همسو با این نتایج، Li و همکاران (۲۰۲۰) با مطالعه کشت مخلوط ذرت و گندم (*Triticum aestivum* L.) بیان کردند که اجزای عملکرد ذرت در کشت مخلوط نسبت به خالص کاهش یافت.

وزن صد دانه

نتایج پژوهش بیانگر بیشتر بودن وزن صد دانه نخود در کشت خالص همراه با کاربرد قارچ‌های میکوریزا بود. در بررسی کودهای زیستی بر عملکرد، گره‌زایی و طول دوره پرشدن عدس دیم، مشاهده شد که کاربرد قارچ میکوریزا

تحت تأثیر شرایط رویشی گیاه قرار می‌گیرد و زمانی که رقابت برون‌گونه‌ای به علت سایه‌اندازی برای دریافت کسب نور بیشتر باشد، ارتفاع گیاه نیز افزایش می‌یابد، به طوری که در شرایط سایه با کم شدن نسبت نور قرمز به قرمز دور و کاستن میزان تشعشعات فعال فتوسنتزی، ارتفاع بوته‌ها افزایش می‌یابد (Yang *et al.*, 2014). همچنین، در کشت مخلوط به دلیل دریافت نیتروژن تثبیتی نخود و تحریک رشد رویشی، افزایش ارتفاع بوته‌ها قابل انتظار است. در این زمینه Gong و همکاران (۲۰۲۰) بیان کردند در کشت مخلوط ارزن (*Panicum miliaceum* L.) با ماش (*Vigna radiate* L.) به دلیل جذب نور و منابع محیطی و اثر هورمون اکسین به دلیل کمبود نور، ارتفاع بوته‌ها افزایش پیدا کرد. همچنین Amiri و همکاران (۲۰۲۱) نیز در کشت مخلوط ذرت با لوبیا چشم‌بلبلی (*Vigna unguiculata* L.) بیشترین ارتفاع لوبیا چشم‌بلبلی را در الگوی کشت ۷۵٪ ذرت + ۲۵٪ لوبیا گزارش کردند.

تعداد غلاف در بوته، دانه در غلاف و دانه در بوته نخود

نتایج این پژوهش نشان داد بالاترین مقادیر این صفات در کشت خالص و با کاربرد کود زیستی مایکوروت حاصل شد. به طوری که مایکوروت توانست تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف و تعداد دانه در بوته نخود را به ترتیب ۳۶، ۲۴ و ۷۱ درصد نسبت به عدم مصرف افزایش دهد. قارچ میکوریزا می‌تواند بر تخصیص بیوماس بین ریشه و ساقه و نسبت آنها از طریق توسعه ریشه در گستره وسیعی از خاک مؤثر باشد (Laranjeira *et al.*, 2021) و به دنبال آن موجب افزایش مساحت سطح برگ، محتوای کلروفیل، کارایی کربوکسیلاسیون، کارایی فتوسنتز و افزایش باروری گیاه می‌شود (Begum *et al.*, 2020). به نحوی که مجموع این عوامل بر مرحله زایشی گیاه اثرگذار است و در نهایت سبب افزایش تعداد دانه در غلاف و تعداد دانه در بوته خواهد شد. علاوه بر این، از آنجا که فسفر در انتقال انرژی حاصل از فتوسنتز و افزایش تعداد دانه در گیاه نقش مهمی دارد، می‌توان افزایش تعداد دانه در گیاهان تلقیح شده با

پژوهشی محققان نشان دادند که تلقیح با قارچ میکوریزا باعث افزایش تعداد و وزن گره در گیاه عدس (*Lens esculinaris* L.) گردید که این افزایش به تأمین عناصر میکرو و ماکرو نسبت داده شد (Seyed Sharifi & Seyed Sharifi, 2020). علاوه بر این، هنگامی که لگومها به صورت مخلوط با سایر گونه‌ها قرار می‌گیرند، به دلیل اثرهای مکملی و مساعدتی بین آنها، تثبیت نیتروژن تحریک شده و در نهایت فعالیت ریزوبیوم که در ریشه نخود گره‌سازی می‌کند بیشتر شده و باعث افزایش تعداد گره، سرعت و تشکیل گره‌ها می‌شود (Asadi et al., 2019). در تأیید این نتایج در کشت مخلوط باقلا با گندم، افزایش تعداد گره‌های ریزوبیومی در کشت مخلوط باقلا (*Faba vulgaris* L.) نسبت به کشت خالص آن گزارش شده است (Liu et al., 2017). همچنین Asadi و همکاران (۲۰۱۹) در کشت مخلوط بزرک (*Linum usitatissimum* L.) و نخود بیان کردند که بیشترین و کمترین میزان گره به ترتیب از کشت مخلوط یک ردیف نخود+ یک ردیف بزرک و کشت خالص بدست آمد.

عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه نخود

بیشترین عملکرد بیولوژیک و دانه نخود در کشت خالص همراه با کاربرد کود زیستی مایکوروت حاصل شد. گیاهان تلقیح شده با میکوریزا نسبت به عدم تلقیح دارای قابلیت آب برگ و هدایت روزه‌ای بیشتری هستند (Varma et al., 2018). در واقع همزیستی با میکوریزا سبب تنظیم اسمزی گیاه میزبان و افزایش تماس ریشه با ذرات خاک شده که باعث بهبود شرایط رشدی، افزایش مواد مغذی خاک و محلول‌سازی مواد معدنی خاک بر اثر افزایش فعالیت‌های میکروبی شده و منجر به بهینه‌سازی جذب عناصر کم‌مصرف و پرمصرف توسط ریشه گیاه شده (Kothe & Turnau, 2018) که با بهبود جذب عناصر غذایی و انتقال به بخش‌های زایشی گیاه در مرحله پر شدن دانه در افزایش وزن دانه‌ها و به تبع آن در عملکرد دانه نقش بسزایی دارد (Erman et al., 2011). در بررسی همزیستی قارچ

