

## Farklı Dalga Boylu LED Işıklarının Yeşil Yapraklı Bitkilerin Gelişimi Üzerindeki Etkileri

Nuri ÇAĞLAYAN<sup>1\*</sup>, Can ERTEKİN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü

<sup>2</sup>Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü

\*Sorumlu yazar e-posta: nuricaglayan@akdeniz.edu.tr

Geliş Tarihi (Received): 23.05.2018 Kabul

Tarihi (Accepted): 07.11.2018

**Özet:** Işık yayan diyot (*LED: Light Emitting Diode*) teknolojisinin yeni tip yarı iletken malzemelerin ortaya çıkmasıyla sürekli şekilde gelişmesi, aydınlatmanın bitki büyümesi ve gelişimi de dahil olmak üzere giderek artan sayıda yeni alanlarda uygulanmasını mümkün kılmıştır. Son yıllarda, geleneksel aydınlatma sistemlerine alternatif olarak, LED'in bitki morfogenezi için mükemmel bir yapay akıllı aydınlatma kaynağı olduğu kanıtlanmıştır. LED aydınlatma çiçekler, sebzeler, meyveler, aşılansız fideler, mikro yeşillikler, algler, tıbbi ve aromatik vb. bitkilerin üretilmesinde kullanılmakta ve önemli faydalar sunmaktadır. LED aydınlatma teknolojisi, bitkisel üretimde verimliliği artırabilecek farklı dalga boylu ışık kontrollü bir büyüme ortamı sağlayabilir. Ayrıca, yeni LED teknolojileri sadece bitki üretimindeki verim ve kaliteyi arttırmakla kalmaz, aynı zamanda bitkinin fizyolojik tepkilerini anlamaya yönelik yeni araştırmalara da olanak tanır. Bu nedenle, çeşitli bitki büyüme ve geliştirme uygulamaları için LED ışığının yeni kontrol seviyeleri araştırılmakta, ışığın değeri artırılmakta, diğer yandan LED aydınlatma ürünlerinin maliyeti azalmaya devam etmektedir. Yapılandırılabilir LED aydınlatma artık nispeten ucuzdur ve dünyanın dört bir yanındaki araştırmacıların kayda değer deneyler yapmasına ve bu önemli konu için bilgi literatürüne katkıda bulunmasına olanak tanır. Bu çalışmada farklı dalga boylu LED ışıklarının spektral özellikleri açıklanmış, marul ve bazı mikro yeşillikler üzerindeki bazı araştırma sonuçlarına yer verilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Yapay aydınlatma, LED ışık kontrolü, marul, mikro yeşillikler

### The Effects of Different Wavelength LED Lights on the Development of Green Leafy Plants

**Abstract:** The steady development of the light-emitting diode (LED) technology with the emergence of new types of semiconductor materials has made it possible to lighting applies it in an increasing number of new areas including plant growth and development. In recent years, as an alternative to conventional lighting systems, LED has been demonstrated to be an excellent artificial smart lighting source for plant morphogenesis. LED lighting, flowers, vegetables, grapes, grafted seedlings, micro greens, algae, medical and aromatic etc. are used in the production of plants and offer significant benefits. LED lighting technology can provide a light controlled growth environment with different wavelengths that can increase productivity in crop production. In addition, new LED technologies not only improve yield and quality in plant production, but also enable new research to understand the plant's physiological responses to light. Thus, the levels of control are being explored for various plant growth and development applications, increasing the value of the light, the cost of LED lighting products continues to decrease. Configurable LED lighting is now relatively inexpensive, allowing for researchers across the globe to conduct meaningful experiments and add to the literature of knowledge for this important topic. In this study, the spectral characteristics of different wavelength LED lights are explained and the results of the some research on lettuce and some micro greens are given.

**Key words:** Artificial lighting, LED light control, lettuce, micro greens

## GİRİŞ

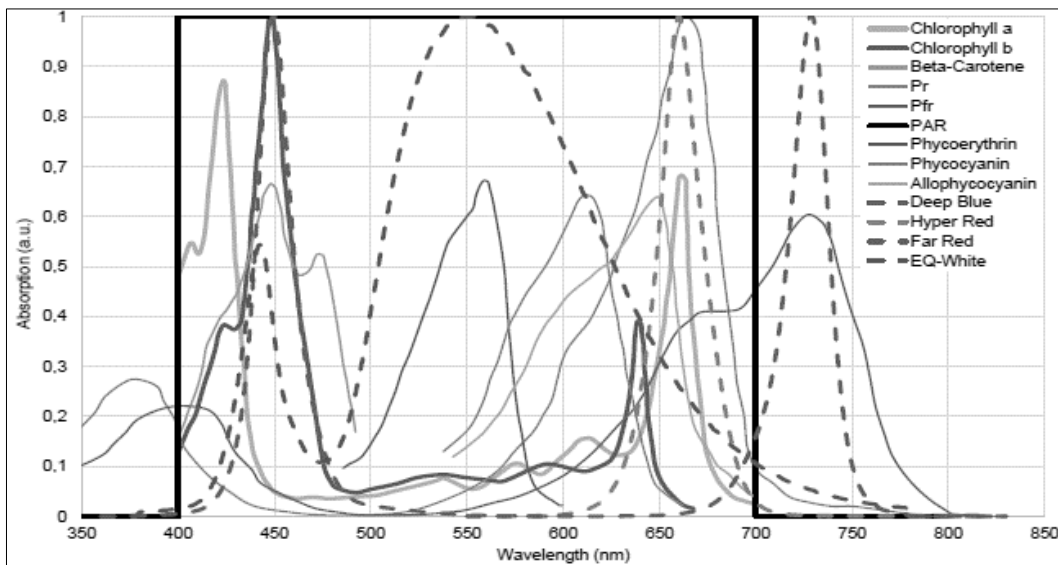
İlk LED bitki yetiştirme lambaları, ışığın klorofil tarafından emildiği dalga boylarını eşleştirecek şekilde kırmızı ve mavi LED'lerin farklı oranlardaki kombinasyonlarında tasarlanmışlardır. Gerçek anlamda klorofil ve fotoreseptör gibi birçok pigment, bitkilerdeki çiçeklenme, kök uzaması, kütle ağırlığı, çimlenme, vb. önemli özellikleri etkiler. Fakat bu etkiler sadece mavi ve kırmızı dalga boyları kullanılarak istenilen düzeyde sağlanamaz. Bununla birlikte, bitkilerde kırmızı ve mavi dışındaki dalga boylarını da soğuran pigmentlerin olması ve ayrıca PAR (*Photosynthetically Active Radiation*) alanının ötesindeki dalga boylarının da bitkilerin morfolojisini ve metabolizmasını önemli ölçüde etkileyebileceği anlaşılmıştır. Özellikle UV dalga boyundan başlayarak kırmızı ötesine kadar tüm dalga boylarını kapsayan sürekli bir spektruma sahip olmak, yetiştiricilerin ürünleri ihtiyaçlarına ve isteklerine göre yönetmeleri için daha fazla imkan sunmaktadır.

Mükemmel bir büyüme spektrumunu sağlayacak LED lambaların geliştirilmesi ve sonuçların deneysel araştırmalarla desteklenme süreci uzun zaman almaktadır. Günümüzde üretilen LED bitki yetiştirme lambaları farklı LED kombinasyonu ile bir araya getirilmiş dar band UV, mavi, yeşil, beyaz, sarı, turuncu, kırmızı, kırmızı ötesi ve kızıl ötesi LED'lerin dalga boyu tepe değerleri dikkate alınarak tasarlanmaktadır.

