


Araştırma Makalesi
(Research Article)


Ege Üniv. Ziraat Fak. Derg., 2021, 58 (3):385-397
<https://doi.org/10.20289/zfdergi.849364>

Vedat DEMİR^{1*} 

Hüseyin YÜRDEM¹ 

Tuncay GÜNHAN¹ 

H. Baki ÜNAL² 

Barış UZUN³ 

Seralarda fotosentez amaçlı kullanılan farklı LED ışık kaynaklarının FAR dağılım düzeylerinin belirlenmesi

Determination of PAR distribution uniformity of different LED light sources used in photosynthesis in greenhouses

Alınış (Received): 29.12.2020

Kabul Tarihi (Accepted): 08.02.2021

¹ Ege Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, İzmir/Türkiye

² Ege Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, İzmir/Türkiye

³ İzmir Meteoroloji 2. Bölge Müdürlüğü, İzmir/Türkiye

*İletişim (correspondence) e-posta: vedat.demir@ege.edu.tr

ÖZ

Amaç: Bu çalışmada, seralarda tamamlayıcı fotosentez aydınlatma uygulamalarında kullanılacak dört farklı LED ışık kaynağının farklı asılma yüksekliklerindeki FAR dağılımının belirlenmesi ve dağılım düzgünlüğünü sağlayacak yerleşim düzeninin ortaya konması amaçlanmıştır.

Materyal ve Yöntem: Seralar için geliştirilen yerli yapım LED ışık kaynakları ele alınmış, FAR ölçümlerinde karartılmış deneme odasında kurulan ölçüm düzeneği kullanılmıştır. Ölçümler, 3x3 m alanda 10x10 cm kare ağı yapısında ve FAR algılayıcı ile ışık kaynağı arası düşey mesafe 31.6, 50, 75, 100, 125 ve 150 cm olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. FAR dağılımları, farklı dağılım düzgünlüğü değerlendirme kriterlerine göre hesaplanmış ve LED ışık kaynağının farklı asılma yüksekliği ve aralığı için eş aydınlık eğrileri belirlenmiştir.

Araştırma Bulguları: A, B, C ve D tipi ışık kaynaklarının asılma yüksekliği ve aralıkları için en düşük ve en yüksek günlük ışık birikimi değerleri sırasıyla; 23.8-9.3, 13.8-3.6, 2.1-1.3, 2.2-1.1 mol·m⁻²·gün⁻¹ olarak belirlenmiştir. Günlük ışık birikimi açısından, A ve B tipi ışık kaynaklarının ele alınan yerleşim durumlarında tam yapay ve tamamlayıcı fotosentez aydınlatma uygulamalarında, C ve D tipi ışık kaynaklarının ise yalnızca tamamlayıcı fotosentez aydınlatma uygulamalarında kullanılabilmesi söylenebilir.

Sonuç: Araştırmada ele alınan LED ışık kaynaklarının tamamında, 100 cm üzeri asılma yüksekliği ve tüm yerleşim aralıklarında dağılım düzgünlüğü değerlendirme kriterlerine göre kabul edilebilir eş FAR dağılımının elde edilebileceği ortaya konmuştur.

Anahtar sözcükler: Aydınlanma şiddeti, dağılım düzgünlüğü, enerji etkinliği, eş aydınlık, eş dağılım, tekdüzelik

Keywords: Illuminance intensity, distribution uniformity, energy efficiency, equiuniformity, uniformity

ABSTRACT

Objective: In this study, it is aimed to determine the PAR distribution of different types LED and the arrangements that could make the working efficiency in the LED light sources.

Material and Methods: Four locally produced LED developed for greenhouses have been considered. The PAR measurements were carried out within the specially designed a testing unit in a dark room in 10x10 cm square grid within 3x3 m dimensions. The height between the PAR sensor and the LED was considered as 31.6, 50, 75, 100, 125 and 150 cm. In the evaluations, different uniformity coefficients were calculated and PAR distribution patterns were determined for different mounting height and spacing.

Results: The minimum and maximum daily light integral values for A, B, C and D LED were found 23.8-9.3, 13.8-3.6, 2.1-1.3, 2.2-1.1 mol·m⁻²·day⁻¹, respectively. In terms of daily light integral, it can be said that A and B LED can be used in both full artificial and supplementary lighting and, C and D LED can be used only in supplementary lighting for PAR applications.

Conclusion: It was determined that all LED had acceptable PAR uniformity according to the different distribution uniformity criteria for over 100 cm mounting height and spacing.

GİRİŞ

Bitkisel üretimde görünür ışık bölgesi olan 380 ile 750 nm dalga boyundaki ışınlar son derece önemlidir. Bu görünür bölgedeki 400-700 nm dalga boyu aralığındaki ışınım bölgesi fotosentetik aktif radyasyon (FAR) bölgesi olarak adlandırılır. FAR bölgesindeki farklı dalga boyuna sahip her ışınının, yararlanılabilir oranı değişmekle birlikte, yoğun olarak fotosentez için kullanıldığı bilinmektedir (Fisher and Donnelly, 2001; Ficher and Runkle, 2004; Yağcıoğlu et al., 2004; Uzun and Demir, 2012).

Sera içine ulaşan FAR miktarı, seranın dış örtü yüzeyine ulaşan ortalama FAR miktarı ve örtü malzemesinin geçirgenlik katsayısı dikkate alınarak yaklaşık olarak belirlenebilmektedir (Faust, 2004). Örtü malzemesinin geçirgenliğine bağlı olarak FAR miktarının %35-75'inin sera içine ulaşabilmekte ve ortalama geçirgenlik katsayısı 0.45-0.50 arasında kabul edilmektedir (Fisher and Donnelly, 2001; Faust, 2004; Ünal et al., 2015).

Sera yetiştiriciliğinde gün içinde birim alana ulaşan FAR bölgesindeki dalga boyuna sahip fotonların sayısı, fotosentezde kullanılan enerji açısından önemlidir. FAR bölgesinde anlık fotosentetik foton akısı yoğunluğu (Photosynthetic Photon Flux Density-PPFD) ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) olarak ifade edilmektedir (Thimijan and Heins, 1983). Son yıllarda anlık fotonların PPFD enerjisi yerine, bir gün (24 h) süre boyunca bitki bölgesine ulaşan PPFD enerji miktarının toplam değerinin ölçülmesi ve kullanılması tercih edilir hale gelmektedir. Işık yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak belirli bir alana günlük ulaşan ışığın toplam miktarı "Günlük Işık Birikimi" (Daily Light Integral-DLI) ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{gün}^{-1}$) olarak tanımlanmaktadır. Toplam günlük ışık gereksinimi, bitki türlerine göre önemli oranda değişiklik gösterebilmektedir. Toplam günlük ışık gereksinimi değerleri; düşük olan bitkilerde (birçok ev bitkisi) 3-6 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{gün}^{-1}$, orta olan bitkilerde (çoğu yıllık bitkiler) 6-12 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{gün}^{-1}$, yüksek olan bitkilerde (çok yıllık bitkiler ve sebzeler) ise en düşük 12 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{gün}^{-1}$ değerlerinin dikkate alınması önerilmektedir (Mattson, 2015; Torres and Lopez, 2012).

