

Dikey Tarım Tesislerinde Yapay Aydınlatma Prensipleri

Artificial Lighting Principles in Vertical Plant Factories

ÖZET

Işık, bitki büyüme ve gelişmesini düzenleyen en önemli faktörlerden biridir. Bitkiler için başta fotosentez olmak üzere birçok biyolojik ve fizyolojik olay, ışık ile düzenlenmektedir. Dikey tarım tesisleri gibi yoğun üretim yapılan alanlarda aydınlatmayı tümüyle sağlamak ya da doğal aydınlatmayı desteklemek amacıyla yapay aydınlatma elemanlarından yararlanılmaktadır. Bitkilerin ışık ihtiyacını ifade etmek için Fotosentetik Foton Akısı Yoğunluğu (PPFD), Fotosentetik Aktif Radyasyon (PAR), Günlük Işık İntegrali (DLI) gibi terimleri bilmek ve hesaplamaları bunlara göre yapmak gerekmektedir. Bitki yetiştiriciliği için ışığın şiddeti, kalitesi, periyodu, tekdüzeligi, yönü, polarizasyonu ve uyumluluğunun bilinmesi, ihtiyaç duyulan aydınlatmanın oluşturulmasına olanak sağlayacaktır. Günümüzde bitki gelişimini sağlayan aydınlatma armatürlerinde bu parametrelerden yalnızca ışığın şiddeti, kalitesi ve periyodu dikkate alınmaktadır. Bitkilerin gerçek ihtiyaçlarını tespit etmek ve ışığı bu ihtiyaçlara göre yönetmek, daha yüksek enerji verimliliğine sahip bir üretim sistemleri ortaya koymayı mümkün kılacaktır. Bu çalışmada dikey tarım tesislerinde kullanılan ışığın özelliklerine dair temel bilgiler verilmesi amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dikey tarım, topraksız tarım, yapay aydınlatma, ışık

Sorumlu Yazar

Temuçin Göktürk SEYHAN

seyhan@ankara.edu.tr

iD 0000-0003-4622-6059

Yazar

Sinem SEYHAN

sinem.seyhan@ankara.edu.tr

iD 0000-0002-2252-7335

Yazar

Hasan SİLLELİ

hsilleli@agri.edu.tr

iD 0000-0003-2242-3402

Yazar

Hasan YILMAZ

hasan@baharaydinlatma.com.tr

iD 0000-0001-8577-0327

Gönderilme Tarihi :

31 Ekim 2022

Kabul Tarihi :

26 Aralık 2022

ABSTRACT

Light is one of the most important factors regulating plant growth and development. Many biological and physiological events of plants, especially photosynthesis, are regulated by light. Artificial lighting elements are used to provide full lighting or supplemental lighting to sunlight in areas where production is intense such as plant factories. In order to express the light needs of plants, it is necessary to know terms such as Photosynthetic Photon Flux Density (PPFD), Photosynthetic Active Radiation (PAR), Daily Light Integral (DLI) and make calculations accordingly. Knowing the intensity, quality, period, uniformity, direction, polarization and compatibility of the light for plant cultivation will enable the creation of the required lighting. Today, only the intensity, quality and period of the light are taken into account among these parameters in lighting fixtures that provide plant growth. Identifying the real needs of the plants and managing the light according to these needs will make it possible to put forward a production system with higher energy efficiency. In this study, it is aimed to give basic information about the properties of light used in vertical farming facilities.

Keywords: Vertical farming, hydroponics, artificial lighting, light

GİRİŞ

Dikey tarım, bitkilerin yalnızca yere paralel olarak yanyana değil aynı zamanda katlar halinde üstüste yetiştirildiği bir topraksız tarım biçimidir. Bu sayede birim alanda daha fazla bitki üretilmesine olanak sağlamaktadır. Bitki fabrikaları ise üretim ortamının ve bitki büyümesinin yıl boyunca kontrol altında olduğu bitkisel üretim sistemleridir (Seyhan, Seyhan, Silleli ve Yılmaz, 2022). Dikey tarım tesislerinde yıl boyunca iklim koşullarına göre değişmeyen miktarda, kalitede ve değişmeyen maliyetle bitkisel üretim yapılmaktadır. Aynı zamanda temiz bir odada tamamen kontrollü şekilde üretilen bitkisel ürünler, pestisit kalıntısı olmadan doğrudan yenebilecek kalitede olmaktadır.

Işık, bitkilerin büyüme ve gelişmesi, fotosentezin düzenlenmesi, morfogenez, üreme ve diğer fizyolojik olaylardaki en önemli faktörlerden biridir (McNellis ve Deng, 1995). Bitkiler üzerinde ışığın etkisi; fotosentez

için enerji sağlamanın yanında metabolizma hızının ve büyümenin düzenlenmesi ile bitkinin hormon tepkilerinin oluşmasını sağlayacak yöndedir (Wang, Zhang, Zhao ve Yuan, 2001). Işığın farklı dalga boyları ve farklı enerji seviyelerinin bitkiler üzerinde farklı etkileri olduğu araştırmalarla ortaya konmuştur. Yalnızca ışığı düzenleyerek bitkilerin yaprak şekilleri, çiçeklenmesi, belirli fonksiyonel bileşenlerin daha fazla üretilmesi sağlanabilmektedir (Goto, 2012).

