مجله علوم و فنون باغبانی ایران جلد ۲۴ شماره ۴ صفحه‌های ۵۲۵ تا ۵۴۰ (۱۴۰۲)
مقاله پژوهشی

مطالعه ترکیب‌پذیری و هتروزیس صفات مهم گوجه فرنگی با استفاده از روش تجزیه دای‌آلل

Studying Combining Ability and Heterosis of Important Traits in Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) Using Diallel Crosses

فرزاد خوش‌اخلاق و بابک ربیعی
گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان
*نویسنده مسئول، پست الکترونیک: (rabiei@guilan.ac.ir)
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۲/۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۵/۹

چکیده

به‌منظور مطالعه ترکیب‌پذیری عمومی و خصوصی و هتروزیس شش لاین گوجه فرنگی، از یک طرح دای‌آلل ۶×۶ استفاده شد. والدین تلاقی‌ها، لاین‌های ۴۸۶(P_1)، ۲۰۸ (P_2)، ۱۵۱/۶ (P_3)، Kim (P_4)، ۱۰۱۰ (P_5) و ۵۴۲ (P_6) با ویژگی‌های متفاوت از نظر عملکرد و سایر صفات مورد مطالعه بودند که از بخش سبزی و صیفی موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کشور تهیه شدند. والدین به‌همراه ۱۵ دورگ F_1 حاصل از تلاقی‌های دای‌آلل یک‌طرفه آنها (در مجموع ۲۱ نژادگان) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان قزوین در بهار سال ۱۳۹۹ کشت و صفات عملکرد میوه، تعداد میوه در بوته، وزن میوه و درصد مواد محلول اندازه‌گیری شدند. نتایج تجزیه واریانس داده‌ها در قالب روش دوم گریفینگ با فرض والدین ثابت نشان داد که تفاوت بین نژادگان‌ها و همچنین تفاوت بین ترکیب‌پذیری عمومی والدین و خصوصی دورگه‌ها در تمامی صفات معنی‌دار بود که نشان‌دهنده نقش هر دو اثر افزایشی و غیر افزایشی ژن‌ها در توارث صفات بود. نسبت بیکر و نیز نسبت هانگ و هالند برای تمامی صفات مورد مطالعه نیز بین نیم تا یک به‌دست آمد که نشان دهنده نقش هر دو اثر افزایشی و غیرافزایشی ژن‌ها با سهم بیشتر اثر افزایشی در کنترل تمامی صفات بود. مقایسه والدین و تلاقی‌ها نشان داد که لاین Kim برای صفات عملکرد میوه و تعداد میوه در بوته، لاین ۱۰۱۰ برای وزن میوه و لاین ۴۶۸ برای درصد املاح محلول، دارای بالاترین ترکیب‌پذیری عمومی مثبت و معنی‌دار و تلاقی ۱۰۱۰×۱۵۱/۶ برای صفات عملکرد میوه و وزن میوه، تلاقی Kim×۵۴۲ برای تعداد میوه در بوته و تلاقی ۱۵۱/۶ × Kim برای درصد املاح محلول دارای بالاترین ترکیب‌پذیری خصوصی مثبت و معنی‌دار بودند. در مجموع نتایج این آزمایش نشان داد که تلاقی‌های ۲۰۸×۱۵۱/۶ و ۱۰۱۰×۱۵۱/۶ برای عملکرد میوه، ۱۰۱۰×۵۴۲ برای تعداد میوه در بوته و ۲۰۸×۱۵۱/۶ برای درصد املاح محلول، بالاترین میزان هتروزیس مثبت و معنی‌دار را نسبت به والد برتر خود داشتند و ارزشمندترین تلاقی‌ها در این آزمایش بودند، اما برای صفت وزن میوه، فقط تلاقی ۴۶۸×۱۵۱/۶ دارای هتروزیس مثبت و معنی‌دار نسبت به متوسط والدین بود.

واژه‌های کلیدی: اثر افزایشی و غیرافزایشی ژن‌ها، میزان مواد محلول، وراثت‌پذیری، وزن میوه.

مقدمه

گوجه‌فرنگی با نام علمی *Lycopersicon esculentum* Mill. یکی از مهم‌ترین سبزی‌های تیره سیب زمینی سانان یا بادمجانیان و بومی پرو، اکوادور و بولیوی در آمریکای جنوبی است (Rick, 1969). این محصول با داشتن پتانسیل مناسب و بهره‌وری مطلوب پس از سیب‌زمینی در صدر فهرست تولید و مصرف سبزی‌های فرآوری شده جهان قرار دارد و به‌دلیل سازگاری و عملکرد بالا به‌طور گسترده در سراسر جهان کشت می‌شود و به‌عنوان یک راهبرد برای تامین مواد غذایی و افزایش درآمد

زارعین بسیار ارزشمند می‌باشد. گوجه فرنگی با تقاضای تقریباً ثابت در طول سال در بین مصرف کنندگان سطح جهانی به دو منظور تازه‌خوری یا فرآوری‌شده، کشت و به‌عنوان یک محصول با ارزش اقتصادی بالا در نظر گرفته می‌شود (Singh *et al.*, 2010).

گوجه‌فرنگی یک گیاه خودبارور و روزخنثی با تعداد کروموزوم 2n=24 است و از جمله گیاهانی است که با استفاده از پدیده هتروزیس قابلیت اصلاح دارد، به‌طوری‌که در مطالعات متعددی موفقیت در اصلاح صفات عملکرد و زودرسی گزارش شده است (Shankara *et al.*, 2005; Farzaneh *et al.*, 2013). هتروزیس یا قدرت دورگه[1] به افزایش اندازه، عملکرد و به‌طور کلی قدرت رشد نتاج نسبت به والدین اطلاق می‌شود. برای بهره‌برداری حداکثری از پدیده هتروزیس جهت تولید دورگه‌های پرمحصول، تولید و تهیه لاین‌های خالص و سپس گروه‌بندی و تعیین الگوهای هتروتیک آنها به‌منظور انجام تلاقی‌های مناسب و هدف‌مند ضروری است (Farshadfar, 1997). میزان هتروزیس بستگی به تفاوت‌های ژنتیکی بین والدین دارد، به‌طوری‌که نتاج متعلق به والدینی که تفاوت‌های ژنتیکی بیشتری دارند، هتروزیس بیشتری نیز نشان می‌دهند. بیشترین مقدار هتروزیس عموماً در نسل F_1 مشاهده می‌شود و پس از آن با شروع نسل F_2 به‌تدریج کاهش می‌یابد (Makumbi *et al.*, 2018). استفاده از پدیده هتروزیس در تولید محصولات کشاورزی تا کنون به‌طور قابل توجهی توانسته است ویژگی‌های مختلف گیاهی نظیر عملکرد (Lippman and Zamir, 2007)، کیفیت (Machida *et al.*, 2010) و مقاومت گیاهان به آفات و بیماری‌ها (Cheng *et al.*, 2010; Machida *et al.*, 2010) را بهبود بخشد.

با توجه به اهمیت اصلاحی پدیده هتروزیس و مشاهده میزان حداکثری آن در نتاج حاصل از تلاقی بین لاین‌های خالص با فاصله ژنتیکی بیشتر و نیز قابلیت ترکیب‌پذیری[2] بالاتر، برآورد میزان ترکیب‌پذیری در انتخاب لاین‌ها برای تولید دورگه‌های تجاری پر محصول ضروری است. والدهای لازم برای دورگ‌گیری بر مبنای میزان ترکیب‌پذیری خصوصی (SCA)[3] ارزش‌های فنوتیپی صفات و ویژگی‌های مهم مرتبط با عملکرد مورد گزینش قرار می‌گیرند تا از ژن‌های با آثار غیر افزایشی (غالبیت) و واریانس ناشی از آنها (واریانس غالبیت) استفاده کرد و احتمال بروز پدیدیه هتروزیس را در تلاقی‌ها افزایش داد. در مقابل، از والدهای دارای ترکیب‌پذیری عمومی (GCA)[4] بالاتر معمولاً در تولید واریته‌های ترکیبی (سنتتیک)[5] و یا در تهیه یک جمعیت پایه جدید استفاده می‌شود تا پس از طی چند نسل و افزایش سهم ژن‌های با آثار افزایشی، بتوان از واریانس ژنتیکی افزایشی بهره‌برداری کرد (Moll *et al.*, 1965; Allahgholipour *et al.*, 2015).

ارتباط بین میزان هتروزیس و ترکیب‌پذیری عمومی (GCA) والدین توسط پژوهشگران مختلفی بررسی شده است. مطالعات Singh و Asati در گوجه‌فرنگی نشان داد که میزان ترکیب‌پذیری عمومی والدین می‌تواند معیار مهمی برای انتخاب والدین مناسب جهت تولید دورگه‌های با حداکثر میزان هتروزیس باشد و بنابراین نتیجه‌گیری کردند که GCA برای پیش‌بینی موفقیت‌آمیز در انتخاب لاین‌ها و بنابراین بر کیفیت دورگه‌ها موثر است (Singh and Asati, 2011). نتایج آزمایش Liu و همکاران در مورد ارتباط ترکیب‌پذیری و هتروزیس در گوجه فرنگی نیز نشان داد که اگرچه ارتباطی بین GCA و SCA وجود ندارد و از طرفی قدرت هتروزیس بستگی به SCA دارد، اما مجموع مقادیر GCA والدین هتروزیس را با دقت بیشتری نسبت به SCA پیش‌بینی کرد (Liu *et al.*, 2021). در مقابل در برخی دیگر از مطالعات، ارتباط معنی‌داری بین هتروزیس و GCA گزارش نشده است، به‌طوری‌که Lee و همکاران (Lee *et al.*, 2007) در ذرت و Xiang و همکاران (Xiang *et al.*, 2019) در برنج، ضمن بررسی ارتباط بین عملکرد و GCA والدین با هتروزیس، عنوان داشتند که عملکرد و GCA والدین لزوماً پیش‌بینی‌کننده قابل اعتمادی برای هتروزیس نیستند. شاید بتوان گفت از آنجایی که پدیده هتروزیس در عمل به تنوع ژنتیکی بالای والدین و ناهمگونی آنها مربوط می‌شود، در حالی‌که قابلیت ترکیب‌پذیری عمومی والدین عمدتاً توسط اثر افزایشی ژن‌های والدین کنترل می‌شود، به این دلیل است که در برخی از مطالعات ارتباط بین آنها گزارش نشده است. در مقابل، قابلیت ترکیب‌پذیری خصوصی (SCA) تلاقی‌ها یا دورگه‌ها توسط آثار غالبیت و در حقیقت اثر متقابل بین آلل‌ها کنترل می‌شود و پدیده هتروزیس نیز عمدتاً توسط غالبیت و

۱- Heterosis or Hybrid Vigor
۲- Combining Ability
۳- Specific Combining Ability
۴- General Combining Ability
۵- Synthetic Variety

اثرات غیر آللی ایجاد می‌شود، بنابراین می‌توان عنوان کرد که هتروزیس به اثر ترکیب‌پذیری خصوصی یا SCA بستگی دارد (Singh *et al*., 2014).

