تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک/ جلد پنجم، شماره دوم، پاییز ۱۴۰۲، ص ۵۰۱-۵۲۳

مقاله پژوهشی

بررسی اثرات تلقیح قارچ‌های مایکوریزا بر عملکرد و اجزای عملکرد اکوتیپ‌های مختلف سیاه‌دانه

سید حمید رضا رمضانی[1*]، مرتضی قربانی[2]

۱- گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی ، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- گروه زیست شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

* مسئول مکاتبه: hrramazani@birjand.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱ /۰۲/۱۷ **DOI: 10.22034/CSRAR.2023.302907.1127**

چکیده

کاربرد کودهای بیولوژیک به ویژه قارچ‌های مایکوریزا از مهم‌ترین راهبردهای تغذیه‌ای در کشاورزی پایدار و مدیریت بوم‌نظام‌های کشاورزی می‌باشد. بر همین اساس، پژوهش حاضر به منظور بررسی اثرات دو گونه قارچ مایکوریزا بر عملکرد و اجزای عملکرد سه اکوتیپ ایرانی سیاهدانه (سرایان، همدان و شهرکرد) بصورت فاکتوریل در قالب بلوک کامل تصادفی در سه تکرار در دانشکده کشاورزی سرایان اجرا شد. نتایج تجزیه واریانس نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین اکوتیپ‌های سیاهدانه برای اکثر صفات مورد بررسی بود. با این‌حال، هیچ‌کدام از صفات فوق تحت تأثیر برهمکنش بین تیمارهای مورد بررسی در پژوهش حاضر (اکوتیپ × مایکوریزا) قرار نگرفتند. بیشترین ارتفاع گیاه، ارتفاع اولین شاخه فرعی، طول ریشه، ارتفاع اولین کپسول و طول کپسول برای اکوتیپ همدان، بیشترین تعداد دانه در کپسول، عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه و عملکرد کاه برای اکوتیپ شهرکرد و بیشترین وزن هزار دانه و شاخص برداشت برای اکوتیپ سرایان حاصل شد. از طرفی، کاربرد هر دو گونه قارچ مایکوریزا موجب افزایش معنی‌دار صفات طول کپسول، قطر کپسول و تعداد شاخه گل‌دهنده اکوتیپ‌های مورد مطالعه نسبت به تیمار شاهد شدند. در تجزیه ضرایب مسیر، صفات تعداد شاخه گل‌دهنده و عملکرد بیولوژیک اثرات مستقیم مثبتی بر صفت عملکرد دانه داشتند و بیشترین اثر برای صفت عملکرد بیولوژیک به دست آمد. در مقابل، بیشترین اثر مستقیم منفی بر روی صفت عملکرد دانه مربوط به عملکرد کاه بود؛ لذا براساس نتایج پیشنهاد می‌شود اکوتیپ/ژنوتیپ‌هایی که از نظر صفات عملکرد بیولوژیک و کاه بهتر هستند را برای گزینش اکوتیپ‌های برتر مورد استفاده قرار دهند.

واژه‌های کلیدی: تجزیه علیت، عملکرد بذر، قارچ همزیست، گیاه دارویی

مقدمه

در سال‌های اخیر، توجه زیادی به مصرف گیاهان دارویی و محصولات مشتق شده از آن‌ها شده است (Niazian *et al.*, 2017). سیاهدانه (*Nigella sativa* L.) گیاهی دارویی از خانواده آلاله (*Ranunclaceae*)، دو لپه، علفی، یک‌ساله، بومی غرب آسیا، سازگار با نواحی خشک و دارای میوه‌ای کپسولی شکل می‌باشد که درون هر کپسول تعداد زیادی دانه‌های سیاه و معطر وجود دارد (Khoramdel *et al.*, 2008; Mirzaei and Mirzaghaderi, 2017). دانه سیاهدانه غالباً حاوی پروتئین (۲۳ درصد)، روغن (۳۹ درصد) و سایر ترکیبات است (D'Antuono *et al.*, 2002; Shah and Kasturi, 2003) و روغن آن غنی از اسیدهای چرب لینولئیک، اولئیک و پالمیتیک می‌باشد (D'Antuono *et al.*, 2002; Shah and Kasturi, 2003). برای این گیاه خواص متعدد دارویی (از قبیل شیرآوری، ضد نفخ، ضد انگل، ضد صرع، ضد ویروس، ضدباکتری، ضد سرطان، مسکن، کاهش‌دهنده قند خون، شل‌کننده عضلات، سیتوتوکسیک و محرک ایمنی) ذکر شده است (Boskabady and Shirmohammadi, 2002; Mouhajir *et al.*, 1999) که به ترکیبات کینونی مثل تیموکینونودی تیموکینون در دانه نسبت داده شده‌اند (Ghosheh *et al.*, 1999).

جهت بهبود رشد و نمو، جذب مواد مغذی توسط گیاهان و افزایش عملکرد آن‌ها، محققان به دنبال جایگزین‌های مناسبی برای کودهای شیمیایی هستند و استفاده از قارچ مایکوریزا بعنوان یکی از جایگزین‌های زیستی مهم در جهت حذف یا کاهش قابل ملاحظه مصرف نهاده‌های شیمیایی گزارش شده است (Cely *et al.*, 2016; Javanmard and Shekari, 2016; Sadat- Shamshirgaran *et al.*, 2016; Rahimi *et al.*, 2019) که می‌توانند عناصر غذایی را از طریق همزیستی با ریشه گیاهان در جهت بهبود شرایط رشدی گیاهان تنظیم کند و در ارائه خدمات اکولوژیکی متنوعی از قبیل افزایش تنوع

زیستی، تشدید فعالیت‌های حیاتی، بهبود کیفیت و حفظ سلامت محیط زیست نقش‌های مهمی ایفا کنند (Chen *et al*., 2018; Begum *et al*., 2019). هم‌چنین، قارچ مایکوریزا نقش‌های مهمی در افزایش ثبات ذرات خاک، تحمل به انواع تنش‌ها (Tadaion and Zaree, 2014)، انحلال بیشتر مواد غذایی معدنی (Helgason and Fitter, 2009)، جذب مواد غذایی (Mohammadi and Rizi, 2017)، تغییر مورفولوژی ریشه (Ying-ning *et al*., 2014)، کلون‌زایی ریشه (Campo *et al*., 2020) و رشد ریشه (Zhang *et al*., 2019) ایفا می‌کنند. مطالعات متعددی اثرات مثبت قارچ‌های مایکوریزا بر گیاهان مختلف را مورد بررسی قرار داده است. در بررسی نشان داده شد که همزیستی مایکوریزایی سبب افزایش معنی‌دار صفات ارتفاع گیاه، طول ریشه، وزن تر اندام‌های هوایی، وزن تر ریشه، محتوای پرولین و قندهای محلول در گیاه سیاهدانه شد (Shamshirgaran *et al,* 2016). اثرات دو سویه قارچ مایکوریزا (*Rhizophagus intraradices* و *Rhizophagus mosseae*) بر ارتفاع بوته، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که هر دو سویه سبب افزایش معنی‌دار صفات مورد مطالعه نسبت به تیمار شاهد شدند و بهبود صفات فوق به جذب و حلالیت بیشتر فسفر تحت کاربرد قارچ‌های مایکوریزا نسبت داده شد (Abadi *et al*., 2015). در پژوهش دیگری، اثرات کاربرد کودهای بیولوژیک بویژه مایکوریزا بر گیاه سیاهدانه مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که تلقیح بذور سیاهدانه با مایکوریزا سبب افزایش ارتفاع بوته، وزن خشک گیاه، محتوای فنول و جذب عناصر توسط گیاه شد (Darakeh *et al*., 2021). پژوهش‌گران فوق نیز بهبود شرایط رشد و نموی سیاهدانه را به حلالیت و جذب بیشتر عناصر معدنی (به ویژه فسفر و نیتروژن) نسبت دادند. هم‌چنین، اظهار شده است که افزایش ماده خشک گیاهان تلقیح شده با قارچ‌های مایکوریزا احتمالاً ناشی از افزایش غلظت آب و مواد مغذی، انتقال کارا و بهتر این مواد در اندام‌های مختلف گیاهی و افزایش فتوسنتز گیاهی می‌باشد که منجر به سنتز مواد فتوسنتزی در گیاهان می‌شود (Tadayyon and Soltanian, 2019). در این راستا، گزارش شده است که قارچ‌های میکوریزا با داشتن شبکه هیفی گسترده و افزایش سطح ریشه و سرعت جذب آب و مواد غذایی توسط ریشه، کارایی گیاهان را در جذب آب و عناصر غذایی بویژه عناصر فسفر، روی، مس افزایش داده و موجب بهبود رشد آن‌ها می‌شوند (Masomi Zavarian et al., 2015).

علاوه بر موارد فوق، باتوجه به وابستگی روزافزون مردم به محصولات کشاورزی و لزوم تولید ارقام اصلاح‌شده گیاهان، لازم است ذخایر ژنتیکی گیاهی مورد بررسی قرار گیرند؛ از این‌رو، درک تنوع ژنتیکی و هم‌چنین تنوع ژنتیکی قابل دسترس در برنامه‌های اصلاحی هر محصول در جهت بهبود محصولات حائز اهمیت است (Litrico and Violle, 2014; Swarup *et al*., 2021; Pandey *et al*., 2021). جهت تعیین و برآورد تنوع ژنتیکی گیاهان می‌توان از روش‌های مختلفی مانند نشانگرهای مورفولوژیکی، بیوشیمیایی، سیتوژنتیکی و مولکولی استفاده نمود (López-Caamal and Tovar-Sánchez, 2014; Yaman, 2022). با این‌حال، این نشانگرها دارای معایب و مزایای بخصوصی هستند و باید در زمان مناسب از آن‌ها استفاده گردد. در این بین، نشانگرهای مورفولوژیکی به دلیل سهولت در استفاده، کم‌هزینه بودن و عدم نیاز به ابزار خاص در ارزیابی‌های مقدماتی استفاده می‌شوند و می‌توانند رویکردی عمومی در بررسی تنوع ژنتیکی باشند (Bhandari *et al*., 2017; Nadeem *et al*., 2018).

در بررسی خصوصیات مورفولوژی چندین گونه *Nigella*، تنوع زیادی در بین گونه‌های مورد بررسی از نظر صفات زراعی گزارش گردید (Ilcim *et al*., 2006). در مطالعه ارزیابی دو گونه *N. sativa* و *N. damascene* در شمال ایتالیا از نظر عملکرد و اجزای عملکرد، تنوع بالایی برای صفات بیوماس، تعداد دانه در کپسول، عملکرد روغن، عملکرد دانه و وزن هزار دانه مشاهده شد و مشخص شد که تعداد دانه در کپسول در هر دو گونه مورد بررسی دارای بیشترین اثر بر عملکرد دانه بود (D'Antuono *et al*., 2002). بررسی تنوع زراعی و آناتومیکی ۲۸ توده سیاهدانه در مناطق مختلف ایران نشان داد که شاخص برداشت و عملکرد بیولوژیکی بیشترین توارث‌پذیری و بازده ژنتیکی را داشتند و از میان صفات مورد بررسی، عملکرد بیولوژیکی و تعداد انشعابات ساقه تغییرات عملکرد دانه را توجیه کردند (Faravani *et al*., 2006).

براساس شواهد، بسیاری از گیاهان دارویی و ادویه‌ای سطح زیرکشت و میزان تولید قابل قبولی در مناطق رویش خود ندارند و معمولاً به روش سنتی جمع‌آوری شده تا جواب‌گوی بازار

مصـرف باشـند (Dalkani *et al*., 2012). بنابراین، با توجه به تقاضـای در حال افزایش گیاهان دارویی و مشـتقات آن‌ها، توجه به اصـلاح کمی و کیفی این گیاهان ضـروری اسـت. در همین راسـتا، اسـتفاده از کودهای زیسـتی در زراعت گیاهان دارویی می‌تولند کیفیت مواد گیاهی اسـتحصـالی را افزایش دهد. بر همین اسـاس، پژوهش حاضـر با هدف بررسـی اثرات تلقیح دو گونه قارچ مایکوریزا بر اکوتیپ‌های بومی گیاه سیاه‌دانه در جهت افزایش عملکرد و اجزای عملکرد و پیدا کردن مهم‌ترین صـفات مؤثر بر عملکرد دانه انجام شد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصـادفی در ۳ تکرار در یک مزرعه تحقیقاتی وابسـته به دانشـکده کشـاورزی سـرایان با طول جغرافیایی ۵۱ درجه و۳۱ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۵۱ دقیقه و ارتفاع ۱۴۸۴ متر از سطح دریا اجرا شد. مهم‌ترین پارامترهای اقلیمی در طول دوره کاشت تا برداشت اکوتیپ‌های سیاهدانه در پژوهش حاضر در جدول ۱ ارائه شـده‌اند و با اطلاعات سـال‌های قبل مورد مقایسه قرار گرفته است.

