

مقاومت آنتی‌زنوزی در پایه‌های سیب نسبت به شته مومی: رمزگشایی ارتباط صفات ریشه و اکولوژی شته

چکیده

مقاومت آنتی‌زنوزی پایه‌های سیب به شته مومی (*Eriosoma lanigerum* Hausmann) نقش کلیدی در کاهش خسارات اقتصادی ناشی از این آفت دارد. این پژوهش به منظور شناسایی مکانیسم‌های مقاومت و ارتباط آن با ویژگی‌های ریشه، طی هفت سال (سه سال اول پژوهش ۱۳۹۶-۱۳۹۸ مرحله تولید و آماده سازی مواد گیاهی و چهار سال بعدی پژوهش ۱۳۹۹-۱۴۰۲ به مرحله ارزیابی مقاومت) روی ۱۰ ژنوتیپ هیبرید حاصل از تلاقی پایه‌های پاکوتاه بومی و تجاری (M9، M27، B9) در ایستگاه تحقیقاتی کمالشهر کرج انجام شد. نمونه‌برداری دوهفته‌ای از کلنی‌های شته و ارزیابی شاخص‌هایی مانند ترجیح میزبانی، شیوع، تجمع کلنی و طاقچه زیستگاهی صورت گرفت. تحلیل عاملی دو مؤلفه اصلی جذابیت میزبانی و استقرار موفق (با $87/1\%$ واریانس) و محدودیت زیستگاهی (با $12/5\%$ واریانس) را شناسایی کرد. خوشه‌بندی پایه‌ها چهار گروه مقاومتی (حساس، نیمه‌حساس، نیمه‌مقاوم، مقاوم) را نشان داد که پایه M9op3 به‌عنوان مقاوم‌ترین ژنوتیپ با کمترین شاخص ترجیح ($0/63$) و بالاترین طاقچه بهره‌برداری نشده ($0/63$) معرفی شد. همبستگی مثبت تراکم ریشه‌های مولد با شاخص ترجیح ($0/51$) و ارتباط منفی طول منطقه ریشه‌زا با پتانسیل زیستگاهی ($-0/59$) تأیید کرد که ویژگی‌های ریشه تأثیر مستقیمی بر مقاومت آنتی‌زنوزی دارند. نتایج، اهمیت تلفیق صفات مورفولوژیک ریشه (کاهش تراکم ریشه‌های مولد و افزایش طول منطقه ریشه‌زا) با مکانیسم‌های اکولوژیک را در توسعه پایه‌های مقاوم برجسته ساخت. این یافته‌ها راهبردهای اصلاحی برای گزینش ژنوتیپ‌های پایدارتر با کاهش مصرف سموم و تقویت باغبانی پایدار ارائه می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: اصلاح پایه‌های مقاوم، ژنوتیپ‌های هیبرید، تنش زیستی، مدیریت تلفیقی

Antixenosis Resistance in Apple Rootstocks Against Woolly Aphids: Deciphering the Relationship Between Root Traits and Aphid Ecology

Abstract

Antixenosis resistance in apple rootstocks against the woolly apple aphid (*Eriosoma lanigerum* Hausmann) plays a pivotal role in reducing economic losses caused by this pest. This study aimed to elucidate resistance mechanisms and their association with root traits, conducted over seven years (The first three years of research 2017-2019 were devoted to the production and preparation of plant materials, and the next four years 2020-2023 to the resistance assessment phase.) on 10 hybrid genotypes derived from crosses between dwarf native and commercial rootstocks (M9, M27, B9) at the Kamalshahr Research Station in Karaj, Iran. Biweekly sampling of aphid colonies and evaluating indices such as host preference, prevalence, colony aggregation, and habitat niche were performed. Factor analysis identified two principal components: host attractiveness and successful establishment (87.1% variance) and habitat limitation (12.5% variance). Hierarchical clustering categorized rootstocks into four resistance groups (susceptible, semi-susceptible, semi-resistant, resistant), with M9op3 identified as the most resistant genotype, exhibiting the lowest host preference index (0.63) and the highest unexploited habitat niche (0.63). Positive correlations between root sucker density and host preference (0.51), alongside negative correlations between root elongation zone length and habitat potential (-0.59), confirmed the direct influence of root traits on antixenosis resistance. The results emphasize the integration of morphological root traits (reduced sucker density and increased root elongation zone length) with ecological mechanisms in developing resistant rootstocks. These findings provide breeding strategies for selecting resilient genotypes, reducing pesticide use, and promoting sustainable horticulture.

Keywords: Rootstock breeding, Hybrid genotypes, Biotic stress, Ecological niches, Integrated pest management

مقدمه

سیب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین محصولات باغی ایران، نقش قابل‌توجهی در اقتصاد کشاورزی و امنیت غذایی کشور ایفا می‌کند. با این حال، آفات و بیماری‌ها از جمله شته مومی (*Eriosoma lanigerum* Hausmann) به‌عنوان عامل تهدیدکننده اصلی، کارایی تولید این محصول را کاهش داده و خسارت‌های اقتصادی قابل‌توجهی به بار می‌آورند. استفاده از پایه‌های مقاوم سیب به شته مومی، هزینه‌های سمپاشی را تا 40% کاهش داده و عملکرد محصول را $20-30\%$ افزایش می‌دهد (Sandanayaka et al., 2003). این روش با حفظ سلامت کشاورزان، کاهش آلودگی محیطی و تقویت امنیت غذایی، صادرات را تا 25% رشد می‌دهد و پایداری اکولوژیک و اقتصادی باغات را تضمین می‌کند (Mathulwe, 2019).

در ایران، با توجه به جایگاه ویژه سیب در الگوی کشت باغی، پژوهش‌های متعددی در زمینه اصلاح پایه‌های مقاوم به‌ویژه با تمرکز بر پایه‌های پاکوتاه بومی و پایه‌های تجاری شناخته شده در سطح جهانی مانند سری M (M9، M27) و B9 انجام شده است. از جمله این تلاش‌ها می‌توان به دورگ‌گیری بین پایه‌های رویشی خارجی (Hajnajari, 2021) و بومی، بررسی قابلیت تکثیر رویشی نتاج اصلاحی و ارزیابی تحمل به تنش‌های محیطی مانند خشکی اشاره کرد (Atashkar et al., 2016; Atashkar et al., 2020). اگرچه دستاوردهای اخیر امیدبخش بوده، اما پویایی جمعیت‌های شته مومی و تکامل بیوتیپ‌های جدید، نیازمند تقویت برنامه‌های پایش، شناسایی نشانگرهای مولکولی مرتبط با مقاومت و تلفیق

روش‌های سنتی و نوین اصلاحی برای دستیابی به ارقام پایدار است. این روند نه تنها کاهش مصرف سموم و هزینه‌های تولید را به همراه دارد، بلکه گامی اساسی در جهت نیل به کشاورزی پایدار و حفظ جایگاه ایران در بازارهای جهانی میوه است.

پیشینه پژوهش

مقاومت گیاه میزبان به این آفت از دیرباز مورد توجه پژوهشگران بوده و به‌طور عمده در مکانیسم آنتی‌زنوز (واکنش غیرترجیحی مؤثر بر رفتار تغذیه‌ای حشره) تعریف می‌شود (Painter, 1951). مطالعات تاریخی نشان می‌دهد ارقامی مانند Winter Majetin و Northern Spy از بیش از یک قرن پیش به‌عنوان ژنوتیپ‌های مقاوم به شته مومی شناخته شده‌اند (Le Pelley, 1927)، تا حدی که در برخی مناطق مانند رودزیا (در جنوب آفریقا) در شمال رود لیمپوپو بوده و امروزه در این منطقه کشور زیمبابوه واقع شده‌است)، واردات پایه‌های غیرمقاوم ممنوع اعلام شد. توسعه پایه‌های مقاوم نظیر سری Malling-Merton (MM) شامل MM1، MM10 و MM111 در دهه‌های اخیر گام مؤثری در مدیریت این آفت بود (Preston, 1966; Sandanayaka *et al.*, 2005)، هرچند تفاوت در سطح مقاومت پایه‌های مختلف مانند M25 و MM106 در مقایسه با Northern Spy نشان داد که انتخاب ژنوتیپ‌های مناسب به شرایط اکولوژیک و بیوتیپ‌های محلی شته وابسته است (Young *et al.*, 1982). بررسی رفتار شته مومی روی ارقام Idared و Granny Smith پیوندشده بر پایه‌های M9 و MM106 تأثیر متقابل ژنوتیپ پایه و پیوندک را آشکار کرد؛ به‌طوری‌که رقم Granny Smith پیوندشده بر پایه M9، تراکم کلنی شته مومی به‌طور معنی‌داری بالاتر (به میزان ۲/۳ برابر) نسبت به رقم Idared روی پایه MM106 نشان داد (Lepaja *et al.*, 2014). از دیگر ارقام نیمه‌مقاوم می‌توان به پایه‌های Amere de Berthecourt، Atlas، Blushing Golden و Lyons اشاره کرد (Fluke, 1930). مطالعات مولکولی مکانیسم‌های مقاومت را با پاسخ‌های موضعی مانند مرگ سلولی (واکنش فوق‌حساسیت)، تولید گونه‌های فعال اکسیژن و پراکسید هیدروژن در محل تغذیه شته مرتبط دانسته‌اند (Zaayman *et al.*, 2009). با این حال، ظهور بیوتیپ‌های جدید شته مومی با توانایی غلبه بر ژن‌های مقاومت شناخته‌شده مانند Er1، Er2 و Er3، لزوم توسعه مستمر ارقام مقاوم با استفاده از ذخایر ژنتیکی متنوع پایه‌های سیب را پررنگ می‌سازد (Han and Korban, 2010; Moinina *et al.*, 2018).

روشن‌شناسی پژوهش

این پژوهش در ایستگاه تحقیقاتی کمالشهر کرج واقع در مجموعه ذخایر توارثی پژوهشکده میوه‌های معتدله و سردسیری طی سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۲ به مدت هفت سال (سه سال اول پژوهش ۱۳۹۶-۱۳۹۸ مرحله تولید و آماده‌سازی مواد گیاهی و چهار سال بعدی پژوهش ۱۳۹۹-۱۴۰۲ به مرحله ارزیابی مقاومت) انجام شد. این ایستگاه در فاصله ۴۸ کیلومتری غرب تهران با مختصات جغرافیایی ۵۱ درجه و ۲ دقیقه شرقی و ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۳۵۰ متر از سطح دریا قرار دارد. ویژگی‌های خاک منطقه شامل بافت لومی-رسی، پی‌هاش ۷.۸، ازت کل ۱ درصد، ازت آلی ۰.۷۸ درصد، پتاسیم قابل جذب ۵۷۵ پی‌پی‌ام و فسفر قابل جذب ۱۲.۱ پی‌پی‌ام بود. سیستم‌های اقلیمی شمالی، شمال غربی و غربی به‌ویژه جبهه‌های جنوب غربی، الگوی بارش را از آبان تا اواسط اردیبهشت شکل می‌دهند (Ehteshami-Moinabadi, 2022).