Dikey tarım tesislerinde bitkiler katlar halinde yerleştirildiğinden güneş ışığının kullanımı pek mümkün olmaması nedeniyle yetiştirilen bitkiye uygun yapıda yapay aydınlatma elemanları kullanmak gerekmektedir. Son dönemde dikey tarım tesislerinde yaygın olarak LED aydınlatma elemanları kullanılmaktadır. LED lambalar, katlar arasında sığabilecek yapıda küçük armatürler içine sığabilmekte ve bunun yanında verim değerleri oldukça yüksek olmaktadır.

Bu çalışmada; ışığın dikey tarım tesislerinde kullanılabilme parametrelerine ilişkin bilgiler derlenmiştir.

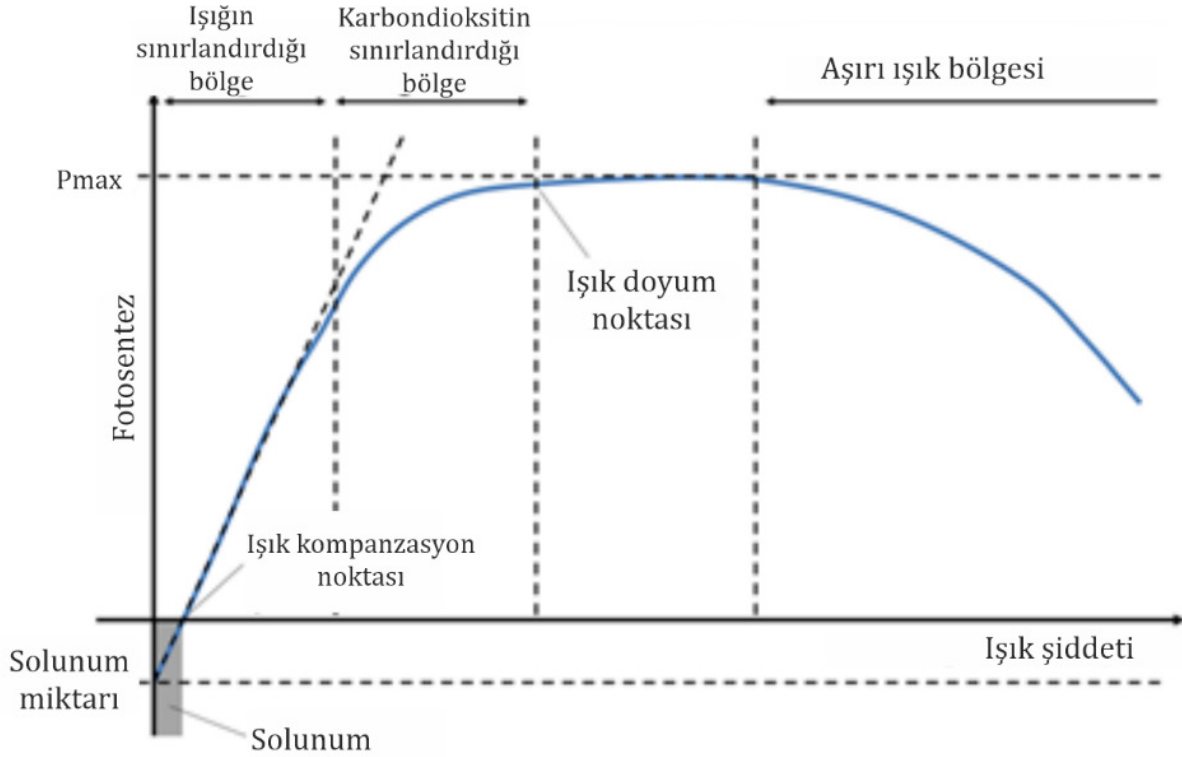
Işığın parametreleri

Bitki büyüme ve gelişmesi için en etkili spektrum, görülebilir (400 – 700 nm) spektrum ve çevresindeki dalga boylarıdır (UV ve IR). Bitkiler, spektrumun yeşil bölgesini görece az soğurduklarından yeşil renkte görünürler (Dou ve Niu, 2020). Bitkiye ulaşan ışığın bitkide yapacağı etkiyi tahmin edebilmek için ışığın bazı özelliklerini bilmek gerekmektedir. Bu özelliklerden kısaca “Işığın yedi boyutu” olarak bahsedilmektedir ve bunlar; ışığın şiddeti, kalitesi, periyodu, tekdüzeliği, yönü, polarizasyonu ve uyumluluğudur (Xu, 2019).

Işığın Şiddeti

Tarımda kullanılan ışığın şiddetinin ifadesi için PPFD değeri kullanılmaktadır. Birimi $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 'dir. Fotosentezde kullanılabilen spektrumdaki (PAR) fotonların bir metrekareye bir saniyede düşen miktarının Avogadro sayısı ($6,022 \times 10^{23}$) cinsinden ifade edilmesidir (Ge, Smith, Jacovides, Kramer ve Carruthers, 2011). Bir başka ışık ölçüm birimi olan lux ile PPFD arasında doğrudan bir çevrim imkânı bulunmamaktadır.

Bitkilerde solunum, ışık belirli bir seviyenin üzerine çıkana kadar fotosentezden daha hızlıdır. Fotosentez ile solunumun aynı hızda olduğu noktaya “kompanzasyon noktası” adı verilmektedir. Işık şiddeti arttıkça fotosentez bir noktaya kadar artmakta (doyum noktası) ve bu noktadan sonra ışığın şiddeti artsa dahi fotosentez hızı artmamaktadır. Işık şiddeti daha da artırılırsa fotosentez hızı düşmeye başlamaktadır (Benedetti, Vecchi, Barera ve Dall’Osto, 2018) (Şekil 1).



