

نقش رنگدانه‌ها و ساز و کارهای احتمالی درگیر در تغییر رنگ برگ گیاهان و اهمیت آن در فضای سبز

فرهمند همایون^{*}، مهدیخانی نجمه

بخش علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان.

✉ ^{*} homayoun.farahmnad@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۳/۰۶، تاریخ بررسی مجدد: ۱۳۹۴/۰۸/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۱/۲۳

چکیده

رنگدانه‌های گیاهی ترکیباتی شیمیایی هستند که نور را در طیف قابل دیدن دریافت و یا بازتاب می‌کنند. چهار گروه مهم رنگدانه های گیاهی کلروفیل‌ها، آنتوسیانین‌ها، کارتنوئیدها و بتالائین‌ها هستند. تغییر رنگ برگ‌ها یکی از پدیده‌های شگفت انگیز روی کره زمین است که به ویژه در فصل پاییز مناطق سردسیر و معتدله، بسیار تماشایی است. تغییر رنگ برگ‌ها تنها محدود به گیاهان خزان دار نمی‌شود، بلکه در گیاهان همیشه سبز و برگ‌های نورسته گیاهان خزان‌دار و همیشه سبز نیز دیده می‌شود. تغییر رنگ، پیامد رخدادهایی بسیار پیچیده، هماهنگ و پویا است که با دریافت پیام‌هایی مانند کوتاه شدن طول روز، کاهش دما و افزایش طول موج‌های آبی و پرتو فرابنفش در پاییز آغاز می‌شود و با تغییرات گسترده در سطح سلولی، مولکولی و سرانجام تغییر در بیان ژن‌ها ادامه می‌یابد. برهمکنشی چندین عامل مانند ژنتیک، مرحله رشد و نمو گیاه، سن برگ، طول روز، دما، نور، پرتو فرابنفش، رطوبت نسبی، ارتفاع از سطح دریا، هورمون‌های گیاهی، کربوهیدرات‌ها، مواد معدنی، ترکیب رنگدانه‌ها، رنگدانه‌های کمکی، یون‌های فلزی، pH تغییرات رنگ برگ را تعیین می‌کنند. کاهش تولید اکسین، افزایش تولید اتیلن و آبسزیک اسید و نیز کاهش مقدار نیتروژن و فسفر از تغییرات درونی هستند که هنگام تغییر رنگ برگ‌ها به ویژه در پاییز دیده می‌شود. اگرچه تغییر رنگ برگ در گونه‌های گیاهی خزان‌دار در ارتباط با فرایند پیری است، اما این فرایند الزاما مربوط به پیری نیست. به طور کلی، پذیرفته شده است که تغییر رنگ برگ‌ها در گیاهان با ساز و کارهای سازگاری گیاهان در برابر تنش‌های گوناگون مانند تنش نوری، پرتو فرابنفش، دمای پایین و بالا، گیاهخواری در ارتباط است. گونه‌های گیاهی به ویژه درختان و درختچه‌های دارای برگ رنگی و یا خزان زیبا، از دیدگاه زیباشناختی بسیار ارزشمند هستند و به طور گسترده‌ای برای اهداف طراحی فضای سبز به کار می‌روند. بنابراین، تغییر رنگ برگ گونه‌های گیاهی از دیدگاه اقتصادی اهمیت فراوان دارد و در بخشی از مناطق معتدله جهان، درآمد زیادی به دلیل اهمیت گردشگری جنگل‌های خزان دار به دست می‌آید.

کلمات کلیدی: پردیسه، رنگ برگ، رنگدانه‌های گیاهی.

قراردارند (Davies 2004; Tanaka et al, 2008,)
 (Mlodzinska 2009, Gandia Hererro, et al. 2013).

جدول ۱- رنگدانه‌های مهم گیاهان و انواع آنها به همراه طیف رنگی ایجاد شده (Davies 2004).		
رنگدانه	انواع معمولی	رنگ‌های معمول ایجاد شده
بتالائین‌ها	بتاسیانین‌ها و بتازانتین‌ها	زرد، نارنجی، قرمز، بنفش
کارتونوئیدها	کاروتن‌ها و زانتوفیل‌ها	زرد، نارنجی، صورتی، قرمز، سبز
کلروفیل‌ها	کلروفیل	سبز
فلاونوئیدها	آنتوسیانین‌ها، آرون‌ها، کالکون‌ها، فلاونول‌ها، پیش آنتوسیانیدین‌ها	زرد، قرمز، آبی، بنفش

نقش رنگ در زندگی انسان‌ها

انسان‌ها رابطه بسیار تنگاتنگی با رنگ دارند. رنگ یکی از عمیق‌ترین رمز و رازها را ایجاد می‌کند و دارای قدرتی زیاد در افزایش احساسات و عواطف است (کافی و خان سفید، ۱۳۸۷). حضور رنگ در بخش‌های مختلف زندگی را نمی‌توان انکار کرد، زیرا که بر اندیشه، روابط و احساسات انسان‌ها تاثیر فراوان دارد (نوری و همکاران، ۱۳۸۷). رنگ در طراحی فضای سبز نیز از اهمیت فراوانی برخوردار است و به نظر می‌رسد که در طراحی فضای سبز و پردیسه در دنیای کنونی، نیاز بیشتری به رنگ است (Xu 2013). طراحان فضای سبز با توجه به اصول روانشناسی رنگ‌ها، زیرساخت فرهنگی و اجتماعی، دانش بومی و برخی ویژگی‌های دیگر از رنگ‌های گوناگون در طراحی فضای سبز بهره می‌گیرند. بنابراین، رنگدانه‌های گیاهی که رنگ‌های گوناگون

گیاهان بیش از ۲۰۰۰۰۰۰ فراورده^۱ تولید می‌کنند که بسیاری از این فراورده‌ها رنگی هستند و رنگدانه^۲ یا رنگیزه نام دارند (Tanaka et al, 2008). رنگدانه‌ها ترکیبات شیمیایی هستند که نور را در طیف قابل دیدن دریافت می‌کنند (Delagado-Vergas 2000). رنگدانه‌های گیاهی اهمیت بسیار زیادی در کره زمین دارند و کاربرد آنها توسط انسان ها، به بیش از ۱۰۰۰۰ سال پیش بر می‌گردد (Davies 2004; Blackburn 2007). راز رنگدانه‌ها سالیان درازی است که گیاه‌شناسان را به خود مشغول کرده است و مطالعه رنگیزه‌های گیاهی، یکی از کهن‌ترین زمینه‌های مطالعه گیاهان است (Mlodzinska 2009). برخی از بزرگ‌ترین پژوهش‌های علمی در قلمرو گیاهی مانند کارهای بزرگ گروگورمندل و داروین به گونه‌ای در ارتباط با رنگدانه‌ها بوده است. رنگدانه‌ها در دریافت جایزه نوبل توسط چندین دانشمند نیز نقش داشته‌اند (Davies 2004). در دنیای کنونی نیز مهندسی رنگیزه^۳ و دستکاری‌های ژنتیکی برای بهره‌گیری بیشتر از رنگدانه به ویژه در مورد گیاهان زینتی، در حال انجام است (Rosati et al. 2009). ظاهر گیاهان بازتاب رنگدانه‌هایی است که طیف‌های گوناگون نوری را دریافت و یا بازتاب می‌کنند (Mlodzinska 2009). نور دریافت شده وارد رنگدانه می‌شود و نور بازتاب شده، به عنوان رنگ دیده می‌شود (Davies 2004). رنگدانه‌ها در گیاهان عالی (جدول ۱)، در چهار گروه بزرگ کلروفیل‌ها، کارتونوئیدها^۴، فلاونوئیدها^۵ (آنتوسیانین‌ها^۶) و بتالائین‌ها^۷

¹ - Products

² - Pigment

³ - Pigment engineering

⁴ - Carotenoids

⁵ - Flavenoids

⁶ - Anthocyanins

⁷ - Betalains



سبز گیاهی دیده می‌شوند و به دلیل توانایی فتوسنتز، مهم ترین مولکول‌های ارگانیک زمین هستند (Davies 2004; Blackburn 2007; Mlodzinska 2009; Pale 2011). بیشترین نور دریافتی کلروفیل‌ها در طول موج‌های ۳۸۰ و ۷۳۰ نانومتر است. در گیاهان عالی، دو نوع کلروفیل عمده وجود دارد. کلروفیل a که سبز-آبی است و کلروفیل b که سبز-زرد است. مقدار این دو نوع کلروفیل به گونه گیاهی، میزان نور و در دسترس بودن یون منیزیم بستگی دارد (Mlodzinska 2009). این دو نوع کلروفیل به دلیل جذب سطح بالایی از نور آبی و قرمز، سبز رنگ دیده می‌شوند (Davies 2004). کلروفیل‌ها در پلاستیدها قرار دارند، محلول در چربی بوده و نیمه عمر^۹ کلروفیل در یک برگ معمولی در گیاهان، بین ۶ تا ۵۰ ساعت است (Davies 2004).

