



مروری بر عارضه سفیدشدگی آریل در انار (*Punica granatum* L.): سبب‌شناسی، سازکارهای موثر و راهکارهای مدیریت تلفیقی

A Review of Aril Paleness Disorder in Pomegranate (*Punica granatum* L.): Etiology, Effective Mechanisms, and Integrated Management Approaches

جواد عرفانی مقدم^۱ , عبدالکریم زارعی^۲

۱- دانشیار، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.

۲- دانشیار، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۴

چکیده

عرفانی مقدم، ج. و زارعی، ع. ۱۴۰۳. مروری بر عارضه سفیدشدگی آریل در انار (*Punica granatum* L.): سبب‌شناسی، سازکارهای موثر و راهکارهای مدیریت تلفیقی. نهال و بذر ۴۰: ۵۷۷-۵۹۸

عارضه سفیدشدگی آریل (Aril paleness disorder) در انار که به نام‌های کم‌رنگی یا رنگ‌پریدگی آریل نیز شناخته می‌شود، یک عارضه فیزیولوژیک نوظهور است که شدیداً بر کیفیت درونی، ارزش بازار و پتانسیل آنتی‌اکسیدانی میوه انار تأثیر منفی می‌گذارد. این عارضه که با کاهش قابل توجه یا توسعه نامنظم رنگدانه‌های قرمز در آریل‌ها مشخص می‌شود، حاصل برهمکنش پیچیده عوامل ژنتیکی، فیزیولوژیکی، محیطی و تغذیه‌ای است. در سال‌های اخیر، پیرنگی آریل‌ها به یک مسئله بحرانی در مناطق اصلی تولید انار، به ویژه در ایران، تبدیل شده است. این مقاله مروری، یافته‌های اخیر در مورد سبب‌شناسی، سازکارهای موثر و مدیریت تلفیقی را با تمرکز ویژه بر بینش‌های حاصل از پژوهش‌های مولکولی و بیوشیمیایی ترکیب می‌کند. عوامل مهم و موثر در بروز عارضه سفیدشدگی آریل انار شامل: حساسیت رقم، کاهش بیان ژن‌های بیوستنز آنتوسیانین بویژه ژن *UFGT*، کمبود عناصر معدنی حیاتی (کلسیم، آهن، روی) و تنش‌های محیطی مانند دمای بالا، شوری خاک و آبیاری با آب شور است. برخلاف فرضیه‌های قبلی، شواهد جدید نشان می‌دهد که تنش اکسیداتیو و تخریب آنتوسیانین ممکن است در درجه دوم نسبت به اختلال در بیوستنز آن قرار گیرند. مدیریت مؤثر این عارضه نیازمند یک رویکرد مدیریت تلفیقی است که ترکیبی از انتخاب ارقام متحمل، تغذیه بهینه برگی (به‌ویژه کلسیم، پتاسیم، آهن و روی)، محلول‌پاشی با سیلیسیم و کائولین، مدیریت تاج برای کاهش تنش گرمایی با استفاده از روش‌های هرس و تربیت مناسب، سامانه‌های سایه‌دهی و آبیاری دقیق را در بر می‌گیرد. این مقاله مروری، دانش فعلی را از جنبه‌های مختلف بررسی کرده، شکاف‌های موجود برای شناسایی این عارضه را برجسته و جهت‌گیری‌های پژوهشی آینده، از جمله کاربرد فناوری‌های آمیکس و ویرایش ژنوم را برای توسعه راهکارهای پایدار برای رفع این عارضه پیشنهاد کرده است.

واژه‌های کلیدی: انار، آنتوسیانین، تغذیه معدنی، ویرایش ژنوم، ژن *UFGT*، تنش‌های محیطی.

تلفن: ۰۸۴۳۲۲۲۷۰۱۵

* نگارنده مسئول: j.erfani@ilam.ac.ir



2025© Seed and Plant. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

مقدمه

انار (*Punica granatum* L.)، یکی از درختان میوه‌ای است که بیش از ۷۰۰۰ هزار سال در ایران مورد کشت می‌شود (Sarkhosh et al., 2021). ایران به عنوان یک مرکز جهانی تنوع زیستی انار، غنی‌ترین ژرم پلاسما انواع کشت‌شده و وحشی این میوه را دارا است (Zarei and Sahraroo, 2018). محبوبیت جهانی انار در سال‌های اخیر به دلیل افزایش آگاهی مصرف‌کنندگان از خواص استثنایی ارتقاء دهنده سلامتی آن که عمدتاً به محتوای غنی ترکیبات پلی‌فنولی، به ویژه آنتوسیانین‌ها و تانن‌های قابل هیدرولیز آن نسبت داده می‌شود، افزایش یافته است (Kandylis and Kokkinomagoulos, 2020). از این رو امروزه کشت و پرورش انار در دنیا در حال گسترش بوده و در مناطق نیمه گرمسیری تا معتدله گرم در هر پنج قاره دنیا مورد کشت و کار قرار می‌گیرد (Sarkhosh et al., 2021). آریل‌های انار منبع غنی از قندها، ویتامین‌ها، پلی‌فنول‌ها و مواد معدنی هستند (Melgarejo-Sánchez et al., 2021). پوست و غشاء میوه سرشار از الایکتانین‌ها می‌باشند که دارای طیف وسیعی از فعالیت‌های سلامت بخش هستند (Seeram et al., 2006)، و دانه‌ها مقدار قابل توجهی روغن دارند (Melgarejo-Sánchez et al., 2021). این ترکیبات زیست‌فعال، به میوه انار فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی، ضد التهابی و ضد میکروبی

قدرتمندی می‌بخشند و جایگاه آن را به عنوان یک ابرمیوه تثبیت کرده‌اند (Stiletto et al., 2020). از نظر تجاری، ترجیح مصرف‌کننده به شدت با ویژگی‌های کیفیت خاص میوه مرتبط است. مهمترین ویژگی‌ها، شامل رنگ قرمز شدید پوست و دانه‌ها، طعم ملایم شیرین به ترش و دانه‌های نرم تا نیمه نرم است (Zarei et al., 2016; Zarei, 2017; Chater et al., 2018).

رنگدانه‌های قرمز و درخشان دانه‌ها، که شاخص کیفیت بصری مهمی است، نتیجه تجمع آنتوسیانین‌ها است که زیر رده‌ای از فلاونوئیدها می‌باشد. آنتوسیانین‌ها، دسته‌ای از متابولیت‌های ثانویه در گیاهان، نه تنها مسئول رنگ‌های قرمز، بنفش و آبی در اندام‌های مختلف هستند، بلکه به عنوان آنتی‌اکسیدان‌های قوی، نقش محافظتی در برابر تنش‌های محیطی ایفا می‌کنند (Liang and He, 2018). پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که علاوه بر نقش آنتوسیانین‌ها در رنگ‌پذیری، ترکیب و نوع آنتوسیانین‌ها (مانند دلفینیدین و سیانیدین) نیز در شدت رنگ قرمز آریل‌ها تعیین‌کننده هستند و تغییر نسبت این ترکیبات می‌تواند به بروز سفیدشدگی آریل‌ها منجر شود (Khademi et al., 2025). سنتز این ترکیبات تحت تأثیر عوامل ژنتیکی و محیطی متعددی از جمله شدت نور، دما و بویژه کمبودهای تغذیه‌ای قرار می‌گیرد (Jezek et al., 2023).

با این حال، گسترش کشت انار به مناطق جدید، همراه با چالش‌های ناشی از اقلیم در حال تغییر، منجر به ظهور عارضه‌های فیزیولوژیک

جدیدی شده است که کیفیت میوه آنرا را تهدید می‌کنند. در میان این عارضه‌ها، بیرنگی دانه‌های انار (که به آن سفیدشدگی دانه‌ها یا رنگ پریدگی آریل نیز گفته می‌شود) به عنوان مشکلی فراگیر و با خسارت اقتصادی بالا، عمدتاً در کشورهای تولیدکننده اصلی انار مانند ایران ظهور کرده است (Asadi et al., 2019; Tabar et al., 2009; Faraji and Karami, 2024; Kavand et al., 2018).