Spektrum ve foton akı yoğunluğu (*PPFD: Photon Flux Density*), bitki gelişimini yöneten iki ana faktördür. Bitkiler esas olarak fotosentez yapmak için gelen spektrumun kızılötesi, kırmızı ve mavi kısımlarını kullanır ve çok sayıda gelişimsel ve uyum süreçlerini

düzenler. En yaygın fotosentetik ve fotomorfojenik soğurma spektrumları ve fotoreseptörler Şekil 1'de gösterilmiştir (Anderson ve ark., 1995). Soğurma işlemi en çok olan klorofilin en üst seviyesi, kırmızı (625-675 nm) ve mavi (425-475 nm) bölgelerde gerçekleşmektedir. Öte yandan Karotenoidler de klorofilin yardımcı fotoreseptörleridir ve ışığı esas olarak mavi bölgede soğurmaktadırlar. Çimlenme dahil olmak üzere fotomorfojenik tepkiler, fototropizm, yaprak genişlemesi, çiçeklenme, stomatal gelişme, kloroplast göçü ve gölgeden kaçınma gibi tepkilerden oluşmaktadır. Bu tepkiler, fitokromlar, kriptomromlar ve fototropinler olmak üzere üç tip fotoreseptör tarafından düzenlenmektedir (Smith, 1995; Sancar, 2003; Briggs ve Christie, 2002).

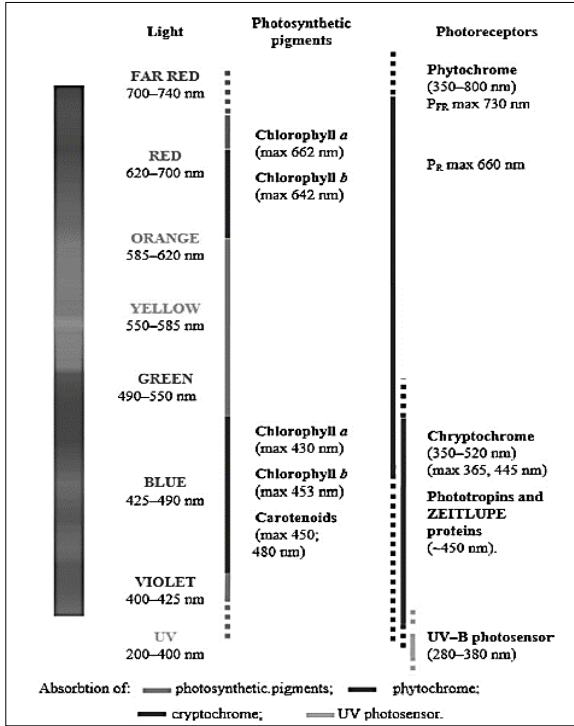
Bitkiler, karanlık sürenin uzunluğunu fitokrom adı verilen, yalnızca 660 nm ve 735 nm dalga boylarına duyarlı pigmentler aracılığıyla ölçer. Fitokromun 660 nm'ye duyarlı formuna fitokrom kırmızı ( $P_r$ ), 735 nm'ye duyarlı formuna ise fitokrom kırmızı ötesi ( $P_{fr}$ ) adı verilir (Yağcıoğlu, 2005). Fitokrom aracılı fotomorfojenik yanıtlar, R/FR oranının algılanmasıyla düzenlenir. (Shinomura ve ark., 2000). Mavi ışığı absorbe eden pigmentler hem kriptomromları hem de fototropinleri içerir. Kriptomrom sistemi, çimlenme, yaprak genişlemesi, kök uzaması ve stoma açılması gibi morfolojik tepkilerin çeşitli yönlerini kontrol eder, ayrıca çiçekli bitkilerde sirkadiyen ritmini düzenler (Cashmore ve ark., 1999). Fototropinler, ışığın toplanmasını optimize etmek ve fotoinhibisyonu önlemek için pigment içeriğinin düzenlenmesinde ve fotosentetik organellerin konumlandırılmasında da rol oynamaktadır (Spalding ve Folta, 2005).



Şekil 1. Fotosentez için klorofiller tarafından, fotomorfojenik için fitokrom, kriptomrom ve fototropin tarafından ışığın çeşitli dalga boylarının kullanılması (Osram Opto S., 2016).

### İşığın Spektral Verimliliği

Fotosentez için genel olarak bilinen aydınlatma spektrumunda McCree (1971) kırmızı ve turuncu ışık fotonları en yüksek verime sahip olurken, yeşil fotonlar, kırmızı ve maviye göre daha düşük verimliliğe sahiptir (Bugbee, 2016). Işık verimi tek yaprak tepkisi ile değil, bitki örtüsünün farklı katmanları içindeki ışık dağılımı, bu katmanların tepkisi, bitki büyümesi ve gelişimi de dikkate alınarak belirlenmektedir (Bugbee, 2016; Snowden ve ark., 2016). Birincil fotosentetik klorofil pigmentlerine ek olarak, karotenoidler ve antosiyaninler gibi diğer bitki pigmentleri de ışık hasadı yapabilirler. Bütün bu pigmentler, bitkilerin geniş kompozit ışık spektrumunu soğurmasına izin veren farklı spektrumlara sahiplerdir (Ouzounis ve ark., 2015a). Bununla birlikte, fotosentez için ana enerji kaynağı olan ışığın karakteristik özellikleri bitkilerin gen ifadesini, fizyolojisini, morfolojisini ve metabolizmasını harekete geçiren süreçlerde de sinyal işlevi görmektedir (Şekil 2).



**Şekil 2. Bitki büyümesi ve gelişmesinde yer alan ışık spektrumları ve fotoreseptörler (Viršilė ve ark., 2017)**

Bir bitkinin ışık ortamına verdiği tepki, farklı fotoreseptörlerin eylemleriyle belirlenir. Fitokrom, kriptokrom, fototropin ve UVR8 proteinlerinin ışık algılama kanalları, bitkinin gelişimsel ve fotosentetik durumunu daha hassas ayarlayabilmek için bütünleşmiştir (Ouzounis ve ark., 2015a).

Fotoreseptörler ve fotosentetik sinyal ağları arasındaki uyumun yanı sıra ışığın her bitkiye özgü farklı tepkilerinin iyi anlaşılması, LED bitki büyütme lambasının vereceği ışığın dalga boyu seçiminin, uygulama zamanının, süresinin ve şiddetinin ne olması gerektiği hakkında önemli bilgiler verecektir (Pocock, 2015). Özellikle ışığın bitkide belirli ışık algılama yollarının etkinleştirecek LED aydınlatma sistemlerinin geliştirilmesi, üreticilerin bitki verimliliğini, kalitesini ve üretim zamanlamasını kontrol etmelerini sağlayabilecektir.

### LED Aydınlatmanın Marul ve Diğer Yeşil Yapraklı Bitkiler Üzerindeki Etkileri

Marul ve diğer yapraklı sebzeler, insan beslenmesinde önemli bir rol oynar. Bu bitkilerin verimlilik ve kaliteleri, çevresel faktörlerle birlikte bitki gelişiminde başlıca rol oynayan ışığa da bağlıdır (Mou, 2012). Sonbahar / kış aylarında doğal ışık seviyesinin düşük olduğu kuzey enlemlerindeki seralarda ve yapay aydınlatmanın tek ışık kaynağı olduğu kapalı bitki üretim alanlarında kaliteli bitki üretimi için uygun ışık kalitesine sahip aydınlatma sisteminin kurulması gerekmektedir. Düşük ışık şiddeti, marul büyümesi ve kalitesindeki sınırlayıcı faktördür (Colonna ve ark., 2016); bununla birlikte, ışık spektral bileşimi de belirgin bir etkiye sahiptir.