Mevsimi dışında seralarda gerçekleştirilen bitki yetiştiriciliğindeki FAR açığını kapatmak amacıyla çeşitli aydınlatıcılar kullanılmaktadır. Seralarda yaygın olarak yüksek basınçlı sodyum buharlı (HPS) ve metal halid (MH) lambalar ile yapılan aydınlatma uygulamalarından enerji maliyetleri ve verimlilik gibi nedenlerden dolayı daha etkin kaynak kullanımına olanak veren yeni nesil aydınlatma uygulamalarına yönelim başlamıştır. Cıva içermeyen çevre dostu olarak tanımlanan yarı iletken aydınlatma araçları olan LED (Light Emitting Diode)'ler; az yer kaplaması, hızlı açılıp-kapanması, düşük çalışma voltajı ile güvenli, uzun ömürlü ve otomasyona uygun olması gibi önemli avantajları nedeniyle geleneksel aydınlatma araçlarının yerini almaya başlamıştır.

Çağlayan ve Ertekin (2014), serada ve bitki yetiştirme odalarında bitkilerin fotobiyolojik gereksinimleri için uygun ışık miktarını %25, %50 ve %100 ışık seviyelerinde bir LED ışık kaynağı ile tamamlamak üzere bir araştırma yapmışlardır. Araştırmada soft beyaz, kırmızı, mavi ve UV-A LED'lerden oluşturdukları bir aydınlatıcı tasarlamışlar ve aydınlatıcının 20, 40, 60, 75 ve 90 cm yüksekliklerdeki FAR ve ışık yoğunluğu (lx) değerlerini ölçmüşlerdir.

Tamamlayıcı fotosentetik aydınlatma uygulamalarında, uygun bir lamba ve ışıklık seçiminin yanı sıra, üretilen ışınının bitkilerin en fazla yararlanabileceği şartlarda verilmesi, işlemin başarısını artıracaktır. Yapılan aydınlatma uygulamasından tüm bitkilerin eşit şekilde yararlanabilmesi ve benzer gelişmeyi gösterebilmesi için, ışığın, tüm üretim alanı üzerindeki dağılım düzgünlüğünün en az %70-80 olması önerilmektedir (Yağcıoğlu, 2014; Yağcıoğlu, 2017). Dağılım düzgünlüğünün kabul edilebilir değerlerde olabilmesi için, lambaların yerleşim aralıklarının ve asılma yüksekliklerinin uygun şekilde düzenlenmiş olması gerekmektedir. Son yıllarda kullanımı yaygınlaşan LED ışık kaynakları ile seralarda aydınlatma uygulamalarının projelendirilmesinde gerekli olan; montaj (yerleşim) aralıkları, ışığın dalga boyu dağılımı ve değişik asılma yüksekliklerinde elde edilen dağılımın düzgünlüğü konularında yapılan bilimsel çalışmalar oldukça sınırlıdır.

Seralarda tamamlayıcı aydınlatma uygulamalarında kullanılacak LED ışık kaynaklarının değişik kullanım durumlarındaki FAR dağılımına ilişkin verilerin ortaya konması, bitki yetiştiriciliğinde kullanıcı ve projelendirme açısından büyük önem taşımaktadır. Bu araştırmada, seralarda tamamlayıcı fotosentetik aydınlatma uygulamalarında kullanılacak farklı tip LED ışık kaynaklarının değişik asılma yüksekliklerindeki FAR dağılımlarının belirlenmesi ve düzgün bir FAR dağılımı yapabilecek yerleşim düzeninin ortaya konması amaçlanmıştır.

MATERYAL ve YÖNTEM

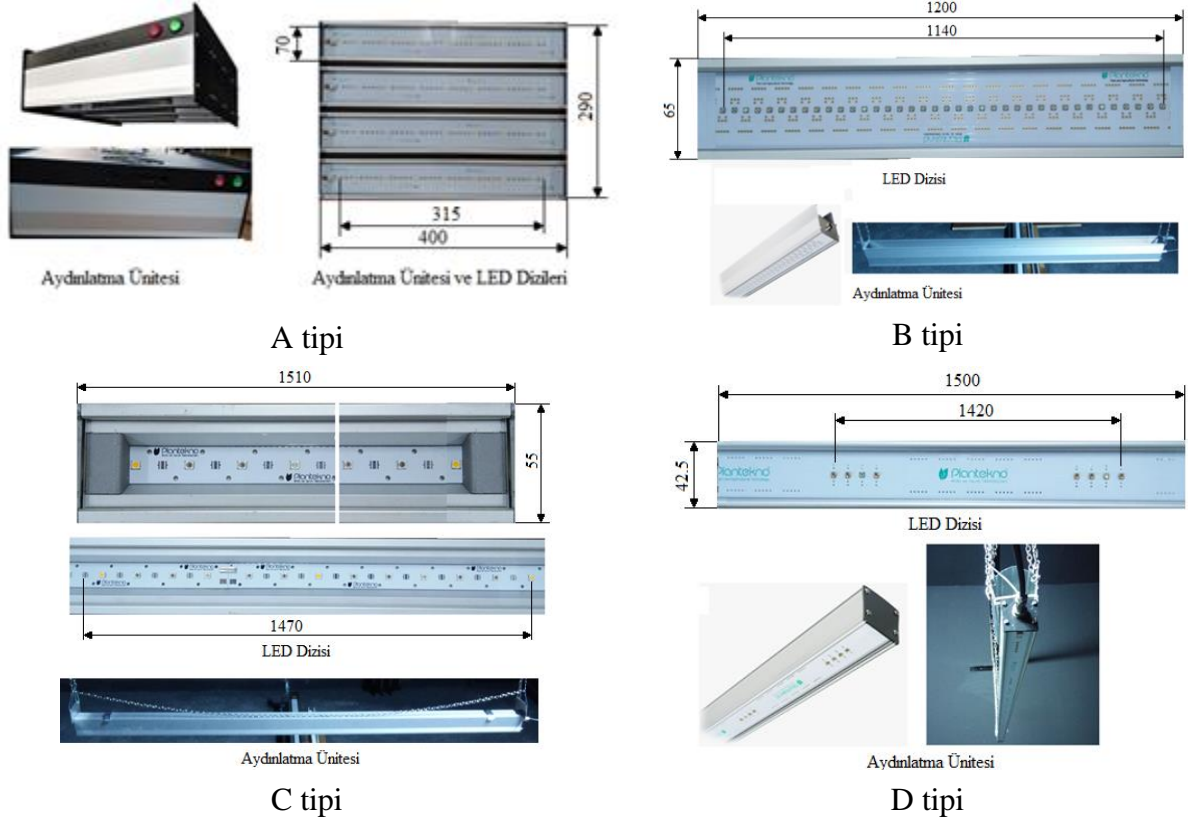
Kullanılan LED Işık Kaynakları

Çalışmada, seralarda fotosentez amaçlı aydınlatmada kullanılabilecek dört farklı tip (A, B, C ve D) yerli yapım LED ışık kaynağı dikkate alınmıştır (Çizelge 1 ve Şekil 1). Işık kaynaklarında kullanılan LED çipleri için üretici firma, birim güç başına ışık miktarını 2 $\mu\text{mol}/\text{W}$, güç faktörünü 0.98 ve güç verimliliğini %96 olarak bildirmiştir (Plantekno, 2017).

