نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۳، شماره ۲ ، تابستان ۱۳۹۴، ص. ۴۳۳-۴۲۰

Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 13, No. 2, Summer. 2015, p. 420-433

شناسایی و کمی‌سازی اثرات علت و معلولی در رابطه‌ی همزیستی قارچ میکوریز آربوسکولار و ذرت با استفاده از رهیافت مدل‌سازی معادلات ساختاری

محسن جهان[1*] - مهدی نصیری محلاتی[2]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۶/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۰۴

چکیده

با توجه به ضرورت تعیین میزان همزیستی میکوریزایی و درجه‌ی تأثیر آن بر ویژگی‌های اگرواکولوژیکی گیاهان زراعی و شناخت دیگر عوامل پنهان دخیل در این روابط، و از سوی دیگر، نبود روشی مطمئن، سریع و مؤثر در این زمینه، این پژوهش برای پاسخگویی به موارد مطرح شده با نگاهی نو و با هدف تعیین روابط علّت و معلولی و نیز متغیرهای پنهان در چگونگی این تأثیر، به‌کمک رهیافت مدل‌سازی معادلات ساختاری، انجام شد. پس از تحلیل عاملی تأییدی داده‌های حاصل از آزمایش به دو عامل، متغیرهایی که بر روی هر یک از دو عامل بیشترین بار را داشتند، مشخص شدند. سپس، با در نظر گرفتن مبانی اکوفیزیولوژیک رشد و نمو گیاهان زراعی و به‌منظور ادامه‌ی تحلیل، عامل اول (سازه‌ی پنهان اول، شامل: شاخص سطح برگ، درصد کلونیزاسیون ریشه، ماده‌ی خشک، قطر ساقه و عدد اسپد) تسخیر منابع و عامل دوم (سازه‌ی پنهان دوم، شامل: فتوسنتز بیشینه، طول مخصوص ریشه، دمای کانوپی، ارتفاع بوته، عملکرد دانه، تعداد بلال، تنفس خاک، نسبت فلورسانس کلروفیل متغیر به بیشینه و درصد فسفر بافت گیاهی) تبدیل منابع نام‌گذاری شدند. نتایج این بررسی نشان داد که متغیرهایی چون شاخص سطح برگ، قطر ساقه، ماده‌ی خشک، عدد اسپد، ارتفاع بوته و دمای کانوپی بیشترین تأثیر علّی در شکل‌گیری عملکرد ذرت در مزرعه در شرایط تلقیح با قارچ میکوریزا را داشتند. به‌طور کلی، به‌نظر می‌رسد که فواید مستقیم همزیستی میکوریزایی عمدتاً از طریق مشارکت سی‌وپنج درصدی در تسخیر منابع بروز یافت.

واژه‌های کلیدی: اثرات مستقیم، تحلیل عاملی، تحلیل مسیر، روابط علت معلولی، ضرایب مسیر

مقدمه

میکوریز آربوسکولار یکی از مجموعه عوامل بیولوژیک اکوسیستم خاک است که بخش مهمی از موجودات خاکزی را شامل می‌شود (۳). علم دیرین‌شناسی با بررسی آثار فسیلی به‌جا مانده از ۴۰۰ تا ۵۰۰ میلیون سال قبل، نشان داده است که همزیستی گیاهان با این قارچ‌ریشه‌ها، قدمتی بس طولانی دارد (۱۷ و ۲۱). همزیستی این قارچ با ریشه گیاهان میزبان و تشکیل سیستم میکوریزایی، نقش مهمی در حاصلخیزی و پایداری اکوسیستم خاک دارد (۷، ۹ و ۱۳). هاریسون (۱۰) معتقد است که همزیستی میکوریزا با گیاهان خشکی در سراسر دنیا، بر تغذیه‌ی فسفر گیاهان، تأثیر دارد نتایج بسیاری از تحقیقات (۲، ۴ و ۱۹) نشان داده است که همزیستی میکوریزایی باعث ایجاد واکنش‌هایی در گیاه میزبان می‌شود و نتیجه این واکنش‌ها، تغییراتی است که در نیچ گیاه میزبان اتفاق می‌افتد. میکوریزا ساختار نیچ را از دو طریق می‌تواند تغییر دهد (۱۶): ۱ـ قابل دسترس ساختن[3] منابع برای گیاه میزبان. ۲ـ امکان جذب[4] بیشتر منابع برای گیاه میزبان. داد (۷) گزارش کرد که اثر میکوریزا بر حرکت کربن به سوی ریشه، رشد و تنفس ریشه را تشدید می‌کند. علاوه براین، میکوریز آربسکولار به خاطر اثر بر ترشحات ریشه، چرخهٔ مواد غذایی و جریان کربن از گیاه اتوتروف به جامعهٔ میکروبی خاک را به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌دهد. این تنظیم جریان کربن، خود عامل اصلی و مهم تنظیم‌کنندهٔ جامعهٔ میکروبی خاک است.

ذرت (*Zea mayz* L.) که از نظر تولید و سطح زیر کشت، بعد از گندم (*Triticum aestivum* L.) و برنج (*Oryza sativa* L.)، سومین گیاه زراعی مهم در دنیا است، نسبت به تشکیل همزیستی با قارچ میکوریز آربوسکولار، واکنش خوبی نشان داده است. تولید بالای این گیاه، مصرف زیاد نهاده‌ها را نیز به‌همراه داشته است. مطالعهٔ

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشیار و استاد گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول: (Email: jahan@um.ac.ir

3- Make available
4- Uptake

جنبه‌های مختلف همزیستی قارچ‌های میکوریزا می‌تواند اتکاء به نهاده‌های شیمیایی را در این گیاه کاهش دهد.

روش‌های رایج ارزیابی درجه‌ی مؤثر بودن این همزیستی، عمدتاً شامل تعیین درصد کلونیزاسیون ریشه‌های گیاه میزبان است. این روش وقت‌گیر، دشوار و پرهزینه بوده و در مواردی احتمال بروز خطا به علت رنگ گرفتن آوندهای ریشه و سایر ساختارهای آن و ایجاد اشتباه در تشخیص اندام‌های قارچی وجود دارد. آلن (۱) پیشنهاد کرد که درصد آلودگی یا درصد کلونیزاسیون طول ریشه، متغیر مناسبی برای بیان درصد آلودگی میکوریزایی نیست، زیرا درصد آلودگی، متغیری است که از رشد دو ارگانیزم وابسته به یکدیگر ولی مجزا حاصل می‌شود که هرکدام در تلاش برای به حداکثر رساندن رشد و بقای خود است. لذا مدل‌هایی نظیر مدل لوتکا- ولترا که هر دو موجود را در نظر می‌گیرند، برای فهم بیولوژی و کارکرد میکوریزا در زمینه‌ی تسخیر[1] و استفاده از منابع[2]، مفیدتر هستند.

در مدل‌سازی معادلات ساختاری[3]، پژوهشگر با مدل‌های مفهومی سروکار دارد که مبتنی بر بازبینی پیشینه‌ی پژوهش است. اگرچه مدل‌سازی معادلات ساختاری، ابزاری برای آزمون یک مدل مفهومی است، اما در حاشیه آزمون مدل، رابطه‌ی دوبه‌دوی متغیرها نیز مورد سنجش قرار می‌گیرد. مدل‌سازی معادلات ساختاری، نتیجه‌ی تلفیق روش تحلیل عاملی تأییدی[4] و روش تحلیل مسیر[5] است که در ابتدا توسط ویلی (۱۹۷۳)، کیسیلینگ (۱۹۷۲) و جورسکوگ (۱۹۷۳) مطرح گردید. در روش تحلیل عاملی پرسش این است که آیا مجموعه‌ای از شاخص‌ها یا همان متغیرهای اندازه‌گیری شده، تعریف‌کننده‌ی یک متغیر نهان یا سازه‌ی پنهان[6] هستند یا خیر؟ و در آن مجموعه‌ای از شاخص‌ها، یک سازه‌ی پنهان را اندازه‌گیری می‌کنند. از طرف دیگر، در روش تحلیل مسیر ارتباط علت/ معلولی متغیرها مورد بررسی قرار می‌گیرد. حال اگر مدلی تعریف شود که در آن هم شاخص‌هایی وجود داشته باشند که سازه‌های پنهان را اندازه‌گیری کنند و هم روابط بین این سازه‌ها تعریف شده باشند، مدل ایجاد شده را می‌توان به‌وسیله‌ی مدل‌سازی معادلات ساختاری حل نمود. به‌طور خلاصه مدل‌سازی معادلات ساختاری می‌تواند در موارد زیر مورد استفاده قرار گیرد: - برآورد روابط بین متغیرهای وابسته، - برآورد روابط بین متغیرهای قابل اندازه‌گیری برای یک متغیر پنهان، - تعیین میزان خطای اندازه‌گیری در مورد هر یک از متغیرهای مستقل، وزن‌دهی نامساوی به شاخص‌های یک متغیر پنهان، - تعیین میزان همبستگی میان خطاهای همبستگی، - برآورد اعتبار[7] و روایی[8] سازه، - انجام آزمون‌های نکویی برازش[9].

توانایی مدل‌سازی معادلات ساختاری در توصیف روابط پیچیده‌ی بین متغیرها، یکی از مهم‌ترین علل تمایل محققان به آن است. روابط پیچیده‌ی حاکم بر برخی آزمایشات، فراتر از آن است که در قالب یک همبستگی ساده بین دو متغیر، تحت عنوان یک فرضیه‌ی پژوهشی آزمون شود. یک متغیر در حالی‌که خود وابسته به متغیری است، برای متغیرهای دیگر می‌تواند نقش یک متغیر مستقل را ایفا نماید. مدل‌سازی معادلات ساختاری یک روش آماری است که یک دیدگاه تأییدی (یک دیدگاه آزمون فرض) را در قبال پدیده‌ها به‌کار می‌گیرد. به‌عبارت دیگر، از طریق مفهوم‌سازی[10] مدل مورد مطالعه، می‌توان مشخص نمود که آیا مدل پژوهش با داده‌های پژوهش سازگار هست یا خیر.