در آزمایشی Izzo و همکاران از یک طرح نیمه دای‌آلل ۶×۶ به‌منظور ارزیابی وراثت‌پذیری و هتروزیس عملکرد و سایر صفات میوه گوجه‌فرنگی استفاده کردند. نتایج نشان داد که در بیشتر دورگه‌ها هتروزیس قابل توجه و معنی‌داری نسبت به متوسط والدین و نیز نسبت به والد برتر وجود داشت، به‌طوری‌که برای صفت عملکرد میوه ۴۹ و ۳۴/۴ درصد، برای روز تا شروع گلدهی۲/۳- تا ۲۷/۳- درصد، برای تعداد میوه در شاخه ۷۳/۹ و ۷۷/۶ درصد، برای ارتفاع بوته ۱۵/۷ و ۹/۳ درصد، برای طول میوه ۲۷/۳ و ۲۴/۲ درصد و برای قطر میوه ۳۲/۵ و ۲۴/۸ درصد هتروزیس به‌ترتیب نسبت به متوسط والدین و والد برتر به‌دست آمد. هم‌چنین برآورد وراثت‌پذیری عمومی و خصوصی و نسبت واریانس GCA به SSA نیز نشان داد که در توارث صفات وزن میوه، طول میوه، قطر میوه و تعداد میوه در هر شاخه بیشتر عمل افزایشی ژن‌ها دخیل بودند، در حالی‌که عملکرد تک‌بوته و تعداد روزهای تا گلدهی بیشتر تحت تاثیر عمل غیرافزایشی ژن‌ها قرار داشتند (Izzo *et al*., 2022).

در آزمایشی ترکیب‌پذیری عمومی والدین در ۱۰ لاین گوجه فرنگی و ترکیب‌پذیری خصوصی در دورگه‌های حاصل از تلاقی آنها ارزیابی و مشخص شد که وزن میوه در بوته توسط عمل غیر افزایشی ژن‌ها کنترل می‌شود و با پیشرفت نسل و انتخاب، اصلاح صفات نیز بهتر خواهد بود. از بین ده لاین والدی مطالعه شده، چهار لاین Floradade، Akra، Ec-164563 و Meghali بالاترین مقدار GCA و از بین تلاقی‌ها نیز دورگه Ec-52830 × Ec-620406 بالاترین میزان عملکرد را نشان داد و به‌عنوان برترین ترکیب شناسایی شد (Kumar and Singh, 2022).

برآورد ترکیب‌پذیری تعداد ده لاین گوجه فرنگی گیلاسی[1] برای صفات عملکرد و اجزای عملکرد در دو شرایط محیطی با استفاده از یک طرح نیمه دی‌آلل نشان داد که مقدار واریانس SCA بیشتر از واریانس GCA برای تمام صفات مورد مطالعه در هر دو محیط، به‌جز صفات روز تا اولین گلدهی، روز تا اولین میوه‌دهی و روز تا رسیدگی اولین میوه در محیط اول بود که نشان دهنده نقش اثر غیرافزایشی ژن‌ها در کنترل ژنتیکی این صفات بود. همچنین برهمکنش محیط×GCA و محیط×SCA برای تمامی صفات ارزیابی شده معنی‌دار بود (Lone *et al*., 2022).

در آزمایشی از یک طرح نیمه دای‌آلل ۵×۵ به‌منظور برآورد ترکیب‌پذیری، نحوه عمل ژن و میزان هتروزیس صفات وزن میوه، کیفیت میوه و شدت بیماری ویروسی پیچ‌خوردگی برگ گوجه‌فرنگی استفاده شد (Pandiarana *et al*., 2015). تجزیه و تحلیل داده‌ها، برتری عمل غیرافزایشی ژن‌ها را برای تمامی صفات مورد مطالعه به‌جز وزن میوه نشان داد، به این معنی که عمل غالبیت و فوق‌غالبیت ژن‌ها در وراثت این صفات دخالت دارد و روش هتروزیس راهکار مناسبی برای بهبود این صفات در جمعیت مربوطه است. بالاترین میزان هتروزیس والد برتر (هتروبلتیوزیس)[2] برای شاخص درصد بیماری ویروسی پیچ‌خوردگی برگ، زودرسی، عملکرد میوه در بوته، تعداد حفره[3] میوه و نیز میزان لیکوپن، میزان ویتامین C، میزان کل مواد جامد محلول و میزان اسیدیته میوه مشاهده شد. همچنین سه لاین CLN2777 E، BCT-115 و CLN2777 F دارای بیشترین میزان ترکیب‌پذیری عمومی و دو دورگه CLN2777 F×CLN2777 E و E2777CLN×Ailsa Craig fulgens دارای بیشترین میزان ترکیب‌پذیری خصوصی بودند (Pandiarana *et al*., 2015).

به‌منظور تعیین الگوی هتروتیک تعدادی از لاین‌های گوجه‌فرنگی و شناسایی دورگه‌های با بالاترین میزان هتروزیس، از روش Line×Tester استفاده و با تلاقی تعداد هشت لاین با سه تستر، ۲۴ دورگه تولید شد (Pattnaik *et al*., 2020). بررسی دورگه‌ها به‌همراه والدین آنها برای صفات مرتبط با عملکرد و کیفیت میوه نشان داد که تفاوت های ژنتیکی بسیار معنی‌داری بین نژادگان‌ها برای تمامی هشت صفت مورد مطالعه وجود داشت. بررسی الگوی هتروتیک لاین‌ها برای صفت عملکرد کل گیاه نشان داد که تلاقی‌های Solan-Vajra×Arka-Abha با ۲۳/۳ درصد و سپس CTS-07×Arka-Abha و VRT-101A×Arka-Abha به‌ترتیب با ۱۹/۲ و ۱۶/۶ درصد، بیشترین میزان هتروزیس نسبت به والد برتر را نشان دادند و برترین دورگه‌ها بودند (Pattnaik *et al*., 2020).

۱- Cherry Tomato
۲- Heterobeltiosis
۳- Locule

در پژوهش دیگری از روش لاین × تستر جهت برآورد ترکیب‌پذیری لاین‌های گوجه‌فرنگی برای صفات عملکرد و اجزای عملکرد میوه، استفاده و تعداد ده لاین با چهار تستر تلاقی داده شد (Reddy *et al*., 2017). نتایج تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد که اثر GCA و SCA برای تمامی صفات معنی‌دار بود که نشان دهنده نقش هر دو عمل افزایشی و غیرافزایشی ژن‌ها در کنترل صفات مورد مطالعه با سهم بیشتر غیرافزایشی بود. همچنین، لاین‌های Pant-t3، co-3 و Flawery و تسترهای H-24 و H-86 بهترین ترکیب‌شونده‌های عمومی برای صفات عملکرد میوه، روز ۵۰ درصد گلدهی و ارتفاع گیاه بودند.

در آزمایشی از یک طرح نیمه دای‌آلل ۸×۸ به‌منظور ارزیابی ترکیب‌پذیری هشت واریته گوجه فرنگی بر اساس واکنش نسبی واریته‌ها به بیماری سوختگی دیررس تحت شرایط گلخانه استفاده شد (Soresa, 2022). تجزیه واریانس داده‌ها وجود تنوع ژنتیکی و تفاوت‌های بسیار معنی‌دار بین نژادگان‌ها را برای سوختگی دیررس نشان داد. تجزیه واریانس دای‌آلل نیز نشان داد که ترکیب‌پذیری عمومی (GCA) واریته‌ها و خصوصی (SCA) تلاقی‌ها برای تمامی پارامترهای ارزیابی شده برای بیماری معنی‌دار و نسبت واریانس GCA/SCA برای همه پارامترهای بیماری حاکی از آثار غالبیت و غیرافزایشی ژن‌ها بود. آنها دو لاین d2 و Metadel را که ترکیب‌شونده‌های عمومی خوب برای شاخص‌های مختلف این بیماری بودند، به‌عنوان منابع پایدار ژن‌های مقاوم برای استفاده در برنامه‌های به‌نژادی با هدف ایجاد مقاومت به بیماری سوختگی دیررس توصیه کردند.

با توجه به‌این‌که برای موفقیت در یک پروژه به‌نژادی، شناخت مناسب نژادگان‌ها و نحوه توارث صفات مربوطه در جمعیت مورد مطالعه ضروری است، از این‌رو تحقیق حاضر اجرا شد که هدف آن، ارزیابی میزان ترکیب‌پذیری عمومی و خصوصی والدین و دورگه‌های حاصل از تلاقی آنها و برآورد پارامترهای ژنتیکی کنترل کننده صفات مهم گوجه فرنگی نظیر هتروزیس، وراثت‌پذیری و نوع عمل ژن‌ها بود.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی این تحقیق ۲۱ نژادگان گوجه‌فرنگی شامل شش لاین خالص والدینی و ۱۵ دورگه حاصل از تلاقی دوبه‌دوی آنها در قالب دای‌آلل یک‌طرفه بودند. والدین شامل لاین‌های ۴۸۶(P_1)، ۲۰۸ (P_2)، ۱۵۱/۶ (P_3) Kim (P_4)، ۱۰۱۰ (P_5) و ۵۴۲ (P_6) بودند که از بخش سبزی و صیفی موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کشور تهیه شدند (جدول ۱). والدین طوری انتخاب شدند که از نظر عملکرد و سایر صفات مورد مطالعه متفاوت باشند. والدین فوق به‌همراه ۱۵ دورگه نسل F_1 حاصل از تلاقی آنها در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مرکز تحقیقات کشاورزی قزوین در سال زراعی ۱۳۹۹ کشت و صفات مهم گوجه‌فرنگی شامل عملکرد کل میوه، تعداد میوه در بوته، وزن میوه و درصد املاح محلول میوه اندازه‌گیری شدند.