Bitki boyu, renk, doku ve aromadaki çeşitliliğin (Carvalho ve Folta, 2014) yanı sıra, klorofiller, karotenoidler, antosiyaninler, askorbik asit ve şekerler gibi pigment ve metabolit konsantrasyonları da ek ışık kaynaklarından etkilenir (Li ve Kubota, 2009). Işık yayan diyetler, yeşil sebze üretiminde potansiyel ışık kaynağı olabilmelerinin yanında ürünün kalitesinin kontrolü için de pek çok araştırmaya konu olmuştur ve olmaya devam etmektedir. Kırmızı ışık genellikle ışıklandırma spektrumunun temelini oluşturur ve tek kırmızı LED ışığı bitki büyümesi ve fotosentez için yeterli olabilir. Önceki çalışmalara göre, ~640 nm (Lefsrud ve ark., 2008; Samuolienė ve ark., 2012a; Žukauskas ve ark., 2011; Samuolienė ve ark., 2012c) veya ~660 nm (Brazaitytė ve ark., 2006; Mizuno ve ark., 2011; Tarakanov ve ark., 2012; Wojciechowska ve ark., 2015; Chen ve ark., 2016) kırmızı LED dalga boyları marul ve diğer yeşil sebzelerin yetiştirilmesinde en yaygın kullanılan ışıklardır. Seralarda ve kapalı ortam bitki yetiştirme odalarında verimli bitki yetiştirmek için kırmızı LED ışığı genellikle mavi ışığın belli oranları ile birleştirilir; bununla birlikte, hasattan birkaç gün önce, kısa sürelerde kırmızı ışık uygulandığında, kırmızı ışığın spesifik davranışlarının önemli avantajları olduğu görülmüştür (Carvalho ve Folta, 2014). Örneğin, bir serada doğal ışıklandırmaya

ek olarak üç gün süren ~640 nm kırmızı LED ışık, marulda karbonhidrat içeriğini ve antioksidan kapasitesini artırabilmekte ve istenmeyen nitrat içeriğini baskılayabilmektedir (Samuolien ve ark., 2009, 2013; Žukauskas ve ark., 2011). Kırmızı ışık altında yetişen yeşil yapraklı marul türlerinde antioksidan aktivitesindeki artış, ışık dahil çevresel etkilere karşı koruma sağlayan ve doğal olarak daha yüksek seviyelerde antioksidanlar içeren kırmızı yapraklı türlere göre daha belirgin ortaya çıktığı görülmüştür (Carvalho ve Folta, 2014). Hasat öncesi kırmızı 640 nm LED ışığa maruz bırakılmış farklı yapraklı sebzelerde değişken sonuçlar vermiştir. Örneğin, sera içinde maydanoz ve dereotunda üç günlük ek kırmızı ışık uygulamasından sonra, fenolik bileşiklerin, C vitamininin, karbonhidratların daha yüksek birikiminin yanı sıra toplam antioksidan aktivitesinin ve birikmiş nitrat içeriğinin hızlıca azaldığı, buna karşılık hardal, ıspanak, roka ve yeşil soğanda nitrat azalmasının olmadığını gözlemlenmiştir (Bliznikas ve ark., 2012). Wanlai ve ark. (2013) yaptıkları araştırmada, kırmızı ve mavi ışık birleşiminin tek kırmızı ışığa kıyasla, hasattan 48 saat önce ve sürekli uygulandığında nitrat azalmasında daha etkili olduğunu ortaya koymuştur. Hasat öncesi yapılan bu tür kısa dönem yapay ışık uygulamaları sebze üretiminde ekonomik kalite yönetimi sağlayabilmektedir. Ayrıca, fotosentetik aktif bölge aralığının hemen dışındaki kırmızı ötesi LED ışığının marulda fotosentez hızını artırdığı ve büyümeyi desteklediği görülmüştür (Goins ve ark., 2001). Bununla birlikte, kırmızı veya kırmızı ötesi ışınımdaki değişiklikler ve bunların oranları fitokromlar tarafından algılanmaktadır (Demotes - Mainard ve ark., 2016) ve bu durum bitkilerdeki fotomorfolojik süreçleri etkileyebilmektedir. Kırmızı ötesi LED ışığı, kırmızı (Stutte ve ark., 2009; Lee ve ark., 2015) veya kırmızı + mavi LED birleşimiyle (Lee ve ark., 2016) veya soğuk beyaz floresan (Li ve Kubota, 2009) ile birlikte uygulandığında, marulun büyüme özellikleri üzerinde biyokütle ve yaprak uzunluğunu artırıcı yönde etkileri olurken, klorofil, antosiyenin ve karotenoid konsantrasyonlarını olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. İlave yapılan kırmızı ötesi ışık uygulaması, ışığı daha iyi yakalamanın bir sonucu olarak maruldaki gelişimin ve yaprak alanının artmasını sağlamaktadır (Kubota ve ark., 2012). Ayrıca, kırmızı ötesi ışığın, kırmızı ve mavi LED'ler ile birlikte kullanılması, hidroponik olarak yetiştirilen marulda gelişmiş mineral (potasyum, kalsiyum ve magnezyum) alımını artırdığı görülmüştür (Pinho ve ark., 2016). Bu etkilerle ilgili olarak, kapalı tip yetiştirme ortamları için yapay aydınlatma sistemleri

tasarlanırken, özellikle kırmızı ötesi LED'lerin diğer dalga boylu LED'lere oranı dikkate alınmalıdır (Lee ve ark., 2015). Kırmızı ışık, fotosentezi etkin bir şekilde yönlendirmesine rağmen, düzenli büyümeyi sağlamak, aşırı uzamış gövde ve gölgeden kaçınma tepkilerini en aza indirmek için genellikle biraz mavi ışıkla birlikte kullanılması gereklidir (Snowden ve ark., 2016). Mavi ışık kriptokrom sistemini harekete geçirir böylece, klorofil ile karotenoid uygun ışıkla karşılaşmış olur. Yapılan çalışmalarda mavi ışığın bu etkisinin yeşil sebzelerde büyüme, fotosentez ve antioksidan sistemi üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir (Olle ve Viršilė, 2013). Mavi LED'ler (440-476 nm) tek veya kırmızı LED'ler ile birlikte kullanıldığında marul (Johkan ve ark., 2010; Lin ve ark., 2013), ıspanak (Matsuda ve ark., 2007; Ohashi - Kaneko ve ark., 2007), kişniş (Naznin ve ark., 2016) ve Çin lahanası (Li ve ark., 2012) bitkilerinde yaprak alanının genişlemesini ve biyokütle birikimini artırıcı yönde etkileri oluşmaktadır. Mavi ışığın artmasının, büyüme üzerinde, klorofil miktarında ve fotosentezde artışı teşvik eden etkileri olmaktadır (Yorio ve ark., 2001; Carvalho ve Folta, 2014). Tüm bitki çalışmaları, genellikle mavi fotonların artmasıyla fotosentezin de arttığını ortaya koymuştur (Hogewoning ve ark., 2010). Ancak, mavi ışığın fotosentez üretkenliği üzerindeki etkisi, esas olarak, ışınım enerjisini yakalamadaki değişimlerle belirlenir ve fotosentez üzerinde doğrudan etkilere yol açmaz (Snowden ve ark., 2016).

