

## LED Işık Kaynaklı Solar Simülatörler Üzerine İnceleme

Ali Samet SARKIN<sup>1\*</sup>, Taner DİNDAR<sup>2</sup>, Vedat ESEN<sup>3</sup>, Yasin CENGİZ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Kadirli Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 80760, Osmaniye

<sup>2</sup>Ankara Üniversitesi, Nallıhan Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 06920, Ankara

<sup>3</sup>İstanbul Topkapı Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 34087, İstanbul

<sup>4</sup>Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, 41380, Kocaeli

<sup>1</sup><http://orcid.org/0000-0001-6261-0531>

<sup>2</sup><http://orcid.org/0000-0002-4112-2114>

<sup>3</sup><http://orcid.org/0000-0001-6230-6070>

<sup>4</sup><http://orcid.org/0000-0003-0186-6319>

\*Sorumlu yazar: sametsarkin@osmaniye.edu.tr

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 30.05.2022

Kabul tarihi:05.09.2022

Online Yayınlanma: 12.12.2022

#### Anahtar Kelimeler:

LED

Solar simülatör

Fotovoltaik

Spektrum

Işık kaynağı

Dalgaboyu

### ÖZ

Bu çalışmada; fotovoltaik cihazların testlerini gerçekleştiren ve son yıllarda kullanımı giderek artan LED ışık kaynaklı solar simülatörler incelenmiştir. Bu amaçla giriş kısmında yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisinin önemi vurgulanmış, solar simülatörlerin tanımı ve gerekliliği açıklanmıştır. Sonraki bölümlerde ise güneş ışığı detayları belirtilmiş, solar simülatörlerde kullanılan diğer ışık kaynakları incelenmiş, LED ışık kaynaklarının diğerlerine göre farkları ortaya konulmuştur. LED solar simülatörler için ASTM E927-10 ve IEC- 60904-9 standartlarında belirtilen performans kriterleri detaylandırılmış ve bu kriterlerin belirlenmesindeki değerler formüle edilmiştir. Yine aynı standartlar doğrultusunda LED solar simülatörler konusunda gerçekleştirilen bilimsel çalışmalar incelenmiş ve kronolojik olarak detaylandırılmıştır. Çalışmanın sonunda solar simülatörlerde kullanılan ışık kaynaklarının avantaj ve dezavantajları bir tablo halinde sunulmuştur. Karşılaştırma sonrasında solar simülatörlerde ışık kaynağı olarak kullanılan LED'lerin önemi ve gerekliliği vurgulanmıştır.

## Survey on LED Light Source Solar Simulators

### Research Article

#### Article History:

Received: 30.05.2022

Accepted: 05.09.2022

Published online: 12.12.2022

#### Keywords:

LED

Solar simulator

Photovoltaics

Spectrum

Light sources

Wavelength

### ABSTRACT

In this study; LED light source solar simulators, which test photovoltaic devices and whose use has been increasing in recent years, have been examined. For this purpose, the definition and necessity of solar simulators are explained by emphasizing the importance of solar energy one of the renewable energy sources, in the introduction part. In the next chapters, the details of sunlight are specified and other light sources used in solar simulators are examined, and the differences between LED light sources compared to others are revealed. For LED Solar simulators, the performance criteria specified in ASTM E927-10 and IEC-60904-9 standards have been detailed and the values in determining these criteria are formulated. Again, in line with the same standards, scientific studies on LED solar simulators were examined and detailed chronologically. At the end of the study, the advantages and disadvantages of light sources used in solar simulators are presented in a table. After the comparison, the importance and necessity of LEDs used as light sources in solar simulators are emphasized.

**To Cite:** Sarkin AS., Dindar T., Esen V., Cengiz Y. LED Işık Kaynaklı Solar Simülatörler Üzerine İnceleme. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2022; 5(3): 1438-1452.

