

Bazı Tarımsal Ürünlerde LED Aydınlatma Kullanımı

Elif YAZAR COŞKUN^{1*}, İlker Hüseyin ÇELEN²

¹Ziraat Yük. Müh., Tekirdağ Bağcılık Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Tekirdağ; ORCID: 0009-0009-3680-3386

²Prof. Dr., Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tekirdağ; ORCID: 0000-0003-1652-379X

Geliş Tarihi / Received: 22 Haziran 2023

Kabul Tarihi / Accepted: 01 Mart 2024

ÖZ

Her geçen gün dünya nüfusu hızla artmakta ve buna bağlı olarak gıda ihtiyacı da her geçen gün büyümektedir. Tarım alanlarının gündün günden azaldığı göz önüne alındığında, yeni üretim tekniklerinin kullanılması ve beraberinde üretim artışının sağlanması bir gereklilik olmuştur. Son yıllarda bu kapsamda kapalı alanlarda tarım ya da dikey tarım uygulamaları oldukça fazla karşımıza çıkmaktadır. Bu uygulamalarda kullanılan bir diğer yenilik, yapay aydınlatma kaynaklarının kullanımınıdır.

Bitkilerin büyüme ve gelişmelerinde en önemli çevresel faktörlerden birisi (çimlenmeden sonraki süreçte) ışıktır. Güneş ışığı en önemli aydınlatma kaynağıdır. Bitkisel üretimde yapay ışık kaynaklarının kullanımı güneş ışığını desteklemek amacıyla kullanılabildiği gibi, güneş ışığı olmayan yetiştirme kabinlerinde de üretimi desteklemek için kullanılabilmektedir.

LED aydınlatmalar günümüzde ışık ve enerji verimliliğinin yüksek olması, kullanım ömrünün uzun olması, ısı oluşumunun düşük olması gibi özellikleri ile ek aydınlatmada bitkiler için önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada gelecekte daha fazla kullanılmak zorunda olacağımızı düşündüğümüz ve günümüz sebze tarımında kullanımı dikkat çekici etkiye sahip yapay ışık kaynakları ve bu alanda yapılan çalışmaların sonuçları değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: LED, ışık spektrumu, yapay aydınlatma, tarımsal üretim

Use of LED Lighting in Some Agricultural Crops

ABSTRACT

The global population is rapidly increasing every day, consequently leading to a continuous growth in food demand. Considering the gradual reduction of agricultural areas, there arises a necessity for the adoption of new production techniques to ensure an increase in output. In recent years, within this framework, practices such as indoor farming or vertical farming have become prevalent. Another innovation commonly employed in these applications is the use of artificial lighting sources.

One of the most crucial environmental factors influencing the growth and development of plants (after germination) is light. Sunlight serves as the primary source of illumination. In plant production, artificial light sources can be used to complement sunlight, either to support natural light or in enclosed cultivation chambers to support production where sunlight is not available.

LED lighting plays a significant role in supplementary lighting for plants today due to its high light and energy efficiency, long lifespan and low heat generation. In this study, artificial light sources, which we anticipate will be increasingly essential in the future and have a noteworthy impact on current vegetable agriculture, were evaluated alongside the results of research conducted in this field.

Keywords: LED, light spectrum, artificial lighting, agriculture production

GİRİŞ

Dünyada gıda talebinin sürekli artışı, kırsal bölgelerde yaşayan insan oranının azalışı ve tarımsal üretim alanlarının daralmasıyla beraber, insan emeğinin yoğun olarak kullanıldığı tarımsal işlerde geleneksel yöntemlerden modern yöntemlere geçiş zorunlu hale gelmektedir. Birleşmiş Milletler (2019)

2050 yılında dünya nüfusunun %68'inin kentlerde yaşayacağını öngörmektedir [83]. Son zamanlarda, giderek daha fazla insan kentsel tarım veya dikey tarımla ilgilenmektedir. Bu noktada öne çıkan detay; bitki büyümesi için gerekenlerin, kapalı alanlarda nasıl tamamlanacağı sorusudur. Işık, bitki büyümesi ile ilgili en önemli çevresel değişkendir. Işık sadece enerji kaynağı olarak değil, bununla birlikte bitkilerin

*Sorumlu yazar / Corresponding author: elif.yazar@tarimorman.gov.tr

büyüme, gelişme ve çeşitli metabolik olaylarında da etkilidir [74]. Güneş ışığının yetersiz olduğu ya da ek aydınlatmaya ihtiyaç duyulan yerlerde yapay aydınlatma kaynakları kullanımı önem kazanmıştır.

LED "Light Emitting Diode" Türkçe'ye "Işık Yayan Diyot" ya da "Işıklı Diyot" şeklinde çevrilebilmiş olsa bile LED kısaltması daha yaygın olarak kullanılmaktadır. LED aydınlatma, bahçe tarımında ek veya tek aydınlatma kaynağı olarak büyük bir potansiyele sahiptir. LED'lerin küçük boyutları ve mükemmel etkinlikleri gibi teknik özelliklerinden dolayı, çok yoğun bitki taç hacimlerine göre tasarımı mümkündür, bu da kapalı alanlarda yetiştiriciliğin verimini büyük ölçüde arttırmaktadır. LED aydınlatmalar sahip olduğu avantajlar nedeniyle, enerjinin maliyetli olduğu yerler veya yapılar için ve de kapalı alanlarda yapılan üretimlerde son derece önemlidir. Bununla birlikte, önem arz eden bir diğer konu ise, farklı bitkilerin ışık spektrumunun farklı dalga boylarına ve yoğunluklarına nasıl tepki verdiğinin daha iyi anlaşılmasıdır. Günümüze kadar çok sınırlı sayıda bu bilgiler edinilmeye çalışıldığı düşünüldüğünde söz konusu bilgilerin anlaşılması için çok geniş bir araştırma alanı konusu ve konusu alanı olduğu ortaya çıkmaktadır. Kontrollü yetiştirme ortamlarının optimizasyonu, bahçede üretilen ürünlerin verimi, kalitesi ve maliyeti üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olabilir [16].

Aydınlatma Neden Gerekli?

Sebze tarımının ana hedefi, minimum maliyetle yüksek kaliteli ve verimli sebze ürünleri elde etmektir [75]. Bu nedenle, bahçe bitkileri yetiştiriciliğinin amaçlarına uymayan koşullar altında teknoloji yardımıyla bitkinin doğal fizyolojik ihtiyaçlarına göre daha iyi bir yetiştiricilik yapılabilir. Bitkiler doğal habitatlarda, güneş spektrumu ve yoğunluğundaki değişimlere uygun olarak fizyolojilerini adapte etmişlerdir. Genel olarak, çeşitli ortamlarda hayatta kalma ve gelişme yeteneğine sahip olan bitkiler yapay aydınlatma koşullarına uyum sağlayabilirler.

Bahçe bitkilerinde ek aydınlatma, bitki büyümesini ve gelişimini artırmak amacıyla uzun bir süredir kullanılmaktadır [78]. Aslında bitkiler için tasarlanmayan bu teknoloji aydınlatma endüstrisinden alınmıştır [46]. Bitki yetiştirme ve araştırma için akkor, floresan, metal halojenür ve yüksek yoğunluklu deşarj lambaları gibi çeşitli lamba teknolojileri kullanılmıştır. Her bir teknoloji uygulaması, farklı bahçe bitkilerinde fotoperiyot

kontrolü, bitki morfolojisini değiştirmek ve fotosentezi geliştirmek için optimize edilmiştir.

Bahçe tarımında aydınlatma teknik ve bilginin ilerlemesiyle LED'ler gündeme oturmuştur. Bugün LED'ler, hemen hemen her iç ve dış aydınlatma uygulamalarında geleneksel lambaların yerini almaktadır. Bitki aydınlatması için LED uygulamasına ilişkin ilk araştırmalar 1990'ların başında başlamıştır. Ancak, farklı bitki türlerinden elde edilen sonuçların da farklı olması nedeniyle, genel bir LED aydınlatma tekniği söylemek mümkün olmamaktadır. Yetiştiricinin hedefleri ile birlikte farklı gelişim aşamalarındaki farklı bahçe bitkileri için ideal olan LED aydınlatma parametreleri değişkenlik göstermektedir.