کارتونوئیدها

کارتونوئیدها که در دامنه رنگ‌های زرد تا قرمز دیده می‌شوند، یک زیر گروه از ترپنوئیدها^{۱۰} هستند که بین ۷۵۰-۶۰۰ ترکیب از آنها گزارش شده است و قابل حل در چربی هستند (Nisar et al. 2015; Tanaka et al, 2008). این رنگدانه‌های گیاهی برای نخستین بار از گیاه هویج^{۱۱} استخراج شدند و به همین دلیل کارتونوئید نامیده شدند (Davies 2004). کارتونوئیدها دومین گروه بزرگ رنگدانه های گیاهی هستند که از کاروتن‌ها^{۱۲} (آلفا کاروتن و بتا کاروتن) و زانتوفیل‌ها^{۱۳} تشکیل شده اند (Davies 2004; Blackburn 2007; Ougham et al. 2005). معروفترین زانتوفیل‌ها، ویولازانتین، آنترازانتین، زئازانتین، نئوزانتین و لوتئین هستند. ویولازانتین و لوتئین مسئول رنگ زرد در

را در برگ‌ها، گل‌ها و میوه‌های گیاهان ایجاد می‌کنند، از دیدگاه زیباشناختی ارزش بسیار بالایی دارند (Kaufman & Lohr, 2004). زیبایی مناظر ساخته انسان، به کاربرد صحیح رنگ در طرح بستگی دارد. به طور کلی، رنگ‌های قرمز، نارنجی و زرد جزو رنگ‌های گرم محسوب می‌شوند و در طراحی باغ و پردیسه، برای شاد جلوه دادن محیط و ایجاد تنوع در فصل‌های مختلف سال، از رنگ‌های گرم استفاده می‌شود. از سوی دیگر، رنگ‌های سبز و آبی جزو رنگ‌های سرد طبقه‌بندی می‌شوند و از این رنگ‌ها برای بزرگ‌تر نمایاندن باغ و پردیسه استفاده می‌شود (روحانی ۱۳۹۳). در طبیعت، خودنمایی رنگ‌ها به ویژه در بهار و پاییز چشمگیر است (خوشخوی ۱۳۹۳). فصل پاییز در مناطق سردسیر و معتدله، یکی از بارزترین فصل‌های سال است که تغییر رنگ برگ گیاهان بسیار شگفت انگیز و دیدنی می‌شود. آلبرت کاموس^۸، رمان نویس برجسته فرانسوی و دارنده جایزه نوبل ادبی می‌گوید "پاییز، بهار دومی است وقتی که هر برگ خودش یک گل است". در این مقاله مروری، در آغاز رنگدانه‌های مهم گیاهی به طور خلاصه معرفی می‌شوند و در ادامه، نقش آنها در تغییر رنگ برگ گیاهان و به ویژه درختان و درختچه‌های زینتی بررسی می‌شود.

کلروفیل‌ها

کلروفیل که برای نخستین بار در سال ۱۸۱۸ به کار رفت از دو واژه یونانی Choloros به معنای سبز و Phyllos یا Phyllon به معنای برگ، گرفته شده است و در مجموع بیانگر برگ سبز است (Davies 2004; Mlodzinska 2009; Pale 2011). کلروفیل‌ها گسترده‌ترین، آشکارترین، حساس‌ترین و تواناترین رنگیزه‌های دریافت کننده نور در جهان هستند که در برگ‌های سبز گیاهان و دیگر اندام‌های

⁹ - Half-life

¹⁰ - Terpenoids

¹¹ - Carrot (*Daucus carota*)

¹² - Carotenes

¹³ - Xanthophylls

⁸ - Albert Camus

از گسترش محدودی در قلمرو گیاهی برخوردارند (Davies 2004; Tanaka *et al.* 2008; Mlodzinska 2009). این ترکیبات نیتروژن دار، متابولیت های ثانویه ای هستند که از اسید آمینه تیروزین^{۱۶} به دست می آیند و چون از مشتقات اسید بتالامیک می باشند، به نام بتالائین ها شناخته می شوند (Davies 2004; Tanaka *et al.* 2008; Gandia Herero *et al.* 2013). بتالائین ها در بسیاری از تیره های گیاهی راسته Caryophyllales به جز Molluginaceae و Caryophyllaceae جایگزین آنتوسیانین ها می شوند و رنگ های زرد تا قرمز را تولید می کنند (Davies 2004; Tanaka *et al.* 2008; Mlodzinska, 2009; Gandia Herero *et al.* 2013). با توجه به این که تغییر رنگ برگ ها تنها به مناطق معتدله و سردسیر و گیاهان خزان دار محدود نمی شود و در مناطق گرمسیری و گیاهان همیشه سبز نیز رخ می دهد، در ادامه نقش رنگدانه ها در انواع تغییر رنگ بررسی می گردد.

نقش رنگدانه ها در تغییر رنگ برگ ها در مناطق سردسیر و معتدله

سرخ شدن برگ ها یک نمایش بی مانند است که در همه فصل ها دیده می شود ولی بازتاب آن در پاییز، بیشترین توجه ها به خود جلب کرده است (Hughes, 2011). در مناطق سردسیر و معتدله، تغییر رنگ برگ ها در پاییز چشم اندازها را به طور کلی دگرگون می کند و رنگین کمانی از رنگ های زرد، نارنجی و قرمز (شکل ۱) ایجاد می شود (Archetti *et al.* 2009).

برگ های پاییزی برخی از گونه های گیاهی هستند. خود واژه Xanthophyll، از دو واژه Xanthos به معنای زرد و Phyll به معنای برگ گرفته شده است که بیانگر زرد بودن رنگ برگ ها در پاییز است (Davies 2004). کارتنوئیدها، انرژی نورانی را در دامنه ۴۰۰-۵۰۰ نانومتر جذب می کنند (Mlodzinska 2009).

آنتوسیانین ها

آنتوسیانین ها متابولیت های ثانویه و از گروه بسیار بزرگ فنول ها هستند، که به طور کلی تحت عنوان فلاونوئیدها شناخته می شوند (Neill 2002). فلاونوئیدها تقریباً در تمام بافت های گیاهی دیده می شوند و تا کنون بیش از ۷۰۰۰ ترکیب از آنها شناخته شده است. آنتوسیانین ها که گروهی از فلاونوئیدها می باشند، رنگدانه های محلول در آب هستند که دامنه گسترده ای از رنگ ها را از نارنجی- قرمز تا آبی- بنفش در برگ ها، گل ها، میوه ها و اندام های ذخیره ای تولید می کنند (Neill 2002; Davies 2004, Tanaka *et al.* 2008; Hughes 2009; Mlodzinska 2009). آنتوسیانین ها از فنیل آلانین^{۱۴} مشتق می شوند و در واکوئل ها ذخیره می شوند (Tanaka *et al.* 2008). آنتوسیانین نخستین بار در عصاره رنگی سلول مشاهده شد. در سال ۱۸۳۵ میلادی یک گیاهشناس آلمانی^{۱۵}، این رنگدانه را آنتوسیانین نامید که واژه ای یونانی بوده و از دو کلمه Anthos (گل) و Kyanos (آبی) مشتق شده است (Davies 2004; Ougham *et al.* 2005).

