

Süs Lahanalarında Yaprak Rengine Yönelik Moleküler Araştırmalar

Gölge SARIKAMIŞ*

Ankara Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, Ankara; ORCID: 0000-0003-0645-9464
Gönderilme Tarihi: 11 Eylül 2024

Kabul Tarihi: 11 Aralık 2024

ÖZ

Süs lahanaları (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*), çarpıcı renk ve şekillerde yaprakları ve soğuk koşullara dayanımı ile kesme çiçek, saksı ve peyzaj bitkisi olarak değerlendirilmektedir. Süs lahanalarında yaprak rengi çeşitlilik göstermekte ve bitkinin süs bitkisi olarak değerlendirilme potansiyelini artırmaktadır. Genel olarak dış yapraklar yeşil tonlarında olurken iç kısımda gelişen yapraklar beyaz, pembe, kırmızı, mor renklindedir. Gelişme dönemine ve çevresel koşullara göre yaprak rengi farklılık gösterebilmektedir. İç yaprakların kırmızı, pembe, mor veya beyaza dönüşümünün düşük sıcaklıklar tarafından teşvik edildiği, bu yolla bitkinin düşük sıcaklığa adaptasyon gösterdiği bildirilmektedir. Bitkilerde başlıca renk pigmentleri klorofil, karotenoidler ve antosiyaninlerdir. Süs lahanalarında başta antosiyaninler olmak üzere renk pigmentlerinin sentez yollarında yer alan genlerin ve transkripsiyon faktörlerinin belirlenmesine yönelik araştırmalar sürdürülmektedir. İlgili genlerin tespitine yönelik gen haritalarının oluşturulması ile genomik düzeyde ve RNA dizi analizleri ve gen ifade analizleri ile transkriptomik düzeyde çalışmalar yürütülmektedir. Son yıllarda CRISPR/Cas9 genom düzenleme yöntemi kullanılarak yaprak rengi ile ilişkili genlerin fonksiyonları oluşturulan mutant bitkilerle incelenmekte ve bu tekniğin süs lahanalarında kullanım olanağı değerlendirilmektedir. Süs lahanalarında yaprak renginin genetik ve moleküler mekanizmasının belirlenmesi yeni çeşitlerin geliştirilmesine yönelik ıslah çalışmaları bakımından önem taşımaktadır. Sunulan çalışmada süs lahanalarında yaprak rengi ile ilgili moleküler düzeyde yürütülen araştırmalar literatür bilgileri ışığında değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Süs lahanası, yaprak rengi, Brassica

Molecular Research on the Leaf color of Ornamental Kale

ABSTRACT

Ornamental kale (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) is used as a cut flower, pot, and landscape plant due to its strikingly colored and shaped leaves and resistance to cold environmental conditions. Leaf color varies in ornamental kale and increases the potential of the species as an ornamental plant. In general, the outer leaves are in green, while the inner leaves is white, pink, red and purple. Leaf color may vary depending on the developmental stage of the plant and the environmental conditions. Low temperatures lead to the transition of the inner leaves from green to red, pink, or white and are considered as the plant's adaptation to low temperatures. The major color pigments in plants are chlorophyll, carotenoids, and anthocyanins. Research is continuing to determine the genes and transcription factors that are involved in the biosynthetic pathways of color pigments and control leaf color in ornamental kale. The identification of the genes and their expression profiles are carried out at the transcriptomic level. Most recently, the utilization of CRISPR/Cas9 genome editing enabled to explore the functions related to leaf color in ornamental kale. Determining the molecular mechanism underlying leaf color is important for breeding studies aimed to develop novel ornamental kale varieties. In the present review, molecular studies on leaf color in ornamental kale is summarized.

Keywords: Ornamental kale, leaf color, Brassica

GİRİŞ

Süs lahanaları (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*), göz alıcı renk ve şekillerde yaprakları ve soğuğa dayanıklı olmaları nedeniyle özellikle sonbahar ve kış aylarına yönelik peyzaj tasarımlarının bir parçası olarak park ve bahçelerde süs bitkisi olarak değerlendirilmektedir. Sebze olarak tüketilen brokoli, karnabahar ve lahana gibi türler ile yem bitkisi ve yağ bitkisi olarak değerlendirilen ekonomik

değeri yüksek türleri de içeren *Brassicaceae* familyası *Brassica* cinsi içerisinde yer almaktadırlar. Genel olarak dış olgun yaprakları yeşil, iç yaprakları, beyaz, krem, kırmızı, pembe, mor tonlarında, düz, yuvarlak, kesikli, dalgalı formlarda olmaktadır. İki veya üç renkli de olabilen süs lahanaları görsel özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Üretimde yaygın olarak F₁ hibrit çeşitler kullanılmakta, çeşitler yaprak özelliklerine göre yaprakları yuvarlak ve

*Sorumlu yazar / Corresponding author: sarikamis@agri.ankara.edu.tr

pürüzsüz olanlar ile saçaklı ve kesik yapraklı olanlar şeklinde sınıflandırılmaktadır [1].