Yenilikçi LED sistemleri, aydınlatma kontrolüne tamamen yeni bir boyut katmaktadır. Spektral çıktının ve ışık yoğunluğunun (fotosentetik foton akısı-PPF) kontrol edilebilme yeteneği LED'lerin önemli bir avantajıdır [46]. LED'ler görünebilir ışık tayfının belirli bir bölümünde ışık yayarlar. Başka bir deyişle tek renk ışık üretirler. Bunun yanında LED'in doğru uygulama için işlevselliği, özel fotobiyolojik, fizyolojik ve teknoloji alanındaki elde edilen bilgilere bağlıdır. Örneğin, istenilen bitki özelliklerini elde edebilmek için dar spektrumlu LED'lerin kombinasyonu uygulanmalıdır [45]. Bu nedenle, bahçe tarımında LED uygulamaları, bitki fotomorfogenezi bilgisi ile yakından bağlantılıdır. LED'lerin piyasaya sürülmesi, ışık parametrelerini uyarlayarak bitki büyümesini, gelişimini ve metabolizmasını kontrol etme imkânı sunar [11, 48].

Bitkilerde Yapay Aydınlatmanın Etkisi Nedir?

Bitki yetiştiriciliğinde LED uygulamalarına ilişkin ilk yapılan çalışmalarda uzay araştırmaları için bitki yetiştirme sistemleri geliştirmeye odaklanılmıştır [44]. Bu çalışmalarda, yalnızca kırmızı LED'ler (~660 nm) bitki gereksinimlerini karşılamaya yetecek bir fotosentetik foton akı çıkışına sahip ışık kaynağı olarak kullanılmışlardır. Ispanak, turp, patates [82] ve buğday [18] ile yapılan ilk denemelerin sonuçları, normal büyüme ve fotosentez için mavi ışığa ihtiyaç olduğunu ortaya koymuştur. Spektrum daha sonra mavi floresan ışıklarla zenginleştirilmiştir. [82]. LED'ler üzerine kapsamlı araştırmalar, yüksek güçlü mavi LED'lerin geliştirilmesiyle hız kazanmıştır. Birçok çalışma, farklı oranlardaki kırmızı ve mavi ışıkların spektral kombinasyonunun, çeşitli bitkilerin sera koşullarında yetiştirilmesi için yeterince verimli olduğunu onaylamıştır [29, 47]. Kırmızı ve mavi LED'lerin kullanımı, birincil bitki pigmentleri (klorofiller) tarafından verimli bir şekilde absorbe

edildiğinden, üreticilerin öncelikli seçimi olmuştur [56]. Kırmızı ve mavi ışıkların kombinasyonunun, diğer renklere kıyasla en yüksek foton verimini sağladıkları belirlenmiştir [51].

Örtüaltı tarımı, çevresel parametre (sıcaklık, ışık vb.) kontrolünün ve ileri teknoloji (hidroponik, otomasyon) olanaklarının yoğun olarak kullanıldığı tarım sistemlerinden biridir [35]. Bununla birlikte iklim değişikliği etkisi ve yanlış teknikler ile yüksek girdi maliyetlerinin oluşması seracılık sektörünün gelişmesini olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle yeni teknolojilerin ve gelişmiş yetiştiricilik tekniklerinin benimsenmesi, rekabetçi bir küresel ortamda başarılı üretim yapılması için gerekliliktir. Seralarda mevsimi dışında yapılan yetiştiriciliğin, ışık gereksinimini tamamlamak amacıyla yapay aydınlatma kaynaklarının kullanımının önemi gün geçtikçe artmaktadır. Tamamlayıcı yapay aydınlatma uygulamalarında, uygun bir lamba ve ışıklık seçiminin yanı sıra, üretilen ışının bitkilerin en fazla yararlanabileceği şartlarda verilmesi, işlemin başarısını artıracaktır.

Paucek ve ark. [60], İtalya'da hidroponik bir serada yaptığı çalışmada, ilkbahar ve yaz mevsiminde yüksek telli terbiye sisteminde yetiştirilen domateslerin (*Solanum lycopersicum* L. cv. 'Siranzo') vejetatif gelişimi, meyve büyümesi, verimi ve meyve kalitesi üzerindeki ek LED aydınlatmanın etkilerini ele almıştır. Bitkiler ya doğal güneş radyasyonu (kontrol) altında ya da tamamlayıcı LED ek aydınlatması eklenerek büyütülmüştür. Çalışma sonucunda ek LED iç aydınlatma uygulaması, meyve ağırlığı, boyutu ve verimi artırmıştır. Hasatta çözünebilir kuru madde içeriği ve meyve rengi üzerinde herhangi bir etki gözlenmezken, ek LED aydınlatması olgunlaşmayı ilbaharda bir hafta, yazın ise iki hafta hızlandırmış ve bu da kontrol uygulamasına kıyasla kümülatif üretkenlikte %16 artışa neden olmuştur.

Fesleğen (*Ocimum basilicum* L.) bitkisi ile yapılan bir çalışmada hiper kırmızı ve koyu mavi LED ışık kombinasyonları arasında herhangi bir fark görülmemekle birlikte, çeşitli LED ışık kombinasyonları uygulanmasının gün ışığına göre genel olarak fesleğenin çimlenmesi ve büyümesi için elverişli olduğu görülmüştür (örn. boy: +%30, toplam yaş ağırlık: +%50) [2].

Dieleman ve ark. [14], yaptığı çalışmada, ek aydınlatma spektrumuna uzak kırmızı ışığın dâhil edilmesinin patlıcan meyvesi yaş ve kuru madde üretimini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Sürdürülebilir bir sera üretimi için LED aydınlatma teknolojisi yetiştiricilik stratejilerinin tasarımında çok önemli bir unsurdur. LED aydınlatma patajonler,

haşereler ve bitkinin doğal düşmanları üzerine farklı etkilere sahiptir. Spektruma uzak kırmızı ışık eklemek, konukçu bitkinin *Botrytis*'e direncini azaltmış, ancak külleme direncini artırmıştır. Ortaya çıkan sonuçlar, bitkilerde meydana gelen başlıca patojenlere ve zararlılara bağlı olarak, bitkiler için LED aydınlatma stratejilerinin geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

LED lambaların, bitki verimini ve kalitesini artırmak için bahçe tarımında geniş çapta uygulanmasına rağmen, doğal ışıkla karşılaştırıldığında LED spektrumunda uzak kırmızı ışığın bulunmaması gibi bir dezavantajlı duruma sahiptirler. Domates, kırmızıbiber, hıyar, kabak, karpuz ve su kabağında ek uzak kırmızıyla zenginleştirilmiş LED ışıkların fidelerin büyümesi üzerindeki etkilerini bulmayı amaçlayan bir çalışmada ele alınmıştır. Uygulamalar, 5:0, 5:1, 5:2 ve 5:3 oranlarında soğuk beyaz LED: uzak kırmızı LED şeklinde yapılmıştır. Uzak kırmızıyla zenginleştirilmiş aydınlatmanın bitki büyümesini ve morfolojisini etkilediğini, ancak yanıtların ışık yoğunluğuna ve bitki türlerine bağlı olarak büyük ölçüde değişebileceği gösterilmiştir. Domates ve kırmızıbiber fidelerinde hipokotil uzunluğu dâhil olmak üzere büyüme, aktif fitokromun (Pfr) toplam fitokroma (Pfr+Pr) oranı olarak tanımlanan fitokrom fotostatik durumu (PSS), ışık yoğunluğu ve kalitesine gövde uzantısı ve uzama tepkilerini ölçmek için kullanılmıştır. 0,70'den 0,85'e kadar olan PSS (the phytochrome photostationary state) ile ifade edilen "Pr fitokromlarının Pr+Pfr fitokromlarının toplamına oranı" değeri, bitkinin sürgün uzunlukları arasında negatif doğrusal bir korelasyon göstermiştir. Bununla birlikte, salatalık veya karpuz için PSS ile büyüme veya hipokotil uzunluğu arasında net bir ilişki yoktu. Bu nedenle, her bitki türü için uygun uzak kırmızı ışık yoğunluklarının seçiminde dikkatli bir değerlendirme yapılmalıdır. İstenen bitki büyümesi ve morfolojisini elde etmek için LED'lerde uzak kırmızıyla zenginleştirilmiş ek aydınlatma uygulaması yapılmalıdır [28].

