

BİTKİSEL ÜRETİMDE YAPAY IŞIK KAYNAKLARININ KULLANIMI

Batuhan IRMAK^{1*}, Yüksel TÜZEL²

¹Ziraat Müh., Ege Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, İzmir; ORCID:

²Prof. Dr., Ege Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, İzmir; ORCID: 0000-0001-7825-9379

ÖZ

Işık bitki gelişimi için gerekli olan çevresel faktörlerden birisidir. Doğal ışık bitkideki fotosentez faaliyeti harekete geçirecek bitkinin inorganik maddeleri organik maddelere dönüştürmesini sağlar. Bu temel işleviyle ışık tarımsal üretimde önemli bir role sahip bir üretim girdisi olarak yer alır. Yetersiz ya da düzensiz aydınlatma bitkisel üretimi kısıtlamaktadır. Bu sebeple doğal ışığın üretimi kısıtladığı yerlerde ek aydınlatma olarak yapay ışık kaynaklarının kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Kapalı ortamlarda da yapay aydınlatma ile bitkisel üretim mümkün hale gelmiştir. Yapay ışık kaynağı ve kaynaktan çıkan ışığın nitelikleri temel alınarak bitkisel üretimde yapay ışıklandırma konusunda daha iyi çözümleri öne sürmek üzerine araştırmalar yapılmaktadır. LED teknolojisi düşük enerji tüketimi ve bitkisel üretim üzerindeki olumlu etkileriyle geleneksel yapay ışık kaynaklarının yerini alarak yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmada bitkinin ışık enerjisi ile ilişkisi incelenmiş, yapay ışıklandırma kaynaklarının nitelikleri ve LED ile yapılan aydınlatmanın çeşitli türlerdeki etkileri üzerinde durulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yapay ışıklandırma, sebze yetiştiriciliği, LED, kontrollü çevre

ARTIFICIAL LIGHTING IN VEGETABLE PRODUCTION

ABSTRACT

Light is one of the environmental factors necessary for plant growth. Natural light provides energy for photosynthesis process which plant can convert inorganic substances into organic substances. With this basic function, light plays a crucial role as an important production input in plant production. Insufficient or irregular lighting often limits crop production. Accordingly, artificial light sources have started to become popular since they serve as additional lighting in places where lighting levels should be optimized. With the help of artificial lighting systems, indoor plant production has become possible. Research on the characteristics of sources and light emitted are carried out to suggest better solutions for artificial lighting. LED technology is becoming widespread by replacing traditional artificial light sources with LEDs' low energy consumption and positive effects on crop production. In this review, the relation between plants and light energy was emphasized, the qualities of artificial lighting sources and the effects of LED lighting on various species were examined.

Keywords: Artificial lighting, vegetable cultivation, LED, controlled environment

GİRİŞ

Açık alanlardaki yağış, sıcaklık ve ışık miktarı gibi değişkenler bitkisel üretimde insan kontrolünü sınırlamaktadır. Aynı zamanda tarıma açık arazi alanlarının gün geçtikçe azalması ve artan nüfusun ihtiyacını karşılamak için bitkisel üretimde birim alandan yüksek verim elde etme çalışmaları hızlanmıştır. Seracılığın bitkisel üretimde kontrole ve yönlendirmeye izin vermesi birim alandan yüksek verim arayışına katkı sağlamış ve seracılık geleneksel açık alan yetiştiriciliğine alternatif bir üretim modeli haline gelmiştir. Yirminci yüzyıl boyunca seracılık faaliyetlerindeki uygulamalar gün geçtikçe gelişmiştir. Havalandırma, ısıtma, soğutma ve karbondioksit gübrelemesi gibi uygulamalar bitkisel üretim üzerinde daha yüksek oranda kontrolü

mümkün kılmıştır. Damla sulama uygulamalarının gelişmesiyle bitkisel üretimde sulama ve gübreleme yeni bir boyut kazanmıştır. Az miktarlarda, ancak sık aralıklarla yapılan hedef odaklı modern sulama ve gübreleme anlayışı kısa sürede bütün dünyada yaygınlaşmıştır. Yapay ışık kaynaklı üretim konsepti ve uygulamaları gün geçtikçe tarım gündeminde daha fazla yer almaktadır. Doğal ışığın yanında destek olarak yapay ışık kaynaklarının kullanılması ile hibrit ışıklandırma sistemleri oluşmaktadır. Doğal ışık kaynağının yetersiz olduğu zamanda yapay ışık kaynakları ile ışıklandırma ihtiyacı karşılanmaktadır. Bunun yanında tamamen yapay ışık kaynakları ile geleneksel üretime göre yüksek kontrol sağlanan modeller de bulunmaktadır. Ülkemizde de bulunan topraksız ve yapay ışıklandırma sistemleri, bitki fabrikası, dikey tarım sistemleri gibi isimlerle ilgi

*Sorumlu yazar / Corresponding author:

çekmektedir. Özellikle yapay ışıklandırma ile tamamen kapalı üretim alanları şehirlerin yakınlarında tesis edilmesi ile şehrin lojistik desteklerden faydalanması cazibe oluşturmaktadır. Bitkisel üretim miktarını ve ürün kalitesini fotosentez süreci belirlemektedir. Işık kaynağının nitelikleri fotosentez süreci üzerinde rol oynamaktadır. Yapay ışıklandırma teknolojileri bu değişkenler üzerinde üreticiye kontrol imkânı yaratmaktadır. Özellikle dalga boyu üzerinde değişiklik yapılmasına imkân veren LED sistemler ile bitki türüne göre bitki bünyesinde farklı etkilere sebep olmayı mümkün kılınmaktadır. Bu çalışmada ışığın fotosentez üzerindeki rolü ve LED teknolojisindeki gelişmeler ve uygulamalar ile ilgili bilgiler derlenmiştir.