Diğer lahanalar gibi süs lahanaları da bu türlere özgü kükürtlü bileşikler olan glukozinolatları içermektedir. Glukozinolatlar, lahanalar grubu sebzelerde sentezlenen ve bitkide savunma sistemi olarak görev aldığı bilinen sekonder metabolitlerdir. Bitki dokularında oluşan mekanik hasar sonucunda, hücre içerisinde mevcut tirozinaz enzimi tarafından parçalanarak biyoaktif metabolitlere dönüşmektedirler. Brokolide yaygın olarak bulunan sülfürofan başta olmak üzere bu metabolitlerin, sağlık değeri yanında, antimikrobiyal özellikleri ile toprak kökenli hastalık ve zararlılarla mücadelede etkili oldukları bildirilmektedir [2, 3]. Farklı yaprak özelliklerine sahip süs lahanası çeşitlerinde glukozinolat içeriğinin belirlendiği bir çalışmada, 15 farklı glukozinolat belirlenmiş, bunlar içerisinde dört glukozinolat formunun (progoitrin, sinigrin, glucoraphanin ve glucobrassicin) miktar bakımından öne çıktığı belirlenmiştir. Çeşitler arasında glukozinolat miktarı bakımından farklar olduğu tespit edilmiştir [4].

Süs lahanalarının çarpıcı renklerini klorofil, antosiyaninler ve karotenoidler gibi başlıca renk pigmentleri sağlamaktadır [5]. Yaprak rengi genetik faktörlerle birlikte başta sıcaklık olmak üzere çevresel koşulların etkisi altındadır. Özellikle iç yapraklarda geç sonbahar veya kış döneminde kırmızı renk oluşumu sıcaklık düşüşüne bağlı olarak klorofil ve karotenoid içeriğinin azalması ve antosiyanin içeriğinin artışıyla birlikte ortaya çıkmaktadır [6]. Antosiyaninler, bitkilere göz alıcı kırmızı, mavi, mor renkleri veren ve bitkilerde çok yaygın olarak bulunan flavonoidlerdir. Suda çözünebilir doğal renk maddeleri arasında en büyük ve en önemli grubu temsil etmektedirler. En fazla çiçek ve meyvelerde bulunmakla birlikte, yapraklarda, gövde ve depo organlarında da bulunabilmektedirler. Çarpıcı renklerdeki çiçekler, arı ve böcekleri çekerek, çiçek tozları ve tohumların yayılmasına yardımcı olurken, bitkileri biyotik ve abiyotik stres faktörlerinin zararlı etkilerinden korumaktadırlar. Aynı zamanda yüksek antioksidan aktivite gösterdiklerinden insan sağlığı bakımından yararlıdırlar [7]. Doğada 600'den fazla antosiyanin bulunduğu belirtilmektedir [8]. Antosiyaninlerin bitkideki miktarı bitki türü ve çeşidine göre değişmektedir. Cyanidin kırmızı ve mor yapraklı süs lahanalarında bulunan başlıca antosiyanin olarak belirlenmiş, beyaz yapraklılarda antosiyanine rastlanmamıştır [9]. Yetiştiricilik sırasındaki çevresel koşulların bitkinin antosiyanin miktarını etkilediği belirtilmektedir. Genel olarak düşük sıcaklıkların antosiyanin sentezinden sorumlu genlerin ifadesini teşvik ederek antosiyanin miktarını

artırdığı, yüksek sıcaklıkların ise antosiyaninlerin parçalanmasına neden olarak yaprak renginin solmasına neden olduğu belirtilmekte, antosiyanin birikiminin bitkinin soğuğa ve diğer stres faktörlerine karşı bitkinin adaptasyonunu sağlama stratejisi olduğu bildirilmektedir [10]. Kırmızı yuvarlak yapraklı bir double haploid hat ile beyaz saçaklı yapraklı bir diğer double haploid hatta yapılan incelemelerde sıcaklığın 10°C'nin altına düşmesi ile iç kısımda yeni gelişen yaprakların kırmızı veya beyaz olduğu, beyaz yaprak kısımları incelendiğinde pigment oluşumuna rastlanmadığı, sadece olgun yapraklarda klorofil pigmenti bulunduğu ifade edilmiştir [11].

Süs lahanalarında yaprakta renk oluşumunun genetik mekanizmasını açıklamaya yönelik araştırmalar, antosiyanin başta olmak üzere renk maddelerinin biyosentezi üzerine yoğunlaşmıştır. *Brassica* cinsi ve *Brassicaceae* familyasına dahil model bitki *Arabidopsis* başta olmak üzere pek çok türde antosiyanin biyosentezi ile ilgili genler ve transkripsiyon faktörleri tanımlanmıştır [12]. Bu bilgiler ışığında süs lahanalarında yürütülen genomik, transkriptomik araştırmalar ve son yıllarda genom düzenleme teknikleri ile yaprak rengi, sıcaklık değişiminin renk üzerine etkisi, soğuğa tolerans ve renk ilişkisi çok yönlü olarak incelenmektedir.