Bugbee [6] yaptığı çalışmada, kırmızı ve turuncu ışık fotonlarının en verimli olduğunu, yeşil fotonların ise bunlara kıyasla oldukça düşük verimliliğe sahip olduğunu göstermiştir. LED'lerin en çok tartışılan avantajlarından biri, yeşil ve sarı gibi verimsiz renkler için enerji israfını önleyerek, yalnızca fizyolojik olarak verimli ışık dalga boylarını seçerek aydınlatma spektrumlarını birleştirme potansiyelidir. Bununla birlikte, kısa bir zaman aralığında, düşük fotosentetik foton akı yoğunluğunda tek yapraklardan fotosentetik tepki eğrileri geliştirilmiştir. Işık verimliliği incelenirken son yıllarda tek bir yaprağın ışığa tepkisi

ile değil, farklı taç katmanları içinde ışık dağılımı ile tüm bitki örtüsünün tepkisinin dikkate alınması üzerinde durulmuştur. Bu, bitki büyümesi ve gelişmesi için geniş bir ışık spektrumunun önemini göstermektedir [69].

Bitkiler ışığı sahip olduğu farklı pigmentler sayesinde toplarlar örneğin ışık toplama yeteneğine sahip olan fotosentetik klorofil pigmentleri yanında, antosiyaninler ve karotenoidler gibi diğer bitki pigmentleri de bu özelliğe sahiptirler. Tüm bu bitki pigmentlerinin farklı absorpsiyon spektrumları vardır. Bu da bitkilerin geniş kompozit ışık spektrumunu absorbe etmesine imkân veren bir özelliktir [56].

Işık parametreleri, gen ekspresyonu, fizyoloji, morfoloji ve metabolizmayı yönlendiren süreçlerde sinyaller olarak da işlev görür.

Ouzounis ve ark. [56] çalışmalarında, ışığa karşı bitkinin tepkisi, farklı fotoreseptörlerin eylemleriyle saptanmıştır. Fitokromlar, fototropinler, kriptokromlar, UVR8 sensörlerinin sinyal yolları, bitkinin gelişimsel ve fotosentetik durumuna ince ayar yapmak için entegre edilmiştir. Sinyal ağları (fotoreseptörler ve fotosentetik) arasındaki sinerjinin yanında bireysel bitki tepkilerini anlamak, ürün büyümesinin düzenlenmesi için LED ışık programlarının seçimine ve zamanlamasına yardımcı olur [63].

Özelleştirilmiş LED armatürler tarafından belirli ışık algılama yollarının seçici aktivasyonu, yetiştiricilerin tesis üretkenliğini, kalitesini ve üretim zamanlamasını kontrol etmesine olanak tanır. Carvalho ve Folta [7] kontrol edilebilir çevresel parametreleri (ışık dâhil) uyarlayarak, bitki özelliklerini genetik potansiyel dâhilinde ayarlamanın ve bitki verimi, gelişimi veya metabolizmasında istenen değişiklikleri sağlamanın mümkün olduğunu belirtmiştir.

LED Lamba mı? Yüksek Basınçlı Sodyum Lamba mı?

Enerji giderek daha değerli bir meta haline gelirken, enerji kayıplarını azaltma arzusu güçlenmektedir. Geleneksel ışık kaynaklarının yaydıkları dalga boylarının büyük bir kısmı PAR (Photosynthetically Active Radiation) eğrisinin dışında yer almaktadır. Bu durum, geleneksel ışık kaynaklarının bitkilerin gelişiminde LED'lere göre daha az verimli olduklarını göstermektedir. Diğer bir ifadeyle, LED'ler tükettikleri enerjinin neredeyse tamamını fotosentez için gerekli PAR bölgesindeki dalga boylarında yaymaktadırlar [33]. LED ışıklarının sahip olduğu kontrol esnekliği, enerji

kayıplarını büyük oranda azaltması ve kontrollü bitki büyümesinin kombinasyonuna izin vermesi gibi sağlamış olduğu faydalar nedeni ile kullanım alanı oldukça genişlemiştir [16].

Yüksek basınçlı sodyum (HPS) lambalar, yüksek basınçlı cıva lambalar ve floresan lambalar 1990'larda kullanılan ana ışık kaynaklarından bazı örneklerdir [55]. Yüksek basınçlı sodyum lambaları, kuzey enlemlerindeki seralarda ana ışık kaynağı olarak kullanılmıştır. Yaygın olarak kullanılmalarının nedenleri arasında, düşük maliyetli olmaları, yüksek fotosentetik olarak aktif radyasyon emisyonuna sahip olmaları, uzun kullanım ömrü ve yüksek elektrik verimliliği gibi özellikleri gösterebilir. Bununla birlikte, ağırlıklı olarak elektromanyetik spektrumun sarı-yeşil ve kıvılotesi bölgesinde bulunan, düşük mavi ışık emisyonu ve kıvıloteden uzak kıvıloteye oranı olan spektral emisyonunun kalitesizliği yüksek basınçlı sodyum lambaların aydınlatmasının ana dezavantajlı yönlerini oluşturmaktadır [62].

Günümüzde, yüksek basınçlı sodyum lambaların potansiyel bir alternatifi olarak LED aydınlatma geliştirilmiştir. LED'lerin bitki aydınlatma uygulamalarında kullanılması, bitki büyümesi ve gelişiminin optimizasyonu için yeni fırsatlar sunmaktadır. İstenilen optimizasyon, sağlanan ışığın miktarını, periyodikliğini ve spektrumunu kontrol ederek başarılabilir. Böyle bir optimizasyon, her ürün türünün özel ihtiyaçlarına ve üretim koşullarına göre uyarlanabilir [61]. HPS ve LED teknolojileri bahçe bitkileri aydınlatmasında birbirlerinin alternatifi olmaktan ziyade birbirlerini tamamlayıcı özelliktedirler. Nelson ve Bugbee [51], geniş sıralara sahip daha küçük seralarda, LED armatürlerde tipik olarak bulunan daha odaklı tasarım, bitki yapraklarına radyasyon transferini en üst düzeye çıkarabilir sonucuna varmıştır.

Aydınlatmada teorik maksimum verim, tüm giriş enerjisinin fotosentetik fotonlarda enerjiye dönüştürüldüğünde ortaya çıkmaktadır. Mavi LED'ler %93 verimli, fosforla dönüştürülmüş "beyazlar" %76 verimli ve kıvıloteli LED'ler %81 verimli olabilmektedir [38]. Elektrik maliyetleriyle karşılaştırıldığında, analizleri uzun vadeli bakım maliyetlerinin her iki teknoloji için de düşük olduğunu göstermiştir. Ayrıca LED armatürleri 2,2-2,4 µmol/J'lük verimliliklere ulaşırken, HPS lambaları (1000 W) 2,1 µmol/J'e kadar ulaşmaktadır. Bu da LED'lerin ticari ölçekte kullanılabileceğini göstermiştir.

LED aydınlatma, aralıklı aydınlatma sistemi, ara aydınlatma veya kapalı sistem bahçe tarımında taç aydınlatma gibi uygulama alanlarında zaten vazgeçilmezdirler. LED aydınlatma altında kontrollü

çevre ile ekim-dikim, yakın gelecekte tarımın yeni yüzü olarak öngörülmektedir [31].

Taç aydınlatması için LED teknolojisinin uygulanması, genellikle yüksek basınçlı sodyum lambalarla yapılan aydınlatmaya göre önemli ölçüde düşük yaprak sıcaklıkları sağlamaktadır. Yakın zamanda yapılan bir analiz, en verimli ticari LED armatürlerinin foton etkinliğinin, elektrik girdisinin 1,7 µmol/J olduğunu ve en verimli HPS armatürlerinininkine eşit olduğunu göstermiştir. Bu teorik olarak fotosentetik foton başına aynı miktarda termal enerji ürettiğini göstermektedir. Bununla birlikte, LED'ler ısılarının çoğunu aydınlattıkları düzlemden uzaklaştırırken, HPS armatürleri aydınlattıkları düzleme doğru daha fazla ısı yaymaktadır [51].

Bitki yetiştiriciliğinde LED kullanımını engelleyen bir durum, farklı bitki türleri için optimal LED aydınlatma parametrelerinin olmamasıdır. Bu nedenle LED kullanımında doğru ve hedefe yönelik aydınlatmanın sağlanabilmesi için temel fotobiyolojik bilgiye sahip olunması gerekmektedir.

Kapalı Tarımsal Alanlarda LED Kullanımı

LED ışık kaynaklarının kullanımıyla, bitki büyümesine, gelişmesine ve metabolizmasına doğrudan etki edilebilmektedir. Ancak yapılan araştırma sonuçlarında gözlenen değişkenlik, farklı deney koşulları ve bitki çeşitliliğinden kaynaklanıyor olması nedeni ile elde edilen sonuçların birbirleri ile karşılaştırılmasını zorlaştırmaktadır.