این مطالعه بر روی ۱۰ ژنوتیپ منتخب از تلاقی‌های بین پایه‌های پاکوتاه محلی (ازایش اصفهان و مربائی مشهد) به‌عنوان والد مادری و پایه‌های تجاری M9، M27 و B9 به‌عنوان والد پدری انجام شد (جدول ۱) (Atashkar *et al.*, 2016).

جدول ۱- مشخصات پایه‌های سیب مورد بررسی مقاومت آنتی‌زنوزی نسبت به شته موم

ژنوتیپ پایه	سال تولید	والد/ والدین	روش اصلاح
Azop3	۱۳۸۵	ازایش اصفهان	گرده‌افشانی آزاد
AZ*M92	۱۳۸۵	ازایش اصفهان * پایه رویشی M9	هیبرید
AZ*M27	۱۳۸۵	ازایش اصفهان * پایه رویشی M27	هیبرید
Azop2	۱۳۸۵	ازایش اصفهان	گرده‌افشانی آزاد
AZ*M91	۱۳۸۵	ازایش اصفهان * پایه رویشی M9	هیبرید
Azop2	۱۳۸۶	ازایش اصفهان	گرده‌افشانی آزاد
Azop3	۱۳۸۶	ازایش اصفهان	گرده‌افشانی آزاد
M9op3	۱۳۸۷	پایه رویشی M9	گرده‌افشانی آزاد
B9op	۱۳۸۶	پایه رویشی B9	گرده‌افشانی آزاد
Azop4	۱۳۸۶	ازایش اصفهان	گرده‌افشانی آزاد

نهال‌های جوان یک‌ساله از طریق تکثیر رویشی به روش خوابانیدن شاخه تولید و در گلدان‌های حاوی ترکیب خاک ماسه‌ای، رس و مواد آلی (نسبت ۲:۱:۱) پرورش یافتند. پس از رسیدن به مرحله رشد مناسب در سال دوم، آزمون‌های ترجیح میزبانی آغاز گردید (Fazio *et al.*, 2013). قلمه‌های ۲۵ سانتی‌متری تهیه‌شده در فصل زمستان پس از تیمار با هورمون ریشه‌زایی IBA (غلظت ۳۰۰۰ ppm) در محیط کشت پرلیت تحت دمای کنترل‌شده ۲۱ درجه سانتی‌گراد ریشه‌دار شده و به گلدان‌های بزرگتر با بستر خاکی ترکیبی (خاک باغی، ماسه، پیت ماس و مواد آلی) انتقال داده شدند (Hajnajari, 2021; Russo *et al.*, 2007). نهال‌ها در چیدمانی با فواصل کشت ۲ متر بین ردیف‌ها و ۱ متر روی ردیف در شرایط طبیعی خزانه کشت شدند. برنامه مدیریتی شامل آبیاری تحت فشار، حذف مکانیکی علف‌های هرز، کاربرد کود نیتروژنه (در سه مرحله ۱۶ گرمی) اجرا گردید. ارزیابی نهایی روی درختان سه‌ساله بدون اعمال هیچگونه روش کنترلی علیه آفات انجام شد (Atashkar *et al.*, 2016).

روش نمونه‌برداری

فرآیند پایش کلونی‌های هوایی شته مومی سیب به‌صورت دوهفته‌ای از ابتدای فروردین تا پایان آبان به مدت چهار سال از سال ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۲ اجرا شد. در هر مرحله، تمامی بخش‌های ریشه، طوقه، تنه و شاخه‌ها به‌دقت مورد بررسی قرار گرفتند. از هر ژنوتیپ هیبرید، پنج درخت و از هر درخت پنج شاخه به‌صورت تصادفی برای ارزیابی تراکم کلنی‌های شته در نواحی ریشه-طوقه، تنه و شاخه‌ها انتخاب شدند. صحت داده‌ها با محاسبه شاخص‌های واریانس نسبی (RV) و ضریب تغییرپذیری (CV) تأیید گردید (Latifian *et al.*, 2009). نمونه‌گیری از ریشه در عمق ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متری با رعایت فاصله یکنواخت بین درختان انجام شد (Beers *et al.*, 2010). به‌منظور جلوگیری از اختلال در رفتار طبیعی آفت، از روش غیرمخرب شمارش سریع استفاده شد که در آن هر تجمع شته با قطر حداکثر ۵ سانتی‌متر به‌عنوان یک کلنی مستقل محاسبه گردید (Verghese and Jayanthi, 2002). سطح طوقه با پوشش پلاستیکی سیاه پوشانده شد تا امکان رصد دوره‌ای بدون مزاحمت فراهم شود، درحالی‌که خاک‌دهی مجدد در نیمه دوم سال صورت پذیرفت (Damavandian, 2000). کلنی‌های شناسایی‌شده در هر مرحله و در طول دوره تحقیق ثبت و تحلیل شدند (Osborne, 2010). تعداد کل کلنی در هر نمونه برداری شمارش شدند (Osborne, 2010). کلنی-روز مؤثر (EAD) با استفاده از رابطه
$$EAD = \frac{C(i-1) - C_i}{2} \times t$$
 محاسبه شد (Machlitt, 1998). در این رابطه $C(i-1)$ و C_i به ترتیب تعداد کل کلنی فعال در هر هیبرید در نمونه‌برداری $i-1$ و i و t فاصله زمانی بین دو نمونه‌برداری بر حسب روز بود.

شاخص‌های مقاومت آنتی‌زیزی

شاخص ترجیح کلنی شته^۱

شاخص ترجیح کلنی شته مومی با استفاده از رابطه $C - Aphis = \frac{2A}{M+A}$ محاسبه شد (Krisnawati *et al.*, 2017). در این رابطه، A تعداد کلنی شته-روز مؤثر در هر پایه و M متوسط شته-روز مؤثر در کل پایه‌های سیب مورد مطالعه در هر تاریخ نمونه‌برداری است. اگر $C < 1$ مقاومت‌تر (پایه کمتر ترجیح داده می‌شود)، $C = 1$ مقاومت متوسط (میان‌ه ترجیح میزبانی) و اگر $C > 1$ باشد، پایه حساس‌تر (پایه مورد ترجیح بیشتر) است.

شاخص شیوع شته^۲

شاخص شیوع شته با استفاده از رابطه $PI = \frac{(T-P)}{(T+P)} \times 100$ محاسبه شد (Baldin *et al.*, 2017). در این رابطه T متوسط کلنی-روز مؤثر در هر پایه در هر نمونه‌برداری و P متوسط کلنی شته-روز مؤثر در کل پایه‌های مورد مطالعه بود.

شاخص تجمع کلنی شته^۳

شاخص تجمع کلنی شته با استفاده از رابطه $M^* = \bar{x} + \frac{s^2}{\bar{x}+1}$ محاسبه شد. در این روابط $\bar{x}$ و S^2 به ترتیب میانگین و واریانس تراکم کلنی شته در هر پایه سیب مورد مطالعه بود (Reiczigel *et al.*, 2005).

نرخ فراوانی نسبی استقرار کلنی شته^۴

1 -C-Aphis

2 -(PI) Prevalence index

3 -(M*) Mean crowding intensity

4 - (AQR) Relative abundance establishment rate

نرخ فراوانی نسبی استقرار کلنی شته مومی سیب با استفاده از رابطه $AQR = \frac{\sum C_i}{\sum C_1 + \dots + \sum C_n}$ محاسبه شد. در این رابطه C_i و C_n به ترتیب مجموعه کلنی شته روز مؤثر در هر مرحله نمونه‌برداری در پایه i ام تا n ام طول فصل نمونه‌برداری و n تعداد دفعات نمونه‌برداری می‌باشد (Tu et al., 2018).

شاخص عدم رجحان کلنی شته^۱

شاخص عدم ترجیح با استفاده از رابطه $NPI = \left[\frac{100-R}{100+R} \right] \times 100$ محاسبه شد. در این رابطه R متوسط کلنی شته-روز مؤثر ($E/N/Ad$) در هر پایه نسبت به متوسط کل کلنی شته-روز مؤثر (EAd) در پایه‌های سیب مورد مطالعه است (Antônio et al., 2011).

شاخص احتمال وقوع نسبی^۲

برای ارزیابی میزان بهره‌وری پایه‌های سیب به‌عنوان طاقچه زیستگاهی شته مومی، ابتدا شاخص احتمال وقوع نسبی O_i هریک از مراحل رشدی بر اساس رابطه $O_i = \frac{\sigma(ni)}{\text{Max}(ni)}$ محاسبه شد. در رابطه دو O_i تراکم جمعیت مؤثر کلنی شته در هر رقم و $\text{Max}(ni)$ حداکثر تراکم مؤثر تعداد کلنی ثبت شده در هر درخت در کل پایه‌های سیب در طی فصل بود (Ferrier et al., 2007; Hengl et al., 2009).

پتانسیل طاقچه زیستگاهی قابل بهره‌برداری^۳

در مرحله بعد پتانسیل طاقچه زیستگاهی قابل بهره‌برداری در هر پایه توسط شته ei با استفاده از رابطه $ei = \frac{\text{Max}(ni) - ni}{\text{Max}(ni)}$ محاسبه شد (Ghaedi et al., 2020).

مقدار طاقچه زیستگاهی بهره‌برداری نشده^۴

مقدار طاقچه زیستگاهی بهره‌برداری نشده توسط شته مومی (zi) نیز توسط رابطه $zi = \frac{O_i/ei}{\text{Max}(ni)}$ محاسبه شد (Ghaedi et al., 2020).

صفات رشد رویشی پایه‌های سیب

صفات رشد رویشی پایه‌ها پس از رسیدن به مرحله رشد مناسب، ارزیابی نهایی روی درختان سه ساله به بعد در ایستگاه تحقیقاتی کمالشهر انجام شد. با استفاده از روش خوابانیدن کپه‌ای قدرت ریشه‌زایی ژنوتیپ پایه‌های امید بخش آزمایش شد. بدین صورت در فصل بهار قسمت پایین ساقه گیاهان تازه رویده شده را با ترکیب خاکی سبک پوشانیده و سیستم آبیاری نشتی روی گیاهان اعمال گردید (شکل ۱). در پایان فصل رشد جهت آزمون قدرت ریشه‌زایی ژنوتیپ پایه‌های مختلف خاک کپه‌ها را کنار زده شد و با استخراج ریشه‌ها اقدام به اندازه‌گیری صفات مختلف شد. صفات رشد رویشی پایه‌های سیب مورد آزمایش شامل تعداد ریشه تولید شده (تعداد ریشه در هر قلمه ریشه‌دار)، طول ریشه‌ها (میانگین طول ده عدد ریشه که به‌صورت تصادفی انتخاب شدند)، طول ناحیه ریشه‌زا روی پاک‌های تولید شده (فاصله محل قلمه که در محیط ریشه‌زایی قرار گرفته تا قسمت انتهایی قلمه که دارای ریشه است)، تعداد پاک تولید شده (تعداد پاک از هر هیبرید پایه در محیط خوابانیدن کپه‌ای) و درصد ریشه‌زایی (درصد قلمه‌های ریشه‌دار از کل قلمه‌های کاشته شده) اندازه‌گیری شد (Zhao et al., 2022).