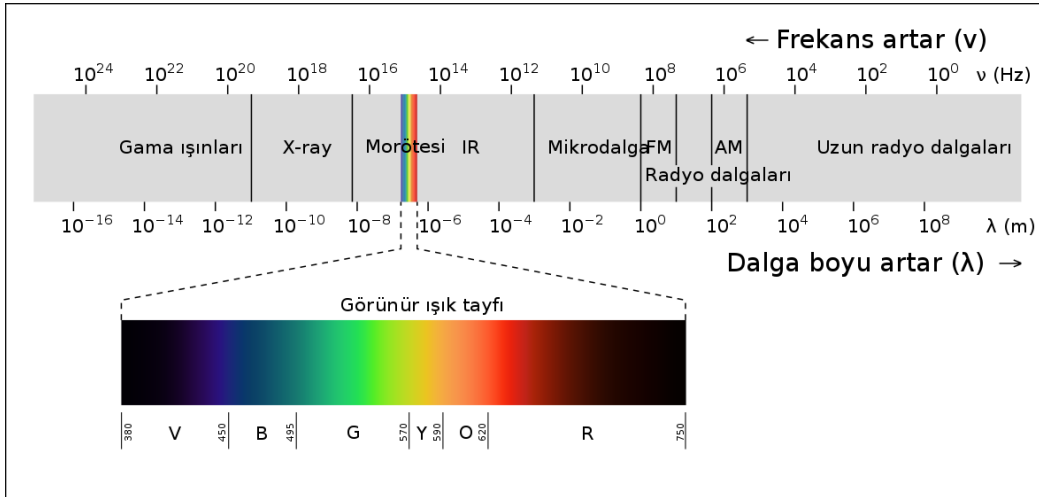
Şekil 1. Fotosentez hızı ile ışık seviyesi arasındaki ilişki

Işığın farklı şiddetlerinin çilek (*Fragaria × ananassa* Duch. cv. Benihoppe) fideleri üzerindeki etkilerini araştıran Zheng, Ji, He ve Niu (2019), 3 yapraklı aşamada sırasıyla 30, 90, 150 ve 210 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ışık şiddetinde 6 gün boyunca köklenme performansını, köklü bitkilerin ise sırasıyla 90, 180, 270 ve 360 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ışık şiddetinde 18 gün boyunca büyüme performansını incelemişlerdir. Fotoperiyodu 16 saat olarak ayarlanan hidroponik üretim şeklinde en yüksek kök sayısı (7,7) ve en yüksek kök uzunluğunun (14,8 cm) 90 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ışık kaynağı ile aydınlatılan bitkilerde olduğu tespit edilmiştir. Büyüme aşamasında ise yine 90 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ışık kaynağı altındaki bitkilerde daha yüksek fotosentetik aktivite görülürken 90 – 270 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ arasındaki ışık şiddetleri stomatal kondüktans, net fotosentez hızı ve büyüme hızını artırmıştır. Işık şiddeti 90 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 'den 270 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 'e çıkarıldığında köklü fidelerin taç çapı, sürgün ve kök

kuru ağırlıkları ile kök-gövde oranı sırasıyla %9,7, %38,8, %106,1 ve %48,7 artış göstermiştir. Ancak 360 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ışık şiddeti altında bitki büyümesi artış göstermemiştir. 180 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ve 270 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ grupları arasında bitkiye ulaşan fotonların miktarı başına kuru biyokütlede meydana gelen artışta önemli bir fark bulunmamıştır. Yazarlar, bitki fabrikalarında enerji verimliliği ve kalite bakımından çilek üretiminde köklenme döneminde 90 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, fide aşamasında ise 270 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ışık şiddeti önermişlerdir.

Işığın Kalitesi

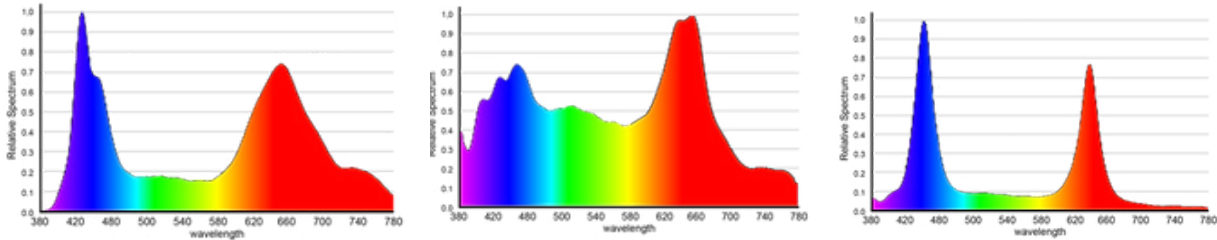
Işık, insan gözünün algılayabildiği dalga boylarındaki elektromanyetik spektrum bölgesidir (CIE, 2020). Görünür ışık tayfının elektromanyetik dalga spektrumu içindeki yeri, Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Elektromanyetik dalga spektrumu ve görünür ışık (Ronan, 2007)

Tarımsal aydınlatmada ışığın kalitesi, ışığın spektral kompozisyonudur. Bitkisel üretimde ışığın farklı dalga boylarının farklı etkileri olmaktadır. İnsan gözüne aynı renkte görülen farklı aydınlatma elemanları, farklı spektral kompozisyona sahip olabilirler. Günümüz teknolojisi ile dikey tarım tesislerini aydınlatmak için kullanılan LED lambalar, geniş ve dar spektrumlarda üretilebilmektedir.