Yapraklara yeşil rengi veren klorofil pigmentinin biyosentezi ve kloroplast gelişimi ile ilgili genler *B.oleracea* ve *B.rapa* gibi türler ve *Arabidopsis*'ide kapsayan pek çok bitki türünde tanımlanmıştır [13, 14]. Süs lahanalarında sıcaklık değişimine bağlı olarak iç yaprak renginde gözlenen renk değişimleri klorofil biyosentezinden sorumlu genlerin ifadesindeki değişimlerin belirlenmesiyle açıklanmıştır [15].

Karotenoid biyosentezi *Brassica* cinsi dahil pek çok türde tanımlanmıştır [16]. Buna göre karotenoidlerin plastidlerde ve sitozolde iki bağımsız yol ile sentezlendiği ve biyosentez aşamalarında yer alan genlerin bazı türlerde belirlendiği ve çevresel etkilere bağlı gen ifade seviyelerindeki değişimlerin izlendiği belirtilmiştir [17].

Sunulan derleme çalışmasında süs lahanalarında yaprak renginin kalıtımının belirlenmesine yönelik genetik ve moleküler düzeyde yürütülen güncel araştırma sonuçları incelenerek değerlendirilmiştir. Yaprak rengini kontrol eden genlerin, transkripsiyon faktörlerinin belirlenerek renk oluşumunun genetik ve moleküler mekanizmasının aydınlatılması, süs bitkileri alanında görsel kalite bakımından öne çıkan yeni çeşitlerin ıslahına yönelik yürütülecek çalışmalara ışık tutacaktır.

SÜS LAHANALARINDA YAPRAK RENGİNİN KALITIMI VE MOLEKÜLER ARAŞTIRMALAR

Genomik Araştırmalar

Süs lahanalarında yaprak rengi bakımından görülen geniş varyasyon bu türün süs bitkisi olarak değerlendirilme potansiyelini artırmaktadır. Yaprak rengi görsel kalite yanında bitkinin soğuğa dayanıklılığını da etkilemektedir. Süs lahanasında yaprak rengini kontrol eden birçok gen haritalanmıştır.

Kırmızı yaprak renginin kalıtımını araştırmak üzere yürütülen bir çalışmada, kırmızı ve beyaz yapraklı süs lahana çeşitleri melezlenmiş, melez bitkiler kendilenerek F₂ popülasyonu elde edilmiştir. Yaprak rengi bakımından açılım gösteren F₂ popülasyonunda yapılan genetik değerlendirmeler sonucunda kırmızı yaprak renginin bir veya iki çift gen tarafından kontrol edilen kalitatif bir özellik olduğu bildirilmiştir [18, 19]. SRAP markırlar kullanılarak bir genetik harita oluşturulmuş ve kırmızı renk özelliği ile ilişkili Re lokusu ve bu lokusla bağlantılı olduğu tespit edilen SRAP markırlar belirlenmiştir [19]. Diğer bir çalışmada, kırmızı yapraklı bir double haploid hat ile beyaz yapraklı bir double haploid hattın melezlenmesinin ardından kendilenerek oluşturulan F₂ popülasyonunda 4284 birey incelenmiş ve kırmızı rengin dominant (baskın) bir gen tarafından kontrol edildiği bildirilmiştir [20].

Pembe yaprak renginin kalıtımına yönelik bir çalışmada beyaz renkli bir hat ile pembe renkli bir hattın melezlenmesi sonucunda elde edilen melez bitkilerden F₂ kademesinde harita popülasyonu oluşturmuş, bu özelliğin bir yarı baskın gen tarafından kontrol edildiği belirlenmiştir [21]. Çalışmada Pi olarak tanımlanan gen haritalanmış, bu genle bağlantılı olabilecek bir SSR ve bir SCAR markır belirlenerek, bu markırların süs lahanalarında pembe yaprak rengi ile ilgili ıslah çalışmalarında marker destekli seleksiyon (MAS) kapsamında kullanılabilmesi belirtilmiştir. Bir diğer araştırmada ise pembe ve beyaz yapraklı iki hattın melezlenmesi sonucunda elde edilen F₁, F₂ ve her iki ebeveynle oluşturulan geriye melez (BC) popülasyonlarında (BC₁P₁ ve BC₁P₂) yapılan genetik incelemelerle pembe renk özelliğinin yarı baskın bir gen tarafından kontrol edildiği gösterilmiştir. Ayrıca antosiyanin biyosentezinde yer alan pek çok enzimden biri olan dihydroflavonol 4-reductase (DFR) enzimi ile süs lahanasında antosiyanin birikimi ve pembe rengin oluşumu arasında bir ilişki olduğu belirtilmiştir [22].