روش تحلیل داده‌ها

داده‌های مربوط به شاخص‌های مقاومت آنتی‌زنوزی پس از تأیید نرمال بودن با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف، مورد تحلیل آماری قرار گرفتند. در مرحله اول، از تحلیل عاملی برای شناسایی عوامل پنهان تأثیرگذار بر مکانیسم مقاومت استفاده شد که ترکیبات خطی شاخص‌های مشاهده‌پذیر را در برمی‌گرفت (Hamzehzarghani et al., 2005). سپس، ژنوتیپ‌ها بر پایه شباهت در الگوهای مقاومتی با روش خوشه‌ای سلسله‌مراتبی و محاسبه فاصله اقلیدسی گروه‌بندی شدند (Frades and Matthiesen, 2010). اعتبارسنجی این خوشه‌بندی با به‌کارگیری تحلیل تشخیص خطی انجام پذیرفت. در نهایت، ارتباط بین ویژگی‌های ریشه و سطح مقاومت از طریق محاسبه ضریب همبستگی ارزیابی گردید (Gogtay and Thatte, 2017). کلیه مراحل پردازش داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۷ انجام شد.

1 - (NPI) Non-preference index

2 - (O_i)Relative probability of occurrence index

3 - (ei)Exploitable habitat niche potential

4 - (zi)Amount of unexploited habitat niche



شکل ۱- ارزیابی صفات ریشی پایه‌ها پس از رسیدن به مرحله رشد مناسب

یافته‌های پژوهش

همبستگی شاخص‌های جمعیت‌شناسی مؤثر بر مقاومت آنتی‌زنوزی پایه‌های سیب

ماتریس همبستگی شاخص‌های مقاومت آنتی‌زنوزی پایه‌های سیب نسبت به شته مومی (جدول ۲) نشان‌دهنده روابط پیچیده بین معیارهای مختلف است. با توجه به ماتریس همبستگی ارائه‌شده، ارتباطات آماری بین شاخص‌های مختلف واکنش آنتی‌زنوزی پایه‌های سیب نسبت به شته مومی سیب از طریق ضرایب همبستگی پیرسون بررسی شد. شاخص‌های ترجیح و شیوع با ضریب همبستگی کامل $(1 \geq p < 0/001)$ رابطه خطی مثبت کامل نشان دادند که بیانگر وابستگی مطلق بین میزان ترجیح شته‌ها برای پایه‌های سیب و شیوع آن‌ها در این پایه‌های سیب مورد مطالعه بود. این نتیجه نشان داد پایه‌هایی که مورد ترجیح شته‌ها قرار می‌گیرند، با احتمال شیوع بالاتری به شته مومی آلوده می‌شوند. شاخص تجمع نیز با نرخ فراوانی نسبی استقرار همبستگی مثبت قوی $(0/98 \geq p < 0/001)$ داشت که حاکی از آن است تجمع بیشتر شته‌ها روی پایه‌های سیب، موفقیت استقرار آن‌ها را افزایش می‌دهد و نشان‌دهنده حساسیت بالاتر آن پایه‌هاست.

شاخص عدم رجحان با تجمع همبستگی منفی بسیار قوی $(-0/99 \geq p < 0/001)$ نشان داد. این رابطه آماری بیان می‌کند در پایه‌های سیبی که شته‌ها تجمع بیشتری دارند، عدم رجحان (یعنی تمایل کمتر شته‌ها به پذیرش میزبان) به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد. این پدیده نشان‌دهنده سازوکارهای دفاعی ضعیف‌تر در پایه‌هایی باشد که شته‌ها به‌راحتی در آن‌ها تجمع می‌کنند. شاخص احتمال وقوع نسبی نیز با پتانسیل طاقچه‌زیستگاهی قابل‌بهره‌برداری همبستگی منفی کامل $(-1 \geq p < 0/001)$ داد که نشان‌دهنده رابطه معکوس کامل بین این دو متغیر بود. به عبارت دیگر، در پایه‌های سیبی که احتمال وقوع شته‌ها بالاست، پتانسیل طاقچه‌زیستگاهی برای بهره‌برداری کاهش می‌یابد که می‌تواند ناشی از تخلیه منابع یا محدودیت‌های ناشی از تراکم بالای آفت باشد.

جدول ۲- ماتریس همبستگی شاخص‌های مقاومت آنتی‌زنوزی پایه‌های سیب نسبت به شته مومی

شاخص‌ها	ترجیح	شیوع	تجمع	نرخ فراوانی نسبی	عدم رجحان	احتمال وقوع نسبی	طابقه قابل بهره‌برداری	طابقه بهره‌برداری نشده
ترجیح	۱	۱**	۰/۹۸**	۰/۹۹**	۰/۹۸**	۰/۹۴**	۰/۹۴**	۰/۳۶
شیوع	۱**	۱	۰/۹۸**	۰/۹۹**	۰/۹۸**	۰/۹۴**	۰/۹۴**	۰/۳۶
تجمع	۰/۹۸**	۰/۹۸**	۱	۰/۹۸**	۰/۹۹**	۰/۹۴**	۰/۹۴**	۰/۳۳
نرخ فراوانی نسبی	۰/۹۹**	۰/۹۹**	۰/۹۸**	۱	۰/۹۸**	۰/۹۵**	۰/۹۵**	۰/۴۳*
عدم رجحان	۰/۹۸**	۰/۹۸**	-	۰/۹۹**	۰/۹۸**	۰/۹۶**	۰/۹۶**	۰/۳۹*
احتمال وقوع نسبی	۰/۹۴**	۰/۹۴**	۰/۹۴**	۰/۹۵**	۰/۹۶**	۱	۱	۰/۶۱**
پتانسیل طاقچه قابل بهره‌برداری	۰/۹۴**	۰/۹۴**	-	۰/۹۵**	۰/۹۶**	۱	۱	۰/۶۱**
طاقچه بهره‌برداری نشده	۰/۳۶	۰/۳۶	۰/۳۳	۰/۴۳*	۰/۳۹*	۰/۶۱**	۰/۶۱**	۱

* نشان دهنده معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۱ درصد

** نشان دهنده معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۵ درصد

شاخص مقدار طاقچه زیستگاهی بهره‌برداری نشده تنها با نرخ فراوانی نسبی استقرار همبستگی مثبت ضعیف اما معنی‌دار ($p \geq 0.05$) و با عدم رجحان همبستگی منفی ضعیف ($p \geq 0.05$) نشان داد. این نتایج حاکی از آن است که موفقیت استقرار شته‌ها تأثیر محدود اما مثبت، و عدم رجحان تأثیر منفی جزئی بر پتانسیل زیستگاه‌های استفاده نشده داشته است. این ارتباطات ممکن است نشان‌دهنده تعاملات پیچیده بین ویژگی‌های پایه‌های سیب و شاخص‌های اکولوژیک شته مومیا در بهره‌برداری از زیستگاه‌های پایه‌های سیب باشد. از نظر واکنش آنتی‌زنوزی، همبستگی‌های مشاهده شده نشان داد پایه‌های سیب با سطوح بالاتر ترجیح، شیوع و تجمع شته‌ها، احتمالاً مقاومت کمتری در برابر این آفت داشته‌اند. در مقابل، پایه‌هایی که با کاهش تجمع شته‌ها و افزایش عدم رجحان همراه بوده‌اند، ممکن است از مکانیسم‌های دفاعی قوی‌تری برخوردار باشند. رابطه معکوس بین احتمال وقوع شته‌ها و پتانسیل طاقچه زیستگاهی نیز بیانگر آن بود که تراکم بالای آفت می‌تواند ظرفیت زیستگاهی پایه‌ها را کاهش دهد که این پدیده در برنامه‌های انتخاب پایه‌های مقاوم برای کنترل شته مومی سیب حائز اهمیت است.

تحلیل مؤلفه‌های اصلی مؤثر بر واکنش آنتی‌زنوزی پایه‌های سیب

تحلیل عاملی شاخص‌های مقاومت آنتی‌زنوزی پایه‌های سیب نسبت به شته مومی (جدول ۳) نشان داد دو عامل اصلی به ترتیب ۸۷/۱ درصد و ۱۲/۵ درصد از واریانس کل داده‌ها را توجیه می‌کنند که در مجموع ۹۹/۶ درصد از تغییرپذیری را پوشش می‌دهند. عامل اول با تأکید بر شاخص‌های ترجیح میزبانی (C-Aphis با بار عاملی ۰/۹۹۳)، نرخ فراوانی نسبی استقرار (AQR با ۰/۹۹۵)، شاخص تجمع کلنی (M^* با ۰/۹۹۷)، شاخص شیوع (PI با ۰/۹۹۳) و احتمال وقوع نسبی (Oi با ۰/۹۱۸)، به عنوان «عامل جذابیت میزبانی و استقرار موفق» نامگذاری شد. این عامل نشان‌دهنده نقش کلیدی ویژگی‌هایی است که پایه‌های سیب را برای شته مومی جذاب می‌سازد و امکان استقرار و گسترش جمعیت آفت را فراهم می‌کند. به عنوان مثال، همبستگی مثبت قوی بین شاخص ترجیح و نرخ استقرار (۰/۹۹۵) تأیید می‌کند که پایه‌های مورد علاقه شته، زیستگاه مطلوب‌تری برای تشکیل کلنی‌ها ارائه می‌دهند. از سوی دیگر، شاخص عدم رجحان (NPI با بار عاملی -۰/۹۹۶) رابطه معکوس با این عامل داشت که نشان‌دهنده مقاومت پایه‌های کمتر ترجیح داده شده در کاهش استقرار آفت است.