Bunların yanında, monokromik ışığa bitkilerin verdikleri tepkiler de arka plan spektrumuna bağlıdır. Farklı ışık dalga boylarının ortaya çıkardığı etkiler, diğer farklı ışık dalga boyları ile birlikte uygulandığında değişiklik gösterebilmektedir. Bu nedenle, iklimlendirme odaları için optimize edilmiş aydınlatma stratejileri, sera koşullarında her zaman eşdeğer sonuçlar vermemektedir. Bir serada doğal gün ışığının düşük akışı bile, özellikle tayfi, miktarı ve fotoperiyodundaki varyasyonu, bitkiler üzerinde önemli bir fizyolojik etkiye sahiptir. Buna dayanarak seralarda ve kapalı ortam yetiştirme sistemlerinde aydınlatma koşulları ayrı ayrı optimize edilmesi gerekmektedir.

Seralardaki LED aydınlatma uygulamalarının genelinde, yüksek foton verimliliği ile kırmızı ve mavi dalga boylarının kombinasyonları seçilir. Kapalı bitki üretim alanlarında kırmızı/mavi veya kırmızı/beyaz kombinasyonları da uygulanabilir [52].

Kapalı ortamlarda önemli miktarlarda yeşil dalga boyları içeren yeşil veya beyaz ışık, bitkiler üzerinde olumlu fizyolojik etkiye sahip olup ortamlarda

bitkilerin görünümünü iyileştirmek için faydalıdır. Mavi ve kırmızı ışıkların kombinasyonu, insan gözü tarafından bitkilerin morumsu gri görüntüsü olarak algılanır. Bu durum bitki sağlığı ve yaralanmalarının görsel olarak değerlendirilmesini engeller. Küçük bir yeşil ışık akışı bu sorunu çözmek için yeterli olabilmektedir [44].

Cope ve Bugbee [10], sıcak, nötr ve soğuk beyaz LED'lerin (sırasıyla %11, %19 ve %28 mavi ışıkla) turp, soya fasulyesi ve buğdayın büyümesi ve gelişimi üzerindeki etkilerini değerlendirmişler; kırmızı, mavi ve yeşil dalga boylarını içeren beyaz LED'lerin kullanıcı dostu bir bitki aydınlatma kaynağı olarak nitelendirmişlerdir. Nötr ve sıcak beyaz LED'lere kıyasla elektriksel olarak daha verimli oldukları için soğuk beyaz LED'lerin tercih edilen ışık kaynağı olabileceği sonucuna varmışlardır. Ayrıca, soğuk beyaz LED'lerdeki yüksek mavi ışık yüzdesi, normal bitki büyümesi ve gelişmesi için mavi ışık gereksinimlerini karşıladığını, farklı büyüme aşamalarında soğuktan sıcak beyaz dalga boylarına geçebilme özelliğine sahip dinamik aydınlatmanın da bitki büyümesini desteklediğini belirlemişlerdir. Büyümenin ilk aşamalarında, soğuk beyaz LED'lerin spektrumundaki yüksek mavi ışık yüzdesi, kısa sağlam hipokotillerle sonuçlanmıştır. Daha sonraki gelişim aşamalarında, soğuk beyaz LED'ler sıcak LED'ler ile değiştirilebilir. Böylece ışık spektrumu yaprak genişlemesini destekleyecektir. Araştırmacılar büyümenin son aşamalarında aşırı gövde uzamasını önlemek için tekrar soğuk beyaz LED'ler kullanılmasını önermişlerdir.

Bitkiler, her yaprak tarafından alınan ışık miktarı yeterli olduğunda, gövde tacı boyunca ışınların eşit dağılımından yararlanır. Yüksek bitki yoğunluğuna sahip yüksek telli yetiştirme sisteminde, doğal veya yapay üstten aydınlatmaya bakılmaksızın ışığın çoğu yalnızca bitki örtüsünün üst kısmı tarafından yakalanabilir [21]. Taç içi aydınlatma (inter-lighting), bu sorunun üstesinden gelmek için yakın zamanda geliştirilmiş bir tamamlayıcı aydınlatma tekniğidir. Ek ışığın bir kısmının bitki gölgesine uygulanması, orta veya alt gölgelik kısımdan ışık dağılımını iyileştirebilir ve böylece ışık kullanım etkinliğini ve mahsul verimini artırabilir. HPS lambaların ampul sıcaklıklarının yüksek olması nedeniyle ara aydınlatma olarak kullanılmasına karşılık, LED'lerin düşük ısı emisyonu, onları potansiyel olarak ara aydınlatma için daha uygun ışık sistemleri haline getirir [22].

Kumar ve ark. [37] yaptığı çalışmada, bir veya iki sıra ara aydınlatma LED'lerinin eklenmesiyle mini salatalık veriminin, iç aydınlatma yapılmamasına

kıyasla %22,3 ve %30,8 arttığını bildirmiştir. Bununla birlikte, Hao ve ark. [22], ara aydınlatma kullanılarak mini hıyar veriminin sadece erken üretim döneminde arttığını ve geç üretim dönemine doğru kademeli olarak azaldığını ortaya koymuştur.

Domates üzerine yürütülen çalışmada gövde tacı LED ek aydınlatma kullanımının meyve kalitesi üzerinde olumsuz bir etkisi olmadığını gözlemlemiştir [15]. Yine hem taç içi aydınlatmanın hem de üstten aydınlatmanın, kontrole göre domateste verimi artırdığını gözlemlemiş, ancak bu iki tamamlayıcı ışık uygulaması arasında verimde önemli bir fark olmadığını ortaya koymuşlardır [20]. Ayrıca gövde tacı aydınlatma ile sağlanan daha yüksek ürün fotosentetik aktivitesi meyve verimini artırmamıştır [13]. Farklı kırmızı ışık ve mavi ışık oranlarını analiz etmiş ve domates meyve verimini artırmak için 5:1'lik bir optimal oran önermiştir.

Bitkilerin birincil veya ikincil metabolit birikimindeki ışık durum değişiklikleri, bitki bağışıklığı, hastalık gelişimi ve zararlılarla etkileşim durumları ile de ilişkilendirilebilir [74]. Ancak, bugüne kadar yalnızca belirli araştırma sonuçları üzerinde durulmuş olup [32] LED aydınlatma parametreleriyle bitki sağlığının ilişkilendirilmesi hala gelecekte üzerinde araştırma çalışması yürütülecek konular arasında yer almaktadır.

Yeşil Sebzeler İçin LED

Mikro yeşillikler, sebzelerin, tahılların veya tıbbi aromatik bitkilerin tohumlarından üretilen olgunlaşmamış yeşillikler olarak tanımlanan yeni bir özel ürün grubudur. Brazilya ve ark. [5], bu özel mahsullerin aydınlatma parametrelerine tepkisinin olgun bitkilerinkinden nispeten farklı olduğunu öne sürmektedir. Ancak, aydınlatmada mavi ışık birincil öneme sahiptir. Mavi LED dalga boylarının daha yüksek oranda uygulandığında Brassica mikro yeşilliklerindeki sürgün dokusu pigmentlerinde, glukosinolatlarda ve temel mineral elementlerde önemli artışlar olduğu belirlenmiştir [34]. Araştırmacılar ek mavi ışığın, mikro yeşilliklerin besin değerini [77] ve mineral içeriklerini [17] geliştirmek için stratejik olarak kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. İç mekân deneylerinde Brazilya ve ark. [5], sarı, turuncu, yeşil ve UV-A LED'lerle desteklenen ana kırmızı, mavi ve uzak kırmızı LED seti altında farklı mikro yeşil türleri yetiştirmişlerdir. Ek yeşil (520 nm) ve turuncu (622 nm) ışığın nitrat azalmasına neden olduğu, sarı (595 nm) ve UV-A'nın (366, 390 nm) büyüme parametreleri üzerinde önemsiz etkiye sahip olduğu, antioksidan bileşik birikimi için ise daha olumlu etki yaptıkları sonucuna

varmışlardır. Buna karşılık, Gerovac ve ark. [17], ışık kalitesinden bağımsız olarak, aydınlatma integrali 105'ten 315 mol/m²s'e yükseldikçe, alabaşlar, mizuna ve hardal mikro yeşillikleri için hipokotil uzunluğunun azaldığını ve kuru ağırlık yüzdesinin arttığını tespit etmişlerdir.