هدف از تحقیق در زمینهٔ میکوریزا، معرفی قارچ‌های میکوریز آربسکولار به مناطق مختلف جهت کاهش مشکلات موجود در آن مناطق است. با توجه به ضرورت تعیین میزان همزیستی میکوریزایی و درجه‌ی تأثیر آن بر ویژگی‌های اگرواکولوژیکی گیاهان زراعی و شناخت دیگر عوامل پنهان دخیل در این روابط، و از سوی دیگر، نبود روشی مطمئن، سریع و مؤثر در این زمینه، این پژوهش برای پاسخگویی به موارد مطرح شده با نگاهی نو و با هدف تعیین روابط علت و معلولی و نیز سازه‌های پنهان در چگونگی این تأثیر به کمک رهیافت مدل‌سازی معادلات ساختاری، انجام شد. به‌عبارت دیگر، آیا می‌توان از روش مدل‌سازی معادلات ساختاری به‌عنوان رهیافتی جهت تشخیص کارایی همزیستی بر مبنای فرآیندها[11] و کارکرد اگرواکولوژیکی قارچ استفاده نمود.

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی محل آزمایش

این تحقیق در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۶ در مزرعهٔ تحقیقاتی دانشکدهٔ کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد واقع در ۱۰ کیلومتری شرق مشهد با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۵ دقیقهٔ شمالی و طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۲۸ دقیقهٔ شرقی و ارتفاع ۹۸۵ متری از سطح دریا اجرا شد. متوسط بارندگی منطقه، ۲۸۶ میلی‌متر و حداکثر و حداقل دمای مطلق سالانه به‌ترتیب ۴۲ و ۲۷/۸- درجهٔ سانتی‌گراد می‌باشد. آب‌وهوای منطقه براساس طبقه‌بندی آمبرژه، سرد و خشک تعیین شده است. قبل از انجام کاشت، از عمق ۳۰ سانتی‌متری خاک

1- Capture
2- Utilization
3- Structural Equation Modeling
4- Confirmatory Factor Analysis
5- Path Analysis
6- Latent Construct
7- Reliability
8- Validity
9- Goodness of Fit Tests
10- Conceptualization
11- Process based

کلیهٔ کرت‌های آزمایش نمونه‌گیری شده و جهت تعیین محتوای نیتروژن، فسفر و پتاسیم به آزمایشگاه ارسال شد (جدول ۱). نمونه‌برداری از خاک در پایان فصل رشد در هر دو سال آزمایش تکرار شد.

جدول ۱- مشخصات کلی خاک محل انجام آزمایش

Org. matter (%)	EC ($dS\ m^{-1}$)	pH	K (ppm)	P (ppm)	Total N (%)
۰/۴۰	۲/۰۴	۷/۹	۲۲۹	۳۱	۰/۰۶

طرح آماری آزمایش

آزمایش به‌صورت طرح کرت‌های خرد شده (اسپلیت پلات) در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. فاکتور اصلی چهار نظام زراعی مختلف کشت ذرت شامل: ۱- نظام رایج با نهادهٔ زیاد، ۲- نظام رایج با نهادهٔ متوسط، ۳- نظام رایج با نهادهٔ کم و ۴- نظام اکولوژیک، بود. کرت‌های فرعی شامل: ۱- تلقیح با قارچ میکوریزا (*Glomus intraradices*)، ۲- تلقیح با مخلوط باکتری‌های آزوسپیریلوم (*Azospirillum brasilense*) و ازوتوباکتر (*Azotobacter paspali*)، ۳- تلقیح با مخلوط قارچ میکوریزا و باکتری‌های آزوسپیریلوم و ازوتوباکتر و ۴- شاهد (بدون تلقیح) بود. ابعاد هر کرت اصلی ۳×۱۰ متر و هر کرت فرعی ۳×۲/۵ متر بود. انتخاب میکوریزا، جنس گلوموس و گونهٔ اینترارادیسس با توجه به چند نکته انجام گرفت: - جنس گلوموس بیشترین پراکندگی را در نظام‌های زراعی در مقایسه با سیستم‌های طبیعی دارا می‌باشد. - تشکیل اندام قارچی به نام وزیکول که اهمیت غذایی برای گیاه میزبان دارد، در این جنس به اثبات رسیده است. -گلوموس اینترارادیسس در بیشتر مناطق ایران وجود داشته و مراحل تهیه و تکثیر آن به‌خوبی شناخته و تشریح شده است. - گونهٔ گلوموس اینترارادیسس به سطوح بالای عناصر غذایی مقاوم است، لذا برای مطالعه در نظام‌های زراعی مناسب می‌باشد (۲۰). - گونهٔ گلوموس اینترارادیسس تا به حال موضوع مطالعات بسیاری بوده است. -گونهٔ گلوموس اینترارادیسس به همزیستی با گیاه ذرت پاسخ خوبی می‌دهد.

عملیات مزرعه‌ای

تراکم کاشت شش بوته در متر مربع بود. زمین محل انجام آزمایش، در سال قبل از شروع تحقیق، تحت آیش بود. کاشت گیاه در دو سال زراعی در تاریخ‌های ۸۵/۲/۱۲ و ۸۶/۲/۱۵ انجام شد. زمین محل انجام آزمایش و ترتیب تیمارها در سال دوم آزمایش، مطابق سال اول بود. آبیاری به فاصلهٔ هر هفت روز انجام می‌شد.

کلیه‌ی عملیات زراعی و مصرف نهاده‌ها اعم از کاشت، داشت و برداشت، برای هرکدام از نظام‌های زراعی در زمان مناسب و معمول منطقه انجام شد. عملیات تهیهٔ زمین، کنترل علف‌های هرز، مبارزه با آفات و بیماری‌ها، کودهای شیمیایی و دامی در نظام‌های زراعی پرنهاده و کم‌نهاده، به‌ترتیب حداکثر و حداقل عملیات زراعی و نهادهٔ مصرفی که کشاورزان منطقه استفاده می‌کنند و برای نظام زراعی متوسط‌نهاده، میانگین این دو نظام به‌کار گرفته شد. در نظام زراعی اکولوژیک، حداقل خاک‌ورزی توسط تراکتور و سایر عملیات مثل وجین علف‌های هرز، با دست انجام شد و تنها نهادهٔ مصرفی، کود حیوانی و بذر بود. دو هفته قبل از کاشت، کود دامی (گاوی) کاملاً پوسیده به میزان ۶۰ تن در هکتار به کرت‌های اصلی دارای تیمار نظام زراعی اکولوژیک اضافه شد. این مقدار کود دامی براساس متوسط مقدار نیتروژن و فسفر موجود در سه نظام رایج محاسبه شد. مقادیر نیتروژن، فسفر و پتاسیم موجود در کود دامی و کود شیمیایی مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است.

اندازه‌گیری سطح برگ

پس از مرحله‌ی شش برگی تا مرحله‌ی تاسل‌دهی، به فاصله‌ی هر دو هفته یک‌بار، سطح برگ بوته‌ها توسط دستگاه Leaf Area Meter, Li-Cor, LI-1300, USA اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری ارتفاع بوته و قطر ساقه

در پایان مرحلهٔ کاکل‌دهی، ارتفاع سه بوته و قطر ساقهٔ آنها در اولین میان‌گره بعد از ریشه‌های نگه‌دارنده[1]، از هر کرت فرعی اندازه‌گیری شده و میانگین آنها ثبت شد.

اندازه‌گیری سرعت فتوسنتز

در این تحقیق به‌منظور اندازه‌گیری سرعت فتوسنتز ذرت، از دستگاه LC*i* (Leaf Chamber Information) ساخت کمپانی ADC (Analytical Development Components) کشور انگلستان استفاده شد.

جدول ۲- درصد نیتروژن، فسفر و پتاس در کود دامی و کود شیمیایی مورد استفاده در آزمایش

نوع کود و خاک	نیتروژن (٪)	فسفر (٪)	پتاس (٪)
کود دامی	۲/۳۶	۰/۵۹	۲/۰۸
کود شیمیایی (سولفات آمونیوم + سوپرفسفات تریپل+ کلرور پتاسیم)	۲۱	۴۶	۶۰

1- Brace root

اندازه‌گیری شاخص کلروفیل برگ یا عدد اسپد

با استفاده از دستگاه کلروفیل‌متر (SPAD 502, Minolta, Japan) شاخص کلروفیل برگ قرائت شد. اندازه‌گیری‌ها از زمان کاکل‌دهی به بعد، هر هفته یک بار و بر روی سومین برگ کاملاً توسعه‌یافته، از بالا و در نقطه‌ای واقع در وسط برگ و وسط فاصلهٔ لبهٔ برگ با رگبرگ میانی (به‌طوری‌که نور مستقیم خورشید به حسگر دستگاه نتابد) انجام شد.

اندازه‌گیری دمای کانوپی

برای اندازه‌گیری دمای کانوپی از ترمومتر مادون قرمز مدل Infra-red thermometer KM 842 Standard Model, Kane-May, England ضمن رعایت نکات دستورالعمل روت و گوین (۲۰۰۴) و پس از چندین بار آزمایش در حالات مختلف استفاده شد.

تعیین طول مخصوص ریشه[1]

به مقدار طول ریشهٔ موجود در حجم مشخصی از خاک، طول مخصوص ریشه گفته می‌شود. به‌منظور تعیین طول مخصوص ریشه، در اواخر فصل رشد از گیاهان رشد کرده در مزرعه اقدام به نمونه‌گیری شد. در ادامه، طول مخصوص ریشهٔ هر نمونه (طول ریشهٔ موجود در ۲۵ سانتی‌متر مکعب خاک) با استفاده از روش تنانت اصلاح شده (تنانت، ۱۹۷۵) تعیین شد.