LED lambalar, bir armatür içine çeşitli spektrumlarda LED çiplerinin çeşitli adetler ve dizilimlerle birleştirilmesi ile üretilmektedir. Böylece çok farklı spektral kompozisyonlar elde edilebilmektedir. Şekil 3'te farklı amaçlarla tasarlanmış üç farklı LED armatürün spektral dağılımı verilmiştir (Anonim, 2022).



Şekil 3. Farklı üç LED armatürün spektral dağılımı

Mavi dalga boyundaki ışık, düşük enerji seviyesine sahiptir. Bitki boyu uzamasını kısıtlamakta ve yaprakların daha kalın, koyu renkli ve küçük olmasına neden olmaktadır. Spektrumun orta bölgesine denk gelen dalga boylarındaki yeşil ışığın, bitkiler tarafından yansıtıldığı veya geçirildiği için daha az kullanıldığı bilinmektedir. Ancak son zamanlarda yapılan çalışmalarda fotosentez hızını ve biokütle artırdığı belirlenmiştir (Kim, Goins, Wheeler ve Sager, 2004). Kırmızı dalga boyundaki ışık ise mavi ışığa göre yüksek enerji seviyesine sahiptir ve bitkilerin uzun

boylu, ince ve geniş yapraklı olmasına sebep olur.

Kırmızı (Red – R) : uzak kırmızı (Far red – FR) oranı, fidelerin morfolojik davranışları üzerine etkilidir (McNellis ve Deng, 1995). Bu oran azaldıkça, bitkilerin gölgeden kaçınma davranışları geliştirdiği gözlenir. Bu davranış kapsamında fideler, yaprak kalınlığı ve yüzeyini artırarak daha fazla ışık almaya yönelmektedir (Kendrick ve Kronenberg, 1994). Kaliteli ürün elde etmek için kırmızı, mavi ve diğer dalga boylarındaki ışığın dengeli bir şekilde bitkiye ulaşması gerekmektedir.

Dikey tarım tesislerinde kullanılacak yapay aydınlatma elemanlarının spektrumlarının genelde klorofil taneciklerinin en çok soğurduğu kırmızı ve mavi dalga boylarında üretilmesi söz konusu olsa da son zamanlarda yapılan bazı çalışmalar, uygulanan spektruma yeşil, sarı, turuncu, ultraviyole (UV) ve infrared (IR) gibi dalga boylarının eklenmesi durumunda bitkide farklı fizyolojik değişimler ve farklı kimyasalların üretiminin desteklendiği veya inhibe edildiğini bildirmektedir (Çağlayan ve Ertekin, 2018; Folta, 2004; Folta ve Maruhnich, 2007; Kim, vd., 2004; Lin, Huang, Huang, Hsu, Yang ve Yang, 2013; Viršilė, Olle ve Duchovskis, 2017).

Işığın Periyodu

Işık bitkilere gün içinde belirli bir süre boyunca verilmekte, geri kalan süre de karanlık olarak geçirilmektedir. Güneş ışığıyla aydınlatılan tarım alanlarında sabah yavaş yavaş artan bir eğri ile şiddetini artırıp sonrasında yavaş yavaş azalarak karanlık evreye geçilirken, dikey tarım tesislerinde ışık kaynakları ile genellikle aynı anda başlayan tam şiddette aydınlatma yapılmakta ve ışıklar aynı anda sönmektedir. Bitkilerin aydınlık ve karanlık evrelerde geçirdiği sürelerin toplamına gün uzunluğu denilmektedir. Kapalı dikey tarım tesislerinde gün uzunluğu istenen uzunlukta ayarlanabilmektedir (Fukuda, Tanigaki ve Moriyuki, 2018). Ancak yapılan bir araştırmada (Tanigaki

ve Fukuda, 2019) 20 saat, 24 saat ve 28 saatlik gün uzunluklarının marul bitkisi üzerindeki etkileri incelenmiş ve en yüksek bitki yaş ağırlığı 24 saatlik gün uzunluğunda bulunmuştur. Bitkilerin bünyesinde gerçekleşen hormonal olayların değişimine bağlı olan sirkadiyen ritim, 24 saatlik gün uzunluğunda doğru şekilde çalışmaktadır. Sirkadiyen ritim, bitkilerin günün saatini tahmin etmelerine yarayan ve dünyanın kendi etrafındaki dönüşünden kaynaklanan çevresel olaylar (ışık, sıcaklık, vb.) tarafından tetiklenen biyolojik saat olarak tanımlanmaktadır (Dodd, Kusakina, Hall, Gould ve Hanaoka, 2014). Sirkadiyen ritim, bitkinin vejetatif ve generatif gelişimi üzerinde etkilidir (Fukuda vd., 2018).

Bitkilerin gün içinde aldıkları toplam foton miktarını ifade etmek için Günlük Işık İntegrali (DLI) kavramı kullanılmaktadır (Dayıoğlu ve Silleli, 2012). DLI'nın birimi $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}$ 'dir. Dikey tarım sistemlerinde genellikle yaprağı yenen sebzeler yetiştirildiğinden DLI ihtiyacının 12-17 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}$ arasında olması beklenmektedir (Runkle, 2019).