جدول ۱- تغییرات مهم‌ترین پارامترهای اقلیمی منطقه مورد مطالعه

Table 1- Changes in the most important climatic parameters of the study area

پارامتر/سال و ماه Parameter/Year and Month	میزان بارندگی کل Total rainfall and / or snowmelt(mm)		میانگین رطوبت نسبی Average relative humidity(٪)		دمای کمینه Minimum temperature(°C)		دمای بیشینه Maximum temperature(°C)		میانگین دما Average Temperature(°C)		میانگین سرعت باد Average wind speed(Km/h)	
	2011-2017	2018	2011-2017	2018	2011-2017	2018	2011-2017	2018	2011-2017	2018	2011-2017	2018
اردیبهشت April	32.66	42.43	30.53	36.1	12.4	11.9	24.60	24.3	19.26	18.4	11.63	13.1
خرداد May	5.80	23.11	24.24	26.3	18.24	15.7	31.51	28.5	25.36	22.6	12.50	12.4
تیر June	0.83	0	17.26	14.5	21.90	22.1	35.73	36.3	29.51	30	12.56	11.8
مرداد July	0	0	17.49	13.2	22.71	24.6	36.34	37	30.24	31.4	13.46	14.4
شهریور August	0.04	0	17.39	16.2	20.81	21.2	34.53	35.6	28.20	29.2	13.01	12.8
مهر September	0	15.2	19.51	15	16.83	16.6	32.09	31.9	24.46	24.8	11.61	14.5
کل Total	1.85	19.56	26.84	32.5	11.70	11	26.04	23.4	18.84	17.3	10.73	13.1

تیمارهای آزمایش شامل تلقیح سویه‌های مایکوریزا در سه سـطح (عدم تلقیح، تلقیح بذور با گونه‌های *Rhizophagus fasciculatum* و *Rhizophagus mosseae*) و فاکتور اکوتیپ گیاهی سـیاهدانه در سـه سـطح (سـرایان، همدان و شـهرکرد) بودند. قابل ذکر اسـت که ماده‌های تلقیحی مورد اسـتفاده در پژوهش حاضـر بصـورت تلقیح شـده روی ریشـه شـبدر بود که از شرکت زیست فناور توران مستقر در پارک علم و فناوری استان سمنان تهیه شـدند. پس از آماده‌سـازی بسـتر کشـت، کرت‌هایی در ابعاد ۲×۳ متر با فاصـله یک متر بین بلوک‌ها و ۰/۵ متر بین کرت‌ها در نظر گرفته شـدند. پس از آن، در هر کرت ۵ ردیف کاشـت با فواصـل ۳۰ سـانتی‌متر (۲۵۰ بوته در متر مربع) تهیه شـدند و بذرها در هر کرت آزمایشـی در عمق ۲-۱ سـانتی‌متری سـطح خاک و به صـورت خشـکه‌کاری در اردیبهشـت‌ماه سـال ۱۳۹۷ کاشت شدند. پیش از عملیات کاشت، ابتدا ۵ گرم بذر از هر اکوتیپ جهت کاشت جداسازی شد. در هنگام کاشت نیز ۳۰ گرم از هر کدام از زادمایه‌ها (Zamani et al., 2019) که حاوی ۱۰۰ اسپور به ازای هر گرم زادمایه بود را به ازای هر بوته توزین شـدند و پس از آن، زادمایه‌ها با ۹۰۰ گرم خاکبرگ مخلوط و به فاصله سه سانتی‌متر پایین‌تر از محل استقرار بذرها (به صورت شیاری) قرار داده شد و روی بذرها با ماسه پوشانده شد. علاوه بر این، با توجه به اینکه زادمایه‌های تلقیحی قارچ مایکوریزای مورد بررسی در پژوهش حاضر حاوی مواد غذایی تقویتی دیگری

به غیر از زادمایه قارچ می‌باشند، مقداری از زادمایه‌ها (هم وزن با زادمایه‌های مورد استفاده تیمارهای حاوی مایکوریزا) در اتوکلاو استریل شد و به‌منظور یکسان‌سازی اثرات مواد غذایی موجود در ماده تلقیحی فرموله شده، بذور تیمار شاهد نیز با آن‌ها آغشته شدند. هم‌چنین، در طول فصل رشد نیز عملیات زراعی از جمله آبیاری و وجین علف‌های هرز بطور دستی برای تمامی کرت‌ها بصورت یکسان انجام گرفت. دو ماه پس از عملیات کاشت (در زمان ۵۰٪ گل‌دهی)، محتوای کلروفیل کل به روش آرنون (Arnon, 1949) اندازه‌گیری شد و در مرحله ۵۰٪ دانه‌بندی تعداد ۵ بوته از هر کرت انتخاب شد و صفات ارتفاع بوته، ارتفاع تا اولین شاخه فرعی، ارتفاع اولین کپسول، طول ریشه، قطر ساقه، تعداد شاخه فرعی، تعداد شاخه گل‌دهنده، طول کپسول، قطر کپسول، تعداد کپسول در بوته و تعداد دانه در کپسول مورد ارزیابی قرار گرفتند. سایر صفات شامل وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت و عملکرد کاه پس از رسیدگی کامل و برداشت کل بوته‌های هر کرت اندازه‌گیری شد.

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

Table 2- Some physical and chemical properties of the soil of experiment site

بافت خاک Soil Texture	رس Clay(٪)	سیلت Silt(٪)	شن Sand(٪)	کربن آلی O.C.(٪)	اسیدیته pH	میزان شوری EC(dS/m)	نیتروژن در دسترس Available N(٪)	فسفر Phosphorus(mg/l)	پتاسیم Potassium(mg/l)
لوم Loam	22	22.5	48.5	0.13	8.49	2.27	0.02	2.07	149.9

قابل ذکر است که قبل از اجرای آزمایش، نمونه‌ای مرکب از عمق ۲۵-۰ سانتی‌متری خاک مزرعه تهیه و جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه خاکشناسی ارسال شد و پس از تعیین خصوصیات مذکور (جدول ۲)، مواد غذایی مورد نیاز (شامل ۷۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن در هکتار از منبع کودی اوره ۴۶٪، ۵۰ کیلوگرم در هکتار فسفر از منبع کودی P_2O_5 و ۱۷۰ کیلوگرم در هکتار پتاسیم از منبع کودی K_2O) براساس تجزیه خاک در اختیار گیاهان مورد بررسی قرار گرفت. بعبارت دیگر، تمامی کودهای فسفر و پتاسیم مورد نیاز به همراه یک‌سوم کود نیتروژن (۲۵ کیلوگرم در هکتار از منبع کودی اوره ۴۶٪) در زمان کاشت و مابقی کودهای نیتروژنه با مشاهده علائم کمبود و در طول دوره رشدی گیاه مورد استفاده قرار گرفتند.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

داده‌های حاصل از صفات اندازه‌گیری شده با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و مقایسه میانگین‌ها به وسیله آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ انجام شد. هم‌چنین، تجزیه رگرسیون گام به گام نیز با استفاده از نرم‌افزار SPSS-ver26 انجام شد و مدل مربوطه به دست آمد. علاوه بر این، تجزیه همبستگی ساده صفات و تجزیه ضرایب مسیر بوسیله نرم‌افزار SAS 9.4 و نمودارها با نرم‌افزار Excell ترسیم شدند. قابل ذکر است که نرمال بودن داده‌ها در پژوهش حاضر نیز از طریق آزمون‌های توزیع نرمال کولموگراف-اسمیرنوف و شاپیرو-ویلک انجام گرفت.

نتایج

ارتفاع گیاه، قطر ساقه، تعداد شاخه فرعی، ارتفاع اولین شاخه فرعی و طول ریشه

نتایج حاصل از تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان دادند که تیمار اکوتیپ گیاهی به ترتیب اثرات معنی‌داری در سطوح احتمال ۵٪، ۵٪ و ۱٪ بر صفات ارتفاع بوته، ارتفاع تا اولین شاخه فرعی و طول ریشه اکوتیپ‌های مورد بررسی گیاه دارویی سیاهدانه داشت، ولی بین صفات قطر ساقه و تعداد شاخه فرعی در اکوتیپ‌های سرایان، همدان و شهرکرد اختلاف معناداری مشاهده نشد. علاوه بر این، براساس نتایج نشان دادند که تلقیح مایکوریزا و برهمکنش بین اکوتیپ‌ها × تلقیح مایکوریزا سبب ایجاد اختلاف معنی‌دار در صفات فوق نشدند. از طرفی، در بررسی اثرات تیمارهای مورد بررسی در پژوهش حاضر بر محتوای کلروفیل برگ گیاه دارویی سیاهدانه مشاهده شد که محتوای کلروفیل سطحی در سطح احتمال ۵٪ تحت تأثیر تلقیح مایکوریزا قرار گرفت لیکن اختلاف معنی‌داری در محتوای

کلروفیل در بین اکوتیپ‌های گیاهی سیاهدانه و برهمکنش اکوتیپ‌های گیاهی × تلقیح مایکوریزا مشاهده نشد (جدول ۳).

جدول ۳- تجزیه واریانس برخی از صفات مورفولوژیک و بیوشیمیایی اکوتیپ‌های سیاهدانه تحت تأثیر گونه‌های کود مایکوریزا

Table 3- Analysis of variance of some morphological and biochemical traits of black seed ecotypes under mycorrhiza fertilizer species

منابع تغییرات S. O. V.	درجه آزادی df	طول ریشه Root height	ارتفاع تا اولین شاخه فرعی Height to first branch	تعداد شاخه فرعی No. branches	قطر ساقه Stem diameter	ارتفاع گیاه Plant height	محتوای کلروفیل Cholorophyl content
بلوک Block	2	3.31 ns	9.25 ns	0.37 ns	0.72 *	37.21 *	0.37 ns
اکوتیپ Ecotype (E)	2	29.4 **	64.38 **	0.59 ns	0.34 ns	255.1 **	3.37 ns
مایکوریزا Mycohriza (M)	2	6.26 ns	2.06 ns	0.81 ns	0.15 ns	8.97 ns	9.38 *
اکوتیپ × مایکوریزا E×M	4	7.58 ns	1.53 ns	0.71 ns	0.04 ns	7.35 ns	6.27 ns
خطا Error	16	4.44	3.12	1.91	0.13	7.19	6.19
ضریب تغییرات CV.(%)		17.68	23.87	25.00	19.27	16.21	22.50

ns: عدم معنی‌داری؛ * و **: به ترتیب معنی‌داری در سطوح احتمال ۵٪ و ۱٪

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

مقایسه میانگین صفات مندرج در جدول ۴ نشان داد که بین مقادیر صفات مورفولوژیک اکوتیپ‌های مختلف سیاهدانه در پژوهش حاضر اختلاف معناداری وجود داشت به‌طوری‌که بیشترین و کمترین مقادیر در صفات ارتفاع بوته (۱۹/۸۵ و ۱۰/۷۸ سانتی‌متر)، ارتفاع اولین شاخه فرعی (۸/۹۹ و ۴/۳۱ سانتی‌متر) و طول ریشه (۱۳/۶۳ و ۱۰/۰۳ سانتی‌متر) به ترتیب برای اکوتیپ‌های همدان و سرایان به ثبت رسید. به طور کلی، نتایج جدول ۳ نشان می‌دهند که اکوتیپ همدان در مقایسه با اکوتیپ‌های سرایان و شهرکرد به ترتیب افزایشی معادل ۸۲/۶۱ و ۴/۶۴ درصد در ارتفاع بوته، ۱۰۸/۵۹ و ۱/۱۳ درصد در ارتفاع تا اولین شاخه فرعی و ۳۵/۸۹ و ۱۲/۹۳ درصد در طول ریشه داشت.

جدول ۴- مقایسه میانگین برخی صفات مورفولوژیک و اجزای عملکرد اکوتیپ‌های مختلف گیاه دارویی سیاهدانه

Table 4- Means comparison of some morphological traits and yield components of different ecotypes of black seed

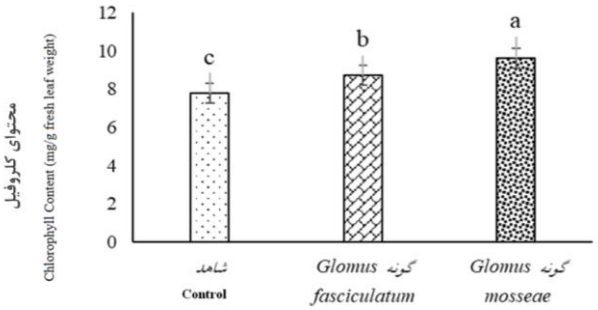
اکوتیپ Ecotypes		ارتفاع گیاه Plant height (cm)	ارتفاع اولین شاخه فرعی Height of first branch (cm)	طول ریشه Root length (cm)
Sarayan	سرایان	10.78 b	4.31 b	10.03 b
Hamadan	همدان	19.85 a	8.99 a	13.63 a
Shahrecord	شهرکرد	18.97 a	8.89 a	12.07 a

حروف غیر مشابه در هر ستون، نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین تیمارها می‌باشند.