تعیین درصد کلونیزاسیون طول ریشه[2]

تعیین درصد کلونیزاسیون طول ریشه‌ها مستلزم رنگ‌آمیزی ریشه‌های تثبیت‌شده و سپس مشاهده و اندازه‌گیری آن قسمت از طول ریشه‌ها که توسط اندام‌های قارچی آلوده شده‌اند، می‌باشد که به این منظور به‌ترتیب از روش رنگ‌آمیزی کورمانیک و مک‌گرا (۱۱ و ۱۲) و روش جی‌یووانتی و موسه (۸) موسوم به روش گریدلاین اینترسکت[3] با کمی تغییرات (۱۵) استفاده شد.

تعیین درصد فسفر نمونه‌های گیاهی

به‌منظور تعیین درصد فسفر موجود در بافت گیاه، نمونهٔ گیاهی آسیاب شده، ابتدا به روش هضم خشک آماده شده و سپس مقدار فسفر در عصارهٔ حاصل به روش مورفی و رایلی (۱۴) اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری سرعت تنفس خاک

به‌منظور اندازه‌گیری سرعت تنفس خاک، اتاقک مخصوص اندازه‌گیری موسوم به SRS 1000 (Soil Respiration Hood), ADC BioScientific Ltd. UK به دستگاه LC*i* متصل شده و اعداد مربوطه قرائت شدند. روش کار با دستگاه و زمان ثبت داده‌ها مشابه با روش اندازه‌گیری میزان فتوسنتز است.

اندازه‌گیری فلورسانس کلروفیل (Fv/Fm)

به‌منظور اندازه‌گیری فلورسانس کلروفیل، از دستگاه OS-30 Chlorophyll Fluorometer, ADC BioScientific Ltd., UK استفاده شد. اندازه‌گیری در ۵ نوبت، با شروع کاکل‌دهی و به فاصلهٔ هر ۷ روز بر روی سومین برگ زیر کاکل و در نقطه‌ای واقع در وسط طول برگ و وسط فاصلهٔ لبهٔ برگ با رگبرگ میانی، انجام شد.

تجزیه و تحلیل آماری

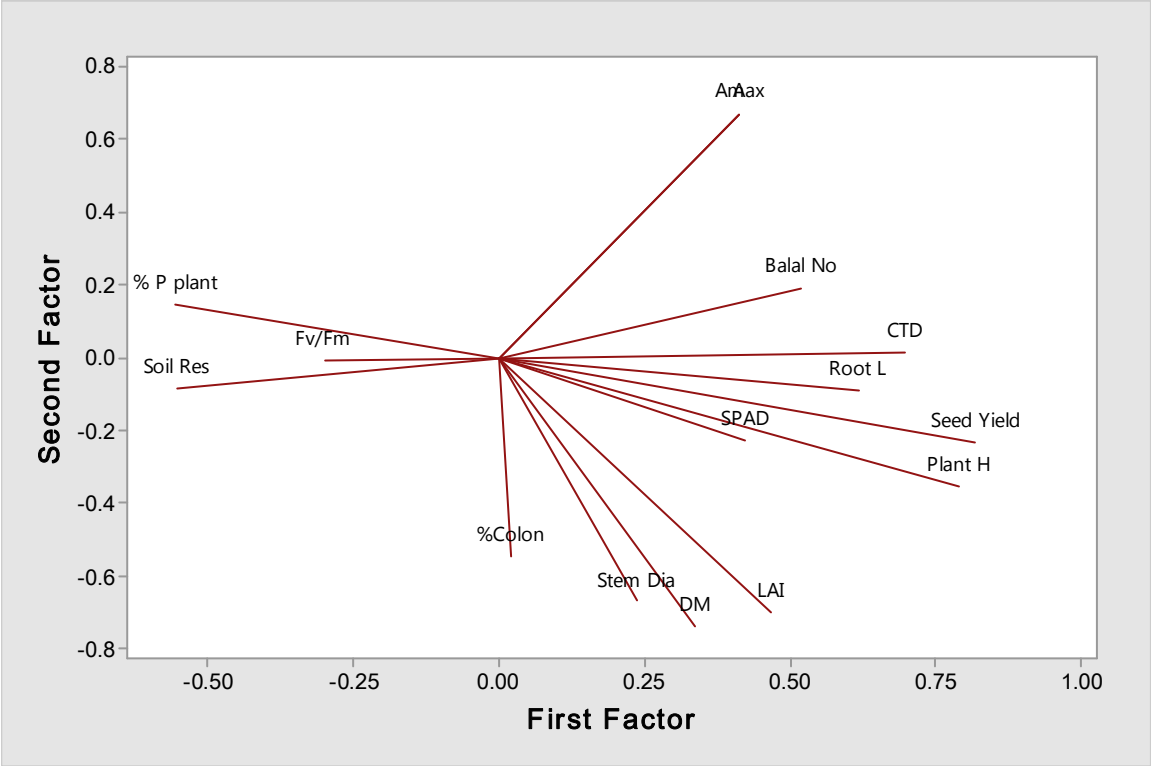
تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایش و رسم شکل‌های مربوط به آنها، توسط نرم‌افزارهای SPSS Ver. 21 و AMOS Ver. 21 صورت گرفت. در مورد داده‌های درصدی، تبدیل زاویه‌ای انجام شد.

نتایج و بحث

پس از تحلیل عاملی تأییدی داده‌های حاصل از آزمایش به دو عامل، متغیرهایی که بر روی هر یک از دو عامل بیشترین بار[4] را داشتند مشخص شدند. نتیجه این شد که متغیرهای شاخص سطح برگ LAI، عدد اسپد SPAD، عملکرد ماده‌ی خشک Drymatter، درصد کلونیزه شدن طول ریشه Colon و قطر ساقه StemD در عامل اول و متغیرهای طول مخصوص ریشه SRL، ارتفاع بوته PlantH، فتوسنتز بیشینه Amax، دمای کانوپی CT، ، تعداد بلال CobN و عملکرد دانه Seedyield، درصد فسفر بافت گیاه PlantP، تنفس پایه خاک SoilRes و نسبت فلورسانس کلروفیل متغیر به فلورسانس کلروفیل بیشینه Fv/Fm در عامل دوم قرار گرفتند. اگرچه اختصاص دادن متغیرهای اندازه‌گیری شده به هر عامل بر مبنای بارهای عاملی انجام گرفت، بررسی متغیرهای موجود در هر عامل نشان داد که اختصاص یافتن آنها به عامل‌ها با مبانی نظری مربوط به ارتباط بین آنها همخوانی داشت. تحلیل نمودار بارهای عاملی مربوط به موقعیت قرارگیری متغیرها نسبت به دو عامل، مطلب فوق را تأیید کرد (شکل ۱).

1- Specific root length
2- Root length colonization percent
3- Gridline-intersect method

4- Load



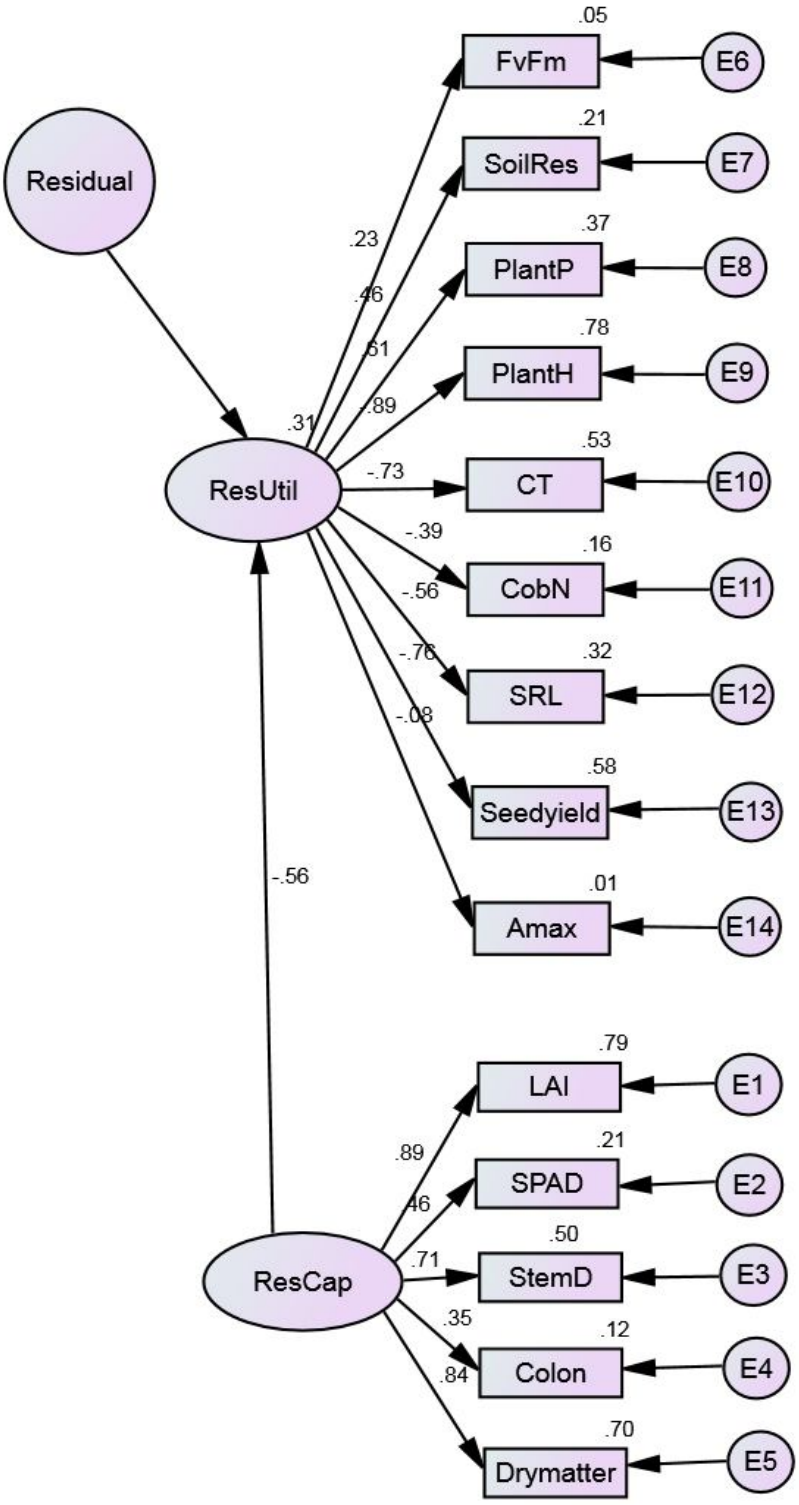
شکل ۱- نمودار بارهای عاملی متغیرهای اندازه‌گیری شده در آزمایش