Bitki büyümesi, genel olarak mavi fotonların oranı %5-10'unu aştığında azalma eğilimindedir. Tayftaki mavi ışık seviyesinin aşırı yükselmesi hücre bölünmesini, hücre genişlemesini ve yaprak alanı büyümesini engeller, bu durum foton yakalanmasının ve büyümenin de azalmasına neden olur. Türlerin mavi ışığa duyarlılığı geniş bir yelpazede bulunur ve bitkinin gelişim aşaması ile tepkiler değişebilir (Bugbee, 2016). Bitki büyümesi ve fotosentez için en uygun kırmızı/mavi oranı üzerine yapılan araştırmalarda sayısız ve farklı sonuçlar elde edilmesine rağmen bu konuda daha fazla çalışma yapılmasına ihtiyaç vardır. Mavi LED ışığı aynı zamanda yeşil sebzelerin besin kalitesini artırmak için de faydalıdır. Bununla birlikte, mavi ışığın nitrat içeriğini azalttığı (Xin ve ark., 2015; Bian ve ark., 2016), antioksidan durumunu teşvik ettiği, fenolik bileşiklerin (Johkan ve ark., 2010; Son ve Oh, 2013; Bian ve ark., 2016; Taulavuori ve ark., 2016), askorbik asitin (Li ve ark., 2012), karotenoidlerin (Lefsrud ve ark., 2008), antosiyenin içeriklerinin artmasını teşvik ettiği ve yaprak rengini (Stutte ve ark., 2009; Li ve Kubota, 2009; Mizuno ve ark., 2011) etkilediği görülmüştür. Çalışmalar, kırmızı marul

çeşitlerinde pigmentasyonu artırmak için tamamlayıcı mavi ışık ile birkaç gün süren üretim sonu uygulamalarının yeterli olduğunu göstermektedir (Owen ve Lopez, 2015; Nicole ve ark., 2016). Çalışmalar ayrıca, mavi LED aydınlatmanın etkilerinin türe ve kültüre bağlı olduğu ve kırmızı renkli çeşitlerin yeşil çeşitlere göre mavi ışık koşullarına daha iyi uyum sağladığını doğrulamaktadır (Ouzounis ve ark., 2015b; Taulavuori ve ark., 2016).

Marulun tadı ışık şartlarından etkilenebilmektedir (Carvalho ve Folta, 2014). Bir çalışmada, *Grand Rapids* marul çeşidinde, sadece kırmızı LED altında veya kırmızı ötesi ve kırmızı LED birleşimli ışık altında yetiştirilenler ile karşılaştırıldığında mavi LED ışığı altında yetiştirilenlerin tadının daha acı olduğu görülmüştür (Carvalho ve Folta, 2014). Lin ve ark. (2013), kırmızı ve mavi veya kırmızı, mavi ve beyaz LED'ler altında yetiştirilen *Boston* marulunun duyuşal özelliklerini karşılaştırmış, bu amaçla kırmızı ve mavi ışığa tabi tutulmuş bitkilerin şekli, canlılığı ve tatlılığı incelenmiş ve pazar için kabul edilemez olduğunu bulmuşlardır. Fakat buna karşılık, ilave gün ışığı beyaz LED'ler kullanıldığında, bitkilerin daha canlı ve şeker birikmesi nedeniyle daha tatlı olduğu görülmüştür.

Yapılan araştırma sonuçlarına göre, çoğu kaynağın aksine yeşil ışığın da bitkiler üzerinde önemli fizyolojik etkilere sahip olduğu anlaşılmıştır (Olle ve Viršilė, 2013). Çeşitli çalışmalarda, yeşil floresan lambalara kıyasla, 510–530 nm yeşil LED ışık (Johkan ve ark., 2012; Son ve Oh, 2015) mavi ve kırmızı LED ışıklarla birlikte kullanıldığında marul gelişimini desteklediği sonucuna varılmıştır. Son ve Oh (2015), yeşil LED ışığına maruz bırakılan bitkilerde yaprak morfolojisi, geçirgenlik, hücre bölünme oranı ve yaprak anatomisini incelemişler ve test edilen iki marul çeşidinde büyümenin arttığını gözlemlemişlerdir. Snowden ve ark. (2016) ve Bugbee (2016), yeşil ışığın yaprakların ve kanopilerin daha derinlerine nüfuz ettiğini, dolayısıyla bitki büyümesini ve gelişimini değiştirdiğini; bununla birlikte, artan fotosentetik akışlar nedeniyle bu etkilerin azalabileceği sonucuna ulaşmışlardır. Folta ve Maruhnich (2007) yeşil ışığın bitki büyümesini yavaşlatmak veya durdurmak için bir uyarıcı olduğunu öne sürmüşlerdir, ancak yeşil ışığın rolünün, tipik olarak bitki örtüsü altında meydana gelen düşük ışık koşullarında özellikle önemli olduğu düşünülmektedir. Yeşil ışık, kırmızı veya mavi ışık dalga boylarına kıyasla yaprak dokusu ile daha iyi iletim sağlayarak bitkiyi canlandırmakta ve farklılıklar oluşturmaktadır (Massa ve ark., 2015). Çok az

sayıdaki araştırma sonuçlarında, yeşil ışığın yapraklı sebzelerin besin değeri üzerindeki etkileri üzerinde durulmuştur. İlave yapılan 530 nm yeşil ışık, kırmızı ve mavi LED'lerin kombinasyonu altında kapalı ortam odalarında yetiştirilen Romaine bebek yapraklı marulda  $\alpha$ -karoten ve antosiyaninlerin birikmesini teşvik ettiği gözlenmiştir (Samuolien ve ark., 2013). Aynı araştırmacılar, bir serada yüksek basınçlı sodyum lamba aydınlatmasına ilave olarak 505, 530 ve 535 nm yeşil LED kullandıkları araştırmalarında, bebek yapraklı farklı marul çeşitlerinde nitrat azalmasına, askorbik asit, tokoferol ve antosiyanin konsantrasyonlarının artışı yönünde bulgular elde etmişlerdir (Samuolien ve ark., 2012b, d). Kırmızı ve mavi LED'lere ilave olarak yeşil ve sarı LED'lerin kullanılması, fesleğen bitkilerinde monoterpenoid uçucuların emisyon düzeylerini artırmıştır (Carvalho ve ark., 2016). Ancak, UV ışınları yapraklı sebzelerde ikincil metabolitler üzerinde en yüksek etkiye sahiptir. Sınırlı UV LED kullanılabilirliği ve nispeten yüksek maliyetler nedeniyle (Wargent, 2016), şimdiye kadar sadece birkaç araştırma sonucu yayınlanmıştır. Chang ve Chang (2014), UV-A ışığına maruz kalan yaprak marulunun taze ağırlığında bir artış bildirmişlerdir. UV-A LED ışınının küçük bir akışı da bebek yapraklı marulda antosiyanin (Li ve Kubota, 2009), fenolik bileşikler ve  $\alpha$ -karoten (Samuolien ve ark., 2013) içeriğini artırdığı görülmüştür. Goto ve ark. (2016), hasattan 1–3 gün önce UV ışığının eklenmesinin, kırmızı yapraklı marulda antosiyanin konsantrasyonunu ve antioksidan kapasitesini etkili bir şekilde artırdığını göstermiştir.