بتالائین ها

بتالائین ها، رنگدانه های نیتروژنی قابل حل در آب هستند که در واکوئل قرار دارند و نسبت به سه گروه دیگر رنگدانه ها،

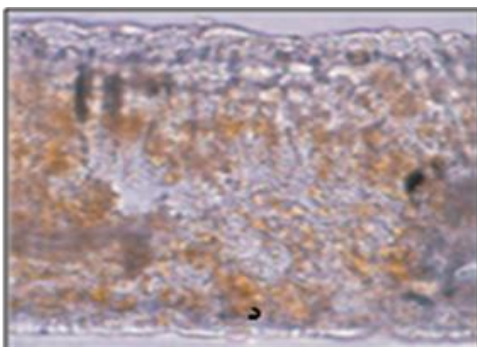
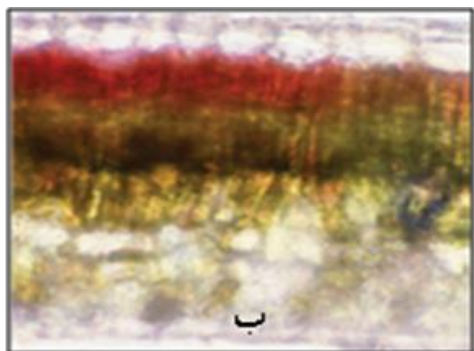
¹⁶ - Tyrosine

¹⁴ - Phenylalanine

¹⁵ - Ludwig Marquart



شکل ۱- تغییر رنگ برگ‌ها در پاییز و ایجاد پردیسه‌های زیبا در مناطق معتدله و سردسیر



در حدود ۱۵ درصد گونه‌های درختی مناطق معتدله در پاییز تغییر رنگ می‌دهند و این نسبت در جنگل‌های ایالت‌های شرقی آمریکا به ویژه نیوانگلند^{۱۷}، به ۷۰ درصد هم می‌رسد و همین خزان شگفت انگیز و زیبا یک منبع درآمد اقتصادی بسیار بزرگ برای این ایالت‌ها و ایالت‌های همجوار آن در کانادا است (Archetti et al. 2013). تغییر رنگ برگ‌ها در پاییز، یکی از پدیده‌های شگفت انگیز روی کره زمین است که پس از سال‌ها دانشمندان ساز و کارهای آن را دریافتند (Chaney 1997, Ougham et al. 2005). این پدیده، پیامد رخدادهایی بسیار پیچیده، هماهنگ، پویا و پیوسته است که با دریافت پیام‌هایی مانند کوتاه شدن طول روز و کاهش دما در پاییز آغاز می‌شود و با تغییرات گسترده در سطح سلولی، مولکولی و سرانجام تغییر در بیان ژن‌ها ادامه می‌یابد (شکل ۲).



شکل ۲- نمای بیرونی (الف) و میکروگراف درونی (ب) تغییر رنگ برگ بلوط قرمز (*Red oak (Quercus rubra)*) و نمای بیرونی (ج) و میکروگراف درونی (د) تغییر رنگ برگ هاماملیس ویرجینیایی (*American witch hazel (Hamamelis virginiana)*)

دست‌آورد این دگرگونی‌های پیوسته و هدفمند، تغییر چهره طبیعت به ویژه در مناطق سردسیر و معتدله است که چشم اندازه‌های چشم‌نوازی (شکل ۱) را پدید می‌آورد (Chaney 1997; Ougham et al. 2005).

¹⁷ - New England

دریافت پیام‌های محیطی توسط برگ‌ها و آغاز فرایندهای تغییر رنگ

پیری برگ‌ها و تغییر رنگ آنها یک فرایند بسیار برنامه ریزی شده، سازمان یافته و در عین حال پیچیده است که به طور تنگاتنگی تحت تاثیر عوامل ژنتیکی و محیطی است (Keskitalo *et al.* 2005; Wen *et al.* 2015). برهمکنشی از چندین عامل مانند ژنتیک، مرحله رشد و نمو گیاه، طول روز، دما، نور، پرتو فرابنفش، رطوبت، ارتفاع از سطح دریا، هورمون‌های گیاهی، کربوهیدرات‌ها، مواد معدنی، ترکیب رنگدانه‌ها، رنگدانه‌های کمکی، سن برگ، یون‌های فلزی، pH و غیره تغییرات رنگ برگ را تعیین می‌کند (Davies 2004; Ougham *et al.* 2005; Tanaka *et al.* 2008; Mlodzinska 2009; Archetti *et al.* 2009). همچنین، تغییر رنگ برگ نه تنها از درختی به درخت دیگر متفاوت است، بلکه حتی بین برگ‌های روی یک شاخه هم تفاوت دارد. در برخی از درختان، حتی در بین بخش‌های یک برگ هم تغییر رنگ دیده می‌شود (Archetti & Brown 2004). در شکل ۳، در روند تغییر رنگ برگ در انجیلی یا درخت آهن که از گونه‌های بومی و انحصاری شمال ایران است، دیده می‌شود.



شکل ۳- تغییر رنگ در برگ‌های انجیلی یا درخت آهن از گونه های انحصاری جنگل‌های شمال ایران

رنگ سبز برگ‌ها در طول تابستان، به دلیل غلظت بیشتر کلروفیل نسبت به دیگر رنگدانه‌ها است (Koike 1990; Chaney *et al.* 1997; Archetti *et al.* 2009; Hoch 2004). در اواخر تابستان و آغاز پاییز، یک سری تغییرات

محیطی مانند کوتاه شدن طول روز، کاهش دما و افزایش طول موج‌های آبی و پرتو فرابنفش، پیام‌هایی هستند که توسط گیاهان دریافت شده و باعث ایجاد یک سری تغییرات درونی به ویژه تغییرات هورمونی مانند کاهش تولید اکسین، افزایش تولید اتیلن و افزایش آبسزیک اسید می‌شود. به دنبال این تغییرات هورمونی، سنتز کلروفیل کاهش می‌یابد و سرانجام به طور کامل متوقف می‌شود (Chaney 1997; Ougham *et al.* 2005). به همین دلیل، در برگ‌ها تولید قندها و کربوهیدرات‌ها کاهش می‌یابد و سپس متوقف می‌شود. در گونه‌های گیاهی خزان‌دار، به دنبال این فرایندها، تولید رنگیزه آنتوسیانین آغاز می‌شود (Chaney 1997; Ougham *et al.* 2005). آنتوسیانین‌ها پس از تجزیه حدود نیمی از کلروفیل و پیش از ریزش برگ‌ها، تولید می‌شوند. بنابراین، رنگ قرمز که به دلیل تولید آنتوسیانین‌ها است، از یک فرایند فعال ایجاد می‌شود و پیامد فرایند پیری نیست (Koike 1990; Chaney *et al.* 2009; Hoch 2004; Archetti *et al.* 1997). سرخ شدن برگ‌ها در پاییز و زمستان در همیشه سبزه‌های علفی، درختان، درختچه‌ها و گیاهان بالارونده در مناطق مدیترانه-ای، معتدله، آلباین و مناطق قطبی دیده می‌شود. در گونه‌های خزان‌دار برگ‌ها سرانجام ریزش می‌کنند اما در برخی همیشه سبزه‌ها، این تغییر رنگ تا چندین ماه ادامه داشته و با گرم شدن در فصل بهار ناپدید می‌شود (Hughes 2011). کارتنوئیدها در طول سال در برگ‌ها حضور دارند اما به دلیل چیرگی کلروفیل دیده نمی‌شوند. در پاییز با کوتاه شدن طول روز و کاهش دما، کلروفیل‌ها تجزیه شده و به متابولیت‌های ثانویه بی رنگ شکسته می‌شوند و در ادامه کارتنوئیدها پدیدار می‌گردند که مسئول رنگ زرد- نارنجی برگ‌ها در پاییز هستند. در برخی از درختان مانند ژینکو^{۱۸}، زیبایی فریبنده پاییزی (شکل ۴) به خاطر کارتنوئیدها است

¹⁸ - *Ginkgo biloba*

(Ougham et al. 2005; Matile 2000). نسبت کارتنوئیدها با گونه گیاهی، سن برگ و عوامل محیطی تغییر می‌کند. این رنگیزه‌ها به طور عمده رنگ‌های زرد و نارنجی را ایجاد می‌کنند (Ougham et al. 2005).



شکل ۴- تغییر رنگ پاییزی در برگ‌های ژینکو به دلیل وجود کارتنوئیدها

و به صورت تک نما، پرچین رنگی و یا آرایش‌های هندسی دیگر در فضای سبز به کار می‌رود. همچنین، تغییر رنگ برگ در جنس سه رنگ^{۱۹} که بیشتر گونه‌ها آن همیشه سبز هستند، زیبایی خاصی را در پردیسه‌ها ایجاد می‌کند. از این تغییر رنگ به آسانی می‌توان برای طراحی منظر بهره برد و با ترکیبی از گونه‌های خزان‌دار و نیز همیشه سبز، دامنه‌ای از رنگ را در طول سال برای بازدید کنندگان فضای سبز فراهم کرد.

به طور کلی، در نهاندانگان، آنتوسیانین‌ها رنگدانه‌های غالب در ایجاد رنگ قرمز در پاییز و زمستان هستند اما در بازدانگان، رنگدانه‌های عمده درگیر در رنگ سرخ برگ‌ها، کارتنوئیدهای قرمز هستند (Hughes 2011). بنابراین، رنگ‌های پاییزی به طور عمده توسط آنتوسیانین‌ها (قرمز-ارغوانی) و کارتنوئیدها (زرد-نارنجی) ایجاد می‌شود (Archetti 2009). به همین دلیل، در ادامه متن، چگونگی نقش این دو رنگیزه مهم در تغییر رنگ برگ‌ها، با جزئیات بیشتری آورده می‌شود.