با در نظر گرفتن مبانی اکوفیزیولوژیک رشد و نمو گیاهان زراعی (نقش هریک از صفات و ویژگی‌های گیاهی در شکل‌گیری عملکرد و تولید ماده‌ی خشک) و به‌منظور ادامه‌ی تحلیل، عامل اول (سازه‌ی پنهان اول، شامل: شاخص سطح برگ، درصد کلونیزاسیون ریشه، ماده‌ی خشک، قطر ساقه و عدد اسپد) تسخیر منابع[1] و عامل دوم (سازه‌ی پنهان دوم، شامل: فتوسنتز بیشینه، طول مخصوص ریشه، دمای کانوپی، ارتفاع بوته، عملکرد دانه، تعداد بلال، تنفس خاک، نسبت فلورسانس کلروفیل متغیر به بیشینه و درصد فسفر بافت گیاهی) تبدیل منابع[2] نامگذاری شدند.

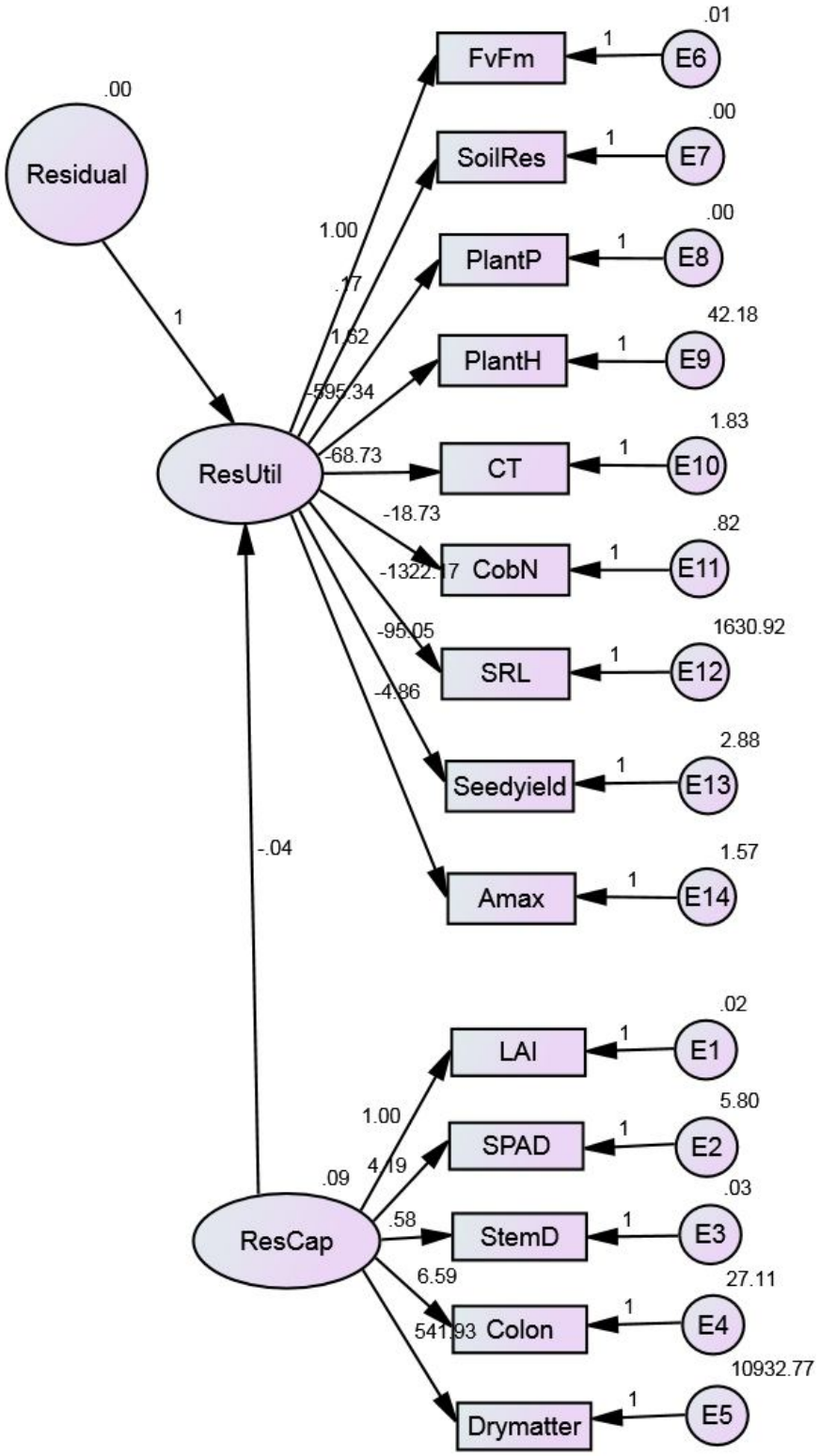
به‌منظور حصول اطمینان از پایایی یا اعتبار تحلیل، و این که آیا دو گروه پنج و نه متغیر اندازه‌گیری شده، به‌ترتیب مربوط به سازه‌های تسخیر منابع و تبدیل منابع، صحت و دقت لازم برای اندازه‌گیری این دو عامل را دارند یا خیر، از آزمون پایایی آلفای کرونباخ[3] استفاده شد. آلفای کرونباخ یکی از چندین شاخص اندازه‌گیری سازگاری درونی پرسش‌ها در پرسش‌نامه، آزمون و متغیرهای قابل مشاهده در یک شاخص یا سازه‌ی پنهان است. زمانی‌که یک سازه یا شاخص دارای سازگاری درونی است به این معنی است که تمام پرسش‌ها یا متغیرهای تشکیل‌دهنده‌ی آن سازه، باید با یکدیگر همبستگی بالایی داشته باشند. محققان پیشنهاد کرده‌اند که جهت حصول اطمینان از اعتبار سازه‌ها، این ضریب باید مقداری بیشتر از ۷۰ درصد داشته باشد (۵ و ۶). این ضریب برای سازه‌ی تسخیر منابع ۰/۷۷۹۷ است که بیانگر اعتبار داده‌های این سازه است. برای سازه‌ی تبدیل منابع این ضریب ۰/۵۰۸۳ بود که پس از حذف متغیرهای درصد فسفر بافت گیاه، تنفس پایه خاک و نسبت کلروفیل فلورسانس متغیر به بیشینه، به ۰/۷۴۲۲ رسید.

سازه‌های نظری[4] یا پنهان وضع شده در این پژوهش (تسخیر منابع و تبدیل منابع)، به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیستند، اگرچه در تجزیه و تحلیل کلاسیک طرح‌های آزمایشی، متغیرهایی تحت عنوان زیست توده و عملکرد (کل یا دانه) به‌عنوان صفاتی گیاهی در تسخیر و تبدیل منابع اندازه‌گیری می‌شوند، اما همانطور که قبلاً بیان شد، در این صورت، اثر سایر متغیرها در شکل‌گیری سازه‌های نظری یا پنهان نادیده گرفته می‌شود.

1- Resource Capture
2- Resource Utilization
3- Cronbach's Alpha Reliability Test
4- Theoretical Constructs



شکل ۲- الف- نمایی گرافیکی از مدل برآورد شده به همراه تخمین پارامترهای استاندارد شده (ضرایب مسیر، ضرایب همبستگی چندگانه مربع در گوشه‌ی سمت راست بالای هر مستطیل) مدل نشان داده شده است.



شکل ۲- ب- نمایی گرافیکی از مدل برآورد شده به‌همراه تخمین پارامترهای استاندارد نشده (واریانس خطاها و ضرایب مسیر) مدل نشان داده شده است.

مدل کامل پیشنهادی برای این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. این مدل خود از دو مدل اندازه‌گیری شامل: ۱- مدل اندازه‌گیری تسخیر منابع و ۲- مدل اندازه‌گیری تبدیل منابع تشکیل شده است. این دو مدل اندازه‌گیری توسط مدل ساختاری به یکدیگر مربوط شده‌اند. به‌عبارت دیگر، پس از اختصاص یافتن کلیه‌ی متغیرهای اندازه‌گیری شده در آزمایش به دو عامل (دو سازه‌ی پنهان)، در گام بعدی چگونگی ارتباط بین این دو عامل توسط آنالیز مسیر در قالب مدل‌سازی معادلات ساختاری صورت می‌گیرد. جهت پیکان، مسیر تابعیت را از تسخیر منابع به سمت تبدیل منابع نشان می‌دهد.