BİTKİ VE IŞIK

Fotosentez Süreci ve Işık Enerjisi

Bitki organik maddeye çevireceği karbondioksiti ve suyu bulunduğu ortamdan bulabilirken, tepkimenin başarılı bir şekilde gerçekleşmesi için ışık enerjisini dışarıdan sağlaması zorunludur [15, 20]. Ana enerji kaynağı olarak ışık, bitki gelişimi için en önemli çevresel faktörlerden biridir [33]. Işık yoğunluğu ve dalga boyu sadece bitki gelişimi için değil, morfolojik değişimler ve çeşitli fizyolojik tepkiler için de önemli bir etkiye sahiptir [27]. Işık tayfindaki (spektrum) değişimler bitkideki anatomik, fizyolojik ve morfolojik değişkenleri etkiler [18, 29]. Bitkiler yeni ortama uyum sağlayabilmek için yaprak seviyesinde çeşitli morfolojik ve fizyolojik mekanizmalar geliştirmiştir [43]. Net fotosentez oranındaki artış genelde ışık şiddeti ile ilişkilendirilir [28]. Ancak yüksek ışık şiddetinin net fotosentez oranında azalma ile sonuçlandığı [1], düşük ışık seviyelerinin ise spesifik yaprak alanında ve bitki boyunda artışa sebep olabildiği belirtilmiştir. Bu adaptasyonlar fotosentez sürecinde kullanılmak üzere işe yarar ışığın Emilimini arttırmak içindir [38]. Bitkiler çeşitli tepkilerle aşırı ışınmadan korunmakta ya da olumsuz etkiyi azaltarak fotosentezin sürmesini sağlamaktadır [14, 40].

Bitkinin yüksek orandaki ışınmadan (radyasyon) korunması için;

- Spesifik yaprak alanını azaltması,
- Yaprak kalınlığını arttırması ve bunun sonucunda artan katman miktarı ve palizat dokusunun gelişmesiyle süngerimsi tabakanın derinleşmesi, örnek olarak verilebilir [5].

“Bitki gelişiminde ihtiyaç duyulan ışığın kaynağı güneş veya yapay ışıklardır” [34]. Gün ışığı ve yapay ışık kaynaklarının beraber kullanılacağı sistemlerde fizibilite çalışmalarında doğal gün ışığının sera içerisine alınımı ve dağılımı konusu büyük önem

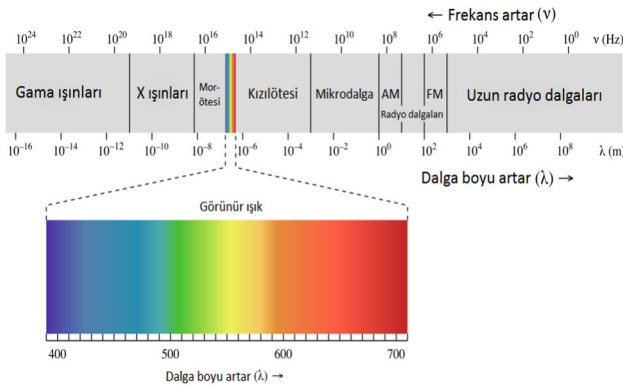
taşımaktadır. Üretim yapılan bölgenin gün ışığına bağlı olarak ışık ve gölge yönetimi bitkilerin dengeli bir şekilde ışığa ulaşmasını sağlamaktadır [32]. Bu doğrultuda sera örtü materyallerinin seçimi, perde kullanımı ve perdeleme stratejileri üreticinin doğal ışığı yönetimi konusunda kullanabileceği seçeneklerdir [15, 16]. Zhu [44] güneşten yayılan elektromanyetik ışınların görünür aralıktaki dalga boyuna sahip fotonlarının fotosentez sürecinde yer aldığını ifade etmektedir. Dalga boyu 400 nm ile 700 nm arasında değişen ışık insan gözü ile ayırt edilebilir. Bu aralığa aynı zamanda fotosentetik aktif radyasyon (İng. Photosynthetically Active Radiation) denmektedir (Şekil 1). Bitki tarafından emilimi yapıp fotosentez sürecinde kullanılabilecek aralığı ifade etmektedir. Mor ve mavi en kısa dalga boylarına sahip olup yüksek enerji düzeyine sahiptir [19]. Kırmızı ise uzun dalga boyu ile düşük enerji düzeyinde bulunmaktadır. Fotosentez sürecinde ışınların Emiliminden pigmentler sorumludur. Pigmentler Emilimini yapamadıkları dalga boylarına karşılık gelen enerjileri yansıtır ya da iletirler. Bu durumda da ilgili pigment Emilimini yapmadığı dalga boyunun rengini almış olur. Örneğin klorofil a ve klorofil b pigmentleri sırasıyla mavi-mor ve kırmızı-mavi aralığındaki dalga boyu aralığının Emilimini yapmakta ve yeşil rengi yansıtmaktadır. Bu şekilde klorofil pigmenti yeşil renkte gözükmektedir [39].