Sonbahar ve kış aylarında, kuzey enlemlerinde serada doğal ışık seviyesinin düşük olması sebebiyle ve tek ışık kaynağının yapay aydınlatma olduğu kapalı bitki üretim alanlarında ve ticari üretimde ek aydınlatma gereklidir. Marul büyümesi ve kalitesinde, düşük ışık yoğunluğu sınırlayıcı faktördür [9].

Hafif spektral bileşimin bitkide belirgin bir etkisi vardır. Carvalho ve Folta [7] yaptıkları çalışmalarında ek ışık kaynaklarından, bitki boyutu, renk, doku ve lezzetin etkilendiği gibi klorofiller, pigmentlerin (antosiyeninler, karotenoidler, askorbik asit ve şekerler gibi) ve metabolitlerin konsantrasyonlarının da etkilendiğini tespit etmişlerdir.

Kırmızı ışık genellikle aydınlatma spektrumunun temelidir ve bitki büyümesi ve fotosentez için tek kırmızı LED ışık oldukça önemlidir. Önceki çalışmalara göre, marul ve diğer yeşil sebzelerin yetiştirilmesinde kırmızı LED ~640 nm [64, 66] veya ~660 nm [47, 72, 80] yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle, hasattan önce kısa sürelerle spesifik kırmızı dalga boyu uygulandığında avantajlı olabilir [7]. Örneğin, bir serada doğal aydınlatmaya ek olarak üç günlük LED kırmızı ~640 nm dalga boyu, marulun antioksidan kapasitesini ve karbonhidrat içeriğini artırırken arzu edilmeyen nitrat içeriğini bastırmaktadır [68]. Kırmızı dalga boyları uygulandığında genel marul antioksidan aktivitesindeki artış çeşidine özgüdür. Yeşil yapraklı çeşitlerde, daha yüksek seviyelerde antioksidanlar içeren, bitkileri çevresel maruziyetten koruyan kırmızı yaprak tiplerine göre daha belirgindir.

Hasattan önce yapılan kırmızı 640 nm LED aydınlatması, yapraklı sebzelerin türüne göre farklı sonuçlar vermiştir. Dereotu ve maydanoz gibi bitkilerde, serada üç günlük kısa süreli kırmızı ışık uygulamaları sonucunda daha yüksek fenolik bileşikler, C vitamini, karbonhidrat birikimi görülmüştür. Hardal, ıspanak, roka ve yeşil soğan için nitrat azalması gözlenmezken, toplam antioksidan aktivitede artış ve birikmiş nitrat içeriğinde azalma gözlenmiştir [3]. Wanlai ve ark. [79], tek kırmızı ışığa kıyasla, kırmızı/mavi ışık kombinasyonunun, hasattan 2 gün önce sürekli olarak uygulanmasının nitratı azaltmada daha etkili olduğunu bildirmiştir.

Fitokromlar kırmızı veya uzak kırmızı radyasyondaki değişiklikleri algırlarlar [12] ve bitkilerdeki fotomorfogenetik süreçleri

etkileyebilirler. Uzak kırmızı ışık, kırmızı [39], kırmızı ve mavi LED'ler [40] veya soğuk beyaz floresan ışık [41] ile birlikte uygulandığında, marul büyüme özellikleri üzerinde belirgin etkisi sebebiyle biyokütle ve yaprak uzunluğunu artmıştır. Ancak klorofil, antosiyanin ve karotenoid konsantrasyonlarını olumsuz etkilemiştir.

Ek uzak kırmızı aydınlatma altında marul büyümesinin teşviki, artan yaprak alanının ve sonuç olarak iyileştirilmiş ışık yakalamasının etkisi ile elde edilmiştir [36]. Hidroponik olarak yetiştirilen marulda kırmızı ve mavi LED'lerle birlikte uygulanan uzak kırmızı ışık, gelişmiş mineral (K, Ca, Mg) alımına sebep olduğu belirlenmiştir.

Kırmızı ışık sebebiyle fotosentez artış gösterse de büyümeyi iyileştirmek ve bitkinin gölgede kalmasına karşı gösterdiği tepkiyi en aza indirmek için bir miktar mavi ışığa genellikle ihtiyaç duyulmaktadır [69]. Kriptokrom sistemini aktive eden mavi ışık, klorofil ve karotenoid absorpsiyon spektrumlarıyla eşleşir. Ayrıca yeşil sebze morfolojisi, büyümesi, fotosentez ve antioksidan sistem tepkisine önemli derecede etki eder [54]. Artan mavi ışık fraksiyonlarının büyüme üzerindeki olumlu etkileri, artan yaprak klorofil seviyeleri ve fotosentez oranlarına karşılık gelmektedir [7]. Mavi LED'ler (440-476 nm dalga boyuna sahip) kırmızı LED'lerle ya da tek başına kullanıldığında, marulda [29, 43], Çin lahanasında [42], ıspanakta [53] ve kişnişte [50] yaprak alanı genişlemesini ve biyokütle birikimini uyarır.

Bununla birlikte, mavi ışığın bitki fotosentetik üretkenliği üzerindeki etkisi, fotosentez üzerindeki doğrudan etkileri ile değil, birincil olarak radyasyon yakalamadaki değişikliklerle belirlenmektedir [69]. Mavi fotonların oranı %5-10'u aştığında, bitki büyümesi azalma eğilimindedir. Spektrumdaki yüksek mavi ışık seviyeleri, hücre bölünmesini, hücre genişlemesini ve yaprak alanı büyümesini engellemektedir. Bu durum foton yakalamasının azalmasına ve büyümenin azalmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte, mavi ışık, radyasyon yoğunluğu ile etkileşime girebilir. Etkileri daha yüksek fotosentetik akı yoğunluklarında daha fazla olmaktadır [69]. Türlerin mavi ışığa duyarlılığı çok değişkendir ve bitkinin gelişim aşamasına göre etkileri değişkenlik gösterebilir [6].

Mavi LED ışık, yeşil sebzelerin besin kalitesinin iyileştirilmesinde de faydalıdır. Nitrat içeriğini azaltır, antioksidan miktarını değiştirir, fenolik bileşikler artırır [29, 70]. Hatta askorbik asit [81], karotenoidler [41], antosiyanin içerikleri ve yaprak renklenmesi etkilenmektedir [47]. Kırmızı marul çeşitlerinde pigmentasyonu artırmak için birkaç gün

süren üretim sonu uygulamalarının ek mavi ışıkla uygulanması ile desteklenmesi yeterlidir [59, 52]. Çalışmalar kırmızı renkli çeşitlerin mavi aydınlatma koşullarına yeşil çeşitlere göre daha iyi uyum sağladığını doğrulamıştır [57, 73].

Marul lezzeti de aydınlatma koşullarından etkilenmektedir. Bir çalışmada, Grand Rapids marul çeşidi mavi ışık altında, kırmızı veya uzak kırmızı ışıkta kırmızıya kıyasla giderek artan bir acılık geliştirmiştir [7]. Lin ve ark. [43], yürüttükleri çalışmada kırmızı ve mavi, sadece kırmızı, mavi ve beyaz LED'lerle aydınlatma yaparak boston marulu yetiştirmişlerdir. Duyusal özellikleri incelendiğinde kırmızı ve mavi uygulanmış bitkilerin şeklinin, gevrekliğinin ve tatlılığının pazara uygun olmadığı, ek beyaz LED'lerin, artan şeker birikimi nedeniyle daha yüksek gevreklik ve daha tatlı tat oluştuğu saptanmıştır.

Yeşil ışığın fizyolojik etkileri de önemlidir. Çeşitli araştırmalarda, kırmızı ve mavi LED'leri tamamlayan yeşil flüoresan lambalara kıyasla 510-530 nm LED ışığı marul büyümesini teşvik ettiği belirlenmiştir [30]. Son ve Oh [71], yeşil LED'lerle üretimde yaprak morfolojisi, geçirgenliğini, hücre bölünme oranı ve yaprak anatomisi üzerinde durmuşlardır. Ölçümlerde büyümede gelişme olduğu gözlemlenmiştir. Snowden ve ark. [69], yeşil ışığın yapraklara ve gövde tacına daha derinden nüfuz ederek bitki büyümesinde ve gelişiminde değişiklikler oluşturmuştur. Ancak, fotosentetik akıların artmasıyla etkisinin azaldığını saptamışlardır.