Farklı dalga boylu LED ışıklarının bazı marul çeşitleri üzerindeki etkileri Çizelge 1'de verilmiştir. Bununla birlikte, farklı yeşil sebzeler ve marul çeşitleri için LED aydınlatma modellerinin geliştirilmesine önemli çaba sarf edilmesi gerekecektir. Buna ek olarak, araştırma raporları karşılaştırılırken sebze çeşitliliği, gelişim evresi, aydınlatmanın zamanı, ışık kaynaklarının spektral dağılımı, fotosentetik foton akışı, fotoperiyod uzunluğu, sıcaklık ve ekim ortamının diğer koşulları (Carvalho ve Folta, 2014) gibi dikkate alınması gereken birçok değişken vardır. Dahası, sera ortamında mevsimsel etkiler ortadan kaldırılamaz. Kuzey enlemlerinde yapılan birçok araştırma, farklı ışık spektrum özelliklerinin, aynı mevsimde ve farklı ekim yıllarında olduğu gibi, yılın farklı mevsimlerinde de (Samuolien ve ark., 2012a, b; Wojciechowska ve ark., 2016) verimli olduğunu doğrulamaktadır. (Wojciechowska ve ark., 2015).

Çizelge 1. Farklı dalga boylu LED ışıklarının marul çeşitleri üzerindeki etkileri

Işık Rengi	LED aydınlatma	Bitki	Etkileri
Kırmızı ötesi (700–850 nm)	850 nm ( $30 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) ile birlikte Beyaz LED (449, 548 nm, %30 Mavi); Toplam PPFD= $135 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ; Uygulama= 16 saat	( <i>Lactuca sativa</i> var. <i>crispata</i> ) 'Green Oak Leaf'	• Sadece beyaz LED kullanımına göre taze ağırlıkta %36 azalma, bitkilerde seyrelme ve kıvrılma (Chen ve ark., 2016).
	660 ve 455 nm ile 740 nm LED birleşimi; R/B oranı= 4.5; R/FR oranı= 7; Toplam PPFD= $150 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ; Uygulama= 20 saat	( <i>Lactuca sativa</i> L.) 'Frillice Crisp'	• Kırmızı ötesi ışığın eklenmesiyle yaprak alan indeksinde %17, taze ağırlıkta %29, sürgün yüksekliğinde %121 ve boğumlar arası mesafede %117 artış, • Hızlı büyümenin, SPAD ve kuru ağırlık içeriğinde sırasıyla %27 ve %7 oranında azalma, • Kırmızı ötesi ışığın Azot alımını teşvik etmesi, • Kırmızı, kırmızı +mavi ışık altındaki bitkilere göre kırmızı ötesi ışık altındaki bitkilerde K, Ca ve Mg alımlarında sırasıyla 27, 25 ve %28 artış (Pinho ve ark., 2016).
	735 nm ile birlikte 440, 660 nm; B + R/FR oranı= 0.7, 1.2, 4.1, 8.6; B:R oranı= 2:8; Toplam PPFD= $130 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ; Uygulama= 12 saat	( <i>Lactuca sativa</i> L.) 'Sunmang' (16 günlük fideler)	• Sürgün ve kök büyümesinde gelişme; • Bitki taze ağırlığındaki en yüksek artış B+R/FR'nin 1.2 oranında görülmüştür (Lee ve ark., 2016).
	734 nm ( $160 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) ile soğuk beyaz floresan lamba; Toplam PPFD= $300 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ; Uygulama= 16 saat	'Red Cross' ( <i>Lactuca sativa</i> L.)	• Floresanın tek başına kullanılmasıyla karşılaştırıldığında, taze ağırlık, kuru ağırlık, gövde uzunluğu, yaprak uzunluğu ve yaprak genişliğinde sırasıyla 28, 15, 14, 44 ve 15 oranında artış, • Floresana kıyasla klorofil konsantrasyonunda %14 ve karotenoid konsantrasyonunda %11 azalma (Li ve Kubota, 2009).
Kırmızı ötesi (700–850 nm)	660 nm kırmızı (R) ile 732 nm (FR) LED birleşimi; R/FR oranları= 0.7, 1.2, 4.1, 8.6, ve 100% kırmızı; Toplam PPFD= $132 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ;	Kırmızı yapraklı marul 'Sunmang' ( <i>Lactuca sativa</i> L.)	• R/FR oranı 1,2 olduğunda taze ve kuru ağırlıkta artış, • R / FR oranı azaldığında yaprak sayısında artış, • Floresan lamba aydınlatması altındaki bitkilere kıyasla yapraklarda uzunluk artışı ve SPAD değerlerinde azalma (Lee ve ark., 2015).
	640 nm kırmızı ile 730 nm kırmızı ötesi ( $20 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) LED birleşimi; Toplam PPFD= $320 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ; Uygulama= 18 saat	Kırmızı yapraklı marul 'Outredgeous' ( <i>Lactuca sativa</i> L.)	• Toplam biyokütlerde ve yaprak uzamasında artış (Stutte ve ark., 2009).
	Beyaz LED (449, 548 nm, %30 Mavi) ile 660 nm ( $30 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) birleşimi; Toplam PPFD= $135 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ; Uygulama= 16 saat	'Green Oak Leaf' ( <i>Lactuca sativa</i> var. <i>crispata</i> )	• Klorofil ve karotenoid içeriğinde artış (Chen ve ark., 2016).
	Kışın serada doğal ışığa ilave olarak 100:0, 90:10, 70:30 ve 50:50 oranlarında 660 ve 430 nm LED uygulaması; PPFD= $200 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ; Uygulama= 16 saat	'Noordhollandse' ( <i>V. locusta</i> L.)	• Askorbik asit içeriğinde azalma (Wojciechowska ve ark., 2015).
	Beyaz floresanla birlikte 658 nm ( $130 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) LED uygulaması; Toplam= PPFD $300 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ; Uygulama= 16 saat	'Red Cross' ( <i>Lactuca sativa</i> L.)	• Beyaz floresan ile karşılaştırıldığında fenolik bileşik konsantrasyonunda artış (Li ve Kubota, 2009).
	Serada doğal ışık ve HPS ( $130 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) lambaya ilave 638 nm LED ( $\sim 500 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) uygulaması Uygulama= Hasat öncesi 3 gün	'Grand rapids' ( <i>Lactuca sativa</i> L.)	• Nitrat içeriğinde azalma (Samuolien ve ark., 2009).
	Serada doğal ışık ve HPS ( $300 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) lambaya ilave 638 nm LED ( $210 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) Uygulama= Hasat öncesi 3 gün (18 saat/gün)	Yeşil yapraklı marul 'Thumper' ve 'Multibaby' ( <i>Lactuca sativa</i> L.)	• Multibaby marulunda artan antioksidan özellikler: toplam fenoliklerin (% 28.5) daha yüksek konsantrasyonu, tokoferol (% 33.5), antioksidan kapasite (% 14.5) ve şeker (% 52.0) (Samuolien ve ark., 2012a).