Fotoreseptörler ve Işık Tayfı

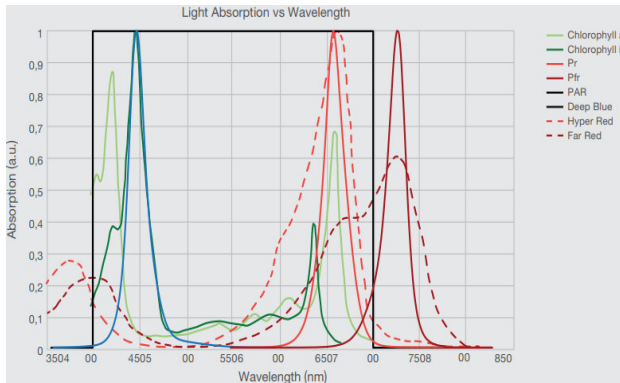
Aydınlanmanın bitki üzerindeki etkisi ışık kaynağının niteliğine ve ışığı algılayan bitki fotoreseptörlerine bağlıdır. Dalga boyu ile ifade edilmek üzere, bitki bünyesindeki fotosentetik aktif pigmentlerin absorpsiyon kapasitesi ve fotonların kuantum enerji düzeylerindeki farklılık ışığa bağlı olaylara yön vermektedir [14]. Bu nedenle üretimde kullanılan aydınlatma kaynağının niteliği bitkinin oluşturacağı tepkilerin belirleyicisidir [7, 10]. Klorofil pigmentlerinin azami oranda ışık Emilimi yaptığı dalga boyu ile ifade edilen aralıklar mevcuttur (Şekil 2). Bunun yanında önemli fizyolojik tepkilerin tetiklendiği farklı dalga boyu aralıkları da (kırmızı ötesi) bitki tarafından algılanmaktadır [25, 40]. Bitkideki fizyolojik ve morfolojik değişimlerin dalga boyuna göre değiştiği ifade edilir [29]. Bitki gelişimi bitki yüzeyine ulaşan renk ya da dalga boyu ile ifade edilen ışık niteliğinden şiddetli bir şekilde etkilenir [19]. Yapraklar tarafından mavi ya da kırmızı ışığın Emilimi yaklaşık %90’ı bulmaktadır [39].

Bitkide kırmızı kuşaktaki dalga boylarını algılayan reseptör fitokromdur. Kırmızı ve kırmızı ötesi aralıklara düşen dalga boylarını algılayarak çimlenme, çiçeklenme, fotosentez ve bitki gelişimi için bitkiyi uyarır [7]. Mavi ışık bitkide ağırlıklı

olarak vejetatif gelişmeyi tetiklemektedir. Gövde uzaması, fide gelişimi ve meyve besin içeriğinde zenginleşme mavi ışık ile kontrol edilmektedir. Eğer aydınlatma kaynağının tayfında mavi aralık eksik ise bitkinin fototropizma (ışığa doğru yönelim) tepkisi zayıf kalmaktadır [3, 25]. Fitokrom, kriptokrom ve neokrom reseptörü kırmızı ve kırmızı ötesi ışıkların algılanmasına görev almaktadır. Düzenli ve sağlıklı bitki gelişimi için fitokrom ve kriptokromların dengeli şekilde uyarılması gerekmektedir. Fitokrom ve kriptokrom reseptörleri algıladıkları farklı dalga boyu aralıkları ile sırasıyla generatif ve vejetatif gelişmeye yön verirler [22]. Bu reseptörlerin yanında fototropin denilen bir grup fotoreseptörün de uyarılmasıyla bitkinin ışık emilimi artmakta ve fotosentez etkinliği olumlu yönde etkilenmektedir [8].



Şekil 1. Elektromanyetik dalga spektrumu
Figure 1. Electromagnetic spectrum



Şekil 2. Klorofil çeşitleri ve ışık renk aralıklarının dalga boylarına göre absorpsiyon (emilim) değerleri (Osram, 2020)

Figure 2. Absorption values of chlorophyll types and light color ranges according to wavelengths (Osram, 2020)

YAPAY IŞIKLANDIRMA

Geleneksel Aydınlatma Teknolojisi

Doğal aydınlatma koşullarında beklenmeyen değişimler, yetersiz gün ışığı ve iklim değişimi

