



مجله علوم و صنایع غذایی ایران

سایت مجله: www.fsct.modares.ac.ir

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی روند رنگ‌گیری و تغییرات خواص آنتی‌اکسیدانی پنج رقم انار در طی فصل رشد

اورنگ خادمی*^۱، مریم عصمتی^۱، محمدعلی عسکری سرچشمه^۲، عرفان سپهوند^۲

۱- گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران.

۲- گروه مهندسی علوم باغبانی و فضای سبز، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ‌های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۴

تاریخ داوری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۴

کلمات کلیدی:

آنتوسیانین،

انار،

رقم،

رنگ‌گیری،

همبستگی

DOI: 10.48311/fsct.2026.117263.82907

* مسئول مکاتبات:

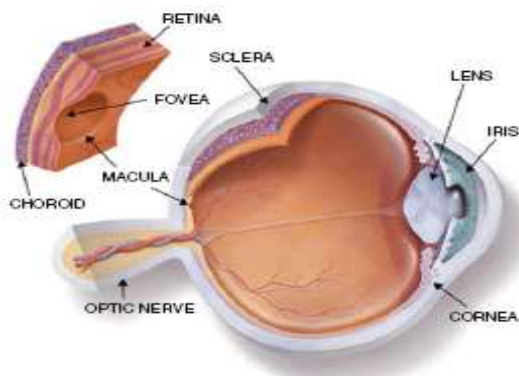
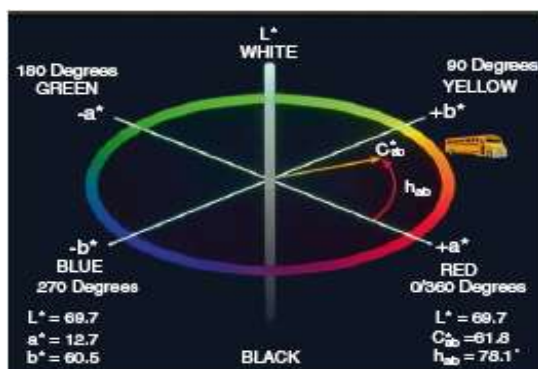
o.khademi@shahed.ac.ir

رنگ قرمز در بیشتر ارقام تجاری انار، شاخص اصلی کیفیت محسوب می‌گردد. مطالعات زیادی نوع و مقدار آنتوسیانین‌ها را در ارقام انار بررسی نموده است، اما تغییرات رنگ‌گیری در ارقام بومی ایران کمتر مورد توجه بوده است. در این پژوهش، تغییرات رنگی و خصوصیات فیزیکی‌شیمیایی پوست و آریل پنج رقم انار بومی ایران (آقا محمدعلی، آلك ترش، پوست سیاه، پوست سفید و شیرین ساوه) در شرایط اقلیمی کرج مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد، با پیشرفت فصل رشد، وزن و قطر میوه در همه ارقام افزایش یافت؛ در این میان؛ رقم پوست سفید بیشترین و رقم پوست سیاه کمترین مقادیر را داشتند. شاخص L^* در آریل همه ارقام روند کاهشی، ولی در پوست آنها روند افزایشی نشان داد. شاخص a^* در آریل و پوست اغلب ارقام (به جز رقم پوست سیاه) روند افزایشی نشان داد و در مراحل پایانی تشدید شد؛ که در نهایت نیز رقم آلك ترش بیشترین a^* را داشت. زاویه هیو در اکثر ارقام روند کاهشی داشت، و رقم پوست سیاه کمترین مقدار را دارا بود. آریل‌های رقم آلك ترش بالاترین مقادیر آنتوسیانین، فنل و آنتی‌اکسیدان را دارا بودند، در حالی که پوست، رقم پوست سیاه بیشترین شدت رنگ را نشان داد. روند تغییرات فنل کل و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در اغلب ارقام افزایشی بود، ولی در رقم پوست سفید در انتهای آزمایش کاهش یافت. مقدار آنتوسیانین آریل در همه ارقام روند افزایشی نشان داد. بررسی ضرایب همبستگی نیز روابط معنی‌داری و مشخصی را بین شاخص‌های رنگ پوست و آریل با یکدیگر و با ترکیبات زیست‌فعال نشان داد.

۱-مقدمه

رنگ، طعم و بافت سه ویژگی اصلی کیفی هستند که پذیرش محصول را تعیین می‌کنند و رنگ تأثیر بسیار بیشتری بر قضاوت مشتری دارد. رنگ یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های بصری در ادراک انسان و تحلیل داده‌های تصویری است و نقش اساسی در تفسیر محیط پیرامون، تصمیم‌گیری شناختی و کنترل کیفیت محصولات ایفا می‌کند. انسان به‌طور طبیعی رنگ را به‌عنوان یکی از معیارهای مهم برای ارزیابی کیفیت مواد غذایی، تازگی محصولات کشاورزی و جذابیت ظاهری درک می‌کند [۱]. انسان‌ها می‌توانند تا ۱۰ میلیون رنگ تشخیص دهند، اما حافظه رنگی ضعیفی دارند. درک رنگ در افراد با دید رنگی طبیعی نسبتاً یکنواخت است، اما ۸ درصد مردان و ۰/۵ درصد زنان نقص فیزیولوژیکی دارند و رنگ‌ها را متفاوت می‌بینند. به‌طور کلی، رنگ حاصل برهمکنش میان منبع نور، جسم و مشاهده‌گر است؛ زمانی که نور مرئی با طول‌موج‌های مختلف بر جسمی می‌تابد، بخشی از آن جذب و بخشی بازتاب می‌شود و ترکیب خاصی از این بازتاب‌ها بر شبکیه چشم انسان می‌افتد. مغز با تفسیر این سیگنال‌ها، رنگ را به‌صورت یک احساس ادراکی ذهنی تجربه می‌کند. چشم انسان یک سیستم پیچیده است که نور را دریافت و پردازش می‌کند تا رنگ‌ها را درک کنیم. نور از قرنیه (cornea) وارد چشم می‌شود، از مایع زلالیه

(aqueous humor) و زجاجیه (vitreous humor) عبور می‌کند و روی شبکیه (retina) تمرکز می‌یابد. در شبکیه چشم انسان دو نوع سلول گیرنده نوری وجود دارد: میله‌ها (Rods) و مخروط‌ها (Cones). ماکولا (macula) بخشی کوچک (حدود ۵ میلی‌متر) و حساس از شبکیه است که مسئول دید مرکزی دقیق است (شکل ۱). این بخش زرد-نارنجی رنگ است و غلظت بالایی از کاروتنوئیدهای لوتئین و زآگزانتین دارد که ممکن است آن را از آسیب نوری محافظت کنند. مرکز ماکولا، فووه‌آ (fovea) است (حدود ۲ میلی‌متر)، که غلظت بالایی از مخروط‌ها را دارد که مسئول دید رنگی در نور روز هستند. سه نوع سلول مخروطی وجود دارد که هر یک به بخشی از طیف نوری حساس هستند: مخروط‌های L (حساس به نور قرمز در محدوده ۵۶۰-۵۸۰ نانومتر)، مخروط‌های M (حساس به نور سبز در محدوده ۵۳۰ نانومتر) و مخروط‌های S (حساس به نور آبی در محدوده ۴۲۰ نانومتر). طبق تئوری رنگ مخالف (Color Opponent Theory)، سیگنال‌های قرمز، سبز و آبی در مغز به یک سیگنال روشنایی (تاریکی-روشنی) و دو سیگنال رنگ (قرمز در برابر سبز، آبی در برابر زرد) تبدیل می‌شوند [۲ و ۳]. همین موارد مذکور مبنای توسعه فضاهای رنگی می‌باشد.



شکل ۱: ساختار چشم در ارتباط با تشخیص رنگ (راست) و فضای رنگی $CIE1976 L^*a^*b^*$ (چپ) (برگرفته از

Wrolstad & Smith, 2017).