عارضه سفیدشدگی آریل انار نه تنها باعث زیان‌های اقتصادی مستقیم می‌شود، بلکه اعتبار میوه انار را در بازارهای بین‌المللی که استانداردهای کیفیت سختگیرانه و انعطاف‌ناپذیری دارند، به خطر می‌اندازد. اگرچه علت دقیق این عارضه هنوز به طور کامل شناخته نشده است، اما ترکیبی از عوامل ژنتیکی، فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی، تغذیه‌ای و محیطی در بروز آن دخیل هستند (Jezek et al., 2023). در این مقاله مروری سعی شده است عوامل مهم و موثر بر بروز این عارضه مورد بحث قرار گیرد و نقشه‌راهی برای تحقیقات آینده و مدیریت این عارضه در تولید این محصول مهم باغی ارائه شود.

عارضه سفیدشدگی آریل‌ها: سبب‌شناسی و تشخیص

بیرنگی دانه‌ها یک عارضه فیزیولوژیکی است که به صورت درونی ظاهر می‌شود و تا زمانی که میوه برش نخورده باشد، غیرقابل تشخیص است. نشانه اولیه و بارز، از دست دادن رنگ قرمز مشخصه دانه‌ها است که در عوض به

صورت رنگ‌پریده، سفید یا کرمی ظاهر می‌شوند (شکل ۱). در برخی موارد، دانه‌های مبتلا، ممکن است ظاهری راه‌راه داشته باشند که ناشی از خطوط سفید نازک تابیده از مرکز دانه است (Shivashankar et al., 2012). این تغییر رنگ اغلب با سایر تغییرات فیزیولوژیک از جمله خشک‌شدگی دانه‌ها، چروکیدگی، ایجاد فضاهای هوایی داخلی و بافت نرم و غیرجذاب همراه است (Tabar et al., 2009; Shivashankar et al., 2012). در موارد شدید، این عارضه می‌تواند بیش از ۵۰ درصد دانه‌های داخل یک میوه را تحت تأثیر قرار دهد و آن را برای مصرف یا فروش تجاری نامناسب کند (Shivashankar et al., 2012).

ماهیت درونی بودن این عارضه، فریبنده‌ترین ویژگی آن است. میوه‌های مبتلا به بیرنگی دانه‌ها، پوست خارجی طبیعی و سالمی دارند که غربالگری چشمی قبل از بسته‌بندی را غیرممکن می‌سازد (Shivashankar et al., 2012). این امر چالشی بزرگ برای صنعت انار ایجاد می‌کند، زیرا مستلزم آزمون‌های تخریبی یا توسعه فناوری‌های تشخیص غیرتخریبی، مانند طیف‌سنجی نزدیک مادون قرمز (NIR) یا تصویربرداری ابرطیفی است که هنوز برای این اختلال خاص در مراحل ابتدایی خود می‌باشند (Ghasemi-Soloklui et al., 2023). پژوهش‌های سایر پژوهشگران نیز نشان داده است که اخیراً تصویربرداری لبرطیفی توانسته است با دقت بالای بیش از ۹۰٪ میوه‌های مبتلا به سفیدشدگی را از میوه‌های سالم تفکیک



شکل ۱- عارضه سفیدشدگی آریل‌ها در انار رقم "ملس ساوه" (عرب رودبار، ایلام)

Fig. 1. Aril paleness disorder in pomegranate cv. 'Malase-Saveh' (Arab Roodbar, Ilam)

ژنتیکی مسئول بیوسنتز آنتوسیانین مرتبط است. انار تنوع ژنتیکی وسیعی در پوست و رنگ دانه، از سفید تا سیاه عمیق دارد که نشان می‌دهد که این صفات تحت کنترل ژنتیکی قوی می‌باشند (Zarei and Sahraroo, 2018). شدت رنگدانه‌های قرمز و حساسیت به بیرنگی، به سطوح بیان ژن‌های ساختاری اصلی در مسیر فنیل پروپانویید گره خورده است. در این زمینه، خادمی و همکاران (Khademi et al., 2025) پژوهشی بر روی سه رقم "ملس ساوه"، «نادری بادرود» با دانه‌های قرمز و «پوست سفید» با دانه‌های طبیعی سفید انجام دادند و گزارش کردند که بیان ژن‌های اصلی بیوسنتز آنتوسیانین شامل:

PAL(Phenylalanine ammonia-lyase),

CHS(Chalcone synthase),

LDOX(Leucoanthocyanidin dioxygenase),

کند که نشان‌دهنده پتانسیل بالای این فناوری در غربالگری تجاری برای میوه‌های دچار این عارضه است (Khademi et al., 2025). این عارضه در چندین رقم تجاری مهم انار در ایران گزارش شده است که ارقام "شیشه‌کاپ فردوس" و "ملس ساوه" به دلیل حساسیت بالا و رقم "نادری بادرود" به عنوان رقم متحمل‌تر شناخته می‌شوند (Khademi et al., 2025; Tabar et al., 2009). ناتوانی در جداسازی میوه‌های مبتلا قبل از بسته‌بندی، منجر به بازگرداندن مکرر از بازارهای صادراتی شده و نیاز فوری به مدیریت مؤثر و روش‌های تشخیص مطمئن را ایجاد کرده است.

عوامل ژنتیکی مؤثر بر سفیدشدگی آریل‌های انار

حساسیت به بیرنگی آریل‌ها در بین تمام ژنوتیپ‌های انار یکسان نیست که این نشان‌دهنده تنوع ژنتیکی در ژرم پلاسِم برای تحمل به این عارضه است. این عارضه اساساً با سازوکارهای

UFGT(UDP-glucose flavonoid 3-O-glucosyltransferase)

در رقم "پوست سفید" به طور معنی داری کمتر بود. نکته مهم این که هنگام مقایسه دانه های قرمز سالم با دانه های مبتلا به بیرنگی، بارزترین تفاوت کاهش بیان چشمگیر ژن *UFGT* در بافت های رنگ پریده بود. در حالی که ژن هایی مانند *LDOX* برای تمایز ارقام قرمز از ارقام سفید طبیعی، کلیدی هستند، به نظر می رسد سرکوب ژن *UFGT* محرک مولکولی اولیه برای بروز عارضه بیرنگی دانه ها در ارقام دارای رنگدانه قرمز است. این یافته با مطالعات روی سایر محصولات باغی مانند انگور و زردآلو ژاپنی همخوانی دارد که در آن بیان ژن *UFGT* تعیین کننده بحرانی رنگ گوشت و پوست است (Kobayashi et al., 2001; Wu et al., 2017). علاوه بر ژن *UFGT*، کاهش بیان ژن های *PAL* و *CHS* نیز در برخی ارقام حساس مشاهده شده است، که نشان می دهد عارضه سفیدشدگی آریل انار ممکن است در مراحل اولیه مسیر بیوسنتزی مربوطه نیز رخ دهد (Khademi et al., 2025).

با توجه به اینکه گل های انار دگرگشن/خودگشن و ساختار ژنتیکی آن بسیار هتروزیگوت است، تنوع فوتوبی قابل توجهی حتی در یک رقم مشخص دیده می شود. این ناهمگونی به این معناست که حساسیت به بیرنگی دانه ها می تواند از میوه ای به میوه دیگر روی همان درخت متفاوت باشد که موضوع را پیچیده تر

کرده و نیاز به درک عمیق تری از مکان های صفات کمی (QTLs) مرتبط با مقاومت به این عارضه را برجسته می سازد (Zarei et al., 2020). به عبارتی با توجه به اینکه گل های انار علاوه بر خودگشنی، قادر به دگرگشنی با استفاده از گرده های دیگر ارقام هم می باشد، و همچنین تایید تاثیر بالای دانه گرده بر بافت های میوه در انار (Gharaghani et al., 2017)، این احتمال وجود دارد که نوع دانه گرده نیز بر میزان حساسیت به این عارضه تاثیر گذار باشد.

عوامل فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و تغذیه ای

اساس فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی بیرنگی دانه ها، بر اختلال در متابولیسم آنتوسیانین و یکپارچگی سلولی متمرکز است. تحلیل های بیوشیمیایی به طور پیوسته نشان می دهند که میوه ها و دانه های مبتلا به بیرنگی، محتوای آنتوسیانین کلی به مراتب کمتری در مقایسه با نمونه های سالم دارند (Khademi et al., 2025; Zarei et al., 2024a; Zarei et al., 2024b). این کاهش مستقیماً با از دست دادن شدت رنگ قرمز (مقدار a^*) همبستگی دارد (شکل ۲). خادمی و همکاران (Khademi et al., 2025) نشان دادند که سایر خصوصیات بیوشیمیایی مهم مرتبط با کیفیت میوه، مانند محتوای فنل کل، ظرفیت آنتی اکسیدانی، سطوح اسید اسکوربیک و غلظت پراکسید هیدروژن، بین دانه های سالم و مبتلا به بیرنگی تفاوت معنی داری ندارند. این یافته نشان می دهد که اختلال عمدتاً توسط یک سازکار تنش اکسیداتیو کلی هدایت نمی شود، بلکه ناشی از

فرآیندی که توسط آنزیم *UFGT* کاتالیز می‌شود. بدون این گلیکوزیلاسیون، آنتوسیانین‌ها به درستی تشکیل یا در واکوئل تثبیت نمی‌شوند که منجر به فنوتیپ رنگ پریده می‌شود.