fenomeni dünyanın birçok yerinde ürün gelişiminde eksiklere ve verim kayıplarına sebep olmaktadır. Olumsuz durumların etkilerini azaltmak için örtü altında kontrollü yapay ışıklandırma ile üreticilik konsepti geliştirilmiştir. Yapay ışıklandırma ile bitki yetiştiriciliği ilk olarak 1860'larda ortaya kondu. Ancak yapay ışıklandırma ile bitkisel üretim sistemlerinin ticari uygulamaları yirminci yüzyılın başlarında, sağlam ve uzun ömürlü elektrik lambalarının geliştirilmesinden sonra ortaya çıkmıştır. İlk elektrikli lambalar on dokuzuncu yüzyılın ilk yarısında tasarlanmıştır. İlk ark lambası modeli 1809'da ve ilk akkor lamba 1840'ta geliştirildi. Akkor lamba modellerinin geliştirilmesi lambaların çağını başlatmıştır. Sunulan ilk modeller ticari uygulamalar için oldukça pahalı ve kısa ömürlüydü. On dokuzuncu yüzyılın ortasından itibaren akkor lambalar için karbon flamanlı modeller öne sürülse de tungsten yapıları akkor lambalar yirminci yüzyılın ilk çeyreğinde kabul görmüştür. Elektro-optik gelişmelerin bir sonraki aşamasını ark tütünün içinde asal gazların bulunduğu ilk olarak 1857'de üretilen gaz deşarjlı lambalar oluşturmaktadır. Floresan lamba en yaygın kullanılan gaz deşarjlı lambadır. Floresan lambalar uygun enerji verimliliği ve yüksek ömrü ile bitkisel üretimde yaygın olarak yer edinmiştir. Cıva ve sodyum metalleri deşarj tüpü modeline dahil edilmesi ve bu metallerin buharı boyunca elektrik akımının kanallı olması aydınlatmayı güçlendirmiştir. Yaygın olarak ilk kabul gören cıva buharlı lamba 1901 yılında tasarlanmıştır. Bu tasarım geliştirilerek ilk modern yüksek basınçlı gaz deşarj lambası piyasaya sürülmüştür. Sonraki süreçte metal halojen lambalar ve yüksek basınçlı sodyum lambalar geliştirilerek daha yüksek aydınlanma elde edilmiştir. Yüksek basınçlı deşarj lambalar kontrollü koşullarda bitkisel üretim için tercih edilen yapay ışık kaynağı olmuştur [2, 13]. PAR aralığı içerisinde nispeten yüksek yüzde mavi aralık ışıması, uzun kullanım ömrü ve %25-40 aralığında elektrik verimliliği bu lambaların doğal gün ışığına ikame olmasını ya da yanında destek olarak yıl boyunca kullanılabilmesine olanak sağlamıştır [37].

•*Akkor flamanlı lambalar:* Akkor flamanlı lambaların çalışma prensibi bir katının ısıtılması üzerine görünür kuşakta elektromanyetik ışıma yapmasıdır. Zaman içerisinde ısıtılan madde gelişerek değişmiştir. Günümüzde tungsten metali kullanılmaktadır. Telin yaklaşık 2600°C ısıtılması ile ışık elde edilmektedir. Akkor lambalar kullandıkları enerjinin %15'ini PAR (400-700 nm) aralığında yayarken, %75'ini kızıl ötesi (850-2700 nm) olarak yaymaktadır. Geniş aralıkta ışık yayması ve yaydığı sıcaklık ile bitkileri ısıtması avantajına karşılık enerji

kullanım etkinliği düşüktür. Akkor lambalar kullandığı enerji karşılığında yaydığı düşük ışık şiddeti ve kısa ömrü ile günümüzde bitkisel üretimde yapay ışık kaynağı olarak tercih edilen öncü bir ışık kaynağı değildir [13].

Floresan lambalar: Düşük basınçlı cıva buharına elektrik akımı verilerek elde edilen ultraviyole ışımaya lambanın iç yüzeyindeki kaplamadan geçerek görünür ışığı yayar. Farklı boyut ve şekillerde bulunmalarına rağmen aynı çalışma prensibine sahiptirler. Yayıdıkları ışığın %90'ı PAR aralığındadır. Ancak ışının dalga boyu kontrol edilememekte ve kullanım sırasında lambanın yüzeyi nispeten sıcak olmaktadır. UV ışınlarının görünür ışık yayması sırasında her fotonun enerjisinin yaklaşık yarısının ısı olarak kaybolduğu bilinmektedir [13].

•*Yüksek basınçlı deşarj lambalar:* Floresan lambalardaki gibi metal buharının elektrik akımı ile uyarılması sonucu ışımaya elde edilir. Yüksek basınç uygulanması nedeniyle metal daha iyi bir iletken rolü oynadığı için floresana göre daha etkin bir aydınlanma elde edilmektedir [37].

Led Aydınlatma Teknolojisi

Epoksi ya da plastik kaplama içerisine yerleştirilmiş elektrik akımını yönlendiren tellere bağlı yarı iletken bir çip içeren yapıdır. Geleneksel LED'ler çift iç hatlı DIP'ler olmuştur. Modern LED'ler DIP-LED'lere göre daha yüksek akımı işleyebildikleri için daha yüksek aydınlık sağlayabilmektedir. LED teknolojisini diğer yapay ışık kaynaklarından farklı kılan bileşeni yaklaşık 1 mm² boyutundaki çiplerdir. Çipte iki türlü katkı maddesi bulunur: n-tipi yani yüksek sayıda değerlik elektronu içeren ve p-tipi yani değerlik kabuğundaki çok sayıda boşluktan oluşmaktadır. Bu iki tip yarı iletken kristaller birbirine kaynaştırılmıştır. Kaynaşmış bu yapıya "p-n heteroeklemi" denilmektedir. Elektrik akımı diyot boyunca p tarafından n tarafına doğru hareket ettikçe n tarafındaki elektronlar p tarafına geçmektedir. Elektronlar p-tipi katkı maddesindeki boş alanlara düşmektedir. Bu olaya "elektron deliği eşleşmesi" adı verilir. Elektronun yeni yerleştiği yörüngesinin enerjisi elektronun kendi enerjisinden daha düşük olduğu için fazla enerji, belirli bir dalga boyunda yani ona karşılık gelen bir renkte elektromanyetik ışımaya olarak serbest kalmış olur. Bu dalga boyunu (ışığın rengini) belirleyen ise p ve n katkı maddelerinin değerlik kabuklarının arasındaki enerji farkıdır [13]. Floresan lambalar, metal halojen lambalar, yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalar ve akkor lambalar bitki yetiştiriciliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu ışık kaynakları fotosentetik foton akı seviyelerini yükselterek bitki gelişimini olumlu yönde etkilemektedir. Ancak, bu durumda