Mor yaprak rengi ile ilgili yürütülen araştırmalarla, *Brassica* cinsine dahil türlerden

şalgamda bir gen bölgesi belirlenmiş ve bu bölgeden bir SSR bir de CAPS markır tespit edilmiştir [23]. Bir diğer çalışmada mor yapraklı pak-choi (*B.rapa* subsp. *chinensis*) ile yeşil yapraklı Çin lahanasının (*B.rapa* subsp. *pekinensis*) melezlenmesi sonucunda F₁, F₂ ve BC popülasyonları oluşturulmuş, açılım gösteren F₂ popülasyonundan elde edilen genetik bilgilere dayanarak tek bir dominant gen (BrPur) belirlenerek *B.rapa* genetik haritasında A03 numaralı kromozoma haritalanmıştır [24]. Baş lahanada yaprak renginin (mor/yeşil) iki adet eklemeli genin etkisinde olduğu, mor rengin baskın olduğu tespit edilmiştir [25]. Beyaz yapraklı ve mor yapraklı iki süs lahanası çeşidinin melezlenmesinin ardından elde edilen F₁'lerin kendilenmesiyle oluşturulan F₂ popülasyonunda ve her iki ebeveyn ile yapılan geriye melezlemeler sonucunda oluşturulan BC₁P₁ ve BC₁P₂ popülasyonlarında yürütülen genetik analizlere göre mor rengin BoPr olarak isimlendirdikleri tek bir baskın gen tarafından kontrol edildiği bildirilmiştir [26].

Beyaz ve beyaz-yeşil yapraklı süs lahanaları, moleküler çalışmalarda kloroplast gelişimi, pigment metabolizması ve fotosentez gibi önemli fizyolojik olayların mekanizmasının incelenmesinde kaynak olarak kullanılmaktadır. Beyaz renkli süs lahanası sıcaklığa duyarlı bir klorofil mutanı olarak tanımlanmaktadır [27]. Düşük sıcaklıkta yeni gelişen iç yaprakların beyaz renk olduğu, kritik eşik sıcaklık olarak bildirilen 16°C üzerindeki normal sıcaklık koşullarında yeniden yeşil renkli olduğu belirtilmiştir [27]. Araştırmalar, beyaz rengin klorofil biyosentezinin ve kloroplast gelişiminin engellenmesine bağlı olabileceğini göstermiş, Bol015404 geni, süs lahanasında beyaz iç yaprak renginin oluşumundan sorumlu aday gen olarak tanımlanmıştır [15].

Transkriptomik Araştırmalar

Yeni nesil dizileme teknolojilerindeki gelişmelere bağlı olarak bitki türlerinde transkriptomik düzeyde RNA dizi (RNA-seq) analizleri yaygınlaşmıştır. Süs lahanalarında renk özelliği ile ilgili genlerin belirlenebilmesi amacıyla farklı yaprak rengine sahip çeşitlerden alınan RNA örnekleri dizi analizine alınarak renk oluşumu ile ilgili aday genler tespit edilmektedir. Belirlenen genler, gerçek zamanlı PCR (qRT-PCR) tekniği ile ifade analizine alınarak validasyonları sağlanmaktadır [27]. Kırmızı ve beyaz iki farklı renkte süs lahanasında yürütülen RNA dizi analizi ile *B.oleracea* referans genomunda antosiyanin biyosentezinden sorumlu genler belirlenmiş ve gen ifade analizleri yapılmıştır. Bu kapsamda antosiyanin biyosentezinde yer alan 81 adet gen tespit edilmiştir [11]. Beyaz, yeşil ve beyaz-

yeşil (yaprak kenarı yeşil, iç kısmı beyaz) üç farklı çeşidin RNA dizileme yöntemi ile transkriptomik profili çıkarılmış, aynı zamanda pigment analizleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda yeşil ve beyaz renk oluşumunun; klorofil ve karotenoid biyosentezi, kloroplast gelişimi ve fotosentezin birlikte etkisi altında olduğu ve sonuçların yaprak renginin moleküler mekanizmasının anlaşılmasına yönelik bilgi sağladığı belirtilmiştir [27]. Benzer bir yaklaşım, üç renkli (dış yapraklar yeşil, orta yapraklar beyaz, iç yapraklar mor renkli) olarak geliştirilen süs lahanasında uygulanmıştır. Beyaz ve mor yapraklarda klorofil miktarı yeşil yapraklara göre daha az, antosiyanin içeriği mor yapraklarda en yüksek bulunmuştur. Antosiyanin biyosentezinde görev alan genlerin ifadesi mor yapraklarda diğerlerine göre artmıştır. Beyaz ve mor yapraklarda klorofil miktarının azalmasının, klorofilin parçalanmasına bağlı olmadığı, klorofil biyosentezinde görev alan genlerin ifadesindeki azalışa bağlı olduğu vurgulanmıştır [17].