یک اختلال خاص در مسیر بیوسنتز آنتوسیانین است. رویداد بیوشیمیایی اصلی، شکست در گلیکوزیلاسیون آنتوسیانیدین‌ها (فرم آگلیکون) به آنتوسیانین‌های پایدار (فرم گلیکوزیده) است،



شکل ۲- تصویر آرپل نمونه‌های سالم و مبتلا به عارضه رنگ پریدگی در انار رقم "رباب" در مرحله رسیدگی میوه (کوهمره سرخی، استان فارس).

Fig. 2. Photo of arils of healthy and aril paleness affected samples in pomegranate cv. 'Rabab' at the ripe stage (Kohmareh Sorkhy, Fars Province).

همراه است (Zhang et al., 2025). این پدیده، پرسش‌هایی در مورد ارتباط بین پیام‌رسانی (سیگنالینگ) کمبود آهن و تنظیم متابولیسم آنتوسیانین در میوه‌های درختی ایجاد کرده است. در میوه انار، نتایج پژوهشگران نشان داده است که میوه‌های مبتلا به عارضه سفیدشدگی آرپل، غلظت کمتری از مواد معدنی کلیدی به ویژه آهن (Fe)، کلسیم (Ca) و همچنین آنتوسیانین در مقایسه با میوه‌های سالم دارند. در حالی که سطوح روی (Zn) ممکن است تفاوت معنی‌داری نداشته باشد. محلول‌پاشی ترکیبی آهن، روی و کلسیم در مراحل اصلی رشد میوه، شدت می‌تواند عارضه را تا ۴۰٪ کاهش دهد

علاوه بر این، تغذیه معدنی نقش فیزیولوژیکی مهمی در بروز یا عدم بروز عارضه سفیدشدگی آرپل انار ایفا می‌کند. پاسخ گیاهان به کمبود عناصر غذایی و ارتباط آن با مسیر بیوسنتز آنتوسیانین، به‌ویژه در گونه‌های باغی، موضوعی نسبتاً ناشناخته است. در کیوی قرمز (*Actinidia chinensis*) نشان داده شده است که این میوه به‌دلیل محتوای بالای آنتوسیانین در بخش درونی میوه (حفره تخمدان) دارای ارزش تجاری بالایی است. با این حال، مشاهدات مزرعه‌ای نشان می‌دهد که کمبود آهن در گیاهان کیوی، علاوه بر ایجاد کلروز برگ، با قرمزی غیرعادی پوست بیرونی میوه نیز

(Karami and Faraji, 2025).

کمبرود کلسیم یکی از عوامل موثر در بروز عارضه سفیدشدگی آریل در انار می باشد (Tadayon, 2023; Kvand *et al.*, 2018)، زیرا کلسیم جزء حیاتی برای حفظ یکپارچگی دیواره سلولی و غشاء است که مستقیماً بر کیفیت میوه پس از برداشت و حساسیت به عارضه های فیزیولوژیک تأثیر می گذارد (Hosein-Beigi *et al.*, 2019). مصرف بیش از حد نیتروژن که موجب رشد رویشی زیاد و کاهش جذب کلسیم در میوه می شود نیز در این عارضه موثر است (Tadayon, 2023). افزایش ماده آلی خاک و مدیریت بهینه نیتروژن می تواند جذب کلسیم را بهبود داده و حساسیت به عارضه سفیدشدگی آریل را کاهش دهد (Kavand *et al.*, 2017).

عنصر کلسیم علاوه بر نقش مستقیم ساختاری در تشکیل بافت های مختلف، به عنوان یک مولکول سیگنال مهم درون سلولی هم عمل می کند و می تواند علاوه بر رشد و نمو بر مقاومت بافت های گیاه به تنش های مختلف تأثیر گذار باشد (Erfani-Moghadam and Zarei, 2025). به عبارتی کلسیم با عمل به عنوان پیام رسان ثانویه، از طریق حسگرهای کلسیمی و تنظیم عوامل رونویسی، بیان ژن های مسیرهای مرتبط با تنش را در پاسخ به محرک های محیطی و هورمونی کنترل می کند و نقش کلیدی در دفاع و سازگاری گیاه دارد (Reddy *et al.*, 2011). نتایج پژوهش های اخیر اثر تغذیه بر روی سفیدشدگی آریل انار بیانگر تأثیر

مثبت تغذیه با کلرید کلسیم بر کاهش این عارضه می باشد (Karami and Faraji, 2025). همچنین بعلاوه تأثیر بالای pH خاک بر جذب این عنصر، استفاده از محلول پاشی منجر به نتایج بهتری در مقایسه با کوددهی در خاک شد. البته نکته مهم در این خصوص زمان محلول پاشی می باشد که به نظر می رسد بهتر است از مراحل اولیه تشکیل میوه و رشد اولیه آن که هنوز تنش گرمایی بالایی به درخت وارد نشده است انجام شود و چند مرتبه در طول دوره رشد تکرار گردد.

گزارشات قبلی نیز بیانگر این است که علاوه بر کلسیم، محلول پاشی پتاسیم هم منجر به کاهش شدت این عارضه شد (Kavand *et al.*, 2017). گزارشاتی از تأثیر مثبت کوددهی با سولفات پتاسیم بر تولید آنتوسیانین در انار رقم واندرفول مشاهده گردید (Farag *et al.*, 2018).

تأثیر عنصر پتاسیم بر عارضه سفیدشدگی آریل انار هم گزارش شده است (Tadayon, 2023). پتاسیم علاوه بر نقش مستقیم در تغذیه گیاه، بطور غیر مستقیم در پیام رسانی نقش دارد و می تواند بر جابجایی یون کلسیم در گیاه و تنظیم بیان ژن های بیوسنتزی اکسین و جاسمونیک اسید، دو تنظیم کننده گیاهی، که در بیان ژن های بیوسنتزی آنتوسیانین و جلوگیری از تخریب آن در گیاهان نقش دارند، اثر گذار باشد (Mirdehghan *et al.*, 2012; Tadayon and Hosseini, 2021).

عنصر پتاسیم در سنتز و تجمع آنتوسیانین ها نقش دارد و با تنظیم فشار اسمزی، انتقال قندها و

فعال‌سازی آنزیم‌های دخیل در مسیرهای متابولیکی، شرایط لازم را برای رنگ‌گیری طبیعی در آریل انار فراهم می‌کند. به عبارتی ممکن است در شرایط کمبود قند، انتقال قند به سمت آریل‌ها کاهش یافته و مسیر بیوسنتز رنگدانه‌ها مختل می‌شود. همچنین گزارش شده است که محلول‌پاشی با پتاسیم باعث کاهش معنی‌دار در میزان pH سلول انار رقم ملس ساوه شد (Abdollahi *et al.*, 2024). لازم به ذکر است که رنگ‌پذیری گلیکوزیدهای آنتوسیانینی به شدت تحت تأثیر pH داخل سلولی قرار دارد، به‌طوری‌که مقادیر بالاتر pH باعث تمایل رنگ‌دانه‌ها به طیف‌های آبی می‌شود و مقادیر پایین‌تر pH شدت رنگ قرمز را افزایش می‌دهد (Rakić and Poklar Ulrih, 2021). بنابراین می‌توان تصور کرد که عنصر پتاسیم یکی از عناصر کلیدی در تنظیم رنگ‌پذیری آریل‌های انار است و کمبود آن به‌طور مستقیم با بروز عارضه‌ی بیرنگی یا کاهش شدت قرمزی مرتبط باشد. بنابراین مدیریت صحیح تغذیه با پتاسیم در باغ‌های انار نه تنها برای بهبود کیفیت و بازارپسندی میوه، بلکه برای پیشگیری از عارضه‌ی بیرنگی آریل اهمیت دارد.