Çizelge 1. Çalışmada ele alınan LED ışık kaynaklarının teknik ölçüleri

Table 1. Technical properties of the LED light sources used in the study

LED Işık Kaynağı tipi	Aydınlatma ünitesi genel boyutları (mm)	Aydınlatma ünitesindeki		
		Toplam LED sayısı (adet)	LED dizi uzunluğu (mm)	LED'ler /LED grupları arası mesafe (mm)
A	400x290x150	168	315 (4 adet)	7.5
B	1200x65x45	150	1140	7.5
C	1510x45x55	70	1470	20
D	1500x42.5x42.5	40	1420	8.5 / 125



Şekil 1. Çalışmada ele alınan LED ışık kaynakları

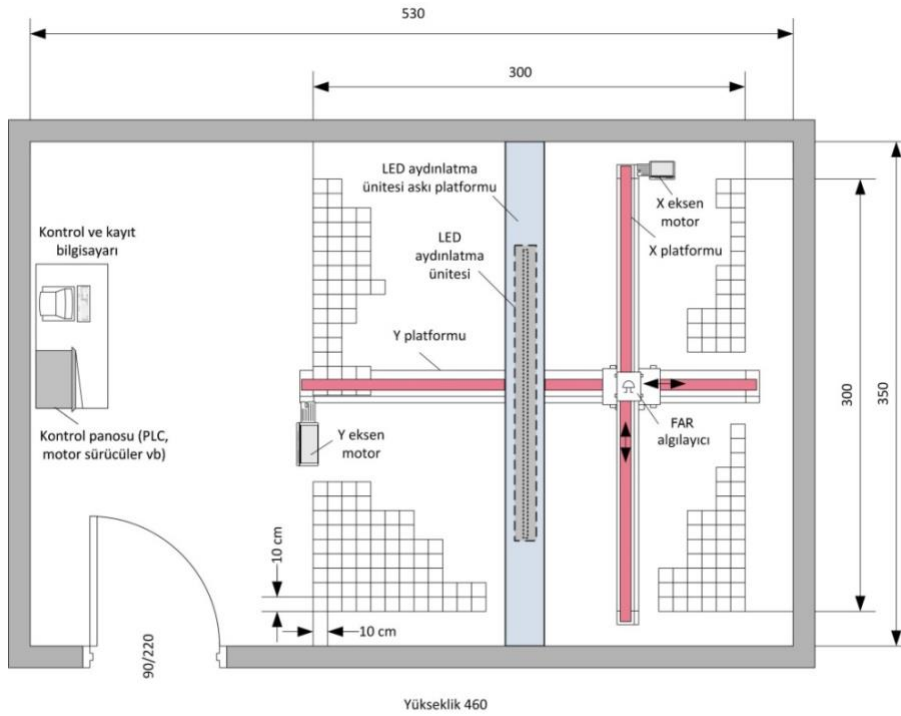
Figure 1. LED light sources used in the study

Yöntem

LED Işık Kaynaklarının FAR Dağılımlarının Belirlenmesi

Araştırmada kullanılan her bir LED ışık kaynağının tekil olarak FAR dağılımları, güneş ışığı almayan (penceresiz), tavan yüksekliği 460 cm, iç ölçüleri 530x350 cm olan bir deneme odasında hazırlanan ölçüm düzeneğinden yararlanılarak belirlenmiştir. Aydınlatıcılardan çıkan ışınların yansıma yapmadan ölçülmesi amacıyla, odanın tüm yüzeyleri mat siyaha boyanmıştır. Odadaki ölçüm düzeneğine ait bilgisayar, pano vb. tüm ışık kaynaklarının üzerleri ise ölçüm süresince siyah örtü ile kapatılmıştır.

Deneme odasında hazırlanan FAR ölçüm düzeneğinin şematik görünümü Şekil 2’de verilmiştir. LED ışık kaynağından yayılan ışığın FAR değerlerini yatay düzlemde doğrudan ölçebilmek amacıyla oda zemininde 3x3 m boyutunda yatay bir aydınlatma düzlemi esas alınmıştır. Bu düzlem üzerinde 10x10 cm boyutunda 961 adet kareden oluşan bir sanal kareler ağı oluşturulmuştur. Bu sanal kareler ağı üzerinde FAR değerlerinin ölçümü için FAR algılayıcısının yatay düzlemde iki eksen (x ve y) doğrultusunda hareket ettirilmesini sağlayacak bir deneme düzeneği tasarlanmıştır.



Şekil 2. Deneme odasında oluşturulan FAR ölçüm düzeneğinin şematik görünümü

Figure 2. Schematic of the FAR measuring system in the experiment room

FAR ölçümleri, FAR algılayıcısı ile aydınlatma üniteleri arası düşey mesafe (asıma yüksekliği) 31.6, 50, 75, 100, 125 ve 150 cm olacak şekilde gerçekleştirilmiştir (Turn and Walker, 1987; Ohno, 2006; Çağlayan and Ertekin, 2014). Çalışmada FAR ölçümleri için hassasiyeti $0.01 \text{ mV}/\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ olan Apogee SQ 500 modeli (Apogee Instruments Logan, UT, USA) algılayıcı kullanılmıştır (Apogee, 2017).

LED Işık Kaynaklarının FAR Dağılımına Ait Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çalışmada ele alınan LED ışık kaynaklarının, farklı asılma yüksekliklerinde konumlandırılması durumunda yatay düzlemde ölçülen FAR değerlerinden yararlanılarak, tekil ve değişik yerleşim aralıklarında çalışması durumundaki FAR değerlerinin yatay düzlemdeki alansal dağılımı belirlenmiştir. FAR değerlerinin yatay düzlemde dağılım düzgünlüğünün belirlenmesinde dikkate alınan değerlendirme kriterleri (UC_1 , UC_2 , UC_3 , UC_4 , UC_5 , UC_6 , EDI) Çizelge 2’de verilmiştir.

LED Işık Kaynaklarının Güç Tüketimlerinin Belirlenmesi

Güç ölçümü, elektrik kaynağı ile aydınlatma sistemi arasına bir dijital güç ölçer (Arcmeter SY1012 Energy, China) yerleştirilerek gerçekleştirilmiştir. Güç ölçerin doğruluk kontrolü amacıyla dijital multimetre (Fluke 179 True-RMS-Germany) kullanılmıştır.

Çizelge 2. Çalışmada dikkate alınan FAR dağılım düzgünlüğü değerlendirme kriterleri
Table 2. Criteria for the evaluation of the uniformity of PAR distribution in the study

Dağılım düzgünlüğü değerlendirme kriterleri	Eşitlik	Sınır değerleri	Kaynak
Ölçülen en düşük ve en yüksek PPFd değerlerinin oranı	$UC_1 = \frac{E_{Min}}{E_{Max}}$	>0.7	Both et al., (2002)
Ölçülen en düşük ve ortalama PPFd değerlerinin oranı	$UC_2 = \frac{E_{Min}}{E_{Avg}}$	>0.8	Mahdavi and Pal (1999); Ciolkosz et al., (2001); Both et al., (2002)
Ölçülen en yüksek ve en düşük PPFd değerlerinin oranı	$UC_3 = \frac{E_{Max}}{E_{Min}}$	<1.7 (I. sınıf) <2.5 (II. sınıf) <3.0 (III. sınıf) <4.0 (IV. sınıf)	Rea, (2000)
Varyasyon katsayısı	$UC_4 = \frac{E_{Stdev}}{E_{Avg}}$ $E_{Stdev} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - E_{Avg})^2}{(n-1)}}$	<0.13 (I. sınıf) <0.21 (II. sınıf) <0.25 (III. sınıf) <0.30 (IV. sınıf)	Mahdavi and Pal (1999); Rea, (2000)
Ölçülen değerlerin ortalamadan bağıl sapmasının tamamlayıcısı	$UC_5 = 100 \cdot \left(1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n E_i - E_{Avg} }{n \cdot E_{Avg}} \right] \right)$	>%75 (tercih>%90)	Turn and Walker, (1987); Albright and Both (1994); Ciolkosz et al., (2001); Both et al., (2002); Chen, (2005); Ferentinos and Albright, (2005)
İstatiksel eş dağılım	$UC_6 = 100 \cdot \left[1 - 0.798 \cdot \left(\frac{E_{Stdev}}{E_{Avg}} \right) \right]$	>%84	Hart (1961)
Entropiye dayalı dağılım indeksi (EDI)	$EDI = \frac{100}{n} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_{i,g} \times E_{i,l})}$ $E_{i,g} = 1 - \frac{ E_i - E_{Avg} }{E_{Avg} + E_{Stdev}}$ $E_{i,l} = 1 - \frac{ E_{m,l,i} - E_{Avg} }{E_{Avg} + E_{Stdev}}$	Sınır belirtilmemiş olup % 100 değerine yakın olması esastır.	Mahdavi and Pal (1999)