Açıkta yetiştiricilikte DLI değerinin, güneşten genel toplam ışınım değerinden hesaplanması veya gün boyunca ölçülmesi gerekmektedir ancak dikey tarım tesislerinde yapay aydınlatma kullanıldığı için anlık PPFd değeri kullanılarak Eşitlik 1 yardımıyla DLI değeri kolaylıkla hesaplanabilmektedir.

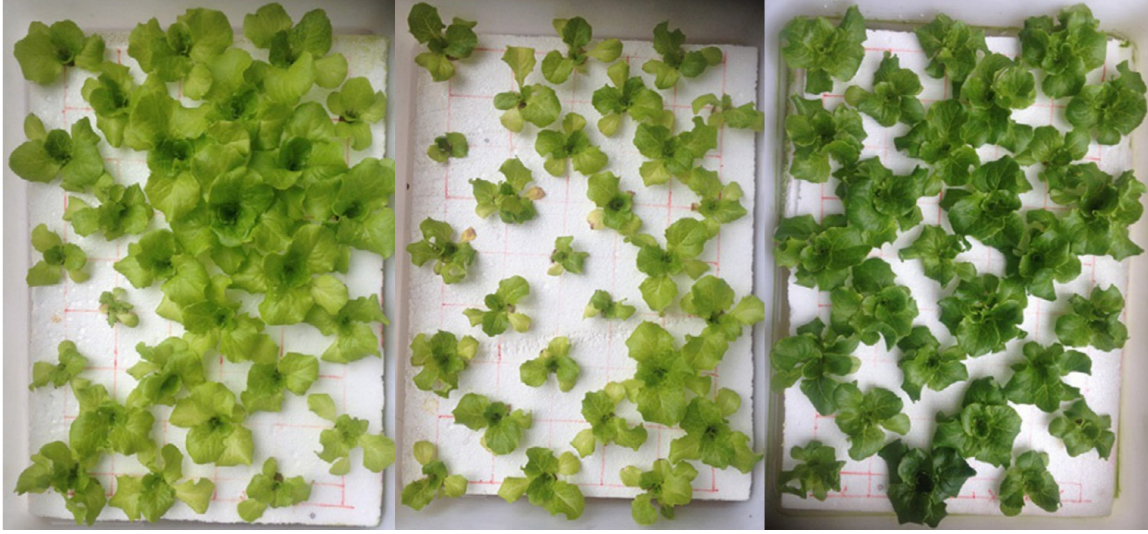
(1)

Yapılan bir araştırmada (Xu, 2016) 24 saatlik gün uzunluğu içinde farklı PPFd değerlerine sahip aydınlatma elemanları ile farklı açık/kapalı aydınlatma periyotlarıyla aynı DLI değerine ulaşacak şekilde marul (*Lactuca sativa* L.) bitkileri yetiştirilmiştir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Deneme grupları (Xu, 2016)

Deneme	PPFD	Periyot	DLI
A	200	10 dk ON 10 dk OFF	8,64
B	154	13 dk ON 7 dk OFF	8,64
C	100	Sürekli Açık	8,64

21 gün süren denemeden sonra bitkilerin gelişim durumu Şekil 4'te görülmektedir. En iyi gelişim C örneğinde tespit edilmiştir. Araştırma sonucunda bitkilerin, aynı oranda enerji topluyor olsalar dahi aydınlatma periyoduna göre farklı tepkiler verdiği tespit edilmiştir.

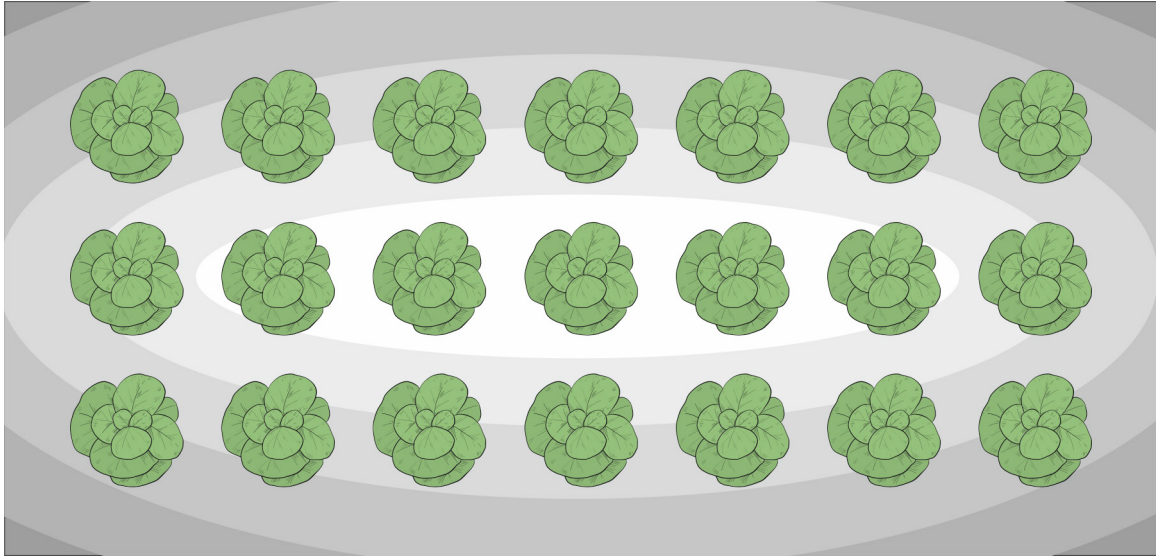


Şekil 4. Sırasıyla A, B ve C denemeleri (Xu, 2016)

Işığın Tekdüzeliliği

Bitkilerin dikili olduğu yetiştirme alanını üzerinde ışık şiddeti ve spektral özelliklerinin eşit şekilde dağılması, optimum ve yeknesak gelişim için önemlidir. Genellikle

dikey tarım tesislerinde bir yetiştirme alanının orta bölgesinde yüksek, kenarlara gidildikçe azalan ışık şiddetine sahip olduğu görülmektedir (Xu, 2016) (Şekil 5). Bu durum, bazı bitkilerin diğerlerine göre daha fazla ışık alması anlamına gelmektedir.