نقش آنتوسیانین‌ها و عوامل محیطی در تغییر رنگ برگ در گونه‌های خزان‌دار

دمای پایین و شدت نور بالا

در آغاز دیدگاه نادرستی در زمینه تولید آنتوسیانین وجود داشت و تصور بر این بود که آنتوسیانین از شکستن کلروفیل در پاییز ایجاد می‌شود. تولید آنتوسیانین زمانی آغاز می‌شود که رنگیزه کلروفیل به صورت تدریجی تخریب می‌شود (William et al., 2001). آنتوسیانین‌ها ممکن است در برگ‌ها در تمام مراحل رشد و در هر زمانی از سال دیده شوند. برای نمونه، در برگ‌های جوان بلوط سفید^{۲۰} در بهار

برخی از درختان و درختچه‌ها دارای برگ‌های رنگی هستند و ارزش زینتی چشمگیری دارند. رنگ برگ این درختان و درختچه‌ها اغلب به دلیل وجود کارتنوئیدها و آنتوسیانین‌ها زرد، قرمز و ارغوانی است. همه این گیاهان برای فتوسنتز دارای کلروفیل کافی می‌باشند، اما سطوح کارتنوئیدها و آنتوسیانین‌ها بیشتر از مقدار کلروفیل می‌باشد، که باعث می‌شود رنگشان در حضور کلروفیل دیده شود (Chaney 1997). وجود چنین درختان و درختچه‌هایی برای ایجاد فضای سبز رنگارنگ و متنوع بسیار سودمند است. برای نمونه، زرشک زینتی یکی از گونه‌های بسیار ارزشمند است

¹⁹ - *Photinia spp.*

²⁰ - *Quercus alba*

پرتوهایی که باعث تولید رنگیزه می‌شوند، در دسترس نیستند (William *et al.* 2001). در جانمایی گونه‌های گیاهی برای فضای سبز، به خوبی می‌توان از موقعیت محل پردیسه (آفتاب، سایه، نیم سایه) استفاده کرد و گونه‌ها را به گونه‌ای کاشت که بهترین نمایش را در روزهای پاییزی داشته باشند.

کربوهیدرات‌ها و عناصر غذایی

تولید آنتوسیانین‌ها به شکستن قندها بستگی دارد و شکستن قند در برگ زمانی رخ می‌دهد که سطحی از مواد غذایی خاص در برگ‌ها کاهش پیدا کند. بنابراین، وجود قندها برای تولید و نمایش آنتوسیانین لازم است (Close & Bedale 2003; Schaberg *et al.* 2003). همچنین، یکی دیگر از پیش نیازهای ساخت آنتوسیانین‌ها، کاهش سطح برخی از عناصر غذایی است. در برخی از گونه‌های گیاهی، بخش عمده‌ای از عناصر غذایی در پاییز از برگ‌ها به دیگر قسمت های گیاهان منتقل و ذخیره می‌گردد. این جابه‌جایی و کاهش سطح عناصر ضروری رشد و نمو، به ویژه فسفر و نیتروژن، سبب تولید آنتوسیانین‌ها می‌شود (Close & Bedale 2003; Schaberg *et al.* 2003; Keskitalo *et al.* 2005; Hagen-Thorn *et al.* 2006; Fracheboud *et al.* 2009). کمبود نیتروژن اثر منفی بر کارکرد و راندمان فتوسنتز دارد و سطح آنزیم‌های چرخه کالوین را کاهش می‌دهد و همچنین باعث بیان ژن‌هایی می‌شود که آنزیم‌های مرتبط با بیوسنتز آنتوسیانین را رمزگذاری می‌کنند. کمبود فسفر نیز باعث افزایش مقدار آنتوسیانین برگ‌ها می‌شود (Close & Bedale 2003).

پرتو فرابنفش و تئوری حفاظت نوری

پرتو فرابنفش (۲۸۰-۳۲۰ نانومتر) در حدود ۷ درصد نور خورشید را تشکیل می‌دهد (Neill 2002; Guo *et al.* 2008). پرتو فرابنفش عاملی است برای تحریک تولید

آنتوسیانین تولید می‌شود. در افرای قندی^{۲۱}، آنتوسیانین‌ها در برگ‌های در حال پیر شدن در پاییز تولید می‌شوند (Schanber *et al.* 2003; Hughes 2009). در گیاهانی مانند بلوط سرخ، افرای سرخ (شکل ۲)، نوعی زغال اخته^{۲۲} و برخی از دیگر گونه‌های گیاهی که دارای برگ‌های سرخ رنگ در پاییز هستند، نقش آنتوسیانین‌ها در تغییر رنگ برگ‌ها به روشنی دیده می‌شود (Lee & Gould 2002). برگ‌های گیاهانی که در مناطق با شدت نور بالا رشد می‌کنند، به دلیل تولید آنتوسیانین در طول زمستان، قرمز رنگ می‌شوند (Carpenter *et al.* 2014). در شرایط آب و هوای پاییزی، آنتوسیانین بیشتری نسبت به سایر رنگدانه‌ها در برگ‌ها دیده می‌شود. تولید آنتوسیانین‌ها با کاهش دما و به دنبال آن روزهای آفتابی درخشان و شب‌های خنک تحریک می‌شود (Wojciechowska *et al.* 2014). هر چه روزهای پاییز روشن‌تر و خنک‌تر باشد و شب‌ها سرد باشد (اما نه یخبندان)، تولید آنتوسیانین بیشتر می‌شود که نتیجه آن رنگ‌های روشن‌تر و درخشان‌تر و پاییزی زیباتر است (Chaney 1997; William *et al.* 2001; Wojciechowska *et al.* 2014). علت این موضوع این است که در این شرایط فتوسنتز انجام می‌شود و قندهای بیشتری تولید می‌شود و افزایش قندها در برگ‌ها به افزایش تولید آنتوسیانین می‌انجامد. اما اگر در پاییز دماهای یخبندان وجود داشته باشد، باعث مرگ و ریزش برگ‌ها می‌شود و نمایش خوبی از رنگیزه‌ها دیده نمی‌شود (Chaney 1997; Ougham *et al.* 2005).

تجمع آنتوسیانین‌های پاییزی، بیشتر در برگ‌هایی است که در معرض آفتاب مستقیم قرار دارند، در حالی که در برگ‌هایی که در سایه قرار دارند مقدار تولید آنتوسیانین کم است و یا اصلاً تولید نمی‌شود. دلیل این پدیده این است که فتوسنتز به مقدار مناسب در این برگ‌ها انجام نمی‌شود و نیز

²¹ - *Acer saccharum*

²² - Red-osier dogwood (*Cornus stolonifera*)



که گیاه در آن قرار دارد، می‌باشد (William et al. 2001). بدون توجه به این که تولید آنتوسیانین مربوط به کدام از شرایط بالا باشد، تغییر رنگ برگ‌ها در همه زمان‌های سال و به ویژه در پاییز مناطق معتدله و سردسیر، چشم اندازهایی زیبا را ایجاد می‌کند. اوج این زیبایی در جنگل‌های آمیخته^{۲۸} (شکل ۱) که ترکیبی از گونه‌های خزان دار و همیشه سبز را دارند، دیده می‌شود. طراحان و مدیران فضای سبز از همین الگوی طبیعی الهام گرفته و پردیسه‌های بی مانندی را ایجاد می‌کنند.

نقش آنتوسیانین‌ها در تغییر رنگ برگ گونه‌های همیشه سبز

برگ بسیاری از گونه‌های پهن برگ همیشه سبز در شرایط نور شدید در زمستان به دلیل تولید آنتوسیانین‌ها، به رنگ قرمز و ارغوانی در می‌آیند (Hughes 2009; Hughes et al. 2010). در درختان پهن برگ همیشه سبز نیز آنتوسیانین‌ها یک نقش موقت حفاظت نوری را در زمان تغییر فصل (در زمستان) بر عهده دارند و چون دمای پایین و شدت نور با هم در این زمان ترکیب می‌شوند، پس تغییر رنگ برگ‌ها خطر تنش نوری یا بازدارندگی نوری^{۲۹} را کاهش می‌دهد (Adams et al. 2004; Archetti et al. 2009; Hughes 2009; Nikiforou et al. 2014). در بسیاری از گونه‌های گیاهی همیشه سبز، قرمز شدن برگ‌ها در زمستان موقتی است و دوباره با گرم شدن هوا در فصل بهار، به رنگ سبز در می‌آیند (Hughes 2011). در بررسی چندین درختچه همیشه سبز مانند *Rhododendron maximum* و *Kalmia latifolia*، *Rhododendron catawbiens* و *Leucothoe fontanesiana*، نقش آنتوسیانین‌ها به عنوان محافظت کننده نوری در زمستان گزارش شده است (Hughes & Smith 2007).