E_i = Dağılım deseninin her bir noktasında ölçülen ışık foton akı yoğunluğu ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

E_{Min} = Dağılım deseninde ölçülen en düşük ışık foton akı yoğunluğu ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

E_{Max} = Dağılım deseninde ölçülen en yüksek ışık foton akı yoğunluğu ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

E_{Avg} = Dağılım deseninde ölçülen ışık foton akı yoğunluğu değerlerinin ortalaması ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

E_{Stdev} = Dağılım deseninde ölçülen ışık foton akı yoğunluğu değerlerinin standart sapması ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

n = Dağılım desenindeki ölçüm sayısı

$E_{i,g}$ = Genel tahminleme terimi

$E_{i,l}$ = Bölgesel tahminleme terimi

$E_{m,l,i}$ = Dağılım deseninde her bir ölçülen ışık foton akı yoğunluğu değerinin yanında ölçülen değerlerin ortalaması ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

EDI = Entropiye dayalı dağılım indeksi

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Çalışmada dört farklı tipteki (A, B, C ve D) LED ışık kaynağının tekil olarak farklı asılma yüksekliklerinde konumlandırılması durumunda oluşan FAR değerleri, geliştirilen ölçüm düzeneği yardımıyla belirlenmiştir. Elde edilen tekil FAR ölçüm sonuçlarından yararlanılarak, farklı yerleşim aralıkları için örtmeli FAR dağılım değerleri belirlenmiştir. LED ışık kaynaklarının boyutsal yapılarına göre çok farklı sayıda yerleşim aralığı denenmiş, ancak makale kapsamında her bir LED ışık kaynağı için iki farklı yerleşim aralığına ilişkin sonuçlar verilmiştir. Bunlar; A ışık kaynağı için 100×100 cm ve 150×150 cm, B ışık kaynağı için 150×150 cm ve 180×180 cm, C ve D ışık kaynakları için 160×160 cm ve 240×160 cm'dir. Her bir yükseklik ve yerleşim aralığı için FAR açısından dağılım düzgünlüğü değerleri, Çizelge 2'de verilen farklı dağılım düzgünlüğü değerlendirme kriterlerine göre hesaplanmış ve sonuçlar A ve B tipi LED ışık kaynakları için Çizelge 3'te, C ve D tipi LED ışık kaynakları için ise Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 3 ve Çizelge 4'de verilen günlük ışık birikimi (DLI_{ort}) değerleri incelendiğinde, montaj yüksekliği ve aralığı arttıkça doğal olarak birim yüzeye ulaşan günlük ışık birikimi değerlerinin azaldığı görülmektedir. Farklı montaj yüksekliği ve dikkate alınan farklı yerleşim aralıklarında ölçülen minimum ve maksimum günlük ışık birikimi değerleri A, B, C ve D tipi ışık kaynakları için sırasıyla 23.8-9.3 mol·m⁻²gün⁻¹, 13.8-3.6 mol·m⁻²gün⁻¹, 2.1-1.3 mol·m⁻²gün⁻¹, 2.2-1.1 mol·m⁻²gün⁻¹ olarak belirlenmiştir. Sera bitkileri için en az olması gereken 10-12 mol·m⁻²gün⁻¹ ve en yüksek domates verimi için 20-30 mol·m⁻²gün⁻¹ günlük ışık birikimi önerileri (Dayıoğlu ve Silleli, 2012; Torres and Lopez, 2012; Mattson, 2015) dikkate alındığında, A ve B tipi ışık kaynaklarının söz konusu yerleşim sonuçlarının bu istekleri rahatlıkla karşıladığı yani yerleşim durumuna göre hem tam yapay hem de tamamlayıcı fotosentez aydınlatma uygulamalarında kullanılabileceği görülmektedir. C ve D tipi ışık kaynaklarının ise yalnızca tamamlayıcı fotosentez aydınlatma uygulamalarında kullanılabileceği söylenebilir.

LED ışık kaynaklarının farklı asılma yüksekliği ve dikkate alınan yerleşim aralıklarında elde edilen ortalama FAR değerleri incelendiğinde, birim alana ulaşan en yüksek ortalama FAR değerleri beklendiği gibi en düşük asılma yüksekliği olan 31.6 cm'de belirlenmiştir. Dikkate alınan yerleşim aralıklarında en yüksek ortalama FAR değerleri; A ve B tipi aydınlatıcılar için 120×120 cm'lik yerleşim aralığında sırasıyla 275.9 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ve 160.2 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, C ve D tipi için 160×160 cm'lik yerleşim aralığında 24.5 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ve 25.6 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ olmuştur (Çizelge 3 ve Çizelge 4). Dört tipteki LED ışık kaynağının dikkate alınan iki farklı yerleşim aralığı için minimum ve maksimum FAR değerleri arasındaki farklar incelendiğinde, düşük asılma yüksekliğindeki bu değerler oldukça fazla olduğu, asılma yüksekliği arttıkça ise azaldığı görülmektedir (Çizelge 3 ve 4). Asılma yüksekliği arttıkça FAR değerleri azalmakla birlikte, dikkate alınan örtüşme alanındaki her birim noktaya düşük de olsa FAR değerleri ulaşabilmektedir. Örnek olması açısından LED ışık kaynaklarının 50 cm ve 100 cm asılma yüksekliği ve dikkate alınan bazı yerleşim aralıkları için belirlenen örtmeli FAR dağılımları Şekil 3 ve 4'te verilmiştir. Şekillerin incelenmesinden de görüleceği gibi düşük asılma yüksekliğinde (50 cm) özellikle C ve D tipi aydınlatıcılarda bu durum net bir şekilde görülmektedir. Aydınlatıcıların asılma yüksekliğinin artması durumunda (100 cm), FAR değerlerinin azalmasına karşın dikkate alınan alanda belirli bir dağılımın olduğu görülmektedir. Farklı dağılım düzgünlüğü değerlendirme kriterlerine (UC_1, UC_2, UC_3 (sınıf I), UC_4 (sınıf I), UC_5, UC_6, EDI) göre hesaplanan sonuçlar incelendiğinde (Çizelge 3 ve 4); tüm LED ışık kaynaklarının düşük asılma (31.6 ve 50 cm) yüksekliğindeki dağılım düzgünlüğü değerlerinin, sınır değerlerinden (Çizelge 2) daha düşük olduğu görülmektedir. Bununla birlikte A tipi LED ışık kaynağı ile 100, 125 ve 150 cm asılma yüksekliğinde ve dikkate alınan her iki yerleşim aralığı için tüm dağılım düzgünlüğü değerlendirme kriterlerine göre hesaplanan sonuçların genel olarak uygun olduğu söylenebilir. Diğer yükseklikler için bazı yerleşim aralıklarının da uygun olduğu görülmektedir.