جدول ۳- نتایج تجزیه به عامل‌ها به منظور تشخیص عامل‌های مشاهده ناپذیر ترکیبی مؤثر مقاومت آنتی‌زنوزی پایه‌های سیب نسبت به شته

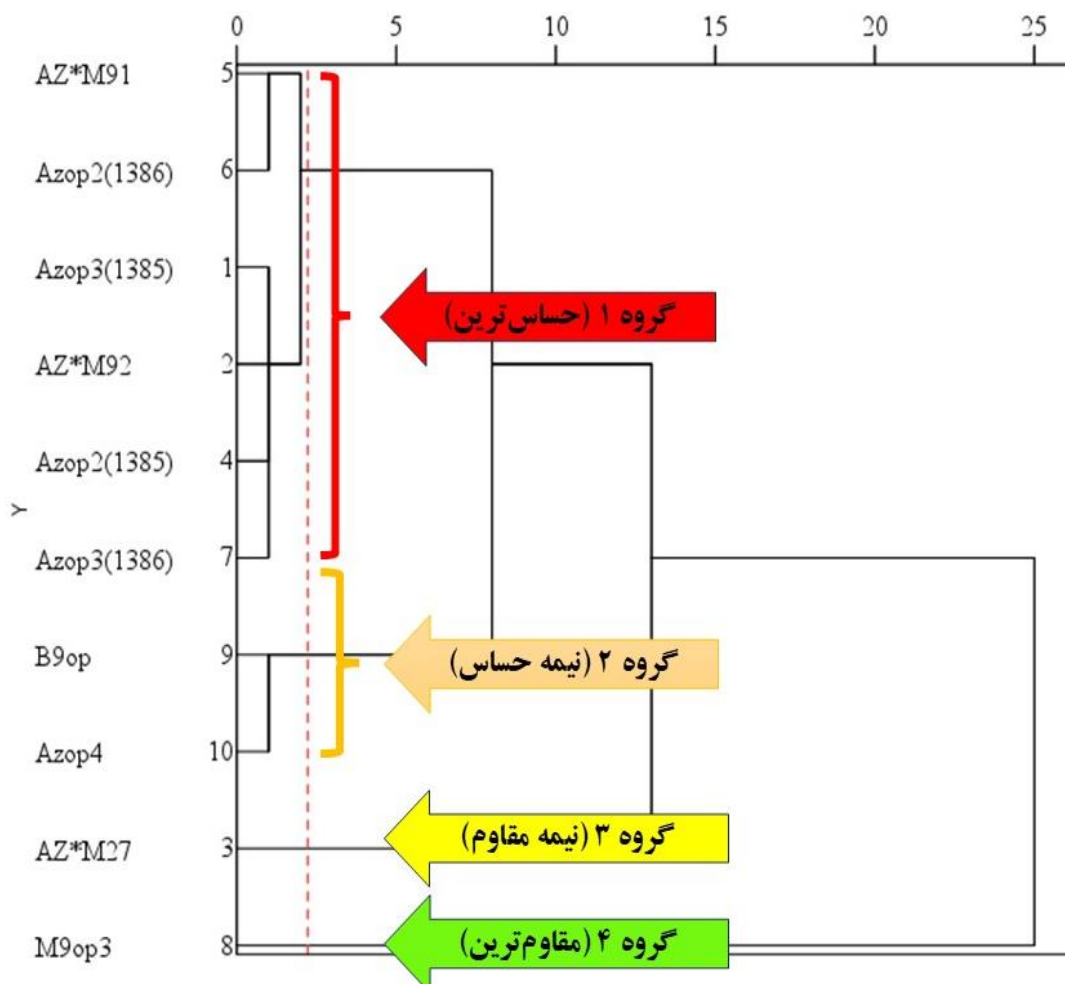
مومی					
مؤلفه‌ها			مقادیر ویژه اولیه		
			مجموع بارهای مربعی		
			کل	وارianس % درصد تجمعی	کل
۱) (عامل جذابیت میزبانی و استقرار موفق)			۸۷/۱۰	۸۷/۱۰	۷/۸۴
۲) (عامل محدودیت زیستگاهی)			۱۲/۴۹	۱۲/۴۹	۱/۱۲
۳			۰/۰۴	۰/۳۸	۹۹/۹۹
۴			۰/۰۰۱	۰/۰۱۲	۹۹/۹۹

عامل دوم با تمرکز بر شاخص مقدار طاقچه زیستگاهی بهره‌برداری نشده (Zi با بار عاملی ۰/۹۹۷) و پتانسیل طاقچه زیستگاهی قابل بهره‌برداری (ei با بار عاملی ۰/۴۰۵- در عامل دوم)، تحت عنوان «عامل محدودیت زیستگاهی» نام‌گذاری شد. این عامل بیانگر توانایی پایه‌ها در ایجاد شرایط نامساعد اکولوژیک برای بهره‌برداری شته از پایه‌های سیب بود. به‌طور خاص، بار عاملی مثبت Zi (۰/۹۹۷) نشان می‌دهد پایه‌های مقاوم‌تر، طاقچه‌های غیرقابل استفاده بیشتری ایجاد می‌کنند که مانع از بهره‌برداری مؤثر شته از زیستگاه می‌شود. در مقابل، بار عاملی منفی ei (۰/۴۰۵-) در این عامل، کاهش پتانسیل زیستگاهی قابل بهره‌برداری را در پایه‌های مقاوم تأیید می‌کند.

از نظر آماری، عامل اول با سهم ۸۷/۱ درصدی، نقش تعیین‌کننده‌ای در تبیین تغییرپذیری داده‌ها داشت که حاکی از اهمیت بالای شاخص‌های مرتبط با جذابیت میزبانی در مقاومت آنتی‌زنوزی است. در مقابل، عامل دوم با وجود سهم کم‌تر (۱۲/۵ درصد)، مکانیسم مکملی را برای شناسایی پایه‌هایی فراهم می‌کند که از طریق محدودسازی زیستگاهی، مقاومت خود را اعمال می‌کنند. ترکیب این دو عامل در تحلیل عاملی، امکان شناسایی جامع‌تری از پایه‌های مقاوم را فراهم می‌سازد که همزمان از جذابیت میزبانی پایین و محدودیت زیستگاهی بالا برخوردارند. این یافته‌ها راهبردهای اصلاحی را به سمت انتخاب ژنوتیپ‌هایی سوق می‌دهد که با کاهش ترجیح شته و ایجاد موانع اکولوژیک شده‌اند.

گروه‌بندی پایه‌های سیب بر اساس سطح مقاومت آنتی‌زنوزی

تحلیل خوشه‌بندی پایه‌های سیب بر اساس مقاومت آنتی‌زنوزی نسبت به شته مومی نشان داد (شکل ۲ و جدول ۴) که پایه‌های سیب در چهار گروه مجزا با سطوح مقاومتی متفاوت قرار می‌گیرند. ضریب همبستگی کوفنیتیک ۰/۹۱ نشان‌دهنده دقت بالای گروه‌بندی انجام‌شده است. گروه‌های تشکیل‌شده به شرح زیر تحلیل می‌شوند:



شکل ۲- خوشه‌بندی پایه‌های سیب براساس واکنش مقاومت آنتی‌زنوزی نسبت به شته مومی

جدول ۴- گروه بندی پایه سیب براساس واکنش آنتی‌زنوزی نسبت به شته مومی

رتبه آنتی‌زنوزی		پایه‌ها		شاخص‌ها		میانگین		خطای استاندارد		تعداد معتبر در فهرست	

۲	۲	۱/۴۳	۷/۲۰	NPI		
۲	۲	۱/۱۱	۱۰/۰۹	M*		
۲	۲	۶۲/۵۳	۸۸/۹۷	PSI		
۲	۲	۰/۰۱	۶/۳۹	Oi		
۲	۲	۰/۰۱	۰/۵۷	Ei		
۲	۲	۰/۰۲	۰/۹۲	PI		
۲	۲	۰/۰۱	۰/۷۴	Zi		
۱	۱	.a	۰/۶۳	C-Aphid		
۱	۱	.a	-۳۷/۰۶	AQR		
۱	۱	.a	۵/۵۰	NPI		
۱	۱	.a	۶/۸۹	M*		
۱	۱	.a	۹۲/۱۹	PSI	AZ*M27	گروه ۳ (نیمه مقاوم)
۱	۱	.a	۵/۳۲	Oi		
۱	۱	.a	۰/۶۵	Ei		
۱	۱	.a	۰/۷۲	PI		
۱	۱	.a	۰/۶۳	Zi		
۱	۱	.a	۰/۶۳	C-Aphid		
۱	۱	.a	-۳۷/۰۰	AQR		
۱	۱	.a	۵/۶۳	NPI		
۱	۱	.a	۶/۹۵	M*		
۱	۱	.a	۹۲/۲۱	PSI	M9op3	گروه ۴ (مقاوم ترین)
۱	۱	.a	۵/۳۱	Oi		
۱	۱	.a	۰/۶۵	Ei		
۱	۱	.a	۰/۷۳	PI		
۱	۱	.a	۰/۶۳	Zi		

a. ناکافی بودن داده‌ها

C-Aphis, PI, M*, AQR, NPI, Oi, ei و zi به ترتیب نشان‌دهنده شاخص‌های ترجیح، شیوع، تجمع، نرخ فراوانی نسبی استقرار، عدم رجحان، احتمال وقوع نسبی، پتانسیل طاقچه زیستگاهی قابل بهره‌برداری و مقدار طاقچه زیستگاهی بهره‌برداری نشده هستند.

گروه ۱ (حساس‌ترین):

این گروه شامل ۶ پایه (Azop2-85، AZM91، AZM92، Azop2-86، Azop3-85 و Azop3-86) بوده است که پایین‌ترین سطح مقاومت آنتی‌نوزی را نشان دادند. میانگین شاخص ترجیح (C-Aphis) ۰/۵۹، شاخص شیوع (PI) ۰/۸۵ و شاخص تجمع کلنی (M*) ۶/۲۹ بیانگر جذابیت بالای این پایه‌ها برای شته مومی است. نرخ فراوانی نسبی استقرار (AQR) ۶/۲۹ و شاخص عدم رجحان (NPI) ۵/۰۶ نیز تأیید می‌کند که این پایه‌ها محیط مطلوبی برای استقرار و تکثیر آفت فراهم می‌کنند. از نظر اکولوژیکی، پتانسیل طاقچه زیستگاهی قابل بهره‌برداری (ei) ۰/۶۴ و مقدار طاقچه زیستگاهی بهره‌برداری نشده (Zi) ۰/۵۹ نشان داد که این پایه‌ها فاقد مکانیسم‌های محدودکننده مؤثر برای کاهش بهره‌برداری شته از منابع هستند. بنابراین، این گروه به‌عنوان حساس‌ترین پایه‌ها شناخته شدند.

گروه ۲ (نیمه حساس):

این گروه شامل دو پایه (B9op و Azop4) بود که سطح مقاومت متوسطی داشتند. میانگین شاخص ترجیح ($0/74$) و شاخص شیوع ($0/92$) نسبت به گروه ۱ افزایش یافته، اما همچنان بالاتر از حد مطلوب بود. شاخص تجمع کلنی ($10/09$) و نرخ فراوانی نسبی استقرار ($27/79$) نشان داد که اگرچه استقرار شته در این پایه‌ها کمتر از گروه ۱ بوده است، اما هنوز محیط نسبتاً مناسبی برای آفت فراهم می‌کرده است. پتانسیل طاقچه زیستگاهی قابل بهره‌برداری ($0/57$ (ei) و مقدار طاقچه بهره‌برداری نشده ($0/74$ (zi) حاکی از بهبود نسبی در ایجاد محدودیت‌های اکولوژیک بوده است، اما این مکانیسم‌ها به‌تنهایی برای مهار کامل آفت کافی نبود. این پایه‌ها می‌توانند در برنامه‌های اصلاحی به‌عنوان مواد اولیه برای توسعه ارقام مقاوم‌تر مورد استفاده قرار گیرند.