مؤلفه‌های پر شدن دانه را بهبود بخشید. زیرا کربن اضافی تثبیت شده توسط گیاهان میکوریزایی به قارچ‌های میکوریزا تخصیص یافته و این قارچ‌ها با ایفای نقش مخزن اضافی برای آسیمیلات‌ها، موجب تحریک فتوسنتز گیاه میزبان شده و از این طریق به بهبود مؤلفه‌های پر شدن دانه و عملکرد آن کمک می‌کنند (Seyed Sharifi & Seyed Sharifi, 2020). در ارزیابی همزیستی قارچ میکوریزا با گیاه شوید مشخص شد که بیشترین وزن هزاردانه از تیمارهای تلقیح شده با میکوریزا بدست آمد (Gheidarlouei et al., 2020). علاوه بر این، زمانی که گیاه در شرایط رقابت برون‌گونه‌ای قرار می‌گیرد، مواد فتوسنتزی را برای برتری در رقابت با گیاهان مجاور صرف رشد رویشی و ارتفاع می‌کند که به تبع آن انتقال مواد فتوسنتزی و منابع تأمین ذخایر بذری کم شده و وزن دانه‌ها با کاهش مواجه می‌شود (Gao et al., 2010). بنابراین چنین به نظر می‌رسد بیشتر بودن وزن صد دانه در کشت خالص نخود به علت کاهش رقابت برای دریافت مواد فتوسنتزی و امکان انتقال مواد فتوسنتزی بیشتر به دانه بوده که در نهایت منجر به افزایش وزن صد دانه می‌گردد (Fallah et al., 2018).

تعداد گره و وزن خشک گره نخود

نتایج پژوهش بیانگر افزایش تعداد و وزن خشک گره‌های ریزوبیومی در الگوی کشت ۲:۱ همراه با کاربرد کود زیستی مایکوروت بود. قارچ میکوریزا از طریق جذب تدریجی عناصر غذایی، جذب آب و هدایت برگی را افزایش می‌دهد و با تنظیم فشار تورژسانس و با حفظ باز بودن روزه‌ها موجب بهبود کارایی تثبیت کربن دی‌اکسید می‌شود (Laranjeira et al., 2021) و با حفظ رطوبت، امکان بقاء، فعالیت و همزیستی باکتری‌های ریزوبیومی را فراهم می‌کند. از سویی، با توجه به اینکه تشکیل گره ریزوبیوم نیاز شدیدی به فسفر دارد تلقیح با قارچ میکوریزا از طریق فراهم کردن فسفر و همچنین جذب عناصر دیگری مانند کلسیم، مولیبدن، مس و روی بر تعداد و وزن گره‌ها مؤثر است (Farhadian Asgarabadi & Eisvand, 2017). در

میکوریزا بر عملکرد نخود و سیاهدانه (*Nigella sativa* L.) در کشت مخلوط، گزارش شد که تلقیح با میکوریزا عملکرد دانه سیاهدانه و نخود را به ترتیب ۶۲/۲۴٪ و ۵۹/۱۸٪ نسبت به عدم مصرف قارچ میکوریزا افزایش داد (Javanmard et al., 2020). علاوه بر این، به نظر می‌رسد یکی از دلایل کاهش عملکرد دانه نخود در کشت مخلوط به ویژه در الگوی ۱:۱ کاهش تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف، تعداد دانه در بوته و وزن صد دانه نسبت به کشت خالص است (جدول ۳). سایه‌اندازی در کشت مخلوط بر روی سنتز کلروفیل تأثیر می‌گذارد و میزان شاخص کلروفیل را کاهش می‌دهد، به طوری که کلروپلاست‌ها عمدتاً در بافت‌ها محصور می‌شوند و ورود CO₂ به کلروپلاست از طریق فضای بین سلولی محدود می‌گردد. محققان دیگر نیز اعتقاد دارند در کشت مخلوط نسبت به خالص عملکرد بیولوژیک با کاهش مواجه خواهد شد که علت آن را به کاهش فضای لازم برای رشد و افزایش رقابت بین‌گونه‌ای نسبت می‌دهند (Dusa & Stan, 2013). در تطابق با نتایج بدست آمده از این پژوهش، محققان در ارزیابی کشت مخلوط باقلا و رازیانه بیان کردند که بیشترین عملکرد دانه و بیولوژیک رازیانه از کشت خالص بدست آمد (Mohammadi & Rezaei-Chiyaneh, 2019). در پژوهش دیگری، در بررسی کشت مخلوط بزرک و نخود بیشترین عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک از کشت خالص گزارش شد (Asadi et al., 2019).

شاخص برداشت نخود

بالاترین شاخص برداشت نخود در کشت‌های خالص بدون تفاوت معنی‌دار با الگوی کشت ۲:۱ با و بدون کود زیستی مایکوروت حاصل شد. همزیستی با قارچ‌های میکوریزا با افزایش آسیمیلایون مواد فتوسنتزی موجب بهبود سطح برگ و افزایش قابلیت فتوسنتزی در زمان قبل از گلدهی می‌گردد که به نظر می‌رسد در زمان پس از گلدهی با انتقال دوباره این مواد فتوسنتزی از منبع به مخزن، سبب افزایش وزن دانه و شاخص برداشت خواهد شد (Begum

et al., 2020). همچنین افزایش شاخص برداشت با کاربرد قارچ میکوریزا به آزادسازی یون هیدروژن و اسیدی کردن ریزوسفر و ترشح اسیدهای آلی حل‌کننده فسفات‌های نامحلول مانند اسید مالیک و در نتیجه جذب فسفر بیشتر توسط گیاه نسبت داده شده است (Varma et al., 2018). در کشت مخلوط رقابت بین گیاهان سبب تخصیص منابع به برگ و ساقه برای رقابت بر سر نور، یا به ریشه به دلیل افزایش رقابت بر سر جذب آب و مواد غذایی می‌گردد که باعث شده گیاهان نتوانند به اندازه کافی و مناسب مواد فتوسنتزی را به دانه‌ها منتقل کنند. از این رو نسبت عملکرد دانه به عملکرد بیولوژیکی با کاهش مواجه و در نهایت منجر به کاهش شاخص برداشت می‌گردد (Zhang et al., 2020). همچنین تفاوت در شاخص برداشت ممکن است به دلیل میزان بیوماس در آغاز پر شدن دانه، میزان رشد گیاه در طول پر شدن دانه و انتقال دوباره آسیمیلات‌های ذخیره شده قبل از گرده‌افشانی در طول مراحل رویشی باشد. به طوری که فشار رقابت می‌تواند در مرحله گرده‌افشانی موجب کاهش تعداد دانه‌ها شده و پس از گرده‌افشانی نیز به علت کاهش آسیمیلات، تجمع بیوماس در طول رشد دانه کمتر خواهد شد که در نتیجه شاخص برداشت کاهش می‌یابد (Li et al., 2015). در این رابطه Liu و همکاران (۲۰۱۷) در کشت مخلوط سویا و ذرت گزارش کردند که شاخص برداشت سویا در الگوهای کشت مخلوط نسبت به کشت خالص کاهش یافت و آن را به افزایش نسبت زیست‌توده ساقه به دانه نسبت دادند. همچنین در پژوهشی با ارزیابی عملکرد و شاخص‌های سودمندی زوفا (*Hyssopus officinalis*) و اسفرزه (*Plantago ovate* Forsk)، محققان نتیجه گرفتند که بیشترین شاخص برداشت اسفرزه به کشت خالص اسفرزه تعلق داشت (Roospeikar et al., 2020).