یکنواختی نسبی از نظر ادراک رنگ و استقلال از دستگاه، یکی از دقیق‌ترین مدل‌ها برای تحلیل رنگ در صنایع مختلف از جمله کشاورزی و صنایع غذایی محسوب می‌شود [۱، ۴ و ۷]. در واقع رایج‌ترین فضای رنگی مورد استفاده در صنایع غذایی می‌باشد. در ادامه، فضای CIE^* LCH پیشنهاد شد که L^* روشنایی، C^* chroma (شدت) و H^* hue angle (زاویه رنگ) بود. هیو به رنگ اصلی اشاره دارد که انسان به طور غریزی آن را به عنوان "رنگ" می‌شناسد و بر پایه طول‌موج غالب نور است. کروما شدت یا اشباع یک رنگ را نشان می‌دهد که از فرمول‌های زیر بدست می‌آیند [۵]:

$$Hue^\circ = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$$

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

یکی دیگر از فرمول‌های پرکاربرد در خصوص مقایسه رنگ‌ها استفاده از فرمول ΔE می‌باشد که نشان‌دهنده تفاوت عددی بین دو رنگ (دو شی ۱ و ۲ یا یک شی نسبت به استاندارد) در فضای رنگی $CIE L^*a^*b^*$ است. این پارامتر در صنایع غذایی، و کنترل کیفیت برای مقایسه دقیق رنگها استفاده می‌شود. هرچه مقدار ΔE کوچکتر باشد (حدود یک)، دو رنگ شبیه‌ترند؛ و هرچه مقدار بزرگتر باشد (بزرگتر از پنج)، تفاوت دو رنگ بیشتر است [۵].

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{\{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2\}}$$

ایران به‌عنوان خاستگاه اصلی انار (*Punica granatum L.*) یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان و صادرکنندگان این میوه در جهان محسوب می‌شود، و دارای ارقامی با تنوع ژنتیکی و فنوتیپی گسترده است. رنگ پوست و آریل در ارقام انار ایرانی از سفید تا قرمز تیره متغیر بوده و در میان این رنگ‌ها، رنگ قرمز به‌عنوان

فضاهای رنگی برای بیان عددی و مقایسه‌پذیر رنگ‌ها طراحی شده‌اند که هر رنگ را با مجموعه‌ای از مختصات در فضای سه‌بعدی توصیف می‌کنند [۴ و ۵]. این فضاها امکان اندازه‌گیری کمی رنگ، مقایسه نمونه‌ها و پردازش داده‌های تصویری را فراهم می‌سازند. یکی از پایه‌ای‌ترین فضاها رنگی، فضای رنگی RGB است که بر اساس نظریه سه‌رنگی بینایی انسان بنا شده است. هر رنگ در این مدل با ترکیب مقادیری از سه مؤلفه قرمز، سبز و آبی در بازه صفر تا ۲۵۵ تعریف می‌شود و برای نمایش در مانیتورها، دوربین‌ها و سیستم‌های دیجیتال کاربرد دارد. با این حال، به دلیل اینکه این فضای رنگی نسبت به ادراک انسان از رنگ غیرخطی است، فضای رنگی دیگری موسوم به فضای CIE XYZ در سال ۱۹۳۱ توسط کمیسیون بین‌المللی روشنایی (Commission Internationale de l'Éclairage) بر پایه فضای RGB توسعه یافت. در این سیستم، هر رنگ با سه مؤلفه X ، Y و Z بیان می‌شود که نسبت بین سه رنگ قرمز، سبز و آبی را نشان می‌دهند [۶]. این فضا، اگرچه استاندارد شد، اما دارای ضعف در یکنواختی ادراکی است؛ یعنی تغییرات عددی یکنواخت در آن همیشه به تغییرات ادراکی یکنواخت در انسان منجر نمی‌شود. برای بهبود این نکته، ریچارد اس. هانت در دهه ۱۹۵۰-۱۹۶۰، مدل Hunter Lab را ارائه نمود. هرچند مدل Hunter Lab پیشرفت مهمی بود، اما هنوز کامل یکنواخت نبود و در برخی نواحی طیف رنگ (مثلاً رنگ‌های زرد یا آبی اشباع) نقصان‌هایی داشت. بعدها، در سال ۱۹۷۶، کمیسیون CIE فضای رنگی جدیدی موسوم به $CIELAB (L^*a^*b^*)$ را معرفی کرد تا یکنواختی ادراکی را بیشتر بهبود بخشد (تصویر ۲). در فضای LAB، مؤلفه L^* نشان‌دهنده روشنایی یا درخشندگی، a^* محور قرمز-سبز، و b^* محور زرد-آبی است که با ادراک مغز انسان تطابق دارد. این فضا به دلیل

۳۰ مرداد (21 August)، ۲۵ شهریور (16 September) و ۱۵ مهر (7 October) سال ۱۴۰۰ مورد بررسی قرار گرفت. برداشت ارقام کلکسیون انار از مرکز تحقیقات باغبانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در محمدرشته کرج صورت گرفت. مختصات جغرافیایی مکان نمونه‌برداری شامل: طول $50^{\circ} 55' 49'' E$ و عرض $35^{\circ} 46' 36'' N$ و ارتفاع از سطح دریا ۱۳۲۰ متر می‌باشد.

از هر رقم و در هر زمان نمونه‌برداری تعداد نه عدد میوه به عنوان سه تکرار (از یک درخت واحد و در جهات مختلف تاج درخت) برداشت و پس از ارزیابی خصوصیات وزن و قطر میوه، آریل آن‌ها استخراج و عصاره‌گیری شد و برای اندازه‌گیری خصوصیات رنگی و آنتی‌اکسیدانت اختصاص یافت.

وزن میوه توسط دستگاه ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم (AND, Japan) و قطر میوه با استفاده از کولیس دیجیتالی اندازه‌گیری شد.

خصوصیات رنگی $CIE L^*, a^*, b^*$ پوست و آریل با استفاده از دستگاه رنگ سنج مینولتا (مدل CR-300 ساخت کشور ژاپن) اندازه‌گیری و زاویه هیو نیز با استفاده از فرمول مربوطه محاسبه شد [۵].

مقدار آنتوسیانین عصاره آریل با استفاده از روش تفرق pH اندازه‌گیری شد. برای این منظور بافر کلرید پتاسیم ۲۵ میلی مولار با $pH=1$ و بافر استات سدیم ۰/۴ مولار با $pH=4.5$ تهیه شد. عصاره آریل ابتدا در $98.00 \times g$ و دمای چهار درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ شد. مایع رویی جمع‌آوری و مقدار ۰/۵ میلی‌لیتر از آن با ۴/۵ میلی‌لیتر از بافرها مخلوط شده و مقدار جذب هر یک از محلول‌ها در دو طول موج ۵۱۰ و ۷۰۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکترومتر (پرکین‌المر، مدل لامبدا - ۲۵) اندازه‌گیری شد. مقدار آنتوسیانین با استفاده از رابطه ذیل محاسبه شد [۱۵]:

(mg/L) مقدار آنتوسیانین

$$= \frac{[(ABS\ 510nm - ABS700nm)pH\ 1 - (ABS\ 510nm - ABS700nm)pH\ 4.5] \times MW \times DF}{MA}$$

شاخص اصلی کیفیت و پذیرش از سوی مصرف کننده شناخته می‌شود [۸].