گروه ۳ (نیمه مقاوم):

پایه AZ*M27 به‌تنهایی در این گروه قرار داشت و سطح مقاومت بالاتری نسبت به گروه‌های ۱ و ۲ نشان می‌داد. میانگین شاخص ترجیح ($0/63$) و شاخص شیوع ($0/72$) کاهش محسوسی داشته، اما شاخص تجمع کلنی ($6/89$) و نرخ فراوانی نسبی استقرار ($37/06$) بیانگر آن است که استقرار شته در این پایه نسبت به گروه‌های قبلی محدودتر شده است. پتانسیل طاقچه زیستگاهی قابل بهره‌برداری ($0/65$ (ei) و مقدار طاقچه بهره‌برداری نشده ($63/0$ (zi) نشان داد که این پایه تا حدی توانایی ایجاد موانع اکولوژیک را داشت، اما هنوز نیاز به بهبود ویژگی‌های مقاومتی است. این گروه می‌تواند به‌عنوان پل ارتباطی بین پایه‌های حساس و مقاوم در برنامه‌های اصلاحی مورد توجه قرار گیرد.

گروه ۴ (مقاوم‌ترین):

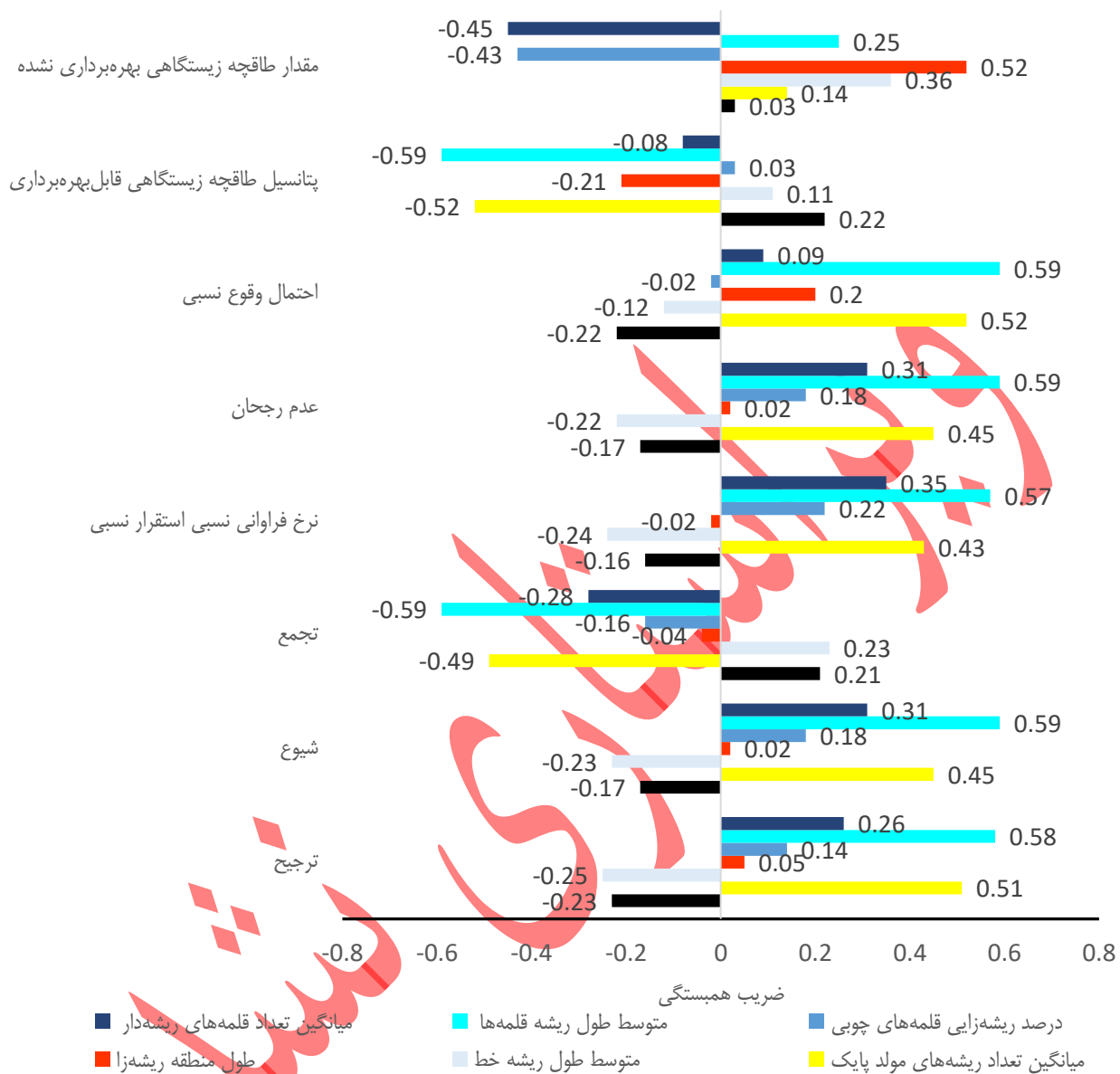
پایه M9op3 به‌عنوان مقاوم‌ترین ژنوتیپ شناسایی شد. میانگین شاخص ترجیح ($0/63$)، شاخص شیوع ($0/73$) و شاخص تجمع کلنی ($6/95$) پایین‌تر از سایر گروه‌ها بوده است که نشان‌دهنده کاهش جذابیت میزبانی و محدودیت در استقرار شته است. نرخ فراوانی نسبی استقرار ($37/00$) و شاخص عدم رجحان ($5/63$) بیانگر مقاومت بالای این پایه در برابر حمله آفت بوده است. از نظر اکولوژیکی، پتانسیل طاقچه زیستگاهی قابل بهره‌برداری ($0/65$ (ei) و مقدار طاقچه بهره‌برداری نشده ($0/63$ (zi) نشان می‌دهد این پایه توانایی ایجاد موانع مؤثری برای کاهش بهره‌برداری شته از منابع داشت. این گروه به‌عنوان الگوی مطلوب برای توسعه ارقام مقاوم در برنامه‌های اصلاحی پیشنهاد می‌شود.

تحلیل تابع تشخیص خطی فیشر با صحت $2/89$ درصد، تفاوت معنی‌دار بین گروه‌ها را تأیید کرد. تابع اول با سهم $68/2$ درصدی از واریانس، نقش اصلی را در تفکیک گروه‌ها ایفا می‌کرد. مقدار لامبدای ویلکس $0001/0$ برای این تابع، نشان‌دهنده قدرت بالای آن در تشخیص گروه‌های مقاومتی بوده است. این یافته‌ها نشان داد که ترکیب شاخص‌های مرتبط با جذابیت میزبانی و محدودیت‌های اکولوژیک می‌تواند به‌عنوان معیاری کلیدی در انتخاب پایه‌های مقاوم برای مدیریت پایدار شته مومی سیب مورد استفاده قرار گیرد.

اثر صفات مختلف ریشه در بروز واکنش آنتی‌زنوزی

تحلیل رابطه بین صفات ریشه و شاخص‌های مقاومت آنتی‌زنوزی در پایه‌های سیب نشان‌دهنده تأثیر معنادار ویژگی‌های ریشه بر پاسخ گیاه به شته مومی است (شکل ۳). بر اساس ضرایب همبستگی پیرسون، شاخص ترجیح شته با میانگین تعداد ریشه‌های مولد پایک همبستگی مثبت و قوی $0/51$ (در سطح $0/01$) داشت، که بیانگر آن است پایه‌هایی با تراکم بالاتر این ریشه‌ها، جذابیت بیشتری برای شته داشته و مستعد استقرار کلنی‌های آفت هستند. در مقابل، شاخص عدم رجحان با همین صفت همبستگی منفی $0/49$ (در سطح $0/01$) نشان داد که تأیید می‌کند کاهش تعداد ریشه‌های مولد، مقاومت پایه‌ها را در برابر حمله شته افزایش می‌دهد. این نتایج حاکی از آن است که تراکم ریشه‌های مولد به‌عنوان شاخصی کلیدی در جذابیت میزبانی نقش داشت و مدیریت آن می‌تواند راهکاری مؤثر برای کاهش آسیب‌پذیری پایه‌های سیب باشد.

طول منطقه ریشه‌زا نیز با شاخص مقدار طاقچه زیستگاهی بهره‌برداری نشده همبستگی مثبت $0/52$ (در سطح $0/01$) داشت. این ارتباط نشان داد که پایه‌هایی با مناطق ریشه‌زای گسترده‌تر، طاقچه‌های غیرقابل دسترس بیشتری برای شته ایجاد می‌کنند که موفقیت استقرار آفت را کاهش می‌دهد. از نظر اکولوژیکی، این ویژگی ممکن است ناشی از ساختار فیزیکی پیچیده ریشه باشد که دسترسی شته به منابع تغذیه‌ای را محدود می‌کند. علاوه بر این، درصد ریشه‌زایی قلمه‌های چوبی با همین شاخص همبستگی منفی $0/43$ - (در سطح $0/01$) نشان می‌دهد، که بیانگر آن است پایه‌هایی با توانایی ریشه‌زایی بالاتر، طاقچه‌های بهره‌برداری نشده کمتری داشته‌اند و بنابراین محیط مطلوب‌تری برای شته فراهم کرده‌اند.



شکل ۳- ضرایب همبستگی (در سطح احتمال ۱ درصد) صفات ریشه پایه‌های سیب با شاخص‌های مقاومت آنتی‌زنوزی نسبت به شته مومی

متوسط طول ریشه قلمه‌ها با شاخص شیوع همبستگی مثبت ۰/۵۹ (در سطح ۰/۰۱) داشت، که نشان می‌دهد پایه‌هایی با ریشه‌های بلندتر، شیوع بالاتری از کلنی‌های شته را تجربه کرده‌اند. این احتمالاً به دلیل افزایش سطح دسترسی شته به آوندهای گیاهی و منابع غذایی است. در مقابل، شاخص پتانسیل طاقچه زیستگاهی قابل بهره‌برداری با متوسط طول ریشه قلمه‌ها همبستگی منفی ۰/۵۹ (در سطح ۰/۰۱) داشت و نشان داد که ریشه‌های کوتاه‌تر با کاهش پتانسیل زیستگاهی برای شته همراه بودند و مقاومت گیاه را افزایش داده است.