Şekil 5. Dikey tarım tesislerinde yapay aydınlatma tekdüzeliliği

Tüm bitkilerin eşit ışık almasını sağlamak için armatür ile bitki arasındaki mesafe ile armatür aydınlatma açısının uygun seçilmesi gerekmektedir. Şekil 6'da piyasada ticari olarak bulunan bir armatürün üç farklı askı yüksekliği

için altındaki 1,5m x 1,5m alanda yaptığı PPFD dağılımı verilmiştir. Armatür ile yetiştirme alanı arasındaki mesafe arttıkça ışık dağılımı düzensizliği artmakta fakat merkezdeki PPFD değeri düşmektedir.

30 cm										40 cm										100 cm									
329	496	700	704	731	730	635	531	509	429	419	561	710	797	807	817	724	590	607	542	744	749	798	795	734	756	731	682	757	762
412	737	1041	1115	1107	1101	1130	1016	763	571	555	699	906	1028	1040	1010	1039	933	740	680	738	796	876	830	821	813	822	813	774	752
586	779	1321	1609	1587	1580	1510	1339	941	748	677	916	1205	1442	1445	1378	1335	1244	913	803	781	831	869	907	903	890	880	864	801	826
774	1007	1413	1706	1804	1795	1702	1585	1057	875	857	1016	1258	1508	1585	1613	1517	1414	1008	918	829	852	895	934	948	933	937	911	838	855
881	1173	1499	1843	1883	1882	1791	1666	1142	816	926	1017	1341	1652	1687	1716	1622	1488	1087	937	840	889	903	956	979	961	957	940	871	880
822	1247	1485	1854	1894	1893	1845	1708	1204	859	890	1052	1328	1653	1716	1730	1658	1552	1116	953	857	891	900	856	967	981	966	945	880	886
754	1170	1401	1790	1891	1853	1837	1647	1097	757	811	1097	1296	1578	1678	1680	1613	1493	1119	866	775	839	855	924	962	964	951	930	865	825
722	1020	1448	1695	1777	1700	1691	1502	994	635	711	966	1197	1467	1550	1540	1465	1311	960	817	740	804	828	910	943	937	941	896	802	770
538	849	1068	1304	1299	1317	1313	1193	792	587	688	800	985	1197	1232	1292	1183	1025	735	648	663	732	824	894	916	894	902	831	739	658
449	583	685	849	991	861	901	819	628	491	574	594	773	930	936	952	965	877	812	627	563	687	728	860	891	889	813	763	745	702

Şekil 6. Farklı askı yüksekliğine göre PPFd değişimi (Anonymous, 2022)

Işığın Yönü

Bitkiler ışığa doğru yönelme eğilimi göstermektedir. Özellikle mavi ışığa karşı duyarlı olan fotoreseptörler sayesinde bitkilerin ışığa yönelmesine “fototropizm” adı verilmektedir (Folta ve Maruhnich, 2007). Günümüzde fototropizmin altında yatan biyokimyasal, moleküler ve hücrel aktiviteler ile ilgili araştırmalar yürütülmektedir (Liscum, Askinosie, Leuchtman, Morrow, Willenburg ve Coats, 2014). Bazı dik olarak gelişen bitkilerde ise yukarıdan gelen ışığın bitki tarafından alınması zordur. Örneğin taze soğan yetiştirilmek istendiğinde ışığın büyük bir kısmı bitkiye ulaşmamaktadır. Bu nedenle dikey tarım tesislerinde geniş yapraklı ve görece büyük çapa ulaşan bitkilerin üretimi daha verimli olmaktadır (Kim, Huh ve Ko, 2021).

Işığın Polarizasyonu

Işık, bir elektromanyetik dalga biçimidir (Zwinkels, 2014). Neredeyse tüm kaynaklardan çıkan ışık, mümkün olan her yöne doğru hızla yayılmaktadır. Bu durumdaki ışık dalgaları rastgele titreşmektedir. Polarize ışıkta ise tüm ışık dalgaları aynı yönde titreşerek bitki yüzeyine ulaşmaktadır. Tüm ışık dalgalarının bitki yüzeyine dik olarak gönderilebilmesi durumunda ışığın bitkinin iç dokularına girerek etkinliğinin artması mümkündür. Işığın polarizasyonu çeşitli filtreler ile mümkündür. Polarize edilmiş ışığın, edilmemiş olana göre dokuların içine daha çok girişim yapabildiği bilinmektedir. Polarize ışıkla bitki

aydınlatması üzerine yapılmış çalışmalar bulunmakta birlikte bu konunun daha detaylı bir şekilde araştırılması gerekmektedir (Shibayev ve Pergolizzi, 2010; Vanderbilt, Grant ve Daughtry, 1985).