Literatürde yeşil ışığın yapraklı sebzelerin besin değeri üzerindeki etkisini inceleyen çok fazla çalışma yoktur. Bebek yapraklı marul ek yeşil ışık (530 nm) ile kırmızı ve mavi LED'lerin kombinasyonu altında iklimlendirme odalarında yetiştirilirken antosiyaninlerin ve a-karoten birikmesinin desteklendiği belirlenmiştir [68]. Sera uygulamasında, HPS lamba aydınlatmasına ek 505, 530 ve 535 nm yeşil LED ışığın, farklı çeşitlerinde nitratı azalttığını veya tokoferol, askorbik asit ve antosiyanin konsantrasyonlarını artırdığını tespit etmişlerdir [65, 67].

Uygulamalarda sebze türü, gelişme aşaması, aydınlatmanın uygulanma süresi, fotoperiyot uzunluğu, fotosentetik foton akısı, ışık kaynaklarının spektral dağılımı ve sıcaklık gibi yetiştirme ortamı koşulları önemsenmelidir [7]. Ayrıca, farklı yeşil sebzeler için LED aydınlatma sistemlerinin geliştirilmesi için daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir. Seralarda iklimin etkileri ortadan kaldırılamaz. Kuzey enlemlerinde yapılan çalışmalar, çeşitli spektral özelliklerin, yılın farklı

mevsimlerinden ve farklı yetiştirme yıllarının aynı mevsimden de daha verimli olduğunu doğrulamaktadır [80].

Şaşırtma Tekniği ve LED Etkisi

Sera koşullarında başarılı sebze üretimi için fidelerde yapılan şaşırtma uygulamaları oldukça önemlidir. Fide şaşırtmada tipik olarak iyi gelişmiş yapraklar ve kısa boğum aralıkları ile kalın gövdeli köklere sahip bitkiler gereklidir. [46]. Aşılı materyalin şaşırtma işleminde, fide morfolojisi için gereksinimler genellikle farklıdır. [8]. Şaşırtma işlemlerinin başarılı olabilmesi için sera koşullarındaki gereksinimlere uygun olarak yapılacak ek aydınlatma uygulamaları etkili olmaktadır.

Hıyar fideleri şaşırtma işleminde, artan mavi ışık ile birlikte kuru madde miktarı azalırken, yaprak alanı başına klorofil içeriği, net fotosentetik hız ve stoma iletkenliği, mavi ışığın fotosentetik akısındaki artışla artmıştır. Hıyar fidesi şaşırtma işleminde, mavi ışığın artmasıyla kuru madde miktarı da azalırken, yaprak alanı başına klorofil içeriği, net fotosentetik hız ve stoma iletkenliği, mavi ışığın fotosentetik akısının artışıyla artmıştır [27]. Hernández ve Kubota [26], yalnızca kırmızı ve mavi LED ışıklar altında hıyar yetiştiriciliği için toplam fotosentetik akıdaki mavinin %10'unun optimal olduğunu, domates için ise %30-50'nin faydalı olduğunu öne sürmüşlerdir. Ayrıca kırmızı ve mavi spektruma yeşil ışığın eklenmesinin hıyarda herhangi bir etkisinin olmadığını da bildirmişlerdir. Buna karşılık, Brazilya ve ark. [4], yeşil ışığın hıyarın büyümesini hızlandırdığını, ancak yetiştirme odasında domates şaşırtma işleminde büyümesini engellediğini tespit etmişlerdir.

Kapalı alanlarda tek aydınlatma kaynağı olarak LED'ler kullanıldığında, ışık spektral bileşimi için bitki gereksinimleri, sera koşullarındaki gereksinimlere göre daha belirgindir. Kırmızı ışık tek başına yeterince etkili değildir. Mavi ışık dalga boylarının eklenmesi, farklı çeşitlerde daha güçlü, daha kısa domates fideleri [49], daha kısa hıyar sapları oluşumunu sağlamıştır [25]. Ayrıca kırmızı ışık uygulaması altında ortaya çıkan domates yaprağı kıvrılmasını ortadan kaldırmıştır [58]. Bununla birlikte, ışık spektrumundaki artan mavi ışık girişi, domates fidelerinde kuru madde birikimini baskılamıştır [49]. Hernández ve ark. [26], domateste kuru madde miktarı ve yaprak alanının artan mavi ışıkla %30-50'ye kadar arttığını ve ardından azaldığını bildirmektedirler.

Sera ortamlarında, özellikle arka plan güneş ışınımı yeterli fotosentetik olarak aktif foton akışı

sağladığında, tamamlayıcı ışık kalitesinin etkisinin azaldığı belirlenmiştir [46]. Ek aydınlatma yoluyla mavi foton akışı gerektiren bir eşik arka planda güneş günlük ışık integrali (DLI) veya göreceli bir tamamlayıcı DLI seviyesi olması muhtemeldir [23, 24, 25]. Bununla birlikte, Gómez ve Mitchell [19], değişen güneş DLI'lerinde altı domates çeşidinin iki haftalık farklı LED uygulamalarına morfolojik tepkilerini değerlendirmişlerdir. Değerlendirilen tüm çeşitlerde, kırmızı ışığa mavi ışık eklendiğinde hipokotil çapının ve yaprak alanının arttığını belirlemişlerdir. Mavi ışıktan yoksun yüksek basınçlı sodyum lamba spektrumunun yeşil-mavi LED dalga boylarıyla (530, 505, 455, 530, 505, 455, 470 nm), farklı sonuçlar göstermiştir. Farklı bir çalışmada, mavi ve camgöbeği (505 nm) ek ışık, hıyar ve domates fidelerinde yaprak alanının ve taze/kuru ağırlığın yanı sıra hipokotil uzunluğunun azalmasına neden olduğu tespit edilmiştir [66]. Tatlı biber yetiştiriciliğinde, mavi ve camgöbeği ışığı 'Reda' çeşidi üzerinde olumlu etkilere sahipken, 'Figaro' biber çeşidinin şaşırtılmasında ek mavi-yeşil LED ışığın büyüme ve gelişme oranlarını baskıladığı belirlenmiştir [66, 1].

SONUÇ

Yenilikçi LED aydınlatma sistemleri, tarımsal üretimine tamamen yeni bir boyut katmaktadır. Enerji verimliliği ve ışık dağılımı gelişmeleri ile LED'ler, mevcut ek aydınlatma teknolojilerine umut verici bir alternatif olmuştur. Bir bitkinin sağlıklı gelişimi pek çok farklı etkenin bir arada ve dengeli olması ile sağlanabilir. LED spektrumuna bitkilerin özel tepkileri vardır ve karmaşık etkileşimler nedeniyle genel bitki tepkisini öngörmek genellikle zordur. Bu nedenle bitki büyümesi, gelişimi, mineral beslenmesi ve metabolizması üzerindeki spektral kalite etkilerinin optimizasyonu üzerine birçok çalışmanın yapılması gerekmektedir. Türler arasındaki etkileşimler, ışık yoğunluğu, süresi ve diğer çevresel parametreler, birçok bütün bitki fizyolojik tepkisi için geniş fotobiyolojik sonuçlar çıkarma yeteneğimizi engeller. Bu nedenle, LED aydınlatma araştırma alanı çok geniştir. Bilim insanları gibi yetiştiriciler de, bitkiler ve LED aydınlatma üzerinde araştırma geliştirme çalışmaları yaparak bu parametreleri test ve optimize etmelidirler.