از نظر آماری، این همبستگی‌ها تأکید می‌کنند که صفات ریشه نه تنها بر جذابیت میزبانی، بلکه بر مکانیسم‌های محدودکننده اکولوژیک نیز تأثیر می‌گذارند. برای مثال، پایه مقاوم M9op3 که در تحلیل خوشه‌بندی شناسایی شد، دارای ویژگی‌هایی مانند تراکم پایین ریشه‌های مولد و طول منطقه ریشه‌زای محدود است. این ترکیب ویژگی‌ها همزمان جذابیت میزبانی را کاهش داد و طاقچه‌های غیرقابل استفاده را افزایش داد که همسو با نتایج همبستگی و خوشه‌بندی بوده است. از جنبه اکولوژیکی، کاهش تراکم ریشه‌های مولد توانسته‌است که منجر به کاهش تولید ترکیبات

جاذب شته شود، در حالی که طول محدود منطقه ریشه‌ها با ایجاد ساختارهای فیزیکی پیچیده، دسترسی شته به منابع را محدود کرده است. این تغییرات نه تنها استقرار شته را کاهش می‌دهد، بلکه بقا و تکثیر آن را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد.

در نهایت، این یافته‌ها نشان داد که اصلاح ویژگی‌های ریشه برای کاهش تراکم ریشه‌های مولد و افزایش طول منطقه ریشه‌زای محدود می‌تواند به عنوان راهبردی مؤثر در گزینش پایه‌های سیب دارای مقاومت آنتی‌زنوزی نسبت به شته مومی سبب مورد استفاده قرار گیرد. چنین رویکردی در برنامه‌های اصلاحی، امکان توسعه ارقامی را فراهم می‌کند که همزمان از مقاومت آنتی‌زنوزی بالا و عملکرد مطلوب برخوردار باشند. ادغام داده‌های مورفولوژیک ریشه با شاخص‌های مقاومت، ابزاری قدرتمند برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر پایه‌های سیب است.

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که مقاومت آنتی‌زنوزی پایه‌های سیب در برابر شته مومی، حاصل تعامل پویایی بین ویژگی‌های مورفولوژیک ریشه و سازوکارهای اکولوژیک است. تحلیل عاملی انجام‌شده دو مؤلفه اصلی را شناسایی کرد که در مجموع ۹۹/۶ درصد از تغییرپذیری داده‌ها را پوشش می‌دهند. مؤلفه نخست با سهم ۸۷/۱ درصدی، بر «جاذبیت میزبانی و موفقیت استقرار شته» متمرکز بود و شاخص‌هایی مانند ترجیح میزبانی (C-Aphis)، نرخ فراوانی نسبی استقرار (AQR) و شاخص تجمع کلنی (M^*) را دربرمی‌گرفت. این یافته‌ها تأیید می‌کند که پایه‌های با جاذبیت بالا، نه تنها شته را به سمت خود جلب می‌کنند، بلکه شرایط مطلوبی برای تشکیل کلنی‌های پایدار فراهم می‌سازند. این مکانیسم با مطالعاتی همسو است که گزارش کرده‌اند گیاهان با ترشح ترکیبات فرار یا ساختارهای آناتومیک خاص، رفتار تغذیه‌ای حشرات را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Fürstenberg-Hägg *et al.*, 2013). به‌طور خاص، همبستگی قوی بین شاخص ترجیح و نرخ استقرار (۰/۹۹۵) نشان می‌دهد که جاذبیت اولیه پایه‌های سیب، پیش‌نیاز ضروری برای استقرار موفقیت‌آمیز شته مومی سبب محسوب می‌شود.

مؤلفه دوم با سهم ۱۲/۵ درصدی، بر «محدودیت‌های زیستگاهی» تمرکز داشت و شاخص‌هایی مانند طاقچه زیستگاهی بهره‌برداری نشده (Zi) و پتانسیل طاقچه قابل بهره‌برداری (ei) را شامل می‌شد. این مؤلفه نشان داد که پایه‌های مقاوم امکان بهره‌برداری مؤثر شته از منابع را محدود می‌کنند. برای مثال، همبستگی مثبت Zi با طول منطقه ریشه‌ها (۰/۵۲) بیانگر آن است که ساختار ریشه‌های گسترده و پیچیده، دسترسی شته به آوندهای غذایی را دشوار می‌سازد. این یافته با پژوهش‌هایی همخوانی دارد که کاهش جمعیت شته در گیاهان با سیستم ریشه‌ای فشرده را گزارش کرده‌اند (Wu *et al.*, 1999). چنین مکانیسم‌هایی ممکن است ناشی از تولید ترکیبات دفاعی ثانویه مانند آلکالوئیدها یا ترپنوئیدها در ریشه باشد که به‌طور مستقیم بر رفتار تغذیه‌ای شته تأثیر می‌گذارند (Montllor, 2017).

خوشه‌بندی پایه‌ها به چهار گروه مجزا (حساس، نیمه‌حساس، نیمه‌مقاوم و مقاوم) نه تنها تفاوت‌های کیفی بین ژنوتیپ‌ها را آشکار کرد، بلکه نشان داد که مقاومت آنتی‌زنوزی یک صفت پیوسته و چندبعدی است. پایه‌های حساس (مانند Azop2-85) با میانگین شاخص ترجیح ۰/۵۹ و پتانسیل زیستگاهی قابل بهره‌برداری ۰/۶۴، به عنوان محیطی ایده‌آل برای شته عمل می‌کنند. این پایه‌ها معمولاً دارای سیستم ریشه‌ای متراکم با تعداد بالای ریشه‌های مولد هستند که جذب شته را تسهیل می‌کنند. در مقابل، پایه‌های مقاوم (مانند M9op3) با شاخص ترجیح ۰/۶۳ و طاقچه بهره‌برداری نشده ۰/۶۳، از طریق ترکیبی از کاهش جاذبیت و ایجاد موانع اکولوژیک، مقاومت خود را اعمال می‌کنند. این الگو شباهت قابل توجهی به پایه‌های سیب سری (Malling-Merton (MM دارد که در مطالعات پیشین به عنوان استاندارد برای مقاومت پایدار به شته مومی معرفی شده‌اند (Godfrey, 2024).

نکته جالب توجه در تحلیل خوشه‌ها، وجود پایه‌های نیمه‌مقاوم (مانند AZ* M27) بود که اگرچه از نظر شاخص‌های کلیدی بهبود نسبی نشان می‌دادند، اما هنوز فاقد مکانیسم‌های کامل محدودکننده بودند. این یافته نشان می‌دهد که مقاومت آنتی‌زنوزی می‌تواند به صورت تدریجی و در اثر ترکیب چندین ویژگی کوچک ظهور کند. چنین پایه‌هایی می‌توانند به عنوان مواد اولیه در برنامه‌های اصلاحی مورد استفاده قرار گیرند تا با تلاقی‌های هدفمند، ژن‌های مؤثر بر مقاومت تقویت شوند.

بررسی همبستگی بین صفات ریشه و شاخص‌های مقاومت، نقش کلیدی ویژگی‌های مورفولوژیک ریشه را در تعیین سطح مقاومت پایه‌ها تأیید کرد. تراکم بالای ریشه‌های مولد (همبستگی ۰/۵۱ با شاخص ترجیح) نه تنها جاذبیت گیاه را افزایش می‌دهد، بلکه ممکن است با تولید ترکیبات جاذب شیمیایی مانند ساکارزها یا اسیدهای آمینه آزاد مرتبط باشد (Robert *et al.*, 2012). از سوی دیگر، طول منطقه ریشه‌زای گسترده (همبستگی ۰/۵۲ با طاقچه بهره‌برداری نشده) احتمالاً با افزایش رقابت بر سر منابع یا تولید ترکیبات بازدارنده، امکان استقرار شته را کاهش می‌دهد (Petersen & Sandström, 2001). این یافته‌ها با پژوهش‌هایی همسو است که گزارش کرده‌اند گیاهان با سیستم ریشه‌ای عمیق و گسترده، مقاومت بالاتری در برابر آفات خاکزی نشان می‌دهند (Divya Rani & Sudini, 2013).

همچنین، درصد ریشه‌زایی قلمه‌ها (همبستگی ۰/۴۳- با طاقچه بهره‌برداری نشده) نشان داد که پایه‌های با توانایی تکثیر رویشی بالا، ممکن است انرژی بیشتری را صرف رشد ریشه کنند و در نتیجه منابع کمتری برای تولید ترکیبات دفاعی باقی بماند. این موضوع می‌تواند توجیهی برای آسیب‌پذیری بالاتر این پایه‌ها باشد. در مقابل، پایه‌های با متوسط طول ریشه کوتاه‌تر (همبستگی ۰/۵۹- با پتانسیل زیستگاهی) احتمالاً با تخصیص منابع به تولید متابولیت‌های ثانویه، مقاومت خود را افزایش می‌دهند (Isah, 2019).

نتایج این پژوهش از جنبه‌های متعددی با یافته‌های پیشین همخوانی دارد. برای مثال، تأکید بر نقش ترکیبی جذابیت میزبانی و محدودیت‌های زیستگاهی، با مطالعاتی که مقاومت آنتی‌زنوزی را حاصل تعامل چندین مکانیسم می‌دانند، همسو است (Pinheiro et al., 2024). با این حال، نوآوری اصلی این تحقیق در شناسایی دقیق سهم هر یک از مؤلفه‌ها و ارتباط آن‌ها با صفات مورفولوژیک ریشه است. در حالی که پژوهش‌های پیشین عمدتاً بر ویژگی‌های هوایی گیاه تمرکز داشتند، این مطالعه نشان داد که سیستم ریشه‌ای می‌تواند به‌تنهایی تا ۵۱ درصد از تغییرپذیری مقاومت را تبیین کند. در پژوهش‌های دیگری ارزیابی ده پایه امیدبخش سیب نشان داده که پایه M9op3 با سازوکارهای آنتی‌بیوز، جمعیت شته را ۶۰٪ کاهش داده است (Latifian et al., 2023a). همچنین در پژوهش دیگری مشخص شده که احتمال استقرار شته در پایه‌های مقاوم ۲۰-۳۰٪ کمتر از پایه‌های حساس (مانند B9op) بوده است. در آن پژوهش‌ها همچنین مشخص شده که ویژگی‌های فیزیکی نظیر تراکم کرک و ضخامت پوست به‌عنوان عوامل کلیدی مقاومت هستند (Latifian et al., 2023b). با توجه به نتایج تحقیقات قبلی (Latifian & Atashkar, 2024) و پژوهش حاضر پایه M9op3 با ترکیب سازوکارهای آنتی‌زنوزی (کاهش جذابیت میزبانی) و آنتی‌بیوزی (کاهش بقای شته) و ویژگی‌های مورفولوژیک ریشه (تراکم پایین ریشه‌های مولد و طول منطقه ریشه‌زای کوتاه)، به‌عنوان گزینه بهینه برای برنامه‌های اصلاحی پایه‌های مقاوم سیب در مدیریت پایدار شته مومی است.