کمبود آهن می‌تواند مستقیماً کارکرد آنزیم‌های مسیر فنیل پروپانویید را مختل کند، که فعالیت آن‌ها اغلب وابسته به آهن به عنوان هم‌عامل (Co-factor) است و پیوند مستقیمی بین تغذیه معدنی و سنتز رنگدانه ایجاد می‌کند (Álvarez-Fernández *et al.*, 2011). آهن یک عامل ضروری در سنتز

کلروفیل و زنجیره انتقال الکترون در فتوسنتز است. از آنجا که فتوسنتز منبع اصلی تولید کربوهیدرات‌ها (پیش‌سازهای سنتز آنتوسیانین) است، کمبود آهن می‌تواند به‌طور غیرمستقیم سنتز رنگدانه‌ها را کاهش دهد. علاوه بر این، آهن به‌طور مستقیم در فعالیت برخی آنزیم‌های دخیل در متابولیسم ثانویه نقش دارد (Davarpanah *et al.*, 2020). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که محلول‌پاشی برگ‌ی با آهن (هم به صورت کلاته و هم معدنی) می‌تواند محتوای آنتوسیانین، قند و اسیدیت میوه انار را به‌طور معناداری افزایش داده و عارضه بیرنگی آریل را کاهش دهد (Asadi *et al.*, 2019).

عنصر روی (Zn) ریزمغذی دیگری است که می‌تواند به‌طور قابل توجهی کمیت و کیفیت میوه انار را بهبود بخشد (Karami *et al.*, 2019). عنصر روی متابولیسم پروتئین‌ها و کربوهیدرات‌ها را تنظیم می‌کند و در واکنش‌های آنزیمی نقش دارد (Hasani *et al.*, 2012). عنصر روی با مشارکت در متابولیسم و تولید آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، تولید گونه‌های فعال اکسیژن و آسیب‌های ناشی از آن را کاهش می‌دهد و کاربرد سولفات روی به‌طور قابل توجهی بر بیان ژن‌ها در مسیرهای زیست‌ساخت ترکیبات فنولی تأثیر می‌گذارد (Tang *et al.*, 2015).

همچنین با توجه به گزارشات موجود به نظر می‌رسد محلول‌پاشی با سیلیسیم، به عنوان یک عنصر مفید در مقابله با تنش، می‌تواند در کاهش عارضه سفیدشدگی آریل انار موثر باشد. مطالعات قبلی روی انار بیانگر این موضوع

است که کودهای دارای سیلیسیم منجر به افزایش تحمل درخت انار به تنش‌های مختلف می‌شود (Olyaie Torshiz *et al.*, 2020). بعلاوه سیلیسیم می‌تواند برای مقابله با افزایش دمای درخت و میوه نقش مفیدی داشته باشد. همچنین گزارشات قبلی بیانگر نقش مفید کاربرد کائولین (سیلیکات آلومینیوم) و دیگر ترکیبات دارای سیلیسیم از قبیل دی اکسید سیلیسیم بر افزایش معنی دار محتوی آنتوسیانین در میوه انار می باشد (Abdel-Sattar *et al.*, 2017).

عوامل محیطی و مدیریت باغی

بروز بیرنگی دانه‌ها به شدت تحت تأثیر شرایط محیطی قرار دارد و برهمکنش ژنوتیپ × محیط در بروز آنرا به خوبی نشان می‌دهد. گسترش کشت انار به مناطق جدید، اغلب گرم‌تر و خشک‌تر، محرک اصلی بروز این عارضه بوده است. زراعی و همکاران (Zarei *et al.*, 2024b) نشان دادند در حالی که میوه‌های درختان انار کشت‌شده در یک اقلیم جدید و گرم‌تر (یزد) کیفیت پس از برداشت مطلوب‌تری (مانند سفتی بیشتر، تحمل بیشتر به انبار سرد) داشتند، اما کاهش معنی‌داری در محتوای آنتوسیانین و رنگ قرمز (مقدار a^*) دانه‌ها در مقایسه با میوه‌های درختان انار کشت‌شده در زیستگاه‌های سنتی و معتدل‌تر (ساوه و قم) داشتند. این یافته با اصل تثبیت‌شده‌ای همخوانی دارد که دمای پایین‌تر به طور کلی تجمع آنتوسیانین را افزایش می‌دهد، در حالی که

دمای بالا می‌تواند بیوستز آنتوسیانین را سرکوب یا تخریب آن را تسریع کند (Borochoy-Neori *et al.*, 2011; Oren-Shamir, 2009). گرمایش جهانی ممکن است با کاهش تجمع آنتوسیانین‌ها، شدت رنگ قرمز انار را تحت تأثیر قرار دهد. این یافته‌ها می‌تواند در برنامه‌های به‌نژادی برای تولید ارقام انار محمل به گرما با رنگ‌دهی مطلوب مفید باشد.

مدیریت آبیاری، سایه‌اندازی و انتخاب زمان برداشت می‌تواند برای حفظ رنگ در شرایط گرم مؤثر باشد (Borochoy-Neori *et al.*, 2011). علاوه بر دما، شوری خاک و آب از عوامل محیطی تنش‌زای مهمی هستند که می‌تواند بیرنگی دانه‌ها را تشدید کنند (Sedaghat *et al.*, 2021). این تنش‌های غیرزیستی می‌تواند متابولیسم گیاه و جذب مواد مغذی را مختل کرده و مسیر بیوستز آنتوسیانین را تضعیف کنند. همچنین می‌توان توجیه کرد کشت انار در مناطق گرم‌تر، که در آن‌ها اسیدیته میوه‌ها اغلب کاهش می‌یابد، ممکن است به افزایش pH سلولی منجر شود، امری که به نوبه خود پایداری آنتوسیانین‌ها را تغییر داده و در نهایت بر الگوی نهایی رنگ‌دانه‌ای تأثیر می‌گذارد.

تیمارهای پیش از برداشت برای کاهش عارضه سفیدشدگی آریل انار امیدوارکننده هستند. کاربرد تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه (PGRs) مانند جبرلیک اسید نشان داده است که با بهبود زنده‌مانی بذر (که با سلامت کلی میوه مرتبط است)، بروز عارضه مرتبط با قهوه‌ای‌شدن دانه‌ها را کاهش می‌دهد (Shivashankar *et al.*, 2012). کاربرد مواد

ضد آفتاب، کائولین، آبیاری تکمیلی و انواع محلول پاشی بر گی از راهکارهای رایج برای کاهش این عارضه می باشند (Mirdehghan and Vatanparast, 2013; Kavand et al., 2017; Asadi et al., 2019). نقش مدیریت آب آبیاری نیز مهم است، به طوری که رژیم های کم آبیاری (Deficit irrigation) حساسیت را افزایش می دهند، در حالی که آبیاری تنظیم شده (Regulated irrigation) و عدم آبیاری در مراحل غیر حساس رشد گیاه گاهی می تواند کیفیت آریل ها را بدون ایجاد بروز عارضه بهبود دهند (Narjesi, 2021). شدت بروز علائم عارضه سفیدشدگی آریل در میوه های بزرگتر به مراتب بیشتر از میوه های کوچکتر است. به نظر می رسد کیفیت پایین آب آبیاری و اختلال در فرایند جذب و انتقال یون کلسیم در بافت میوه ها، یکی از عوامل اصلی بروز عارضه سفیدشدگی در انار است (Kavand et al., 2018). استفاده از سایه بان به تنهایی این عارضه را کاهش نمی دهد، ولی استفاده همزمان از سایه بان در باغ، محلول پاشی با کائولین، همراه با آبیاری تکمیلی، شدت اختلال را تا ۲۴٪ کاهش داد و درصد میوه های سالم را به بیش از ۹۵٪ رساند (Kavand et al., 2017).

ساز کارهای مولکولی و بیوشیمیایی

ساز کارهای مولکولی سفیدشدگی آریل در انار موضوع بسیار پیچیده ای است. اجماع کنونی، بر اساس شواهد ترانسکریپتومیک و بیوشیمیایی، این است که این عارضه ناشی از یک شکست خاص در مراحل پایانی بیوستتر آنتوسیانین است.

مسیر آنتوسیانین با مسیر فنیل پروپانویید شروع می شود، جایی که فنیل آلانین توسط آنزیم PAL به اسید سینامیک تبدیل می شود و در نهایت منجر به تشکیل نارینجین چالکون از طریق CHS می گردد (Khademi et al., 2025). ترکیب اخیر سپس از طریق یک سری مراحل آنزیمی به آنتوسیانیدین ها توسط آنزیم LDOX تغییر می یابد. به نظر می رسد نقطه عطف بحرانی برای بیرنگی دانه ها، عمل ژن UFGT باشد. این آنزیم یک مولکول گلوکز را به آنتوسیانیدین منتقل می کند و آنتوسیانین پایدار و محلول در آب را ایجاد می کند که در واکوئل تجمع یافته و رنگ قرمز را فراهم می کند (Zhang and Zhu, 2023).