عملکرد ماده خشک آویشن باغی

عملکرد ماده خشک آویشن باغی با کاربرد قارچ‌های میکوریزا در کشت خالص ۳۲/۲۶٪ نسبت به عدم کاربرد میکوریزا افزایش یافت. قارچ میکوریزا قادر است از طریق

تعداد غده‌های ترشح کننده اسانس، تسریع واکنش‌های متابولیسمی، افزایش سنتز و تجمع متابولیت‌ها کمک کرده که در نهایت با بهبود فتوسنتز که گام اول برای تولید ترپنوئیدها می‌باشد موجب افزایش تولید اسانس می‌گردد (Golubkina *et al.*, 2020). همچنین، همزیستی با قارچ میکوریزا با افزایش شبکه گسترده هیف موجب می‌شود تا گیاه مواد مغذی بیشتری را جذب کند و با تأمین کافی عناصر اصلی سازنده اسانس از جمله فسفر باعث افزایش درصد و عملکرد اسانس می‌گردد (Merlin *et al.*, 2020). در پژوهش دیگری که بر روی ریحان مقدس (*Ocimum tenuiflorum*) انجام شد، محققان دریافتند که گیاهان تلقیح شده از درصد عملکرد اسانس بالاتری برخوردار بودند (Thokchom *et al.*, 2020). علاوه بر این، در کشت مخلوط با در اختیار قرار دادن نیتروژن برای گیاهان، ATP و NADPH بیشتری توسط گیاه تولید شده، در نتیجه انرژی بیشتری برای تولید واحدهای سازنده ترکیب‌های ترپنوئیدی که در تشکیل اسانس نقش دارند مهیا می‌گردد و موجب افزایش عملکرد و درصد اسانس می‌شود (Ormeno & Fernandez, 2012). همچنین از آنجا که عملکرد اسانس حاصلزرب درصد اسانس و عملکرد ماده خشک می‌باشد، از این رو، هر گونه افزایش در این صفات منجر به افزایش عملکرد اسانس خواهد شد. بنابراین دلیل افزایش عملکرد اسانس در چین اول به افزایش عملکرد ماده خشک و میزان اسانس تولید شده در مقایسه با چین دوم مربوط می‌شود. در تطابق با نتایج این پژوهش، Amani Machiani و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند که درصد و عملکرد اسانس در چین اول ۴۳/۵٪ نسبت به چین دوم افزایش یافت. در مطالعه دیگری افزایش درصد و عملکرد اسانس زین گیاه (*Dracocephalum kotschy* Boiss) در کشت مخلوط با لوبیا مشاهده شد (Hosseini & Hamzei, 2021).

ترکیب‌های اسانس

بالاترین مقادیر ترکیب‌های اصلی اسانس آویشن باغی (تیمول و گاما-ترپینن) در الگوی کشت مخلوط ۱:۱ و با

تأمین بخشی از نیتروژن مورد نیاز گیاه در افزایش ماده خشک اثرگذار باشد. پژوهشگران افزایش ماده خشک در گیاهان تلقیح شده با قارچ میکوریزا را به بهبود جذب عناصر غذایی از جمله نیتروژن نسبت دادند (Zhang *et al.*, 2020). نتایج مشابهی مبنی بر افزایش ماده خشک ریحان و فرنجمشک (*Melissa officinalis* L. (Khalediyani *et al.*, 2021؛ Assis *et al.*, 2020) با کاربرد قارچ میکوریز مشاهده شده است. علاوه بر این، چنین به نظر می‌رسد که کاهش عملکرد ماده خشک آویشن در کشت مخلوط نسبت به کشت خالص به دلیل کمتر بودن نسبت رقابت و منفی بودن غالبیت این گیاه در برابر نخود باشد (Roospeikar *et al.*, 2020). در این رابطه محققان مشاهده کردند که میزان عملکرد ماده خشک اسطوخودوس و گل بابونه در کشت خالص به ترتیب ۱۹٪ و ۴۱٪ نسبت به کشت مخلوط افزایش یافت (Naghizadeh & Moradi, 2021). همچنین براساس نتایج بدست آمده از این پژوهش، عملکرد ماده خشک آویشن در چین اول بیشتر از چین دوم بود که کاهش عملکرد ماده خشک آویشن در چین دوم نسبت به چین اول به طول دوره رشد کمتر و همچنین شرایط محیطی مانند تابش آفتاب، دمای محیط و طول روز نسبت داده شده است.