رنگ قرمز انار عمدتاً ناشی از وجود آنتوسیانین‌ها (ترکیبات فلاونوئیدی گلیکوزیده‌ای) در پوست و آریل انار می‌باشند [۹]. مطالعات اولیه توسط Du و همکاران [۱۰] نشان داد که انار حاوی شش نوع آنتوسیانین اصلی شامل: سیانیدین ۳-گلوکوزید (cyanidin 3-glucoside)، سیانیدین ۳ و ۵-دی گلوکوزید (cyanidin 3,5-diglucoside)، دلفینیدین ۳-گلوکوزید (delphinidin 3-glucoside)، دلفینیدین ۳ و ۵-دی گلوکوزید (delphinidin 3,5-diglucoside)، پلارگونیدین ۳-گلوکوزید (pelargonidin 3-glucoside)، پلارگونیدین ۳ و ۵-دی گلوکوزید (pelargonidin 3,5-diglucoside) می‌باشند. اگرچه نوع غالب رنگدانه در بافت‌های مختلف، متفاوت گزارش شده است [۱۱ و ۱۲]. در بررسی‌های صورت گرفته روی ارقام انار ایرانی هر شش نوع آنتوسیانین مذکور شناسایی شد ولی تفاوت معنی‌داری در مقدار آنتوسیانین کل و ترکیب اجزای آن بین ارقام مشاهده گردید [۱۳ و ۱۴]. با وجود مطالعات متعدد در زمینه شناسایی و کمی‌سازی آنتوسیانین‌های موجود در انار، اطلاعات محدودی در مورد روند رنگ‌گیری و تغییرات تجمع آنتوسیانین طی رسیدن، به‌ویژه در ارقام بومی ایران، وجود دارد.

از این‌رو، در پژوهش حاضر روند تغییرات رنگ پوست و آریل و همچنین خواص آنتی‌اکسیدانی و خصوصیات فیزیکی پنج رقم انار پرورش‌یافته در شرایط اقلیمی کرج مورد بررسی قرار گرفت.

۲-مواد و روش‌ها

در این آزمایش روند تغییرات رنگ پوست و آریل پنج رقم انار شامل: آقامحمدعلی (Agha M. Ali)، آک ترش (Alake Torsh)، پوست سیاه (Poste Siah)، پوست سفید (Poste Sefid) و شیرین ساوه (Shirine Saveh)

در تاریخ‌های؛ ۱۰ تیر (1 July)، پنجم مرداد (27 July)

عامل اصلی رقم و عامل فرعی زمان نمونه برداری بودند. داده ها پس از بررسی نرمال بودن توسط نرم افزار آماری SAS (نسخه ۹/۳/۱) تجزیه و برای مقایسه اختلاف بین میانگین ها از آزمون حداقل تفاوت معنی دار (Least Significant Difference, LSD)، در سطح احتمال ۰/۵، استفاده شد.

۳- نتایج

۳-۱- وزن و قطر میوه

روند تغییرات وزن و قطر میوه در پنج رقم انار طی دوره رشد از الگوی مشابهی پیروی نمود. به طوری که در تمامی ارقام، با تداوم فصل رشد، بر قطر و وزن میوه ها افزوده شد. در این میان، رقم «پوست سفید» در طول دوره رشد، دارای بیشترین وزن و قطر میوه بود، در حالی که کمترین مقادیر این صفات در رقم «پوست سیاه» اندازه گیری شد. ارقام «شیرین ساوه»، «آقا محمدعلی» و «آلک ترش» از نظر وزن و قطر در سطح متوسطی قرار داشتند، با این حال رقم «شیرین ساوه» در نهایت میوه های بزرگتری در مقایسه با دو رقم دیگر تشکیل داد (شکل ۲).

در این رابطه ABS؛ مقدار جذب نمونه MW؛ وزن مولکولی سیانیدین ۳- گلوکوزید به عنوان آنتوسیانین غالب انار (۴۴۹/۲) df؛ فاکتور رقت (۱۰) MA؛ ضریب جذب مولی آنتوسیانین غالب انار (۲۶/۹۰۰) می باشد.

همچنین مقدار یک گرم از پوست میوه با ۱۰ میلی لیتر متانول اسیدی عصاره گیری شده و پس از سانتریفیوژ میزان جذب نوری ماده رویی در ۵۲۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه گیری شد.

برای سنجش ظرفیت آنتی اکسیدانی به روش DPPH، ابتدا عصاره آریل تهیه، سپس در سانتریفیوژ (۹۸۰۰×g)، چهار درجه سانتی گراد، ۱۵ دقیقه) تفکیک و محلول رویی جمع آوری گردید. برای واکنش، ۱۰ میکرو لیتر از محلول رویی با ۲ میلی لیتر محلول DPPH (۱ mM) مخلوط و به مدت ۴۵ دقیقه در تاریکی نگه داشته شد تا واکنش کامل شود. در نهایت، جذب نوری نمونه ها در ۵۱۵ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر اندازه گیری شده و براساس کاهش جذب نسبت به شاهد، ظرفیت آنتی اکسیدانی محاسبه گردید [۱۵].

۱۰۰ × [میزان جذب محلول DPPH / میزان جذب

نمونه و DPPH] - ۱ = درصد بازدارندگی DPPH

مقدار فنل کل با استفاده از روش فولین سیوکالتو (Folin ciocalteu) اندازه گیری شد [۱۶]. برای این منظور پنج میلی لیتر آب مقطر با ۰/۵ میلی لیتر عصاره میوه مخلوط شد و سپس به محلول حاصل ۰/۵ میلی لیتر معرف فولین سیوکالتو، و پس از گذشت پنج دقیقه ۰/۵ میلی لیتر محلول کربنات سدیم ۲۰٪ اضافه شد. میزان جذب نمونه ها پس از گذشت یک ساعت در طول موج ۷۶۰ نانومتر قرائت شده و مقدار فنل کل بر اساس استاندارد اسید تانیک که همزمان با تهیه نمونه ها تهیه شده بود، محاسبه گردید.

آزمایش به صورت طرح خرد شده در زمان در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار تجزیه و تحلیل شدند.

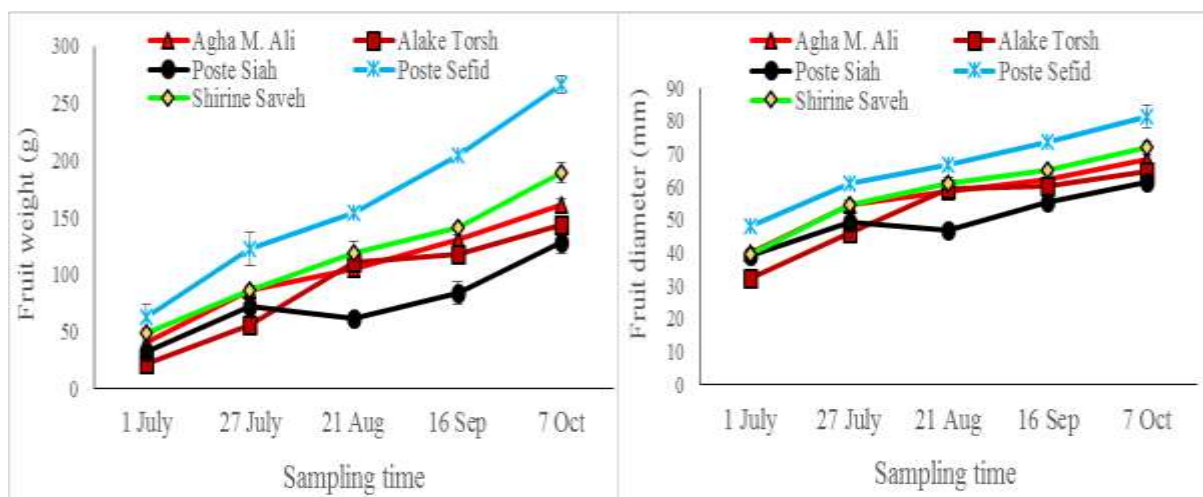


Figure 2 . Changes in weight and diameter of five pomegranate cultivars during growth period in Karaj climatic conditions

۲-۳- خصوصیات رنگی

بر اساس نتایج، در اولین تاریخ برداشت، کمترین مقدار شاخص درخشندگی (L^*) آریل مربوط به رقم «پوست سیاه» بود. همچنین مقدار L^* پوست در رقم «آقا محمدعلی» پایین‌تر از سایر ارقام اندازه‌گیری شد. با تداوم دوره رشد، مقدار L^* آریل در تمامی ارقام روندی کاهشی نشان داد، اگرچه شدت این کاهش در بین ارقام یکسان نبود. در نهایت، در آخرین تاریخ بررسی، کمترین مقدار L^* آریل در رقم «آلک ترش» و بیشترین مقدار آن در رقم «شیرین ساوه» مشاهده شد (شکل ۳).