kaynaktan çıkan enerji PAR aralığının dışında kalan, bitki için etkili emilim görülmeyen dalga boylarını da ışıtmaktadır [23]. Günümüzde LED aydınlatma yaygın kullanım alanı bulmuştur.

Geleneksel ışık kaynaklarıyla karşılaştırıldığında LED aydınlatma sistemleri, ışık tayfı bileşimini kontrol etme yeteneğine sahiptir. Bunun yanında küçük bir kütle ve hacme sahiptir. Dayanıklılık, uzun çalışma ömürleri, dalga boyu özgünlüğü, ışık yayan yüzeyin nispeten serin olması, en az şekilde ısıtma özelliği ve elektrik giriş akımı ile doğrusal olan foton çıkışı özelliği avantaj yaratmaktadır. LED sistemler, bitki fotoreseptörleri ile daha iyi eşleşecek dalga boyları ile bitki morfolojisini ve metabolizmasını etkilemektedir. Daha verimli bir üretime zemin hazırlanmış olurlar [30, 41]. Çağlayan ve Ertekin [9], mavi, yeşil ve kırmızı renk aralıklarında bulunan dalga boylu ışıklandırmaların fotosentez için yeterli enerjiyi barındıklarını ifade etmiştir. Geleneksel yapay ışık kaynakları LED'e göre düşük bir verim ile çalışmaktadır. Çünkü bu ışık kaynaklarından yayılan ışık enerjisinin dalga boyları bitkinin fotosentezinde kullanımı için önemli olan PAR aralığının dışında yer almaktadır. LED'ler ise PAR aralığına optimize edilmiş dalga boylu fotosentez odaklı bir ışımaya yaparlar [24]. LED'ler beyaz ışıkta bulunan çeşitli dalga boylarına sahip renk aralıklarının ayrı ayrı ışımaya yapılmasına imkân sağlamaktadır. Bu şekilde kaynaktan bitkinin gelişimi için ihtiyacı olan ışımaya yapılırken daha az enerji tüketilmektedir. Örnek olarak doku kültürü laboratuvarlarında yaygın olarak kullanılan geleneksel ışık kaynaklarından boru şeklindeki floresan lamba en yüksek oranda elektrik tüketen ışık kaynağıdır. Laboratuvarlarda harcanan toplam elektriğin %65'ini oluşturmaktadır [42]. Aynı miktardaki domates üretimi için kurulan LED ışıklandırmada kullanılan enerji HPS ışıklandırmada kullanılan enerjinin %25'i kadardır. Bunun yanında, LED teknolojisi geleneksel ışıklandırma kaynaklarına göre yaklaşık %65 daha az enerji tüketimine yol açmaktadır [4]. LED lambaların ömürleri 15.000 ile 50.000 saat arasında değişmektedir. Normal akkor bir ampulün ömrü ise 1000 saat ile sınırlıdır [12]. LED'ler belirli dalga boyunda ışımaya yaptıklarından ötürü diğer kaynaklar gibi morötesi ve kızılötesi ışınım yapmaz. LED'ler cıva içermezler. Bunun yanında cam ile kaplı olmayıp ve yüzeyleri yüksek sıcaklıkta değildir. Bu nedenle LED'ler ile çalışması daha güvenlidir [42].

Led Aydınlatmanın Etkileri

Kırmızı ve mavi ışıklar fotosentez tepkimelerinde yer alan karbondioksit özümlemesinde ana enerji kaynağı oldukları için bitki gelişiminde önemli etkiye sahiptir. Kırmızı ve mavi aralıklarında pigmentlerin

bu aralıktaki enerji ile yüksek etkileşim görüldüğü bilinmektedir [21]. Kırmızı ve mavi ikili kombine ışıklar (R-B LED), kontrollü ortamlarda marul gibi yeşil yapraklı sebze türlerinin yetiştiriciliğinde etkili bir ışık kaynağı olarak kanıtlanmıştır [26, 35, 36]. Kırmızı ve mavi ışığın beraber kullanılması, bitkisel gelişimi için etkili bir ışık kaynağı olarak öne çıkmaktadır. 1:1 oranındaki kırmızı-mavi ışık zambak (*Lilium candidum*), kasımpatı (*Chrysanthemum*) ve domates (*Solanum lycopersicum*) gibi birçok bitkimin bitkinin taze ve kuru ağırlığını artırmıştır [23]. Bu iki dalga boyundan birinin yokluğu fotosentetik yetersizliklere sebep olabilmektedir [18]. Heo [17] ve Lee [26] yaptıkları çalışmalar sonucunda 1:1 oranında kırmızı-mavi ışık altında yetiştirilen bitkilerde spesifik yaprak alanının güneş ışığı altındaki koşullara göre daha yüksek olduğunu gözlemlemiş ve bu durum ışık emilimini arttırabileceğini ifade etmişlerdir.