Çizelge 1'in devamı

Işık Rengi	LED aydınlatma	Bitki	Etkileri
Yeşil (490–550 nm)	510, 520 veya 530 nm LED; PPFD= 100, 200 ve 300 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$	Kırmızı yapraklı marul 'Banchu Ref Fire' ( <i>Lactuca sativa</i> L.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yüksek yoğunluklu (<math>300 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}</math>) yeşil LED ışığının floresana kıyasla marul gelişimini desteklemiştir.</li> <li>• 510 nm ışık bitki büyümesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür (Johkan ve ark., 2012).</li> </ul>
	Serada doğal ışık ve HPS ( $170 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) lambaya ilave olarak 530 nm LED ( $30 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ); Uygulama= 16 saat	Kırmızı yapraklı 'Multired 4,' Yeşil yapraklı 'Multigreen 3' Açık yeşil yapraklı 'Multiblond 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tüm marul çeşitlerinde nitrat konsantrasyonunda azalma ve sakarit içeriğinde artış. (Samuoliené ve ark., 2012d).</li> </ul>
Yeşil (490–550 nm)	Serada doğal ışığa ilave HPS ( $170 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) ve 505, 530 nm LED ( $30 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ); Uygulama= 16 saat	Kırmızı yapraklı 'Multired 4,' yeşil yapraklı 'Multigreen 3', açık yeşil yapraklı 'Multiblond 2'	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 535 nm yeşil LED'lerin, askorbik asit, tokoferol içeriği ve DPPH serbest radikal aktivitesi üzerinde büyük pozitif etkiye sahip olduğu,</li> <li>• 505 nm LED'lerin toplam fenol ve antosiyanin içerikleri üzerinde daha fazla etkisi olduğu görülmüştür. (Samuoliené ve ark., 2012b).</li> </ul>
	Kırmızı 655 nm, mavi 456 nm ile yeşil 518 nm LED birleşimi (R:G:B = 9:1:0, 8:1:1, 7:1:2); Toplam PPFD= 173 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ; Uygulama= 12 saat	Kırmızı yapraklı 'Sunmang' ve yeşil yapraklı 'Grand Rapid TBR'  (18 günlük fideler üzerinde 4 haftalık deneme)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mavi ve yeşil LED'lerin kırmızı LED'lerle birlikte belli oranlarda bulunması marulda büyümeyi artırmıştır.</li> <li>• 8R+1G+1B dizilim oranında kırmızı yapraklı marul sürgünlerinin taze ağırlıkları 8R+2B altındakilere göre yaklaşık% 61 daha yüksek çıkmıştır (Son ve Oh, 2015).</li> </ul>
Mavi (425–490 nm)	Soğuk beyaz floresana ilave Mavi LED (476 nm, $130 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ )	'Red Cross' ( <i>Lactuca sativa</i> L.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Antosiyanin konsantrasyonunda %31 artış,</li> <li>• Karotenoid konsantrasyonunda %12 artış. (Li ve Kubota, 2009).</li> </ul>
	Blue (468 nm) LEDs alone or in combination with red (655 nm) LEDs. Total PPFD *100 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$	Kırmızı yapraklı ( <i>Lactuca sativa</i> L. cv. Banchu Red Fire)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Köklerde biyokütle birikiminin teşvik edilmesi,</li> <li>• Güçlü marul fidelerinin gelişmesi,</li> <li>• Ekimden sonra marul büyümesini teşvik etmesi,</li> <li>• Daha fazla polifenol ve toplam antioksidan içeriği (Johkan ve ark., 2010).</li> </ul>
	630 nm kırmızı ve 460 nm LED birleşimi (R:B oranları= 2:1, 4:1, 8:1, 1:0) Toplam PPFD= $150 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ; Uygulama= Hasat öncesi 48 saat sürekli aydınlatma	Marul ( <i>Lactuca sativa</i> L.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Azaltılmış nitrat içerikleri ve önemli ölçüde artan çözünebilir şeker içerikleri, en çok R:B= 4:1 olarak bulunmuştur (Wanlai ve ark., 2013).</li> </ul>
	Mavi (440 nm, $30 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) ve kırmızı (640 nm, $270 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) LED	Kırmızı yapraklı ( <i>Lactuca sativa</i> L. cv. Outredgeous))	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Antosiyaninlerde konsantrasyon artışı, daha yüksek antioksidan potansiyeli,</li> <li>• Yaprak genişliğinde artış (Stutte ve ark., 2009).</li> </ul>
UV(200–400 nm)	UV-A 383–426 nm, kırmızı 623–673 nm ve mavi 427–478 nm LED birleşimi (R:B:UV-A= %52.9:%7:%10.1); Toplam PPFD= $300 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ; Uygulama= 12 saat	( <i>Lactuca sativa</i> var. <i>Crispa</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Taze kütlede artış (Chang ve Chang, 2014).</li> </ul>
	Soğuk beyaz floresana ilave UV-A LED (373 nm, $18 \pm 2 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ )	'Red Cross' ( <i>Lactuca sativa</i> L.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Antosiyanin konsantrasyonunda % 11 artış (Li ve Kubota, 2009).</li> </ul>
	Floresan lambayla birlikte 310, 325 veya 340 nm UV-B LED ( $0.5 \text{ W.m}^{-2}$ ) Uygulama= Hasat öncesi 3 gün	'Red fire' ( <i>Lactuca sativa</i> L.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hasat öncesi UV-B ışıkların antosiyanin ve diğer antioksidan polifenollerde teşvik edici etkileri,</li> <li>• Antosiyanin konsantrasyonu, 310 nm'de, 325 ve 340 nm'ye kıyasla önemli ölçüde daha yüksek ölçülmüştür.(Goto ve ark., 2016).</li> </ul>

## TARTIŞMA VE SONUÇ

LED aydınlatma, yılın herhangi bir zamanında bitkisel üretimi teşvik edici kontrollü çevre tarımının kilit ve etkili bir bileşeni olma yolunda hızla gelişmektedir. Yenilikçi LED aydınlatma sistemlerinin, yarı iletken teknolojisindeki gelişmelerle birlikte bitkisel

üretimde tamamen yeni bir boyut kazandırdığı görülmektedir. LED teknolojisinin tamamlayıcı aydınlatma için bir ışık kaynağı olarak en önemli farkı, ışık ortamını kontrol etme esnekliğidir. LED, hem ışık spektrumunu hem de fotosentetik akış yoğunluğunu (PPFD: *Photosynthetic Photon Flux Density*) kontrol

etme imkanı sunar. Akıllı LED aydınlatma sistemleri kullanılarak, ışık kalitesinin, yani ışık spektrumunun bitki büyümesi ve gelişimi üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak ortaya çıkarılabilir ve böylece yapılacak sonraki çalışmalara ışık tutacak etkili ilave aydınlatma kılavuzları geliştirilebilir.

LED'ler sahip oldukları sabit enerji verimliliği ve ışık dağılımlarındaki geliştirmeler ile mevcut ilave aydınlatma teknolojilerine yön veren önemli bir alternatiftir. Ancak, bitki büyüme, gelişme, besleme ve metabolizma üzerindeki spektral kalite etkilerinin nasıl optimize edileceğine dair önemli sorunlar devam etmektedir. Bitkilerin LED spektrumuna özel tepkileri bazen yayınlanmış araştırmalara dayanılarak tahmin edilebilir. Fakat bitki metabolizmasındaki birçok farklı iç tepkimenin karmaşık etkileşimi nedeniyle bitkilerin

ışığa gösterecekleri tepkinin, tam olarak öngörülmesi genellikle zordur. Işık şiddeti, süresi, kalitesi, dalga boyu ve diğer çevresel parametreler, bitkilerin fotobiyolojik tepkilerini elde etmeyi, anlamayı ve yeni sonuçlar çıkarmayı zorlaştıran başlıca faktörlerdir. Ayrıca, ışığın farklı dalga boylarının fotosentez üzerindeki etkileşimi henüz tam anlaşılabilmiş değildir. Bu nedenle, LED aydınlatma üzerine yıllarca daha pek çok araştırmanın yapılacağı öngörülmektedir. Öte yandan, uzman araştırmacılar dışında konuya meraklı bazı işletmelerin de özel bitki çeşitleri ve özel yetiştirme teknolojileri (Doku kültürü, aşılı fide, dikey yetiştiricilik gibi) için LED aydınlatma parametrelerini test ve optimize etmek amacıyla küçük ölçekli Ar-Ge çalışmaları yaptıkları da gözlemlenmektedir.