خادمی و همکاران (Khademi et al., 2025) نشان دادند که بیان ژن UFGT در دانه های مبتلا به بیرنگی به طور محسوسی کاهش می یابد، حتی در مقایسه با ارقام سفید طبیعی، که در آن ژن های دیگری مانند LDOX سرکوب می شوند. این کاهش بیان خاص ژن UFGT، به جای یک خاموشی کلی مسیر یا افزایش تخریب اکسیداتیو، اکنون به عنوان یکی از عوامل مهم مولکولی این عارضه در نظر گرفته می شود. این امر توضیح می دهد که چرا سایر ترکیبات فنولی و ظرفیت های آنتی اکسیدانی در بافت های مبتلا تا حد زیادی بدون تغییر باقی می مانند.

علاوه بر ژن های ساختاری، تنظیم بیوستتر آنتوسیانین توسط یک شبکه پیچیده از عوامل رونویسی، عمدتاً کمپلکس MYB-(MBW) bHLH-WD40 کنترل می شود. اگرچه هنوز به

طور مستقیم در زمینه بیرنگی دانه‌های انار مطالعه نشده است، بسیار محتمل است که تنش‌های محیطی مانند گرما، ساخت یا فعالیت این کمپلکس را مختل کنند، که منجر به سرکوب ژن‌های پایین دست، از جمله ژن *UFGT* می‌شود (Schaart et al., 2013). این دست آورد دانشی کلیدی و امیدوارکننده برای پژوهش‌های آینده است.

راهکارهای مدیریتی پیشرفته برای کنترل سفیدشدگی آریل‌های انار

با در نظر گرفتن سبب‌شناسی عارضه سفیدشدگی آریل انار، چندین راهکار مدیریتی پیشرفته با درجات مختلفی از موفقیت، توسعه یافته و آزمایش شده‌اند. امیدوارکننده‌ترین رویکرد تا به امروز، استفاده راهبردی از تغذیه برگی است. یک پژوهش اخیر و طراحی شده دو ساله، شواهد محکمی برای کارآیی این روش ارائه داده است (Karami and Faraji, 2025). نتایج این پژوهش نشان داده‌است که محلول‌پاشی برگی ترکیب سولفات آهن، سولفات روی و کلرید کلسیم در کاهش بروز و شدت بیرنگی دانه‌ها در رقم حساس "ملس ساوه" بسیار مؤثر بود. این یافته‌ها نشان داد که عنصر کلسیم می‌تواند نقش محوری ایفا کند و گنجاندن آن در محلول پاشی، درصد بیرنگی را به طور چشمگیری کاهش داد (Karami and Faraji, 2025). علاوه بر این، نتایج این پژوهش بیانگر هم‌افزایی قوی بین عناصر می‌باشد، بطوریکه بیان شده ترکیب

Ca با Fe یا Zn مؤثرتر از کاربرد هر یک از آنها به تنهایی بود (Karami and Faraji, 2025).

موفق‌ترین تیمارها، کاربرد همزمان $Fe_4Zn_6Ca_4$ و $Fe_4Zn_3Ca_4$ (اعداد نشان‌دهنده غلظت در هزار برای هر عنصر می‌باشند) در دو مرحله کلیدی رشد بود: ابتدای تشکیل میوه و ابتدای رسیدن میوه. این رویکرد به طور مستقیم به علل فیزیولوژیکی (کمبود مواد معدنی) و بیوشیمیایی (کمبود آنتوسیانین) شناسایی شده عارضه سفیدشدگی آریل انار می‌پردازد و راه‌حلی عملی و مؤثر برای باغداران ارائه می‌دهد (Karami and Faraji, 2025).

در باغ‌های اناری که دارای بافت سبک خاک، حاصلخیزی ضعیف و تنش شوری هستند، استفاده از کودهای آلی به همراه عناصر معدنی و محلول‌پاشی عناصر غذایی سولفات پتاسیم و نترات کلسیم در مدیریت باغ‌های انار مبتلا به عارضه سفیدشدگی آریل در منطقه توصیه می‌شود. کاربرد این کودها تاثیر قابل ملاحظه‌ای در جلوگیری از ریزش برگ‌ها و کاهش علائم کلروز و نکروزه شدن انتهایی برگ‌ها دارد (Kavand et al., 2018).

آبیاری منظم و جلوگیری از تنش‌های آبی در مراحل پایانی رشد میوه، همراه با مدیریت صحیح هرس و باردهی برای جلوگیری از فرسودگی درخت، از دیگر اقدامات به‌باغی و ضروری است. با توجه به گرم شدن زمین و کاهش کیفیت آب آبیاری، توصیه می‌شود باغ‌های انار مبتلا به عارضه

سفیدشدگی آریل‌ها، به شکلی مدیریت شوند که برآیند آنها کاهش آثار مخرب تنش دمای بالای، افزایش رطوبت نسبی در میکروکلیمای باغ و کاهش تنش شوری آب و خاک باشد. مدیریت باید به صورت تلفیقی و هم‌راستا با هم به گونه‌ای انجام شود که برآیند آنها کاهش آثار تنش‌ها باشد (Kavand et al., 2018).

در بلندمدت، شناسایی و توسعه ارقام متحمل انار با پایداری بیشتر آنتوسیانین می‌تواند راهکاری اساسی باشد (Tabar et al., 2009). علاوه بر تغذیه برگی، سایر راهکارهای امیدوارکننده در حال ظهور هستند. کاربرد پیش از برداشت کلسیم در ترکیب با اسید سالیسیلیک نشان داده است که یکپارچگی دیواره سلولی را افزایش داده و مسیرهای مرتبط با دفاع را فعال می‌کند، که ممکن است به طور غیرمستقیم میوه انار را در برابر عارضه سفیدشدگی آریل انار محافظت کند (Moradinezhad et al., 2024). احداث باغ در ارتفاع بالاتر، استفاده از سایبان و کودهای حیوانی و افزایش مواد آلی خاک، تغذیه مناسب و محلول‌پاشی کلسیم، پتاسیم و فسفر، آبیاری باغ با احتساب ضریب شوری و آبیاری با دور کمتر، استفاده از پوشش گیاهی در کف باغ به طور موثری شاخص عارضه سفیدشدگی را کاهش می‌دهد (Kavand et al., 2018; Faraji et al., 2019).

علاوه بر این، استفاده از توری‌های سایه‌انداز رنگی برای تغییر کیفیت نور و کاهش دمای میوه، کارآیی در کاهش آفتاب‌سوختگی و بهبود رنگ

نشان داده است که می‌توان برای پیشگیری از سفیدشدگی دانه‌ها مفید باشد (Ramezani et al., 2022). استفاده از توری‌های رنگی نه تنها دمای میوه را کاهش می‌دهد، بلکه با تغییر کیفیت نور دریافتی، ممکن است بیان ژن‌های مرتبط با سنتز آنتوسیانین از جمله ژن *UFGT* را تحت تأثیر قرار دهد. این موضوع می‌تواند به عنوان یک راهکار غیرمغذی مکمل در مناطق گرم و پرنور مورد توجه قرار گیرد. با این حال، پایدارترین راه‌حل بلندمدت برای حل این اختلال در شناسایی ارقام متحمل و مقاوم نهفته است، هدفی که با ظهور ابزارهای ژنومیک مدرن به تدریج امکان‌پذیر می‌شود.

جمع‌بندی و پیشنهادات برای پژوهش‌های آینده

بنابراین، سفیدشدگی یا بیرنگی آریل انار یک عارضه فیزیولوژیکی پیچیده است که تهدیدی جدی برای صنعت جهانی انار محسوب می‌شود. این مقاله مروری، درک کنونی از این عارضه را که از ترکیب موارد مختلف شامل حساسیت ژنتیکی، تنش محیطی (به ویژه دمای بالا)، آبیاری و تغذیه نامناسب و آسیب مولکولی خاص در مسیر بیوسنتز آنتوسیانین، یعنی کاهش بیان ژن *UFGT*، ناشی می‌شود را بررسی کرده است. در حالی که راهکارهای پیشرفته تغذیه برگی، به ویژه کاربرد همزمان کلسیم، پتاسیم، آهن و روی ابزار قدرتمندی برای کاهش کوتاه‌مدت ارائه می‌دهند، راه‌حل‌های بلندمدت باید بر اصالت‌بخشی برای مقاومت یا تحمل به این اختلال متمرکز شوند.