Çizelge 3. A ve B tipi LED ışık kaynaklarının farklı asılma yüksekliği ve farklı yerleşim aralığına göre FAR değerleri ve farklı dağılım düzgünlüğü değerlendirme kriterlerine ilişkin sonuçlar

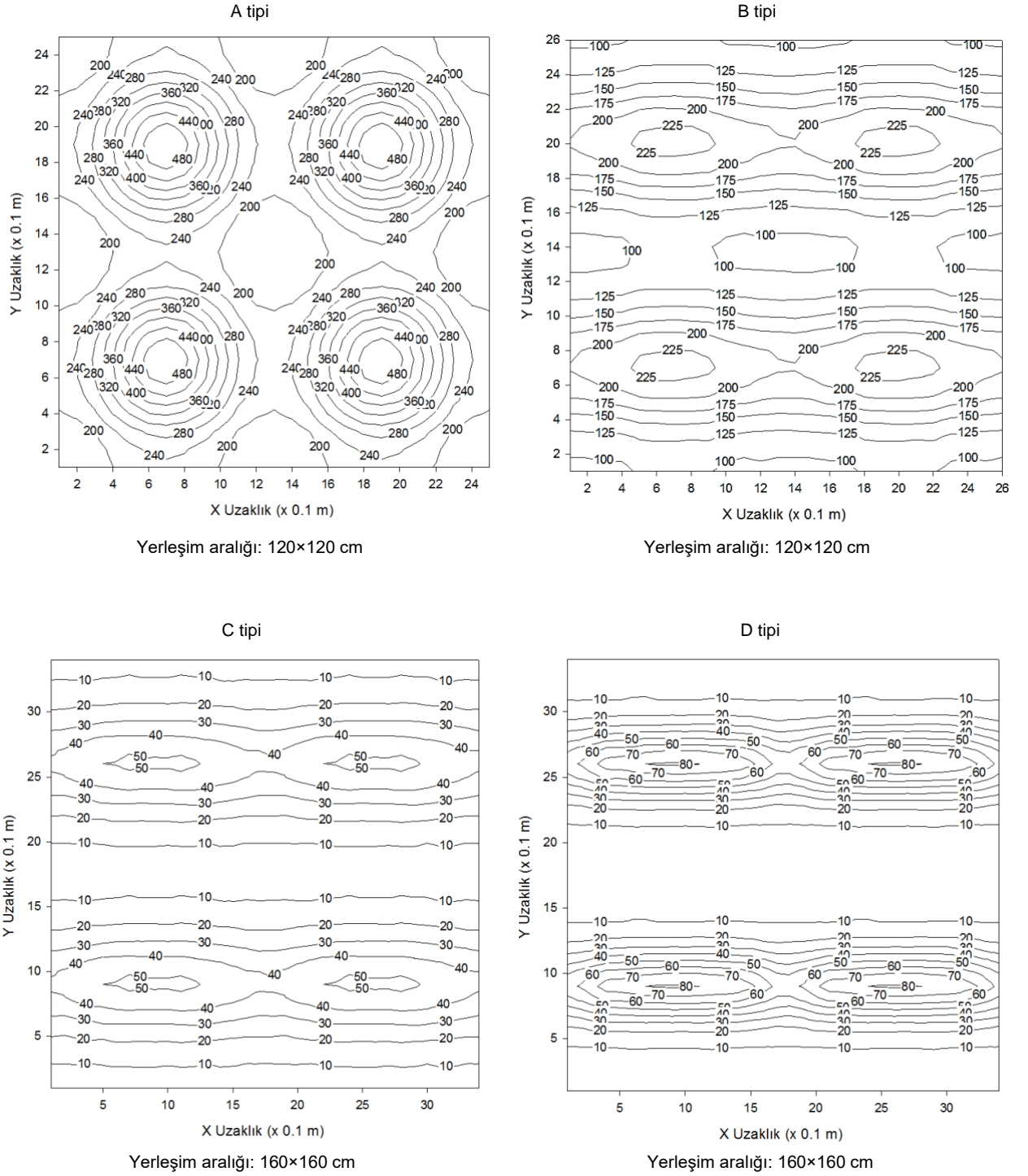
Table 3. PAR values and results for different distribution uniformity criteria of A and B type LED light sources according to different mounting height and installation distance

LED ışık kaynağı tipi	Işık kaynağının asılma yüksekliği (cm)	Yerleşim aralığı (cm×cm)	LED ışık kaynaklarının FAR değerleri					Farklı kriterlere göre dağılım düzgünlüğü değerleri							
			FAR_{min} ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	FAR_{max} ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	FAR_{ort} ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Saatlik ışık birikimi HLL_{ort} ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	Günlük ışık birikimi DLI_{ort} ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{gün}^{-1}$)	UC_1 >0.7	UC_2 >0.8	UC_3 <1.7	UC_4 <0.13	UC_5 (%) >%75	UC_6 (%) >%84	EDI (%) %100 yakın	
A	31.6	120×120	86.0	1036.2	275.9	0.99	23.8	0.08	0.31	12.0	0.79	39.6	36.6	69.6	
		150×150	35.0	1020.5	180.8	0.65	15.6	0.03	0.19	29.1	1.14	18.3	8.8	69.2	
	50	120×120	160.4	518.0	269.7	0.97	23.3	0.31	0.59	3.2	0.33	73.2	73.5	80.8	
		150×150	77.6	481.8	174.2	0.63	15.1	0.16	0.45	6.2	0.55	57.3	56.5	73.2	
	75	120×120	197.3	324.9	248.9	0.90	21.5	0.61	0.79	1.6	0.14	88.7	89.0	90.6	
		150×150	113.9	270.7	159.9	0.58	13.8	0.42	0.71	2.4	0.22	82.4	82.6	85.9	
	100	120×120	187.0	258.6	221.7	0.80	19.2	0.72	0.84	1.4	0.10	92.1	92.2	93.2	
		150×150	124.2	198.9	142.5	0.51	12.3	0.62	0.87	1.6	0.09	92.8	92.8	93.7	
	125	120×120	161.6	223.0	193.4	0.70	16.7	0.72	0.84	1.4	0.10	91.5	91.7	92.8	
		150×150	118.3	167.8	124.5	0.45	10.8	0.71	0.95	1.4	0.06	96.2	95.2	96.8	
	150	120×120	133.4	195.0	166.3	0.60	14.4	0.68	0.80	1.5	0.12	89.9	90.1	91.6	
		150×150	98.2	145.5	107.3	0.39	9.3	0.67	0.92	1.5	0.07	95.9	94.8	97.1	
B	31.6	120×120	56.1	352.6	160.2	0.58	13.8	0.16	0.35	6.28	0.58	49.4	53.9	69.2	
		180×180	9.9	338.7	75.0	0.27	6.5	0.03	0.13	34.3	1.10	15.9	12.2	64.5	
	50	120×120	94.2	234.0	152.3	0.55	13.2	0.40	0.62	2.5	0.29	74.2	76.9	80.8	
		180×180	23.5	199.3	71.3	0.26	6.2	0.12	0.33	8.5	0.65	47.7	48.4	68.9	
	75	120×120	111.5	172.0	137.6	0.50	11.9	0.65	0.81	1.54	0.13	88.5	89.7	90.3	
		180×180	39.4	112.6	64.4	0.23	5.6	0.35	0.61	2.86	0.30	75.0	76.1	80.2	
	100	120×120	104.5	143.4	120.7	0.43	10.4	0.73	0.87	1.37	0.09	92.4	92.5	93.5	
		180×180	42.2	71.1	56.5	0.20	4.9	0.59	0.75	1.68	0.11	90.5	90.8	90.4	
	125	120×120	91.5	128.2	105.6	0.38	9.1	0.71	0.87	1.40	0.10	91.6	91.7	93.0	
		180×180	39.3	60.4	49.4	0.18	4.3	0.65	0.79	1.54	0.10	91.3	91.9	91.2	
	150	120×120	74.7	112.1	89.7	0.32	7.7	0.67	0.83	1.50	0.12	90.1	90.2	91.9	
		180×180	29.4	52.0	42.0	0.15	3.6	0.57	0.70	1.77	0.16	85.4	87.2	86.9	