## 1. Giriş

Enerji, ülkelerin sosyal gelişimi ve ekonomik kalkınmasında en önemli etkidir ve enerji olmadan modern toplumdaki söz edilemez (Tükenmez ve Demireli, 2012). Günümüzde ülkelerin gelişmişliği, kişi başına tüketilen enerji miktarı ile ölçülmektedir (Çapık ve ark., 2012). Ekonomik kalkınma ve gelişen teknoloji ile birlikte insanların enerjiye olan ihtiyacı her geçen gün daha da artmaktadır. Bu durum, sera gazı etkisi nedeniyle küresel ısınmaya yol açan, giderek tükenmekte olan ve elde edilme maliyeti artan fosil yakıtlar yerine dünyada temel bileşen haline gelmiş olan yenilenebilir enerji kaynaklarının ortaya çıkmasına neden olmuştur (Öcal ve Aslan, 2013; Alagöz, 2021). 1970'lerdeki enerji krizinden bu yana özel kuruluşlar ve kamu kurumları, fosil yakıtların neden olduğu sorunları aşmak için yenilenebilir enerji çalışmalarına hız ve destek vermiş, bunun sonucunda son yıllarda bu konuyla ilgili uygulamalar hız kazanmıştır (Liao ve ark., 2011). Yenilenebilir enerji kaynakları, çevrenin korunmasına katkı sağlamasının yanı sıra enerjide dışa bağımlılığı azaltması, kolay erişilebilirlik ve kullanılabilirlik özelliklerinden dolayı tüm ülkeler tarafından benimsenmiştir (Gök ve Kavasoglu, 2013). Yenilenebilir enerji kaynaklarına bakıldığında, rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi, su gücü, biyolojik yakıt enerjisi ve dalga gücü gibi kaynaklar görülmektedir. Ancak, yıllar içerisinde yapılan çalışmalar rüzgâr ve güneş enerjisinin elektrik enerjisine doğrudan dönüşümünün daha pratik ve kolay olduğunu göstermektedir (Twidell ve Weir, 2015). Güneş enerjisi, ısıtma, konutların ve ticari binaların aydınlatması, endüstriyel ısıtma ve soğutma uygulamaları için direkt olarak kullanılır. Aynı zamanda güneş enerjisi fotovoltaik güneş hücreleri kullanılarak doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülür (Barış ve Küçükali, 2012). Çevre dostu olması, potansiyelinin yüksek olması, kullanımının diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre kolay olması, güneş enerjisinin daha kolay yaygınlaşmasını sağlamaktadır. Kurulum maliyetlerinin yüksekliği, veriminin ve kapasite faktörünün düşük olması gibi ekonomik ve teknik zorlukları her geçen gün aşıldıkça güneş enerjisi tüm dünyada daha cazip hale gelecektir.

Fotovoltaik sistemlerin kullanımının artmasıyla birlikte, kullanılacak güneş pillerinin güvenilirliğini sağlamak için performanslarını test etmek en önemli konu haline gelmektedir (Kohraku ve Kurokawa, 2006). Hızla gelişen teknolojiler ve yapılan çalışmalarla birlikte fotovoltaik güneş panellerinin giderek daha da karmaşık yapılara dönüşmesi, panellerin akım-gerilim (I-V) karakteristiğinin çıkarılmasında zorluklara yol açmaktadır. Bu nedenle yapılacak testlerde solar simülatörlerin kullanılması kaçınılmaz hale gelmektedir. Fotovoltaik panellerin verimli hale gelmesi, panellerin üretiminde kullanılan tüm malzeme ve teknolojilerinin elektriksel ve optik açıdan sağlıklı bir şekilde test edilmesine bağlıdır (Dennis ve ark., 2012). Böylelikle gelecekteki enerji standartları da göz önüne alındığında gerçek gün ışığına yakın spektrum değerlerinin elde edileceği solar simülatörlerin kullanılması bir zorunluluk olmaktadır (Bliss ve ark., 2009).

Solar simülatörler güneş ışığına benzer yoğunlukta spektral kompozisyon sunan cihazlardır. Yaygın olarak kontrol edilebilen kapalı bir sisteme sahip olan solar simülatörler, güneş ışığına duyarlı olan

güneş hücreleri, güneş panelleri, plastikler ve diğer materyaller için laboratuvar koşullarını sunarlar (Esen ve ark., 2017). Solar simülatörler genellikle ışık kaynağı ve buna bağlı güç kaynağı, gereksinimleri karşılamak için ışın yönlerini değiştiren herhangi bir optik ve filtre, simülatörü çalıştırmak için gerekli kontroller olmak üzere üç ana bileşenden oluşurlar. Güneş ışığını ve şiddetini simüle etmek amacıyla uygun bir ışık kaynağı seçimi, solar simülatör tasarımında en önemli kısımdır ve ışık kaynakları spektral nitelikleri, aydınlatma düzeni, kolimasyonu, ışık akısı kararlılığı ve ışık menzili gibi özellikleri dikkate alınarak seçilmektedir (Krusi ve Schmid, 1983). Solar simülatör uygulamalarında güneş ışığını IEC 60904-9 ve ASTM E927-10 standartlarına uygun simüle etmek için farklı ışık kaynakları kullanılmaktadır (Esen ve ark., 2020).