KAYNAKLAR

1. Bagdonavičienė, A., Brazaitytė, A., Viršilė, A., Samuolienė, G., Jankauskienė, J., Sirtautas, R., Sakalauskienė, S., Miliauskienė, J., Maročkienė, N., Duchovskis, P., 2015. Cultivation of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) transplants under high pressure sodium lamps supplemented by light emitting diodes of various wavelengths. *Acta Sci Pol Hortorum Cultus*, 14:3-14.
2. Barbi, S., Barbieri, F., Bertacchini, A., Barbieri, L., Montorsi, M., 2021. Effects of different led light recipes and NPK fertilizers on basil cultivation for automated and integrated horticulture methods. *Appl. Sci.*, 11:2497.
3. Bliznikas, Z., Žukauskas, A., Samuolienė, G., Viršilė, A., Brazaitytė, A., Jankauskienė, J., Duchovskis, P., Novičkovas, A., 2012. Effect of supplementary pre-harvest LED lighting on the antioxidant and nutritional properties of green vegetables. *Acta Hort.*, 939:85-91.
4. Brazaitytė, A., Duchovskis, P., Urbonavičiūtė, A., Samuolienė, G., Jankauskienė, J., Kasiulevičiūtė-Bonakerė, A., Bliznikas, Z., Novičkovas, A., Breivė, K., Žukauskas, A., 2009. The effect of light-emitting diodes lighting on cucumber transplants and after-effect on yield. *Zemdirbyste-Agriculture*, 96:102-118.
5. Brazaitytė, A., Viršilė, A., Samuolienė, G., Jankauskienė, J., Sakalauskienė, S., Sirtautas, R., Novičkovas, A., Dabašinskas, L., Vaštakatiė, V., Miliauskienė, J., Duchovskis, P., 2016. Light quality: growth and nutritional value of microgreens under indoor and greenhouse conditions. *Acta Hort.*, 1134:277-284.
6. Bugbee, B., 2016. Towards an optimal spectral quality for plant growth and development: the importance of radiation capture. *Acta Hort.*, 1134:1-12.
7. Carvalho, S.D., Folta, K.M., 2014. Environmentally modified organisms-expanding genetic potential with light. *Crit Rev in Plant Sci.*, 33:486-508.
8. Chia, P.L., Kubota, C., 2010. End-of-day far-red light quality and dose requirements for tomato rootstock hypocotyl elongation. *HortScience*, 45:1501-1506.
9. Colonna, E., Roupheal, Y., Barbieri, G., De Pascale, S., 2016. Nutritional quality of ten leafy vegetables harvested at two light intensities. *Food Chem*, 199:702-710.
10. Cope, K.R., Bugbee, B., 2013. Spectral effects of three types of white light-emitting diodes on plant growth and development: absolute versus relative amounts of blue light. *HortScience*, 48:504-509.
11. Çelen, İ.H., Önlü, E., 2019. Light and led lighting use in agriculture. Agriculture, Forestry and Aquaculture Sciences Research Papers, Chapter 6. *Gece Kitaplığı. ISBN : 978-625-7958-52-3.*
12. Demotes-Mainard, S., Peron, T., Corot, A., 2016. Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture. *Eviron. Exp. Bot.*, 121:4-21.
13. Deram, P., Lefsrud, M.G., Orsat, V., 2014. Supplemental lighting orientation and red-to blue ratio of light-emitting diodes for greenhouse tomato production. *HortScience*, 49:448-452.
14. Dieleman, J.A., Kruidhof, H.M., Weerheim, K., Leiss, K., 2021. LED lighting strategies affect physiology and resilience to pathogens and pests in eggplant (*Solanum melongena* L.). *Front Plant Sci*, 11:610046.
15. Dzakovich, M.P., Gomez, C., Mitchell, C.A., 2015. Tomatoes grown with light-emitting diodes or high-pressure sodium supplemental lights have similar fruit-quality attributes. *HortScience*, 50:1498-1502.
16. Fylladitakis, E.D., 2023. Controlled LED lighting for horticulture: a review. *Open Journal of Applied Sciences*, 13:175-188.
17. Gerovac, J.R., Craver, J.K., Boldt, J.K., Lopez, R.G., 2016. Light intensity and quality from sole-source light-emitting diodes impact growth, morphology, and nutrient content of brassica microgreens. *HortScience*, 51:497-503.
18. Goins, G.D., Yorlano, N.C., Sanwo, M.M., Brown, C.S., 1997. Photomorphogenesis, photosynthesis and seed yield of wheat plants grown under red light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental blue lighting. *J. Exp. Bot.*, 48:1407-1413.
19. Gómez, C., Mitchell, C.A., 2015. Growth responses of tomato seedlings to different spectra of supplemental lighting. *HortScience*, 50:112-118.
20. Gómez, C., Mitchell, C.A., 2016. Physiological and productivity responses of high-wire tomato as affected by supplemental light source and distribution within the canopy. *JASHS*, 141:196-208.
21. Guo, X., Hao, X., Khosla, S., Kumar, K.G.S., Cao, R., Bennett, N., 2016. Effect of LED inter lighting combined with overhead HPS light on fruit yield and quality of year-round sweet pepper in commercial greenhouse. *Acta Hort.*, 1134:71-78.
22. Hao, X.M., Zheng, J.M., Little, C., Khosla, S., 2012. LED inter-lighting in year-round

- greenhouse mini-cucumber production. *Acta Hort.*, 956:335-340.
23. Hernández, R., Kubota, C., 2012. Tomato seedling growth and morphological responses to supplemental LED lighting red: blue ratios under varied daily light integrals. *Acta Hort.*, 956:187-194.
 24. Hernández, R., Kubota, C., 2014-a. Growth and morphological response of cucumber seedlings to supplemental red and blue photon flux ratios under varied solar daily light integrals. *Sci. Hort.*, 173:92-99.
 25. Hernández, R., Kubota, C., 2014-b. LEDs supplemental lighting for vegetable transplant production: spectral evaluation and comparisons with HID technology. *Acta Hort.*, 1037:829-835.
 26. Hernández, R., Eguchi, T., Kubota, C., 2016. Growth and morphology of vegetable seedlings under different blue and red photon flux ratios using light-emitting diodes as sole-source lighting. *Acta Hort.*, 1134:195-200.
 27. Hogewoning, S.W., Trouwborst, G., Maljaars, H., Poorter, H., Van Ieperen, W., 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. *J. Exp. Bot.*, 61:3107-3117.
 28. Hwang, H., An, S., Lee, B., Chun, C., 2020. Improvement of growth and morphology of vegetable seedlings with supplemental far-red enriched LED lights in a plant factory. *Horticulturae*, 6:109.
 29. 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*, 45:1809-1814.
 30. Johkan, M., Shoji, K., Goto, F., Hashida, S., Yoshihara, T., 2012. Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*. *Environ Exp Bot*, 75:128-133.
 31. Kanechi, M., Maekawa, A., Nishida, Y., Miyashita, E., 2016. Effects of pulsed lighting-based light-emitting diodes on the growth and photosynthesis of lettuce leaves. *Acta Hort.*, 1134:207-214.
 32. Kim, K., Kook, H., Jang, J., Lee, W.H., Kamala-Kannan, S., Chae, J.C., Lee, K.J., 2013. The effect of blue-light-emitting diodes on antioxidant properties and resistance to *Botrytis cinerea* in tomato. *J Plant Pathol Microb*, 4:203-207.
 33. Koç, C., Vatandaş, M., Koç, A.B., 2009. LED aydınlatma teknolojisi ve tarımda kullanımı. 25. *Tarımsal Mekanizasyon Ulusal Kongresi, Isparta*, pp:153-158.
 34. Kopsell, D.A., Sams, C.E., 2015. Blue wavelengths from LED lighting increase nutritionally important metabolites in specialty crops. *HortScience*, 50:1285-1288.
 35. Koukounaras, A., 2021. Advanced greenhouse horticulture: new technologies and cultivation practices. *Horticulturae*, 7(1):1.
 36. Kubota, C., Chia, P., Yang, L.Q., 2012. Applications of far-red light emitting diodes in plant production under controlled environments. *Acta Hort.*, 952:59-66.
 37. Kumar, K.G.S., Hao, X., Khosla, S., Guo, X., Bennett, N., 2016. Comparison of HPS lighting and hybrid lighting with top HPS and intra-canopy LED lighting for high-wire mini-cucumber production. *Acta Hort.*, 1134:111-117.
 38. Kusuma, P., Pattison, M., Bugbee, B., 2020. From physics to fixtures to food: current and potential LED efficacy. *Horticulture Research*, Vol.7:56.
 39. Lee, M.J., Park, S.Y., Oh, M.M., 2015. Growth and cell division of lettuce plants under various ratios of red to far-red light-emitting diodes. *Hort. Environ Biote*, 56:188-194.
 40. Lee, M.J., Son, K.H., Oh, M.M. 2016. Increase in biomass and bioactive compounds in lettuce under various ratios of red to far-red LED light supplemented with blue LED light. *Hort. Environ Biote*, 57:139-147.
 41. Li, Q., Kubota, C., 2009. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. *Environ Exp Bot*, 67:59-64.
 42. Li, H., Tang, C., Xu, Z., Liu, X., Han, X., 2012. Effects of different light sources on the growth of non-heading Chinese cabbage (*Brassica campestris* L.). *J. Agri. Sci.*, 4:262-273.
 43. Lin, K.H., Huang, M.Y., Huang, W.D., Hsu, M.H., Yang, Z.W., Yang, C.M., 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.
 44. Massa, G.D., Kim, H.H., Wheeler, R.M., Mitchell, C.A., 2008. Plant productivity in response to LED lighting. *HortScience*, 43:1951-1956.
 45. Mitchell, C.A., Both, A.J., Bourget, C.M., Burr, J.F., Kubota, C., Lopez, R.G., Morrow, R.C., Runkle, E.S., 2012. LEDs: the future of greenhouse lighting. *Chron Hort.*, 52:6-10.