آنتوسیانین. در واکنش به پرتو فرابنفش در گیاهان، ژن‌هایی فعال می‌شوند و سرانجام آنتوسیانین‌ها تولید می‌شوند تا گیاهان را در برابر این اشعه که سبب تخریب پروتئین‌ها، اکسیداسیون چربی‌ها و نوکلئیک اسیدها می‌شود، حفظ کنند (Hoch et al. 2001; Neill 2002; Hughes 2005;). (Guo et al. 2008; Montolio 2013). پذیرفته شده‌ترین فرضیه در زمینه نقش آنتوسیانین‌ها در بیشتر گیاهان، حفاظت نوری^{۳۳} است (Sims & Gamon 2002; Close & Bedale 2003; Hughes 2005; Hughes 2009; Zhang et al. 2010). در واقع آنتوسیانین نقش محافظتی از سیستم فتوسنتزی در برابر پرتو فرابنفش دارد. در چنین مواردی، مقدار انرژی دریافتی بیشتر از مقدار مورد نیاز برای فرایند فتوسنتز است و انرژی اضافی سبب می‌شود که گونه‌های فعال اکسیژن^{۲۴} تولید شوند و حساسیت به اکسیداسیون نوری^{۲۵} افزایش می‌یابد (Hughes 2009). بنابراین، در این شرایط یا آنتوسیانین‌ها تولید می‌شوند یا کارتنوئیدها از طریق چرخه زانتوفیل^{۲۶}، مقدار نور را کاهش می‌دهند (Hoch et al. 2001). آنتوسیانین‌ها یا به طور مستقیم (مانند یک چتر و یا کرم ضد آفتاب) درگیر کاهش صدمات فتو اکسیداتیو هستند که در شرایط نور شدید (به ویژه پرتو فرابنفش) و دمای پایین رخ می‌دهد و یا به طور غیر مستقیم سبب ربایش گونه‌های فعال اکسیژن می‌شوند (Archetti et al. 2009). نقش حفاظتی آنتوسیانین‌ها در طبیعت به حدی است که این گروه از مواد را چاقوی نظامی سوئسی طبیعت^{۲۷} می‌نامند (Gould 2004). عوامل موثر در تعیین رنگ توسط آنتوسیانین شامل ترکیب با قندهای مختلف، pH واکوئل، افزایش و کاهش سطح یون‌های فلزی و حضور کمک رنگیزه‌هایی مانند فلاونول‌ها و فلاون‌ها، دما، میزان روشنایی، pH خاک، رطوبت خاک و مکان و ارتفاعی

²³ - Photoprotection

²⁴ - Reactive oxygen species (ROS)

²⁵ - Photooxidation

²⁶ - Xanthophyll cycle

²⁷ - Nature's Swiss Army Knife

²⁸ - Mixed forests

²⁹ - Photoinhibition

نقش آنتوسیانین‌ها در تغییر رنگ برگ‌های جوان

رنگ سرخ برگ‌ها، الزاما با پیری برگ‌ها و پاییز در ارتباط نیست. در گیاهان همیشه سبز و برگ‌های نورسته گیاهان خزان‌دار و همیشه سبز نیز رنگ قرمز تولید می‌شود (Feild et al. 2001; Archetti et al. 2009). در بسیاری از گونه‌های درختی و درختچه‌ای، برگ‌های نورسته و در حال توسعه و جوانه‌هایی که در اوایل بهار تازه ظاهر شده‌اند، در آغاز به دلیل حضور آنتوسیانین در برگ‌های نابالغ، سرخ هستند و به تدریج با بلوغ برگ‌ها سبز می‌شوند. این پدیده هم در گونه‌های مناطق گرمسیری و هم گونه‌های مناطق معتدله رخ می‌دهد (Karageorgou & Manetas 2006; Archetti et al. 2009). وجود آنتوسیانین‌ها در برگ‌های بسیار جوان برخی گونه‌ها، گذرا است و نقش کلیدی آنتوسیانین در این برگ‌ها به عنوان یک محافظت کننده نوری^{۳۰} می‌باشد. بنابراین، در برگ‌های جوان این گونه از گیاهان، محتوای بالایی از آنتوسیانین وجود دارد اما در برگ‌های بالغ، میزان آنتوسیانین کاهش می‌یابد یا از بین می‌رود (Close et al. 2003). در آزمایش‌های گوناگون دیده شده است که محتوای کاروتنوئیدها در برگ‌های جوان حاوی آنتوسیانین، پایین است درحالی‌که میزان کاروتنوئید در برگ‌های بالغ بیشتر است و این یکی از دلایل حضور آنتوسیانین‌ها در برگ‌های جوان برخی از گونه‌های گیاهی است (Archetti et al. 2009).

نقش کارتنوئیدها

چرخه زانتوفیل و کاهش صدمات نوری

کاروتنوئیدها در طی فصل رشد در برگ‌ها وجود دارند، اما به دلیل وجود کلروفیل دیده نمی‌شوند. همزمان با تخریب کلروفیل، رنگ‌های زرد و نارنجی تولید شده توسط این

رنگیزه نمایان می‌شوند (Ougham et al., 2005). کارتنوئیدها در کلروپلاست ساخته می‌شوند و برای حفظ یکپارچگی دستگاه فتوسنتزی ضروری هستند (Tanaka et al. 2008). در سلول‌های مزوفیل سبز، کاروتنوئیدها به عنوان رنگیزه‌های کمکی^{۳۱} در فرایند فتوسنتز نقش دارند و به ویژه در زمان انتقال انرژی و الکترون درگیر هستند و همچنین از رنگیزه کلروفیل در برابر صدمات ناشی از اکسیداسیون نوری^{۳۲} محافظت می‌کنند. کارتنوئیدها به عنوان کمک رنگیزه، نور دریافتی را به کلروفیل b منتقل می‌کنند و از فعالیت گونه‌های فعال اکسیژن در شرایط تنش نوری جلوگیری می‌کنند (Ougham et al. 2005; Mlodzinska 2009; Jahns & Holzwarth 2012). لوتئین فراوان‌ترین زانتوفیل در گیاهان عالی است و در ربایش گونه‌های فعال اکسیژن نقش دارد (Jahns & Holzwarth 2012). در عدم حضور کارتنوئیدها، به دلیل وجود نور زیاد که به تولید گونه‌های فعال اکسیژن می‌انجامد، برگ‌ها دچار سوختگی نوری^{۳۳} می‌شوند که دلیل آن آسیب دیدن چربی‌ها، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک است (Davies 2004). در گیاهان عالی، فرایندی به نام چرخه زانتوفیل وجود دارد. در این چرخه، انرژی اضافی مصرف می‌شود و از تخریب دستگاه فتوسنتزی جلوگیری می‌شود. اهمیت چرخه زانتوفیل در سازگاری گونه‌های گیاهی به شرایط نوری، در مورد *Tilia cordata*, *Populus tremula*, *Betula pendula* و *Arbutus undedo* گزارش شده است (Ninemets et al. 1998; Baraldi et al. 2008). تحمل به دمای پایین زمستانه در گیاهان همیشه سبز، نیازمند ساز و کارهایی برای کاهش اکسیداسیون نوری است، زیرا در دمای پایین سرعت فرایند فتوسنتز کاهش می‌یابد و نور دریافتی تغییری نمی‌کند.

³¹- Co-pigments

³²- Photooxidation

³³- Photobleach

³⁰- Photoprotective

مهندسی ژنتیک افزایش داده است (Nakatsuka *et al.* 2013; Cabanes *et al.* 2014; Guaadaoui *et al.* 2014). بتالائین‌ها همچنین، در گیاهان زینتی مانند لاله عباسی^{۳۷}، ناز آفتابی^{۳۸} و گل کاغذی^{۳۹} وجود داشته و دامنه‌ای از رنگ‌های زرد، قرمز و حتی بنفش را ایجاد می‌کنند (Lee & Gould 2002; Atintzig & Carle 2004; Gandia Hererro *et al.* 2013). جالب است که بتالین‌ها و آنتوسیانین‌ها هرگز با هم در یک گونه گیاهی دیده نشده‌اند (Han *et al.* 2009).