جدول ۱- اسامی و مشخصات لاین‌های خالص مورد مطالعه در این آزمایش.

Table 1. Name and important characteristics of the studied pure lines of tomato in this experiment.

شماره No.	والد Parent	منشاء Origin	تیپ Type	دوره رسیدگی Maturity duration	شکل میوه Fruit shape	رنگ Color
1	468	ایتالیا Italy	میانه Determinate	میان‌رس (۹۰ روز) Medium, 90	مستطیلی Oblong	قرمز Red
2	208	آمریکا America	میانه Determinate	میان‌رس (۸۵ روز) Medium, 85	مستطیلی Oblong	قرمز Red
3	151.6	چین China	میانه Determinate	میان‌رس (۸۰ روز) Medium, 80	گرد Round	قرمز Red
4	Kim	انگلستان England	میانه Determinate	میان‌رس (۹۰ روز) Medium, 90	گرد Round	قرمز Red
5	1010	ترکیه Turkey	میانه Determinate	میان‌رس (۸۵ روز) Medium, 85	مستطیلی Oblong	قرمز Red
6	542	ایران Iran	میانه Determinate	زودرس (۷۵ روز) Early, 75	گرد Round	قرمز Red

هر کرت آزمایشی به مساحت ۱۲ متر مربع (۲×۶ متر) شامل سه ردیف کاشت به فاصله ۶۰ سانتی متر بود و در هر ردیف تعداد ۱۰ بوته با فاصله ۶۰ سانتی‌متر نشاکاری شد و بنابراین در هر کرت تعداد ۳۰ نشا از هر نژادگان کشت شد. برای حذف اثر حاشیه‌ای، فاصله ۵۰ سانتی‌متری از اطراف کرت‌ها به‌عنوان حاشیه در نظر گرفته شد و تمام نمونه‌گیری‌ها از ردیف‌های وسطی انجام گرفت. عملیات کشت، نشاکاری، مراحل داشت و کنترل مزرعه به‌صورت معمول و طبق اصول به‌زراعی انجام شد. برای رشد بهتر گیاهان، مقدار ۱۲۵ کیلوگرم در هکتار ازت خالص از منبع اوره، ۸۰ کیلوگرم در هکتار فسفر خالص از منبع دی آمونیوم فسفات و ۴۵ کیلوگرم در هکتار پتاس خالص از منبع سولفات پتاسیم بر اساس نتایج آزمون خاک مزرعه پژوهشی استفاده شد.

برای اندازه‌گیری تمامی صفات مطالعه شده در این آزمایش از دستورالعمل فنی موسسه اصلاح و تهیه نهال و بذر کشور (۱) استفاده و فقط میوه‌های صاف، کامل و رسیده در اندازه‌گیری‌ها استفاده و میوه‌های غیرمتعارف حذف شدند. به‌منظور اندازه‌گیری وزن میوه، تمامی میوه‌های هر کرت در طی سه چین برداشت و اندازه‌گیری و در پایان بر حسب کیلوگرم بر مترمربع ثبت شد. برای اندازه‌گیری وزن میوه، یک نمونه تصادفی شامل تعداد ۳۰ میوه از هر یک از کرت‌های آزمایشی انتخاب و پس از اندازه‌گیری وزن آنها، متوسط وزن هر میوه بر حسب گرم با تقسیم وزن ۳۰ میوه به تعداد آنها به‌دست آمد. برای اندازه‌گیری تعداد میوه در بوته نیز تعداد کل میوه‌های گیاه در زمان بلوغ در یک نمونه تصادفی شامل ۱۰ بوته از هر کرت، شمارش و سپس متوسط تعداد میوه در هر بوته به‌دست آمد. در مورد مواد جامد محلول نیز تعداد ۱۰ میوه به‌طور تصادفی از هر کرت انتخاب و درصد مواد محلول در میوه‌ها با استفاده از دستگاه رفروکتومتر قابل حمل اندازه‌گیری و سپس متوسط آن در هر میوه برای انجام تجزیه‌های آماری ثبت شد.

به‌منظور انجام تجزیه و تحلیل‌های آماری، ابتدا تجزیه واریانس داده‌ها انجام شد و سپس اثر نژادگان به اثر ترکیب‌پذیری عمومی والدین و خصوصی دورگه‌ها تفکیک شد. برای محاسبه مجموع مربعات ترکیب‌پذیری عمومی (SS_{GCA}) والدین و خصوصی (SS_{SCA}) دورگه‌ها به‌ترتیب از روابط (۱) و (۲) استفاده و معنی‌داری آنها با آزمون F بررسی شد:

$$SS_{GCA} = \frac{1}{(p+2)}\sum(X_{i.} + X_{ii})^2 - \frac{4}{p} X_{..}^2 \quad (۱)$$

$$SS_{SCA} = \sum\sum X_{ij}^2 - \frac{1}{(p+2)}\sum(X_{i.} + X_{ii})^2 + \frac{2}{(p+1)(p+2)} X_{..}^2 \quad (۲)$$

میانگین مربعات خطای دیالل نیز از تقسیم میانگین مربعات خطای طرح آزمایشی بر تعداد تکرارها به‌دست آمد.

برای برآورد اثرات ترکیب‌پذیری عمومی هر یک از لاین‌های والدی و ترکیب‌پذیری خصوصی هر یک از تلاقی‌ها به‌ترتیب از روابط (۳) و (۴) استفاده شد:

$$gca_i = \frac{1}{(p+2)}\left[X_{i.} + X_{ii} - \frac{2X_{..}}{p}\right] \quad (۳)$$

$$sca_{ij} = X_{ij} - \frac{1}{(p+2)}\left[X_{i.} + X_{ii} + X_{j.} + X_{jj}\right] + \frac{2}{(p+1)(p+2)} X_{..} \quad (۴)$$

مقادیر واریانس‌های افزایشی و غالبیت نیز به‌ترتیب بر اساس روابط (۵) و (۶) و وراثت‌پذیری عمومی و خصوصی به‌ترتیب با استفاده از روابط (۷) و (۸) برآورد شدند:

$$\sigma_A^2 = 2\sigma_{GCA}^2 \quad (۵)$$

$$\sigma_D^2 = \sigma_{SCA}^2 \quad (۶)$$

$$h_b^2 = \frac{\sigma_{Genotype}^2}{\sigma_{Phenotype}^2} = \frac{\sigma_A^2 + \sigma_D^2}{\sigma_A^2 + \sigma_D^2 + \frac{\sigma_e^2}{r}} \quad (۷)$$

$$h_n^2 = \frac{\sigma_{Additive}^2}{\sigma_{Phenotype}^2} = \frac{\sigma_A^2}{\sigma_A^2 + \sigma_D^2 + \frac{\sigma_e^2}{r}} \quad (۸)$$

نسبت Baker (Baker, 1978) و نسبت Hung و Holland (Hung and Holland, 2012) نیز به‌ترتیب با استفاده از روابط (۹) و (۱۰) برآورد شدند. هر دو نسبت فوق بین صفر تا یک متغیر هستند، به‌طوری که اگر مقدار این نسبت‌ها به سمت یک میل کند، به معنی نقش بیشتر آثار افزایشی ژن‌ها و برعکس اگر مقدار آنها به صفر میل کند، به معنی تاثیر بیشتر آثار غیر

افزایشی ژن‌ها بوده و اگر در حدود نیم باشند، به مفهوم نقش یکسان هر دو اثر افزایشی و غیر افزایشی ژن‌ها در توارث صفت مربوطه خواهد بود:

$$BR = \frac{MS_{GCA}}{(MS_{GCA}+MS_{SCA})} \quad (۹)$$

$$HR = \frac{2\sigma^2_{GCA}}{(2\sigma^2_{GCA}+\sigma^2_{SCA})} \quad (۱۰)$$

همچنین، درصد هتروزیس مشاهده شده در هر یک از صفات مورد مطالعه بر حسب متوسط عملکرد والدین ($\overline{MP}$) و متوسط عملکرد والد برتر ($\overline{BP}$) به‌ترتیب با استفاده روابط (۱۱) و (۱۲) محاسبه شدند:

$$MPH\ (\%) = \frac{\overline{F_1}-\overline{MP}}{\overline{MP}} \times 100 \quad (۱۱)$$

$$BPH\ (\%) = \frac{\overline{F_1}-\overline{BP}}{\overline{BP}} \times 100 \quad (۱۲)$$

تجزیه آماری داده‌ها شامل تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها بر اساس روش حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) با استفاده از نرم‌افزار SAS و تجزیه دای‌آلل بر اساس روش دوم گریفینگ با فرض والدین ثابت (Griffing, 1956) با استفاده از برنامه DIALLEL-SAS (Zhang, 1997) انجام شد.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس داده‌های این آزمایش (جدول ۲) نشان داد که تفاوت بین نژادگان‌ها از نظر تمامی صفات مورد مطالعه شامل وزن میوه، تعداد میوه در بوته، وزن میوه و میزان مواد جامد محلول در میوه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود و بنابراین تنوع ژنتیکی بالا و قابل توجهی در بین نژادگان‌های آزمایش وجود داشته و می‌توان اثر نژادگان را با استفاده از روش تجزیه دای‌آلل به اجزای آن شامل قابلیت ترکیب‌پذیری عمومی والدین و خصوصی دورگه‌ها تفکیک کرد. ضریب تغییرات خطای آزمایش نیز در دامنه قابل قبول از حدود ۴ درصد در میزان مواد جامد محلول تا ۱۷ درصد در تعداد میوه در بوته متغیر و حاکی از دقت مناسب آزمایش بود.

جدول ۲- تجزیه واریانس صفات مورد مطالعه در گوجه‌فرنگی بر اساس روش دوم گریفینگ با فرض والدین ثابت.

Table 2. Analysis of variance of the studied traits in tomato based on the second method of Griffing with the assumption of fixed parents.