شکل ۲- الف، مقادیر استاندارد ضرایب مسیر و ضرایب همبستگی چندگانه مربع برای هر متغیر و سازه را نشان می‌دهد. شکل ۲- ب، مقادیر استاندارد نشده‌ی ضرایب مسیر و خطاهای اندازه‌گیری مربوط به هر متغیر را نشان می‌دهد.

به‌منظور مقایسه و تحلیل دقیق‌تر، این ضرایب به‌ترتیب در جدول‌های ۳ و ۷ ارائه شده‌اند. ضرایب رگرسیونی سازه‌های مدل (یا همان ضرایب مسیر) به‌عنوان متغیر مستقل و شاخص‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش به‌عنوان متغیر وابسته، به همراه انحراف معیار، نسبت بحرانی آماره t و احتمال آنها در جدول ۳ نشان داده شده است.

به‌منظور مقایسه‌ی این ضرایب و تعیین اثرگذارترین آنها، ضرایب رگرسیونی استاندارد شده (با میانگین صفر و انحراف معیار یک) در جدول ۴ آورده شده‌اند. ضریب رگرسیونی ۰/۵۶۲- برای اثر سازه‌ی تبدیل منابع بر طول مخصوص ریشه به این معنی است که یک واحد افزایش انحراف معیار در تبدیل منابع، ۰/۵۶۲ واحد کاهش انحراف معیار در طول مخصوص ریشه را به همراه خواهد داشت. این ضریب برای درصد کلونیزه شدن ریشه برابر با ۰/۳۴۹ است. ضریب رگرسیونی متغیرهای اندازه‌گیری شده ماده‌ی خشک، قطر ساقه، طول مخصوص ریشه و عدد اسپد در سطح احتمال یک درصد و متغیر درصد کلونیزه شدن ریشه در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بودند (جدول ۳).

واریانس هر یک از متغیرهای اندازه‌گیری شده به همراه کوواریانس بین آنها در جدول ۵ نشان داده شده است. عناصر قطری واریانس و عناصر غیر قطری، کوواریانس بین متغیرها هستند. کوواریانس شدت و جهت تغییرات توأم دو متغیر نسبت به یکدیگر یا همبستگی بین آن‌ها را نشان می‌دهد. محاسبات مربوط بین واریانس و کوواریانس، مبنای تخمین‌های بعدی پارامترهای مدل می‌باشد.

جدول ۳- ضرایب رگرسیونی سازه‌های مدل به‌عنوان متغیر مستقل و شاخص‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش به‌عنوان متغیر وابسته، به همراه خطای معیار، نسبت بحرانی آماره t و احتمال آنها

			Estimate	S.E.	C.R.	P
ResUtil	<---	ResCap	-۰/۰۳۹	۰/۰۲۸	-۱/۴۱۶	۰/۱۵۷
CT	<---	ResUtil	-۶۸/۷۲۶	۴۲/۱۲۶	-۱/۴۹۰	۰/۱۳۶
PlantH	<---	ResUtil	-۵۹۵/۳۴۴	۳۹۳/۵۷۱	-۱/۵۱۳	۰/۱۳۰
LAI	<---	ResCap	۱/۰۰۰			
SPAD	<---	ResCap	۴/۱۸۷	۱/۳۳۵	۳/۱۳۶	۰/۰۰۲
Drymatter	<---	ResCap	۵۴۱/۹۲۸	۸۲/۱۶۴	۶/۵۹۶	***
FvFm	<---	ResUtil	۱/۰۰۰			
StemD	<---	ResCap	۰/۵۸۵	۰/۱۰۹	۵/۳۷۲	***
Colon	<---	ResCap	۶/۵۸۵	۲/۸۱۷	۲/۳۳۸	۰/۰۱۹
CobN	<---	ResUtil	-۱۸/۷۲۷	۱۳/۹۹۷	-۱/۳۳۸	۰/۱۸۱
Seedyield	<---	ResUtil	-۹۵/۰۴۸	-۶۳/۵۲۹	-۱/۴۹۶	۰/۱۳۵
SRL	<---	ResUtil	-۱۳۲۲/۱۷۱	۹۱۶/۵۵۳	-۱/۴۴۳	۰/۱۴۹
SoilRes	<---	ResUtil	۰/۱۶۵	۰/۱۱۹	۱/۳۹۰	۰/۱۶۵
PlantP	<---	ResUtil	۱/۶۲۳	۱/۱۱۳	۱/۴۵۸	۰/۱۴۵
Amax	<---	ResUtil	-۴/۸۶۱	۹/۸۵۶	-۰/۴۹۳	۰/۶۲۲

جدول ٤- ضرایب رگرسیونی استاندارد شده سازه‌های مدل به‌عنوان متغیر مستقل

			Estimate
ResUtil	<---	ResCap	-۰/۵۵۸
CT	<---	ResUtil	-۰/۷۲۶
PlantH	<---	ResUtil	-۰/۸۸۵
LAI	<---	ResCap	۰/۸۸۹
SPAD	<---	ResCap	۰/۴۵۶
Drymatter	<---	ResCap	۰/۸۳۶
FvFm	<---	ResUtil	۰/۲۳۰
StemD	<---	ResCap	۰/۷۰۷
Colon	<---	ResCap	۰/۳۴۹
CobN	<---	ResUtil	-۰/۳۹۴
Seedyield	<---	ResUtil	-۰/۷۵۹
SRL	<---	ResUtil	-۰/۵۶۲
SoilRes	<---	ResUtil	۰/۴۶۰
PlantP	<---	ResUtil	۰/۶۰۶
Amax	<---	ResUtil	-۰/۰۸۰

جدول ٥- واریانس (عناصر قطری جدول) هریک از متغیرهای اندازه‌گیری شده به همراه کوواریانس (عناصر غیر قطری) آن‌ها

	Amax	SoilRes	StemD	FvFm	PlantP	PlantH	Drymatter	LAI	Seedyield	CobN	Colon	SRL	SPAD	CT
Amax	۱/۵۸۰													
SoilRes	-۰/۰۰۱	۰/۰۰۰												
StemD	-۰/۰۴۵	۰/۰۰۰	/۰۵۹۰											
FvFm	-۰/۰۱۳	۰/۰۰۰	/۰۰۴-۰	۰/۰۰۸										
PlantP	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰	/۰۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۳									
PlantH	-۱/۰۸۶	-۰/۰۳۹	/۱۹۲۱	-۰/۲۹۱	-۰/۴۱۰	۱۹۵/۲۰								
Drymatter	-۴۱/۵۲۱	-۰/۰۵۹	/۱۴۳۲۹	-۱/۷۹۳	-۲/۶۱۰	۱۳۲۶/۳۹	/۶۳۳۶۴۰۹							
LAI	-۰/۰۴۱	۰/۰۰۰	/۰۴۹۰	-۰/۰۰۲	-۰/۰۰۵	۲/۸۳	۴۶/۹۴	۰/۱۱۰						
Seedyield	۰/۵۰۱	-۰/۰۰۷	/۲۲۱۰	-۰/۰۱۲	-۰/۰۵۸	۲۳/۳۷	۱۷۱/۵۰	۰/۴۷۶	۶/۷۷					
CobN	۰/۲۰۶	۰/۰۰۰	/۰۰۹۰	-۰/۰۰۳	-۰/۰۲۴	۳/۶۶	۵/۲۸	۰/۰۰۰	۱/۱۶	۰/۹۷				
Colon	-۱/۵۷۷	۰/۰۰۱	/۲۶۱۰	۰/۰۱۴	-۰/۰۰۹	۱۷/۲۶	۳۲۰/۱۷	۰/۶۱۴	۱/۹۹	-۱/۲۸	۳۰/۸۷			
SRL	۹/۱۱۰	-۰/۱۸۰	/۱۴۳۰	۰/۹۲۴	-۱/۰۱۹	۳۴۶/۸۹	۲۳۴۵/۹۰	۴/۰۶۳	۵۸/۴۸	۱/۷۷	۷۱/۷۶	۲۳۸۵/۶۸		
SPAD	۰/۷۱۶	-۰/۰۰۴	/۳۳۷۰	-۰/۰۱۳	۰/۰۲۰	۶/۲۴	۱۷۹/۱۱	۰/۳۳۰	۳/۹۵	۰/۶۲	۱/۷۶	۲۲/۳۷	۷/۳۲	
CT	۰/۰۲۸	-۰/۰۰۶	/۰۱۳-۰	-۰/۰۳۸	-۰/۰۵۸	۱۸/۰۰	۲۰/۴۴	۰/۱۴۰	۲/۸۴	۰/۸۸	-۰/۲۸	۲۷/۹۹	۰/۱۲	۳/۸۶

در این جدول، کوواریانس‌های بین عملکرد دانه و ماده‌ی خشک (۱۷۱/۵۰۱)، ماده‌ی خشک و دمای کانوپی (۲۰/۴۴۷)، ماده‌ی خشک و ارتفاع بوته (۱۳۲۶/۳۹)، ماده‌ی خشک و قطر ساقه (۲۹/۱۴)، ماده‌ی خشک و درصد کلونیزه شدن طول ریشه (۳۲۰/۱۷)، عملکرد دانه و طول مخصوص ریشه (۵۸/۴۸)، ماده‌ی خشک و طول مخصوص ریشه (۲۳۴۵/۹۰)، دمای کانوپی و طول مخصوص ریشه (۲۷/۹۹)، ارتفاع بوته و طول مخصوص ریشه (۳۴۶/۸۹)، درصد کلونیزاسیون ریشه و طول مخصوص ریشه (۷۱/۷۶)، ماده‌ی خشک و شاخص سطح برگ (۴۶/۹۴)، ماده‌ی خشک و عدد اسپد (۱۷۹/۱۱)، و طول مخصوص ریشه و عدد اسپد (۲۲/۳۷) بیشترین مقادیر را به‌خود اختصاص دادند.