Işık kaynağının bitki üzerindeki etkisi kaynaktan çıkan ışığın dalga boyuna, aydınlanma rejimine, ilgili bitkinin tür ve çeşidinin özelliklerine göre

değişmektedir. Işık kaynağının bitki yüzeyinden uzaklığı, ışık yoğunluğu ve lens seçimleri bitki gelişimi için tayf kompozisyonu kadar önemlidir [31]. Bitki gelişim dönemi boyunca yapılan ışıklandırmanın yanısıra hasat tarihine yakın bir zamandaki aydınlatma uygulamaları üretilen meyvenin kalitesini etkilemektedir [24]. Bliznikas [6] hasat tarihinden üç gün önce başlatılan 640 nm dalga boyundaki aydınlatma uygulamasının çeşitli sebzelerdeki etkilerini incelemiştir. Maydanoz ve dereotunda fenolik bileşiklerde ve C vitamininde artış, antioksidan aktivitesi ve nitrat birikmesinde azalma gözlemlenmiştir. Roka, ıspanak ve hardal bitkilerinde ise nitrat azalması belirlenmiştir. PAR aralığının (400-700 nm) dışındaki kırmızı ötesi ışınım da bitki tarafından algılanmakta ve bit gelişimini etkilemektedir. Kırmızı ötesi (730-740 nm) ışığın kırmızı ya da kırmızı-mavi aralığı ile aydınlatma yapılması sonucunda marulda yaprak uzunluğunda ve biyokütlesinde artış gözlemlenmiş, bunun yanında pigment (klorofil, karotenoid) yoğunluğunda azalma görülmüştür [11].

Çizelge 1. Çeşitli ışık kaynaklarının farklı uygulamaları ve etkileri

Table 1. Effects of various applications of different lighting sources

Bitki	Işık Kaynağı	Bitki Üzerindeki Etkisi
Domates (<i>Lycopersicum esculentum</i>)	Kırmızı, 660 nm LED	Verimde artış [11].
Domates (<i>Magnus</i> F ₁) Tatlı biber (<i>Capsicum annuum</i> L.) Hıyar (<i>Cucumis sativus</i>)	Yeşil, 505 ve 530 nm LED (15 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) + HPS (90 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Yalnız hıyarda 530 nm'de gelişim ve fotosentetik pigment toplamında artış, domates ve tatlı biberde 505 nm uygulamasında yaprak alanında, yaş ve kuru madde miktarında artış [6].
Marul (<i>Lactuca sativa</i> L. cv. Red Cross)	Kırmızı, 638 nm LED (210 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) + HPS (300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Fenolik %28.5, Tokoferol %33.5, Şeker 552.5 ve antioksidan kapasitesinde %14.5 artış, fakat C vitamini içeriğinde azalma [6].
Cherry domates fideleri	Mavi + Kırmızı + Yeşil LED (Toplam 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Net fotosentez ve mm^2 başına stoma sayısında artış [11].
Kıvırcık lahanası (<i>Brassica oleracea</i> L. cv.)	Kırmızı 640 nm LED (ön hazırlık aşamasında soğuk beyaz floresan lamba ile)	Lutein ve klorofil a, b toplamında artış [35].
Fesleğen (<i>Ocimum gratissimum</i> L.)	Kırmızı, 660 ve 635 nm LED + Mavi, 460 nm LED	Çiçeklenmede gecikme (460 nm + 635 nm birleşime göre) [18].
Yeşil Soğan (<i>Allium cepa</i> L.)	Kırmızı, 638 nm LED + Doğal gün ışığı	Nitrat içeriğinde azalma [33].

SONUÇ

Dünya genelinde artan nüfusa besin yetiştirebilme kaygısı, bitkisel üretim üzerindeki kısıtlayıcı faktörlere yönelik çalışmaları yoğunlaştırmaktadır. Tarımsal üretim tarihi boyunca açık tarladan örtü altına doğru giden daha kontrollü yetiştiricilik serüveninde hastalık ve zararlılar, sulama, yetiştirme ortamı niteliği, rüzgâr, sıcaklık gibi streslere karşı çeşitli çözümler ortaya konmuştur. Bitki gelişimi için en önemli ihtiyaçlardan birisi olan yeterli ışıklandırma ihtiyacını karşılama konusunda çözümlerin ortaya konması yakın bir zaman içerisinde başlamıştır. Yapay ışık kaynaklarının doğal ışık yanında destek ışık olarak kullanılması ve kapalı ortamlarda bitkisel üretime izin vermesi, bitkisel modern üretim anlayışını oluşturmaktadır. İnsanın uzay serüvenindeki olası bitkisel üretim uygulamalarında