Işığın Uyumluluğu

Doğal ve yapay ışık kaynaklarından çıkan fotonların her biri kendi enerji seviyesi, frekansı, polarizasyonu ve yönüne sahiptir. Bu tipteki ışığa “uyumsuz ışık” denmektedir. Bu türdeki ışıkta fotonlar arasında herhangi bir ilişki bulunmamaktadır. Yalnızca lazer kaynağından çıkan ışık, belirli frekansta elektromanyetik dalgalar kullanılarak elde edildiğinden ortaya çıkan fotonlar birebir aynı dalgaboyunda ve aynı fazdadır (Kielich, 1970). Bu haldeki fotonlar bir araya geldiklerinde daha yüksek genliğe sahipmiş gibi davranmaktadır. Dolayısıyla bitkide meydana getirdiği etkinin daha yüksek olduğu, araştırmalarla ortaya konmuştur (Aguilar, Domingues ve Cruz-Orea, 2015).

SONUÇ

Dikey tarım tesislerinde yapılacak yapay aydınlatma için ışığın yedi boyutu olarak tanımlanan özelliklerden üç tanesi oldukça önem taşımaktadır. Bu özelliklerden, uygun şiddete, uygun kaliteye ve periyoda sahip olarak yapılacak aydınlatma, bitkisel üretim için yeterli olmaktadır. Yukarıda bahsedilen ışığın tekdüzeliği, yönü, polarizasyonu ve uyumluluğu gibi diğer özellikleri, gelecekte yapılacak çalışmalarda araştırılması gereken konular olarak karşımıza çıkmaktadır.

Dikey tarım tesislerinde yapay aydınlatma için LED lambalar tavsiye edilmektedir (Yan, Zhou ve Li, 2016). Bitki fabrikalarındaki ilk yatırım maliyetinin %40'a yakın kısmını (Zeidler, Schubert ve Vrakking, 2017) aydınlatma oluşturmaktadır. Ayrıca işletme maliyetleri içinde %28 civarında pay alan elektriğin yaklaşık %60'ı da aydınlatma için harcanmaktadır (Avgoustaki ve Xydis, 2020).

Aydınlatma maliyetini düşürecek çalışmalar yapılması, dikey tarım tesislerinin yapılabilme olanaklarını ciddi oranda artıracaktır. Katlı yapısından dolayı kullanımı kısıtlı olan güneş ışığının, çeşitli ışık taşıma sistemleri (yansıtıcı borular, fiber optik kablolar) aracılığıyla dikey tarım sistemlerinde kullanma olanaklarının araştırılması gerekmektedir.

AÇIKLAMA

Bu makalede araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur. Bu araştırma için etik kurul izni ve/veya yasal/özel izin alınmasına gerek duyulmamıştır. Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır. Makalede yazarlar eşit oranda katkı sağlamıştır.

Bu makalenin özeti, 07-09 Eylül 2022 tarihleri arasında Bilecik'te gerçekleştirilmiş olan 34. Ulusal Tarımsal Mekanizasyon ve Enerji Kongresi'nin Özet ve Bildiri Kitabı'nda yayınlanmıştır.

KAYNAKLAR

- Aguilar, C., Dominguez Pacheco, A., Cruz-Orea, A. (2015). Thermal Changes of Maize Seed by Laser Irradiation. *International Journal of Thermophysics*, 36. <https://doi.org/10.1007/s10765-015-1882-7>
- Anonim, 2022. *Yetiştirme Modülleri | SPECTBEE*. <https://www.spectbee.com/kopyas%C4%B1-dok%C3%BCl%C3%BCr%C3%BC-armat%C3%BCrleri> Erişim tarihi: 19/12/2022
- Anonymous. (2022). *Lumatek Zeus 1000W Pro Spec Sheet*. <https://lumatek-lighting.com/lumatek-zeus-1000w-pro/> Erişim tarihi: 19/12/2022
- Avgoustaki, D. D., Xydis, G. (2020). Plant factories in the water-food-energy Nexus era: a systematic bibliographical review. *Food Security*, 12(2), 253-268. <https://doi.org/10.1007/s12571-019-01003-z>
- Benedetti, M., Vecchi, V., Barera, S., Dall'Osto, L. (2018). Biomass from microalgae: the potential of domestication towards sustainable biofactories. *Microbial Cell Factories*, 17(1), 173. <https://doi.org/10.1186/s12934-018-1019-3>
- CIE. (2020). ILV: International Lighting Vocabulary, 2nd Edition. *CIE S 017/E:2020*. <https://doi.org/10.25039/S017.2020>
- Çağlayan, N., Ertekin, C. (2018). Farklı Dalga Boylu LED Işıklarının Yeşil Yapraklı Bitkilerin Gelişimi Üzerindeki Etkileri. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 14 (2), 105-114.
- Dayıoğlu, M. A., Silleli, H. (2012). Seralar için Yapay Aydınlatma Sistemi Tasarımı: Günlük Işık İntegrali Yöntemi. İçinde *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi* 8(2), 233-240.
- Dodd, A. N., Kusakina, J., Hall, A., Gould, P. D., Hanaoka, M. (2014). The circadian regulation of photosynthesis. *Photosynthesis Research*, 119(1-2), 181-190. <https://doi.org/10.1007/s11120-013-9811-8>
- Dou, H., Niu, G. (2020). Chapter 9- Plant responses to light. Kozai, G. Niu, M. Takagaki (Eds.), *Plant Factory (Second Edition)*, 153-166. Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00009-1>
- Folta, K. M. (2004). Green Light Stimulates Early Stem Elongation, Antagonizing Light-Mediated Growth Inhibition. *Plant Physiology*, 135(3), 1407-1416. <https://doi.org/10.1104/pp.104.038893>
- Folta, K. M., Maruhnich, S. A. (2007). Green light: a signal to slow down or stop. *Journal of Experimental Botany*, 58(12), 3099-3111. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm130>
- Fukuda, H., Tanigaki, Y., Moriyuki, S. (2018). *Detection and Utilization of Biological Rhythms in Plant Factories*.
- Ge, S., Smith, R. G., Jacovides, C. P., Kramer, M. G., Carruthers, R. I. (2011). Dynamics of photosynthetic photon flux density (PPFD) and estimates in coastal northern California. *Theoretical and Applied Climatology*, 105(1-2), 107-118. <https://doi.org/10.1007/s00704->