In each column, means with the same letter are not significantly different from each other.

در بررسی اثرات تیمارهای مختلف مایکوریزا بر محتوای کلروفیل برگ سیاه‌دانه (شکل ۱)، نتایج نشان می‌دهند که بیشترین محتوای کلروفیل (۹/۶۱ میلی‌گرم بر گرم وزن تر بافت برگ) تحت کاربرد کود مایکوریزای حاوی گونه *Rhizophagus mosseae* حاصل شد و اختلاف معنی‌داری با محتوای کلروفیل برگ در سایر تیمارهای کودی داشت. در طرف مقابل، کمترین میزان معنی‌دار محتوای کلروفیل برگ (۷/۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) تحت کاربرد تیمار شاهد به دست آمد. به طور کلی، براساس محاسبات آماری شکل ۱ استنتاج می‌شود که کود مایکوریزای حاوی گونه *Rhizophagus mosseae* در مقایسه با

تیمار شاهد و کاربرد کود مایکوریزای حاوی گونه *Rhizophagus fasciculatum* به ترتیب کلروفیل سطحی بیشتری معادل ۲۳/۲۱ و ۱۰/۲۱ درصد حاصل شد (شکل ۱).



شکل ۱- اثرات تلقیح مایکوریزا بر میزان کلروفیل برگ سیاهدانه (حروف غیر مشابه، نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین تیمارها می‌باشند).

Figure 1- Effects of application of fertilizers containing mycorrhizal on the amount of chlorophyll in black seed leaves Different letters indicated significant difference among treatments.

تعداد شاخه گل‌دهنده، ارتفاع تا اولین کپسول، طول کپسول، قطر کپسول، تعداد کپسول در گیاه و تعداد دانه در کپسول

بر اساس نتایج مندرج در جدول ۵، مشاهده می‌شود که صفات ارتفاع اولین کپسول و طول کپسول در سطح احتمال ۱٪ و صفت تعداد دانه در کپسول در سطح احتمال ۵٪ تحت تأثیر اثرات اصلی اکوتیپ‌های سرایان، همدان و شهرکرد قرار گرفتند و اختلاف معناداری را نشان دادند ولی کاربرد گونه‌های مختلف کود مایکوریزا و برهمکنش اکوتیپ‌های مختلف سیاهدانه × گونه‌های مختلف مایکوریزا سبب ایجاد اختلاف معنی‌دار در صفات مذکور نشدند. از طرفی، نتایج نشان دادند که تعداد شاخه گل‌دهنده، طول کپسول و قطر کپسول در سطح احتمال ۵٪ تحت تأثیر کاربرد تیمارهای مختلف کود مایکوریزا قرار گرفتند؛ با این‌حال، کاربرد تیمار اکوتیپ و برهمکنش اکوتیپ‌های سیاهدانه × سویه‌های مایکوریزا بر صفات فوق اختلاف معناداری را ایجاد نکردند (جدول ۵).

جدول ۵- تجزیه واریانس برخی از صفات اجزاء عملکرد اکوتیپ‌های مختلف گیاه دارویی سیاهدانه تحت گونه‌های کود مایکوریزا

Table 5- Variance analysis of some yield components of different ecotypes of black seed under Mycorrhiza fertilizer species

منابع تغییرات S. O. V.	درجه آزادی df	تعداد دانه در کپسول No. seeds per capsuls	تعداد کپسول در گیاه No. capsuls per plant	قطر کپسول Capsule diameter	طول کپسول Capsule length	ارتفاع اولین کپسول Height of first capsule	تعداد شاخه گل‌دهنده No. of flowering branches
بلوک Block	2	315.52 ^{ns}	0.57 ^{ns}	1.89 ^{ns}	1.01 ^{ns}	39.86 **	0.21 ^{ns}
اکوتیپ Ecotype(E)	2	1307.39 *	0.21 ^{ns}	15.65 ^{ns}	6.69 **	213.78 **	1.70 ^{ns}
مایکوریزا Mycohriza(M)	2	119.06 ^{ns}	0.50 ^{ns}	0.41 *	2.20 *	8.38 ^{ns}	1.98 *
اکوتیپ × مایکوریزا E×M	4	148.85 ^{ns}	0.53 ^{ns}	1.77 ^{ns}	2.01 ^{ns}	5.36 ^{ns}	0.54 ^{ns}
خطا Error	16	229.34	1.89	1.50	1.60	6.19	1.67
ضریب تغییرات CV.(%)		21.00	19.00	15.29	16.01	15.53	24

ns: عدم معنی‌داری؛ * و **: به ترتیب معنی‌داری در سطوح احتمال ۵٪ و ۱٪

^{ns}: not significant; * and **: Significant at 5% and 1% probability levels, respectively

مقایسه میانگین اثرات اکوتیپ‌ها بر صفات جدول ۶ نشان داد که بیشترین مقادیر ارتفاع و طول کپسول (به ترتیب برابر با

۱۹/۱۶ و ۸/۳۸ سانتی‌متر) برای اکوتیپ همدان و کمترین ارتفاع (به ترتیب برابر با ۱۰/۴۱ و ۶/۹۸ سانتی‌متر) برای اکوتیپ سرایان بود و دارای اختلاف معنی‌داری با یکدیگر بودند. علاوه بر این، بیشترین تعداد دانه در کپسول (۵۳/۳۱ دانه) برای اکوتیپ شهرکرد به دست آمد اما اختلاف معناداری با تعداد دانه در کپسول اکوتیپ همدان (۵۲/۶۰ دانه در کپسول) نداشت در حالی‌که کمترین تعداد معنی‌دار دانه در کپسول (۳۲/۰۹ دانه) برای اکوتیپ سرایان به دست آمد. داده‌های جدول ۶ حاکی از این است که اکوتیپ همدان در مقایسه با اکوتیپ‌های سرایان و شهرکرد به ترتیب افزایش ۸۴/۰۵ و ۳/۵۱ درصدی برای صفت ارتفاع اولین کپسول و افزایش ۲۰/۰۶ و ۰/۶ درصدی برای صفت طول کپسول داشت. علاوه بر این، محاسبات آماری جدول مذکور به ترتیب نشان‌دهنده افزایش ۶۶/۱۳ و ۱/۳۵ درصدی تعداد دانه در کپسول اکوتیپ شهرکرد در مقایسه با اکوتیپ‌های سرایان و همدان بود (جدول ۶).

جدول ۶- مقایسه میانگین ارتفاع اولین کپسول، طول کپسول و تعداد دانه در کپسول اکوتیپ‌های مختلف گیاه دارویی سیاهدانه

Table 6- Mean comparison of the height of the first capsule, capsule length and number of seeds per capsule of different ecotypes of black seed

اکوتیپ Ecotypes	تعداد دانه در کپسول No. seeds per capsuls	طول کپسول Capsule length (cm)	ارتفاع اولین کپسول Height of first capsule (cm)
سرایان Sarayan	32.09 b	6.98 b	10.41 b
همدان Hamadan	52.60 a	8.38 a	19.16 a
شهرکرد Shahrecord	53.31 a	8.33 a	18.51 a

حروف غیر مشابه در هر ستون و هر تیمار، نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین تیمارها می‌باشند.

In each column, means with the same letter are not significantly different from each other.

مقایسه میانگین اثرات تلقیح مختلف مایکوریزا بر صفات تعداد شاخه گل‌دهنده، طول کپسول و قطر کپسول اکوتیپ‌های مختلف سیاهدانه در جدول ۷ نشان داده شده است. براساس نتایج، مشاهده می‌شود که بیشترین شاخه گل‌دهنده (۳/۹۴ شاخه) تحت کاربرد گونه *Rhizophagus mosseae* به دست آمد که اختلاف معنی‌داری با تعداد شاخه در تیمار شاهد (معادل با ۳/۳۶ شاخه) داشت. به عبارت دیگر، تحت کاربرد تیمار گونه *Rhizophagus mosseae*، تعداد شاخه فرعی در مقایسه با کاربرد تیمار شاهد و گونه *Rhizophagus fasciculatum* به ترتیب افزایشی معادل ۱۷/۲۶ و ۰/۵۱ درصد داشت. براساس نتایج مندرج در جدول ۷ نیز بیشترین طول کپسول در گیاه سیاهدانه تحت کاربرد گونه *Rhizophagus mosseae* به دست آمد که اختلاف معناداری با تعداد کپسول ناشی از کاربرد تیمار شاهد داشت. به طور کلی، محاسبات آماری جدول ۷ حاکی از این است که طول کپسول در گیاه سیاهدانه تحت کاربرد سویه *Rhizophagus mosseae* به ترتیب افزایشی معادل ۹/۲۳ و ۱/۲۴ درصد نسبت به تیمارهای شاهد و کاربرد سویه *Rhizophagus fasciculatum* داشت. علاوه بر نتایج فوق، در مطالعه اثرات اکوتیپ‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر، نتایج حاکی از افزایش معنی‌دار قطر کپسول‌های گیاه دارویی سیاهدانه تحت کاربرد گونه *Rhizophagus fasciculatum* نسبت به تیمار شاهد بود به‌طوری‌که هنگام استفاده از گونه *Rhizophagus fasciculatum* مایکوریزا، به ترتیب افزایش معناداری معادل ۵/۵۱ و ۳ درصد نسبت به تیمار شاهد و کاربرد گونه *Rhizophagus mosseae* مایکوریزا حاصل شد.

وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت و عملکرد کاه

تجزیه واریانس صفات وزن هزار دانه، عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه، شاخص برداشت و عملکرد کاه (جدول ۸) نشان داده شده است. براساس نتایج، مشاهده می‌شود که وزن هزار

دانه، شـاخص برداشـت و عملکرد کاه در سـطح احتمال ۱٪ و عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه در سـطح احتمال ۵٪ تحت تأثیر کاربرد تیمار اکوتیپ‌های مورد بررسـی در پژوهش حاضـر قرار گرفته‌اند، لیکن کاربرد تیمار تلقیح مایکوریزا و برهمکنش بین اکوتیپ × تلقیح مایکوریزا سـبب ایجاد اختلاف معنی‌دار صفات موجود در جدول ۵ نشد (جدول ۸).

در بررسـی اجزای عملکرد اکوتیپ‌های مختلف گیاه دارویی سـیاهدانه، نتایج جدول ۹ نشـان داد که تحت کاربرد اکوتیپ سرایان بیشترین وزن هزار دانه حاصل شد که برابر با ۲/۳۴ گرم بود و اختلاف معنی‌داری با وزن هزار دانه اکوتیپ‌های همدان (۱/۹۲ گرم) و شـهرکرد (۱/۹۳ گرم) داشـت. از طرفی، نتایج نشان دادند که بیشترین عملکرد بیولوژیک (۷۵/۸۰ گرم در متر مربع) تحت کاشـت اکوتیپ شـهرکرد به دسـت آمد که اختلاف معنی‌داری با عملکرد بیولوژیک اکوتیپ سـرایان (۴۸/۵۱ گرم در متر مربع) داشت. به طور کلی، براسـاس نتایج مشـاهده می‌شـود که اکوتیپ شـهرکرد در مقایسـه با اکوتیپ‌های سـرایان و همدان به ترتیب افزایشـی معادل ۵۶/۲۶ و ۱۶/۸۱ درصـد در عملکرد بیولوژیک داشت (جدول ۹).

در بین اکوتیپ‌های مورد بررسـی در پژوهش حاضـر، نتایج جدول ۹ نشـان می‌دهند که بیشـترین عملکرد دانه (برابر با ۲۶/۱۴ گرم در متر مربع) تحت کاربرد اکوتیپ شهرکرد به دست آمد و اختلاف معناداری با عملکرد دانه در سـایر اکوتیپ‌ها داشت. از طرفی، مشاهده می‌شود که کمترین عملکرد دانه (برابر با ۲۰/۷۰ گرم در متر مربع) تحت کاربرد اکوتیپ سرایان به ثبت رسـید لیکن اختلاف معناداری با عملکرد دانه اکوتیپ همدان (عملکرد دانه برابر با ۲۲/۳۳ گرم در متر مربع) نداشت.

جدول ۷- مقایسه میانگین اثرات تلقیح مایکوریزا برخی صفات اجزای عملکرد اکوتیپ‌های مختلف سیاهدانه

Table 7- Mean comparison of different mycorrhiza fertilizers on some traits of yield components of different black seed ecotypes

تلقیح مایکوریزا Mycorrhiza fertilizers	قطر کپسول Capsule diameter (cm)	طول کپسول Capsule length (cm)	تعداد شاخه گل‌دهنده No. of flowering branches
شاهد Control	7.81 b	7.48 b	3.36 b
Rhizophagus fasciculatum	8.24 a	8.04 a	3.92 a
Rhizophagus mosseae	8.00 ab	8.17 a	3.94 a

حروف غیر مشابه در هر ستون و هر تیمار، نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین تیمارها می‌باشند.