En yaygın olarak kısa ark veya uzun ark xenon lambalar ışık kaynağı olarak kullanılırken, metal halide ark lambaları, karbon ark lambaları ve kuvars tungsten halojen lambalar da bazı simülatör tasarımlarında ışık kaynağı olarak seçilmiştir (Esen ve ark., 2017). Günümüzde geleneksel ışık kaynakları ile karşılaştırıldığında düşük maliyet, daha kompakt olma, daha az güç tüketimi gibi avantajları nedeniyle, yapılan araştırma ve çalışmalarda ışık kaynağı olarak LED (Light Emitting Diode) kullanılmaya başlamıştır (Esen ve ark., 2022). Bu çalışmada ışık kaynağı olarak LED kullanılan solar simülatörler ele alınmış ve fotovoltaik cihaz testlerindeki önemi vurgulanmıştır.

## 2. Solar Simülatörlerde Kullanılan Işık Kaynakları

Fotovoltaik panellerin karasal uygulamaları için test standartları, ERDA ve NASA tarafından desteklenen iki atölye faaliyeti sırasındaki bir dizi çalışma neticesinde ortaya konulmuştur. 1975 ve 1977 yılında yapılan çalışmalardan sonra yayımlanan nihai raporda solar simülatörlerin ayrıntılı açıklamaları da dahil olmak üzere karasal fotovoltaik ölçüm prosedürlerinin standartları oluşturulmuştur (Brandhorst et al. 1975). Bu raporda, standart ışınım şiddeti  $1000 \text{ W/m}^2$  seçilirken, AM (air mass) (hava kütlesi) 1,5 spektral bileşen olarak seçilmiştir ve her ikisi de günümüzde güneş simülatörleri için ASTM (Amerikan Society for Testing and Materials) standartlarında kullanılmaktadır (Esen ve ark., 2017).

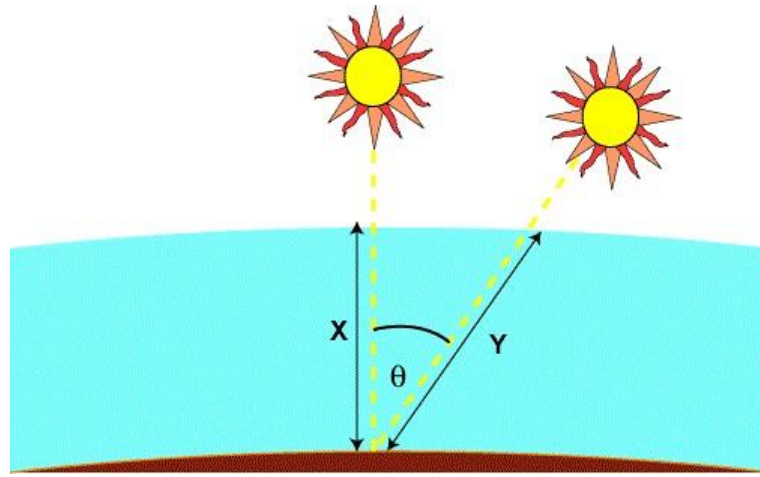
Hava Kütlesi, ışığın mümkün olan en kısa yol uzunluğuna (yani, güneş doğrudan tepedeyken) normalize edilmiş atmosferde aldığı yol uzunluğudur. Hava Kütlesi, atmosferden geçerken ve hava ve toz tarafından emilirken ışığın gücündeki azalmayı ölçer. Hava Kütlesi şu şekilde formüle edilir:

$$AM = \frac{1}{\text{Cos}(\theta)} \quad (1)$$

Bu denklemde “ $\theta$ ” dikeyden açıdır (zenit açısı). Güneş tam tepedeyken hava kütlesi 1'dir.

Hava kütlesi, ışığın Dünya'ya çarpmadan önce geçmesi gereken atmosferin havai yol uzunluğuna göre oranını temsil eder ve  $Y/X$ 'e eşittir (Şekil 1).  $1000 \text{ W/m}^2$  güneş ışınım düzeyi genellikle bir birim olarak seçilmiştir ( $1 \text{ güneş} = 1000 \text{ W/m}^2$ ).