شاخص L^* پوست در بیشتر ارقام، روند افزایشی را در طول دوره آزمایش نشان داد. در همین راستا، کمترین مقدار این شاخص در تمامی تاریخ‌های برداشت، مربوط به رقم «پوست سیاه» بود. همچنین، مقادیر شاخص L^* پوست در ارقام «پوست سفید» و «شیرین ساوه» به‌طور معنی‌داری بالاتر از ارقام «آلک ترش» و «آقامحمدعلی» در طول دوره رشد بود (شکل ۳).

بررسی شاخص a^* آریل نشان داد که در زمان برداشت اول، تمامی ارقام به‌جز «پوست سیاه» دارای مقادیر منفی این شاخص بودند. در رقم «پوست سیاه» کاهش محسوسی در مقدار این شاخص در طول دوره رشد

مشاهده نشد. در مقابل، مقدار a^* در سایر ارقام در طول دوره رشد افزایش یافت که این افزایش در مرحله پایانی رشد بسیار بارزتر بود. در بین ارقام، «آقا محمدعلی» کمترین مقدار a^* آریل را داشت، در حالی که بین سایر ارقام تفاوت معنی‌داری از نظر این شاخص مشاهده نشد (شکل ۳).

مقدار شاخص a^* پوست در رقم «پوست سیاه»، علیرغم نوسانات جزئی، تغییر محسوسی در طول دوره رشد نشان نداد. در مقابل، این شاخص در سایر ارقام روند افزایشی داشت که بیشترین مقدار نهایی آن در رقم «آلک ترش» و کمترین مقدار در رقم «پوست سفید» ثبت شد. لازم به ذکر است که مقادیر a^* در ارقام «پوست سفید» و «شیرین ساوه» تا تاریخ برداشت ۲۵ شهریور منفی باقی ماند که نشان‌دهنده حفظ رنگ سبز در پوست این دو رقم تا این مرحله از رشد بود و در انتهای آزمایش مثبت شد (شکل ۳).

از نظر زاویه هیو آریل، رقم «پوست سیاه» در مقایسه با سایر ارقام دارای کمترین مقدار بود و در طول دوره رشد نیز بر مقدار آن افزوده شد. در مقابل، زاویه هیو آریل در سایر ارقام کاهش مداومی را نشان داد که این کاهش در نزدیکی زمان رسیدگی بسیار بارزتر بود. با این حال، در بیشتر تاریخ‌های برداشت، اختلافات معنی‌داری از نظر این

شاخص بین ارقام دیگر مشاهده نشد (شکل ۳).

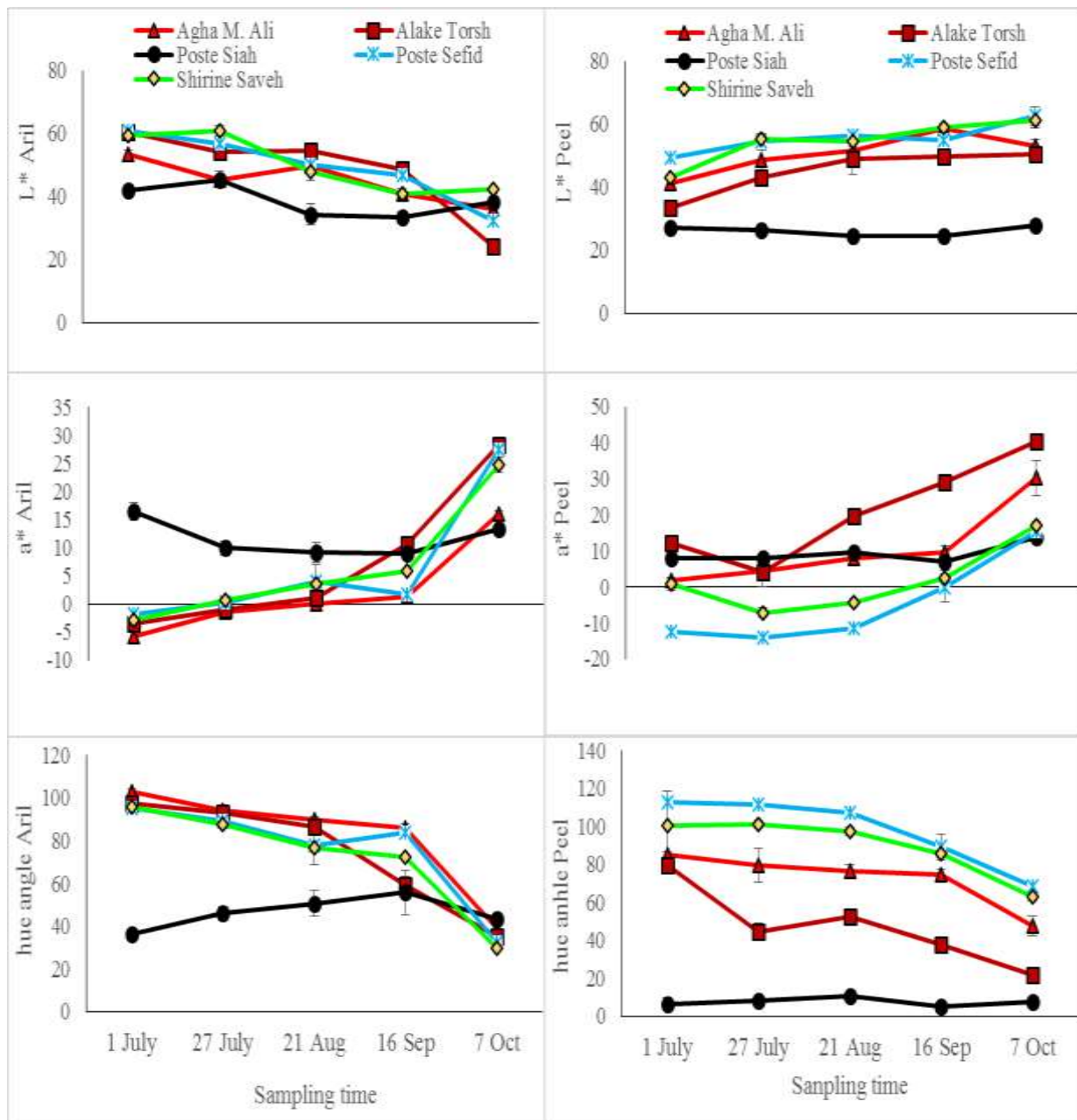


Figure 3. Changes in color characteristics (L^* , a^* , hue°) of aril and peel of five pomegranate cultivars during growth period in Karaj climatic conditions

مقدار متعلق به رقم «آلک ترش» بود. همچنین مقدار زاویه هیو پوست در رقم «شیرین ساوه» به طور معنی داری بیشتر از رقم «آقا محمدعلی» ثبت شد (شکل ۳).

۳-۳- مقدار آنتوسیانین

به دلیل آبدار نبودن آریل‌ها، اندازه‌گیری آنتوسیانین عصاره (و همچنین ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و فنل کل) در تاریخ ۱۰ تیرماه امکان‌پذیر نبود. در تاریخ ۵ مردادماه نیز

نتایج همچنین نشان داد، کمترین زاویه هیو پوست در تمامی مراحل رشد مربوط به رقم «پوست سیاه» بود که مقدار آن در طول دوره رشد تغییر محسوسی نداشت. در مقابل، زاویه هیو پوست در سایر ارقام روند کاهشی پیوسته‌ای را نشان داد. در بین این ارقام، بیشترین مقدار نهایی این شاخص متعلق به رقم «پوست سفید» و کمترین

تنها نمونه‌های رقم «پوست سفید» دارای عصاره قابل استخراج بودند. پس از این تاریخ، تمامی نمونه‌ها قابل ارزیابی شدند.