درصد و عملکرد اسانس

کاربرد کود زیستی مایکوروت در الگوی کشت ۱:۱، درصد و عملکرد اسانس آویشن باغی را نسبت به سایر تیمارها افزایش معنی‌داری داد. بهبود اسانس آویشن باغی با کاربرد قارچ میکوریزا به افزایش فعالیت فتوسنتزی و غدد تشکیل دهنده اسانس بر اثر افزایش سطح جذب و دسترسی به عناصر غذایی نسبت داده می‌شود. به نظر می‌رسد همزیستی ریشه گیاه آویشن با قارچ میکوریزا از طریق فراهمی عناصر اصلی سازنده اسانس از جمله نیتروژن و فسفر موجب افزایش درصد اسانس شده است. میکوریزا جذب مواد معدنی از خاک را تسهیل کرده که می‌تواند با تحریک فعال فتوسنتزی، افزایش متابولیسم ساکاریدها و افزایش تقسیم سلولی به صورت هم‌افزایی به افزایش اندازه و

ترکیب‌هایی مانند ATP و NADPH نیاز دارند. بنابراین، حضور عناصری از قبیل نیتروژن و فسفر برای تشکیل ترکیب‌های مذکور ضروریست. از این رو، کاربرد قارچ میکوریزا منجر به بهبود ترکیب‌های اسانس می‌گردد. تحقیقات قبلی نیز تأثیر قارچ میکوریزا را در بهبود ترکیب‌های شیمیایی در گیاهان دارویی نشان داده‌اند (Assis *et al.*, 2020). پژوهشگران بیان کردند که قارچ‌های میکوریزا اثرهای مثبتی بر روی ترکیب‌های شیمیایی اسانس ریحان مقدس نشان دادند. همچنین غلظت eugenol (یک فنیل پروپانوید با ارزش) و سایر ترپنوئیدهای مهم پزشکی (بتا-المن، بتا-کاربوفیلین، جرماکرن A و جرماکرن D) در اسانس گیاهان تلقیح شده با میکوریزا افزایش می‌یابد. علاوه بر این، تلقیح با قارچ میکوریزا باعث افزایش محتویات فنل، فلاونوئید و پلی‌فنول می‌گردد (Thokchom *et al.*, 2020). در پژوهش دیگری قارچ میکوریزا باعث بهبود ترکیب‌های اسانس ریحان شد، به طوری که در تیمارهای تلقیح شده محتوای متیل، ژرانیول و لیمونن نسبت به شاهد افزایش یافت (Khalediyan *et al.*, 2021). همچنین بیان شده که تولید بیشتر متابولیت‌های ثانویه و بهبود ترکیب‌های آن تا حد زیادی وابسته به میزان فعالیت‌های فتوسنتزی است (Weisany *et al.*, 2021). محققان در کشت مخلوط باقلا و رازیانه نتیجه گرفتند نه تنها بالاترین میزان درصد و عملکرد اسانس رازیانه از کشت مخلوط بدست آمد، بلکه کشت مخلوط منجر به بهبود ترکیب‌های اسانس رازیانه از جمله آنتول نیز شد (Mohammadi & Rezaei-Chiyaneh, 2019). همچنین گزارش شد که بیشترین مقدار فنل و درصد آنتی‌اکسیدان زرین گیاه در کشت مخلوط با لوبیا حاصل شد (Hosseini & Hamzei, 2021).

شاخص‌های ارزیابی کشت مخلوط

نسبت برابری زمین، ارزیابی درستی از کارایی استفاده از عناصر غذایی، آب و تشعشع خورشیدی در کشت مخلوط می‌باشد. LER بیشتر از یک، بیانگر این است که مساعدت

کاربرد مایکوروت حاصل شد. در حالی که بالاترین مقدار پارا-سیمن در کشت خالص آویشن با کاربرد قارچ بدست آمد. همزیستی گیاه با میکوریزا موجب افزایش غلظت ترپنوئیدها می‌گردد که معمولاً این موضوع به بهبود تراکم غده‌ها نسبت داده می‌شود (Thokchom *et al.*, 2020). علاوه بر این، قارچ میکوریزا تغییراتی را در غلظت فیتوهورمون‌های گیاهی از قبیل اسید جاسمونیک، اسید ژیرلیک و سیتوکینین ایجاد می‌کند که این فیتوهورمون‌ها، تشکیل غده‌های ترشح‌کننده اسانس را افزایش و در نهایت موجب بهبود تولید متابولیت‌های ثانویه می‌گردد (Mandal *et al.*, 2015; Rehman & Asif Hanif, 2016). تغییر در سطوح فیتوهورمون‌ها منجر به تحریک مسیر MEP (متیل اریتریتول فسفات (Methyl erythritol phosphate)) با تنظیم سنتز بیشتر DXR (۱-دئوکسی-D-گزیلوز ۵ فسفات ریدوکتو ایزومرزا (1-deoxy-D xylulose 5-Phosphate)) و DXS (۱-دئوکسی-D-گزیلوز ۵-فسفات سنتتاز (1-deoxy-D-xylulose 5-phosphate synthase)) به صورت غیرقابل بازگشت خواهد شد که ممکن است موجب تولید بیشتر IPP (ایزو پنتینیل پیروفسفات (Isopentenyl pyrophosphate)) و DMAPP (دی‌متیل آلیل دی‌فسفات (Dimethylallyl diphosphate)) شده و در نتیجه ترکیب‌های ترپنوئیدی را افزایش می‌دهد (Kapoor *et al.*, 2017). با توجه به این نکته که در مسیر ساخت اجزای اسانس، پیش‌ماده‌هایی مانند ایزوپنتنیل پیروفسفات، دی‌متیل آلیل پیروفسفات و ژرانیل پیروفسفات نقشی ساختاری و حیاتی دارند، به نظر می‌رسد که همزیستی گیاهان با قارچ میکوریزا منجر به افزایش جذب فسفر توسط گیاه و افزایش مقدار پیش‌ماده‌های ذکر شده می‌شود (Mohammadi *et al.*, 2021). همچنین قارچ میکوریزا قادر است باعث افزایش تجمع مونی یا دی‌ترین‌ها توسط فعالیت آنزیمی شود که این موضوع از ژرانیل دی فسفات (GPP) پیش‌ماده مشترک آنها آغاز می‌گردد (Mandal *et al.*, 2015). اسانس‌ها ترکیب‌های ترپنوئیدی هستند که واحدهای سازنده آنها (ایزوپرنوئیدها) مانند ایزوپنتنیل پیروفسفات و دی‌متیل آلیل پیروفسفات بوده که به

و نخود مشاهده کردند که نسبت برابری زمین در تمامی الگوهای کشت مخلوط بیشتر از یک بدست آمد. همچنین این پژوهشگران بیان کردند که بالاترین مقادیر LER در الگوی کشت ۲ ردیف سیاهدانه+ یک ردیف نخود حاصل شد. علاوه بر این، در صورتی که زمان اشغال زمین توسط گونه‌ها در کشت مخلوط یکسان نباشد، نسبت برابر زمان-سطح زیر کشت شرایط ارزیابی مناسب‌تری در مقایسه با نسبت برابری زمین فراهم خواهد کرد (Yilmaz *et al.*, 2015). این شاخص در واقع بیانگر کارایی تبدیل انرژی نورانی به شیمیایی است. براساس نتایج، مقادیر ATER و AHER در تمامی الگوهای کشت مخلوط بالاتر از یک بدست آمد. کارایی استفاده از زمین (LUE) نیز روندی مشابه ATER و AHER داشت. Singh و همکاران (۲۰۱۳) در کشت مخلوط شمعدانی و سیر بیان کردند که ATER در تمامی الگوهای کشت مخلوط بزرگتر از یک است.