Güneş ışığını ve şiddetini simüle etmek amacıyla uygun bir ışık kaynağı seçimi, güneş simülatörü tasarımında en önemli kısımdır (Brandhorst ve ark., 1975). Solar simülatör uygulamalarında güneş ışığını standartlara uygun simüle etmek için farklı ışık kaynakları kullanılmaktadır. Solar simülatörlerin ışık kaynaklarını sınıflandırdığımızda; Karbon Ark Lambalar, Quartz Tungsten Halojen Lambalar, Mercury Xenon Lambalar, Xenon Ark Lambalar, Metal Halide Ark Lambalar oldukları görülmektedir.



Şekil 1. Hava kütlesi (Air Mass) bileşenleri (PV Education, 2022)

Karbon ark lambası spektral yapısının AM 0 ile uyuşmasından dolayı karasal fotovoltaik panel testlerinden çok uzay güneş simülatörlerinde ve multi-junction solar hücre optimizasyonunda ışık kaynağı olarak kullanılmıştır (Xu ve Woodyard, 2000).

Halojen lambalar solar simülatör uygulamalarında yüksek ışık şiddeti, ucuzluğu, kullanılabilirliği ve doğal güneş ışığına yakın spektral aralığı nedeniyle tercih edilmektedir (Roberts ve ark., 2014; Irwan ve ark., 2015).

Mercury Xenon lambalar ilk solar simülatör tasarımlarında yaygın olarak kullanılmıştır (Esen ve ark., 2017). Günümüzde bazı spesifik çalışmalarda (Alxneit, 2011) ışık kaynağı olarak kullanılsa da yaygın olarak daha sonraki solar simülatör tasarımlarında yerini xenon ark lambalara bırakmıştır (Wang ve Laumert, 2014).

Xenon ark lambası yüksek ışık yoğunluğu ve spektrumunun güneş ışığıyla neredeyse eşleşebilmesi gibi avantajları nedeniyle konvansiyonel solar simülatörlerde ışık kaynağı olarak sıkça kullanılmaktadır (Esen ve ark., 2017). Xenon ark lambalarının yüksek güç tüketimi, kapsamlı bakıma ihtiyaç duyması ve kısa ömürlü olması gibi özellikleri de dezavantajlardır. Solar simülatörlerde ışık

kaynağı olarak zaman zaman Xenon ark lambaları yerine Xenon flash lambaları da tercih edilir (Kolberg ve ark., 2011).

Endüstriyel aydınlatmada oldukça sık kullanılan metal halide lambalar solar simülatörlerde de xenon lambaların yüksek güç tüketimi, elektronik sürücülerinin maliyeti ve kısa ömürlü olması nedeniyle özellikle de fiyat avantajı açısından ışık kaynağı olarak seçilmektedir (Ekman, ve ark., 2015; Codd ve ark., 2010; Novickovas ve ark., 2015).

Fotovoltaik panel testleri için yüksek kaliteli solar simülatörlere olan talebin artması hücre verimliliği ölçümlerinin yüksek doğruluk altında yapılması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır (Georgescu ve ark. 2008). Tek ışık kaynağı ile yapılan solar simülatör uygulamalarında bazı dezavantajlar meydana gelebilmektedir. Bu tür dezavantajlardan dolayı tek solar simülatörde farklı ışık kaynaklarının bir arada kullanıldığı çalışmalar da yapılmıştır (Tawfik ve ark., 2018).

Son yıllarda yapılan fotovoltaik cihazlar için yapılan solar simülatör çalışmalarında (Dennis ve ark., 2012; Dennis ve ark., 2014) super continuum lazer ile yapılan solar simülatör çalışmalarında sonuçların umut verici olduğu ve bu teknolojinin daha da geliştirilebileceği öngörülmektedir.

Günümüzde geleneksel ışık kaynakları ile karşılaştırıldığında düşük maliyet, daha kompakt olma, daha az güç tüketimi gibi avantajları nedeniyle, yapılan araştırma ve çalışmalarda ışık kaynağı olarak LED (Light Emitting Diode) kullanılmaya başlanmıştır (Hakki ve ark., 2022; Novickovas ve ark., 2015). Tablo 2’de ışık kaynaklarının hangi yıllarda kullanılmaya başladığı gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Solar simülatörlerde kullanılan ışık kaynakları (Esen ve ark., 2017)