بررسی محتوای آنتوسیانین عصاره آریل نشان داد که با وجود روند افزایشی این شاخص در تمامی ارقام، تفاوت‌های معنی‌دار بین ارقام تا تاریخ ۲۵ شهریور محدود بود. با این حال، بیشترین افزایش در محتوای آنتوسیانین در مرحله پایانی رشد در تمامی ارقام مشاهده شد. در پایان دوره آزمایش، ارزیابی‌ها نشان داد که رقم «آلک ترش» به طور معنی‌داری بیشترین و رقم «آقا محمدعلی» کمترین مقدار آنتوسیانین را در بین ارقام مورد مطالعه دارا بودند. همچنین، اگرچه مقدار آنتوسیانین در رقم «شیرین ساوه» به طور معنی‌داری بیشتر از ارقام «پوست سفید» و «پوست سیاه» بود، اما بین این دو رقم اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۴ و ۵).

بر اساس نتایج، شدت رنگ عصاره پوست در تمامی ارقام به تدریج در طول دوره رشد افزایش یافت. در این میان، رقم «پوست سیاه» به طور قابل توجهی دارای بیشترین شدت رنگ در بین تمامی ارقام مورد مطالعه بود. همچنین، رقم «آلک ترش» نیز شدت رنگ عصاره پوست بیشتری در مقایسه با سه رقم دیگر (پوست سفید، آقا محمدعلی و شیرین ساوه) نشان داد (شکل ۴ و ۵).

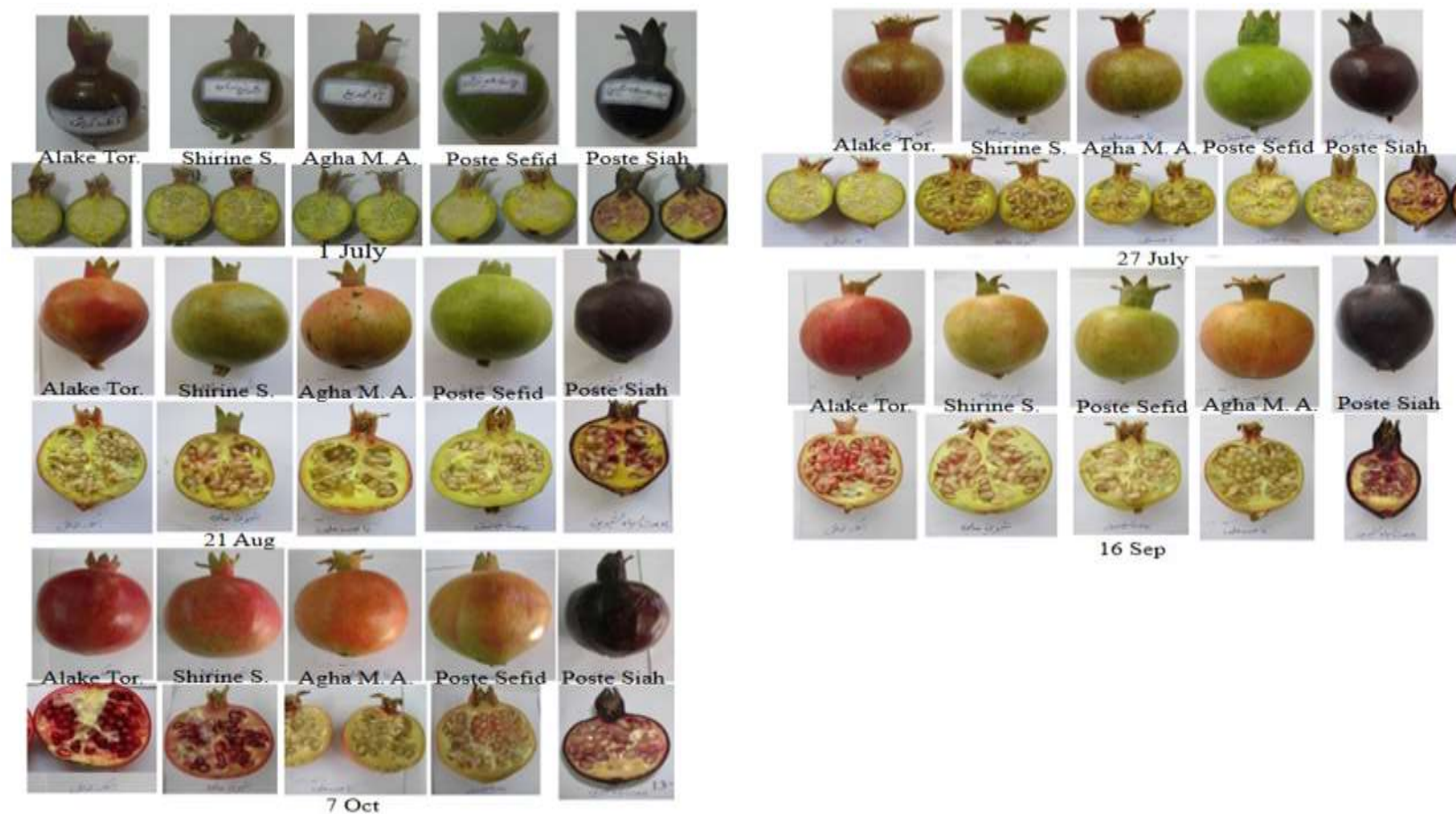


Figure 4. Changes in aril and peel color of five pomegranate cultivars during growth period in Karaj climatic conditions

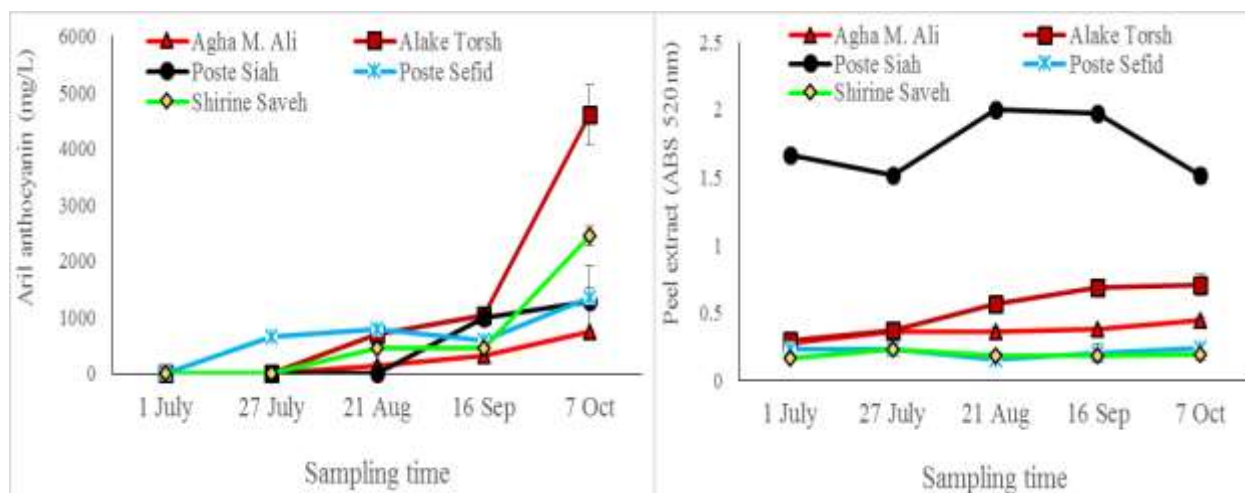


Figure 5. Changes in aril anthocyanin content and peel extract color intensity of five pomegranate cultivars during the growth period under Karaj climatic conditions.

معنی‌داری بین این سه رقم مشاهده نشد (شکل ۶).