Source of variation†	منابع تغییرات†	درجه آزادی df	میانگین مربعات (Mean square)			
			عملکرد میوه Fruit yield	تعداد میوه No. of fruits per plant	وزن میوه Fruit weight	مواد جامد محلول Total soluble solids
Replication	تکرار	2	0.908**	170.33**	24.49 ns	0.0229 ns
Genotype	نژادگان	20	0.478**	73.59**	206.88**	0.2270**
Experimental error	خطای آزمایش	40	0.060	17.73	49.91	0.1102
GCA	ترکیب‌پذیری عمومی	5	0.450**	57.97**	66.69**	0.021**
SCA	ترکیب‌پذیری خصوصی	15	0.062**	13.38*	69.72**	0.094**
Diallel error	خطای دای‌آلل	40	0.020	5.91	16.64	0.037
CV (%)	ضریب تغییرات (درصد)	-	16.88	17.41	11.81	6.06

ns، *، **: به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱ .

ns, * and ** : Not-significant and significant at 0.05 and 0.01 probability, respectively.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها در قالب روش دوم گریفینگ با فرض انتخاب والدین ثابت و غیرتصادفی (جدول ۲) نیز نشان داد که اثر ترکیب‌پذیری عمومی والدین (GCA) برای تمامی صفات مطالعه شده در این آزمایش در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود، به این معنی که ضمن وجود تفاوت معنی‌دار بین والدین از نظر متوسط قدرت ترکیب‌شوندگی با همه والدین دیگر،

واریانس افزایشی معنی‌داری در این جمعیت وجود داشته و ژن‌های با اثر افزایشی در کنترل توارث تمامی صفات نقش دارند. اثر ترکیب‌پذیری خصوصی دورگه‌ها (SCA) نیز به‌جز تعداد میوه در بوته که در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود، برای سایر صفات اندازه‌گیری شده در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود و نشان داد که علاوه بر وجود تفاوت معنی‌دار بین دورگه‌های تولید شده در این آزمایش از نظر قدرت ترکیب شوندگی والدین آنها، واریانس غالبیت معنی‌داری نیز در جمعیت وجود داشته و ژن‌های با اثر غیر افزایشی یا غالبیت نیز نقش مهمی در کنترل توارث تمامی صفات دارند.

عملکرد میوه

با توجه به وجود اختلاف معنی‌دار بین نژادگان‌ها از نظر عملکرد میوه، میانگین نژادگان‌ها محاسبه و سپس مقایسه بین آنها با روش LSD انجام و نتایج در جدول ۳ ارایه شد. نتایج نشان داد که رقم Kim با ۲/۳۶ کیلوگرم در مترمربع بیشترین مقدار و لاین خالص ۴۶۸ با ۱/۶۷ کیلوگرم در متر مربع کمترین مقدار عملکرد را داشتند. همچنین رقم Kim پرمحصول‌ترین رقم این آزمایش در بین تمامی نژادگان‌ها بود، اگرچه لاین ۵۴۲ با عملکرد ۱/۹۶۳ کیلوگرم در متر مربع یکی از بهترین لاین‌های این آزمایش بود که از نظر عملکرد تفاوت آماری معنی‌داری با رقم Kim نداشت. در بین دورگه‌های تولید شده نیز سه دورگه ۱۵۱/۶×۱۰۱۰، Kim ×۱۰۱۰ و ۵۴۲×۱۰۱۰ به‌ترتیب با تولید محصول ۱/۹۵، ۱/۹۲ و ۱/۸۹ کیلوگرم در متر مربع بالاترین عملکرد را داشتند و بهترین دورگه‌های این آزمایش بودند. در مقابل، دورگه ۴۶۸×۵۴۲ با محصول فقط ۰/۹۵ کیلوگرم در متر مربع (کمتر از ۱۰ تن در هکتار) کمترین عملکرد را تولید کرد (جدول ۳). آزمون ترکیب‌پذیری عمومی والدین و خصوصی دورگه‌ها برای عملکرد گوجه‌فرنگی معنی‌دار بود (جدول ۲)، به این معنی که هر دو عمل افزایشی و غیر افرایشی ژن‌ها در کنترل توارث این صفت نقش دارند. این نتیجه با مدل افزایشی- غالبیت ارائه شده توسط Chishti و همکاران (Chishti *et al*., 2008) و Liu و همکاران (Liu *et al*., 2019) مطابقت داشت، در حالی‌که با نتایج مطالعات Pandiarana و همکاران (Pandiarana *et al*., 2015) مطابقت نداشت.

پارامترهای ژنتیکی کنترل کننده عملکرد میوه در جدول ۴ ارایه شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، مقدار واریانس‌های GCA و SCA و نیز مقدار واریانس‌های افزایشی و غالبیت برای عملکرد میوه معنی‌دار شد که نشان دهنده نقش معنی‌دار ژن‌های با هر دو اثر افزایشی و غیرافزایشی (غالبیت) در کنترل این صفت در نژادگان‌های مورد مطالعه بود. همچنین مقدار وراثت‌پذیری عمومی برای عملکرد محصول بالا و حکایت از نقش قابل توجه عوامل ژنتیکی و در مقابل نقش ناچیز عوامل محیطی در کنترل توارث این صفت در این جمعیت داشت (جدول ۴). برآورد وراثت‌پذیری خصوصی برای این صفت نیز نشان داد که اگرچه هر دو نوع عمل افزایشی و غالبیت ژن‌ها در کنترل تنوع این صفت نقش داشتند، اما میزان اثر افزایشی ژن‌ها بیشتر از اثر غالبیت بود. همچنین، برآورد نسبت بیکر و نسبت هانگ و هالند که به‌ترتیب برابر با ۰/۸۸ و ۰/۷۰ به‌دست آمد (جدول ۴)، نیز این نتیجه‌گیری مبنی بر نقش بیشتر اثر افزایشی ژن‌ها در کنترل توارث عملکرد میوه در زمینه ژنتیکی مواد گیاهی این آزمایش را مورد تایید قرار داد.

به‌منظور به‌دست آوردن اطلاعات ژنتیکی بیشتر در رابطه با لاین‌های والدینی و دورگه‌های حاصل از تلاقی آنها در این آزمایش جهت استفاده کاربردی از نتایج و پیشنهاد بهترین روش اصلاح جمعیت، اثرات ترکیب پذیری عمومی (GCA) و خصوصی (SCA) هر یک از والدین و دورگه‌های حاصل از تلاقی آنها محاسبه و به‌ترتیب در جدول‌های ۵ و ۶ ارایه شد. نتایج نشان داد که لاین‌های والدینی گوجه فرنگی مطالعه شده در این آزمایش دارای قابلیت ترکیب‌پذیری عمومی بسیار متفاوتی برای صفت عملکرد محصول بودند، به‌طوری که به‌جز لاین ۱۵۱/۶ که قابلیت ترکیب‌پذیری عمومی آن با پنج لاین دیگر به‌طور متوسط در حدود ۰/۰۳ کیلوگرم در متر مربع بود و از نظر آماری معنی‌دار نبود، سایر لاین‌ها دارای ترکیب‌پذیری عمومی معنی‌داری بودند. در این میان، دو لاین ۴۶۸ و ۲۰۸ به‌ترتیب با مقدار ترکیب‌پذیری عمومی معنی‌دار ۰/۳۴۸- و ۰/۱۸۰- کیلوگرم در متر مربع، به‌طور متوسط عملکرد محصول را در تلاقی با همه لاین‌های دیگر به‌ترتیب در حدود ۰/۳۵ و ۰/۱۸ کیلوگرم در متر مربع کاهش دادند، در حالی‌که سه لاین Kim، ۱۰۱۰ و ۵۴۲ دارای ترکیب‌پذیری عمومی مثبت و معنی‌دار برای عملکرد محصول بودند و به‌ترتیب عملکرد محصول را در تلاقی با تمامی لاین‌های دیگر در حدود ۰/۳۰ ، ۰/۱۶ و ۰/۱۰ کیلوگرم در متر مربع افزایش دادند. به این ترتیب، سه لاین فوق این توانایی را دارند که ویژگی تولید محصول بیشتر را به نتاج خود در تلاقی با لاین‌های دیگر منتقل کنند.

باید توجه داشت که صرفاً داشتن ترکیب‌پذیری عمومی بالا برای یک لاین کفایت نکرده و نمی‌توان بر اساس آن والدین مناسب جهت تولید دورگه را مشخص کرد، زیرا ترکیب‌پذیری عمومی متوسط توانایی و قدرت یک لاین را در تلاقی با تمامی لاین‌های دیگر نشان می‌دهد و چه بسا لاینی که ترکیب‌پذیری عمومی نزدیک به صفر و یا حتی منفی دارد، ممکن است در تلاقی با یکی از لاین‌های دیگر بسیار موفق باشد و دورگه ارزشمندی تولید کند، اما چون در تلاقی با یک یا برخی از لاین‌های دیگر قدرت ترکیب‌پذیری منفی داشته است، در مجموع و در متوسط تمامی لاین‌ها اثر آن منفی یا صفر شده باشد. در حقیقت برای انتخاب والدین مناسب و مطلوب به‌منظور تولید دورگه‌های ارزشمند باید به ترکیب‌پذیری خصوصی هر دو لاین در تلاقی با هم توجه کرد و متوسط عملکرد نتاج حاصل را مورد ارزیابی قرار داد (Singh and Asati, 2011).

جدول ۳- مقایسه میانگین لاین‌های گوجه‌فرنگی و دورگه‌های حاصل از تلاقی آنها از نظر صفات مهم مطالعه شده در این آزمایش.
Table 3. Comparison of means of tomato lines and F1 hybrids derived from their crosses for important traits studied in this experiment.