## LİTERATÜR LİSTESİ

- Anderson, J. M., W. S. Chow, Y. I. Park, 1995. The Grand Design Of Photosynthesis: Acclimation Of The Photosynthetic Apparatus To Environmental Cues. *Photosynth Res* 46:129–139.
- Bian, Z. H., R. F. Cheng, Q. C. Yang, J. Wang, 2016. Continuous Light From Red, Blue, And Green Light-Emitting Diodes Reduces Nitrate Content And Enhances Phytochemical Concentrations And Antioxidant Capacity In Lettuce. *J Amer Soc Hort Sci* 141:186–195.
- Bliznikas, Z., A. Žukauskas, G. Samuolienė, A. Viršilė, A. Brazaitytė, J. Jankauskienė, P. Duchovskis, A. Novičkovas, 2012. Effect Of Supplementary Pre-Harvest Led Lighting On The Antioxidant And Nutritional Properties Of Green Vegetables. *Acta Hort* 939:85–91.
- Brazaitytė, A., R. Uliuskaitė, P. Duchovskis, G. Samuolienė, J. B. Sikšnienienė, G. Šabajevienė, K. Baranauskis, G. Stanienė, G. Tamulaitis, Z. Bliznikas, A. Žukauskas, 2006. Optimization Of Lighting Spectrum For Photosynthetic System And Productivity Of Lettuce By Using Light-Emitting Diodes. *Acta Hort* 711:183–188.
- Briggs, W. R., J. M. Christie, 2002. Phototropins 1 And 2: Versatile Plant Blue Light Receptors. *Trends Plant Sci* 7(5):204–210.
- Bugbee, B., 2016. Towards An Optimal Spectral Quality For Plant Growth And Development: The Importance Of Radiation Capture. *Acta Hort* 1134:1–12.
- Carvalho, S. D., K. M. Folta, 2014. Environmentally Modified Organisms—Expanding Genetic Potential With Light. *Crit Rev in Plant Sci* 33:486–508.
- Carvalho, S. D., M. L. Schwieterman, C. E. Abraham, T. A. Colquhoun, K. M. Folta, 2016. Light Quality Dependent Changes In Morphology, Antioxidant Capacity, And Volatile Production In Sweet Basil (*Ocimum basilicum*). *Front Plant Sci* 7:1328.
- Cashmore, A. R., J. A. Jarillo, Y. J. Wu, D. Liu, 1999. Cryptochromes: Blue Light Receptors For Plants And Animals. *Science* 284(5415):760–765.
- Chang, C. L., K. P. Chang, 2014. The Growth Response Of Leaf Lettuce At Different Stages To Multiple Wavelength-Band Light-Emitting Diode Lighting. *Sci Hort* 179:78–84.
- Chen, X. L., X. Z. Xu, W. Z. Guo, L. C. Wang, X. J. Qiao, 2016. Growth And Nutritional Properties Of Lettuce Affected By Mixed Irradiation Of White And Supplemental Light Provided By Light-Emitting Diode. *Sci Hort* 200:111–118.
- Colonna, E., Y. Roupael, G. Barbieri, 2016. Nutritional Quality Of Ten Leafy Vegetables Harvested At Two Light Intensities. *Food Chem* 199:702–710.
- Demotes-Mainard, S., T. Peron, A. Corot, 2016. Plant Responses To Red And Far Red Lights, Applications In Horticulture. *Environ Exp Bot* 121:4–21.
- Folta, K., S. A. Maruhnich, 2007. Green Light: A Signal To Slow Down Or Stop. *J Exp Bot* 58:3099–3111.
- Goins, G. D., L. M. Ruffe, N. A. Cranston, N. C. Yorio, R. M. Wheeler, J. C. Sager, 2001. Salad Crop Production Under Different Wavelengths Of Red Light-Emitting Diodes (leds). Sae technical paper. In: 31st international conference on environmental systems, 9–12 July 2001, Orlando, FL, USA, pp 1–9.
- Goto, E., K. Hayashi, S. Furuyama, S. Hikosaka, Y. Ishigami, 2016. Effect Of Uv Light On Phytochemical Accumulation And Expression Of Anthocyanin Biosynthesis Genes In Red Leaf Lettuce. *Acta Hort* 1134:179–185.
- Hogewoning, S. W., G. Trouwborst, H. Maljaars, H. Poorter, W. van Ieperen, J. Harbinson, 2010. Blue Light Dose–Responses Of Leaf Photosynthesis, Morphology, And Chemical Composition Of *Cucumis Sativus* Grown Under Different Combinations Of Red And Blue Light. *J Exp Bot* 61:3107–3117.
- Johkan, M., K. Shoji, F. Goto, S. Hashida, T. Yoshihara, 2010. Blue Light-Emitting Diode Light Irradiation Of Seedlings Improves Seedling Quality And Growth After Transplanting In Red Leaf Lettuce. *HortScience* 45:1809–1814.
- Johkan, M., K. Shoji, F. Goto, S. Hashida, T. Yoshihara, 2012. Effect Of Green Light Wavelength And Intensity On Photomorphogenesis And Photosynthesis In *Lactuca Sativa*. *Environ Exp Bot* 75:128–133.
- Kubota, C., P. Chia, Q. Yang Li, 2012. Applications Of Far-Red Light Emitting Diodes In Plant Production Under Controlled Environments. *Acta Hort* 952:59–66.
- Lee, M. J., S. Y. Park, M. M. Oh, 2015. Growth And Cell Division Of Lettuce Plants Under Various Ratios Of Red To Far-Red Light-Emitting Diods. *Hortic. Environ Biote* 56:188–194.
- Lee, M. J., K. H. Son, M. M. Oh, 2016. Increase in biomass and bioactive compounds in lettuce under various ratios of red to far-red LED light supplemented with blue LED light. *Hortic Environ Biote* 57:139–147.