Süs lahanalarında yaprak rengi ile ilgili kilit genlerin belirlenmesi, yaprak rengi bakımından görünen varyasyonun genetik mekanizmasını açıklamaktadır. Bu bilgiler, yeni çeşitlerin geliştirilmesine yönelik ıslah çalışmalarına yön vermektedir.

Genom Düzenleme (CRISPR/Cas9) Tekniği ile Yürütülen Araştırmalar

Son yıllarda, genetik mühendisliği alanındaki en yeni uygulamalardan olan ve bahçe bitkileri alanında kullanılmaya başlanan genom düzenleme teknikleri pek çok önemli agronomik özelliklerle ilgili genlerin işlevini belirlemek ve ıslah amaçlarına uygun yeni çeşitler geliştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu uygulamalar arasında öne çıkan “kümelenmiş düzenli aralıklı kısa palindromik tekrarlar” olarak tanımlanan (CRISPR) sistemi, bitkilere istenen agronomik ve kalite özelliklerinin daha hızlı bir şekilde kazandırılmasını sağlamaktadır. Bakterilerin virüslere karşı geliştirdikleri savunma sistemini esas alan teknik DNA'nın her iki iplikçisini kesebilen bir endonükleaz olan Cas bileşeni ile birlikte CRISPR/Cas olarak adlandırılmakta, bitki ıslahında en yaygın kullanılanı ise CRISPR/Cas9 olarak bilinmektedir [28].

B.oleracea grubunda antosiyanin biyosentezinin mekanizmasını açıklamak amacıyla yürütülen bir çalışmada, yeşil (antosiyanin bulunmayan) kıvrıkcık yapraklı lahana ile antosiyanin içeren lahana ve Çin lahanası melezlenerek oluşturulan popülasyonlardaki genetik açılım incelenmiştir. Genetik analiz sonuçlarına göre antosiyanin içermeyen bitkilerde bu özelliğin resesif bir gen tarafından kontrol edildiği

belirlenmiş ve haritalanmıştır. Bir sonraki adımda, aday genin fonksiyonunu belirleyebilmek amacıyla CRISPR/Cas9 sistemi ile mutant bitkiler geliştirilmiş ve bu mutant bitkilerin tamamen yeşil renkli oldukları tespit edilmiştir. Bu sonuç, haritalanan aday genin ön görüldüğü gibi antosiyanin sentezi ile ilgili olduğunu destekler niteliktedir [29].

Süs lahanalarında CRISPR/Cas9 sistemi, yaprak rengi ile ilgili bazı genlerin fonksiyonunu belirlemek ve bu teknolojinin uygulama potansiyelini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Süs lahanalarında kloroplast gelişimi ve düşük sıcaklık koşullarında yaprak renklenmesi ile ilgili olduğu düşünülen BoPQL₂ geni incelenmiştir. Beyaz-yeşil çizgili iç yapraklara sahip bir çeşit ile tamamen beyaz renkli iç yapraklara sahip bir çeşitten BoPQL₂ geni klonlanarak dizi farklılıkları belirlenmiştir. Dizi farklılıklarından yola çıkarak 5 adet SNP (Single Nucleotide Polymorphism) markır belirlenmiştir. Genin fonksiyonunu belirlemeye yönelik olarak CRISPR teknolojisi kullanılmış üç adet mutant bitki oluşturulmuştur. Geliştirilen mutantların aynı düşük sıcaklık koşullarında tamamen beyaz yapraklar oluşturduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar, BoPQL₂ genindeki mutasyonun düşük sıcaklığa hassasiyeti artırdığını, böylece yaprak kenar rengini etkilediğini göstermiştir. Çalışma aynı zamanda süs lahanasında CRISPR genom düzenleme tekniği ile yaprak renginin kontrol edilebileceğini göstermektedir [30].

Diğer bir çalışmada, pembe ve yeşil renkli süs lahanalarında CRISPR/Cas9 yöntemi ile antosiyanin birikimini kontrol eden BoDFR1 (Bo9g058630) geni ve ortoloğunun BoDFR2 (Bo2g116380) ifadesi pembe süs lahanasında engellenmiştir. BoDFR1 geni aktif olmayan mutantlarda antosiyanin birikimi çok az olurken, BoDFR2 geninin işlevsel olmaması antosiyanin birikimini etkilememiştir. Yeşil yapraklı süs lahanasında BoDFR1 geninde transkriptom analizi sonucunda belirlenen 1 bp'lik eklemenin yeşil yapraklı süs lahanasında antosiyanin birikimini engellediği tespit edilmiştir. Bu çalışma ile CRISPR/Cas9 sistemi kullanılarak DRF geninin fonksiyonu belirlenmiştir [31].