نقش رنگدانه‌ها در تنش‌های زیستی

با توجه به این که نقش رنگدانه‌ها در تنش‌های زیستی موضوع این مقاله مروری نبوده است، به صورت بسیار خلاصه اشاره‌ای به این موضوع می‌شود. تولید رنگدانه‌ها در برخی گیاهان به نوعی بازتاب دهنده واکنش گونه‌های گیاهی به تنش‌های زیستی مانند گیاه‌خواری (چرا) و آفات است. برای نمونه، بیان شده است که رنگ قرمز تولید شده در برگ برخی گونه‌های گیاهی، هشدار می‌دهد (مانند چراغ قرمز) برای برخی از حشرات است و به همین دلیل چنین گیاهانی کمتر مورد حمله آفات مربوطه قرار می‌گیرند. همچنین وجود آنتوسیانین‌ها در برگ‌های جوان برخی گونه‌ها برای جلوگیری از حمله بعضی حشرات است، زیرا چنین برگ‌های جوان و لطیفی بهتر می‌توانند توسط برخی آفات خورده شوند. این نوع از سازگاری در اصل به نام تئوری هم‌تکاملی^{۴۰} یا تکامل همگرا نامیده می‌شود که به نوعی بیانگر تکامل دو سویه بین حشرات و گیاهان است (Neil 2002; Archetti *et al.* 2009; Archetti & Brown 2004; Ougham *et al.* 2005; Blackburn 2007; Rolshausen & Schaefer 2007; Mlodzinska 2009; Hughes 2011). در پایان یادآوری می‌شود که رنگدانه

کند و احتمال تشکیل گونه‌های فعال اکسیژن افزایش می‌یابد (Arora & Rowland 2013). ساز و کارهای رویارویی با تنش ناگهانی دمای پایین نیز در چند گونه درختی و درختچه‌ای همیشه سبز مدیترانه‌ای بررسی شده است و بر نقش چرخه زانتوفیل در کاهش تنش تاکید شده است (Garcia- Plazola *et al.* 2003). اگرچه آنتوسیانین‌ها در پدیدار شدن رنگ قرمز در برگ گیاهان، بیشتر از کارتنوئیدها دیده می‌شوند، اما در برخی گونه‌های گیاهی مانند نوش قرمز آمریکا یا سدر کانو^{۳۴}، سوچی یا سدر ژاپن^{۳۵} و گونه‌ای شمشاد^{۳۶}، در شرایط بازدارندگی نوری، کارتنوئیدهای قرمز تجمع پیدا می‌کنند (Hormaetxe *et al.* 2005). رقمی از سوچی یا سدر ژاپنی به نام 'Elegans'، به دلیل همین تغییر رنگ، یکی از زیباترین سوزنی برگان جهان است و در سطح گسترده‌ای برای اهداف فضای سبز به کار می‌رود. رنگ این رقم در تابستان سبز روشن متمایل به آبی بوده و در زمستان به رنگ برنزه مایل به قرمز در می‌آید (فرهمند، ۱۳۹۴).

نقش بتالائین‌ها

در حالی که رنگ گل، برگ و میوه در بسیاری از گونه‌های گیاهی مربوط به آنتوسیانین‌ها است، در ۱۳ تا ۱۵ تیره در راسته Caryophyllales رنگ گل، میوه و گهگاهی بخش‌های رویشی به دلیل حضور بتالین‌ها است که جایگزین آنتوسیانین‌ها شده‌اند (Strack *et al.* 2003; Moreno *et al.* 2010; Harrison *et al.* 2008). در این راسته تنها دو تیره Caryophyllaceae و Molluginaceae به جای بتالین‌ها، دارای آنتوسیانین هستند (Strack *et al.* 2003). نبود این رنگیزه در بسیاری از گونه‌های گیاهی، انگیزه انتقال این رنگدانه‌ها را به دیگر گونه‌های گیاهی به ویژه از طریق

³⁷ - *Mirabilis jalapa*
³⁸ - *Portulaca grandiflora*
³⁹ - *Bougainvillea* sp.
⁴⁰ - Coevolution theory

³⁴ - Western red cedar, Canoe cedar (*Thuja aplicata*)
³⁵ - Sugi, Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*)
³⁶ - *Buxus sempervirens*



هایی مانند آنتوسیانین‌ها، کارتنوئیدها و بتالائین‌ها، نقش بسیار مهمی نیز در اندام‌های زایشی گیاهان و به ویژه رنگ گلبرگ‌ها و کاسبرگ‌ها دارند که برای اهداف گرده افشانی، تشکیل میوه و پخش میوه و بذر توسط حشرات، حیوانات و پرندگان ضروری است.

نتیجه‌گیری نهایی

تغییر رنگ برگ‌ها در پاییز، یکی از پدیده‌های شگفت‌انگیز روی کره زمین است که پس از سال‌ها دانشمندان ساز و کار های آن را دریافتند. این تغییر رنگ در بیشتر موارد و به ویژه در مورد درختان و درختچه‌های مناطق سردسیر و معتدله، سرآغاز فرایند پیری است و سرانجام با مرگ و ریزش برگ‌ها همراه است. البته تغییر رنگ برگ‌ها در گیاهان، الزاما به معنای پیری نیست و در برگ‌های گونه های همیشه سبز و نیز برگ‌های نورسته گونه‌های همیشه سبز و خزان‌دار، نیز دیده می‌شود. تغییر رنگ برگ‌ها، پیامد رخدادهایی بسیار پیچیده، هماهنگ، پویا و پیوسته است که با دریافت پیام‌هایی مانند کوتاه شدن طول روز، کاهش دما و افزایش طول موج‌های آبی و پرتو فرابنفش در پاییز آغاز می‌شود و با تغییرات گسترده در سطح سلولی، مولکولی و سرانجام تغییر در بیان ژن‌ها ادامه می‌یابد. چهار گروه از رنگدانه‌ها یا رنگیزه‌ها در تغییر رنگ برگ‌ها درگیر هستند که برخی از آنها همیشه در برگ‌ها وجود داشته و برخی دیگر در شرایط ویژه‌ای از عوامل محیطی و یا در مرحله خاصی از رشد و نمو گیاهان تولید می‌شوند. رنگ سبز برگ‌ها در طول تابستان، به دلیل غلظت بیشتر کلروفیل نسبت به دیگر رنگدانه‌ها است. در بیشتر درختان و درختچه‌ها، تغییر رنگ برگ به دلیل تولید رنگدانه‌های گروه آنتوسیانین و کارتنوئید و نیز تجزیه کلروفیل است. همچنین، برهمکنشی از چندین عامل مانند ژنتیک، مرحله رشد و نمو گیاه، سن برگ، طول روز، دما، نور، پرتو فرابنفش، رطوبت، ارتفاع از

سطح دریا، هورمون‌های گیاهی، کربوهیدرات‌ها، مواد معدنی، ترکیب رنگدانه‌ها، رنگدانه‌های کمکی، یون‌های فلزی و pH تغییرات رنگ برگ را تعیین می‌کنند. تغییر رنگ برگ‌ها در گیاهان در بیشتر موارد، ساز و کار برای سازگاری‌های گوناگون است که در طول میلیون‌ها سال تکامل در زیست بوم‌های طبیعی ایجاد شده است. تغییر رنگ برگ‌ها در تمام فصل‌های سال و به ویژه در پاییز و زمستان، ویژگی‌هایی زیباشناختی هستند که اهمیت بسیار زیادی از دیدگاه طراحان، مدیران و کاربران فضای سبز دارد. از سوی دیگر رنگ در زندگی انسان‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. به همین دلیل، تلاش‌های زیادی در سطح حرفه‌ای صورت می‌گیرد تا از ترکیب گیاهان زینتی همیشه سبز، نیمه همیشه سبز و خزان‌دار برای پردیسه‌ها و منظرها استفاده شود. افزون بر این، خزان زیبا به ویژه در جنگل‌های بزرگ در برخی از مناطق جهان، از دیدگاه صنعت گردشگری بسیار مهم است و اثرات چشمگیر اقتصادی دارد.