- Lefsrud, M. G., D. A. Kopsell, C. E. Sams, 2008. Irradiance from distinct wavelength light-emitting diodes affect secondary metabolites in kale. *HortScience* 43:2243–2244
- Li, Q., C. Kubota, 2009. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. *Environ Exp Bot* 67:59–64.
- Li, H., C. Tang, Z. Xu, X. Liu, X. Han, 2012. Effects of different light sources on the growth of non-heading Chinese cabbage (*Brassica campestris* L.). *J Agr Sci* 4:262–273.
- Lin, K. H., M. Y. Huang, W. D. Huang, M. H. Hsu, Z. W. Yang, C. M. Yang, 2013. The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *capitata*). *Sci Hort* 150:86–91.
- Massa, G., T. Graham, T. Haire, C. Flemming II., G. Newsham, R. Wheeler, 2015. Light-emitting diode light transmission through leaf tissue of seven different crops. *HortScience* 50:501–506.
- Matsuda, R., K. Ohashi-Kaneko, K. Fujiwara, K. Kurata, 2007. Analysis of the relationship between blue-light photon flux density and the photosynthetic properties of spinach (*Spinacia oleracea* L.) leaves with regard to the acclimation of photosynthesis to growth irradiance. *Soil Sci Plant Nutr* 53:459–465.
- McCree, K. J., 1971. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric Meteorol* 9:191–216.
- Mizuno, T., W. Amaki, H. Watanabe, 2011. Effects of monochromatic light irradiation by LED on the growth and anthocyanin contents in leaves of cabbage seedlings. *Acta Hort* 907:179–184.
- Mou, B., 2012. Nutritional quality of lettuce. *Curr Nutr Food Sci* 8(3):177–187.
- Naznin, M. T., M. Lefsrud, V. Gravel, X. Hao, 2016. Different ratios of red and blue LED light effects on coriander productivity and antioxidant properties. *Acta Hort* 1134:223–229.
- Nicole, C. C. S., F. Charalambous, S. Martinakos, S. van de Voort, Z. Li, M. Verhoog, M. Krijn, 2016. Lettuce growth and quality optimization in a plant factory. *Acta Hort* 1134:231–238.
- Ohashi-Kaneko, K., M. Takase, N. Kon, K. Fujiwara, K. Kurata, 2007. Effect of light quality on growth and vegetable quality in leaf lettuce, spinach and komatsuna. *Environ Control Biol* 45:189–198.
- Olle, M., A. Viršilė, 2013. The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality. *Agr. Food Sci* 22:223–234.
- Osram Opto, S., 2016. Solutions for Horticulture Lighting. <http://ledapplicatie.nl/wp-content/uploads/sites/32/2016/06/6.final-Horticulture-Lighting-led-evenement-brandes.pdf>. Erişim: Mayıs 2018.
- Ouzounis, T., B. Razi Parjikelaei, X. Fretté, E. Rosenqvist, C. O. Ottosen, 2015a. Predawn and high intensity application of supplemental blue light decreases the quantum yield of PSII and enhances the amount of phenolic acids, flavonoids, and pigments in *Lactuca sativa*. *Front Plant Sci* 6:19.
- Ouzounis, T., E. Rosenqvist, K. Ottosen, 2015b. Spectral effects of artificial light on plant physiology and secondary metabolism: a review. *HortScience* 50:1128–1135.
- Owen, W. G., R. Lopez, 2015. End-of-production supplemental lighting with red and blue light-emitting diodes (LEDs) influences red pigmentation of four lettuce varieties. *HortScience* 50:676–684.
- Pinho, P., K. Jokinen, L. Halonen, 2016. The influence of the LED light spectrum on the growth and nutrient uptake of hydroponically grown lettuce. *Lighting Res Technol*.
- Pocock, T., 2015. Light-emitting diodes and the modulation of specialty crops: light sensing and signaling networks in plants. *HortScience* 50:1281–1284.
- Samuolienė, G., A. Urbonavičiūtė, P. Duchovskis, Z. Bliznikas, P. Vitta, A. Žukauskas, 2009. Decrease in nitrate concentration in leafy vegetables under a solid-state illuminator. *HortScience* 44:1857–1860.
- Samuolienė, G., A. Brazaitytė, P. Duchovskis, A. Viršilė, J. Jankauskienė, R. Sirtautas, A. Novičkovas, S. Skalauskienė, J. Sakalauskaitė, 2012a. Cultivation of vegetable transplants using solid-state lamps for the short-wavelength supplementary lighting in greenhouses. *Acta Hort* 952:885–892.
- Samuolienė, G., A. Brazaitytė, R. Sirtautas, A. Novičkovas, P. Duchovskis, 2012b. The effect of supplementary LED lighting on the antioxidant and nutritional properties of lettuce. *Acta Hort* 952:835–841.
- Samuolienė, G., R. Sirtautas, A. Brazaitytė, A. Viršilė, P. Duchovskis, 2012c. Supplementary red-LED lighting and the changes in phytochemical content of two baby leaf lettuce varieties during three seasons. *J Food Agric Environ* 10:7001–7706.
- Samuolienė, G., R. Sirtautas, A. Brazaitytė, P. Duchovskis, 2012d. LED lighting and seasonality effects antioxidant properties of baby leaf lettuce. *Food Chem* 134:1494–1499.
- Samuolienė, G., A. Brazaitytė, R. Sirtautas, A. Viršilė, J. Sakalauskaitė, S. Sakalauskienė, P. Duchovskis, 2013. LED illumination affects bioactive compounds in romaine baby leaf lettuce. *J Sci Food Agric* 93:3286–3291.
- Sancar, A., 2003. Structure and function of DNA photolyase and cryptochrome blue-light photoreceptors. *Chem Rev* 103(6):2203–2238.
- Shinomura, T., K. Uchida, M. Furuya, 2000. Elementary processes of photoperception by phytochrome A for high-irradiance response of hypocotyl elongation in *Arabidopsis*. *Plant Physiol* 122(1):147–156.
- Smith, H., 1995. Physiological and ecological function within the phytochrome family. *Annu Rev Plant Biol* 46:289–315
- Snowden, M. C., K. R. Cope, B. Bugbee, 2016. Sensitivity of seven diverse species to blue and green light: interactions with photon flux. *PLoS ONE* 11(10):e0163121.
- Son, K. H., M. M. Oh, 2013. Leaf shape, growth, and antioxidant phenolic compounds of two lettuce cultivars grown under various combinations of blue and red light-emitting diodes. *HortScience* 48:988–995.
- Son, K. H., M. M. Oh, 2015. Growth, photosynthetic and antioxidant parameters of two lettuce cultivars as affected by red, green, and blue light-emitting diodes. *Hortic Environ Biotechnol* 56:639–653.
- Spalding, E. P., K. M. Folta, 2005. Illuminating topics in plant photobiology. *Plant, Cell Environ* 28:39–53.
- Stutte, G. W., S. Edney, T. Skerritt, 2009. Photoregulation of bioprotectant content of red leaf lettuce with light-emitting diodes. *HortScience* 44:79–82.

## Farklı Dalga Boylu LED Işıklarının Yeşil Yapraklı Bitkilerin Gelişimi Üzerindeki Etkileri

- Tarakanov, I., O. Yakovleva, I. Konovalova, G. Paliutina, A. Anisimov, 2012. Light-emitting diodes: on the way to combinatorial lighting technologies for basic research and crop production. *Acta Hort* 956:171–178.
- Taulavuori, K., V. Hyöky, L. Oksanen, E. Taulavuori, R. Julkunen-Tiitto, 2016. Species-specific differences in synthesis of flavonoids and phenolic acids under increasing periods of enhanced blue light. *Environ Exp Bot* 121:145–150.
- Viršilė, A., M. Olle ve P. Duchovskis, 2017. LED Lighting in Horticulture, Chap. 7, pp. 113-161. In: *Light Emitting Diodes for Agriculture (Smart Lighting)*. S. Dutta Gupta (ed.), Springer Nature Singapore Pte Ltd.
- Wanlai, Z., L. Wenke, Y. Qichang, 2013. Reducing nitrate content in lettuce by pre-harvest continuous light delivered by red and blue light emitting diodes. *J Plant Nutr* 36:491–490.
- Wargent, J. J., 2016. UV LEDs in horticulture: from biology to application. *Acta Hort* 1134:25–32
- Wojciechowska, R., O. Długosz-Grochowska, A. Kołton, M. Żupnik, 2015. Effects of LED supplemental lighting on yield and some quality parameters of lamb's lettuce grown in two winter cycles. *Sci Hort* 187:80–86.
- Wojciechowska, R., A. Kołton, O. Długosz-Grochowska, E. Knop, 2016. Nitrate content in *Valerianella locusta* L. plants is affected by supplemental LED lighting. *Sci Hort* 211:179–186.
- Xin, J., H. Liu, S. Song, R. Chen, G. Sun, 2015. Growth and quality of Chinese kale grown under different LEDs. *Agric Sci Technol* 16:68–69.
- Yağcıoğlu, A., 2005. Sera Mekanizasyonu. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, Bornova- İzmir, 251 ss.
- Yorio, N. C., G. D. Goins, H. R. Kagie, R. M. Wheeler, J. C. Sager, 2001. Improving spinach, radish and lettuce growth under red light emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation. *HortScience* 36:380–383.
- Žukauskas, A., Z. Bliznikas, K. Breivė, A. Novičkovas, G. Samuolienė, A. Urbonavičiūtė, A. Brazaitytė, J. Jankauskienė, P. Duchovskis, 2011. Effect of supplementary pre-harvest LED lighting on the antioxidant properties of lettuce cultivars. *Acta Hort* 907:87–90.