نژادگان Genotype	عملکرد میوه (کیلوگرم در مترمربع) Fruit yield (kg/m^2)	تعداد میوه در بوته No. of fruit per plant	وزن میوه (گرم) Fruit weight (g)	مواد جامد محلول Total soluble solids (%)
468	1.670	20.333	52.333	5.867
208	1.093	18.333	59.000	5.400
151.6	1.287	23.000	57.667	5.200
Kim	2.358	30.667	74.667	5.733
1010	1.673	25.667	67.333	5.533
542	1.963	23.667	67.000	5.333
468*208	1.157	21.667	55.333	5.933
468*151.6	1.070	18.000	61.667	5.467
468* Kim	1.143	17.667	63.000	5.067
468*1010	1.065	27.333	46.667	5.133
468*542	0.947	24.000	39.000	5.533
208*151.6	1.503	23.333	64.333	5.867
208* Kim	1.523	25.667	63.000	5.067
208*1010	1.280	19.667	65.000	5.267
208*542	1.087	16.333	64.000	5.667
151.6* Kim	1.493	27.333	55.333	5.867
151.6*1010	1.950	27.000	74.333	5.200
151.6*542	1.343	23.000	58.333	5.600
Kim*1010	1.917	33.667	50.000	4.867
Kim*542	1.800	33.667	51.333	5.267
1010*542	1.893	28.000	63.333	5.600
میانگین Mean	1.455	24.190	59.651	5.451
حداقل اختلاف معنی‌دار(۵٪) LSD 5%	0.512	8.784	14.019	0.480
حداقل اختلاف معنی‌دار(۱٪) LSD 1%	0.699	11.980	19.120	0.655

برآورد میزان ترکیب‌پذیری خصوصی (SCA) ۱۵ دورگه تولید شده در این آزمایش (جدول ۶) نشان داد که مقدار آن برای صفت عملکرد محصول با دامنه تغییرات ۰/۶۵۶ کیلوگرم در متر مربع، از حداقل ۰/۲۸۸- تا حداکثر ۰/۳۶۸+ کیلوگرم در متر مربع متغیر بود که به‌ترتیب به دورگه‌های ۵۴۲×۲۰۸ و ۱۰۱۰×۱۵۱/۶ تعلق داشت. از نتایج جالب توجه در این آزمایش این بود که لاین ۲۰۸ که دارای ترکیب‌پذیری عمومی منفی و معنی‌دار بود، در تلاقی با لاین ۵۴۲ که دارای ترکیب‌پذیری عمومی مثبت

و معنی‌دار و در حد متوسطی بود، ارزشمندترین دورگه این آزمایش را تولید کرد. در مقابل، لاین Kim که دارای بالاترین ترکیب‌پذیری عمومی مثبت و معنی‌دار در بین هر شش لاین ارزیابی شده در این آزمایش بود، ترکیب‌پذیری خصوصی معنی‌داری با هیچ‌کدام از لاین‌ها نداشت و نتوانست دورگه ارزشمندی تولید کند، به‌طوری که این لاین در تلاقی با سه لاین ۲۰۸، ۵۴۲ و ۱۰۱۰ دارای مقدار ترکیب‌پذیری خصوصی غیرمعنی‌دار و در تلاقی با دو لاین ۱۵۱/۶ و ۴۶۸ دارای مقدار ترکیب‌پذیری خصوصی منفی و معنی‌دار بود (جدول ۶). این نتیجه در تایید همان مطلبی است که در بالا نیز اشاره شد، به این مفهوم که برای انتخاب والدین مناسب جهت تولید دورگه‌های برتر و ارزشمند، به‌جای ترکیب‌پذیری عمومی باید به ترکیب‌پذیری خصوصی هر جفت از والدین در تلاقی با یکدیگر توجه داشت و در مقابل، از لاین‌های دارای ترکیب‌پذیری عمومی مثبت و معنی‌دار می‌توان برای تولید واریته‌های ترکیبی و یا به‌منظور تشکیل یک جمعیت جدید ارزشمند جهت استخراج مجدد لاین‌های برتر استفاده کرد.

جدول ۴- برآورد پارامترهای ژنتیکی صفات مورد مطالعه گوجه فرنگی در این آزمایش.

Table 4. Evaluating genetic parameters of the studied traits of tomato in this experiment.

Parameter	عملکرد میوه (کیلوگرم در مترمربع) Fruit yield (kg/m^2)	تعداد میوه در بوته No. of fruit per plant	وزن میوه (گرم) Fruit weight (g)	مواد جامد محلول Total soluble solids (%)
واریانس ترکیب‌پذیری عمومی σ^2_{GCA}	0.0485**	5.57**	49.62**	0.0875 ns
واریانس ترکیب‌پذیری خصوصی σ^2_{SCA}	0.0420**	7.47**	81.67**	0.073**
واریانس افزایشی Additive variance (σ^2_A)	0.970**	11.14**	99.27**	0.175**
واریانس غالبیت Dominant variance (σ^2_D)	0.420**	7.47**	81.67**	0.073**
وراثت‌پذیری عمومی Broad-sense heritability (h^2_b)	0.986	0.759	0.923	0.936
وراثت‌پذیری خصوصی Narrow-sense heritability (h^2_n)	0.688	0.454	0.507	0.660
نسبت بیکر Baker ratio	0.879	0.812	0.870	0.700
نسبت هانگ و هالند Hung and Holland ratio	0.700	0.599	0.549	0.706

جدول ۵- اثرات ترکیب‌پذیری عمومی (GCA) لاین‌های گوجه‌فرنگی برای صفات مطالعه شده در این آزمایش.

Table 5. General combining ability (GCA) of tomato lines for the studied traits in this experiment.

والد Parent	عملکرد میوه (کیلوگرم در مترمربع) Fruit yield (kg/m^2)	تعداد میوه در بوته No. of fruit per plant	وزن میوه (گرم) Fruit weight (g)	مواد جامد محلول Total soluble solids (%)
468	-0.349**	-2.500 **	-5.597 **	0.067 ns
208	-0.181**	-3.250 **	1.361 ns	0.033 ns
151.6	-0.031ns	-0.583 ns	1.319 ns	0.008 ns
Kim	0.301**	3.750 **	1.653 ns	-0.008 ns
1010	0.158**	2.208 **	1.903 ns	-0.083 ns
542	0.102**	0.375 ns	-0.639 ns	-0.017 ns

ns، *، **: به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱ .

ns, * and ** : Not-significant and significant at 0.05 and 0.01 probability, respectively.

جدول ۶- اثرات ترکیب‌پذیری خصوصی (SCA) دورگه‌های گوجه‌فرنگی برای صفات مطالعه شده در این آزمایش.

Table 6. Specific combining ability (SCA) of tomato hybrids for the studied traits in this experiment.

تلاقی Cross	عملکرد میوه (کیلوگرم در مترمربع) Fruit yield (kg/m^2)	تعداد میوه در بوته No. of fruit per plant	وزن میوه (گرم) Fruit weight (g)	مواد جامد محلول Total soluble solids (%)
468*208	0.231**	3.226ns	-0.256 ns	0.357**
468*151.6	-0.005 ns	-3.107 ns	6.119**	-0.085 ns
468* Kim	-0.264**	-7.774**	7.119**	-0.468**
468*1010	-0.200 ns	3.435 ns	-9.464**	-0.326**
468*542	-0.261**	1.935 ns	-10.923**	0.007 ns
208*151.6	0.261**	2.976 ns	1.827 ns	0.349**
208* Kim	-0.052 ns	0.976 ns	0.161 ns	-0.435**
208*1010	-0.152ns	-3.482 ns	1.911 ns	-0.160 ns
208*542	-0.289**	-4.982**	3.452 ns	0.174 ns
151.6* Kim	-0.231**	-0.024 ns	-7.464**	0.390**
151.6*1010	0.368**	1.185 ns	11.286**	-0.201**
151.6*542	-0.182 ns	-0.982 ns	-2.173 ns	0.132 ns
Kim*1010	0.002 ns	3.518 ns	-13.381**	0.149 ns
Kim*542	-0.058 ns	5.351**	-9.506**	-0.185 ns
1010*542	0.178ns	1.226 ns	2.244 ns	0.090 ns

ns، *، **: به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱ .

ns, * and ** : Not-significant and significant at 0.05 and 0.01 probability, respectively.

به‌منظور انتخاب دورگه‌های برتر و ارزشمند تولید شده در این آزمایش، مقدار هتروزیس مشاهده شده در هر یک از دورگه‌ها هم بر اساس متوسط والدین و هم بر اساس والد برتر هر تلاقی محاسبه و در جدول ۷ ارایه شد. نتایج این برآورد برای صفت عملکرد میوه حاکی از وجود دامنه بسیار متفاوت برای هر دو نوع هتروزیس از مقادیر منفی تا مثبت بود. دامنه تغییرات هتروزیس متوسط والدین از حدود ۳۶- درصد در دورگه ۴۶۸×۵۴۲ تا ۳۲+ درصد در دورگه ۱۵۱/۶×۱۰۱۰ و برای هتروزیس والد برتر از حدود ۵۲- درصد در دو دورگه Kim×۴۶۸ و ۴۶۸×۵۴۲ تا حدود ۱۷+ درصد در دو دورگه ۲۰۸×۱۵۱/۶ و ۱۵۱/۶×۱۰۱۰ متغیر بود. در مجموع اکثر تلاقی‌ها دارای هتروزیس منفی برای عملکرد محصول بودند، به‌طوری که از نظر هتروزیس متوسط والدین در حدود ۲۰ درصد از دورگه‌ها و از نظر هتروزیس والد برتر در حدود ۱۰ درصد از دورگه‌ها دارای هتروزیس مثبت و معنی‌دار برای عملکرد میوه بودند و در مابقی دورگه‌ها هتروزیس منفی مشاهده شد. ارزشمندترین دورگه تولید شده در این آزمایش دو دورگه ۲۰۸×۱۵۱/۶ و ۱۵۱/۶×۱۰۱۰ بودند که نزدیک به ۱۷ درصد هتروزیس نسبت به والد برتر خود برای عملکرد میوه داشتند.

تعداد میوه در بوته

نتایج نشان داد که اختلاف آماری معنی‌داری بین نژادگان‌ها از نظر تعداد میوه در بوته وجود داشت. مقایسه میانگین بین نژادگان‌ها با استفاده از روش LSD نشان داد که رقم Kim با ۳۰/۶۶۷ عدد بیشترین تعداد و لاین ۲۰۸ با ۱۸/۳۳ عدد کمترین تعداد میوه در بوته را داشتند. در بین دورگه‌های تولید شده نیز دو دورگه ۱۰۱۰ ×Kim و ۵۴۲×Kim با مقدار ۳۳/۶۷ عدد به‌طور مشترک بیشترین تعداد میوه را داشتند و بهترین دورگه‌های این آزمایش بودند. در مقابل، دورگه ۵۴۲×۲۰۸ با تعداد ۱۶/۳۳ عدد کمترین تعداد میوه در بوته را داشت (جدول ۳).

جدول ۷- درصد هتروزیس مشاهده شده در دورگه‌های F_1 بر حسب میانگین والدین (MPH) و والد برتر (BPH).

Table 7. Observed heterosis percentage in F1 hybrids based on mid-parents (MPH) and better parent (BPH).