In each column, means with the same letter are not significantly different from each other.

جدول ۸- تجزیه واریانس عملکرد و اجزاء عملکرد اکوتیپ‌های مختلف سیاهدانه تحت تأثیر گونه‌های کود مایکوریزا

Table 8- Analysis of variance of yield and yield components of different ecotypes of black seed effected by Mycorrhiza fertilizer species

منابع تغییرات S. O. V.	درجه آزادی df	عملکرد کاه Straw yield	شاخص برداشت Harvest Index	عملکرد دانه Grain yield	عملکرد بیولوژیک Biological yield	وزن هزار دانه 1000-seed weight
بلوک Block	2	91.22 ns	101.40 *	203.85 ns	546.44 ns	0.034 ns
اکوتیپ Ecotype(E)	2	1116.9 **	225.69 **	96.69 *	1698.82 *	0.45 **
مایکوریزا Mycohriza(M)	2	49.11 ns	0.09 ns	21.52 ns	135.42 ns	0.026 ns
اکوتیپ × مایکوریزا E×M	4	286.30 ns	26.62 ns	214.14 ns	989.66 ns	0.037 ns
خطا Error	16	174.56	17.57	92.47	250.84	0.066
ضریب تغییرات CV.(%)		23.30	11.67	23.50	24.50	12.28

ns: عدم معنی‌داری؛ * و **: به ترتیب معنی‌داری در سطوح احتمال ۵٪ و ۱٪

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

جدول ۹- مقایسه میانگین صفات اجزای عملکرد و عملکرد اکوتیپ‌های مختلف گیاه دارویی سیاهدانه

Table 9- Mean comparisons of yield and yield components of different ecotypes of black seed effected by Mycorrhiza fertilizer species

اکوتیپ Ecotypes	عملکرد کاه Straw yield (gr/m^2)	شاخص برداشت Harvest index (%)	عملکرد دانه Grain yield (gr/m2)	عملکرد بیولوژیک Biological yield (gr/m2)	وزن هزار دانه 1000-seed weight(gr)
سرایان Sarayan	27.80 b	42.67 a	20.70 b	48.51 b	2.34 a
همدان Hamadan	42.56 a	34.41 b	22.33 b	64.89 ab	1.99 b
شهرکرد Shahrecord	49.64 a	34.51 b	26.16 a	75.80 a	1.93 b

حروف غیر مشابه در هر ستون و هر تیمار، نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار بین تیمارها می‌باشند

In each column, means with the same letter are not significantly different from each other.

از آنجا که شاخص برداشت، درصدی از عملکرد بیولوژیکی است که عملکرد اقتصادی را تشکیل می‌دهد، بیشترین میزان معنی‌دار شاخص برداشت (۴۲/۶۷ درصد) تحت کاربرد اکوتیپ سرایان به دست آمد و کمترین میزان آن (برابر با ۳۴/۴۱ درصد) تحت کاربرد اکوتیپ همدان به ثبت رسید. بر اساس محاسبات آماری جدول ۸ مشاهده می‌شود که اکوتیپ سرایان در مقایسه با اکوتیپ‌های همدان و شهرکرد به ترتیب افزایش معناداری معادل ۲۴/۰۱ و ۲۳/۶۵ درصد در میزان شاخص برداشت داشت. علاوه بر نتایج فوق، مشاهده شد که بیشترین عملکرد کاه (برابر با ۴۹/۶۴ گرم در متر مربع) تحت کاربرد اکوتیپ شهرکرد حاصل شد ولی اختلاف معناداری با میزان عملکرد کاه در اکوتیپ همدان (میزان عملکرد کاه برابر با ۴۲/۵۶ گرم در متر مربع) نداشت. از طرفی، کمترین میزان در عملکرد کاه (۲۷/۸۰ گرم در متر مربع) تحت کاربرد اکوتیپ سرایان به دست آمد و اختلاف معناداری با میزان عملکرد کاه تحت کاربرد سایر اکوتیپ‌ها داشت (جدول ۹).

تحلیل روابط بین صفات

تجزیه همبستگی بر مبنای هر دو فاکتور اکوتیپ و قارچ مایکوریزا و از طریق روش پیرسون مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشان دادند که صفت ارتفاع بوته با صفات محتوای کلروفیل، ارتفاع تا اولین شاخه فرعی، ارتفاع اولین کپسول، طول ریشه، قطرساقه، طول کپسول، قطر کپسول، و وزن کاه همبستگی مثبت و معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪ و با صفات تعداد دانه در کپسول و عملکرد بیولوژیک همبستگی مثبت و معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ داشت (جدول ۱۰). هم‌چنین، صفت ارتفاع تا اولین شاخه فرعی همبستگی مثبت و معنی‌داری با صفات ارتفاع اولین کپسول و قطر کپسول در سطح احتمال ۱٪ و با صفات طول ریشه، قطر ساقه و وزن کاه همبستگی مثبت و معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ داشت. در اکوتیپ‌های سیاهدانه مورد بررسی در پژوهش حاضر، بیشترین همبستگی مثبت و معنی‌دار صفت ارتفاع اولین کپسول با صفت قطر کپسول مشاهده شد ($r=۰/۷۲۶^{**}$). صفت مورفولوژیک طول ریشه به ترتیب با صفات قطر ساقه، تعداد شاخه فرعی، تعداد شاخه گل‌دهنده، عملکرد بیولوژیک، و وزن کاه همبستگی مثبت و معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪ و با صفات طول کپسول، قطر کپسول، تعداد کپسول در بوته، و عملکرد بذر همبستگی مثبت و معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ داشت (جدول ۱۰).

بیشترین همبستگی مثبت صفت تعداد شاخه فرعی با صفت تعداد کپسول در بوته مشاهده شد ($r=۰/۹۴۶^{**}$). صفت عملکرد دانه با صفات طول ریشه، تعداد شاخه فرعی، تعداد شاخه گل‌دهنده، تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول و شاخص برداشت همبستگی مثبت و معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ و با صفات عملکرد بیولوژیک و وزن کاه همبستگی مثبت و معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪ داشت بطوری‌که بیشترین همبستگی مثبت و معنی‌دار با صفت عملکرد بیولوژیک مشاهده شد ($r=۰/۹۴۳^{**}$) (جدول ۱۰).

همبستگی ساده صفت وزن کاه با صفات ارتفاع بوته، ارتفاع تا اولین کپسول، طول ریشه، تعداد دانه در کپسول و عملکرد بیولوژیک مثبت و معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ بود درحالی‌که

همبستگی این صفت با صفات ارتفاع تا اولین شاخه فرعی، قطر ساقه، تعداد شاخه گل‌دهنده، طول کپسول و قطر کپسول مثبت و معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ بود (جدول ۱۰).

تجزیه رگرسیون گام به گام

تجزیه رگرسیون گام به گام حاکی از توجیه ۱۰۰ درصد از تغییرات این صفت توسط صفات عملکرد بیولوژیک و عملکرد کاه بود. سایر صفات تأثیر معنی‌داری بر مدل رگرسیونی نداشته که از این جهت تفاوت بین سیاه‌دانه را نظر عملکرد دانه گیاه را می‌توان به تفاوت در این صفات نسبت داد. عملکرد بیولوژیک بیشترین میزان تغییرات عملکرد دانه را به خود اختصاص داد که معادل ۸۹٪ ارزیابی شد (جدول ۱۱).

جدول ۱۰- ضرایب همبستگی صفات مورفولوژیکی و عملکرد در اکوتیپ‌های مورد بررسی سیاهدانه

Table 10- Correlation coefficient of morphological traits and yield in studied ecotypes of black seed

صفات	ارتفاع گیاه	کلروفیل	ارتفاع اولین شاخه	ارتفاع اولین کپسول	طول ریشه	قطر ساقه	تعداد شاخه فرعی	تعداد شاخه گل‌دهنده	طول کپسول	قطر کپسول	تعداد دانه در کپسول	تعداد کپسول در گیاه	وزن هزار دانه	عملکرد دانه	عملکرد بیولوژیک	شاخص برداشت	عملکرد کاه
Traits	PH	CHL	HFSB	HFP	RH	SD	SBN	FB	PL	FB	SBN	SD	RH	HFP	HFSB	Chl	SY
PH	1.00																
Chl	0.10**	1.00															
HFSB	0.84**	0.28^{ns}	1.00														
HFP	0.99**	0.11^{ns}	0.87**	1.00													
RH	0.74**	-0.14^{ns}	0.43*	0.69**	1.00												
SD	0.69**	-0.18^{ns}	0.50**	0.68**	0.61**	1.00											
SBN	0.27^{ns}	-0.33^{ns}	-0.2^{ns}	0.19^{ns}	0.64**	0.41^{ns}	1.00										
FB	0.36^{ns}	-0.31^{ns}	-0.1^{ns}	0.28^{ns}	0.62**	0.38^{ns}	0.94**	1.00									
PL	0.65**	-0.17^{ns}	0.29^{ns}	0.63**	0.55*	0.38^{ns}	0.51*	0.62**	1.00								
PD	0.73**	0.18^{ns}	0.57**	0.73**	0.53**	0.37^{ns}	0.26^{ns}	0.30^{ns}	0.60**	1.00							
PNP	0.21^{ns}	-0.25^{ns}	-0.23^{ns}	0.14^{ns}	0.53**	0.31^{ns}	0.95**	0.95**	0.51*	0.19^{ns}	1.00						
SNP	0.58*	-0.01^{ns}	0.54^{ns}	0.57*	0.40^{ns}	0.41^{ns}	0.28^{ns}	0.33^{ns}	0.45^{ns}	0.47^{ns}	0.29^{ns}	1.00					
TW	-0.52^{ns}	-0.38^{ns}	-0.54^{ns}	-0.52^{ns}	-0.22^{ns}	-0.1^{ns}	-0.01^{ns}	-0.10^{ns}	-0.27^{ns}	-0.68^{ns}	0.02^{ns}	-0.28^{ns}	1.00				
GY	0.33^{ns}	0.05^{ns}	0.09^{ns}	0.28^{ns}	0.44*	0.32^{ns}	0.50*	0.53*	0.39^{ns}	0.21^{ns}	0.54*	0.58*	0.10^{ns}	1.00			
BY	0.55**	0.06^{ns}	0.32^{ns}	0.51*	0.61*	0.48^{ns}	0.52*	0.56*	0.48^{ns}	0.40^{ns}	0.53*	0.66**	-0.10^{ns}	0.94**	1.00		
HI	-0.49^{ns}	-0.08^{ns}	-0.61^{ns}	-0.52^{ns}	-0.25^{ns}	-0.2^{ns}	0.18v	0.17^{ns}	-0.10^{ns}	-0.40^{ns}	0.27^{ns}	-0.02^{ns}	0.58*	0.55*	0.27^{ns}	1.00	
SY	0.66**	0.07^{ns}	0.46*	0.63**	0.68**	0.56*	0.50*	0.54*	0.52*	0.51*	0.49^{ns}	0.68**	-0.24^{ns}	0.85**	0.98**	0.07^{ns}	1.00

ns: عدم معنی‌داری؛ * و **: به ترتیب معنی‌داری در سطوح احتمال ۵٪ و ۱٪

^{ns}: not significant; * and **: Significant at 5% and 1% probability levels, respectively

با بررسی مدل رگرسیونی حاصل شده و ضرایب همبستگی کلیه صفات با عملکرد دانه، به علت وجود پدیده خود همبستگی بین صفات عملکرد بیولوژیک، عملکرد کاه و عملکرد دانه، سایر صفات وارد مدل رگرسیونی نشدند درحالی‌که طول ریشه، تعداد شاخه فرعی، ارتفاع اولین شاخه فرعی، تعداد غلاف در بوته، تعداد شاخه گل‌دهنده، تعداد کپسول در گیاه، تعداد دانه در کپسول و شاخص برداشت دارای همبستگی مثبت و معنی‌دار با عملکرد دانه بودند. بنابراین، با توجه به عدم تولنایی کافی مدل رگرسیونی در تشخیص تمامی صفات مؤثر، لزوم شکستن ضریب همبستگی تمامی صفات مورد مطالعه با عملکرد دانه به اثرات مستقیم و غیر مستقیم و در نهایت یافتن صفاتی که اثرات مستقیم آن‌ها بر عملکرد دانه دارای روندی مثبت و هم‌سو بودند، تجزیه و تحلیل علیت بر روی این صفات صورت گرفت.