46. Mitchell, C.A., Dzakovich, M.P., Gómez, C., Lopez, R., Burr, J.F., Hernández, R., Kubota, C., Currey, C.J., Meng, Q., Runkle, E.S., Bourget, C.M., Morrow, R.C., Both, A.J. 2015. Light-emitting diodes in horticulture. *In: Janick J (ed) Horticultural reviews, Vol 43* 1 87.
47. Mizuno, T., Amaki, W., Watanabe, H., 2011. Effects of monochromatic light irradiation by LED on the growth and anthocyanin contents in leaves of cabbage seedlings. *Acta Hort.*, 907:179-184.
48. Morrow, R.C., 2008. LED lighting in horticulture. *HortScience*, 43:1947-1950.
49. Nanya, K., Ishigami, Y., Hikosaka, S., Goto, E., 2012. Effects of blue and red light on stem elongation and flowering of tomato seedlings. *Acta Hort.*, 956:261-266.
50. Naznin, M.T., Lefsrud, M., Gravel, V., Hao, X., 2016. Different ratios of red and blue LED light effects on coriander productivity and antioxidant properties. *Acta Hort.*, 1134:223-229.
51. Nelson, J.A., Bugbee, B., 2014. Economic analysis of greenhouse lighting: light emitting diodes vs. high intensity discharge fixtures. 9:6.
52. Nicole, C.C.S., Charalambous, F., Martinakos, S., van de Voort, S., Li, Z., Verhoog, M., Krijn, M., 2016. Lettuce growth and quality optimization in a plant factory. *Acta Hort.*, 1134:231-238.
53. Ohashi-Kaneko, 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. *Environ Control Biol.*, 45:189-198.
54. Olle, M., Viršilė, A. 2013. The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality. *Agri Food Sci*, 22:223-234.
55. Olle, M., 2015. Methods to avoid calcium deficiency on greenhouse grown leafy crops. *Lap Lambert Academic Publishing, Germany*. 112p.
56. Ouzounis, T., Razi, P.B., Fretté, X., Rosenqvist, E., Ottosen, C.O., 2015-a. 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.
57. Ouzounis, T., Rosenqvist, E., Ottosen, K. 2015-b. Spectral effects of artificial light on plant physiology and secondary metabolism: a review. *HortScience*, 50:1128-1135.
58. Ouzounis, T., Heuvelink, E., Ji, Y., Schouten, H.J., Visser, R.G.F., Marcelis, L.F.M., 2016. Blue and red LED lighting effects on plant biomass, stomatal conductance, and metabolite content in nine tomato genotypes. *Acta Hort.*, 1134:251-258.
59. Owen, W.G., Lopez, R., 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.
60. Paucek, I., Pennisi, G., Pistillo, A., Appolloni, E., Crepaldi, A., Calegari, B., Spinelli, F., Cellini, A., Gabarrell, X., Orsini F., Gianquinto, G., 2020. Supplementary LED inter lighting improves yield and precocity of greenhouse tomatoes in the Mediterranean.
61. Pinho, P., Lukkala, R., Särkka, L., Teri, E., Tahvonon, R., Halonen, L., 2007. Evaluation of lettuce growth under multi-spectral-component supplemental solid-state lighting in greenhouse environment. *IREE* 2:854-680.
62. Pinho, P., Halonen, L., 2014. Agricultural and horticultural lighting. *In: Karileck R, Sun CC, Zissis G, Ma R (eds) Handbook of advanced lighting technology. Springer International Publishing, Switzerland*.
63. Pockock, T., 2015. Light-emitting diodes and the modulation of specialty crops: light sensing and signaling networks in plants. *HortScience*, 50:1281-1284.
64. Samuolienė, G., Brazaitytė, A., Duchovskis, P., Viršilė, A., Jankauskienė, J., Sirtautas, R., Novičkovas, A., Skalauskienė, S., Sakalauskaitė, J., 2012-a. Cultivation of vegetable transplants using solid-state lamps for the short-wavelength supplementary lighting in greenhouses. *Acta Hort.*, 952:885-892.
65. Samuolienė, G., Brazaitytė, A., Sirtautas, R., Novičkovas, A., Duchovskis, P., 2012-b. The effect of supplementary LED lighting on the antioxidant and nutritional properties of lettuce. *Acta Hort.*, 952:835-841.
66. Samuolienė, G., Sirtautas, R., Brazaitytė, A., Viršilė, A., Duchovskis, P., 2012-c. 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.
67. Samuolienė, G., Sirtautas, R., Brazaitytė, A., Duchovskis, P., 2012-d. LED lighting and seasonality effects antioxidant properties of baby leaf lettuce. *Food Chem.*, 134:1494-1499.
68. Samuolienė, G., Brazaitytė, A., Sirtautas, R., Viršilė, A., Sakalauskaitė, J., Sakalauskiene, S., Duchovskis, P., 2013. LED illumination affects bioactive compounds in romaine baby leaf lettuce. *J. Sci. Food Agric.*, 93:3286-3291.

69. Snowden, M.C., Cope, K.R., Bugbee, B., 2016. Sensitivity of seven diverse species to blue and green light: interactions with photon flux. *11:10*.
70. Son, K.H., Oh, M.M., 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.
71. Son, K.H., Oh, M.M., 2015. Growth, photosynthetic and antioxidant parameters of two lettuce cultivars as affected by red, green, and blue light-emitting diodes. *Hort. Environ Biote*, 56:639-653.
72. Tarakanov, I., Yakovleva, O., Konovalova, I., Paliutina, G., Anisimov, A., 2012. Light-emitting diodes: on the way to combinatorial lighting technologies for basic research and crop production. *Acta Hort.*, 956:171-178.
73. Taulavuori, K., Hyöky, V., Oksanen, L., Taulavuori, E., Julkunen-Tiitto, R., 2016. Species-specific differences in synthesis of flavonoids and phenolic acids under increasing periods of enhanced blue light. *Environ Exp Bot*, 121:145-150.
74. Urbonavičiūtė, A., Samuolienė, G., Brazaitytė, A., Ulinskaitė, R., Jankauskienė, J., Duchovskis, Žukauskas, A., 2008. The possibility to control the metabolism of green vegetables and sprouts using light emitting diode illumination. *Scientific Works of The Lithuanian Institute of Horticulture and Lithuanian University of Agriculture, Sodininkystė Ir Daržininkystė*, 28(2): 83-92.
75. Van Ieperen, W., 2016. Plant growth control by light spectrum: fact or fiction. *Acta Hort.*, 1134:19-24.
76. Vänninen, I., Pinto, D.M., Nissinen, A.I., Johansen, N.S., Shipp, L., 2010. In the light of new greenhouse technologies: 1. Plant-mediated effects of artificial lighting on arthropods and tritrophic interactions. *An Appl Biol*, 157:393-414.
77. Vaštakaitė, V., Viršilė, A., Brazaitytė, A., Samuoliene, G., Jankauskiene, J., Sirtautas, R., Novičkovas, A., Dabašinskas, L., Sakalauskiene, S., Miliauskienė, J., Duchovskis, P., 2015. The effect of blue light dosage on growth and antioxidant properties of microgreens. *Sodininkystė ir daržininkystė*, 34(1-2):25-35.
78. Wallace, C., Both, A.J., 2016. Evaluating operating characteristics of light sources for horticultural applications. *Acta Hort.*, 1134:435-443.
79. Wanlai, Z., Wenke, L., Qichang, Y., 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.
80. Wojciechowska, R., Długosz-Grochowska, O., Kołton, A., Żupnik, M., 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.
81. Xin, J., Liu, H., Song, S., Chen, R., Sun, G., 2015. Growth and quality of Chinese kale grown under different LEDs. *Agric Sci Technol*, 16:68-69.
82. Yorio, N.C., Goins, G.D., Kagie, H.R., Wheeler, R.M., Sager, J.C., 2001. Improving spinach, radish and lettuce growth under red light emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation. *HortScience*, 36:380-383.
83. Zhongming, Z., Linong, L., Wangqiang, Z., Wei, L., 2020. World Cities Report 2020: The Value of Sustainable Urbanization.