تلاقی Cross	عملکرد میوه (کیلوگرم در مترمربع) Fruit yield (kg/m^2)		تعداد میوه در بوته No. of fruit per plant		وزن میوه (گرم) Fruit weight (g)		مواد جامد محلول Total soluble solids (%)	
	MPH	BPH	MPH	BPH	MPH	BPH	MPH	BPH
468*208	10.16	5.79	12.70	6.56	-0.60	-6.21	5.33	1.14
468*151.6	-6.69	-16.84	-16.92	-21.74	12.12	6.94	-1.20	-6.82
468* Kim	-32.05	-51.52	-30.72	-42.39	-0.79	-15.63	-12.64	-13.64
468*1010	-20.52	.36.35	18.84	6.49	-22.01	-30.69	-9.94	-12.50
468*542	-36.25	-51.78	9.09	1.41	-28.49	-36.32	-1.19	-5.68
208*151.6	26.33	16.84	12.90	1.45	10.29	9.04	10.69	8.64
208* Kim	-11.73	-35.41	4.76	-16.30	-5.74	-15.63	-8.98	-11.63
208*1010	-7.47	-23.51	-10.61	-23.38	2.90	-3.47	-3.66	-4.82
208*542	-28.90	-44.65	-22.22	-30.99	1.59	-4.48	5.59	4.94
151.6* Kim	-18.06	-33.68	1.86	-10.87	-16.37	-25.89	7.32	2.33
151.6*1010	31.76	16.53	10.96	5. 19	-18.93	-10.40	-3.11	-6.02
151.6*542	-17.33	-31.58	-1.43	-2.82	-6.42	-12.94	6.33	5.00
Kim*1010	-4.92	-18.73	19.53	9.78	-29.58	-33.04	-1.78	-3.49
Kim*542	-16.70	-23.67	23.93	9.78	-27.53	-31.25	-4.82	-8.14
1010*542	4.12	-3.57	13.51	18.31	-5.71	-5.94	0.61	-1.20

اثر ترکیب‌پذیری عمومی والدین و خصوصی دورگه‌ها برای صفت تعداد میوه در بوته گوجه‌فرنگی معنی‌دار شد (جدول ۲)، که نشانگر نقش هر دو عمل افزایشی و غیر افرایشی ژن‌ها در کنترل توارث این صفت می‌باشد. بررسی پارامترهای ژنتیکی کنترل کننده تعداد میوه در بوته (جدول ۴) نشان داد که مقدار واریانس‌های GCA و SCA و نیز مقدار واریانس‌های افزایشی و غالبیت برای تعداد میوه در بوته معنی‌دار بود که بیانگر نقش معنی‌دار ژن‌های با هر دو اثر افزایشی و غیرافزایشی در کنترل این صفت در جمعیت بود. همچنین مقدار وراثت‌پذیری عمومی برای تعداد میوه در بوته بالا بوده که حکایت از نقش قابل توجه عوامل ژنتیکی و نقش کم عوامل محیطی در وراثت این صفت داشت (جدول ۴). برآورد وراثت‌پذیری خصوصی برای این صفت نشان داد که اگرچه هر دو نوع عمل افزایشی و غالبیت ژن‌ها در کنترل تنوع این صفت نقش داشتند، اما میزان اثر افزایشی ژن‌ها بیشتر از اثر غالبیت بود. همچنین، برآورد نسبت بیکر و نسبت هانگ و هالند که به‌ترتیب برابر با ۰/۸۱ و ۰/۶۰ به‌دست آمد (جدول ۴)، نیز تاییدی بر نقش بیشتر اثر افزایشی ژن‌ها در کنترل توارث تعداد میوه در بوته در این آزمایش بود.

برآورد اثرات ترکیب پذیری عمومی (GCA) و خصوصی (SCA) هر یک از والدین و دورگه‌های حاصل از تلاقی آنها (جدول‌های ۵ و ۶) نشان داد که لاین‌های والدینی گوجه فرنگی تحت مطالعه، دارای ترکیب‌پذیری عمومی متفاوتی برای صفت تعداد میوه در بوته بودند. بر اساس نتایج ترکیب‌پذیری عمومی، لاین‌های ۱۵۱/۶و ۵۴۲ به‌طور متوسط و به‌ترتیب با حدود ۰/۵۸۳- و ۰/۳۷۵ عدد میوه از نظر آماری معنی‌دار نبودند، درحالی‌که سایر لاین‌ها ترکیب‌پذیری عمومی معنی‌داری داشتند. در این میان، دو لاین ۲۰۸ و ۴۶۸ به‌ترتیب با قابلیت ترکیب‌پذیری عمومی معنی‌دار ۳/۲۵- و ۲/۵۰- عدد، به‌طور متوسط تعداد میوه در بوته را در تلاقی با همه لاین‌های دیگر به‌ترتیب در حدود ۳/۲۵ و ۲/۵۰ عدد کاهش دادند، در حالی‌که دو لاین Kim و۱۰۱۰ دارای ترکیب‌پذیری عمومی مثبت و معنی‌دار برای تعداد میوه در بوته بودند و به‌ترتیب تعداد میوه در بوته را در تلاقی با تمامی لاین‌های دیگر در حدود ۳/۷۵ و ۲/۲۱ عدد افزایش دادند. به این ترتیب، دو لاین اخیر توانایی افزایش تعداد میوه در بوته را در تلاقی با لاین‌های دیگر داشتند.

برآورد میزان ترکیب‌پذیری خصوصی (SCA) ۱۵ دورگه تولید شده در این آزمایش (جدول ۶) نشان داد که مقدار آن برای صفت تعداد میوه در بوته با دامنه تغییرات ۱۳/۱۲۵ عدد میوه ، از حداقل ۷/۷۷۴- تا حداکثر ۵/۳۵۱+ عدد میوه در بوته متغیر بود که به‌ترتیب به دورگه‌های Kim × ۴۶۸ و ۵۴۲ × Kim تعلق داشت. از نظر صفت تعداد میوه، لاین Kim که دارای بالاترین مقدار ترکیب‌پذیری عمومی مثبت و معنی‌دار در بین شش لاین مورد مطالعه در این آزمایش بود، بعد از لاین ۵۴۲ ترکیب‌پذیری خصوصی معنی‌داری با لاین ۱۰۱۰ داشت و توانست دورگه مطلوبی تولید کند (جدول ۶).

به‌منظور انتخاب دورگه‌های برتر و ارزشمند تولید شده در این آزمایش، مقدار هتروزیس مشاهده شده در هر یک از دورگه‌ها هم بر اساس متوسط والدین و هم بر اساس والد برتر هر تلاقی محاسبه و در جدول ۷ ارائه شد. نتایج این برآورد برای صفت تعداد میوه در بوته حاکی از وجود دامنه بسیار متفاوت برای هر دو نوع هتروزیس بود. دامنه تغییرات هتروزیس متوسط والدین از حدود ۳۰/۷۲- درصد در دورگه Kim ×۴۶۸ تا ۲۳/۹۳+ درصد در دورگه ۵۴۲ × Kim و برای هتروزیس والد برتر از ۴۲/۳۹- درصد در دورگه Kim ×۴۶۸ تا ۱۸/۳۱+ درصد در دورگه ۵۴۲ ×۱۰۱۰ متغیر بود. در مجموع اکثر تلاقی‌ها دارای هتروزیس مثبت برای صفت تعداد میوه در بوته بودند، به‌طوری که از نظر هتروزیس متوسط والدین در حدود ۱۳ درصد از دورگه‌ها و از نظر هتروزیس والد برتر در حدود ۷ درصد از دورگه‌ها دارای هتروزیس مثبت و معنی‌دار برای تعداد میوه در بوته بودند و در مابقی دورگه‌ها هتروزیس مثبت و غیرمعنی‌دار و یا منفی مشاهده شد. ارزشمندترین دورگه تولید شده در این آزمایش، دورگه ۵۴۲ ×۱۰۱۰ بود که نزدیک به ۱۸ درصد هتروزیس نسبت به والد برتر خود برای تعداد میوه در بوته داشت.

وزن میوه

با توجه به وجود اختلاف معنی‌دار بین نژادگان‌ها از نظر وزن میوه، میانگین نژادگان‌ها محاسبه و سپس مقایسه بین آنها با روش LSD انجام و نتایج در جدول ۳ ارائه شد. نتایج نشان داد که از بین نژادگان‌های مورد بررسی، رقم Kim با ۷۴/۷ گرم بیشترین مقدار و لاین ۴۶۸ با ۵۲/۳ گرم کمترین مقدار وزن میوه گوجه فرنگی را در آزمایش انجام شده داشتند. در بین دورگه‌های تولید شده نیز دورگه ۱۰۱۰× ۱۵۱/۶ با وزن میوه ۷۴/۳۳ گرم بالاترین وزن میوه را داشت و بهترین دورگه این آزمایش بود. در مقابل، دورگه ۵۴۲ × ۴۶۸ با محصول فقط ۴۲/۶۷ گرم کمترین وزن تک میوه را تولید کرد (جدول ۳).

آزمون ترکیب‌پذیری عمومی والدین و خصوصی دورگه‌ها برای وزن میوه گوجه‌فرنگی معنی‌دار شد (جدول ۲)، به این معنی که هر دو عمل افزایشی و غیر افرایشی ژن‌ها در کنترل توارث این صفت نقش دارند. این نتیجه نیز با مدل افزایشی- غالبیت ارائه شده توسط Chishti و همکاران (Chishti *et al*., 2008) و Liu و همکاران (Liu *et al*., 2019) مطابقت داشت، اما با نتایج Pandiarana و همکاران (Pandiarana *et al*., 2015) که صفت مذکور را منحصراً تحت کنترل اثر افزایشی ژن‌ها نسبت دادند، مطابقت نداشت.

بررسی پارامترهای ژنتیکی کنترل کننده وزن میوه (جدول ۴) نشان داد که مقدار واریانس‌های GCA و SCA و نیز مقدار واریانس‌های افزایشی و غالبیت برای وزن میوه معنی‌دار شد که بیانگر نقش معنی‌دار ژن‌های با هر دو اثر افزایشی و غیرافزایشی (غالبیت) در کنترل این صفت در این جمعیت بود. همچنین مقدار وراثت‌پذیری عمومی برای وزن میوه بالا و حکایت از نقش قابل توجه عوامل ژنتیکی و در مقابل نقش ناچیز عوامل محیطی در کنترل توارث این صفت در جمعیت داشت(جدول ۴). برآورد وراثت‌پذیری خصوصی برای این صفت نیز نشان داد که اگرچه هر دو نوع عمل افزایشی و غالبیت ژن‌ها در کنترل تنوع این صفت نقش داشتند، اما میزان اثر افزایشی ژن‌ها بیشتر از اثر غالبیت بود. همچنین، برآورد نسبت بیکر و نسبت هانگ و هالند که به‌ترتیب برابر با ۰/۸۷ و ۰/۵۵ به‌دست آمد (جدول ۴)، و نتیجه‌گیری مبنی بر نقش بیشتر اثر افزایشی ژن‌ها در کنترل توارث وزن میوه در زمینه ژنتیکی مواد گیاهی این آزمایش را مورد تایید قرار داد.