الگوی تغییرات محتوای فنل کل عصاره آریل‌ها در ارقام مختلف مشابه با ظرفیت آنتی‌اکسیدانی بود. به‌طوری‌که در تمامی ارقام به‌جز «پوست سفید»، مقدار فنل کل با گذشت زمان افزایش یافت و بیشترین مقدار در طول دوره آزمایش در رقم «آلک ترش» ثبت شد. در رقم «پوست سفید»، مقدار فنل کل در طول فصل روند افزایشی داشت، اما در انتهای فصل با کاهش چشمگیری مواجه شد. ارقام «آقا محمدعلی» و «شیرین ساوه» در طول فصل دارای محتوای فنل کل بیشتری نسبت به رقم «پوست سیاه» بودند، اما در انتهای فصل، رقم «پوست سیاه» مقدار فنل کل بیشتری را نشان داد (شکل ۶).

۴-۳- مقدار فنل کل و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی عصاره آریل انار

با گذشت زمان نمونه‌برداری، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در تمامی ارقام افزایش معنی‌داری نشان داد. در این میان، بالاترین میزان این صفت در عصاره آریل رقم «آلک ترش» اندازه‌گیری شد. رقم «پوست سفید» نیز اگرچه در مقایسه با سایر ارقام از ظرفیت آنتی‌اکسیدانی بالاتری برخوردار بود، اما برخلاف روند افزایشی عمومی، در انتهای دوره رشد کاهش چشمگیری را در این شاخص از خود نشان داد. ارقام «آقا محمدعلی» و «شیرین ساوه» در طول فصل، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی بیشتری را نسبت به رقم «پوست سیاه» نشان دادند؛ با این حال، در پایان فصل رشد، تفاوت

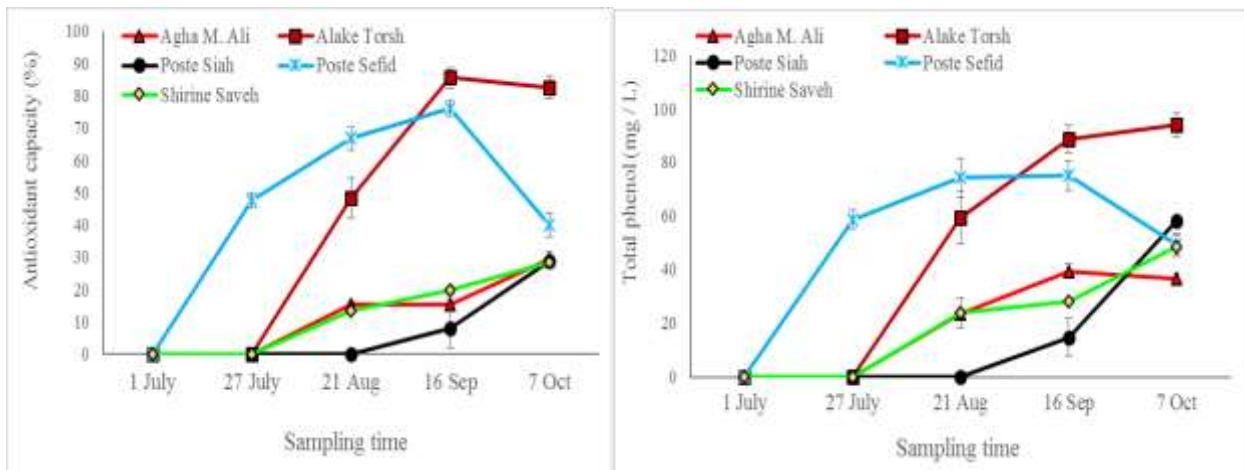


Figure 6. Changes in total phenols and antioxidant capacity of aril extracts of five pomegranate cultivars during growth period in Karaj climatic conditions

معنی دار ($r \approx -0.55$) ولی با L^* ($r \approx 0.64$) و زاویه هیو

($r \approx 0.7$) آریل همبستگی مثبت معنی دار نشان داد.

شاخص های رنگ آریل و پوست ارتباط معنی داری با ترکیبات بیوشیمیایی میوه نشان دادند. به طوری که مقدار آنتوسیانین با a^* آریل ($r \approx 0.75$) و a^* پوست ($r \approx 0.61$) همبستگی مثبت معنی دار، ولی با L^* ($r \approx -0.61$) و زاویه هیو آریل ($r \approx -0.6$) همبستگی منفی معنی دار نشان داد. سایر موارد معنی دار نبود. ظرفیت آنتی اکسیدان فقط با شاخص L^* پوست ($r \approx 0.43$) همبستگی مثبت معنی دار نشان داد و ارتباط مشخصی با سایر خصوصیات رنگ نشان نداد. مقدار فنل کل با شاخص a^* ($r \approx 0.41$) و L^* پوست ($r \approx 0.45$) و a^* آریل ($r \approx 0.48$) همبستگی مثبت معنی دار نشان داد. رنگ عصاره پوست نیز با شاخص L^* آریل ($r \approx -0.49$) و L^* پوست ($r \approx -0.85$) و زاویه هیو آریل ($r \approx -0.52$) و زاویه هیو پوست ($r \approx -0.87$) رابطه منفی معنی دار نشان داد، ولی با سایر خصوصیات رنگ ارتباط مشخصی نشان نداد.

بین خصوصیات ظرفیت آنتی اکسیدان، فنل کل و آنتوسیانین با یکدیگر و با وزن میوه همبستگی مثبت و معنی داری مشاهده شد. همچنین وزن میوه با شاخص رنگ L^* پوست ($r \approx 0.67$) و a^* آریل ($r \approx 0.57$) همبستگی مثبت معنی دار ولی با L^* ($r \approx -0.47$) و زاویه هیو آریل ($r \approx -0.44$) همبستگی منفی معنی دار نشان داد.

۳-۵- همبستگی بین صفات

نتایج همبستگی پیرسون بین صفات در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج همبستگی پیرسون بین صفات رنگ پوست و آریل انار نشان داد که روابط معنی داری میان مؤلفه های مختلف رنگ وجود داشت. در پوست میوه؛ بین شاخص a^* و زاویه هیو همبستگی منفی معنی دار مشاهده شد ($r \approx -0.63$)، به طوری که با افزایش شاخص a^* پوست (افزایش رنگ قرمز)، زاویه هیو کاهش یافت. همچنین شاخص L^* با زاویه هیو همبستگی مثبت معنی دار نشان داد ($r \approx 0.69$) که بیانگر کاهش زاویه هیو با کاهش شاخص L^* بود.

در آریل ها، روابط همبستگی قوی تری بین شاخص های رنگ مشاهده شد. به طوری که همبستگی بین شاخص a^* و زاویه هیو منفی و معنی دار ($r \approx -0.95$) بود. همچنین بین شاخص L^* و زاویه هیو همبستگی مثبت معنی دار ($r \approx 0.80$) مشاهده شد. علاوه بر این، شاخص L^* با شاخص a^* همبستگی منفی معنی دار ($r \approx -0.8$) نشان داد. بررسی روابط بین شاخص های رنگ در پوست و آریل نشان داد که a^* پوست با L^* ($r \approx -0.61$) و زاویه هیو آریل ($r \approx -0.6$) همبستگی منفی معنی دار ولی با a^* آریل همبستگی مثبت معنی دار ($r \approx 0.65$) نشان داد. در مقابل، زاویه هیو پوست با شاخص a^* آریل همبستگی منفی

Table 1. The Pearson correlation among the different Pomegranate cultivars traits

	Peel Color	Hue Peel	a* Peel	L* Peel	Hue* Aril	a* Aril	L* Aril	Total Phenol	Antioxidant	Anthocyanin	Fruit Weight
Fruit Weight	-0.309	0.126	0.232	<u>0.665**</u>	<u>-0.436*</u>	<u>0.567**</u>	<u>-0.47*</u>	<u>0.702**</u>	<u>0.644**</u>	<u>0.513**</u>	1
Anthocyanin	0.006	-0.272	<u>0.612**</u>	0.247	<u>-0.577**</u>	<u>0.743**</u>	<u>-0.604**</u>	<u>0.695**</u>	<u>0.636**</u>	1	
Antioxidant	-0.193	0.01	0.372	<u>0.433*</u>	-0.26	0.387	-0.278	<u>0.968**</u>	1		
Total Phenol	-0.171	-0.026	<u>0.402*</u>	<u>0.451*</u>	-0.324	<u>0.447*</u>	-0.352	1			
L* Aril	<u>-0.485*</u>	<u>0.639**</u>	<u>-0.609**</u>	0.098	<u>0.790**</u>	<u>-0.788**</u>	1				
a* Aril	0.306	<u>-0.544**</u>	<u>0.644**</u>	0.059	<u>-0.95**</u>	1					
Hue Aril	<u>-0.522**</u>	<u>0.690**</u>	<u>-0.599**</u>	0.162	1						
L* Peel	<u>-0.846**</u>	<u>0.685**</u>	-0.072	1							
a* Peel	0.248	<u>-0.627**</u>	1								
Hue Peel	<u>-0.87**</u>	1									
Peel Color	1										