همچنین، شناسایی پایه M9op3 به‌عنوان مقاوم‌ترین ژنوتیپ، مشابه یافته‌هایی است که پایه‌های پاکوتاه را به دلیل کارایی بالاتر در تخصیص منابع، گزینه‌ای مناسب برای اصلاح مقاومت می‌دانند. این موضوع اهمیت استفاده از پایه‌های بومی سازگار با شرایط اکولوژیک ایران را پررنگ می‌سازد. از طرفی، ظهور بیوتیپ‌های جدید شته که توانایی غلبه بر ژن‌های مقاومت شناخته‌شده (مانند Er1، Er2 و Er3) را دارند، لزوم توسعه ارقام با مکانیسم‌های چندگانه مقاومت را نشان می‌دهد (Sandanayaka et al., 2003). این پژوهش با ارائه چارچوبی برای ترکیب صفات مورفولوژیک و اکولوژیک، گامی مهم در این جهت محسوب می‌شود.

نتیجه‌گیری

این پژوهش به‌طور جامع نشان داد که مقاومت آنتی‌زنوزی پایه‌های سیب نسبت به شته مومی، پدیده‌ای چندبعدی است که از تعامل ویژگی‌های مورفولوژیک ریشه و سازوکارهای اکولوژیک نشئت می‌گیرد. ترکیب تحلیل عاملی، خوشه‌بندی و همبستگی، چارچوبی علمی برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر و درک مکانیسم‌های مقاومت فراهم کرد. دستاوردهای این مطالعه به توسعه ارقام مقاوم با عملکرد بالا کمک می‌کند. در نهایت، تلفیق یافته‌های این پژوهش با فناوری‌های نوین اصلاحی، می‌تواند جایگاه ایران را به‌عنوان یکی از پیشگامان تولید سیب در منطقه تقویت کند.

پیشنهادها

یافته‌های این مطالعه پیامدهای مهمی برای برنامه‌های اصلاحی و مدیریت تلفیقی آفات (IPM) دارد. اولاً، انتخاب پایه‌های با تراکم پایین ریشه‌های مولد و طول منطقه ریشه‌زای محدود می‌تواند به‌عنوان معیاری کلیدی در گزینش ژنوتیپ‌های مقاوم مورد استفاده قرار گیرد. ثانیاً، پایش مستمر جمعیت‌های شته و شناسایی بیوتیپ‌های جدید، ضرورتی انکارناپذیر برای حفظ پایداری مقاومت در طول زمان است. برای تحقیقات آینده، پیشنهاد می‌شود تأثیر ترکیبات شیمیایی ریشه بر رفتار شته به‌صورت جزئی‌تر بررسی شود. همچنین، ارزیابی تعامل بین پایه و پیوندک در شرایط تنش‌های محیطی (مانند خشکی یا شوری) می‌تواند بینش‌های جدیدی درباره پایداری مقاومت ارائه دهد. علاوه بر این، استفاده از تکنیک‌های تصویربرداری پیشرفته برای بررسی ساختار ریشه و ارتباط آن با الگوی استقرار شته، می‌تواند مکملی ارزشمند برای مطالعات کنونی باشد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از مدیران و کارکنان محترم پژوهشکده میوه‌های معتدله و سردسیری، همچنین کارشناسان فنی آزمایشگاه‌ها و ایستگاه تحقیقاتی کمالشهر که با مساعدت‌های علمی و اجرایی در مراحل مختلف این پژوهش همراهی نمودند، صمیمانه سپاسگزاریم. حمایت‌های بی‌شائبه ایشان امکان تکمیل موفق این مطالعه را فراهم ساخت.

منابع

- آتشکار، د.، عبدالمهی، ح.، و ارشادی، ع. (۱۳۹۹). تأثیر تنش خشکی بر شاخص‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی پایه‌های هیبرید سیب. *مجله علوم و فناوری باغبانی ایران*، ۲۱(۲)، ۱۰۷-۱۲۲. <https://doi.org/20.1001.1.16807154.1399.21.2.2.8>
- آتشکار، د.، پیرخضری، م.، و تقی‌زاده، ع. ا. (۱۳۹۵). تولید و ارزیابی اولیه پایه‌های هیبرید سیب (*Malus domestica* Borkh.). *مجله علوم باغبانی ایران*، ۴۷(۲)، ۲۳۵-۲۲۹. <https://doi.org/10.22059/ijhs.2016.5834>
- قاندی، ح.، کچیلی، ف.، لطیفیان، م.، و فرخی‌نیا، ر. (۱۳۹۹). پراکنش مکانی و زمانی سوسک‌های کرگدنی (*Oryctes spp.*) در نخلستان‌های استان خوزستان. *تحقیقات آفات گیاهی*، ۱۰(۲)، ۱-۱۲. <https://doi.org/10.22124/ijprj.2020.4292>
- لطیفیان، م.، سیدالاسلامی، ح.، و خواجه‌علی، ج. (۱۳۸۸). مقایسه چند روش نمونه‌برداری برای برآورد تراکم جمعیت زنجره برگ مو (*Arboridia* Hem., Cicadellidae). *مجله تحقیقات حشره‌شناسی دانشگاه آزاد اسلامی*، ۱(۲)، ۹۵-۱۰۸. <https://sanad.iau.ir/Journal/jer/Article/915520>

REFERENCES

- Antônio, A. D. C., Silva, D. J. H. D., Picanço, M. C., Santos, N. T., & Fernandes, M. E. D. S. (2011). Tomato plant inheritance of antixenotic resistance to tomato leaf miner. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 46, 74–80. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011000100010>
- Atashkar, D., Ershadi, A., & Abdollahi, H. (2020). Effects of drought stress on physiological and biochemical indices in hybrid apple rootstocks. *Iranian Journal of Horticultural Science and Technology*, 21(2), 107–122. (In Persian). <https://doi.org/20.1001.1.16807154.1399.21.2.2.8>
- Atashkar, D., Pirkhezri, M., & Taghizadeh, A. A. (2016). Production and primary evaluation of apple (*Malus domestica* Borkh.) hybrid rootstocks. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 47(2), 229–235. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ijhs.2016.5834>
- Baldin, E. L. L., Cruz, P. L., Morando, R., Silva, I. F., Bentivenha, J. P. F., Tozin, L. R. S., & Rodrigues, T. M. (2017). Characterization of antixenosis in soybean genotypes to *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) biotype B. *Journal of Economic Entomology*, 110(4), 1869–1876. <https://doi.org/10.1093/jee/tox228>
- Beers, E. H., Cockfield, S. D., & Gontijo, L. M. (2010). Seasonal phenology of woolly apple aphid (Hemiptera: Aphididae) in Central Washington. *Environmental Entomology*, 39(2), 286–294. <https://doi.org/10.1603/EN09062>
- Damavandian, M. R. (2000). Biology of subterranean populations of woolly apple aphid, *Eriosoma lanigerum* (Hausmann) (Homoptera: Aphididae), in apple orchards [Doctoral dissertation, Stellenbosch University].
- Divya Rani, V., & Sudini, H. (2013). Management of soilborne diseases in crop plants: An overview. *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences*, 3(4), 156–164. (No DOI available)
- Ehteshami-Moinabadi, M. (2022). Properties of fault zones and their influences on rainfall-induced landslides, examples from Alborz and Zagros ranges. *Environmental Earth Sciences*, 81(5), Article 168. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10283-2>
- Fazio, G., Aldwinckle, H., & Robinson, T. (2013). Unique characteristics of Geneva® apple rootstocks. *Encontro Nacional sobre Fruticultura de Clima Temperado*.
- Ferrier, S., Manion, G., Elith, J., & Richardson, K. (2007). Using generalized dissimilarity modelling to analyse and predict patterns of beta diversity in regional biodiversity assessment. *Diversity and Distributions*, 13(3), 252–264. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2007.00341.x>
- Fluke, C. L. (1930). The influence of resistant apple scions on the susceptibility of non-resistant stocks with relation to woolly aphid attacks. *Journal of Economic Entomology*, 23(4), 741–743. <https://doi.org/10.1093/jee/23.4.741>
- Frades, I., & Matthiesen, R. (2010). Overview on techniques in cluster analysis. In R. Matthiesen (Ed.), *Bioinformatics methods in clinical research* (pp. 81–107). *Humana Press*. https://doi.org/10.1007/978-1-60327-194-3_5
- Fürstenberg-Hägg, J., Zagobelny, M., & Bak, S. (2013). Plant defense against insect herbivores. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(5), 10242–10297. <https://doi.org/10.3390/ijms140510242>