دستورالعمل ترویجی

با توجه به این که هدف این مقاله مروری، بررسی ساز و کارهای درگیر در تغییر رنگ برگ بوده و بررسی نقش رنگ در طراحی فضای سبز، خود نیاز به مقاله‌ای جداگانه دارد، به طور خلاصه پیشنهادهایی ترویجی در این راستا ارائه می‌شود. رنگ یکی از عناصر^{۴۱} ضروری در طراحی فضای سبز است. در طراحی فضای سبز، علاوه بر کاربرد گیاهان فصلی برای ایجاد تنوع در طول سال، از درختان و درختچه‌ها به طور گسترده‌ای برای افزایش تنوع و کیفیت طراحی استفاده می‌شود. برخی از درختان و درختچه‌ها مانند زرشک زینتی، به طور کلی دارای برگ‌های رنگی هستند و کاربرد درست و جانمایی اصولی آنها در طرح باعث می‌شود که از این

⁴¹ - Element

زرد و طلایی مانند سرو طلایی، سرو لائوسون طلایی، سدر کاند، برخی از رقم های سدر ژاپنی و...گزینه هایی بی مانند برای طراحی پردیسه می باشند. تغییر رنگ برگ گونه های یاد شده، زمانی بیشترین نمایش و زیبایی را دارد که با گیاهان سوزنی برگ همیشه سبزی مانند سروها، کاجها، نوئلها، نرادها، ارسها، سرخدارها و نیز پهن برگان همیشه سبز به صورت آمیخته در فضای سبز کاشته شده باشند. اوج این زیبایی نیز هنگامی دیده می شود که در پاییز در مناطق سردسیر و معتدله، یخبندان ناگهانی رخ ندهد زیرا این نوع یخبندان سبب ریزش ناگهانی برگ در گیاهان خزان دار می - شود.

ویژگی به خوبی استفاده شود. درختان و درختچه هایی مانند انجیلی، ژینکو، درخت آزاد، ذغال اخته، توت معمولی و توت مجنون، توت آمریکایی، درخت لاله، افرای سرخ، افرای قندی، بلوط سرخ، درخت پر یا دودی، درخت آتش یا بامبوی آتشین، دار تالاب، عنبرالسائل، سه رنگ، توری، پده، بید سرخ، چنار، نارون، شاه بلوط، نمدر، تمشک، برخی از هسته دارها، برخی از گونه های پسته، سیب های زینتی، برخی سپیدارها و بسیاری از گونه هایی که بافت ناهمسان فرابوش (Periclinal chimera) هستند و برگ ابلق دارند مانند برگ نو طلایی و ابلق، شمشاد ابلق، سنجد زینتی ابلق، افرای ابلق و نیز سوزنی برگان دارای برگساره

منابع

- خوشخوی م (۱۳۹۳). اصول نوین باغبانی. انتشارات دانشگاه شیراز. ۶۳۸ صفحه.
- روحانی غ (۱۳۹۳). طراحی باغ و احداث فضای سبز. انتشارات فرهنگ جامع. ۱۸۴ صفحه.
- فرهمند ه (۱۳۹۴). درختان و درختچه های زینتی (بازدائگان). انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد. ۴۵۹ صفحه.
- کافی م، خان سفید، م (۱۳۸۷). طراحی کاشت منظر (رویکردی حرفه ای به طراحی باغ). ترجمه. انتشارات آبیژ. ۲۴۶ صفحه.
- نوری ع ر، نوری س، نوری س (۱۳۸۷). هنر باغبانی (ترجمه). انتشارات آبیژ. ۲۳۹ صفحه.
- Adams WW, Zarter CR, Ebbert V, Demmig-Adams B (2004). Photoprotective strategies of overwintering evergreens. *Bioscience*. 54: 1-9.
- Archetti M. 2009. Phylogenetic analysis reveals a scattered distribution of autumn colors. *Ann Bot*. 103: 703-713.
- Archetti, M, Brown SP (2004). The coevolution theory of autumn colors. *Proc R Soc Lond*. 271: 1219-1223.
- Archetti M, Richardson AD, O'Keefe J, Delpierre N (2013). Predicting climate change impacts the amount and duration of autumn colors in a New England forest. *PLOS ONE*. 8: 1-8.
- Archetti M, Doring, TF, Hagen SB, Hughes NM, Leather SR, Lee DW, Lev- Yadun S, Manetas Y, Ougham HJ, Schaberg PG, Thomas H (2009). Unraveling the evolution of autumn colors: an interdisciplinary approach. *Trends Ecol Evol*. 24: 166-173.
- Arora R, Rowland LJ (2013). Physiological research on winter hardiness: Deacclimation resistance,

reacclimation ability, photoprotection strategies and a cold acclimation protocol design. HortScience 46: 1070-1078.

Baraldi R, Canaccini F, Cortes S, Magnani F, Rapparini F, Zamboni A, Raddi S (2008). Role of zanthophyll cycle-mediated photoprotection in *Arbutus undedo* plants exposed to water stress during Mediterranean summer. Photosynthetica 48: 378-388.

Bartley GK (2012). Applicability of Chemical Compounds for Reducing Light Stress in Bentgrass. MS.c. Thesis. The University of Tennessee, Knoxville. 81p.

Berardi A, Frey FM, Denton EM, Wells JH (2013). Betalain color morphs exhibit differential growth rate, defensive ability, and pollen tube growth rates in *Mirabilis jalapa* (Nyctaginaceae). Int J Plant Sci. 174: 1229-1238.

Blackburn GA (2007). Hyperspectral remote sensing of plant pigments. J Exp Bot. 58: 855-867.

Cabanes F, Gandia-Herrero J, Edscribano J, Garcia-Carmona F, Jimenes-Atienzar M (2014). One-step synthesis of betalains using a novel betalamic acid derivatized support. J Agric Food Chem. 62: 3776-3782.

Carpenter KL, Keidel TS, Pihl MC, Hughes NM (2014). Support for a photoprotective function of winter leaf reddening in nitrogen-deficient individuals of *Lonicera japonica*. Molecules 19: 17810-17828.

Chaney WR (1997). Why leaves Change color-The Physiological Basis. Department of Forestry and Natural Resources. Purdue University. Available at: www.fnr.purdue.edu

Close DC, Bedale CL (2003). The Ecophysiology of Foliar Anthocyanin. The Botanical Review 69:149-161.

Davies KM (2004). Plant Pigments and Their Manipulation. Ann. Plant Rev. Vol. 14. Blackwell Publishing Ltd. 369p.

Delgado-Vergas F, Jimenes AR, Paredes-Lopez O (2000). Natural pigments: Carotenoids, Anthocyanins and Betalains- characteristics, biosynthesis, processing and stability. Critical Rev. Food Sci Nut. 40: 173-289.

Feild TS, Lee DW, Holbrook NM (2001). Why leaves turn red in autumn. The role of anthocyanins in senescing leaves of red-osier dogwood. Plant Physiol. 127: 566-574.

Fracheboud Y, Luquez V, Bjorken L, Sjodin A, Tuominen H, Jansson S (2009). The control of autumn senescence in European aspen. Plant Physiol. 149: 1982-1991.

Gandia-Herrero F, Garcia- Carmona F (2013). Biosynthesis of betalains: yellow and violet plant pigments. Trends in Plant Science 18: 334-343.

Garcia-Plazola JI, Olano JM, Hernandez A (2003). Photoprotection in evergreen Mediterranean plants during sudden periods of intense cold weather. Trees 17: 285-291.

Gould KS (2004). Nature's Swiss army knife: The diverse protective roles of anthocyanins in leaves. J Biomed Biotech. 5: 314-320.

Guaadaoui A, Saddik R, Bouali A, Boukhatem N, Benchat N, Hamal A (2014). Betalains polyacetylenes and tocopherols as biocompounds: A concise review for enriching the bioactivity concept. Int J Nu Food

Sci. 3: 230-237.

Guo J, Han W, Wang MH (2008). Ultraviolet and environmental stresses in the induction and regulation of anthocyanin biosynthesis: a review. *Afric J Biotech*. 7: 4966-4972.

Hagen-Thorn A, Varnagirte I, Nihlgard B, Aromalaitis K (2006). Autumn nutrient resorption in four deciduous forest tree species. *Forest Ecol Man*. 228: 33-39.

Han XH, Gao ZJ, Xiao XG (2009). Enzymes and genes involved in the betalain biosynthesis in higher plants. *Afric J Biotech*. 8: 6735-6744.

Harrison D, Kochanek J, Joyce D (2010). Understanding the Chemical Basis of flower color in Australian native *Ptilotus* and *Gomphrena*. Final Research Report. Australia Flora Foundation. Center for Native Floriculture. School of Land, Crop and Food Sciences. The University of Queensland. 10p.

Hoch W (2004). Leaf color change in autumn. University of Wisconsin garden facts. Wisconsin Cooperative Extension. Wisconsin University.

Hormaetxe K, Mara Becerril J, Fleck I, Pinto M, Garcia-Plazaola JI (2005). Functional role of red (retro)-carotenoids as passive light filters in the leaves of *Buxus sempervirens* L.: increased protection of photosynthetic tissues? *J Exp Bot*. 56: 2629-2636.

Hughes NM (2009). The Photoprotective Role of Anthocyanin Pigments in Leaf Tissue. Ph.D. Thesis. Department of Biology, Wake Forest University. 169p.