جدول ۱۱- تجزیه رگرسیون گام به گام مرحله به مرحله برای کلیه صفات به عنوان متغیر مستقل و عملکرد دانه به عنوان متغیر وابسته

Table 11- Stepwise regression analysis for all traits as an independent variable and grain yield as a dependent variable

مدل Model		ضریب رگرسیون B	انحراف معیار Std. Error	مقدار آماره‌T T Test	سطح احتمال Sig.	ضریب تبیین R2	ضریب تبیین اصلاح شده Adjusted R2
1	مقدار ثابت Constant	-1.83	1.88	-0.972	0.341	0.89	0.886
	عملکرد بیولوژیک Biological Yield	0.395	0.028	14.2	0.000		
2	مقدار ثابت Constant	-0.002	0.003	-0.735	0.470	1.00	1.00
	عملکرد بیولوژیک Biological Yield	1.000	0.000	5989.7	0.000		
	عملکرد کاه Straw yield	-1.000	0.000	-3719.2	0.000		

جدول ۱۲- اثرات مستقیم و غیرمستقیم صفات مؤثر بر عملکرد دانه سیاهدانه

Table 12- Direct and indirect effects of traits affecting the grain yield of black seed

صفات مورد بررسی Traits	PH	RH	SBN	FB	PNP	SNP	TW	BY	HI	SY	
ارتفاع گیاه PH	**-0.006***	-0.004	-0.002	-0.002	-0.002	-0.004	0.002	-0.003	0.002	-0.004	
طول ریشه RH	-0.001	**-0.001**	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.000	-0.001	0.000	0.001	
تعداد شاخه فرعی SBN	-0.001	-0.002	**-0.003**	-0.003	-0.003	-0.001	0.000	-0.002	-0.001	-0.002	
تعداد شاخه گل‌دهنده FB	0.006	0.010	0.015	**0.016**	0.016	0.005	0.000	0.009	0.002	0.009	
تعداد کپسول در گیاهPNP	-0.004	-0.008	-0.014	-0.014	**-0.015**	-0.005	-0.002	-0.008	-0.004	-0.007	
تعداد دانه در کپسول SNP	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	**-0.001**	-0.001	-0.001	0.000	-0.001	
وزن هزار دانه TW	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.000	-0.001	**0.000**	-0.001	0.000	-0.001	
عملکرد بیولوژیک BY	1.353	1.501	1.281	1.383	1.306	1.635	0.000	**2.470**	0.669	2.408	
شاخص برداشت HI	0.009	0.004	-0.004	-0.004	-0.006	0.000	-0.012	-0.006	**-0.020**	-0.002	باقیمانده Residual
عملکرد دانه SY	-1.035	-1.060	-0.775	-0.845	-0.758	-1.058	0.367	-1.520	-1.559	**-1.559**	
کل Total	0.324	0.444	0.501	0.533	0.541	0.574	0.101	0.943	0.55	0.846	**0.038**

*: اعداد تیره نشان‌دهنده اثرات مستقیم صفات بر عملکرد دانه می‌باشند.

*: Bold number indicated direct effect on grain yield

تجزیه ضرایب مسیر (تجزیه علیت)

مقادیر اثرات مستقیم و اثرات غیرمستقیمی که صفات ارتفاع بوته، طول ریشه، تعداد شاخه فرعی، تعداد شاخه گل‌دهنده، تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، وزن

هزار دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت و وزن کاه روی صفت عملکرد دانه در اکوتیپ‌های مورد بررسی گیاه سیاهدانه داشتند در جدول ۱۲ ارائه گردیده است. صفات ارتفاع بوته، طول ریشه، تعداد شاخه‌فرعی، تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، شاخص برداشت و وزن کاه اثرات مستقیم و منفی و صفات تعداد شاخه گل‌دهنده، وزن هزار دانه و عملکرد بیولوژیک اثرات مستقیم و مثبتی بر صفت عملکرد دانه داشتند (جدول ۱۲).

صفت ارتفاع بوته از طریق صفات طول ریشه، تعداد شاخه‌های فرعی، تعداد شاخه گل‌دهنده، تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، عملکرد بیولوژیک و وزن کاه، اثر غیرمستقیم منفی و از طریق صفات وزن هزار دانه و شاخص برداشت، اثر غیرمستقیم مثبت بر روی عملکرد دانه اکوتیپ‌های گیاه دارویی سیاه دانه داشت (جدول ۱۲). بر اساس نتایج حاصل از تجزیه ضرایب مسیر، بیشترین اثر غیرمستقیم مثبت بر روی عملکرد دانه گیاه دارویی سیاه دانه مربوط به عملکرد بیولوژیک (از طریق صفت عملکرد کاه) و بیشترین اثر غیرمستقیم منفی بر روی عملکرد دانه مربوط به صفت عملکرد کاه (از طریق صفت شاخص برداشت) بود (جدول ۱۲).

بحث

بطور کلی، هر چند رشد، نمو و عملکرد گیاهان زراعی تابع ژنتیک، محیط و برهمکنش بین آن‌ها می‌باشد، مدیریت زراعی و میزان نهاده‌های کشاورزی می‌تواند سبب کاهش یا افزایش رشد و نمو گیاهان شوند(Kafi *et al.*, 2012; Rakeei and Maali-Amiri, 2012). در این رابطه، اظهار شده است که ارزیابی واکنش گیاهان دارویی به انواع حاصل‌خیزکننده‌های خاک، یکی از مباحث مهم زراعی در زمینه تولید و توسعه کاشت این گیاهان است (Fallahi *et al.*, 2018). هم‌چنین، گزارش شده است با توجه به نقش تنوع ژنتیکی در پیشبرد برنامه‌های به‌نژادی، بررسی و شناخت ویژگی‌های مورفولوژیکی مؤثر بر عملکرد دانه می‌تواند در دست‌یابی به معیارهای اصلی گزینش، اصلاح و معرفی ارقام برتر اهمیت زیادی داشته باشند (Mohebodini *et al.*, 2019). بر همین اساس، انتخاب ارقام با خصوصیات زراعی مطلوب می‌تواند در راستای تولید یک رقم جدید مورد استفاده قرار گیرد؛ لذا، از آنجا که عملکرد بیولوژیک حاصل شده از پژوهش حاضر در حدود ۹۵٪ تغییرات عملکرد دانه را توجیه کرد، می‌توان ارقام و ژنوتیپ‌های سیاهدانه دارای عملکرد بیولوژیک بیشتر را گزینش و در مطالعات بعدی مورد بررسی‌های دقیق‌تر قرار داد. نتایج حاصل از تجزیه رگرسیون گام به گام پژوهش ارائه شده توسط محققین نشان داد که عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت مهم‌ترین صفات مؤثر بر عملکرد دانه در گیاه جو بودند و پیشنهاد دادند که می‌توان عملکرد دانه را از طریق افزایش عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت افزایش داد (Zare Kohan *et al.*, 2020). علاوه بر این، از آنجا که اکوتیپ‌های مختلف یک گونه گیاهی در یک منطقه می‌توانند قابلیت‌های رشد، نمو و عملکردی متفاوتی داشته باشند، نتایج پژوهش حاضر نشان داد که هر کدام از اکوتیپ‌های سرایان، همدان و شهرکرد از نظر برخی صفات اهمیت بیشتری داشتند (جداول ۳، ۵ و ۸). با این‌حال، اکوتیپ‌های شهرکرد و همدان در اکثر صفات از قبیل ارتفاع گیاه، ارتفاع اولین شاخه فرعی، طول ریشه، ارتفاع اولین کپسول، طول کپسول، تعداد دانه در کپسول، عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه و عملکرد کاه نسبت به اکوتیپ بومی سرایان دارای برتری قابل ملاحظه‌ای بودند و به‌عنوان اکوتیپ‌های جایگزین شناخته شدند. در این راستا، گزارش شده است توده‌های بومی به‌دلیل سازگاری مناسبی که طی سال‌های متمادی در زیستگاه طبیعی‌شان به دست آورده‌اند، در صورتی‌که نسبت به سایر اکوتیپ‌های ورودی دارای صفات مناسبی باشند می‌توانند به عنوان یک منبع ژنتیکی با ارزش در اصلاح ارقام جدید مورد استفاده قرار گیرند؛ از طرفی، گزارش شده است هر چند از اکوتیپ‌های بومی هر منطقه جهت کشت سیاهدانه استفاده می‌شود، لازم است اکوتیپ‌های پر محصول و دارای قابلیت سازگاری بالا با شرایط اقلیمی مناطق مختلف شناسایی شوند و با اکوتیپ‌های بومی مورد مقایسه قرار گیرند (Javadi Hedayat Abad *et al.*, 2015; Kheiry *et al.*, 2021). در پژوهش حاضر نیز اکوتیپ‌های شهرکرد و همدان در اکثر صفات (بجز وزن هزار دانه و شاخص برداشت) افزایش معنی‌داری نسبت به اکوتیپ بومی سرایان داشتند و از آنجا که عملکرد اقتصادی بالاتر هدف نهایی از زراعت یک محصول، می‌باشد و اکوتیپ‌های شهرکرد و همدان دارای قابلیت بیشتری در عملکرد اقتصادی بودند، احتمال دارد بتوانند بعنوان اکوتیپ‌های

جایگزین مورد استفاده قرار گیرند. پژوهشگران دیگری (Javadi Hedayat Abad *et al.*, 2015; Kheiry *et al.*, 2021) نیز عملکرد اکوتیپ‌های مختلف سیاهدانه را در شرایط اقلیمی مشهد مورد بررسی قرار دادند و برتری دو اکوتیپ گناباد و بیرجند را به دوره رشدی طولانی‌تر اکوتیپ‌های مختلف سیاهدانه و رشد و نمو بهتر گیاه از طریق تأمین مخازن زایشی گیاه و به دنبال آن افزایش اجزای عملکرد گیاه نسبت دادند.

از طرفی، از آنجا که مبحث تولید بر پایه اصول کشاورزی پایدار اهمیت زیادی در زراعت گیاهان دارویی دارد، کاربرد کودهای بیولوژیک می‌تواند سبب افزایش کمی و کیفی تولیدات گیاهان دارویی شود؛ بر همین اساس، بسیاری از شرکت‌های تولید کننده داروهای گیاهی، ترکیب‌های گیاهی را که با کشت آلی یا ارگانیک تولید شده باشند را ترجیح می‌دهند (Fallahi *et al.*, 2018). در پژوهش حاضر نیز به منظور عدم کاربرد نهاده‌های شیمیایی در زراعت گیاه دارویی سیاه‌دانه، اثرات تلقیح سویه‌های *Rhizophagus fasciculatum* و *Rhizophagus mosseae* مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان دادند که هر دو نوع سویه قارچ سبب افزایش معنی‌دار برخی از صفات از قبیل تعداد شاخه گل‌دهنده، طول کپسول و قطر کپسول اکوتیپ‌های مورد مطالعه نسبت به تیمار شاهد (عدم تلقیح) شدند (جدول ۷). در ارتباط با اثرات مثبت مایکوریزا بر گیاهان، اظهار شده است که توانایی باکتری‌های موجود در این کودها در تولید انواع مواد محرک رشد از قبیل سیدروفورها، مواد هورمونی و تنظیم‌کننده رشد گیاهی مانند اکسین‌ها و جیبرلین‌ها، آزادسازی عناصر مغذی گیاه مانند فسفر و پتاسیم از ترکیبات نامحلول آن‌ها در خاک، تجزیه ترکیبات آلی پیچیده در خاک و کنترل آفات و بیماری‌های گیاهی می‌باشد که نهایتاً منجر به تحریک بیشتر رشد گیاه و افزایش کمی و کیفی محصول می‌شوند (Hasanzadeh Ghorttapeh and Javadi, 2016). هم‌چنین، در ارتباط با اثرات مثبت همزیستی قارچ مایکوریزا با گیاهان و اکوتیپ‌های گیاهی، برخی پژوهش‌گران اظهار دارند که نوع قارچ همزیست، نوع گیاه میزبان و هم‌چنین پاسخ گیاهان مختلف به قارچ‌های همزیست مایکوریزا متفاوت می‌باشد (Sousa *et al.*, 2012; Zhong *et al.*, 2012). نتایج جدول ۶ نیز حاکی از افزایش معنی‌دار تعداد دانه در هر کپسول در اکوتیپ‌های شهرکرد و همدان نسبت به اکوتیپ سرایان بودند.