پژوهش‌های آینده باید حوزه‌های کلیدی زیر را در اولویت قرار دهند:

۱- تولید و توسعه نشانگرهای مولکولی مرتبط با ژن *UFGT* و سایر *QTL* های مرتبط با تحمل به بیرنگی آریل انار برای تسهیل انتخاب به کمک نشانگر (MAS).

۲- بررسی عمیق‌تر سازکارهای تنظیمی بالادست و ارزیابی کمپلکس فاکتورهای رونویسی MYB-bHLH-WD40 که تنظیم‌کننده اصلی مسیر بیوسنتز آنتوسیانین در گیاهان است و به نظر می‌رسد تنش‌های محیطی مانند گرمای بالا از طریق اختلال در عملکرد این کمپلکس، سبب سرکوب بیان ژن *UFGT* می‌شوند. بنابراین، پژوهش‌های آتی می‌توانند به بررسی دقیق‌تر این شبکه تنظیمی در انار و پاسخ آن به تنش‌های غیرزیستی متمرکز شوند.

۳- کاربرد فناوری‌های جدید برای فنوتایپینگ با توان عملیاتی بالا، مانند الگوریتم‌های یادگیری ماشین همراه با تصویربرداری ابرطیفی، برای غربالگری سریع و غیرمخرب جمعیت‌های بزرگ.

۴- ارزیابی ارقام جدید انار به طور خاص برای تحمل به محیط‌هایی با دمای بالا، و تلاش برای راهکارهای تلفیقی در اصالت‌بخشی گیاهی، زیست‌شناسی مولکولی و باغبانی دقیق برای تضمین تولید میوه انار باکیفیت بالا در شرایط اقلیمی در حال تغییر

و امنیت آینده این محصول ارزشمند ضروری خواهند بود.

۵- ادغام داده‌های ترانسکریپتومیک، متابولومیک و پروتئومیک (رویکردهای اُمیکس) می‌تواند تصویر کامل‌تری از شبکه‌های تنظیمی و متابولیکی دخیل در سفیدشدگی آریل انار ارائه دهد. این ادغام‌سازی به ویژه برای شناسایی بیومارکرهای قابل اعتماد برای انتخاب به کمک نشانگر (MAS) و نیز درک پاسخ یکپارچه گیاه به تنش‌های چندگانه ضروری است.

سپاسگزاری

این مقاله مروری با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه ایلام و دانشگاه جهرم که برای پروژه‌های پژوهشی انار تخصیص داده شده است و با استفاده از سایر منابع موجود پژوهشی داخلی و خارجی که در زمینه عارضه فیزیولوژیکی انار منتشر شده است، تنظیم و تدوین گردیده است. نگارندگان بدین وسیله مراتب سپاسگزاری خود را از آنها اعلام می‌دارند.

تعارض منافع

نگارندگان اعلام می‌دارند که هیچگونه تعارض منافی با دیگر اشخاص حقیقی و حقوقی ندارند.

References

- Abdel-Sattar, M., Eissa, A.M., El-shazly, S.M. and Alabd, A.S. 2017.** Improving quality of wonderful pomegranate by using bagging and different agrochemical treatments. *Alexandria Journal of Agricultural Sciences*, 62(1), pp.103-109. DOI: 10.21608/alexja.2017.5760
- Abdollahi, F., Zarei, A., Erfani-Moghadam, J. and Rostaminia, M. 2024.** Foliar application of silica and potassium sulphate on some characteristics of pomegranate fruit cv. 'Malase-Saveh'. *Plant Productions*, 47(2), pp.309-321 (in Persian). DOI: 10.22055/ppd.2024.46385.2150
- Álvarez-Fernández, A., Melgar, J.C., Abadía, J. and Abadía, A. 2011.** Effects of moderate and severe iron deficiency chlorosis on fruit yield, appearance and composition in pear (*Pyrus communis* L.) and peach (*Prunus persica* (L.) Batsch). *Environmental and Experimental Botany*, 71(2), pp.280-286. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2010.12.012
- Asadi, E., Ghehsareh, A.M., Moghadam, E.G., Hodaji, M. and Zabihi, H.R. 2019.** Improving of pomegranate aril paleness disorder through application of Fe and Zn elements. *Indian Journal of Horticulture*, 76(2), pp.279–288. DOI: 10.5958/0974-0112.2019.00043.4
- Borochoy-Neori, H., Judeinstein, S., Harari, M., Bar-Ya'akov, I., Patil, B.S. and Lurie, S. 2011.** Climate effects on anthocyanin accumulation and composition in the pomegranate (*Punica granatum* L.) fruit arils. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(10), pp.5325–5334. DOI: 10.1021/jf2003688
- Chater, J.M., Merhaut, D.J., Jia, Z., Arpaia, M.L., Mauk, P.A. and Preece, J.E. 2018.** Effects of site and cultivar on consumer acceptance of pomegranate. *Journal of Food Science*, 83(4), pp.1179–1185. DOI: 10.1111/1750-3841.14101
- Davarpanah, S., Tehranifar, A., Zarei, M., Aran, M., Davarynejad, G. and Abadía, J. 2020.** Early season foliar iron fertilization increases fruit yield and quality in pomegranate. *Agronomy*, 10(6), e832. DOI: 10.3390/agronomy10060832
- Erfani-Moghadam, J. and Zarei, A. 2025.** Calcium and silicon nanofertilizers improved morphological attributes and fatty acid composition in olive; an insight into synergistic interaction between these elements. *BMC Plant Biology*, 25(997), pp.1-16. DOI: 10.1186/s12870-025-07027-2
- Farag, K.M., Nagy, N.M.N., El-Sheikh, M.H. and Abada, H.S. 2018.** Reducing

- cracking and enhancing coloration and quality of wonderful pomegranates cultivar by safe treatments. *Zagazig Journal of Agricultural Research*, 45(4), pp.1245-1256. DOI:10.21608/zjar.2018.48569
- Faraji, S. and Karami, S. 2024.** Spatial distribution of pomegranate aril paleness and its relationship with some environmental and non-environmental factors using geographic information system (GIS). *Iranian Journal of Horticultural Science*, 55(3), pp.495-513 (in Persian). DOI: 10.22059/ijhs.2024.372626.2156
- Faraji, S., Naeimi, M., Keikhaei, F., Sheikhi, M. and Mir Abdulhaq Hezaveh, A. 2019.** Aril paleness disorder in pomegranate (*Punica granatum* L.) and its reduction strategies. *Extension Journal of Pomegranate*, 1(2), pp.21-28 (in Persian).
- Gharaghani, A., Ghasemi Soloklui, A.A., Oraguzie, N. and Zare, D. 2017.** Pollen source influences fruit quality, aril properties, and seed characteristics in pomegranate. *International Journal of Fruit Science*, 17, pp.333-348. DOI: 10.1080/15538362.2017.1318733
- Ghasemi-Soloklui, A.A., Kordrostami, M. and Gharaghani, A. 2023.** Environmental and geographical conditions influence color, physical properties, and physiochemical composition of pomegranate fruits. *Scientific Reports*, 13(1), e15447. DOI: 10.1038/s41598-023-42749-z
- Hasani, M., Zamani, Z., Savaghebi, G. and Fatahi, R. 2012.** Effects of zinc and manganese as foliar spray on pomegranate yield, fruit quality and leaf minerals. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12, pp.471-480. DOI: 10.4067/S0718-95162012005000009
- Hosein-Beigi, M., Zarei, A., Rostaminia, M. and Erfani-Moghadam, J. 2019.** Positive effects of foliar application of Ca, B and GA3 on the qualitative and quantitative traits of pomegranate (*Punica granatum* L.) cv. 'Malase-Torshe-Saveh'. *Scientia Horticulturae*, 254, pp.40-47. DOI: 10.1016/j.scienta.2019.04.081
- Jezek, M., Allan, A.C., Jones, J.J. and Geilfus, C.M. 2023.** Why do plants blush when they are hungry? *New Phytologist*, 239(2), pp.494-505. DOI: 1111/nph.18833
- Kandyli, P. and Kokkinomagoulos, E. 2020.** Food applications and potential health benefits of pomegranate and its derivatives. *Foods*, 9(2), e122. DOI: 10.3390/foods9020122
- Karami, K., Erfani-Moghadam, J., Bazgir, M. and Khademi, O. 2019.** Effect of gibberellic acid and zinc sulfate spraying on fruit cracking and quantitative and qualitative