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

۴- بحث

بیشتر ارقام تجاری انار در ایران دارای رنگ قرمز هستند و این رنگ به عنوان شاخصی از کیفیت در میان مصرف کنندگان شناخته می شود [۱۷]. در آزمایش حاضر نیز، به جز رقم پوست سیاه، سایر ارقام با شاخص رنگ قرمز مشخص می شوند. شاخص رنگ a^* در محدوده مثبت نشان دهنده رنگ قرمز است. از سوی دیگر، افزایش شدت رنگ قرمز در میوه ها معمولاً با کاهش زاویه هیو و کاهش شاخص رنگ L^* همراه است [۱۸]. بر اساس نتایج این پژوهش، رقم آلك ترش بیشترین شدت رنگ را در میان ارقام بررسی شده داشت و رقم شیرین ساوه نیز رنگ گیری مطلوبی نشان داد. در مقابل، رقم آقامحمدعلی در شرایط اقلیمی کرج رنگ گیری مناسبی نداشت. در همین حال، رقم پوست سفید نیز در نهایت آریل هایی با رنگ قرمز ایجاد کرد.

نتایج آزمایش همچنین به وضوح نشان داد که روند رنگ گیری پوست و آریل در رقم پوست سیاه با سایر ارقام تفاوت مشخصی دارد. رنگ گیری در پوست و آریل این رقم در مراحل اولیه رشد بیشتر از سایر ارقام بود، اما در ادامه فصل رشد تغییر قابل توجهی نشان نداد. در حالی که در سایر ارقام، رنگ گیری پوست و آریل با پیشرفت فصل رشد افزایش یافته و به ویژه در مراحل پایانی رشد تغییرات چشمگیری مشاهده شد. علاوه بر این، رنگ گیری پوست معمولاً زودتر از آریل آغاز شد و رنگ گیری آریل در مراحل پایانی رشد و با خنک شدن هوا شدت یافت که این موضوع اهمیت دمای پایین در فرایند رنگ گیری انار را نشان می دهد [۱۹].

الگوهای متفاوت رنگ گیری می تواند ناشی از دو عامل باشد: نخست، تفاوت در نوع آنتوسیانین های موجود در رقم پوست سیاه نسبت به سایر ارقام، و دوم، تفاوت در نوع آنتوسیانین های موجود در پوست و آریل ارقام قرمز رنگ. در پژوهشی مشابه، Hernández و همکاران [۱۹] الگوی رنگ گیری پنج کلون انار در اسپانیا را بررسی کردند و نشان دادند که هر پنج رقم از نظر روند تجمع آنتوسیانین در طول رشد و نمو مشابه اند، هرچند از نظر مقدار آنتوسیانین ها

تفاوت معنی داری با یکدیگر دارند. همچنین مشخص شد که میوه های بخش شمالی درخت دارای آنتوسیانین بیشتری نسبت به میوه های بخش جنوبی هستند؛ علت این پدیده، خنک تر بودن نسبی هوای بخش شمالی و اثر مثبت دمای پایین بر تجمع آنتوسیانین عنوان شد.

Zhao و همکاران [۱۲] نیز بیان ژن های درگیر در مسیر بیوسنتزی آنتوسیانین را در پوست دو رقم انار سفید و قرمز بررسی کرده و گزارش دادند که تفاوت عمده در ارقام پوست سفید، فقدان فعالیت آنزیم آنتوسیانیدین سنتاز است که منجر به عدم تجمع آنتوسیانین های رنگی در پوست می شود. در پژوهشی دیگر، Ben-Simhon و همکاران [۹] با مقایسه آریل ارقام قرمز و سفید انار نشان دادند که عدم بیان ژن کلیدی آنتوسیانیدین سنتاز، عامل اصلی سفید بودن آریل در ارقام سفید است. بنابراین، تفاوت در الگوی رنگ گیری بین ارقام مختلف و یا میان پوست و آریل یک رقم خاص می تواند ناشی از تفاوت در سطح بیان ژن های مرتبط با مسیر بیوسنتز آنتوسیانین باشد، که بررسی دقیق تر آن ضروری به نظر می رسد.

افزایش محتوای فنل کل و ظرفیت آنتی اکسیدانی در طی رشد میوه، هم راستا با روند تجمع آنتوسیانین ها و تشدید رنگ قرمز در اغلب ارقام مشاهده شد. این همبستگی بیانگر آن است که ترکیبات فنلی، به ویژه آنتوسیانین ها، نقش اصلی را در تعیین ظرفیت آنتی اکسیدانی میوه ایفا می کنند [۲۰]. در رقم «آلك ترش» که بیشترین شدت رنگ و بالاترین مقدار آنتوسیانین را داشت، مقادیر فنل کل و فعالیت آنتی اکسیدانی نیز در بالاترین سطح قرار گرفت، که نشان دهنده رابطه مثبت میان مسیرهای بیوسنتزی رنگدانه ها و ترکیبات فنلی است. از سوی دیگر، در رقم «پوست سفید» با وجود ظرفیت آنتی اکسیدانی نسبتاً بالا در مراحل ابتدایی، کاهش این شاخص ها در پایان فصل نشان می دهد که پایداری ترکیبات فنلی در این رقم کمتر بوده و احتمالاً به دلیل ضعف در مسیر سنتز آنتوسیانین ها و عدم حفاظت از سایر ترکیبات آنتی اکسیدانی در مراحل نهایی رشد است [۸]. تفاوت میان ارقام از نظر روند تغییرات فنل و آنتی اکسیدان می تواند ناشی

نشان دادند. این روابط، امکان ارزیابی غیرمستقیم برخی ترکیبات زیست فعال انار (مانند آنتوسیانین) را از طریق ویژگی‌های ساده رنگ فراهم می‌کند.

دسترس‌ی به داده‌ها

تمامی داده‌های این مقاله، در صورت درخواست، از طریق نویسنده مسئول در دسترس خواهند بود.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تعارض مالی یا روابط شخصی تأثیرگذار بر نتایج این پژوهش وجود ندارد.

حمایت مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی قابل ذکر دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

اورنگ خادمی: طراحی پژوهش، راهنمایی، اجرای آزمایش‌ها و جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل داده‌ها، آماده‌سازی و نگارش نسخه اولیه مقاله. مریم عصمتی: اجرای آزمایش‌ها و جمع‌آوری داده‌ها. محمدعلی عسگری سرچشمه: تأمین نمونه‌های گیاهی و بازمینی و ویرایش مقاله. عرفان سپهوند: تأمین نمونه‌های گیاهی، همکاری در روش‌شناسی و بازمینی و ویرایش مقاله.

۳-منابع

- [1] Mora, M., Oyarce, M., and Fredes, C. (2013). Fruit maturity estimation based on color scales. Universidad Católica del Maule.
- [2] Berns, R. S. (2000). Billmeyer and Saltzman's principles of color technology (3rd ed.). Wiley.
- [3] Wrolstad, R. E., and Smith, D. E. (2017). Color analysis. In S. Nielsen (Ed.), Food analysis (pp. 545–556). Springer International Publishing.
- [4] Durmus, D. (2020). CIELAB color space boundaries under theoretical spectra and 99 test color samples. Color Research & Application, 45(5), 796–802.
- [5] Waskale, H. S., and Bhong, M. G. (2017). Experimental RGB and CIE L*a*b* colour space analysis and comparison for fruits and vegetables.