- 010-0368-6
- Goto, E. (2012). Plant Production in a Closed Plant Factory with Artificial Lighting. *Acta Horticulturae*, 956, 37-49. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.956.2>
- Kendrick, R. E., Kronenberg, G. H. M. (1994). Photomorphogenesis in Plants. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-1884-2>
- Kielich, S. (1970). Optical harmonic generation and laser light frequency mixing processes in nonlinear media. *Opto-Electronics*, 2(3), 125-151. <https://doi.org/10.1007/BF01415090>
- Kim, H.-H., Goins, G. D., Wheeler, R. M., Sager, J. C. (2004). Green-light Supplementation for Enhanced Lettuce Growth under Red- and Blue-light-emitting Diodes. *HortScience HortSci*, 39(7), 1617-1622. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.39.7.1617>
- Kim, K. Y., Huh, J. H., Ko, H. J. (2021). Research on crop growing factory: Focusing on lighting and environmental control with technological proposal. *Energies*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/en14092624>
- 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). *Scientia Horticulturae*, 150, 86-91. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2012.10.002>
- Liscum, E., Askinosie, S. K., Leuchtman, D. L., Morrow, J., Willenburg, K. T., Coats, D. R. (2014). Phototropism: Growing towards an Understanding of Plant Movement. *The Plant Cell*, 26(1), 38-55. <https://doi.org/10.1105/tpc.113.119727>
- McNellis, T. W., Deng, X.-W. (1995). Light control of seedling morphogenetic pattern. *Plant Cell*, 7(11), 1749-1761.
- Ronan, P. (2007). EM Spectrum. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_spectrum.svg Erişim tarihi: 07/09/2022
- Runkle, E. (2019). DLI 'Requirements'. <https://gpnmag.com/article/dli-requirements/> Erişim tarihi: 07/09/2022
- Seyhan, S., Seyhan, T. G., Silleli, H., Yılmaz, H. (2022). Bitki fabrikalarında kontrol edilen parametreler ve kontrol yöntemleri. İçinde *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi* 13(2), 153-159. <https://doi.org/10.24012/dumf.1058651>
- Shibayev, P. P., Pergolizzi, R. G. (2010). The Effect of Circularly Polarized Light on the Growth of Plants. *International Journal of Botany*, 7(1), 113-117. <https://doi.org/10.3923/ijb.2011.113.117>
- Tanigaki, Y., Fukuda, H. (2019). Chapter 2.4 – Control Theory in the Metabolic Rhythms of Plants. M. Anpo, H. Fukuda, T. Wada (Eds.), *Plant Factory Using Artificial Light*, 89-98. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813973-8.00009-9>
- Vanderbilt, V. C., Grant, L., Daughtry, C. S. T. (1985). Polarization of light scattered by vegetation. *Proceedings of the IEEE*, 73(6), 1012-1024. <https://doi.org/10.1109/PROC.1985.13232>
- Viršilė, A., Olle, M., Duchovskis, P. (2017). LED Lighting in Horticulture. S. Dutta Gupta (Ed.), *Light Emitting Diodes for Agriculture: Smart Lighting*, 113-147. Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5807-3_7
- Wang, Y., Zhang, H., Zhao, B., Yuan, X. (2001). Improved growth of artemisia annua L hairy roots and artemisinin production under red light conditions. *Biotechnology Letters*, 23(23), 1971-1973. <https://doi.org/10.1023/A:1013786332363>
- Xu, Y. (2016). Seven dimensions of light in regulating plant growth. *Acta Horticulturae*, 1134, 445-452. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.56>
- Xu, Y. (2019). Chapter 2.1 – Nature and Source of Light for Plant Factory. M. Anpo, H. Fukuda, T. Wada (Ed.), *Plant Factory Using Artificial Light*, 47-69. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813973-8.00002-6>
- Yan, C., Zhou, H., Li, J. (2016). Safety production based LED light system design for plant factories. *2016 13th China International Forum on Solid State Lighting (SSLChina)*, 97-100. <https://doi.org/10.1109/SSLCHINA.2016.7804360>

- Zeidler, C., Schubert, D., Vrakking, V. (2017). *Vertical Farm 2.0: Designing an Economically Feasible Vertical Farm – A combined European Endeavor for Sustainable Urban Agriculture*.
- Zheng, J., Ji, F., He, D., Niu, G. (2019). Effect of Light Intensity on Rooting and Growth of Hydroponic Strawberry Runner Plants in a LED Plant Factory. *Agronomy*, 9(12), 875. <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy9120875>
- Zwinkels, J. (2014). Light, Electromagnetic Spectrum. R. Luo (Ed.), *Encyclopedia of Color Science and Technology*, 1-8. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27851-8_204-1