جدول ۶ ضرایب همبستگی بین متغیرهای اندازه‌گیری شده که در واقع مقادیر استاندارد شده کوواریانس‌های بین متغیرهای اندازه‌گیری شده (جدول ۵) هستند را نشان می‌دهد. با بررسی این جدول می‌توان از میزان رابطه‌ی متغیرهای قابل اندازه‌گیری با یکدیگر آگاهی یافت. عملکرد دانه با دمای کانوپی (۰/۵۵)، ارتفاع بوته (۰/۶۴)، شاخص سطح برگ (۰/۵۵) و عدد اسپد (۰/۵۶) همبستگی بالایی نشان داد. ماده‌ی خشک با ارتفاع بوته (۰/۴۹)، قطر ساقه (۰/۶۲)، شاخص سطح برگ (۰/۷۴) همبستگی قوی نشان داد. بین دمای کانوپی و ارتفاع بوته (۰/۶۵) و ارتفاع بوته با طول مخصوص ریشه (۰/۵۰) و شاخص سطح برگ (۰/۶۱) و قطر ساقه با شاخص سطح برگ (۰/۶۰) و عدد اسپد (۰/۵۱) همبستگی بالایی وجود داشت.

جدول ٦- ضرایب همبستگی بین متغیرهای اندازه‌گیری شده که در واقع مقادیر استاندارد شده کوواریانس‌ها هستند

	Amax	SoilRes	StemD	FvFm	PlantP	PlantH	Drymatter	LAI	Seedyield	CobN	Colon	SRL	SPAD	CT
Amax	۱/۰۰۰													
SoilRes	۰/۱۰۹-	۱/۰۰۰												
StemD	۰/۱۴۸-	۰/۰۳۱	۱/۰۰۰											
FvFm	۰/۱۱۵-	۰/۱۹۹	-۰/۲۰۴	۱/۰۰۰										
PlantP	۰/۰۹۷	۰/۲۵۶	-۰/۰۲۴	۰/۰۷۳	۱/۰۰۰									
PlantH	۰/۰۶۲	-۰/۳۷۲	۰/۳۵۱	-۰/۲۳۱	-۰/۵۲۸	۱/۰۰۰								
Drymatter	۰/۱۷۳-	-۰/۰۴۱	۰/۶۲۷	-۰/۱۰۴	-۰/۲۴۶	۰/۴۹۸	۱/۰۰۰							
LAI	۰/۰۹۸-	-۰/۱۰۹	۰/۶۰۴	-۰/۰۷۷	-۰/۲۶۳	۰/۶۱۲	۰/۷۴۲	۱/۰۰۰						
Seedyield	۰/۱۵۳	-۰/۳۴۹	۰/۳۴۹	-۰/۰۵۱	-۰/۴۰۲	۰/۶۴۳	۰/۳۴۵	۰/۵۵۱	۱/۰۰۰					
CobN	۰/۱۶۶	-۰/۰۳۹	۰/۰۳۸	-۰/۰۳۶	-۰/۴۲۹	۰/۲۶۶	۰/۰۲۸	-۰/۰۰۱	۰/۴۵۲	۱/۰۰۰				
Colon	۰/۲۲۶-	۰/۰۳۵	۰/۱۹۳	۰/۰۲۸	-۰/۰۲۹	۰/۲۲۲	۰/۳۰۲	۰/۳۳۳	۰/۱۳۸	-۰/۲۳۴	۱/۰۰۰			
SRL	۰/۱۴۸	-۰/۴۹۴	۰/۰۱۲	-۰/۲۱۰	-۰/۳۷۵	۰/۵۰۸	۰/۲۵۲	۰/۲۵۱	۰/۴۶۰	۰/۰۳۷	۰/۲۶۴	۱/۰۰۰		
SPAD	۰/۲۱۰	-۰/۱۷۶	۰/۵۱۱	-۰/۰۵۳	۰/۱۳۵	۰/۱۶۵	۰/۳۴۷	۰/۳۶۸	۰/۵۶۲	۰/۲۳۴	۰/۱۱۷	۰/۱۶۹	۱/۰۰۰	
CT	۰/۰۱۱	-۰/۴۲۰	-۰/۰۲۸	-۰/۲۱۶	-۰/۵۲۵	۰/۶۵۵	۰/۰۵۴	۰/۲۱۵	۰/۵۵۶	۰/۴۵۴	-۰/۰۲۶	۰/۲۹۲	۰/۰۲۳	۱/۰۰۰

در جدول ۷ مقادیر همبستگی‌های چندگانه مربع[1] نشان داده شده‌اند. در این جدول دو گروه از متغیرها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در گروه نخست، ضرایب مربوط به متغیر وابسته (سازه تبدیل منابع) و در گروه دوم ضرایب مربوط به متغیرهای اندازه‌گیری شده نشان داده شده‌اند. مقادیر مربوط به گروه اول معادل مقدار R^2 در تحلیل رگرسیون است. به‌عنوان مثال، مقدار ۰/۳۱۱ برای متغیر وابسته‌ی تبدیل منابع بیانگر آن است که مدل مفروض، ۳۱/۱ درصد از تغییرات متغیر تبدیل منابع را توضیح می‌دهد.

1- Squared Multiple Correlations

جدول ۷- مقادیر همبستگی‌های چندگانه مربع بین سازه تبدیل منابع و متغیرهای اندازه‌گیری شده در مدل ساختاری

	Estimate
ResUtil	۰/۳۱۱
Amax	۰/۰۰۶
SoilRes	۰/۲۱۲
StemD	۰/۵۰۰
FvFm	۰/۰۵۳
PlantP	۰/۳۶۷
PlantH	۰/۷۸۴
Drymatter	۰/۷۰۰
LAI	۰/۷۹۰
Seedyield	۰/۵۷۵
CobN	۰/۱۵۶
Colon	۰/۱۲۲
SRL	۰/۳۱۶
SPAD	۰/۲۰۸
CT	۰/۵۲۷

مقادیر همبستگی چندگانه مربع مربوط به متغیرهای اندازه‌گیری شده، معادل مفهوم اعتبار است در واقع، این ضرایب همان مربع بارهای عاملی استاندارد می‌باشند. برای مثال، مقدار ۰/۵۷۵ برای متغیر عملکرد دانه به این معنی است که متغیر پنهان تبدیل منابع، ۵۷/۵ درصد از تغییرات عملکرد دانه را توضیح می‌دهد. مقدار همبستگی چندگانه‌ی مربع، می‌تواند میزان کفایت هریک از این متغیرها را نیز نشان دهد. مقادیر همبستگی بین ۳۰ درصد تا ۵۰ درصد نشان می‌دهد که متغیر قابل اندازه‌گیری نسبتاً ضعیف می‌باشد، ولی در عین حال برای ادامه‌ی تحلیل کفایت می‌کند. مقادیر بزرگتر از ۵۰ درصد نشان می‌دهد که متغیر قابل اندازه‌گیری، جهت محاسبه‌ی متغیر پنهان قابل اطمینان می‌باشد. همان‌گونه که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، مقادیر همبستگی چندگانه مربوط به متغیرهای اندازه‌گیری شده‌ی شاخص سطح برگ (۰/۷۹۰)، ارتفاع بوته (۰/۷۸۴)، عدد اسپد (۰/۲۰۸)، ماده خشک (۰/۷۰۰)، عملکرد دانه (۰/۵۷۵)، دمای کانوپی (۰/۵۲۷) و قطر ساقه (۰/۵۰۰) بود که از بین آنها LAI و StemD و SPAD وDrymatter مربوط به سازه‌ی تسخیر منابع و PlantH، Seedyield و CT مربوط به سازه‌ی تبدیل منابع بودند، که حاکی از آن است که این متغیرها، شاخص‌های ایده‌آلی برای سنجش سازه‌های پنهان مربوطه به خود بودند. برای سازه‌ی پنهان تبدیل منابع، محتوای فسفر گیاه (۰/۳۶۷) مقیاسی نسبتاً قوی و تنفس خاک، فتوسنتز بیشینه و نسبت کلروفیل فلورسانی متغیر به بیشینه، شاخص‌های ضعیفی بودند.

به‌طور کلی نتایج جدول ۷ حاکی از آن است که با توجه به همبستگی‌های چندگانه‌ی مربع بالای سازه‌ی تبدیل منابع با عملکرد دانه، دمای کانوپی، ارتفاع بوته، و برعکس همبستگی‌های چندگانه‌ی مربع پایین فتوسنتز بیشینه، درصد کلونیزاسیون ریشه و طول مخصوص ریشه، آن چیزی که تعیین‌کننده‌ی نهایی عملکرد ذرت بوده، توانایی آن در تبدیل منابع بوده است. در بحث مربوط به تسخیر منابع، همبستگی چندگانه‌ی بالای شاخص سطح برگ، ارتفاع بوته، و عملکرد دانه نشانگر آن است که تسخیر نور از طریق سطح برگ بیشتر و تبدیل آن از طریق توزیع فضایی مطلوب سطح برگ (از طریق ارتفاع بوته) بیشترین نقش را در تعیین عملکرد ذرت داشته‌اند. بنابراین، به نظر می‌رسد که تلقیح ذرت با میکوریزا، اثر مستقیمی در جذب منابع بیشتر نداشته است. شاید حجم وسیع ریشه‌ی افشان ذرت و توانایی این گیاه در تخلیه‌ی منابع خاک که در منابع متعدد به آن اشاره شده است، تأییدی بر این نکته باشد که همزیستی میکوریزایی برای چنین گیاهی، اثرات مستقیمی در جذب بیشتر منابع از طریق افزایش توان ریشه به همراه نخواهد داشت.