Hughes NM (2011). Winter leaf reddening in evergreen species. *New Phytol*. 190: 573-581.

Hughes NM, Neufeld HS, Berkey KO (2005). Functional roles of anthocyanins in high-light winter leaves of the evergreen herb *Galax urceolata*. *New Phytol*. 168: 575-587.

Hughes NM, Smith WK (2007). Seasonal photosynthesis and anthocyanin production in 10 broadleaf evergreen species. *Func Plant Biol*. 34: 1072-1079.

Jahns P, Holzwarth AR (2012). The role of the xanthophyll cycle and lutein in photoprotection of photosystem II (Review). *Biochimica et Biophysica Acta*. 1817: 182-193.

Jain J, Gould KS (2015). Functional significance of betalain biosynthesis in leaves of *Disphyma austral* under salinity stress. *Environ Exp Bot*. 109: 131-140.

Kaufman AJ, Lohr VI (2004). Does plant color affect emotional and psychological responses to landscape? *Proc. XXVI IHC, Horticulture, Human well-being and life quality. Acta Hort*. 639: 229-223.

Keskitalo J, Bergquist G, Gardestrum P, Jansson S (2005). A cellular timetable of autumn senescence. *Plant Physiol*. 139: 1635-1648.

Koike T (1990). Autumn coloring, photosynthetic performance and leaf development of deciduous broad-leaves trees in relation to forest succession. *Tree Physiol*. 7: 21-32.

Lee DW, Keefe JO, Holbrook MN, Field TS (2003). Pigment dynamics and autumn leaf senescence in New England forest, Eastern USA. *Ecol Res*. 18: 677-694.

Manetas Y, Drinia A, Petropoulou Y (2002). High contents of anthocyanins in young leaves are correlated with low pools of xanthophylls cycle components and low risk of photoinhibition.

Photosynthetica 40:349-354.

Matile P (2000). Biochemistry of Indian summer: Physiology of autumnal leaf coloration (Review). Exp Gerontol. 35: 145-158.

Mlodzinska E (2009). Survey of plant pigments: molecular and environmental determination of plant colors. Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica 51: 7-16.

Moreno DA, Garcia-Viguera C, Gil JJ, Gil-Izquierdo A (2008). Betalains in the era of agri-food science, technology and nutritional health. Phytochem Rev. 7: 161-280.

Nakatsuka T, Yamada E, Takahashi H, Imamura T, Suzuki M, Ozeki Y, Tsujimura I, Sakamoto Y, Sasaki N (2013). Genetic engineering of yellow betalain pigments beyond the species barrier. Scientific Reports.

Neil SO (2002). The Functional Role of anthocyanins in Leaves. Ph.D. Thesis. School of Biological Science, University of Auckland. New Zealand. 196p.

Niliforou C, Pilippou P, Menetas Y, Fotopoulos V (2014). Winter leaf redness in mastic tree (*Pistacia lentiscus* L.) is associated with increased cellular damaged levels and modified nitric oxide and hydrogen peroxide biosynthesis. Adv Plants Agric Res. 1: 1-5.

Ninemets U, Bilger W, Kull O, Tenhunen JD (1998). Acclimation to high irradiance in temperate deciduous trees in the field: changes in xanthophyll cycle pool size and in photosynthetic capacity along a canopy light gradient. Plant, Cell and Environ. 21: 1205-1218.

Nisar N, Li L, Lu S, Khin NC, Pogson BJ (2015). Carotenoid metabolism in plants. Molecular Plant 8: 68-82.

Pale V (2011). Improving the Optical Properties of Chlorophyll Aggregates with Supramolecular Design. MS.C. Thesis. School of Electronic Engineering. Aalto University. 60p.

Queenborough SA, Metz MR, Valencia R, Wright SJ (2013). Demographic consequences of chromatic leaf defence in tropical tree communities: do red young leaves increase growth and survival? Ann Bot. 112: 677-684.

Ougham H, Morris P, Thomas H (2005). The colors of autumn leaves as symptoms of cellular recycling and defenses against environmental stresses. Current Topics in Developmental Biol. 66:135-160.

Ravichandran K, Thaw Saw NMM, Mohdaly AAA, Gabr AAM, Kastell A, Riedel H, Cai Z, Knorr D, Smetanska I (2013). Impact of processing of red beet on betalain content and antioxidant activity. Food Res Int. 50: 670-675.

Rolshausen G, Schaefer HM (2007). Do aphids paint the tree red (or yellow) - can herbivore resistance or photoprotection explain colorful leaves in autumn? Plant Ecol. 191: 77-84.

Rosati C, Diretto G, Giuliano G (2009). Biosynthesis and Engineering of Carotenoids and Apocarotenoids in Plants: State of the Art and Future Prospects. Biotech Gen Eng Rev. 26: 151-174.

Schaberg PG, Van Den Berg AK, Murakami PF, Shane JB, Donnelly JR (2003). Factors influencing red expression in autumn foliage of sugar maple trees. Tree Physiol. 23: 325-333.

Stintzig FC, Carle R (2004). Functional properties of anthocyanins and betalains in plants, food and human nutrition. Trends in Food Sci Technol. 15: 19-38.

Strack D, Voght T, Schliemann W (2003). Recent advances in betalain research. *Phytochemistry*. 62: 247-269.

Swarna J, Lokewari TS, Smita M, Ravindhran R (2013). Characterization and determination of in vitro antioxidant potential of betalains from *Talinum triangulare* (Jack.) Wild. *Food Chem*.141: 4382-4390.

Tanaka Y, Sakaki N, Ohmiya A (2008). Biosynthesis of plant pigments: anthocyanins, betalains and carotenoids. *The Plant Journal*. 54: 733-749.

Wen C.H, Lin SS, Chu FH (2015). Transcriptome analysis of a subtropical deciduous tree: autumn leaf senescence gene expression profile of Formosan gum. *Plant Cell Physiol*. 56: 163-174.

William A, Zeidan L, Brent H (2001). Physiological significance of anthocyanins during autumnal leaf senescence. *Tree Physiol*. 21:1-8.

Wojciechowska R, Skowronek K, Kolton A, Czaja M (2014). Some physiological changes in *Parthenocissus inserta* growing in urban conditions. *Proceeding of International Symposium on Plants in Urban Areas and Landscape*. Faculty of Horticulture and Landscape Engineering. Slovak University of Agriculture. 20-23.

Xu H (2013). Study on color in landscape architecture. In: Yang, Y. and M. Ma (Eds.). *Proceedings of the 2nd International Conference on Green Communications and Networks*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 223-229.

Zhang KM, Yu HJ, Xhou YH, Yu JQ, Xia XJ (2010). Photoprotective role of anthocyanin in *Begonia semperflorens*. *Plant Science*. 179: 202-208.

The Role of Pigments and the Putative Mechanisms Involved in Plants' Leaf Color Change and its Importance in Landscape

Farahmand Homayoun*, Mehdikhani Najmeh

Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman.

✉ * homayoun.farahmnad@gmail.com

Abstract

Plant pigments are chemical compounds that absorb or reflect light in visible spectrum. Four important plant pigments include chlorophylls, anthocyanins, carotenoids and betalains. Leaf color change is an amazing phenomenon on the earth which is spectacular especially during autumn in cool and temperate zones. Leaf color change is not merely restricted to deciduous species but also it occurs in evergreen species and new emerging shoots of both deciduous and evergreen ones. These changes are the consequence of very complex, harmonious and dynamic occurrences which are triggered by perception of some signals such as short days, low temperature and the increment of blue and violet wavelengths in autumn followed by extensive changes at cellular, molecular and ultimately gene expression. The interaction of some factors such as genetic base, growth and developmental stage, leaf life, day length, temperature, light intensity, UV, relative humidity, elevation, plant hormones, carbohydrates, minerals, pigment combination, co-pigments, metal ions, pH determine leaf color change. Reduction in auxin synthesis, the increase of ethylene and abscisic acid and the reduction of nitrogen and phosphorus are among internal changes occurring during leaf color change especially in autumn. Although, leaf color change in deciduous species is associated with senescence but this process is not necessarily related to senescence. It is generally accepted that leaf color change is closely linked with adaptation mechanisms against various stresses including light stress, UV, low and high temperature, herbivory. Color is an important element in landscape design. Therefore, plant species particularly trees and shrubs with colored leaves or elegant autumn are very important from aesthetic perspective and are extensively used for landscape purposes worldwide. Furthermore, leaf color change is significant from economic viewpoint and in some regions of temperate zones, a considerable income is obtained due to tourism importance of deciduous forests.

Key words: Landscape, Leaf color, Plant pigments.