Çizelge 4. C ve D tipi LED ışık kaynaklarının farklı asılma yüksekliği ve farklı yerleşim aralığına göre FAR değerleri ve farklı dağılım düzgünlüğü değerlendirme kriterlerine ilişkin sonuçlar**Table 4.** PAR values and results for different distribution uniformity criteria of C and D type LED light sources according to different mounting height and installation distance

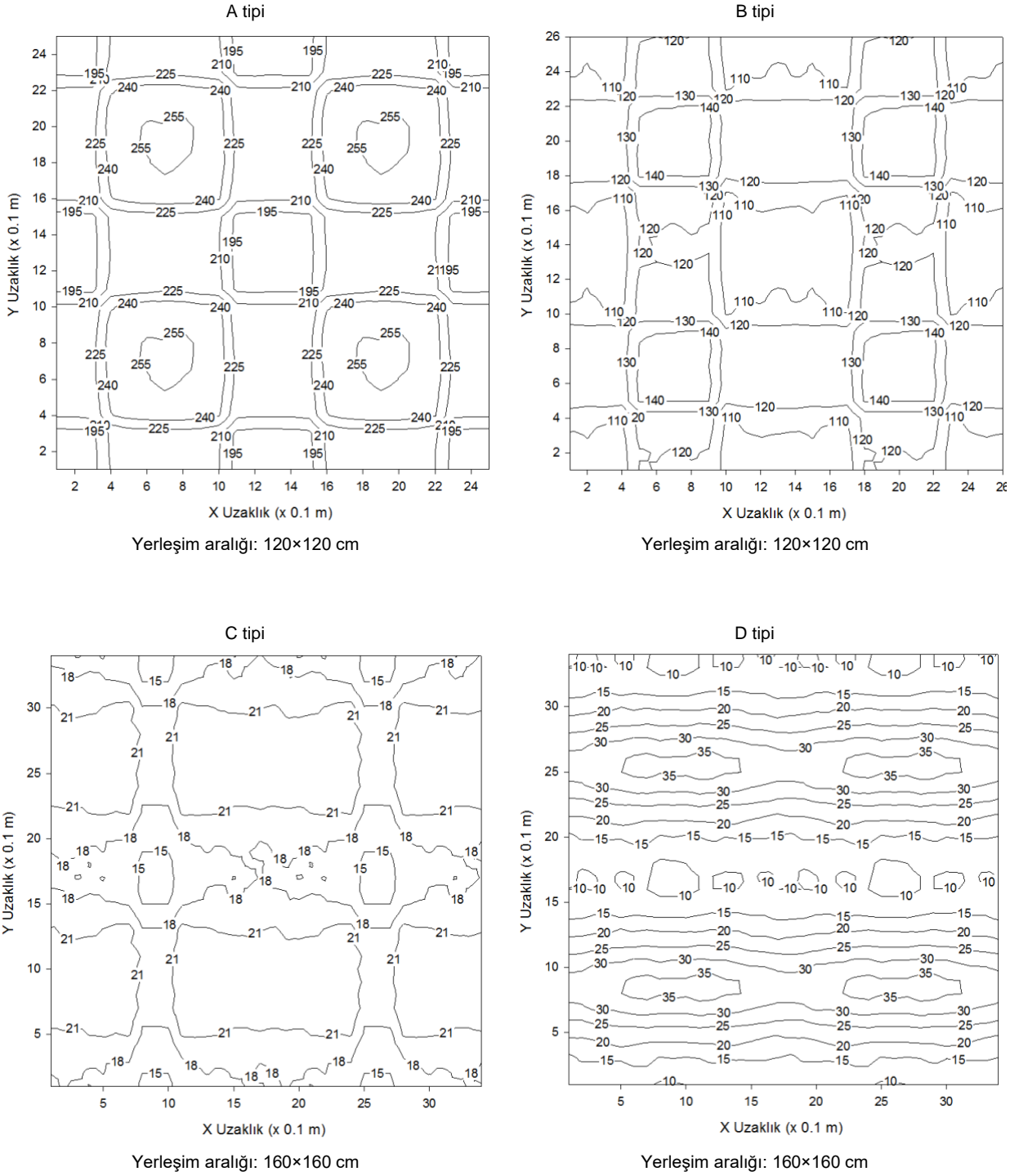
LED ışık kaynağı tipi	Işık kaynağının asılma yüksekliği (cm)	Yerleşim aralığı (cm×cm)	LED ışık kaynaklarının FAR değerleri					Farklı kriterlere göre dağılım düzgünlüğü değerleri							
			FAR_{min} ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	FAR_{max} ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	FAR_{ort} ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Saatlik ışık birikimi HLL_{ort} ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	Günlük ışık birikimi DLL_{ort} ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{gün}^{-1}$)	UC_1 >0.7	UC_2 >0.8	UC_3 <1.7	UC_4 <0.13	UC_5 (%) >%75	UC_6 (%) >%84	EDI (%) %100 yakın	
C	31.6	160×160	0.0	89.5	24.5	0.09	2.1	-*	-	-	1.11	-	-	57.0	
		240×160	0.0	89.5	18.8	0.07	1.6	-	-	-	1.32	-	-	61.4	
	50	160×160	3.2	52.3	23.4	0.08	2.0	0.06	0.14	16.39	0.63	44.8	49.7	66.9	
		240×160	0.0	51.4	17.5	0.06	1.5	0.01	0.03	-	0.80	36.1	36.3	65.1	
	75	160×160	13.2	33.6	21.7	0.08	1.9	0.39	0.61	2.55	0.27	76.1	78.6	79.3	
		240×160	5.5	31.4	15.8	0.06	1.4	0.17	0.35	5.73	0.41	65.6	67.0	75.2	
	100	160×160	14.1	23.9	19.8	0.07	1.7	0.59	0.71	1.69	0.12	89.4	90.2	87.9	
		240×160	8.0	20.5	14.0	0.05	1.2	0.39	0.57	2.57	0.23	79.7	81.3	82.4	
	125	160×160	12.1	20.0	17.1	0.06	1.5	0.60	0.71	1.65	0.10	92.3	91.9	90.3	
		240×160	7.5	16.4	11.9	0.04	1.0	0.46	0.63	2.18	0.15	87.1	87.8	87.5	
	150	160×160	9.6	17.2	14.6	0.05	1.3	0.55	0.65	1.81	0.13	88.9	89.4	88.1	
		240×160	6.3	12.7	10.1	0.04	0.9	0.49	0.62	2.04	0.13	88.6	89.4	89.3	
	D	31.6	160×160	0.0	133.6	25.6	0.09	2.2	-	-	-	1.36	-	-	61.2
			240×160	0.0	133.6	19.7	0.07	1.7	-	-	-	1.63	-	-	65.5
50		160×160	3.7	81.4	24.4	0.09	2.1	0.04	0.15	22.29	0.95	19.6	24.4	59.9	
		240×160	0.0	81.4	18.4	0.07	1.6	-	-	-	1.16	-	-	63.0	
75		160×160	6.4	52.0	22.6	0.08	2.0	0.12	0.28	8.15	0.63	44.6	49.8	66.8	
		240×160	2.7	51.4	16.8	0.06	1.5	0.05	0.16	18.7	0.80	36.3	36.2	65.4	
100		160×160	8.2	37.7	20.8	0.07	1.8	0.22	0.39	4.61	0.42	63.5	66.7	74.7	
		240×160	3.7	36.3	15.2	0.05	1.3	0.10	0.24	9.93	0.56	53.9	55.0	70.9	
125		160×160	10.9	29.1	19.3	0.07	1.7	0.38	0.57	2.66	0.26	76.6	79.0	81.9	
		240×160	5.0	26.4	13.9	0.05	1.2	0.19	0.36	5.26	0.39	67.5	68.9	76.6	
150		160×160	11.8	23.7	18.0	0.06	1.6	0.50	0.66	2.00	0.17	85.6	86.8	88.0	
		240×160	6.3	20.5	12.8	0.05	1.1	0.31	0.49	3.23	0.28	76.5	78.0	81.4	