با توجه به ضرایب همبستگی بین LAI و Colon، و LAI و SRL در جدول sample Corre که به‌ترتیب ۰/۳۳ و ۰/۲۵ برآورد شده‌اند، و همچنین ضرایب همبستگی بین PlantH و SRL، و PlantH و LAI که به‌ترتیب ۰/۵۰ و ۰/۶۱ محاسبه شده‌اند، به نظر می‌رسد که اثر میکوریزا به‌طور غیر مستقیم و از طریق افزایش سطح برگ و ارتفاع بوته به‌وقوع پیوسته است. محققان متعدد، تأثیر قارچ میکوریز آربوسکولار بر افزایش سطح برگ گیاه میزبان را گزارش کرده‌اند.

با تفریق ماتریس کوواریانس نمونه از ماتریس کوواریانس ضمنی[1] (یا برآورد شده)، ماتریسی به نام ماتریس کوواریانس باقی‌مانده محاسبه شد (جدول ۸). هرچه میزان باقی‌مانده‌های این ماتریس به صفر نزدیک‌تر باشد، نشانگر نزدیکی مدل نظری با داده‌های تجربی است. مشکلی که در تفسیر این ماتریس وجود دارد آن است که از آن‌جا که تمام متغیرهای قابل اندازه‌گیری با استفاده از یک مقیاس مشابه اندازه‌گیری نمی‌شوند، بنابراین، دانستن این که آیا میزان خطای باقی‌مانده یک متغیر (در ماتریس کوواریانس باقی‌مانده) بیشتر یا کمتر از میزان خطای باقی‌مانده متغیر دیگر هست یا خیر، مشکل می‌شود. به همین دلیل، ماتریس کوواریانس خطای باقی‌مانده استاندارد شده، توسط نرم افزار محاسبه و در جدول ۸ ارائه شده است. همان‌گونه که قبلاً بیان شد، این کوواریانس‌های استاندارد شده دارای توزیع نرمال بوده و چنانچه مقدار خطای باقیمانده استاندارد شده بزرگتر از ۱/۹۶ (معمولاً ۲ در نظر می‌گیرند) باشد، نشانگر آن است که کوواریانس‌های ضمنی و کوواریانس‌های نمونه، از نظر آماری به‌طور معنی‌داری با

1- Implied

یکدیگر متفاوت هستند. مقادیر اندک (کمتر از یک) برای کوواریانس‌های درصد کلونیزاسیون ریشه با محتوای فسفر گیاه (۰/۷۱۴)، تنفس خاک (۰/۱۵۹)، نسبت کلروفیل فلورسانس متغیر به بیشینه (۰/۰۳۲)، قطر ساقه (۰/۴۵۲)، و شاخص سطح برگ (۰/۶۱۹) حاکی از همخوانی ماتریس های کوواریانس ضمنی و نمونه است. مقادیر باقی‌مانده برای کوواریانس‌های طول مخصوص ریشه با قطر ساقه (۰/۷۵۸) و شاخص سطح برگ (۰/۹۳۵) نیز اندک بودند (جدول ۸)

جدول ۸- مقادیر باقی‌مانده‌ی کوواریانس‌های استاندارد شده متغیرهای اندازه‌گیری شده در مدل

	Amax	Soil Res	Stem D	Fv/Fm	Plant P	Plant H	Dry matter	LAI	Seed yield	Cob N	Colon	SRL	SPAD	CT
Amax	۰/۰۰۰													
SoilRes	-۰/۴۹۶	۰/۰۰۰												
StemD	-۱/۲۲۹	۱/۴۳۴	۰/۰۰۰											
FvFm	-۰/۶۵۸	۰/۶۳۵	-۰/۷۷۴	۰/۰۰۰										
PlantP	۱/۰۰۱	-۰/۱۵۲	۱/۴۳۰	-۰/۴۴۹	۰/۰۰۰									
PlantH	-۰/۰۶۴	۰/۲۲۷	۰/۰۰۸	-۰/۱۸۱	۰/۰۵۱	۰/۰۰۰								
Drymatter	-۱/۴۴۳	۱/۱۶۱	۰/۲۱۱	۰/۰۲۲	۰/۲۴۳	۰/۵۳۵	۰/۰۰۰							
LAI	-۰/۹۴۳	۰/۷۹۸	-۰/۱۴۳	۰/۲۵۱	۰/۲۴۷	۱/۰۸۹	-۰/۰۰۶	۰/۰۰۰						
Seedyield	۰/۶۳۱	۰/۰۰۱	۰/۳۲۷	۰/۸۳۶	۰/۳۵۸	-۰/۱۶۶	-۰/۰۵۶	۱/۱۲۵	۰/۰۰۰					
CobN	۰/۹۲۰	۰/۹۶۰	-۰/۷۹۵	۰/۳۷۶	-۱/۲۶۷	-۰/۵۳۷	-۱/۰۵۱	-۱/۳۲۲	۱/۰۰۴	۰/۰۰۰				
Colon	-۱/۶۵۵	۰/۸۴۸	-۰/۳۶۰	۰/۵۰۱	۰/۶۰۶	۰/۳۳۸	۰/۰۶۶	۰/۱۵۲	-۰/۰۶۶	-۲/۱۲۷	۰/۰۰۰			
SRL	۰/۷۰۷	-۱/۵۵۹	-۱/۴۰۴	-۰/۵۴۵	-۰/۲۲۲	۰/۰۶۳	-۰/۰۷۱	-۰/۱۸۳	۰/۲۱۰	-۱/۲۳۹	۱/۰۵۶	۰/۰۰۰		
SPAD	۱/۳۰۳	-۰/۴۰۳	۱/۲۳۲	۰/۰۳۹	۱/۹۵۴	-۰/۴۰۱	-۰/۲۲۰	-۰/۲۳۶	۲/۴۸۵	۰/۹۱۱	-۰/۲۸۳	۰/۱۷۸	۰/۰۰۰	
CT	-۰/۳۲۳	-۰/۵۵۷	-۲/۰۷۲	-۰/۳۲۹	-۰/۵۳۷	.071	-۱/۸۴۶	-۰/۹۳۴	۰/۰۳۱	۱/۱۰۳	-۱/۱۳۴	-۰/۷۴۲	-۱/۰۹۲	۰/۰۰۰

اثرات مستقیم استاندارد شده که معادل ضرایب رگرسیونی در شکل ۱- ب هستند در جدول ۹ الف نشان داده شده‌اند. اثر مستقیم استاندارد برابر ۰/۸۸۹ برای شاخص سطح برگ به معنای آن است که یک واحد افزایش در انحراف معیار سازه‌ی پنهان تسخیر منابع، ۰/۸۸۹ افزایش در انحراف معیار شاخص سطح برگ را به‌دنبال خواهد داشت. بیشترین مقدار برای سازه‌ی نامبرده پس از شاخص سطح برگ و ماده‌ی خشک، به متغیر قطر ساقه (۰/۷۰۷) که نمایانگر توان گیاه در نقل و انتقال مواد خام و شیره‌ی پرورده است، اختصاص یافت. اعداد ۰/۳۴۹ و ۰/۳۱۴ به‌ترتیب برای درصد کلونیزه شدن ریشه و طول مخصوص ریشه، بیان‌کننده‌ی این نکته است، که سهم کلونیزه شدن ریشه توسط میکوریزا و به‌دنبال آن در تسخیر منابع، کم بیشتر از سهم افزایش طول مخصوص ریشه توسط آن در تسخیر منابع بوده است. این سهم سی و پنج درصدی در توان تسخیر منابع توسط ذرت با دیگر نتایج حاصل از تحلیل داده‌های این پژوهش (جدول ۴ و ۷) منطقی به نظر رسیده و تأیید می‌شود.

ضرایب کل مسیرها از مجموع ضرایب مستقیم و غیرمستقیم هر متغیر حاصل می‌شود. استاندارد شده‌ی این ضرایب به‌منظور مقایسه‌ی بهتر، در جدول ۹ ج آورده شده است. در سازه‌های تسخیر منابع و تبدیل منابع، بیشترین اثرات مستقیم به‌ترتیب مربوط به متغیرهای شاخص سطح برگ و ارتفاع بوته بود. اگر ارتباط قطر ساقه با دستجات آوندی و روابط حاک بر منبع و مخزن در نظر گرفته شوند، در آن صورت اهمیت قطر بیشتر ساقه در تسخیر منابع روشن می‌شود. اهمیت ارتفاع بوته بر تبدیل منابع، بی‌شک به توزیع هندسی بهتر برگ‌ها روی گیاه و جذب بیشتر و مؤثرتر تشعشع برمی‌گردد.

نتایج ارزیابی نکویی برازش مدل در جدول‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. یکی از شاخص‌های مهم در ارزیابی نیکویی برازش مدل، ریشه‌ی دوم میانگین مربعات خطای برآورد (RMSEA) است. همانطور که در جدول ۱۰ دیده می‌شود، مقدار این شاخص ۰/۱۴۴ است که انطباق قابل قبول داده‌های اندازه‌گیری شده با مدل نظری پژوهش را نشان می‌دهد.

در جدول ۱۱، NPAR تعداد پارامترهای مدل نشان داده شده است. CMIN مقدار کای مربع را نشان می‌دهد که برای مدل پژوهش، ۱۵۰ می‌باشد. CMIN/DF مقدار کای مربع بهنجار است که برای مدل حاضر ۱/۹۷ برآورد شد. برخی از محققان مقدار بین ۱ و ۲ و عده‌ای دیگر مقدار ۱ تا ۳ را برای این شاخص مناسب می‌دانند. مدل اشباع شده، مدلی است که در آن تمام پارامترهای ممکن برآورد

شده‌اند. به‌عبارتی در این مدل، تمامی رابطه‌های ممکن بین متغیرها برقرار شده است.