شاخص‌های اقتصادی

در همه الگوهای کشت مخلوط، مقادیر IA و MAI مثبت بودند. بالاترین شاخص برتری مالی کشت مخلوط و سودمندی مالی در الگوی ۲:۱ همراه با کاربرد قارچ میکوریزا مشاهده شد. علاوه بر این، یکی دیگر از شاخص‌ها که میزان بهره‌وری و کارایی سیستم کشت مخلوط را نشان می‌دهد، شاخص بهره‌وری سیستم (SPI) بوده که داده‌ای مربوط به آن با استاندارد کردن محصول زراعت ثانوی بر مبنای محصول زراعت اصلی حاصل می‌شود (Agegnehu *et al.*, 2006; Gitari *et al.*, 2020). بالاترین شاخص بهره‌وری سیستم نیز در الگوی ۲:۱ همراه با کاربرد قارچ میکوریزا مشاهده شد. دلیل آن به نسبت برابری زمین، نسبت برابر سطح زیرکشت و کارایی استفاده از زمین بیشتر این الگوی کشت برمی‌گردد (Hosseini & Hamzei, 2021). Hosseini و Hamzei (۲۰۲۱) مشاهده کردند که تیمارهایی که از LER بالاتری برخوردار باشند، میزان SPI بالاتر و در نتیجه ثبات عملکرد بیشتری دارند. Haghaniia و همکاران

بیشتر از رقابت بین گونه‌ای بوده است (Haghaniia *et al.*, 2018). براساس نتایج این پژوهش، نسبت برابری جزئی زمین آویشن و نخود در تمامی الگوهای کشت مخلوط بیشتر از ۰/۵ بود. افزایش LER جزئی بیشتر از ۰/۵ به درجه مکملی اجزای مخلوط بستگی دارد (Gitari *et al.*, 2020). اثر مکملی اشاره به این موضوع دارد که در کشت مخلوط، گیاهان با روش‌های مختلفی به منابع دسترسی پیدا می‌کنند و از آن استفاده می‌نمایند، در نتیجه رقابت بین گونه‌ای کاهش می‌یابد. در کشت مخلوط به علت اینکه گیاهان از لحاظ مورفولوژی تفاوت‌هایی دارند، توزیع و طراحی ریشه به گونه‌ای انجام می‌شود که جذب آب و مواد غذایی هر یک از گیاهان در آشیان‌های اکولوژیکی مختلفی انجام گردد. توزیع فضایی اندام هوایی نیز به گونه‌ای است که کارایی جذب نور را افزایش می‌دهد. نخود در کشت مخلوط با سیستم ریشه‌ای عمیق‌تر نسبت به آویشن باغی از اعماق پایین‌تری آب و عناصر غذایی را جذب می‌کند ولی آویشن باغی دارای ریشه سطحی است؛ بدین صورت که هر یک از آشیان اکولوژیکی مخصوص به خود آب و عناصر غذایی را جذب می‌کند و با استفاده از اثر مکملی از بروز رقابت جلوگیری کرده و کارایی استفاده از منابع را افزایش می‌دهد. همچنین اثر مکملی شیمیایی به توانایی گیاهان برای جذب شکل‌های شیمیایی مختلف مواد غذایی اشاره دارد. نمونه بارز اثر مکملی شیمیایی، توانایی لگوم‌ها در تثبیت نیتروژن اتمسفری است که دیگر گونه‌ها این توانایی را ندارند (Duchene *et al.*, 2017). با افزودن نخود در مزرعه آویشن باغی، به علت توانایی نخود در بهره‌برداری از نیتروژن اتمسفری، از رقابت بین گونه‌ای برای نیتروژن جلوگیری می‌شود. از سویی دسترسی به فسفر و سایر عناصر غذایی خاک را به علت افزایش سطح تماس ریشه‌ها با خاک و اسیدی شدن ریزوسفر خاک در ناحیه ریشه تسهیل می‌کند (Hosseini & Hamzei, 2021). براساس مقادیر نسبت برابری زمین، ۶۵-۳۸٪ سطح زیر کشت بیشتری در کشت خالص آویشن باغی و نخود نیاز است تا عملکردی مشابه کشت مخلوط این دو گیاه حاصل شود. Javanmard و همکاران (۲۰۲۰) در کشت مخلوط سیاهدانه

- Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research, 36(6): 1022-1037.
- Amiri, A., Ramrodi, M., Galavi, M. and Rafiee, M., 2021. Ecophysiological investigation of intercropping of maize (*Zea mays* L.) and cowpea (*Vigna unguiculata* L.) under the influence of biofertilizers. Journal of Crop Ecophysiology, 14(4): 535-550.
 - Asadi, S., Rezaei-Chiyaneh, E. and Amirnia, R., 2019. Effect of planting pattern and fertilizer source on agronomic characteristics of linseed (*Linum usitatissimum* L.) and chickpea (*Cicer arietinum* L.) in intercropping under rainfed conditions. Iranian Journal of Crop Sciences, 21(1): 16-30.
 - Assis, R.M.A., Carneiro, J.J., Medeiros, A.P.R., de Carvalho, A.A., da Cunha Honorato, A., Carneiro, M.A.C., Bertolucci, S.K.V. and Pinto, J.E.B.P., 2020. Arbuscular mycorrhizal fungi and organic manure enhance growth and accumulation of citral, total phenols, and flavonoids in *Melissa officinalis* L. Industrial Crops and Products, 158: 112981.
 - Begum, N., Ahanger, M.A. and Zhang, L., 2020. AMF inoculation and phosphorus supplementation alleviates drought induced growth and photosynthetic decline in *Nicotiana tabacum* by up-regulating antioxidant metabolism and osmolyte accumulation. Environmental and Experimental Botany, 176: 104088.
 - Duchene, O., Vian, J.F. and Celette, F., 2017. Intercropping with legume for agroecological cropping systems: Complementarity and facilitation processes and the importance of soil microorganisms. A review. Agriculture, Ecosystems and Environment, 240: 148-161.
 - Dusa, E.M. and Stan, V., 2013. The effect of intercropping on crop productivity and yield quality of oat grain leguminous species pea and lentil cultivated in pure stand and mixtures in the organic agriculture system. European Scientific Journal, 21: 69-78.
 - Erman, M., Demir, S., Ocağ, E., Tufenkçi, S., Oguz, F. and Akkopru, A., 2011. Effects of rhizobium, arbuscular mycorrhiza and whey applications on some properties in chickpea (*Cicer arietinum* L.) under irrigated and rainfed conditions 1-yield, yield components, nodulation and AMF colonization. Field Crops Research, 122(1): 14-24.
 - Fallah, S., kakolvand, R. and AbbasiSurki, A., 2018. The competition effects of fenugreek and black cumin plants on yield and yield components under drought stress. Journal of Plant Production Research, 25(2): 35-51.
 - Farhadian Asgarabadi, K. and Eisvand, H.R., 2017. Effects of mycorrhiza and superabsorbent on root morphological characteristics and yield of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under rainfed conditions. Journal of Crop Production, 10(2): 61-73.
- (۲۰۱۸) گزارش کردند که قارچ مایکوریزا با افزایش جذب آب و مواد غذایی برای گیاه در شرایط کشت مخلوط موجب افزایش عملکرد شده و از این طریق باعث بهبود شاخص‌های اکولوژیکی و اقتصادی کشت مخلوط می‌گردد. به‌عنوان نتیجه‌گیری کلی می‌توان بیان کرد که عملکرد و اجزای عملکرد نخود و کیفیت اسانس آویشن باغی تحت تأثیر معنی‌دار الگوهای کشت و کاربرد کود زیستی مایکوروت قرار گرفتند، به‌طوری که بیشترین عملکرد دانه نخود و عملکرد ماده خشک آویشن باغی در کشت خالص با کاربرد مایکوروت حاصل شد. اما بیشترین درصد و عملکرد اسانس و بالاترین مقادیر تیمول و گاما-تریپنین به‌عنوان ترکیب‌های اصلی اسانس آویشن باغی در الگوی کشت یک ردیف نخود + یک ردیف آویشن با کاربرد مایکوروت بدست آمد. همچنین بالاترین شاخص‌های نسبت برابری زمین، کارایی استفاده از زمین، بهره‌وری سیستم و سودمندی مالی کشت مخلوط به‌ترتیب در الگوهای ۲:۱ و ۱:۱ و با کاربرد کود زیستی مایکوروت حاصل شدند. بنابراین، کشت مخلوط آویشن با نخود همراه با کاربرد قارچ میکوریزا نه تنها منجر به ایجاد تنوع در اکوسیستم‌های کشاورزی و پایداری تولید می‌شود، بلکه در افزایش کمی و کیفی محصول و افزایش درآمد اقتصادی و کارایی استفاده از زمین‌های کشاورزی نیز مؤثر خواهد بود.

References

- Adams, R.P., 2007. Identification of Essential Oil Components by Gas Chromatography/Mass Spectrometry. Allured Publishing Corporation Carol Stream, IL, 804p.
- Agegnehu, G., Ghizam, A. and Sinebo, W., 2006. Yield performance and land-use efficiency of barley and faba bean mixed cropping in Ethiopian highlands. European Journal of Agronomy, 25: 202-207.
- Almeida, D.J., Alberton, O., Otênio, J.K. and Carrenho, R., 2020. Growth of chamomile (*Matricaria chamomilla* L.) and production of essential oil stimulated by arbuscular mycorrhizal symbiosis. Rhizosphere, 15: 100208.
- Amani Machiani, M., Javanmard, A., Ostadi, A., Morshedloo, M. and Chabokpour, J., 2021. Effects of harvest time and mycorrhiza fungus application on quantitative and qualitative yield of thyme (*Thymus vulgaris* L.) essential oil at different irrigation levels.