SONUÇ

Süs lahanalarında yaprak rengi ve morfolojisi açısından elde edilecek çeşitlilik ıslah öncelikleri arasındadır. Klasik ıslah yöntemleri bitkilere yeni özellikler katmak veya var olan özellikleri iyileştirmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak moleküler markır tekniklerin ıslah programlarına entegrasyonu ıslah çalışmalarının daha hızlı ve etkin şekilde yürütülmesini sağlamaktadır. Böylece daha kısa sürede yeni çeşitlere ulaşmak

mümkün olmaktadır. Süs lahanaları *Brassicaceae* familyasına dahil olduğundan gerek *Brassica* cinsi gerekse aynı familyada yer alan model bitki *Arabidopsis*'te yürütülen pek çok araştırma bitkilerde önemli fizyolojik özelliklerin genetik ve moleküler mekanizmasının aydınlatılmasını sağlamıştır. Süs lahanalarında renk oluşumunu sağlayan başlıca renk pigmentleri klorofil, antosiyaninler ve karotenoidlerin biyosentezinden sorumlu genler ve transkripsiyon faktörlerine ait bilgiler araştırmalarda önemli düzeyde yol alınmasına olanak sağlamıştır. *B.juncea* (hardal) bitkisinde mor renkli bir mutant bitkide yapılan bir çalışmada mor renk sentezini sağlayan BjPI1 geninin genetik haritalama ve tüm genom dizileme ile dominant karakterde olduğu tespit edilmiştir [32]. Kolzada (*B.napus*) üç farklı yaprak rengine sahip çeşitlerde yürütülen metabolomik ve transkriptomik analizlerle antosiyanin biyosentezinde yer alan yapısal genler ve transkripsiyon faktörleri belirlenerek, ifade seviyeleri incelenmiştir [33]. *B.oleracea* türünde tüm genom dizileme ve ifade analizleri ile 88 adet antosiyanin biyosentez geni tespit edilmiş (BoABGs), bunların 46 adedi *Arabidopsis* ile homoloji göstermiştir. İfade analizleri belirgin farklılıklar göstermiş, bunlar arasında antosiyanin birikimini BoMYB113.1 geni pozitif yönlü ve BoMYBL2.1 geni negatif yönlü olarak etkilemiştir. Bu iki genin kırmızı lahana ve süs lahanalarında etkili olan kilit genler olabileceği bildirilmiştir [34].

Yakın ve akraba türlerden genetik ve moleküler bilgi akışı süs lahanalarında yürütülen araştırmalara çok yönlü katkı sağlamıştır. Süs lahanalarında farklı renklerde bitkisel materyalin melezlenmesi sonucunda oluşturulan popülasyonlarda genetik düzeyde tanımlama, moleküler araçların kullanılmasıyla genetik haritalama, RNA dizi analizleri ile dizi farklılıklarının belirlenmesi, farklı koşullar altında gen ifade seviyelerindeki değişimlerin belirlenmesi ve son olarak da CRISPR/Cas9 sisteminin kullanıldığı görülmektedir.

İslah amaçlarına yönelik harita popülasyonları ile genetik haritaların oluşturulması, ilgili lokus bölgelerinin belirlenmesi, incelenen özelliğe ait gen/genlerle bağlantılı moleküler markırların tespitini sağlamaktadır. Süs lahanalarında oluşturulan genetik haritalarla yaprak rengi ile ilgili RAPD, SSR, SCAR, SRAP, SNP gibi markırlar tespit edilmiştir. Belirlenen markırlar gen kaynaklarının ve ıslah hatlarının taranmasında kullanılabilir. Markır destekli seleksiyon (MAS) olarak tanımlanan bu yaklaşım, ıslah çalışmalarına ivme kazandırmaktadır.

Moleküler biyoloji alanındaki teknolojik gelişmelere bağlı olarak, dizi analizleri daha erişilebilir teknolojiler olmuştur. Pek çok türde

genom veya transkriptom düzeyinde tarama olanağı sunmaktadır. Süs lahanalarında RNA düzeyinde dizi analizleri (RNA-seq) ile farklı yaprak rengine sahip bitkilerde, dizi farklılıkları tespit edilirken, renk özelliği ile bağlantılı olduğu bilinen genlerin, farklı şartlar altında gen ifade seviyelerindeki değişimler incelenmektedir. Düşük sıcaklık gibi renk dönüşümünü tetikleyen koşulların ilgili genlerin ifadesini ne yönde değiştirdiği tespit edilerek dönüşümün mekanizması açıklanmaktadır.

Son yıllarda genom düzenleme teknolojilerindeki gelişmeler ıslah çalışmalarına yeni bir boyut kazandırırken aynı zamanda pek çok fizyolojik özelliğin mekanizmasının aydınlatılmasına katkı sağlamaktadır. Süs lahanalarında yaprak rengi ile bağlantılı olarak CRISPR/Cas9 teknolojisi kullanılarak yapılan araştırmalarla oluşturulan mutant bitkilerde ilgili genlerin fonksiyonu incelenmiş ve bu teknolojinin süs lahanalarında kullanım potansiyeli değerlendirilmiştir.