da kendine yer bulan yapay ışık kaynakları yaratıcı çözümler sunmaktadır. Yapay ışık kaynaklarının kullanımı ile yetersiz ya da düzensiz aydınlanma rejimine sahip bölgelerde bitki gelişimi desteklenmektedir. Gelişen teknolojiler ile daha düşük enerji kullanarak yüksek etkinlikte bitki gelişimi sağlanabilmektedir. Bu anlamda LED ışıkların gelişimi, bitkisel üretimde yapay ışık kaynakları konusunda bir sıçramadır. Doğrudan bitkinin ihtiyacını duyduğu dalga boyu aralığı ile kaynaktan ışınma yapılması, düşük enerji kullanımı, uzun kullanım ömrü ve yüksek verim ile cazip bir ışık kaynağıdır. Fotosentez tepkimeleri sürecinde yer alan reseptörler ve ışık enerjisi arasındaki ilişkilere bağlı olarak bitkinin ışık ile ilişkisine dair çıkarımlar yapmak mümkündür. Bu yöndeki çalışmalar yapay ışık kaynakları kullanımı konusunda eşsiz ipuçları vermektedir. Işık kaynağının ve yayılan ışığın niteliği

ışık kaynağında harcanan enerjiye karşılık bitkiden görülen tepkilere açıklık getirmektedir. Işık kaynağının bitki üzerindeki tepkileri, yapay ışık kaynağı kullanımına dair potansiyelleri ortaya sunmaktadır. Bu teknolojinin başarılı uygulamaları bitkisel üretimde daha yüksek insan kontrolü sunmaktadır.

KAYNAKÇA

- Al-Khatib, K., Gary, P., 1989. Enhancement of thermal injury to photosynthesis in wheat plants and thylakoids by high light intensity. *Plant Physiology* 90(3):1041-1048.
- Bean, R., Spiros, K., 2011. *Light Sources Technologies and Applications*. Taylor & Francis.
- Benedetti, M., Vecchi, V., Barera, S., Dall'Osto, L., 2018. Biomass from microalgae: the potential of domestication towards sustainable biofactories. *Microbial Cell Factories* 17.
- Blanchard, M., Runkle, E., 2010. Intermittent light from a rotating high-pressure sodium lamp promotes flowering of long-day plants. *HortScience* 45:236-241.
- Blankenship, R.E., 1992. Origin and early evolution of photosynthesis. *Photosynth Res.* 33:91-111.
- Bliznikas, Z., Arturas, Z., Samuoliene, G., Viršilė, A., Brazaitytė, A., Jankauskienė, J., Duchovskis, P., Novickovas, A., 2012. Effect of supplementary pre-harvest LED lighting on the antioxidant and nutritional properties of green vegetables. *Acta Horticulturae* 939:85-91.
- Pinheiro, C., M.M. Chaves, 2011. Photosynthesis and drought: can we make metabolic connections from available data. *Journal of Experimental Botany* 62:869-882.
- Christie, J.M., 2007. Phototropin blue-light receptors. *Annu Rev Plant Biol.* 58:21-45.
- Çağlayan, N., Ertekin, C., 2016. Sebze üretiminde ilave LED aydınlatma uygulamaları. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi* 12(1):27-35.
- David, M., 1973. Gates, lighting for plant growth. *BioScience* July 1973, 23(7):450.
- Demotes-Mainard, S., Péron, T., Corot, A., Bertheloot, J., Gourrierc, J., Travier, S., Crespel, L., Morel, P., Huché-Thélier, L., Boumaza, R., Vian, A., Guérin, V., Leduc, N., Sakr, S., 2015. Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture. *Environmental and Experimental Botany* 121:4-21.
- Despommier, D., 2011. The vertical farm: controlled environment agriculture carried out in tall buildings would create greater food safety and security for large urban populations. *Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit* 6:233-236.
- Dutta, G.S., Agarwal, A., 2017. Artificial lighting system for plant growth and development: chronological advancement, working principles, and comparative assessment. In: Dutta Gupta S. (eds) *Light Emitting Diodes for Agriculture*. Springer, Singapore, 334p.
- Givnish, T.J., Montgomery, R.A., Goldstein, G., 2004. Adaptive radiation of photosynthetic physiology in the Hawaiian lobeliads: light regimes, static light responses and whole-plant compensation points. *American J. of Botany* 91.
- Gül, A., 2008. *Topraksız tarım*. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Hasad Yayıncılık, İzmir, 146s.
- Hemming, S., 2009. Use of natural and artificial light in horticulture interaction of plant and technology. *Acta Horticulturae*. 907(1):25-35.
- Heo, J.W., Lee, C.W., Paek, K.Y., 2006. Influence of mixed LED radiation on the growth of annual plants. *J. Plant Biol.* 49:286-290.
- Hogewoning, S.W., Trouwborst, G., Maljaars, H., Poorter, H., Ieperen, W.V., Harbinson, J., 2010. Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. *Journal of Botany* 61:3117.
- Johkan, M., Shoji, K., Goto, F., Hashida, S., Yoshihara, T., 2010. Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce. *HortScience: a Publication of the American Society for Horticultural Science* 45(12):1809-1814.
- Kacar, B., Katkat, A.V., Öztürk, Ş., 2002. Bitki fizyolojisi. *Uludağ Üniversitesi Güçlendirme Vakfı, Bursa*, 230s.
- Kasajima, S., Inoue, N., Mahmud, R., Kato, M., 2008. Developmental responses of Wheat cv. Norin 61 to Fluence rate of green light. *Plant Production Science* 11:76-81.
- Kianianmomeni, A., 2015. Cell-type specific photoreceptors and light signaling pathways in the multicellular green alga *Volvox carteri* and their potential role in cellular differentiation. *Plant Signaling Behavior* 10(4):e1010935.
- Kim, H., Goins, G., Wheeler, R., Sager, J., 2005. Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red- and blue-light-emitting diodes. *HortScience: a Publication of the American Society for Horticultural Science* 39(7):1617-22.
- Koç, C., Vatandaş, M., Koç, A.B., 2009. Led aydınlatma teknolojisi ve tarımda kullanımı. 25.