- Kapoor, R., Anand, G., Gupta, P. and Mandal, S., 2017. Insight into the mechanisms of enhanced production of valuable terpenoids by arbuscular mycorrhiza. *Phytochemistry Reviews*, 16(4): 677-692.
- Kaur, R. and Prasad, K., 2021. Technological, processing and nutritional aspects of chickpea (*Cicer arietinum*)-A review. *Trends in Food Science & Technology*, 109: 448-463.
- Khalediyan, N., Weisany, W. and Schenk, P.M., 2021. Arbuscular mycorrhizae and rhizobacteria improve growth, nutritional status and essential oil production in *Ocimum basilicum* and *Satureja hortensis*. *Industrial Crops and Products*, 160: 113163.
- Kothe, E. and Turnau, K., 2018. Mycorrhizosphere communication: mycorrhizal fungi and endophytic fungus- plant interactions. *Frontiers in Microbiology*, 9: 3015.
- Laranjeira, S., Fernandes-Silva, A., Reis, S., Torcato, C., Raimundo, F., Ferreira, L., Carnide, V. and Marques, G., 2021. Inoculation of plant growth promoting bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi improve chickpea performance under water deficit conditions. *Applied Soil Ecology*, 164: 103927.
- Li, J., Xie, R., Wang, K., Ming, B., Guo, Y. and Zhang, G., 2015. Variations in maize dry matter, harvest index, and grain yield with plant density. *Agronomy Journal*, 107(3): 829-834.
- Liu, X., Rahman, T., Song, C., Su, B., Yang, F., Yong, T., Wu, Y., Zhang, C. and Yang, W., 2017. Changes in light environment, morphology, growth and yield of soybean in maize-soybean intercropping systems. *Field Crops Research*, 200: 38-46.
- Madawala, H.M.S.P., 2021. Arbuscular mycorrhizal fungi as biofertilizers: current trends, challenges, and future prospects. *Biofertilizers*, 1: 83-93.
- Mandal, S., Upadhyay, S., Wajid, S., Ram, M., Jain, D.C., Singh, V.P., Abdin, M.K. and Kapoor, R., 2015. Arbuscular mycorrhiza increase artemisinin accumulation in *Artemisia annua* by higher expression of key biosynthesis genes via enhanced jasmonic acid levels. *Mycorrhiza*, 25(5): 345- 357.
- Merlin, E., Melato, E., Lourenço, E.L.B., Jacomassi, E., Junior, A.G., da Cruz, R.M.S., Otênio, J.K., da Silva, C. and Alberton, O., 2020. Inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus addition increase coarse mint (*Plectranthus amboinicus* Lour.) plant growth and essential oil content. *Rhizosphere*, 15: 100217.
- Mohammadi, H. and Rezaei-Chiyaneh, E., 2019. Effect of vermicompost application on seed yield and quality in fababean (*Vicia faba* L.) and fennel (*Foeniculum vulgare* L.) intercropping. *Iranian Journal of Crop Sciences*. 21(2): 139-154.
- Mohammadi, S., Sefidkon, F., Asadi-Sanam, S. and Kalatejari, S., 2021. Effects of nutritional treatments on morphological characteristics and essential oil
- Gao, Y., Duan, A., Qiu, X., Liu, Z., Suna, J., Zhang, J. and Wang, H., 2010. Distribution of roots and root length density in a maize/soybean strip intercropping system. *Agricultural Water Management*, 98: 199-212.
- Gheidarlouei, S., Khademian, R. and Mafakheri, S., 2020. Response of *Anethum graveolens* L. to mycorrhiza symbiosis at different salinity levels. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 36(2): 329-347.
- Gitari, H.I., Nyawade, S.O., Kamau, S., Karanja, N.N., Gachene, C.K., Raza, M.A., Maitra, S. and Schulte-Geldermann, E., 2020. Revisiting intercropping indices with respect to potato-legume intercropping systems. *Field Crops Research*, 258: 107957.
- Golubkina, N., Logvinenko, L., Novitsky, M., Zamana, S., Sokolov, S., Molchanova, A., Shevchuk, O., Sekara, A., Tallarita, A. and Caruso, G., 2020. Yield, essential oil and quality performances of *Artemisia dracuncululus*, *Hyssopus officinalis* and *Lavandula angustifolia* as affected by arbuscular mycorrhizal fungi under organic management. *Plants*, 9: 1-16.
- Gong, X., Ferdinand, U., Dang, K., Li, J., Chen, G., Luo, Y., Yang, P. and Feng, B., 2020. Boosting proso millet yield by altering canopy light distribution in proso millet/mung bean intercropping systems. *The Crop Journal*, 8(2): 365-377.
- Haghaninia, M., Javanmard, A. and Mollaaliabasiyan, S., 2018. Evaluation of forage yield and quality and advantages of barley (*Hordeum vulgare* L.)- grass pea (*Lathyrus sativus* L.) intercropping using mycorrhiza. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 28(3): 221-242.
- Hamzei, J. and Davoudian, R., 2019. Evaluation of agrophysiological indices and yield performance in canola/chickpea intercropping. *Journal of Agroecology*, 11(1): 245-259.
- Hosseini, S. and Hamzei, J., 2021. Evaluation of quantitative and qualitative yield of *Dracocephalum kotschyi* Boiss. in conditions of intercropping with bean in Hamedan region. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 36(6): 923-946.
- Javanmard, A., Sadre Karimi, E., Amani Machiani, M., Morshedloo, M. and Ostadi, A., 2020. Effect of symbiosis with mychorrizal fungus (*Funneliformis mosseae*) on yield and yield component of black cumin (*Nigella sativa* L.) and chickpea (*Cicer arietinum* L.) in intercropping. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 30(4): 19-43.
- Jiang, T., Liu, J., Gao, Y., Sun, Z., Chen, S., Yao, N., Ma, H., Feng, H., Yu, Q. and He, J., 2020. Simulation of plant height of winter wheat under soil Water stress using modified growth functions. *Agricultural Water Management*, 232: 1-12.