جدول ۹- اثرات مستقیم استاندارد شده (الف)، اثرات غیر مستقیم استاندارد شده (ب) و اثرات کل استاندارد شده (ج)، برای سازه‌های تسخیر و تبدیل منابع و متغیرهای اندازه‌گیری شده در مدل ساختاری

(الف)

	ResCap	ResUtil
ResUtil	-۰/۵۵۸	۰/۰۰۰
Amax	۰/۰۰۰	-۰/۰۸۰
SoilRes	۰/۰۰۰	۰/۴۶۰
StemD	۰/۷۰۷	۰/۰۰۰
FvFm	۰/۰۰۰	۰/۲۳۰
PlantP	۰/۰۰۰	۰/۶۰۶
PlantH	۰/۰۰۰	-۰/۸۸۵
Drymatter	۰/۸۳۶	۰/۰۰۰
LAI	۰/۸۸۹	۰/۰۰۰
Seedyield	۰/۰۰۰	-۰/۷۵۹
CobN	۰/۰۰۰	-۰/۳۹۴
Colon	۰/۳۴۹	۰/۰۰۰
SRL	۰/۰۰۰	-۰/۵۶۲
SPAD	۰/۴۵۶	۰/۰۰۰
CT	۰/۰۰۰	-۰/۷۲۶

(ب)

	ResCap	ResUtil
ResUtil	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
Amax	۰/۰۴۵	۰/۰۰۰
SoilRes	-۰/۲۵۷	۰/۰۰۰
StemD	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
FvFm	-۰/۱۲۸	۰/۰۰۰
PlantP	-۰/۳۳۸	۰/۰۰۰
PlantH	۰/۴۹۴	۰/۰۰۰
Drymatter	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
LAI	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
Seedyield	۰/۴۲۳	۰/۰۰۰
CobN	۰/۲۲۰	۰/۰۰۰
Colon	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
SRL	۰/۳۱۴	۰/۰۰۰
SPAD	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
CT	۰/۴۰۵	۰/۰۰۰

(ج)

	ResCap	ResUtil
ResUtil	-۰/۵۵۸	۰/۰۰۰
Amax	۰/۰۴۵	-۰/۰۸۰
SoilRes	-۰/۲۵۷	۰/۴۶۰
StemD	۰/۷۰۷	۰/۰۰۰
FvFm	-۰/۱۲۸	۰/۲۳۰
PlantP	-۰/۳۳۸	۰/۶۰۶
PlantH	۰/۴۹۴	-۰/۸۸۵
Drymatter	۰/۸۳۶	۰/۰۰۰
LAI	۰/۸۸۹	۰/۰۰۰
Seedyield	۰/۴۲۳	-۰/۷۵۹
CobN	۰/۲۲۰	-۰/۳۹۴
Colon	۰/۳۴۹	۰/۰۰۰
SRL	۰/۳۱۴	-۰/۵۶۲
SPAD	۰/۴۵۶	۰/۰۰۰
CT	۰/۴۰۵	-۰/۷۲۶

جدول ۱۰- مقادیر RMSEA برای مدل برآورد شده و مدل مستقل

Model	RMSEA	LO 90	HI 90	PCLOSE
Default model	۰/۱۴۴	۰/۱۱۰	۰/۱۷۸	۰/۰۰۰
Independence model	۰/۲۴۶	۰/۲۱۹	۰/۲۷۳	۰/۰۰۰

مدل اشباع شده همواره یک مدل با انطباق کامل بوده و مقدار کای مربع آن برابر صفر و درجه آزادی نیز برابر صفر می‌باشد. برخلاف مدل اشباع شده، مدل استقلال، مدلی است که تنها نشان‌دهنده‌ی واریانس‌های مربوط به متغیرهای اندازه‌گیری شده است. به‌بیان دیگر در مدل استقلال (یا مدل صفر) هیچ رابطه‌ای بین متغیرها وجود ندارد.

جدول ۱۱- مقادیر کای مربع CMIN برای مدل برآورده شده، مدل اشباع و مدل مستقل

Model	NPAR	CMIN	DF	P	CMIN/DF
Default model	۲۹	۱۵۰/۰۲	۷۶	۰/۰۰	۱/۹۷
Saturated model	۱۰۵	۰/۰۰	۰		
Independence model	۱۴	۳۴۹/۴۶	۹۱	۰/۰۰	۳/۸۴

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، نتایج حاصل از مدل‌سازی معادلات ساختاری در پژوهش حاضر نشان داد که با در نظر گرفتن دو سازه‌ی پنهان تسخیر منابع و تبدیل منابع و روابط علت و معلولی تأیید شده در مدل، می‌توان در جهت مدیریت جداگانه و ویژه‌ی هرکدام از متغیرهای دارای بیشترین تأثیر بر آنها، نسبت به تولید مطلوب در کنار صرفه‌جویی در زمان، هزینه و انرژی اقدام نمود. به نظر می‌رسد که متغیرهایی چون شاخص سطح برگ، قطر ساقه، ماده‌ی خشک، عدد اسپد (محتوای کلروفیل)، ارتفاع بوته و دمای کانوپی بیشترین تأثیر علّی در شکل‌گیری عملکرد ذرت در مزرعه در شرایط تلقیح با قارچ میکوریزا را داشتند. از سوی دیگر، به‌نظر می‌رسد که فواید مستقیم همزیستی میکوریزایی عمدتاً از طریق مشارکت سی و پنج درصدی در تسخیر منابع بروز یافت.

منابع

1- Allen, M. F. 2001. Modeling arbuscular mycorrhizal infection: is % infection an appropriate variable? Mycorrhiza 10: 255-258.
2- Allen, M. F., W. Swenson, J. I. Querejeta, L. M. Egerton-Warburton, and K. K. Treseder. 2003. Ecology of Mycorrhizae: A Conceptual Framework for Complex Interactions among Plants and Fungi. Annual Review of Phytopathology 41: 271-303.
3- Barea, J. M., M. J. Pozo, R. Azcon, and C. Azcon-Aguilar. 2005. Microbial co-operation in the rhizosphere. Journal of Experimental Botany 56: 1761-1778.
4- Brundrett, M. C., and L. K. Abbott. 2002. Arbuscular mycorrhizas in plant communities. In: Microorganisms in Plant Conservation and Biodiversity. Sivasithamparam, K., Dixon, K.W., and Barrett, R.L. (Eds.). Kluwer Academic Press. ISBN: 1402007809. pp. 151-193.
5- Cramer, D. 1998. Fundamentals statistics for Social Research. London, Routledge.
6- Cronbach, L. 1951. Coefficient alpha and the internal structure of tests. Psychometrika 16: 297-334.
7- Dodd, J. C. 2000. The role of arbuscular mycorrhizal fungi in agro-natural ecosystems. Outlook on Agriculture, 29: 63-70.
8- Giovannetti, M., and B. Mosse. 1980. An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. New Phytologist 84: 489-500.
9- Gosling, P., A. Hodge, G. Goodlass, and G. D. Bending. 2006. Arbuscular mycorrhiza fungi and organic farming. Agriculture, Ecosystems and Environment 113: 17-35.
10- Harrison, M. J. 2005. Signaling in the arbuscular mycorrhizal symbiosis. Annual Review of Microbiology, 59: 19-42.
11- Kormanik, P. P., and A. C. McGraw. 1982. Quantification of vesicular-arbuscular mycorrhizae in plant roots. Available Online at: http://md1.csa.com/partners/viewrecords.php?requester=gs&collection=ENV&recid=596492.
12- Kormanik, P. P., and A. C. McGraw. 1982a. In: Methods and principles of mycorrhizal research. Schenk, N.C. (Ed.). The American Phytopathological Society, St. Paul, MN. pp. 37-45.
13- Miller, R. M., and J. D. Jastrow. 2000. Mycorrhizal fungi influence soil structure. In: Arbuscular Mycorrhizas: Physiology and Function. Kapulnik, Y., Douds, D.D. (Eds.). Kluwer Academic, Dordrecht, pp. 3-18.
14- Morphy, J., and J. P. Riley. 1962. Phosphorus analysis procedure. In: Methods of soil analysis: part 2, Chemical and Microbiological Properties. Page, A. L. (Ed). 1982. Second Edition. Madison, Wisconsin USA. pp. 413-427.
15- Rajapakse, S., and C. Miller. 1992. Methods for studying vesicular-arbuscular mycorrhizal root colonization and related root physical properties. In: Methods in microbiology, Volume 24. Norris, J.R., Read, D.J., and Varma, A. K. (Eds). Academic Press Ltd., USA. pp. 302-316.
16- Read, D. J. 1991. Mycorrhizas in ecosystems. Experientia 47: 376-391.
17- Remy, W., T. N. Taylor, H. Hass, and H. Kerp. 1994. Four hundred million year old vesicular-arbuscular mycorrhiza. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 91: 11841-11843.
18- Roth, G., and P. H. Goyne. 2004. Measuring plant water status. In: Waterpak. Dugdale, H., Harris, G., Neilsen, J., Richards, D., Roth, G., and Williams, D. (Eds). 2004. Cotton CRC, CSIRO, Narrabi, Australia. pp. 157-Available online at: http://web.cotton.crc.org.au/content/Industry/publications/Water and Irrigation/Waterpak.
19- Smith, S. E., and D. J. Read. 1997. Mycorrhizal Symbiosis. 2nd Edn. Academic Press, San Diego, California, USA. 605 p.
20- Sylvia, D.M., and N.C. Schenck. 1983. Application of superphosphate to mycorrhizal plants stimulates sporulation of phosphorus-tolerant vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. New Phytologist 95: 655-661.
21- Taylor, T. N., W. Remy, H. Hass, and H. Kerp. 1995. Fossil arbuscular mycorrhizae from the Early Devonian. Mycologia 87 (4): 560-573.
22- Tennant, D. 1975. A test of a modified line intersect method of estimating root length. Journal of Ecology 63: 995-1001.