*) ölçüm yüksekliğinin az ve/veya LED aydınlatıcının ışınım gücünün az olması nedeniyle, aydınlatıcı merkezine göre dikkate alınan yanıl bölgeye ışınımın çok az düşmesi veya hiç düşmemesi sonucu minimum FAR değeri (FAR_{min}) sıfır olduğundan veri hesaplanmamıştır.



Şekil 3. LED ışık kaynaklarının 50 cm asılma yüksekliğinde ve farklı yerleşim aralığında FAR dağılımları

Figure 3. PAR distributions of LED light sources for different installation distance at 50 cm mounting height



Şekil 4. LED ışık kaynaklarının 100 cm asılma yüksekliğinde ve farklı yerleşim aralığında FAR dağılımları

Figure 4. PAR distributions of LED light sources for different installation distance at 100 cm mounting height

B ve C tipi LED ışık kaynakları ile de 100, 125 ve 150 cm asılma yüksekliğinde ve D tipi LED ışık kaynağında ise 125 ve 150 cm asılma yüksekliğinde her iki yerleşim aralığı için tüm dağılım düzgünlüğü değerlendirme kriterlerine göre uygun dağılım düzgünlüğü elde edilmiştir. B ve C tipi LED ışık kaynaklarının 75 cm asılma yüksekliğinde, dikkate alınan yerleşim aralığına bağlı olarak belirli dağılım düzgünlüğü değerlendirme kriterlerine göre uygun dağılım düzgünlüğü değerleri elde edilmiş, bazılarında ise bu mümkün olamamıştır (Çizelge 3 ve 4). Benzer durum, D tipi LED ışık kaynağının birçok asılma yüksekliği ve yerleşim aralığı için de gerçekleşmiştir. Bu durum, yükseklik arttıkça ışık kaynağının yapısal özelliği ve ışık kaynaklarının asılma yüksekliğine bağlı olarak aynı birim alana ulaşan FAR ışınım değerlerinin birbirini daha iyi örtmesi sonucu daha yüksek bir dağılım düzgünlüğünün oluşması ile açıklanabilir. D tipi LED ışık kaynağında LED'lerin boşluklu dizilişinin, düşük dağılım düzgünlüğünün oluşmasına neden olduğu söylenebilir. Bu durum 50 cm ve 100 cm asılma yüksekliği için örtmeli FAR dağılım eğrilerini gösteren Şekil 3 ve 4'te açık bir şekilde görülmektedir. Aydınlatıcıların asılma yüksekliğinin artması durumunda, FAR değerlerinin azalmasına karşın tüm dikkate alınan alana ulaşan FAR değerlerinin birbirini örtmesi sonucu daha yüksek bir dağılım düzgünlüğünün oluştuğu görülmektedir.

İstatistiksel değerlendirmeye dayanan UC_4 , UC_5 , UC_6 ve EDI kriterleri incelendiğinde; UC_4 değerlerinin, yerleşim aralıklarına bağlı olarak artış gösterdiğini, buna karşılık asılma yüksekliği artışına bağlı olarak azaldığı görülmektedir. UC_4 değeri için verilen sınıflandırma kriterleri (I, II, III ve IV sınıfları için 0.13, 0.21, 0.25 ve 0.30) dikkate alındığında, en düşük iki asılma yüksekliği dışındaki yüksekliklerde genel olarak sınıflandırma sınırlarının içinde yer aldığı, birçok konumlandırmada da I. sınıf eş dağılımın sağlandığı söylenebilir. UC_5 (en düşük %75 ve %90 tercih edilir), UC_6 (en düşük 0.84) ve EDI (100 değerine yakınlık) için de verilen kriter değerleri dikkate alınarak incelendiğinde, benzer durumlar görülmüştür. Diğer bir ifadeyle, UC_4 , UC_5 , UC_6 ve EDI değerlendirme kriterlerinin birbirine oldukça yakın sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Genel olarak, örtüşme alanına ulaşan sadece en düşük, en yüksek ve ortalama FAR değerlerini dikkate alan UC_1 , UC_2 ve UC_3 değerlendirme kriterlerine göre, örtüşme alanındaki verilerin istatistiksel sonuçlarını dikkate alan UC_4 , UC_5 , UC_6 ve EDI değerlendirme kriterlerinin kullanılmasının daha sağlıklı olduğu söylenilebilir (Turn and Walker, 1987; Albright and Both, 1994; Deithzer et al., 1994; Both et al., 2002; Chen, 2005).

Çalışmada kullanılan A, B, C ve D tipi LED aydınlatıcılarda ölçülen güç tüketimleri sırasıyla 307, 197, 63 ve 56 W olarak gerçekleşmiştir.

SONUÇ

Çalışmada, sera aydınlatma sistemlerinde yaygın olarak tercih edilen, değişik firmalar tarafından üretilmiş dört farklı tipte (A, B, C ve D) LED ışık kaynağının tekil durumdaki FAR dağılımları belirlenmiştir. Bu ölçüm sonuçlarından yararlanılarak, LED ışık kaynaklarının farklı yerleşim aralıklarındaki örtmeli FAR dağılımları belirlenmiş ve farklı dağılım düzgünlüğü değerlendirme kriterine (UC_1 , UC_2 , UC_3 (sınıf I), UC_4 (sınıf I), UC_5 , UC_6 , EDI) göre ayrıntılı biçimde irdelenmiştir. Yapılan değerlendirmelerden ulaşılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- ✓ Günlük ışık birikimi açısından, A ve B tipi ışık kaynaklarının söz konusu yerleşim durumunda hem tam yapay hem de tamamlayıcı fotosentez aydınlatma uygulamalarında, C ve D tipi ışık kaynaklarının ise yalnızca tamamlayıcı fotosentez aydınlatma uygulamalarında kullanılabileceği söylenebilir.
- ✓ Tüm LED ışık kaynaklarının 100, 125 ve 150 cm asılma yüksekliğinde ve dikkate alınan yerleşim aralıkları için dağılım düzgünlüğü değerlendirme kriterlerine göre hesaplanan sonuçlarının kabul edilebilir bir dağılım düzgünlüğü ile FAR değerlerini bu bölgeye ulaştırabildiği belirlenmiştir.
- ✓ A tipi LED ışık kaynağı, tam yapay FAR enerjisi sağlayabilmektedir. Bu ışık kaynağının genel olarak 75 cm veya daha fazla asılma yüksekliklerinde uygun olacağı, daha düşük asılma yüksekliklerinde ise aydınlatıcı aralıklarının mümkün olduğunca yakın olması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