- Ghaedi, H., Kocheili, F., Latifian, M., & Nejad, R. F. (2020). Spatial and temporal distribution of rhinoceros beetles *Oryctes Hellwig* (Col.: Scarabaeidae) in date palm plantations of Khuzestan province. *Plant Pest Research*, 10(2), 1–12. (In Persian). <https://doi.org/10.22124/iprj.2020.4292>.
- Godfrey, C. J. (2024). Resistance and susceptibility in interactions between apple and woolly aphid [Doctoral dissertation, Harper Adams University].
- Gogtay, N. J., & Thatte, U. M. (2017). Principles of correlation analysis. *Journal of the Association of Physicians of India*, 65(3), 78–81.
- Hajnajari, H. (2021). Thirty-three half-sib apple clonal rootstocks tolerant to crown rot produced in a 14-year pathology breeding program. *Acta Hort.* 1315, 227–236. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1315.35>
- Han, Y., & Korban, S. S. (2010). Strategies for map-based cloning in apple. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 29(5), 265–284. <https://doi.org/10.1080/07352689.2010.502084>
- Hengl, T., Sierdsema, H., Radović, A., & Dilo, A. (2009). Spatial prediction of species' distributions from occurrence-only records: Combining point pattern analysis, ENFA and regression-kriging. *Ecological Modelling*, 220(24), 3499–3511. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.06.038>
- Isah, T. (2019). Stress and defense responses in plant secondary metabolites production. *Biological Research*, 52, Article 39. <https://doi.org/10.1186/s40659-019-0246-3>
- Krisnawati, A., Bayu, M. S. Y. I., & Adie, M. M. (2017). Identification of soybean genotypes based on antixenosis and antibiosis to the armyworm (*Spodoptera litura*). *Nusantara Bioscience*, 9(2), 164–169.
- Latifian, M., Seyedoleslami, H., & Khajeali, J. (2009). Comparison of several sampling techniques to estimate population densities of the grape leafhopper *Arboridia kermanshah* Dlabola (Hem., Cicadellidae). *IAU Entomological Research Journal*, 1(2), 95–108. (In Persian). <https://sanad.iau.ir/Journal/jer/Article/915520>
- Latifian, M., Atashkar, D. & Ghaemi, R. (2023a). Relative establishment rate and host preference of woolly apple aphid *Eriosoma lanigerum* (Hausmann, 1802) (Hemiptera: Aphididae) on promising apple hybrid rootstocks. *Journal of Entomological Society of Iran*, 43(3), 233–245. <https://doi.org/10.61186/jesi.43.3.4>
- Latifian, M., Atashkar, D. & Ghaemi, R. (2023b). Antibiosis Resistance Of Promising Apple Rootstocks To Woolly Aphid [*Eriosoma lanigerum* (Hausm.)] under Environmental Conditions of Karaj in Iran. *Seed and Plant Journal*, 39(1), 120–93. <https://doi.org/10.22092/spj.2023.363992.1331>
- Latifian, M. & Atashkar, D. (2024). Resistance of Promising Apple Rootstocks to the Woolly Aphid [*Eriosoma lanigerum* (Hausmann)] under Forced Feeding Conditions. *Seed and Plant Journal*, 40(1), 72–47. <https://doi.org/10.22092/spj.2025.367587.1385>
- Le Pelley, R. (1927). Studies on the resistance of apple to the woolly aphid (*Eriosoma lanigerum* Hausm.). *Journal of Pomology and Horticultural Science*, 6(3), 209–241. (No DOI available)
- Lepaja, L., Musa, F., Lepaja, K., Krasniqi, N., & Zajmi, R. (2014). The comparison of the presence of the woolly apple aphid (*Eriosoma lanigerum*) on the two different apple cultivars and rootstocks. *49th Croatian and 9th International Symposium on Agriculture*. <https://doi.org/10.13140/2.1.2392.8968>
- Machlitt, D. (1998). Persea mite on avocados: Quick field counting method. *Subtropical Fruit*, 6, 1–4.
- Mathulwe, L. L. (2019). Control of the woolly apple aphid, *Eriosoma lanigerum* (Hausmann) (Hemiptera: Aphididae), using entomopathogenic fungi [Doctoral dissertation, Stellenbosch University]. (No DOI available)
- Moinina, A., Lahlali, R., MacLean, D., & Boulif, M. (2018). Farmers' knowledge, perception and practices in apple pest management and climate change in the Fes-Meknes region, Morocco. *Horticulturae*, 4(4), Article 42. <https://doi.org/10.3390/horticulturae4040042>
- Montllor, C. B. (2017). The influence of plant chemistry on aphid feeding behavior. In E. A. Bernays (Ed.), *Insect-Plant Interactions* (pp. 125–174). *CRC Press*. <https://doi.org/10.1201/9780203711699-4>Osborne, J. (2010). Improving your data transformations: Applying the Box-Cox transformation. *Practical Assessment, Research, and Evaluation*, 15(1), Article 12. <https://doi.org/10.7275/qbpc-gk17>
- Painter, R. H. (1951). Insect resistance in crop plants. *Macmillan*. (No DOI available)
- Petersen, M. K., & Sandström, J. P. (2001). Outcome of indirect competition between two aphid species mediated by responses in their common host plant. *Functional Ecology*, 15(4), 525–534. <https://doi.org/10.1046/j.0269-8463.2001.00552.x>
- Pinheiro, D. G. D. S., Espirito-Santo, A. B. M. M. D., Fasoli, J. V. B., Sobral-Souza, T., & Campos, M. L. (2024). Unravelling the secrets of non-host resistance in plant–insect interactions. *Journal of Experimental Botany*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1093/jxb/erae359>
- Reiczigel, J., Lang, Z., Rózsa, L., & Tóthmérész, B. (2005). Properties of crowding indices and statistical tools to analyze parasite crowding data. *Journal of Parasitology*, 91(2), 245–252. <https://doi.org/10.1645/GE-331R>

- Robert, C. A., Erb, M., Hibbard, B. E., Wade French, B., Zwahlen, C., & Turlings, T. C. (2012). A specialist root herbivore reduces plant resistance and uses an induced plant volatile to aggregate in a density-dependent manner. *Functional Ecology*, 26(6), 1429–1440. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2012.02030.x>
- Russo, N. L., Robinson, T. L., Fazio, G., & Aldwinckle, H. S. (2007). Field evaluation of 64 apple rootstocks for orchard performance and fire blight resistance. *HortScience*, 42(7), 1517–1525. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.42.7.1517>
- Sandanayaka, W. R. M., Bus, V. G. M., Connolly, P., & Newcomb, R. (2003). Characteristics associated with woolly apple aphid *Eriosoma lanigerum*, resistance of three apple rootstocks. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 109(1), 63–72. <https://doi.org/10.1046/j.1570-7458.2003.00093.x>
- Sandanayaka, W. R. M., Bus, V. G. M., & Connolly, P. (2005). Mechanisms of woolly aphid [*Eriosoma lanigerum* (Hausm.)] resistance in apple. *Journal of Applied Entomology*, 129(9–10), 534–541. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.2005.01003.x>
- Tu, X. B., Fan, Y. L., McNeill, M., & Zhang, Z. H. (2018). Including predator presence in a refined model for assessing resistance of alfalfa cultivar to aphids. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(2), 397–405. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61767-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61767-5)
- Verghese, A., & Jayanthi, P. K. (2002). A technique for quick estimation of aphid numbers in field. *Current Science*, 82(9), 1165–1168. (No DOI available)
- Wu, T., Wittkamper, J., & Flores, H. E. (1999). Root herbivory in vitro: Interactions between roots and aphids grown in aseptic coculture. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 35, 259–264. <https://doi.org/10.1007/s11627-999-0089-7>
- Young, E., Rock, G. C., Zeiger, D. C., & Cummins, J. N. (1982). Infestation of some *Malus* cultivars by the North Carolina woolly apple aphid biotype. *HortScience*, 17(5), 787–788. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.17.5.787>
- Zaayman, D., Lapitan, N. L., & Botha, A. M. (2009). Dissimilar molecular defense responses are elicited in *Triticum aestivum* after infestation by different *Diuraphis noxia* biotypes. *Physiologia Plantarum*, 136(2), 209–222. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2009.01222.x>
- Zhao, L., He, N., Wang, J., Siddique, K. H., Gao, X., & Zhao, X. (2022). Plasticity of root traits in a seedling apple intercropping system driven by drought stress on the Loess Plateau of China. *Plant and Soil*, 480(1–2), 541–560. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05603-1>

Antixenosis Resistance in Apple Rootstocks Against Woolly Aphids: Deciphering the Relationship Between Root Traits and Aphid Ecology

Extended Abstract

Antixenosis Resistance in Apple Rootstocks Against Woolly Aphids: Deciphering the Relationship Between Root Traits and Aphid Ecology

Introduction

Apple (*Malus domestica* Borkh.) is a cornerstone of Iran's horticultural economy. Yet, its productivity is severely threatened by the woolly apple aphid (*Eriosoma lanigerum*), a pest responsible for significant economic losses. Antixenosis resistance, a non-preference mechanism that deters pest colonization, plays a pivotal role in mitigating aphid damage. Historically, breeding programs such as the Malling-Merton (MM) series have developed resistant rootstocks, but evolving aphid biotypes and ecological variability pose persistent challenges. This study aimed to unravel the relationship between root morphological traits and aphid ecology to identify hybrid rootstocks with enhanced antixenosis resistance, combining root architecture analysis with ecological indices, this research aimed to promote sustainable apple cultivation by decreasing reliance on pesticides and enhancing rootstock resilience. The objectives included evaluating host preference, colony aggregation, and habitat niche utilization across ten hybrid rootstocks derived from crosses between dwarfing Iranian native genotypes (e.g., Azop, AZ) and commercial rootstocks (M9, M27, B9). The study also examined how root traits, such as density, length, and the extent of the rhizogenic zone, influence aphid behavior, providing a framework for future breeding strategies.

Materials and Methods

The seven-year study (2017–2023) was conducted at the Kamalshahr Research Station in Karaj, Iran, under controlled environmental conditions. Ten hybrid rootstocks were evaluated, including crosses between dwarfing Iranian natives (Azop, AZ) and commercial rootstocks (M9, M27, B9). Biweekly sampling of aphid colonies was performed across root, collar, trunk, and branch zones using non-destructive counting methods to minimize disruption to natural aphid behavior. Key resistance indices such as the Colony Preference Index (C-Aphis), Prevalence Index (PI), and Unexploited Habitat Niche (zi) were calculated to quantify host preference, aphid prevalence, and ecological constraints. Root morphological traits, including root density, length, rhizogenic zone extent, and rooting percentage, were measured using standardized protocols. Statistical analyses included Principal Component Analysis (PCA) to identify latent resistance factors and hierarchical clustering to categorize rootstocks by resistance levels. Data normality was confirmed via Kolmogorov-Smirnov tests, and correlations between root traits and aphid responses were analyzed using SPSS v27. The experimental design ensured replication across multiple growing seasons to account for environmental variability.

Results and Discussion

Principal Component Analysis revealed two dominant factors explaining 99.6% of the variance in resistance: *Host Attractiveness and Colonization Success* (87.1% variance) and *Habitat Limitation* (12.5% variance). The first factor correlated strongly with indices such as C-Aphis (loading = 0.993) and PI (0.993), emphasizing the role of rootstock appeal in aphid colonization. The second factor, linked to zi (0.997), highlighted ecological constraints that limit aphid exploitation. Cluster analysis grouped rootstocks into four resistance categories: highly susceptible genotypes (e.g., Azop2-85) exhibited high C-Aphis (0.59) and low zi (0.59), indicating poor ecological deterrence, while semi-susceptible (e.g., B9op) and semi-resistant (AZ*M27) rootstocks showed incremental improvements. The most resistant genotype, M9op3, demonstrated the lowest C-Aphis (0.63) and highest zi (0.63), suggesting robust antixenosis through minimized host appeal and ecological barriers. Root trait correlations revealed that dense root systems positively influenced aphid preference ($r = 0.51, p < 0.01$), likely due to enhanced vascular access, while extended rhizogenic zones negatively impacted habitat exploitation ($r = -0.59, p < 0.01$), implying structural complexity deterred aphids. Shorter root lengths were associated with reduced habitat potential ($r = -0.59, p < 0.01$), aligning with M9op3's compact root architecture. These findings align with prior studies underscoring root morphology's role in pest resistance, where sparse feeder roots limit nutrient access and compact rhizogenic zones reduce chemical attractants. The integration of ecological metrics like zi offers a novel framework for resistance evaluation, complementing traditional indices and enhancing precision in cultivar selection.

Conclusions

This study establishes antixenosis resistance as a multifactorial trait shaped by root morphology and ecological dynamics. The resistant rootstock M9op3, characterized by low root density and compact rhizogenic zones, effectively deterred aphid colonization by restricting access to vascular tissues and minimizing chemical attractants. Breeding programs targeting root architectural traits—such as sparse feeder roots and limited rhizogenic zones—can enhance resistance, offering a sustainable alternative to pesticide-dependent pest management. The integration of ecological metrics (e.g., zi) provides a novel approach to evaluating resistance, advancing precision in cultivar selection and addressing challenges posed by evolving aphid biotypes. Practical implications include reduced pesticide reliance and improved alignment with Integrated Pest Management (IPM) goals. Future research should investigate the biochemical role of root exudates in aphid behavior and test rootstocks under abiotic stresses (e.g., drought) to ensure climate resilience. By bridging agronomy and ecology, this study contributes to global efforts in sustainable horticulture, offering actionable insights for developing aphid-resistant apple cultivars that balance productivity with environmental stewardship.