به‌منظور به‌دست آوردن اطلاعات ژنتیکی بیشتر اثرات ترکیب پذیری عمومی (GCA) و خصوصی (SCA) هر یک از والدین و دورگه‌های حاصل از تلاقی آنها محاسبه و به‌ترتیب در جدول‌های ۵ و ۶ ارائه شد. نتایج نشان داد که به‌جز لاین ۴۶۸ که قابلیت ترکیب‌پذیری عمومی آن با پنج لاین دیگر به‌طور متوسط در حدود ۵/۶۰- گرم و از نظر آماری معنی‌دار بود، سایر لاین‌ها ترکیب‌پذیری عمومی معنی‌داری نداشتند. چهار لاین ۲۰۸، ۱۵۱/۶، Kim و ۱۰۱۰ دارای ترکیب‌پذیری عمومی مثبت ولی غیرمعنی‌دار برای وزن میوه بودند و به‌ترتیب وزن میوه را در تلاقی با تمامی لاین‌های دیگر در حدود ۳/۶۱، ۱/۳۲، ۱/۶۵ و ۱/۹۰ گرم به‌ازای هر میوه افزایش دادند. لاین ۵۴۲ نیز دارای قابلیت ترکیب‌پذیری عمومی منفی غیرمعنی‌دار با مقدار ۰/۶۳- گرم بود و به‌طور متوسط وزن میوه را در تلاقی با همه لاین‌های دیگر به‌ترتیب در حدود ۰/۶۳ گرم به‌ازای هر میوه کاهش داد.

برآورد میزان ترکیب‌پذیری خصوصی (SCA) ۱۵ دورگه تولید شده در این آزمایش (جدول ۶) نشان داد که مقدار آن برای صفت وزن میوه با دامنه تغییرات ۲۴/۶۷ گرم، از حداقل ۱۳/۳۸- تا حداکثر ۱۱/۲۹+ گرم به‌ازای هر میوه متغیر بود که به‌ترتیب به دورگه‌های ۱۰۱۰ × Kim و ۱۰۱۰ × ۱۵۱/۶ تعلق داشت.

به‌منظور انتخاب دورگه‌های برتر و ارزشمند تولید شده در این آزمایش، مقدار هتروزیس مشاهده شده در هر یک از دورگه‌ها هم بر اساس متوسط والدین و هم بر اساس والد برتر هر تلاقی محاسبه و در جدول ۷ ارائه شد. نتایج این برآورد برای صفت وزن میوه حاکی از وجود دامنه بسیار متفاوت برای هر دو نوع هتروزیس از مقادیر منفی تا مثبت بود. دامنه تغییرات هتروزیس متوسط والدین از حدود ۲۹/۵۸- درصد در دورگه ۱۰۱۰ × Kim تا ۱۸/۹۳+ درصد در دورگه ۱۰۱۰× ۱۵۱/۶ و برای هتروزیس والد برتر از حدود ۳۶/۳۲- درصد در دورگه۵۴۲ × ۴۶۸ تا حدود ۱۰/۴۰+ درصد در دورگه ۱۰۱۰×۱۵۱/۶ متغیر بود. قابل ذکر است که اکثر تلاقی‌ها دارای هتروزیس منفی برای وزن میوه بودند، به‌طوری که از نظر هتروزیس متوسط والدین در حدود ۲۰ درصد از دورگه‌ها و از نظر هتروزیس والد برتر در حدود ۷ درصد از دورگه‌ها دارای هتروزیس مثبت و معنی‌دار برای وزن میوه بودند و در مابقی دورگه‌ها هتروزیس غیرمعنی‌دار یا منفی مشاهده شد. ارزشمندترین دورگه تولید شده در این آزمایش نیز دورگه ۱۰۱۰×۱۵۱/۶ بود که نزدیک به ۱۰ درصد هتروزیس نسبت به والد برتر خود برای وزن میوه داشت.

درصد مواد جامد محلول

با توجه به وجود اختلاف معنی‌دار بین نژادگان‌ها از نظر وزن میوه، مقایسه میانگین نژادگان‌ها انجام شد (جدول ۳). نتایج نشان داد که رقم ۴۶۸ با ۵/۸۷ درصد بیشترین مقدار مواد محلول و لاین ۱۵۱/۶ با ۵/۲ درصد کمترین مقدار درصد مواد محلول را داشتند. در بین دورگه‌های تولید شده نیز دورگه ۲۰۸ × ۴۶۸ با مقدار ۵/۹۳۳ درصد بالاترین درصد مواد محلول را داشت و بهترین دورگه این آزمایش بود. در مقابل، دورگه Kim ×۴۶۸ با محصول فقط ۵/۰۶۷ درصد کمترین درصد مواد محلول را تولید کرد (جدول ۳). اثر ترکیب‌پذیری عمومی و خصوصی برای درصد مواد محلول گوجه‌فرنگی معنی‌دار شد (جدول ۲)، به این معنی که هر دو عمل افزایشی و غیر افرایشی ژن‌ها در کنترل توارث این صفت نقش دارند.

پارامترهای ژنتیکی کنترل کننده درصد مواد محلول میوه گوجه‌فرنگی در جدول ۴ ارایه شده است. مقدار واریانس GCA معنی‌دار نشد که نشانگر عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین نژادگان‌های مورد استفاده در آزمایش از نظر صفت درصد مواد محلول بود. واریانس SCA و نیز مقدار واریانس‌های افزایشی و غالبیت برای صفت درصد مواد محلول میوه گوجه‌فرنگی معنی‌دار شد که بیانگر نقش معنی‌دار ژن‌های با هر دو اثر افزایشی و غیرافزایشی (غالبیت) در کنترل این صفت در این جمعیت بود. همچنین مقدار وراثت‌پذیری عمومی برای درصد مواد محلول محصول بالا و حکایت از نقش قابل توجه عوامل ژنتیکی و در مقابل نقش ناچیز عوامل محیطی در کنترل توارث این صفت در این جمعیت داشت (جدول ۴). ذکر این نکته حایز اهمیت می‌باشد که نژادگان‌های مورد استفاده در آزمایش از نظر صفت درصد مواد محلول اختلاف معنی‌داری با هم نداشتند ولی در ترکیب با یکدیگر نتاجی تولید کردند که با هم اختلاف معنی‌دار داشتند. برآورد وراثت‌پذیری خصوصی برای این صفت نیز نشان داد که اگرچه هر دو نوع عمل افزایشی و غالبیت ژن‌ها در کنترل تنوع این صفت نقش داشتند، اما میزان اثر افزایشی بیشتر از غالبیت بود. همچنین، برآورد نسبت بیکر و نسبت هانگ و هالند که هر دو برابر با ۰/۷۰ به‌دست آمدند (جدول ۴)، نیز این نتیجه‌گیری مبنی بر نقش بیشتر اثر افزایشی ژن‌ها در کنترل توارث درصد مواد جامد محلول در زمینه ژنتیکی مواد گیاهی این آزمایش را مورد تایید قرار داد.

بررسی اثر ترکیب‌پذیری عمومی (GCA) والدین و خصوصی (SCA) دورگه‌های حاصل از تلاقی آنها (جدول‌های ۵ و ۶) نشان داد که لاین‌های گوجه فرنگی مطالعه شده در این آزمایش دارای ترکیب‌پذیری عمومی معنی‌داری از نظر درصد مواد محلول نبودند، اما تعدادی از دورگه‌های تولید شده از تلاقی والدین مورد مطالعه، ترکیب‌پذیری خصوصی معنی‌داری داشتند، به‌طوری که میزان ترکیب‌پذیری خصوصی (SCA) دورگه‌های تولید شده در این آزمایش برای درصد مواد جامد محلول در میوه با دامنه تغییرات ۰/۸۶ درصد، از حداقل ۰/۴۶۸- تا حداکثر ۰/۳۹۰+ درصد متغیر بود که به‌ترتیب به دورگه‌های Kim × ۴۶۸ و Kim × ۱۵۱/۶ تعلق داشت (جدول ۶).

بررسی مقدار هتروزیس مشاهده شده در دورگه‌ها برای صفت وزن میوه حاکی از وجود دامنه بسیار متفاوت برای هر دو نوع هتروزیس از مقادیر منفی تا مثبت بود. دامنه تغییرات هتروزیس متوسط والدین از حدود ۱۲/۶- درصد در دورگه Kim × ۴۶۸ تا ۱۰/۷+ درصد در دورگه ۱۵۱/۶ × ۲۰۸ و برای هتروزیس والد برتر از حدود ۱۳/۶- درصد در دورگه Kim × ۴۶۸ تا حدود ۸/۶+ درصد در دورگه ۱۵۱/۶ × ۲۰۸ متغیر بود. در مجموع اکثر تلاقی‌ها دارای هتروزیس منفی برای درصد مواد جامد محلول در میوه بودند، به‌طوری که از نظر هتروزیس متوسط والدین در حدود ۳۳ درصد از دورگه‌ها و از نظر هتروزیس والد برتر در

حدود ۲۰ درصد از دورگه‌ها دارای هتروزیس مثبت و معنی‌دار برای صفت درصد مواد جامد محلول بودند و در مابقی دورگه‌ها هتروزیس غیر معنی‌دار و یا منفی مشاهده شد. ارزشمندترین دورگه تولید شده در این آزمایش برای صفت درصد مواد جامد محلول نیز دورگه ۱۵۱/۶ × ۲۰۸ بود که نزدیک به ۸/۶+ درصد هتروزیس نسبت به والد برتر خود داشت.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، ترکیب‌پذیری عمومی و خصوصی و هتروزیس صفات میوه در شش لاین گوجه فرنگی با استفاده از روش تلاقی‌های دای‌آلل ارزیابی شد. نتایج تجزیه دای‌آلل، نقش معنی‌دار هر دو اثر افزایشی و غیر افزایشی ژن‌ها را در توارث تمامی صفات مورد مطالعه نشان داد. مقایسه لاین‌ها و دورگ‌های حاصل از تلاقی آن‌ها نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین ترکیب‌پذیری عمومی والدین و نیز ترکیب‌پذیری خصوصی دورگ‌ها وجود دارد. تعدادی از دورگ‌ها، هتروزیس مثبت و معنی‌داری نسبت به والد برتر خود داشتند که در صورت تکرار آزمایش و تایید نتایج، می‌توان از آن‌ها برای تولید دورگ‌های موفق و ارزشمند استفاده کرد.