- Shmeit, Y.H., Fernandez, E., Novy, P., Kloucek, P., Orosz, M. and Kokoska, L., 2020. Autopolyploidy effect on morphological variation and essential oil content in *Thymus vulgaris* L. *Scientia Horticulturae*, 263: 109095.
- Singh, M., Singh, U.B., Ram, M., Yadav, A. and Chanotiya, C.S., 2013. Biomass yield, essential oil yield and quality of geranium (*Pelargonium graveolens* L.) as influenced by intercropping with garlic (*Allium sativum* L.) under subtropical and temperate climate of India. *Industrial Crops and Products*, 46: 234-237.
- Thokchom, S.D., Gupta, S. and Kapoor, R., 2020. Arbuscular mycorrhiza augments essential oil composition and antioxidant properties of *Ocimum tenuiflorum* L.-A popular green tea additive. *Industrial Crops and Products*, 153: 112418.
- Urcoviche, R.C., Gazim, Z.C., Dragunski, D.C., Barcellos, F.G. and Alberton, O., 2015. Plant growth and essential oil content of *Mentha crispera* inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi under different levels of phosphorus. *Industrial Crops and Products*, 67: 103-107.
- Varma, A., Prasad, R. and Tuteja, N., 2018. Mycorrhiza Nutrient Uptake, Biocontrol, Ecorestoration. Springer, 533p.
- Weisany, W., Tahir, N.A.R. and Schenk, P.M., 2021. Coriander/soybean intercropping and mycorrhizae application lead to overyielding and changes in essential oil profiles. *European Journal of Agronomy*, 126: 126283.
- Yang, F., Huang, S., Gao, R., Liu, W., Yong, T., Wang, X., Wu, X. and Yang, W., 2014. Growth of soybean seedlings in relay strip intercropping systems in relation to light quantity and red: far-red ratio. *Field Crops Research*, 155: 245-253.
- Yilmaz, S., Ozel, A., Atak, M. and Erayman, M., 2015. Effects of seeding rates on competition indices of barley and vetch intercropping systems in the eastern Mediterranean. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 39: 135-143.
- Zhang, R., Mu, Y., Li, X., Li, S., Sang, P., Wang, X., Wu, H. and Xu, N., 2020. Response of the arbuscular mycorrhizal fungi diversity and community in maize and soybean rhizosphere soil and roots to intercropping systems with different nitrogen application rates. *Science of the Total Environment*, 740: 139810.
- Zhou, T., Wang, L., Sun, X., Wang, X., Pu, T., Yang, H., Rengel, Z., Liu, W. and Yang, W., 2021. Improved post-silking light interception increases yield and P-use efficiency of maize in maize/soybean relay strip intercropping. *Field Crops Research*, 262: 108054.
- yield of *Satureja khuzistanica* Jamzad. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 37(2): 193-213.
- Morshedloo, M.R., Maggi, F., Neko, H.T. and Aghdam, M.S., 2018. Sumac (*Rhus coriaria* L.) fruit: essential oil variability in iranian populations. *Industrial Crops and Products*, 111: 1-7.
- Naghizadeh, M. and Moradi, R., 2021. Study on the radiation use efficiency and quantitative and qualitative yield in lavender and chamomile additive intercropping under the influence of cow manure and chemical fertilizer. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 37(1): 13-29.
- Oliviero, M., Romilde, I., Beatrice, M.M., Matteo, V., Giovanna, N., Consuelo, A., Claudio, C., Giorgio, S., Filippo, M. and Massimo, N., 2016. Evaluations of thyme extract effects in human normal bronchial and tracheal epithelial cell lines and in human lung cancer cell line. *Chemico-Biological Interactions*, 256: 125-133.
- Ormeno, E. and Fernandez, C., 2012. Effect of soil nutrient on production and diversity of volatile terpenoids from plants. *Current Bioactive Compounds*, 8(1): 71-79.
- Raza, M.A., Gul, H., Wang, J., Yasin, H.S., Qin, R., Khalid, M.H.B., Naeem, M., Feng, L.Y., Iqbal, N., Gitari, H. and Ahmad, S., 2021. Land productivity and water use efficiency of maize-soybean strip intercropping systems in semi-arid areas: a case study in Punjab province, Pakistan. *Journal of Cleaner Production*, 308: 127282.
- Rehman, R. and Asif Hanif, M., 2016. biosynthetic factories of essential oils: the aromatic plants. *Natural Products Chemistry and Research*, 4(4): 1000227.
- Roozpeikar, Z., Jowkar, M., Taei-Semiromi, J. and Parsa Motlagh, B., 2020. Effect of additive intercropping system on yield, yield components and efficiency indices of *Hyssopus officinalis* and *Plantago ovate* Forsk. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 30(4): 1-17.
- Semba, R.D., Ramsing, R., Rahman, N., Kraemer, K. and Bloem, M.W., 2021. Legumes as a sustainable source of protein in human diets. *Global Food Security*, 28: 100520.
- Seyed Sharifi, R. and Seyed Sharifi, R., 2020. Effects of starter nitrogen, methanol and bio fertilizers. application on yield, nodulation and grain filling period of rainfed lentil. *Journal of Crops Improvement*, 22(3): 445-460.
- Sharma, A., Bajaj, P., Bhandari, A. and Kaur, G., 2020. From ayurvedic folk medicine to preclinical neurotherapeutic role of a miraculous herb, *Tinospora cordifolia*. *Neurochemistry International*, 141: 104891.

Effects of Myco-Root biofertilizer application on quantity and quality of *Thymus vulgaris* L. essential oil in intercropping with *Cicer arietinum* L.

M. Ahmadvand¹, A. Javanmard^{2*}, M. Haghaninia³ and M.R. Morshedloo⁴

1- M.Sc. student of Agroecology, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran

2*- Corresponding author, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran, E-mail: a.javanmard@maragheh.ac.ir

3- Ph.D. student of Agrotechnology-Crop Ecology, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran

4- Department of Horticulture Science, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran

Received: November 2021

Revised: March 2022

Accepted: March 2022

Abstract

Intercropping systems and biofertilizers application play an important role in improving the quantity and quality of plant products. In this regard, to evaluate the effects of Myco-Root biofertilizer on the quantitative and qualitative traits of *Thymus vulgaris* L. in intercropping with *Cicer arietinum* L., an experiment was carried out as a randomized complete block design (RCBD) at the faculty of Agriculture, University of Maragheh during 2020 growing season. Treatments included thyme sole culture, thyme sole culture inoculated with Myco-Root, chickpea sole culture, chickpea sole culture inoculated with Myco-Root, intercropping of one row chickpea+one row thyme (1:1), planting pattern of 1:1 inoculated with Myco-Root, intercropping of two rows chickpea+one row thyme (2:1), and planting pattern of 2:1 inoculated with Myco-Root. The results demonstrated that the highest seed ($751.40 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) and biological ($1645.6 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) yields of chickpea were obtained in the chickpea monoculture inoculated with Myco-Root, which was not significantly different from planting pattern of 2:1 inoculated with Myco-Root. Moreover, the highest dry matter yield of thyme ($189.47 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) was achieved in the sole culture with application of mycorrhizal fungus. Also, the highest percentage (1.69) and essential oil yield ($3.31 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) of thyme was obtained in planting pattern of 1:1 with application of mycorrhizal fungus in first harvest. Thymol, γ -terpinene, and *p*-cymene were recognized as the main essential oil compounds. The highest percentage of thymol and γ -terpinene was obtained in planting pattern of 1:1 inoculated with mycorrhizal fungus. Also, the highest agronomical (land equivalent ratio, area harvest equivalent ratio, area time equivalent ratio, and land use efficiency) and economic (intercropping advantage, monetary advantage index, and system productivity index) indices were achieved in the intercropping ratio of 2:1 and 1:1 with application of Myco-Root biofertilizer, respectively. In general, the results showed that the Myco-Root biofertilizer application in intercropping, especially the planting pattern of 1:1, could improve the quantity and quality of thyme essential oil.

Keywords: Thymol, sustainable agriculture, biofertilizer, essential oil percentage, seed yield.