از طرفی، نتایج جدول ۷ نیز نشان داد که کاربرد سویه‌های مایکوریزا سبب افزایش معنی‌دار طول کپسول نسبت به تیمار شاهد در بین اکوتیپ‌های مورد بررسی شدند. بر همین اساس، از آنجا که تفاوت‌های قابل مقایسه‌ای از نظر صفات مورفولوژیک، عملکرد و اجزای عملکرد در بین اکوتیپ‌های سیاه‌دانه مورد بررسی در پژوهش حاضر مشاهده شد، احتمال دارد اکوتیپ‌های شهرکرد و همدان ارتباط همزیستی و سازگاری بهتری با سویه‌های مایکوریزای مورد بررسی در پژوهش حاضر برقرار کرده بودند و در نهایت بعنوان اکوتیپ‌های برتر معرفی شدند. علاوه بر این، در ارتباط با اثرات ارقام و ژنوتیپ‌های مختلف سیاهدانه، در برخی پژوهش‌ها نیز اختلاف معنی‌دار صفات مورفولوژیکی و اجزای عملکرد به تنوع ژنتیکی قابل ملاحظه در بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی نسبت داده شد (Mehri *et al.*, 2022). در بررسی تنوع ژنتیکی اکوتیپ‌های مختلف سیاهدانه با استفاده از صفات مورفولوژیکی و زراعی، ضرایب همبستگی بین صفات نشان داد که عملکرد دانه با صفات عملکرد بیولوژیک، تعداد دانه در کپسول، ارتفاع بوته، تعداد شاخه‌های جانبی و شاخص برداشت همبستگی مثبت و بالایی داشت و ۹۵٪ تغییرات عملکرد دانه را توجیه کردند (Salamati and Zeinali, 2013). تغییرات مورد بررسی در پژوهش حاضر (از قبیل بیشتر بودن درصد ضریب تغییرات صفات عملکرد بیولوژیک و شاخه‌های گل‌دهنده) که بیش از ۹۰٪ از تغییرات عملکرد دانه را توجیه کردند نشان‌هنده تنوع ژنتیکی بالا میان سه اکوتیپ سرایان، شهرکرد و همدان بود. در پژوهش دیگری نیز بیشترین ضریب همبستگی مثبت و معنی‌دار سیاهدانه با عملکرد دانه (با ضریب همبستگی معادل ۰/۹۵۷) مربوط به عملکرد بیولوژیک بود (Bahrami Najad and Papzan, 2006). هم‌چنین، پژوهش‌گران دیگری نیز تایید کردند که عملکرد بیولوژیک دارای بیشترین اثر مستقیم و هم‌چنین بیشترین توجیه‌کننده تغییرات مرتبط با عملکرد دانه مربوط به عملکرد بیولوژیک بود (Bardideh *et al.*, 2013). در مقابل، بررسی و مقایسه ۳۰ ژنوتیپ سیاهدانه نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین ژنوتیپ‌ها از نظر صفات زراعی-مورفولوژیکی وجود داشت و میان صفات مورد مطالعه، تعداد کپسول در گیاه و عملکرد دانه دارای بیشترین تنوع ژنتیکی بودند (Golkar and Nourbakhsh, 2019).

علاوه بر موارد فوق، وجود تنوع ژنتیکی یکی از الزامات اساسی برای موفقیت در برنامه‌های اصلاحی بعدی است. در واقع اطلاع از تنوع ژنتیکی برای صفت عملکرد و اجزای عملکرد برای طرح‌ریزی یک برنامه اصلاحی موفق در گیاهان هدف حیاتی است (Niazian *et al*., 2017). بر همین اساس، قبل از اجرای یک برنامه هدفمند اصلاحی، بایستی مطالعات ژنتیکی مختلفی انجام شود تا آگاهی کافی در مورد ماهیت ژنتیکی و همبستگی بین صفات بدست آید که بتوان براساس آن در جهت اصلاح یا گزینش یک رقم خاص گام‌های مؤثری برداشت (Salamati and Zeinali, 2013).

بطور کلی، بررسی مورفولوژیکی صفات ظاهری گیاهان مختلف بسیار ارزان‌تر و آسان‌تر از سایر روش‌های ارزیابی هستند و اطلاعات زیادی را در مدت زمان کمتری در اختیار محققین و اصلاح‌گران قرار می‌دهد (Dalkani *et al*., 2012). چندین روش برای تجزیه اجزای عملکرد وجود دارد که بر اساس هدف پروژه محققان می‌توانند از این روش‌ها استفاده کنند. روش‌های از قبیل تجزیه واریانس، تجزیه همبستگی ساده، تجزیه رگرسیون چند متغییره، و تجزیه ضرایب مسیر معمولاً برای تجزیه و تحلیل اجزای عملکرد در گیاهان مختلف استفاده می‌شوند (Fraser and Eaton, 1983).

در ارتباط با روابط بین همبستگی صفات مورد مطالعه و عملکرد دانه (جدول ۱۰)، عملکرد دانه یک صفت کمی و پیچیده است که توسط ژن‌های زیادی کنترل می‌شود و اثر محیط نیز بر آن زیاد است؛ بنابراین برای ارتقاء این صفت در برنامه‌های اصلاحی بهتر از صفات اجزای عملکرد که وراثت‌پذیری بالاتری دارند و همبستگی بالایی با عملکرد دلنه دارند به جای انتخاب مستقیم برای عملکرد دانه استفاده شود (Niazian *et al*., 2017). بنابراین، تعیین همبستگی اجزای عملکرد با صفت عملکرد دانه جهت اصلاح این صفت ضروری است (Dogan, 2009). تجزیه همبستگی ساده اطلاعاتی درباره درجه ارتباط بین صفات مهم گیاهی ارائه می‌دهد و یک شاخص مفید برای پیش‌بینی پاسخ عملکردی در ارتباط با تغییر یک جزء خاص است (Malik *et al*., 2007).

در بررسی تغییرات اثر متقابل حاصل از نتایج تجزیه علیت (جدول ۱۲) نکات زیر حائز اهمیت است: ۱- اگر همبستگی بین عامل علت و معلول تقریباً برابر اثرات مستقیم باشد در آن صورت، ضریب همبستگی ساده رابطه واقعی را نشان می‌دهد و انتخاب مستقیم از طریق این صفت مؤثر خواهد بود. ۲- اگر ضریب همبستگی مثبت اما اثرات مستقیم منفی یا قابل اغماض باشد، در آن صورت، علت همبستگی اثرات غیر مستقیم است. در چنین مواردی بایستی عوامل غیرمستقیم سببی را به طور همزمان مورد توجه قرار داد. ۳- ممکن است ضریب همبستگی منفی اما اثرات مستقیم مثبت و زیاد باشد. در چنین مواردی، بایستی از مدل‌های انتخاب همزمان محدود شده پیروی کرد، یعنی باید با به صفر رساندن اثرات غیرمستقیم نامطلوب، محدودیت‌هایی اعمال شود تا بتوان از اثرات مستقیم استفاده کرد (Niazian *et al*., 2012). در ارتباط با صفاتی که وارد مدل می‌شوند، پژوهشگران دیگری نیز تنوع ژنتیکی برخی از ژنوتیپ‌های سیاهدانه را با استفاده از صفات مورفولوژیکی و زراعی مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که بیشترین ضریب تغییرات فنوتیپی و ژنوتیپی مربوط به عملکرد بیولوژیک بود (Salamati and Zeinali, 2013). علاوه بر این، از آنجا که صفات عملکرد بیولوژیک، تعداد دانه در فولیکول، تعداد انشعاب‌های ساقه و شاخص برداشت در آن پژوهش به ترتیب دارای بیشترین ضریب تأثیر بر عملکرد دانه بودند و ۹۵٪ تغییرات عملکرد دانه را توجیه کردند، وارد مدل شدند. بررسی مدل رگرسیونی حاصل شده و ضرایب همبستگی کلیه صفات مؤثر بر عملکرد دانه در پژوهش حاضر نیز نشان داد که صفات عملکرد بیولوژیک و عملکرد کاه دارای بیشترین ضریب تأثیر بر عملکرد دانه بودند که بیش از ۹۵٪ از تغییرات عملکرد دانه را توجیه کردند و وارد مدل شدند؛ بر همین اساس، از آنجا که سایر صفات درصدهای بسیار ناچیزی در تغییرات عملکرد دانه داشتند وارد مدل رگرسیونی نشدند.

از آنجا که صفت عملکرد دانه یک صفت پیچیده و کمی با وراثت‌پذیری پایین است، بررسی همبستگی سایر صفات اجزای عملکرد با پیچیدگی کمتر می‌تواند به انتخاب غیرمستقیم برای عملکرد بالاتر کمک کند. هر چند روش‌های آماری متعددی از قبیل تجزیه همبستگی، رگرسیون، ضرایب مسیر و غیره برای انتخاب غیرمستقیم صفات پیچیده و کمی توسط اصلاح‌گران و محققان در گیاهان مختلف بکار رفته است، با این‌حال، استفاده از روش‌های محاسباتی پیشرفته‌تری مانند شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند به محققین جهت انتخاب دقیق‌تر برای صفات

وابسته کمی و پیچیده، که تعداد زیادی متغیر غیرمستقل بر آن‌ها تأثیر دارند، کمک کند (Abdipour *et al.*, 2018; Niazian *et al.*, 2018 a, 2018 b). در تحقیق حاضر همبستگی مثبت و معنی‌داری بین عملکرد دانه و صفات ارتفاع گیاه، طول ریشه، تعداد شاخه جانبی، تعداد شاخه گل‌دهنده، تعداد کپسول در گیاه، تعداد دانه در کپسول، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت و عملکرد کاه مشاهده شد و عملکرد بیولوژیک بیشترین اثر مستقیم مثبت را بر صفت عملکرد دانه داشت (جدول ۱۲). از طرفی، با توجه به نتایج حاصل از تجزیه همبستگی ساده و هم‌چنین نتایج حاصل از تجزیه ضرایب مسیر، صفات عملکرد بیولوژیک و عملکرد کاه به‌عنوان صفات مؤثر در افزایش عملکرد دانه معرفی شدند، اکوتیپ‌های دارای بیشترین صفات فوق می‌توانند گزینش شده و در راستای مطالعات بعدی مرتبط با افزایش عملکرد بذر در گیاه دارویی سیاه دانه مورد بررسی دقیق‌تر قرار گیرند. در تضاد با نتایج پژوهش حاضر، پژوهش دیگری با انجام تجزیه ضرایب مسیر به منظور پیدا نمودن مهم‌ترین صفات مؤثر بر عملکرد دانه در ۱۶ توده ایرانی گیاه دارویی سیاه دانه انجام شد و گزارش شد که تعداد کپسول در گیاه و وزن هزار دانه بیش‌ترین اثر مستقیم را بر روی عملکرد دانه داشتند (Ghorbanzadeh Neghab and Zare Mehrjerdi, 2018). با این‌حال، بالاترین اثر غیر مستقیم در پژوهش اخیر مربوط به صفت زیست‌توده بود. بر همین اساس، احتمال دارد وجود تناقض بین این پژوهش و یافته‌های ما در ارتباط با تأثیر مستقیم و بیشتر عملکرد بیولوژیک و عملکرد کاه در افزایش عملکرد دانه سیاهدانه ناشی از جامعه آماری کوچک و تعداد محدود اکوتیپ در مطالعه حاضر باشد. از طرفی، در راستای نتایج پژوهش حاضر مبنی بر تأثیر بیشتر عملکرد بیولوژیک، در گزارشی میزان تنوع در برخی از صفات زراعی و آناتومیکی توده‌های محلی سیاه دانه در استان خراسان مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت و تعداد انشعاب ساقه به ترتیب به نسبت بیشتری افزایش عملکرد دانه را توجیه کردند (Faravani *et al.*, 2006).

از طرفی، به دلیل آنکه رابطه بین دو صفت ممکن است به حضور صفت سومی وابسته باشد، بنابراین تجزیه همبستگی ساده صفات به تنهایی نمی‌تواند اطلاعات کافی درباره رابطه عللی و معلولی میان متغیرها ارائه دهد (Bahmani *et al.*, 2015). بنابراین توضیح منطقی‌تر رابطه مشاهده شده بین متغیرها می‌تواند از طریق تجزیه ضرایب مسیر (علیت) حاصل گردد. تجزیه ضرایب مسیر یک روش آماری جهت بررسی روابط عللی/معلولی میان متغیرهای همبسته است که در گیاهان دارویی زیادی استفاده شده است (Lal, 2007; Dalkani *et al.*, 2011; Bahmani *et al.*, 2015).