منابع References

Abedi, M., & Ahmadvand, R. (2022). *Technical Guideline: Standard Assessment Method of Traits in Tomato Research*. Publication of Seed and Plant Improvement Institute. (In Persian).

Allahgholipour, M., Farshadfar, E., & Rabiei, B. (2015). Combining ability and heritability of selected rice varieties for grain yield, its components and grain quality characters. *Genetica*, *47*(2), 559-570. https://doi.org/10.2298/GENSR1502559A.

Baker, R.J. (1978). Issues in diallel analysis. *Crop Science*, *18*(4), 533-536. https://doi.org/10.2135/cropsci1978.0011183X001800040001x.

Cheng, Y., Gu, M., Cong, Y., Zou, C. S., Zhang, X. K., and Wang, H. Z. (2010). Combining ability and genetic effects of germination traits of *Brassica napus* L. under waterlogging stress condition. *Agricultural Sciences in China*, *9*(7), 951-957. https://doi.org/10.1016/s1671-2927(09)60176-0.

Chishti, S. A. S., Khan, A. A., Sadia, B., & Khan, I. A. (2008). Analysis of combining ability for yield, yield components and quality characters in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Journal of Agricultural Research*, *46*(4), 325-332.

Farshadfar, E. (1997). *Plant Breeding Methodology*. University of Razi Press. 617 p. (In Persian)

Farzaneh, A., Nemati, H., Arouiee, H., & Mirshamsi Kakhki, A. (2013). Genetic analysis of traits associated with yield and earliness in nine tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) lines using diallel crossing method. *Seed and Plant Journal*, *29*(4), 693-710. (In Persian).

Griffing, B. (1956). Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Australian Journal of Biological Sciences*, *9*(4), 463-493.

Hung, H. Y., & Holland, J. B. (2012). Diallel analysis of resistance to fusarium ear rot and fumonisin contamination in maize. *Crop Science*, *52*, 2173-2181. https://doi.org/10.2135/cropsci2012.03.0154.

Izzo, A. M., Khojah, H., & Murie, A. M. (2022). Combining ability and heterosis for yield and some fruit traits of tomato. *Dysona Applied Science (DAS)*, *3*(1), 15-23. https://doi.org/10.30493/DAS.2021.295501.

Kumar, V., & Singh, S. K. (2022). Estimation of general and specific combining abilities of parents and crosses in tomato (*Lycopersicon esculantum* Mill.). *Indian Journal of Agricultural Research*, *56*(4), 442-448. https://doi.org/10.18805/IJARe.A-5897.

Lee, E.A., Ash, M. J., & Good, B. (2007). Re-examining the relationship between degree of relatedness, genetic effects, and heterosis in maize. *Crop Science*, *47*(2), 629-635. https://doi.org/10.2135/cropsci2006.04.0275.

Lippman, Z. B., & Zamir, D. (2007). Heterosis: Revisiting the magic. *Trends in Genetics*, *23*, 60-66. https://doi.org/10.1016/j.tig.2006.12.006.

Liu, Z., Jiang, J., Ren, A., Xu, X., Zhang, H., Zhao, T., Jiang, X., Sun, Y., Li, J., & Yang, H. (2021). Heterosis and combining ability analysis of fruit yield, early maturity, and quality in tomato. *Agronomy*, *11*(4), 807. https://doi.org/10.3390/agronomy11040807.

Liu, Z. B., Jiang, J. B., Yang, H. H., Jiang, X. M., & Li, J. F. (2019). Research advance of plant heterosis. *Molecular Plant Breeding*, *17*, 4127-4134.

Lone, S., Hussain, K., Malik, A., Masoodi, Kh. Z., Dar, Z., Nazir, N., Zahed, Z., & Ali, G. (2022). Combining ability studies in cherry tomato for yield and yield attributing traits in open and protected conditions. *The Pharma Innovation Journal*, *11*(3), 782-793.

Machida, L., Derera, J., Tongoona, P., & MacRobert, J. (2010). Combining ability and reciprocal cross effects of elite quality protein maize inbred lines in subtropical environments. *Crop Science*, *50*, 1708-1717. https://doi.org/10.2135/cropsci2009.09.0538.

Makumbi, D., Assanga, S., Diallo, A., Magorokosho, C., Asea, G., Worku, M., & Bänziger, M. (2018). Genetic analysis of tropical midaltitude-adapted maize populations under stress and nonstress conditions. *Crop Science*, *58*, 1492-1507. https://doi.org/10.2135/cropsci2017.09.0531.

Moll, R. H., Lonnquist, J. H., Fortuno, J. V., & Johnson, E. C. (1965). The relationship of heterosis and genetic divergence in maize. *Genetics*, *52*, 139-144. https://doi.org/10.1093/genetics/52.1.139.

Pandiarana, N., Chattopadhyay, A., Seth, T., Shende, V. D., Dutta, S., & Hazra, P. (2015). Heterobeltiosis, potence ratio and genetic control of processing quality and disease severity traits in tomato. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, *43*(4), 282-293. https://doi.org/10.1080/01140671.2015.1083039.

Pattnaik, P., Singh, A. K., Kumar, B., Mishra, D., Singh, B. K., Barman, K., & Pal, A. K. (2020). Analysis of heterotic pattern of F_1 s in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) for the improvement of yield and quality traits. *International Journal of Chemical Studies*, *8*, 3160-3165. https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i4am.10136.

Reddy, G. E., Nandan, R., Reddy, M. P., Reddy, B. R., & Bhandari, H. R. (2017). Studies on combining ability analysis in tomato. *Green Farming*, *8*(1), 56-59.

Rick, C. M. (1969). Origin of cultivated tomato: Current status of the problem. Proceedings of the XI International Botanical Congress. Aug. 24 – Sep. 2, 1969, University of Washington, Seattle, U.S.A. pp. 180.

Shankara, N., Joep, V. D. J., Marja, D. G., Martin, H., & Barbara, V. D. (2005). *Cultivation of Tomato: Production Processing and Marketing*. Agromisa Foundation, Agrodok 17, Agromisa/CTA, Wageningen, The Netherlands. pp: 63-64. https://hdl.handle.net/10568/52975.

Singh, B., Kaul, S., Kumar, D., & Kumar, V. (2010). Combining ability for yield and its contributing characters in tomato. *Indian Journal of Horticulture*, *67*(1): 50-55.

Singh, A. K., & Asati, B. S. (2011). Combining ability and heterosis studies in tomato under bacteria wilt condition. *Bangladesh Journal of Agricultural Research*, *36*, 313-318. https://doi.org/10.3329/bjar.v36i2.9259.

Singh, P., Cheema, D. S., Dhaliwal, M. S., & Garg, N. (2014). Heterosis and combining ability for earliness, plant growth, yield and fruit attributes in hot pepper (*Capsicum annuum* L.) involving genetic and cytoplasmic-genetic male sterile lines. *Scientia Horticulture*, *168*, 175-188. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.12.031.

Soresa, D. N. (2022). Estimating combining ability and response of tomato (*Solanum Lycopersicum* L.) genotypes to late blight (*Phytophthora Infestans*) disease. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology Research*, *4*(3), 328-339.

Verma, O. P., & Srivastava, H. K. (2004). Genetic component and combining ability analyses in relation to heterosis for yield and associated traits using three diverse rice-growing ecosystems. *Field Crops Research*, *88*(2-3), 91-102. https://doi.org/10.1016/S0378-4290(03)00080-7.

Xiang, L. Y., Xu, K., Su, J., Wu, C., Yuan, X., Zheng, X. F., Diao, Y., Hu, Z. L., & Li, L. Z. (2019). Genetic dissection of combining ability and heterosis of rice agronomic traits based on pathway analysis. *Acta Agronomica Sinica*, *45*(9), 1319-1326. https://doi.org/10.3724/sp.j.1006.2019.82062.

Zhang, Y., & Kang, M. S. (1997). DIALLEL-SAS: A SAS program for Griffing's diallel analyses. *Agronomy Journal*, *89*(2), 176-182. https://doi.org/10.2134/agronj1997.00021962008900020005x.

Iranian Journal of Horticultural Science and Technology 24 (4): 525-540 (2023)
Research article

Studying Combining Ability and Heterosis of Important Traits in Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) Using Diallel Crosses

Farzad Khosh-Akhlagh[1] and Babak Rabiei[2]

Department of Plant Production and Genetic Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan
* Corresponding Author, Email: (rabiei@guilan.ac.ir)

To study the general and specific combining ability and heterosis of six tomato lines, a 6×6 diallel design was used. The parents of the crosses were lines 486 (P1), 208 (P2), 151.6 (P3), Kim (P4), 1010 (P5), and 542 (P6) with different characteristics for yield and other studied traits. All lines were obtained from the Vegetables and Irrigated Pulse Crops Research Department, Seed and Plant Improvement Institute, Karaj, Iran. The parents together with 15 F_1 hybrids resulting from their half-diallel crosses (21 genotypes) were planted in a randomized complete block design with three replications in the research farm of Qazvin Agricultural Research Center, in 2019, and fruit yield, number of fruits per plant, fruit weight and total soluble solids (TSS) were measured. The results of the analysis of variance based on second Griffing's method with the assumption of fixed parents showed that the difference among all genotypes and the difference in general combining ability (GCA) of parents and the specific combining ability (SCA) of hybrids were significant for all studied traits, indicating the role of both additive and non-additive gene effects in the inheritance of traits. Baker's ratio as well as Hung and Holland's ratio for all studied traits were obtained from 0.5 to 1.0, which indicated the role of both additive and non-additive gene effects with the higher contribution of additive effects in controlling all traits. A comparison of parents showed that Kim for fruit yield and number of fruits per plant, line 1010 for fruit weight, and line 468 for TSS had the highest positive and significant GCA. Among the hybrids, hybrid 1010×151.6 for fruit yield and fruit weight, Kim×542 for number of fruits per plant, and Kim×151.6 for TSS had the highest positive and significant SCA. In total, the results of this experiment showed that hybrids 151.6×208 and 151.6×1010 for fruit weight, hybrid 542×1010 for the number of fruits per plant and hybrid 151.6×208 for TSS had the highest positive and significantly better parent heterosis (heterobeltiosis), and were the most valuable hybrids in this experiment, but for fruit weight, only hybrid 468×151.6 had positive and significant mid-parent (standard) heterosis.

Keywords: Additive and non-additive gene effects, Fruit weight, Heritability, Total soluble solids.