- characteristics of pomegranate cv. 'Malase Saveh'. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 52, pp.317-328 (in Persian). DOI: 10.22059/ijhs.2020.273643.1583
- Karami, S. and Faraji, S. 2025.** The effect of foliar spraying of iron, zinc and calcium in the stages of fruit maturity on the incidence and severity of pomegranate (*Punica granatum* L.) aril paleness. *Journal of Horticultural Science*, 39(1), pp.139–153 (in Persian). DOI: 10.22067/jhs.2024.89090.1366
- Kavand, M., Arzani, K., Barzegar, M. and Mirlatifi, M. 2017.** Effects of sunscreen, kaolin application, fruit thinning and supplementary irrigation on the aril browning disorder of pomegranate cv. Malase Torshe Saveh. *Seed and Plant Production*, 33, pp.85–112 (in Persian). DOI:10.22092/sppj.2017.113760
- Kavand, M., Narjesi, V. and Faraji, S. 2018.** Pomegranate orchards management with aril whitening or browning disorder. Technical Publication. Agricultural Research, Education and Extension Organization, Ministry of Agriculture – Jihad, Iran. 18 pp. (in Persian).
- Khademi, O., Zarei, A. and Naji, A. 2025.** Molecular basis of aril paleness disorder in pomegranate fruit: Insights from anthocyanin biosynthesis genes. *Tropical Plant Biology*, 18, e70. DOI: 10.1007/s12042-025-09438-9
- Kobayashi, S., Ishimaru, M., Ding, C.K., Yakushiji, H. and Goto, N. 2001.** Comparison of UDP-glucose: flavonoid 3-O-glucosyltransferase (UFGT) gene sequences between white grapes (*Vitis vinifera*) and their sports with red skin. *Plant Science*, 160(3), pp.543-550. DOI: 10.1016/s0168-9452(00)00425-8
- Liang, J. and He, J. 2018.** Protective role of anthocyanins in plants under low nitrogen stress. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 498(4), pp.946-953. DOI: 10.1016/j.bbrc.2018.03.087
- Melgarejo-Sánchez, P., Núñez-Gómez, D., Martínez-Nicolás, J.J., Hernández, F., Legua, P. and Melgarejo, P. 2021.** Pomegranate variety and pomegranate plant part, relevance from bioactive point of view: A review. *Bioresources and Bioprocessing*, 8(1), e2. DOI: 10.1186/s40643-020-00351-5
- Mirdehghan, S.H. and Vatanparast, G. 2013.** Avoiding the paleness of pomegranate arils by preharvest application of salicylic acid and potassium sulfate. *Acta Horticulturae*, 1012, pp.815–819. DOI: 10.17660/ActaHortic.2013.1012.110
- Mirdehghan, S.H., Vatanparast, G., Karim, H.R. and Vazifeshenas, M.H. 2012.** Preharvest foliar application of methyl jasmonate, salicylic acid and potassium sulfate

- on improving the quality of pomegranate fruit. *CIHEAM: Options Méditerranéennes*, 103, pp.183-189.
- Moradinezhad, F. and Ranjbar, A. 2024.** Foliar application of fertilizers and plant growth regulators on pomegranate fruit yield and quality: A review. *Journal of Plant Nutrition*, 47(5), pp.797-821. DOI: 10.1080/01904167.2023.2280152
- Narjesi, V. 2021.** Effects of different shade netting treatments on some quantitative and qualitative characteristics of pomegranate fruits cv. Malas-e-Saveh. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 31(1), pp.275-293 (in Persian). DOI: 10.22034/saps.2021.12815
- Olyaie Torshiz, A., Goldansaz, S.H., Motesharezadeh, B., Askari, M.A. and Zarei, A. 2020.** The influence of fertilization on pomegranate susceptibility to infestation by *Ectomyelois ceratoniae*. *Internationa Journal of Fruit Science*, 20(3), pp.1156-1173. DOI: 10.1080/15538362.2020.1778602
- Oren-Shamir, M. 2009.** Does anthocyanin degradation play a significant role in determining pigment concentration in plants? *Plant Science*, 177(4), pp.310–316. DOI: 10.1016/j.plantsci.2009.06.015
- Rakić, V. and Poklar Ulrih, N. 2021.** Influence of pH on color variation and stability of cyanidin and cyanidin 3-*O*- β -glucopyranoside in aqueous solution. *CyTA - Journal of Food*, 19, pp.174–182. DOI: 10.1080/19476337.2021.1874539
- Ramezani, M., Rahemi, M. and Ramzanian, A. 2022.** Application of colored nets to prevent sunburn and increase pomegranate fruit quality. *Iran Agricultural Research*, 40(2), 1-8. DOI: 10.22099/iar.2021.41274.1451
- Schaart, J.G., Dubos, C., Romero De La Fuente, I., van Houwelingen, A.M.M.L., de Vos, R.C.H., Jonker, H.H. Xu, W., Routaboul, J.M., Lepiniec, L. and Bovy, A.G. 2013.** Identification and characterization of MYB-bHLH-WD40 regulatory complexes controlling proanthocyanidin biosynthesis in strawberry (*Fragaria* $\times$ *ananassa*) fruits. *New Phytologist*, 197(2), pp.454-467. DOI: 10.1111/nph.12017
- Sedaghat, S., Rahemi, M. and Jafari, M. 2021.** Effects of soil and water salinity on aril whitening in pomegranate. *Research in Pomology*, 6(1), pp.121–128. DOI: 10.30466/rip.2021.121091
- Seeram, N.P., Zhang, Y., Reed, J.D., Krueger, C.G. and Vaya, J. 2006.** Pomegranate phytochemicals. Pp. 3-30. In: Seeram, N.P., Schulman, R.N. and Heber, D. (eds.) *Pomegranates: Ancient Roots to Modern Medicine*. CRC Press.

- Shivashankar, K.S., Singh, H. and Sumathi, M. 2012.** Aril browning in pomegranate (*Punica granatum* L.) is caused by the seed. *Current Science*, 103(1), pp.26–28.
- Stiletto, A., Giampietri, E. and Trestini, S. 2020.** Heterogeneity in consumer preferences for ready-to-eat pomegranate: an empirical study in Italy. *British Food Journal*, 122(12), pp.3869–3884. DOI: 10.1108/BFJ-08-2019-0655
- Tabar, S.M., Tehranifar, A., Davarynejad, G.H., Nemati, S.H. and Zabihi, H.R. 2009.** Aril paleness, new physiological disorder in pomegranate fruit (*Punica granatum*): Physical and chemical changes during exposure of fruit disorder. *Horticultural Environment and Biotechnology*, 50(3), pp.300–307.
- Tadayon, M.S. 2023.** Instruction for dealing with the complication of pomegranate aril browning. *Technical Publication No. 631. Ministry of Agriculture- Jahad of Iran. 75 pp.* (in Persian).
- Tadayon, M.S. and Hosseini, S.M. 2021.** 24-Epibrassinolide enhances the effect of calcium and boron on amelioration of aril browning disorder in pomegranate (*Punica granatum* cv. 'Rabab'). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21, pp.1679-1688. DOI: 10.1007/s42729-021-00471-7
- Wu, X., Gong, Q., Ni, X., Zhou, Y. and Gao, Z. 2017.** UFGT: the key enzyme associated with the petals variegation in Japanese apricot. *Frontiers in Plant Science*, 8, e108. DOI:10.3389/fpls.2017.00108
- Zarei, A. 2017.** Biochemical and pomological characterization of pomegranate accessions in Fars province of Iran. *Sabao Journal of Breeding and Genetic*, 49(2), pp.155–167.
- Zarei, A. and Sahraroo, A. 2018.** Molecular characterization of *Punica granatum* L. accessions from Fars province of Iran using microsatellite markers. *Horticultural Environment and Biotechnology*, 59, pp.239–249. DOI: 10.1007/s13580-018-0019-x
- Zarei, A., Erfani-Moghadam, J., Hashemi, S. and Shirmardi, A. 2024a.** Effect of foliar application of silicon and potassium nanoparticles on the fatty acid composition of olive oil cv. Zard. *Seed and Plant*, 39, pp.597–619. DOI: 10.22092/spj.2024.366669.1375
- Zarei, A., Khademi, O. and Erfani-Moghadam, J. 2024b.** Differential effects of environmental conditions on the commercially important attributes and postharvest quality of pomegranate fruit. *Acta Physiologiae Plantarum*, 46, 104. DOI: 10.1007/s11738-024-03724-x
- Zarei, A., Zamani, Z., Fatahi, R., Mousavi, A., Salami, S.A., Avila, C. and Canovas,**

- F.M. 2016.** Differential expression of cell wall related genes in the seeds of soft- and hard-seeded pomegranate genotypes. *Scientia Horticulturae*, 205, pp.7–16. DOI: 10.1016/j.scienta.2016.03.043
- Zhang, P. and Zhu, H. 2023.** Anthocyanins in plant food: current status, genetic modification, and future perspectives. *Molecules*, 28(2), e866. DOI: 10.3390/molecules28020866

A Review of Aril Paleness Disorder in Pomegranate (*Punica granatum* L.): Etiology, Effective Mechanisms, and Integrated Management Approaches

J. Erfani-Moghadam¹ * and A. Zarei²

1. Associate Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran.

2. Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Jahrom University, Jahrom, Iran.