Göz alıcı renkleri ve soğuğa tolerans göstermesi nedeniyle süs bitkisi olarak değerlendirilen süs lahanalarında antosiyanin başta olmak üzere renk pigmentlerinin biyosentezine yönelik genetik ve moleküler düzeyde güncel araştırma sonuçlarının, bu alanda yürütülecek ıslah çalışmalarına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Yanmaz, R., Tuncer, B. 2008. Parklarımızın kış gülleri: süs lahanaları. *Hasad* 24(279):90-93.
2. Sarıkamış, G. 2009. Glucosinolates in crucifers and their potential effects against cancer: review. *Canadian Journal of Plant Science* 89(5):953-959.
3. He, L., Jiang, H., Li, Y., Zhang, X., Sun, W., Liu, C., Zhao, Z., Yun, C., Li, H., Wang, C. 2024. Sulforaphane-enriched extracts from broccoli exhibit antimicrobial activity against plant pathogens, promising a natural antimicrobial agent for crop protection. *Biomolecules* 14:352.
4. Kushad, M.M., Cloyd, R., Babadoost, M. 2004. Distribution of glucosinolates in ornamental cabbage and kale cultivars. *Scientia Horticulturae* 101(3):215-221.
5. Simon, P.W. 1997. Plant pigments for color and nutrition. *HortScience* 32:12-13.
6. Hughes, N.M., Carpenter, K.L., Cannon, J.G. 2012. Estimating contribution of anthocyanin pigments to osmotic adjustment during winter leaf reddening. *Journal of Plant Physiology* 170:230-233.
7. Tena, N., Martin, J., Asuero, A.G. 2020. State of the art of anthocyanins: antioxidant activity,