نتیجه‌گیری کلی

گیاهان دارویی منبع غنی از متابولیت‌های ثانویه ارزشمند هستند که کاربردهای زیادی در پزشکی و سایر صنایع دارند. از طرفی به دلیل اثرهای جانبی کمتر، استفاده از محصولات گیاهی در سال‌های اخیر توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. گیاهان دارویی در بیشتر مناطق رشد خود سطح زیرکشت ثابتی ندارند و برداشت بی‌رویه منجر به در معرض خطر انقراض قرار گرفتن آن‌ها شده است. در این شرایط اصلاح صفات کمی و کیفی این گیاهان بسیار ضروری است. در تحقیق حاضر اثر دو گونه مختلف قارچ مایکوریزا بر روی سه اکوتیپ ایرانی گیاه سیاه دانه شامل اکوتیپ‌های سرایان، همدان، و شهرکرد بررسی شد و نشان داده شد که تفاوت معنی‌دار بین سه اکوتیپ سیاهدانه از نظر صفات موروفولوژیکی و عملکردی وجود داشت بطوری‌که اکوتیپ‌های شهرکرد و همدان در همه صفات (بجز وزن هزار دانه و شاخص برداشت) نسبت به اکوتیپ سرایان برتری داشتند. در همین راستا، مقایسه میانگین‌ها نشان داد که اکوتیپ همدان نسبت به اکوتیپ‌های سرایان و شهرکرد برتری نسبی در صفات ارتفاع بوته (به ترتیب معادل ۸۴/۱۴ و ۴/۶۴ درصد)، ارتفاع اولین شاخه فرعی (۱۰۸/۵۹ و ۱/۱۲ درصد)، طول ریشه (۱۰/۸۹ و ۱۲/۹۳ درصد)، ارتفاع اولین کپسول (۸۴/۰۵ و ۳/۵۱ درصد) و طول کپسول (۲۰/۰۶ و ۰/۶ درصد) داشت. هم‌چنین، از طرفی، اکوتیپ شهرکرد در مقایسه با اکوتیپ‌های همدان و سرایان به ترتیب دارای افزایش‌هایی معادل ۵۶/۲۶ و ۱۶/۸۱ درصد برای عملکرد بیولوژیک، ۲۶/۳۸ و ۱۷/۱۵ درصد برای عملکرد دانه، ۷۸/۵۶ و ۱۶/۶۴ درصد برای عملکرد کاه بود. در نهایت، تلقیح سویه *Rhizophagus mosseae* نسبت به تیمار شاهد و سویه *Rhizophagus fasciculatum* به ترتیب سبب افزایش ۱۷/۲۶ و ۰/۵۱ درصدی در تعداد شاخه گل‌دهنده و

افزایش ۹/۲۲ و ۱/۶۲ درصدی در طول کپسول شد درحالی‌که کاربرد سویه *Rhizophagus fasciculatum* نسبت به تیمار شاهد و سویه *Rhizophagus mosseae* منجر به افزایش ۵/۵۱ و ۳ درصدی در قطر کپسول شد. بطور کلی، با توجه به اینکه کاربرد سویه‌های قارچ مایکوریزا در پژوهش حاضر سبب بروز اختلاف معنی‌دار بین اکثر صفات نشد، می‌توان احتمال داد تنوع ژنتیکی ایجاد شده ناشی از پتانسیل ژنتیکی اکوتیپ‌های کشت شده می‌باشد. تجزیه همبستگی ساده صفات مورد ارزیابی حاکی از همبستگی مثبت و معنی‌دار صفت عملکرد دانه با صفات طول ریشه، تعداد شاخه‌های فرعی، تعداد شاخه فرعی، تعداد شاخه گل‌دهنده، تعداد کپسول در بوته و تعداد دانه در کپسول بود. صفات تعداد شاخه گل‌دهنده و عملکرد بیولوژیک بیشترین اثرهای مستقیم و مثبت را بر صفت عملکرد دانه اکوتیپ‌های سیاه‌دانه داشتند و بیشترین اثر مستقیم منفی بر روی صفت عملکرد دانه مربوط به صفت وزن عملکرد کاه بود. نتایج حاصل از تحقیق حاضر در راستای انتخاب اکوتیپ‌های برتر گیاه سیاه‌دانه به منظور کشت در نواحی شرق ایران و هم‌چنین معرفی شاخص‌های مؤثر در افزایش عملکرد بود که می‌توانند مورد توجه اصلاح‌گران گیاه دارویی سیاه‌دانه قرار گیرند. با این‌حال، جهت اطمینان از نتایج فوق و تشخیص میزان عوامل دخیل در افزایش عملکرد، پژوهش‌های مشابه دیگری در مناطق مختلف مورد نیاز است.

تعارض منافع

نویسندگان اظهار می‌نمایند که هیچ‌گونه تعارض منافعی در رابطه با نشر این مقاله وجود ندارد.

References

Abadi, B.H.M., Ganjali, H.R. and Mobasser, H.R. 2015. Effect of mycorrhiza and phosphorus fertilizer on some characteristics of black cumin. *Biological Forum-Research Trend*, *7*, PP.1115-1120 [In Persian]. **doi: 10.22092/ijmapr.2018.121269.2287**

Abdipour, M., Ramazani, S.H.R., Younessi Hmazekhanlu, M. and Niazian, M. 2018. Modeling oil content of sesame (*Sesamum indicum* L.) using artificial neural network and multiple linear regression approaches. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, *95*, PP.283-297. **doi:10.1002/aocs.12027**

Arnon, DI. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenol-oxidase in Beta vulgaris. *Plant Physiology*, *24*, PP.1-15. **doi:10.1104/pp.24.1.1**

Bahmani, K., Darbandi, A.I., Ramshini, H.A., Moradi, N. and Akbari, A. 2015. Agro-morphological and phytochemical diversity of various Iranian fennel landraces. *Industrial Crops and Products*, *77*, PP.282-294. **doi:10.1016/j.indcrop.2015.08.059**

Bahrami Najad, S. and Papzan, A. 2006. Effect of row spacing on different characteristics of black cumin (*Nigella sativa* L.) under Kermanshah conditions. *Iranian Journal of Crop Sciences*, *8*, PP.241-249 [In Persian].

Bardideh, K., Kahrizi, D. and Ghobadi, M.E. 2013. Character association and path analysis of black cumin (*Nigella sativa* L.) genotypes under different irrigation regimes. *Notulae Scientia Biologicae*, *5*, PP.104-108. **doi: 10.15835/nsb518968**

Begum, N., Qin, C., Ahanger, M.A., Raza, S., Khan, M.I., Ashraf, M. and Zhang, L. 2019. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: implications in abiotic stress tolerance. *Front Plant Science*, 1068. **doi: 10.3389/fpls.2019.01068**

Bhandari, H.R., Bhanu, A.N., Srivastava, K., Singh, M.N. and Shreya, H.A. 2017. Assessment of genetic diversity in crop plants-an overview. *Advances in Plants and Agriculture Research*, *7*, PP.279-286. **doi:**

10.15406/apar.2017.07.00255

Boskabady, M.H. and Shirmohammadi, B. 2002. Effect of *Nigella sativa* on isolated guinea pig trachea. *Archives of Iranian Medicine*, *5*, PP.103-107.

Campo, S., Martín-Cardoso, H., Olivé, M., Pla, E., Catala-Forner, M., Martínez-Eixarch, M. and San Segundo, B. 2020. Effect of root colonization by arbuscular mycorrhizal fungi on growth, productivity and blast resistance in rice. *Rice*, *13*, PP.1-14. **doi: 10.1186/s12284-020-00402-7**

Cely, M.V., De Oliveira, A.G., De Freitas, V.F., De Luca, M.B., Barazetti, A.R., Dos Santos, I.M. and Andrade, G. 2016. Inoculant of arbuscular mycorrhizal fungi (*Rhizophagus clarus*) increase yield of soybean and cotton under field conditions. *Frontiers in Microbiology*, *7*, PP.1-9. **doi: 10.3389/fmicb.2016.00720**

Chen, M., Arato, M., Borghi, L., Nouri, E. and Reinhardt, D. 2018. Beneficial services of arbuscular mycorrhizal fungi–from ecology to application. *Frontiers in Plant Science*, 1270. **doi: 10.3389/fpls.2018.01270**

Dalkani, M., Darvishzadeh, R. and Hassani, A. 2011. Correlation and sequential path analysis in Ajowan (*Carumcopticum* L.). *Journal of Medicinal Plants Research*, *5*, PP.211-216.

Dalkani, M., Hassani, A. and Darvishzadeh, R. 2012. Determination of the genetic variation in Ajowan (*CarumCopticum* L.) populations using multivariate statistical techniques. *Revista Ciência Agronômica*, *43*, PP.698-705. **doi: 10.1590/s1806-66902012000400011**

D'Antuono, L.F., Moretti, A. and Lovato, A.F. 2002. Seed yield, yield components, oil content and essential oil content and composition of *Nigella sativa* L. and *Nigella damascena* L. *Industrial Crops and Products*, *15*, PP.59-69. **doi: 10.1016/s0926-6690(01)00096-6**

Darakeh, S.A.S.S., Weisany, W., Diyanat, M. and Ebrahimi, R. 2021. Bio-organic fertilizers induce biochemical changes and affect seed oil fatty acids composition in black cumin (*Nigella sativa* Linn). *Industrial Crops and Products*, *164*, PP.1-8. **doi:10.1016/j.indcrop.2021.113383**

Dogan, R. 2009. The correlation and path coefficient analysis for yield and some yield components of durum wheat (*Triticumturgidum* var. durum L.) in west Anatolia conditions. *Pakistan Journal of Botany*, *41*, PP.1081-1089.

Fallahi, H.R., Taherpour Kalantari, R., Asadian, A.H., Aghhavani-shajari, M. and Ramazani, S.H.R. 2018. Effect of different soil fertilizing agents on growth and yield of isabgol and black seed as two medicinal plants. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *49*(3), PP.1-11. 1120 [In Persian]. **doi: 10.22059/ijfcs.2017.211513.654152**

Faravani, M., Razavi, A.R. and Farsi, M. 2006. Study of variation in some agronomic and anatomiccharacters of *Nigella sativa* landraces in Khorasan. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, *22*. PP.193-197. [In Persian]. **Available from: https://sid.ir/paper/105620/en**

Fraser, J. and Eaton, G.W. 1983. Application of yield component analysis to crop research. *Field Crop Research*, *39*, PP.787-797.

Ghorbanzadeh Neghab, M. and Zare Mehrjerdi, M. 2018. The study of genetic diversity, correlation between traits and path analysis in black cumin (*Nigella sativa* L.) ecotypes. *Journal of Plant Production Research*, *25*, PP.1-12 [In Persian]. **doi: 10.22069/jopp.2018.12268.2111**

Ghosheh, O.A., Houdi, A.A. and Crooks, P.A. 1999. High performance liquid chromatographic analysis of the

pharmacologically active quinones and related compounds in the oil of the black seed (*Nigella sativa* L.). *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, *19,* PP.757-762. **doi: 10.1016/s0731-7085(98)00300-8**

Golkar, P. and Nourbakhsh, V. 2019. Analysis of genetic diversity and population structure in *Nigella sativa* L. using agronomic traits and molecular markers (SRAP and SCoT). *Industrial Crops and Products*, *130,* PP.170-178. **doi: 10.1016/j.indcrop.2018.12.074**

Hasanzadeh Ghorttapeh, A. and Javadi, H. 2016. Study on the effects of inoculation with biofirtilizers (azotobacter and azospirillum) and nitrogen application on oil, yield and yield components of spring canola in west azerbaijan. *Journal of Crop Production and Processing*, *5*(18), PP.39-50 [In Persian]. **doi: 10.18869/acadpub.jcpp.5.18.39**

Helgason, T. and Fitter, A. 2009. Natural selection and the evolutionary ecology of the Arbuscular mycorrhizal fungi (*Phylum Glomeromycota*). *Journal of Experimental Botany*, *60,* PP.2465-2480. **doi: 10.1093/jxb/erp144**

Ilcim, A., Kokdil, G., Ozbilgin G. and Uygun, C. 2006. Morphology and stem anatomy of some species of *Nigella sativa* L. in Turkey. *Journal of Faculty of Pharmacy*, *35,* PP.19-41.

Javadi Hedayat Abad, F., Nezami, A., Kafi, M. and Shabahang, J. 2015. Effects of sowing time on yield of black seed (*Nigella Sativa* L.) ecotypes under Mashhad conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *12,* PP.632-640 [In Persian]. **doi: 10.22067/gsc.v12i4.45146**

Javanmard, A. and Shekari, F. 2016. Improvement of seed yield, its components and oil content of sunflower (*Helianthus annuus* L.) by applications of chemical and organic fertilizers. *Journal of Crop Ecophysiology*, *1,* PP.35-56 [In Persian].

Kafi, M., Borzoi, A., Salehi, M., Kamandi, A., Masoumi, A. and Nabati, J. 2012. Physiology of environmental stresses in plants. Second edition. Publication of University of Mashhad. 502 PP. [In Persian].

Kheiry, A., Barkhori Mehani, F., Soleimani, A., Sani Khani, M. and Arghavani, M. 2021. Study of some morphophysiological characteristics in endemic population of Nigella sativa under water deficits stress in Zanjan climate conditions. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *31,* PP.213-226 [In Persian]. **doi: 10.22034/saps.2021.43976.2610**

Khorramdel, S., Kouchaki, A., Nasiri Mahallati, M. and Ghorbani, R. 2008. The effect of biological fertilizer application on growth indices of black seed (*Nigella sativa* L.). *Iranian Journal of Field Crops Research*, *6,* PP.285-293 [In Persian]. **doi: 10.22034/saps.2021.43976.2610**

Lal, R.K. 2007. Associations among agronomic traits and path analysis in fennel (*Foeniculum vulgare* Miller). *Journal of Sustainable Agriculture*, *30,* PP.21-29. **doi: 10.1300/J064v30n01_04**

Litrico, I. and Violle, C. 2015. Diversity in plant breeding: a new conceptual framework. *Trends in Plant Science*, *20,* PP.604-613. **doi: 10.1016/j.tplants.2015.07.007**

López-Caamal, A. and Tovar-Sánchez, E. 2014. Genetic, morphological, and chemical patterns of plant hybridization. *Revista Chilena de Historia Natural*, *87,* PP.1-14. **doi: 10.1186/s40693-014-0016-0**

Malik, M.F.A., Ashraf, M., Qureshi, A.S. and Ghafoor, A. 2007. Assessment of genetic variability, correlation and path analyses for yield and its components in soybean. *Pakistan Journal of Botany, 39,* PP.405-413.