ABSTRACT

Erfani-Moghadam, J. and Zarei, A. 2025. A review of aril paleness disorder in pomegranate (*Punica granatum* L.): etiology, effective mechanisms, and integrated management approaches. *Seed and Plant*, 40, pp.577-598 (in Persian).

Aril paleness disorder (APD), also known as aril whitening, is an emerging physiological disorder that severely affect the internal quality, market value, and antioxidant potential of pomegranate fruits. The disorder is characterized by a significant reduction or irregular development of red pigments in the arils. The aril paleness disorder results from a complex interplay of genetic, physiological, environmental, and nutritional factors as well as their interactions. In recent years, aril paleness has become a critical issue in major pomegranate-producing regions, most notably in Iran. This review has synthesized recent findings on the causal factors and management of APD, with a special focus on insights from molecular and biochemical studies. Key causal factors include cultivar susceptibility, reduced expression of anthocyanin biosynthesis genes especially *UFGT* (UDP-glucose: flavonoid 3-O-glucosyltransferase), deficiency of mineral elements (Ca, Fe, Zn), and environmental stresses such as high temperature and soil and irrigation water salinity stress. In contrary to the earlier hypotheses, emerging evidence suggests oxidative stress and anthocyanin degradation may be secondary to disruptions in their biosynthesis. Effective management of this disorder requires an integrated approach that combines the selection of tolerant cultivars, optimized foliar nutrition (particularly calcium, potassium, iron and zinc). Foliar application of silicon and kaolin, canopy management to reduce heat stress through appropriate pruning and training methods, shading systems, and precise irrigation. This review article has consolidated current knowledge from diverse perspectives, highlights existing gaps in understanding the disorder, and purposes future research directions, including the application of omics technologies and genome editing for developing sustainable solutions for mitigation of this disorder.

Keywords: Pomegranate, anthocyanin, mineral nutrition, *UFGT* gene, genome editing, environmental stresses.

Introduction

Aril paleness disorder (APD), also referred to as aril whitening, is an emerging physiological disorder that poses a significant threat to the internal quality, marketability, and health-promoting properties of pomegranate fruit (Khademi *et al.*, 2025). The disorder is characterized by a marked reduction or irregular development of red pigmentation in the arils. The aril paleness disorder results from a complex interplay of genetic, physiological, environmental, and nutritional factors. In recent years, this disorder has escalated into a critical challenge in major pomegranate-producing regions, most notably in Iran, causing substantial economic losses and undermining consumer confidence (Asadi *et al.*, 2019).

The susceptibility to the APD is strongly influenced by genotype. Molecular studies have pinpointed a key genetic determinant: a significant downregulation of the *UFGT* (UDP-glucose: flavonoid 3-O-glucosyltransferase) gene in affected arils (Khademi *et al.*, 2025). This enzyme is crucial for the final glycosylation step in anthocyanin biosynthesis. Its suppression leads to a failure in producing stable, pigmented anthocyanins, which is now considered the primary molecular trigger for the APD, rather than a general oxidative stress response or anthocyanin degradation (Khademi *et al.*, 2025). While other structural genes like *PAL* and *CHS* may also show reduced expression, the specific downregulation of *UFGT* gene is the most consistent biomarker of the disorder.

Physiologically, the APD is intrinsically linked to disruptions in anthocyanin metabolism. Affected arils consistently show a drastically lower total anthocyanin content compared to healthy ones, directly correlates with the loss of red color (Zarei *et al.*, 2024b; Khademi *et al.*, 2025). Nutritional imbalances, particularly deficiencies in key mineral elements, play a pivotal synergistic role. Research indicates that deficiencies in calcium (Ca), iron (Fe), and zinc (Zn) are closely associated with the APD incidence (Karami and Faraji, 2025). Calcium is vital for cell wall integrity, while iron acts as a co-factor for enzymes in the phenylpropanoid pathway. Zinc (Zn) influences antioxidant enzyme systems and carbohydrate metabolism, indirectly supporting secondary metabolite synthesis.

Environmental stresses are major exacerbating factors, demonstrating a clear genotype $\times$ environment interaction (Zarei *et al.*, 2024b). High temperatures, particularly during fruit ripening stage, have been shown to suppress anthocyanin accumulation. Similarly, salinity stress from soil or irrigation water can disrupt plant metabolism and nutrient uptake, further intensifying the disorder (Sedaghat *et al.*, 2021). The expansion of pomegranate cultivation into warmer, drier regions has been a significant driver of the APD outbreaks. Effective management of APD necessitates an integrated, multi-pronged strategy. The most promising and immediately applicable approach is application of foliar nutrition.

Recent studies have demonstrated that combination of foliar sprays of calcium, iron, and zinc, applied at key fruit developmental stages (fruit set and onset of ripening), can reduce the APD incidence and severity by up to 40% (Karami and Faraji, 2025). This treatment directly addresses the identified physiological and biochemical deficiencies. Complementary agronomic practices include the use of shade nets to mitigate heat stress and sunburn, precise irrigation management to avoid water stress during critical growth stages, and balanced

nitrogen fertilization to prevent excessive vegetative growth that can limit calcium uptake.

For long-term sustainability, the development of tolerant cultivars is paramount. Future research should prioritize several key areas: 1. Development of molecular markers linked to the *UFGT* gene and other quantitative trait loci (QTLs) for tolerance to enable marker-assisted selection (MAS). 2. Development of tolerant cultivars. 3. Investigating the upstream regulatory networks, particularly the MYB-bHLH-WD40 transcription factor complex, which controls anthocyanin biosynthesis and may be disrupted by environmental stresses. 4. Application of high-throughput phenotyping technologies, such as hyperspectral imaging coupled with machine learning, for non-destructive screening of breeding populations (Khademi *et al.*, 2025). 5. Integration of multi-omics approaches (transcriptomics, metabolomics, and proteomics) to build a holistic understanding of the regulatory and metabolic networks involved in the aril paleness disorder.

In conclusion, the APD is a multifaceted disorder rooted in genetic susceptibility, specific molecular dysfunction (*UFGT* suppression), mineral deficiencies, and environmental stresses as high temperature. While advanced foliar nutrition application offers a powerful short-term management tool, long-term solutions lie in breeding for genetic tolerance. A concerted interdisciplinary effort combining precision horticulture, molecular biology, and modern breeding technologies is essential to safeguard the future of pomegranate production under the changing climate conditions.

References

- Asadi, E., Ghehsareh, A.M., Moghadam, E.G., Hodaji, M. and Zabihi, H.R. 2019.** Improving of pomegranate aril paleness disorder through application of Fe and Zn elements. *Indian Journal of Horticulture*, 76(2), pp.279–288. DOI: 10.5958/0974-0112.2019.00043.4
- Karami, S. and Faraji, S. 2025.** The effect of foliar spraying of iron, zinc and calcium in the stages of fruit maturity on the incidence and severity of pomegranate (*Punica granatum* L.) aril paleness. *Journal of Horticultural Science*, 39(1), pp.139–153 (in Persian). DOI: 10.22067/jhs.2024.89090.1366
- Khademi, O., Zarei, A. and Naji, A. 2025.** Molecular basis of aril paleness disorder in pomegranate fruit: Insights from anthocyanin biosynthesis genes. *Tropical Plant Biology*, 18, e70. DOI: 10.1007/s12042-025-09438-9
- Zarei, A., Khademi, O. and Erfani-Moghadam, J. 2024b.** Differential effects of environmental conditions on the commercially important attributes and postharvest quality of pomegranate fruit. *Acta Physiologiae Plantarum*, 46, 104. DOI: 10.1007/s11738-024-03724-x

*Corresponding author: j.erfani@ilam.ac.ir

Tel.: +988432227015

Received: 10 December 2024

Accepted: 23 January 2025



2025© Seed and Plant. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.