- sources, bioavailability, and therapeutic effect in human health. *Antioxidants* 9:451.
8. Zou, J., Gong, Z., Liu, Z., Ren, J., Feng, H. 2023. Investigation of the key genes associated with anthocyanin accumulation during inner leaf reddening in ornamental kale (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*). *International Journal of Molecular Sciences* 24:2837.
 9. Zhu, P., Tian, Z., Pan, Z., Feng, X. 2017. Identification and quantification of anthocyanins in different coloured cultivars of ornamental kale (*Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC). *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 93(5):466-473.
 10. An, J-P., Wang, X-F., Zhang, X-W., Xu, H-F., Bi, S-Q., You, C-X., Hao, Y-J. 2020. An apple MYB transcription factor regulates cold tolerance and anthocyanin accumulation and undergoes MIEL1-mediated degradation. *Plant Biotechnology Journal* 18:337-353.
 11. Guo, N., Han, S., Zong, M., Wang, G., Zheng, S., Liu, F. 2019. Identification and differential expression analysis of anthocyanin biosynthetic genes in leaf color variants of ornamental kale. *BMC Genomics* 20:564.
 12. Gonzalez, A., Zhao, M., Leavitt, J.M., Lloyd, M.A. 2010. Regulation of the anthocyanin biosynthetic pathway by the TTG1/bHLH/MYB transcriptional complex in Arabidopsis seedlings. *Plant Journal* 53(5):814-827.
 13. Xiangjun, Z., Zhangjun, F., Thannhauser, T.W., Li, L. 2011. Transcriptome analysis of ectopic chloroplast development in green curd cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. *botrytis*). *BMC Plant Biology* 11(1):169.
 14. Liu, X., Chen, C.Y., Wang, K.C., Luo, M., Tai, R., Yuan, L., Zhao, M., Yang, S., Tian, G., Cui, Y., Hsieh, H-L., Wu, K. 2013. Phytochrome interacting factor3 associates with the histone deacetylase HDA15 in repression of chlorophyll biosynthesis and photosynthesis in etiolated Arabidopsis seedlings. *Plant Cell* 25(4):1258-1273.
 15. Yan, C.H., Peng, L.Y., Zhang, L., Qiu, Z.M. 2020. Fine mapping of a candidate gene for cool-temperature-induced albinism in ornamental kale. *BMC Plant Biology* 20:460.
 16. Tian, H., Fang, L., Zhang, Q., Wang, M., Wang, Y., Jia, L. 2018. Transcriptome analysis of carotenoid biosynthesis in the *Brassica campestris* L. subsp. *chinensis* var. *rosularis* Tsen. *Scientia Horticulturae* 235:116-123.
 17. Liu, Xp., Zhang, B., Wu, J., Li, Z., Han, F., Fang, Z., Yang, L., Zhuang, M., Lv, M., Liu, Y., Li, Z., Yu, H., Li, X., Zhang, Y. 2020. Pigment variation and transcriptional response of the pigment synthesis pathway in the S2309 triple-color ornamental kale (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) line. *Genomics* 112(3):2658-2665.
 18. Xie, L.N. 2003. Genetic analysis of leaf color and shape and mechanism of self-incompatibility of *Brassica oleracea* var. *acephala*. Master's thesis, Northeast Forestry University, Harbin.
 19. Wang, Y.S., Liu, Z.Y., Li, Y.F., Zhang, Y., Yang, X.F., Feng, H. 2013. Identification of sequence-related amplified polymorphism markers linked to the red leaf trait in ornamental kale (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*). *Genetics and Molecular Research* 12:870-877.
 20. Ren, J., Liu, Z., Niu, R., Feng, H. 2015. Mapping of Re, a gene conferring the red leaf trait in ornamental kale (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*). *Plant Breeding* 134:494-500.
 21. Zhu, P., Cheng, M., Feng, X., Xiong, Y., Liu, C., Kang, Y. 2016. Mapping of Pi, a gene conferring pink leaf in ornamental kale (*Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC). *Euphytica* 207:377-385.
 22. Feng, X., Zhang, Y., Wang, H., Tian, Z., Xin, S., Zhu, P. 2021. The dihydroflavonol 4-reductase BoDFR1 drives anthocyanin accumulation in pink-leaved ornamental kale. *Theoretical and Applied Genetics* 134:159-169.
 23. Hayashi, K., Matsumoto, S., Tsukazaki, H., Kondo, T., Kubo, N., Hirai, M. 2010. Mapping of a novel locus regulating anthocyanin pigmentation in *Brassica rapa*. *Breeding Science* 60:76-80.
 24. Wang, W., Zhang, D., Yu, S., Liu, J., Wang, D., Zhang, F., Yu, Y., Zhao, X., Lu, G., Su, T. 2014. Mapping the BrPur gene for purple leaf color on linkage group A03 of *Brassica rapa*. *Euphytica* 199:293-302. <https://doi.org/10.1007/s10681-014-1128-y>.
 25. Zhang, H.C., Liu, C.B., Ren, Y. R., Xuan, S.X., Shen, S.X. 2010. Head cabbage leaf color (purple/green) of genetic analysis and gene location. *Scientia Agricultura Sinica* 2:346-350.
 26. Liu, Xp., Gao, Bz., Han, Fq., Fang, Zy., Yang, Lm., Zhuang, M., Lv, Hh., Liu, Ym., Li, Zs., Cai, Cc., Yu, Hl., Li, Zy., Zhang, Yy. 2017. Genetics and fine mapping of a purple leaf gene, BoPr, in ornamental kale (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*). *BMC Genomics* 18:230.
 27. Zhou, F., Liu, Y., Feng, X., Zhang, Y., Zhu, P. 2022. Transcriptome analysis of green and white leaf ornamental kale reveals coloration-related genes and pathways. *Frontiers in Plant Science* 27(13):769121.
 28. Sütçü, Ş., Sarıkamış, G. 2024. CRISPR/Cas9 teknolojisinin sebze ıslahında kullanımı. *Bahçe* 53(Özel Sayı 1):115-119.

29. Yuan, K., Zhao, X., Sun, W., Yang, L., Zhang, Y., Wang, Y., Ji, J., Han, F., Fang, Z., Lv, H. 2023. Map-based cloning and CRISPR/Cas9-based editing uncover BoNA1 as the causal gene for the no-anthocyanin-accumulation phenotype in curly kale (*Brassica oleracea* var. *sabellica*). Horticultural Research 10(8):133.
30. Zhou, F., Feng, X., Jiang, A., Zhu, P. 2024. Mutations in the BoPQL2 gene enhance the sensitivity to low temperature and affect the leaf margin coloration in ornamental kale. Scientia Horticulturae 323:112540.
31. Zhang, Y., Feng, X., Liu, Y., Zhou, F., Zhu, P. 2022. A single-base insertion in BoDFR1 results in loss of anthocyanins in green-leaved ornamental kale. Theoretical and Applied Genetics 135:1855-1865.
32. Zhao, Z., Xiao, L., Xu, L., Xing, X., Tang, G., Du, D. 2017. Fine mapping the BjP11 gene for purple leaf color in B2 of *Brassica juncea* L. through comparative mapping and whole-genome re-sequencing. Euphytica 213:80.
33. Li, H., Du, Y., Zhang, J., Feng, H., Liu, J., Yang, G., Zhu, Y. 2022. Unraveling the mechanism of purple leaf formation in *Brassica napus* by integrated metabolome and transcriptome analyses. Frontiers in Plant Science 13:945553.
34. Han, F., Zhang, X., Yang, L., Zhuang, M., Zhang, Y., Liu, Y., Li, Z., Wang, Y., Fang, Z., Ji, J., Lv, H. 2021. Genome-wide characterization and analysis of the anthocyanin biosynthetic genes in *Brassica oleracea*. Planta 254:92.