Masomi Zavarian, A., Yousefirad, M. and Asghari, M. 2015. Effects of mycorrhizal fungi on quantitative and qualitative characteristics of Anise plant (*Pimpinella anisum*) under salt stress. *Journal of Medicinal Plants*, *14*, PP.139-148 [In Persian]. **doi: 20.1001.1.2717204.2015.14.56.3.0**

Mehri, N., Moheb AlDini, M., Behnamian, M. and Farmanpour-Kalalagh K. 2022. Phylogenetic, genetic diversity, and population structure analysis of iranian black cumin (*Nigella sativa* L.) genotypes using ISSR molecular markers. *International Journal of Horticultural Science and Technology*, *9*(2), PP.151-163. **doi: 10.22059/ijhst.2021.311894.402**

Mirzaei, K. and Mirzaghaderi, G. 2017. Genetic diversity analysis of Iranian *Nigella sativa* L. landraces using SCoT markers and evaluation of adjusted polymorphism information content. *Plant Genetic Resources*, *15*, PP.64-71. **doi: 10.1017/s1479262115000386**

Mohammadi, L. and Reezi, S. 2017. Root quality increasing and absorption improvement of some nutrients with arbuscular mycorrhiza (*Rhizophagus mosseae*) application in New Guinea impatiens (Impatiens hawkeri) cuttings. *Journal of Plant Process and Function*, *6*(21), PP.301-310 [In Persian]. **doi: 20.1001.1.23222727.1396.6.21.22.4**

Mohebodini, M., Mehri, N. and Fathi, R. 2019. Evaluation of Genotype and Environment Effects on Agro-Morphological Traits in Black Cumin (*Nigella Sativa* L.) Ecotypes. *Journal of Crop Breeding*, *11*, PP.108-117 [In Persian]. **doi: 10.29252/jcb.11.30.108**

Mouhajir, F., Pedersen, J.A., Rejdali, M. and Towers, G.H. 1999. Antimicrobial thymohydroquinones of Moroccan *Nigella sativa* seeds detected by electron spin resonance. *Pharmaceutical Biology*, *37*, PP.391-395. **doi: 10.1076/phbi.37.5.391.6052**

Nadeem, M.A., Nawaz, M.A., Shahid, M.Q., Doğan, Y., Comertpay, G., Yıldız, M. and Baloch, F.S. 2018. DNA molecular markers in plant breeding: current status and recent advancements in genomic selection and genome editing. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, *32*, PP.261-285. **doi:10.1080/13102818.2017.1400401**

Niazian, M., Rajabi, A., Amiri, R., Orazizadeh, M.R. and Sharifi, H. 2012. Surveying the relations among traits affecting root yield and sugar content in o-type lines of sugar beet for winter sowing. *Plant Production*, *35*, PP.115-135 [In Persian].

Niazian, M., Sadat Noori, S.A., Tohidfar, M. and Mortazavian, S.M.M. 2017. Essential oil yield and agro-morphological traits in some Iranian ecotypes of ajowan (*Carum copticum* L.). *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, *20*, PP.1151-1156. **doi:10.1080/0972060x.2017.1326849**

Niazian, M., Sadat-Noori, S.A. and Abdipour, M. 2018a. Modeling the seed yield of Ajowan (*Trachyspermumammi* L.) using artificial neural network and multiple linear regression models. *Industrial Crops and Products*, *117*, PP.224-234. **doi: 10.1016/j.indcrop.2018.03.013**

Pandey, J., Scheuring, D.C., Koym, J.W., Coombs, J., Novy, R.G., Thompson, A.L. and Vales, M.I. 2021. Genetic diversity and population structure of advanced clones selected over forty years by a potato breeding program in the USA. *Scientific Reports*, *11*, PP.1-18. **doi:10.1038/s41598-021-87284-x**

Rahimi, A., Siavash Moghaddam, S., Ghiyasi, M., Heydarzadeh, S., Ghazizadeh, K. and Popović-Djordjević, J.

2019. The influence of chemical, organic and biological fertilizers on agrobiological and antioxidant properties of Syrian Cephalaria (*Cephalaria syriaca* L.). *Agriculture*, *9*, PP.122-135. **doi: 10.3390/agriculture9060122**

Rakeei, A. and Maali-Amiri, R. 2012. The role of epigenetic changes in plant response to abiotic environmental stresses. *Genetics in the Third Millennium*, *10*, PP.2834-2845 [In Persian].

Salamati, M.S. and Zeinali, H. 2013. Evaluation of genetic diversity of some Nigella sativa L. genotypes using Agro-morphological characteristics. *Iranian Journal of medicinal and Aromatic Plants*, *29*, PP.201-214 [In Persian]. **doi:10.22092/ijmapr.2013.2901**

Shah, S. and Kasturi, S.R. 2003. Study on antioxidant and antimicrobial properties of black cumin (*Nigella sativa* Linn). *Journal of Food Science and Technology*, *40*, PP.70-73.

Shamshirgaran, Z., Saeid Nematpour, F. and Safipour Afshar, A. 2016. Effect of mycorrhizal symbiosis on growth, some physiological parameters and cadmium accumulation in black seed (*Nigella sativa* L.). *Journal of Plant Process and Function*, *5*(17), PP.133-144 [In Persian]. **doi: 20.1001.1.23222727.1395.5.17.12.9**

Sharma, A.K. 2002. Biofertilizers for sustainable agriculture. Agrobios, India. 300 PP.

Sousa, N.R., Ramos, M.A., Marques, A.P. and Castro, P.M. 2012. The effect of ectomycorrhizal fungi forming symbiosis with Pinus pinaster seedlings exposed to cadmium. *Science of the Total Environment*, *414*, PP.63-67. **doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.10.053**

Tadayyon, A. and Zarei, M. 2014. The effect of arbuscular mycorrhizal fungus Rhizophagus mosseae on the growth and yield of three ecotype of hemp (*Cannabis sativa* L.) under saline soil and saline water. *Journal of Plant Process and Function*, *3*, PP.105-114 [In Persian]. **doi: 20.1001.1.23222727.1393.3.7.2.5**

Yaman, M. 2022. Evaluation of genetic diversity by morphological, biochemical and molecular markers in sour cherry genotypes. *Molecular Biology Reports*, 49, PP.5293–5301. **doi:10.1007/s11033-021-06941-6**

Ying-ning, Z.O.U., Qiang-sheng, W.U., Yan, L.I. and Yong-ming, H.U.A.N.G. 2014. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on root system morphology and sucrose and glucose contents of Poncirus trifoliata. *Yingyong Shengtai Xuebao*, *25*, PP.1125-1129.

Zamani, F., Amirnia, R., Rezaei-Chiyaneh, E. and Rahimi, A. 2019. The effect of bacterial bio-fertilizers and mycorrhizal fungi on seed yield and chemical composition of essential oil from three fennel landrace. *Crops Improvments (Journal of Agricultural Crops Production)*, *20*, PP.831-848 [In Persian]. **doi: 20.1001.1.83372008.1397.20.4.6.5**

Zare Kohan, M., Babaiean Jelodar, N., Tabatabaei, S.A. and Ghasemi Nejad Raeini, M.R. 2020. Stepwise regression analysis of barley genotypes under normal conditions and salinity stress. 4th International Conference on Applied Research in Agriculture, Natural Resources and Environment. Hamedan, February 17, 2020 [In Persian]. **Available from: https://civilica.com/doc/1000374**

Zhang, F., Wang, P., Zou, Y.N., Wu, Q.S. and Kuča, K. 2019. Effects of mycorrhizal fungi on root-hair growth and hormone levels of taproot and lateral roots in trifoliate orange under drought stress. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *65*, PP.1316-1330. **doi:10.1080/03650340.2018.1563780**

Zhong, W.L., Li, J.T., Chen, Y.T., Shu, W.S. and Liao, B. 2012. A study on the effects of lead, cadmium and phosphorus on the lead and cadmium uptake efficacy of Viola baoshanensis inoculated with Arbuscular mycorrhizal fungi. *Journal of Environmental Monitoring*, *14*, PP.2497-2504. **doi: 10.1039/c2em30333g**

Journal of Crop Science Research in Arid Regions/ Volume 5, Issue 2, Autumn 2023, P. 501-523

Investigating the effects of inoculation of mycorrhizal fungi on yield and yield components of different ecotypes of black seed

Seyyed Hamid Reza Ramazani[1*], Morteza Ghorbany[2]

[1] Department of Plant Production and Genetics, College of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran
[2] Department of Biology, College of Science, University of Birjand, Birjand, Iran
[*]Corresponding Author: hrramazani@birjand.ac.ir

Received: 20 January 2022 Accepted: 7 May 2022 **DOI: 10.22034/CSRAR.2023.302907.1127**

Abstract

Introduction: The application of bio-fertilizers, especially mycorrhizal fungi, is known as one of the most important nutritional approaches in sustainable agriculture and agricultural ecosystem management. Among the numerous microorganisms in the rhizosphere, some have positive effects on plant growth promotion. These microorganisms are bio fertilizers such as plant-growth-promoting rhizobacteria, which colonize the rhizosphere and roots of many plant species and confer beneficial effects to plants. Therefore, the present study aimed to investigate the effects of two species of arbuscular mycorrhizal funguswas assessed on yield and yield components of three Iranian ecotypes of black seed medicinal plant.

Materials and Methods: To determine the inoculation of mycorrhizal fungi on yield and yield components of different ecotypes of black seed, a factorial experiment in randomized complete block design with three replications was conducted. The experiment was conducted as factorial in Sarayan faculty of agriculture at 2018, with two factors, the *Rhizophagus fasciculatum* and *Rhizophagus mosseae* species of mycorrhizal as first factor, Sarayan, Hamedan, and Shahrekord ecotypes of black seed as second factor, in three replications. The traits studied in this research were plant height, stem diameter, number of branches, the average height of the first branch, root length, total chlorophyll, number of flowering branches, the average height of the first capsule, capsule length, capsule diameter, number of capsules per plant, number of seeds per capsules, 1000-seed weight, grain yield, biological yield, harvest index, and straw yield.

Results and Discussion: The analysis of variance showed significant differences among investigated ecotypes of black seed for all traits. However, none of the above traits were affected by the interaction of Ecotype × mycorrhiza. In addition, the highest values of plant height (19.85 cm), the average height of the first branch (8.99 cm), root length (13.63 cm), the average height of the first capsule (19.16 cm), and capsule length (8.38 cm) for Hamadan ecotype, the highest values of the number of seeds per capsule (53.31 grains), biological yield (75.8 $g.m^{-2}$), grain yield (26.16 $g.m^{-2}$), and straw yield (49.64 $g.m^{-2}$) for Shahrekord ecotype, and the highest 1000-seed weight (2.34 g) and harvest index (42.67%) for Sarayan cultivar were obtained. In other hand, the means of pod diameter, pod length, and number of flowering branches were increased in plants treated with both species of mycorrhizal bio-fertilizer than the control treatment so that the highest values in the number of flowering branches (8.24 cm) and capsule length (8.18 cm) were obtained under the application of *Rhizophagus mosseae*, and the thickest capsules (8.24 cm) were achieved under the application of frtilizers contained *Rhizophagus fasciculatum*. The results of simple correlation analysis showed the positive and significant correlation of seed yield trait with root length, number of secondary branches, number of flowering branches, number of pods per plants, and number of seeds per pod, at 5% probability level, and with biological yield and straw yield traits at 1% probability level. Results of path analysis showed positive direct effect of number of flowering branches and biological yield traits on grain yield and the highest positive direct effect was recorded for biological yield. In contrast, the highest negative direct effect on the grain yield of investigated ecotypes was obtained for the straw yield.

Conclusion: It was shown that there was a significant difference between the three black seed ecotypes in morphological and functional traits, so that Shahrekord and Hamedan ecotypes were

superior in all traits (except thousand seed weight and harvest index) compared to Sarayan ecotype. In general, our findings demonstrated the relationship between morphological traits and yield components of black seed ecotypes under the inoculation of mycorrhiza strains, which can be employed in black seed breeding programs as a reference. Also, it is suggested that ecotypes/genotypes that are better in biological and straw yield traits were used for cretia selection traits in future.

Keywords: Medicinal plant, Path analysis, Seed yield, Symbiotic fungi