- Tarımsal Mekanizasyon Ulusal Kongresi, 01-03 Ekim, Isparta, s:63-70.
25. Kopsell, D.A., Sams, C.E., 2013. Increases in shoot tissue pigments, Glucosinolates, and mineral elements in sprouting broccoli after exposure to short-duration blue light from light emitting diode. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 138(1):31-37.
 26. Lee, D., Ko, Y., Shen, I., Chao, C., 2011. Effect of light source, ambient illumination, character size and interline spacing on visual performance and visual fatigue with electronic paper displays. *32(1):1-7.*
 27. Li, Q., Kubota, C., 2009. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. *J. Environmental and Experimental Botany* 67.
 28. Losos, J.B., Mason, K.A., Singer, S.R., Raven, P.H., Johnson, G.B., 2011. *Biology*. McGraw-Hill Higher Education, Missouri 1239p.
 29. Macedo, A.F., Marcos, V.L., Tavares, E.S., Lage, C.L.S., Esquibel, M.A., 2011. The effect of light quality on leaf production and development of *in vitro* cultured plants of *Alternanthera brasiliensis* Kuntze. *J. Env. and Experimental Botany* 70.
 30. Massa, G., Drive, A., Lafayette, W., Kim, H., Wheeler, R., Mitchell, C., 2008. Plant Productivity in Response to LED Lighting. *Space Life Sciences* 43(1):1951-1956.
 31. McKay, M., Hesse, B., Mulder, J., 1982. The influence of illumination levels of day length extension on yield of winter-grown gladioli in Queensland. *Scientia Horticulturae* 17:277-288.
 32. Morais, H., Medri, M.E., Marur, C.J., Caramori, P.H., Ribeiro, A.M., Gomes, J.C., 2004. Modifications on leaf anatomy of *Coffea arabica* caused by shade of Pigeonpea (*Cajanus cajan*). *Braz. Arch. Biol. Technol. J.* 47:863.
 33. Naoya, F., Mitsuko, F., Yoshitaka, O., Sadanori, S., Shigeo, N., Hiroshi, E., 2008. Directional blue light irradiation triggers epidermal cell elongation of abaxial side resulting in inhibition of leaf *Epinastyn* *geranium* under red light condition. *J. Sci. Hortic.* 115:182.
 34. Ohashi, K., Takase, M., Kon, N., Fujiwara, K., Kurata, K., 2007. Effect of light quality on growth and vegetable quality in leaf lettuce, spinach and Komatsuna. *Environment Control in Biology* 45:189
 35. Pennisi, G., Orsini, F., Blasioli, S., Cellini, A., Crepaldi, A., Braschi, I., Spinelli, F., Nicola, S., Fernandez, J., Stanghellini, C., Gianquinto, G., Marcelis, L.F.M., 2019. Resource use efficiency of indoor lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivation as affected by red: blue ratio provided by Led lighting, *Frontiers in Plant Science*, 10.
 36. Shin, K., Hosakatte, N., Heo, J., Hahn, E., Paek, K., 2008. The effect of light quality on the growth and development of *in vitro* cultured *Doritaenopsis* plants. *Acta Physiologiae Plantarum* 30:339-343.
 37. Simpson, C., Starr, J., Church, G., Burow, M., Paterson, A., 2003. Registration of ‘NemaTAM’ peanut. *Crop Science* 43:1561-1561.
 38. Steinger, T., Roy, B.A., Stanton, M.L., 2003. Evolution in stressful environments 2: adaptive value and costs of plasticity in response to low light in *Sinapis arvensis*. *Journal of Evolutionary Biology* 16(1):313-323.
 39. Terashima, I., Fujita, T., Inoue, T., Chow, W., Oguchi, R., 2009. Green light drives leaf photosynthesis more efficiently than red light in strong white light: revisiting the enigmatic question of why leaves are green. *Plant Cell Physiology* 50(4):684.
 40. Wentworth, M., Murchie, E.H., Gray, J.E., Villegas, D., Pastenes, C., Pinto, M., Horton, P., 2006. Differential adaptation of two varieties of common bean to abiotic stress. *Journal of Experimental Botany* 57:709.
 41. Yanagi, T., Okamoto, K., 1997. Utilization of super-bright light emitting diodes as an artificial light source for plant growth. *Acta Horticulturae* 418:223-228.
 42. Yeh, N., Chung, J., 2009. High-brightness LEDs energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier 13(8):2175-2180.
 43. Zhang, S., Ma, K., Chen, L., 2003. Response of photosynthetic plasticity of *Paeonia suffruticosa* to changed light environments. *J. Environmental and Experimental Botany* 49(2):121-133.
 44. Zhu, X.G., Long, S.P., Ort, D.R., 2008. What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass? *Current Opinion in Biotechnology* 19(2):153.