- ✓ B tipi LED ışık kaynağı sera bitkileri için gerekli günlük ışık birikimi değerlerini 31.6 ve 50 cm asılma yüksekliklerinde sağlamakta olup, daha yüksek asılma yüksekliklerinde ise tamamlayıcı ışık kaynağı olarak kullanılabilir. Bu tip aydınlatıcının asılma yüksekliği azaldıkça ve yerleşim konumlarındaki açıklık arttıkça dağılım düzgünlüğü azalmakta, ancak 100 cm ve daha yüksek asılma yüksekliklerinde kriterlere uygun dağılım düzgünlüğü değerlerine ulaşılmaktadır.
- ✓ C tipi LED ışık kaynağının günlük ışık birikimi değerleri açısından 100 cm ve üzerindeki asılma yüksekliklerinde kendilerinden beklenen etkiyi gösterme durumları oldukça düşüktür. Ayrıca bu tip aydınlatıcının FAR dağılım düzgünlüğü 50 cm ve daha az asılma yüksekliklerinde oldukça düşük olup, 125 cm ve daha yüksek asılma yüksekliklerinde ise günlük ışık birikimi değerleri çok düşmektedir. Bu nedenle, bu tip ışık kaynağının 75 cm veya 100 cm asılma yüksekliklerinde olması ve aynı zamanda dağılım düzgünlüğü açısından daha sık aralıklarla konumlandırılması ya da masa veya banko tipi yetiştiricilikte kullanılması uygun olacaktır.
- ✓ D tipi LED ışık kaynağının günlük ışık birikimi değerleri, C tipi ışık kaynağının değerlerine oldukça yakın bulunmuştur. Bu ışık kaynağı da dağılım düzgünlüğü açısından 100 cm ve üzeri asılma yüksekliklerinde ve daha sık aralıklarla konumlandırılması ya da masa veya banko tipi yetiştiricilikte kullanılması uygun olacaktır.

Ülkemizde LED ışık kaynaklı aydınlatıcıların ticari satışlarının mümkün olmasına rağmen teknik dokümanlarında FAR ile ilgili ihtiyaç duyulan bilgilere ulaşamamaktadır. Çalışma sonucunda elde edilen veriler, bu alanda imalat yapan sektör temsilcilerine aktarılarak, etkinliği daha yüksek LED ışık kaynaklarının imal edilmesi ve bunların yüksek dağılım düzgünlüğü ile kullanılması sonucunda aydınlatma sistemlerinde daha verimli çalışma ve enerji maliyetinde azalma sağlanacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmaya 2016-ZRF-024 No'lu proje çerçevesinde finansal destek sağlayan Ege Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

- Albright L.D., Both, A.J., 1994. Comparisons of luminaires: efficacies and system design. N96-18151: 281-298.
- Apogee, 2017, Owner's manual, quantum sensor model SQ-500, Apogee Instruments, Logan USA.
- Both, A.J., Ciolkosz, D.E., Albright L.D., 2002. Evaluation of light uniformity underneath supplemental lighting systems. Proc. 4th IS on Artif. Light. Acta Hort. 580, Ed. M. Dorias, ISHS. 183-190.
- Çağlayan, N., Ertekin, C., 2014. An adjustable LED lighting system for plant seedling production in controlled environment systems. Tarım Makinaları Bilimi Dergisi, 10 (2): 171-176.
- Chen, C., 2005. Fluorescent lighting distribution for plant micropropagation. Biosystems Engineering, 90 (3): 295–306.
- Ciolkosz, D.E., Both, A.J., Albright L.D. 2001. Selection and placement of greenhouse luminaires for uniformity. Applied Engineering in Agriculture, 17 (6): 106-113.
- Dayioğlu M.A., Silleli, H., 2012. Seralar için yapay aydınlatma sistemi tasarımı: Günlük ışık integrali yöntemi. Tarım Makinaları Bilimi Dergisi, 8 (2): 233-240.
- Deithzer, G., Langhans, R., Sager, J., Spomer, L.A., Tibbitts, T.W., 1994. Guidelines for lighting of plants in controlled environments. International Lighting in Controlled Environments Workshop, 391-393.
- Faust, J. E., 2004. Light Management in Greenhouses. FIRST Research Report, I. Daily Light Integral: A useful tool for the U.S. Floriculture Industry.
- Ferentinos, K.P., Albright, L.D., 2005. Optimal design of plant lighting system by genetic algorithms. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 18: 473-484.

- Fisher, P., Donnelly, C., 2001. Evaluating supplemental light for your greenhouse. Ohio Florists' Association Bulletin. 858: 4-7.
- Fisher, P., Runkle, E., 2004. Lighting up profits: understanding greenhouse lighting. Meister Media Worldwide, Willoughby, OH.
- Hart, W.E., 1961. Overhead irrigation by sprinkling. Agricultural Engineering, 42 (7): 354-355.
- <http://www.greenhouse.cornell.edu/structures/factsheets/Greenhouse%20Lighting.pdf>, Erişim: Kasım, 2015.
- Mahdavi, A., Pal, V., 1999. Toward an Entropy-based light distribution uniformity indicator. Journal of the Illuminating Engineering Society, 28:(1) 24-29.
- Mattson, N., 2015. Greenhouse Lighting. Cornell University,
- Ohno, Y., 2006. Optical metrology for LEDs and solid state lighting. Fifth Symposium Optics in Industry, (Eds: E. Rosas, R. Cardoso, J. C. Bermudez, O. Barbosa-García), Proceedings of SPIE 6046: 604625/1-8.
- Plantekno, 2017. Plantekno LED spektral ışık dağılımı. <http://plantekno.com/products/> Erişim: Şubat, 2017.
- Rea, M.S., 2000. The IESNA Lighting Handbook: Reference and Application. Illuminating Engineering Society of North America (IESNA), 9th Edition, New York.
- Thimijan, R.W., Heins, R.D., 1983. Photometric, radiometric, and quantum light units of measure - a review of procedures for interconversion. Hortscience, 18: 818-822.
- Torres, A.P., Lopez, R.G., 2012. Measuring daily light integral in a greenhouse. Purdue University Extension Service, HO-238-W.
- Turn, S.Q., Walker, P.N., 1987. Design and operation of a test facility for determining photosynthetic photon flux density distribution of luminaires for greenhouses. Transactions of the ASAE, 30 (2), 492-501.
- Uzun, B., Demir, V., 2012. Fotosentetik Aktif Radyasyon (FAR) ölçümlerinde LED ve fotodiyotların kullanımı. Journal of Agricultural Sciences, 18: 214-225.
- Ünal, H.B., V. Demir, H. Çoban, T. Günhan, H. İ. Yılmaz, İ. Öztürk, 2015. Gediz havzası Manisa yöresinde örtüaltı yetiştiriciliğinde örtü malzemesi kullanımının değerlendirilmesi. E.Ü. Ziraat Fakültesi Dergisi, 52 (3): 257-267.
- Yağcıoğlu, A. K., 2014. Tarımsal Elektrifikasyon. E.Ü.Z.F. Yayın No:488, 320 s.
- Yağcıoğlu, A. K., 2017. Sera Mekanizasyonu, E.Ü.Z.F. Yayın No:562, 377 s.
- Yağcıoğlu, A. K., Demir, V., Günhan, T., 2004. Seraya giren faydalı ışınım enerjisini hesaplamak için bir yöntem- I. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 41 (2):143-154.