از تفاوت‌های ژنتیکی در بیان ژن‌های مسیر فنیل پروپانویید و بیوستنز آنتوسیانین باشد. همچنین، به نظر می‌رسد شرایط محیطی، به‌ویژه کاهش دما در مراحل انتهایی رشد، علاوه بر تحریک سنتز آنتوسیانین، موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های درگیر در مسیر تولید ترکیبات فنلی و در نتیجه ارتقای ظرفیت آنتی‌اکسیدانی می‌شود. بنابراین، الگوی تغییرات فنل و آنتی‌اکسیدان نه تنها با رنگ‌گیری همبستگی دارد، بلکه می‌تواند شاخصی از سلامت متابولیکی میوه و توان دفاعی آن در برابر تنش‌های محیطی محسوب شود [۸ و ۲۰].

۵-نتیجه‌گیری نهایی

یافته‌های آزمایش نشان داد که الگوی رنگ‌گیری و تجمع ترکیبات زیست‌فعال در ارقام مختلف انار بومی ایران متفاوت بوده و تحت تأثیر رقم و شرایط اقلیمی قرار دارد. رقم آلك ترش با بیشترین مقدار آنتوسیانین و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، از نظر رنگ‌پذیری و ارزش تغذیه‌ای برتر بود، در حالی‌که رقم پوست‌سیاه الگوی رنگ‌گیری متفاوتی داشت. همچنین مشخص شد که رنگ‌گیری پوست زودتر از آوریل آغاز می‌شود و دمای پایین در مراحل پایانی رشد موجب افزایش شدت رنگ قرمز می‌گردد. به‌طور کلی، تفاوت‌های ژنتیکی در مسیر بیوستنز آنتوسیانین نقش مهمی در تنوع رنگ ارقام مختلف انار دارد. همچنان بر اساس نتایج این پژوهش شاخص‌های رنگ پوست و آوریل انار، به‌ویژه a^* ، شاخص‌های قابل اعتمادی برای پیش‌بینی کیفیت میوه

- Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR), 4(4), 1–6.
- [6] Wright, W. D. (1971). The measurement of color. Van Nostrand Reinhold.
- [7] Phakade, S. V., D'Souza, F. M., Halade, M. T., and Joshi, R. S. (2014). Automatic fruit defect detection using HSV and RGB color space model. International Journal of Innovative Research in Computer Science & Technology (IJIRCST), 2(3), 67–74.
- [8] 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(1), 70.

- [9] Ben-Simhon, Z., Judeinstein, S., Trainin, T., Harel-Beja, R., Bar-Ya'akov, I., Borochoy-Neori, H., and Holland, D. (2015). A "white" anthocyanin-less pomegranate (*Punica granatum* L.) caused by an insertion in the coding region of the Leucoanthocyanidin Dioxygenase (LDOX; ANS) gene. *PLoS One*, 10(11), e0142777.
- [10] Du, C. T., Wang, P. L., and Francis, F. J. (1975). Anthocyanins of pomegranate (*Punica granatum*). *Journal of Food Science*, 40, 417–418.
- [11] Fischer, U. A., Carle, R., and Kammerer, D. R. (2011). Identification and quantification of phenolic compounds from pomegranate (*Punica granatum* L.) peel, mesocarp, aril and differently produced juices by HPLC-DAD-ESI/MS. *Food Chemistry*, 127, 807–821.
- [12] Zhao, X., Yuan, Z., Feng, L., and Fang, Y. (2015). Cloning and expression of anthocyanin biosynthetic genes in red and white pomegranate. *Journal of Plant Research*, 128, 687–696.
- [13] Alighourchi, H., Barzegar, M., and Abbasi, S. (2008). Anthocyanins characterization of 15 Iranian pomegranate (*Punica granatum* L.) varieties and their variation after cold storage and pasteurization. *European Food Research and Technology*, 227, 881–887.
- [14] Mousavinejad, G., Emam-Djomeh, Z., Rezaei, K., and Haddad Khodaparast, M. H. (2009). Identification and quantification of phenolic compounds and their effects on antioxidant activity in pomegranate juices of eight Iranian cultivars. *Food Chemistry*, 115, 1274–1278.
- [15] Ashtari, M., Khademi, O., Soufbaf, M., Afsharmanesh, H., and Sarcheshmeh, M.A. (2019). Effect of gamma irradiation on antioxidants, microbiological properties and shelf life of pomegranate arils cv. 'Malas Savch'. *Scientia Horticulturae*, 244, 365–71.
- [16] Sayyari, M., Babalar, M., Kalantari, S., Martínez-Romero, D., Guillén, F., Serrano, M., and Valero, D. (2011). Vapour treatments with methyl salicylate or methyl jasmonate alleviated chilling injury and enhanced antioxidant potential during postharvest storage of pomegranates. *Food Chemistry*, 124(3), 964–970.
- [17] Meighani, H., Ghasemnezhad, M., and Bakshi, D. (2014). Evaluation of biochemical composition and enzyme activities in browned arils of pomegranate fruits. *International Journal of Horticultural Science and Technology*, 1(1), 53–65.
- [18] Lancaster, J. E., Lister, C. E., Reay, P. F., and Triggs, C. M. (1997). Influence of pigment composition on skin color in a wide range of fruit and vegetables. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 122(4), 594–598.
- [19] Hernández, F., Melgarejo, P., and Tomás-Barberán, F. A. (1999). Evolution of juice anthocyanins during ripening of new selected pomegranate (*Punica granatum*) clones. *European Food Research and Technology*, 210, 39–42.
- [20] Zarei, A., Khademi, O., and Erfani-Moghadam, J. (2024). Differential effects of environmental conditions on the commercially important attributes and postharvest quality of pomegranate fruit. *Acta Physiologiae Plantarum*, 46(11), 104.



Scientific Research

Investigation of the Color Development Process and Changes in Antioxidant Properties of Five Pomegranate Cultivars During the Growing Season

Orang Khademi^{*1}, Maryam Esmati¹, Mohammad Ali Askari Sarcheshmeh² and Erfan Sepahvand²

1–Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, Shahed University, Tehran, Iran

2–Department of Horticultural Science and Landscape Architecture, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received: 2025/10/26

Review: 2026/02/14

Accepted: 2026/03/15

Keywords:

Anthocyanin,

color development,

correlation,

cultivar,

pomegranate

DOI: 10.48311/fsct.2026.117263.82907

*Corresponding Author E-

o.khademi@shahed.ac.ir

Red color is considered the main quality index in most commercial pomegranates. Many studies have investigated the type and concentration of anthocyanins in pomegranate cultivars; however, changes in color development in Iranian native cultivars have received less attention. In this study, color changes and physicochemical properties of the peel and arils of five native Iranian cultivars (Agha Mohammad Ali, Alak-e Torsh, Pooste Siah, Pooste Sefid, and Shirin-e Saveh) were evaluated under the climatic conditions of Karaj. Results showed that as the growing season progressed, fruit weight and diameter increased in all cultivars; among them, Pooste Sefid exhibited the highest values, while Pooste Siah showed the lowest. The L* index of arils decreased in all cultivars, whereas it increased in the peel. The a* index of arils and peel increased in most cultivars, except Pooste Siah, and intensified in the final stages, with Alak-e Torsh ultimately exhibiting the highest a* value. The hue angle decreased in most cultivars, with Pooste Siah showing the lowest values. Arils of Alak-e Torsh contained the highest levels of anthocyanins, phenolic compounds, and antioxidant capacity, whereas the peel of Pooste Siah showed the greatest color intensity. Trends of total phenol and antioxidant capacity increased in most cultivars, but decreased in Pooste Sefid at the end of the experiment. Anthocyanin of arils increased in all cultivars during fruit development. Correlation analysis also revealed significant and distinct relationships among peel and aril color indices, as well as between these indices and bioactive compounds.