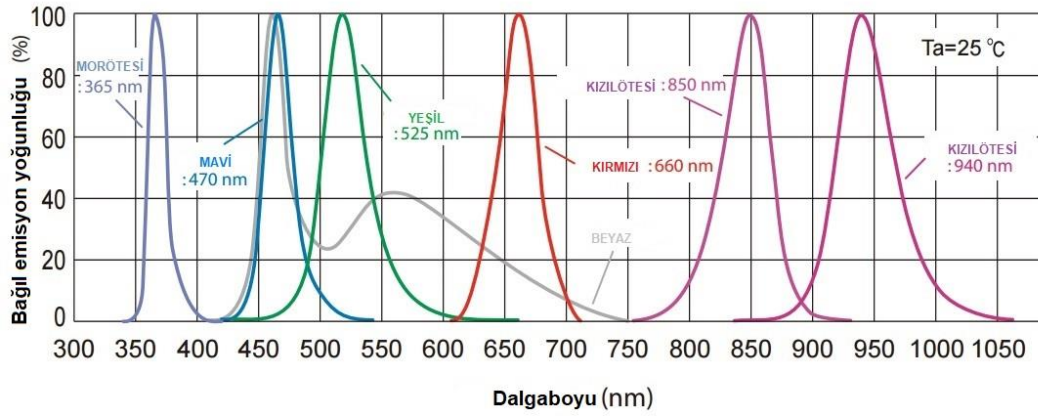
Solar Simülatörlerde Kullanılan Işık Kaynakları								
Karbon	Kuvars	Mercury	Xenon Ark	Metal	Led	Çoklu	Işık	Super
Ark	Tungsten	Xenon	Lambası	Halide		Kaynakları		Continuum
Lambası	Halojen	Lamba	Xenon Flaş	Lamba				Lazer
Yüksek	Lamba		Lambası					
Basınçlı								
Sodyum								
Buhar								
Lambası								
Argon Ark								
Lambası								

**Tablo 2.** Solar simülatörlerdeki ışık kaynaklarının ilk kullanıldığı yıllar (Esen ve ark. 2017)

←1960	1961	1962	1972	1990	2003	2005	2011→
Karbon Ark	Xenon Ark/ Mercury Xenon	Kuvars Tungsten Halojen	Argon Ark	Çoklu Işık	Led	Metal Halide	Süper Continuum Lazer

### 3. LED'lerin Spektral Değerleri

LED'ler, bir yarı iletken içeren ve dar bant yayan ışık kaynaklarıdır (Plyta ve ark., 2013). Dalga boyu kavramı genellikle renkli, morötesi (UV) ve kızılötesi (IR) LED'leri ayırt etmek için kullanılır, ancak beyaz LED'ler için kullanılmaz. Beyaz LED kaynakları nanometre (nm) yerine Kelvin cinsinden ölçülür. Kelvin sıcaklığı düşükse, beyaz bir LED ışık kaynağı göze daha sıcak görünür. LED ampullerin ve armatürlerin çoğu, çok sıcak, neredeyse mum gibi 2700K'den keskin beyaz 6000K'e kadar değişen Kelvin sıcaklıklarında mevcuttur. Renkli LED'lerin dalga boyu genellikle 360 ile 940 nm arasındadır. LED'lerin "UV" ile "IR" arasındaki dalga boyu değerleri Şekil 2 'de gösterilmiştir.



**Şekil 2.** LED spektral değerleri (Khan ve ark. 2015)

### 4. LED Solar Simülatör Çalışmaları

Solar simülatörlerde ışık kaynağı olarak LED kullanılmasına ilk kez 2003 yılında rastlanmaktadır. (Kohraku ve Kurokawa, 2003) LED solar simülatör simülasyonu ile fotovoltaik hücrelerde yeni ölçüm metotları üzerine çalışmalar yapmışlar, farklı ve çoklu LED'ler kullanarak spektral tepkilerini tahmin etmeye çalışmışlardır. (Kohraku ve Kurokawa, 2006) yaptıkları diğer bir çalışmada 4 renkli LED kullanarak tasarladıkları solar simülatöründe fotovoltaik hücrelerin ölçümlerini yapmış, AM 1,5 spektrumu altında güneş hücrelerinin I-V karakteristiklerindeki ölçümlerin dikkat çekici olduğunu ve LED simülatörlerin geliştirilip gelecekte kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır. (Bliss ve ark., 2008) fotovoltaik cihazların karakteristik ölçümlerinde ışık kaynağı olarak LED kullanmanın avantajlarını araştırmış, LED'lerin AM 1,5 standartlarına uygun spektral değerlerinin mikro saniyeler seviyesinde hızlı kontrol edilebildiğini, düşük maliyeti, uzun ömrü ve kalibrasyon kolaylığıyla gelecekte solar simülatörlerde kullanılacak ışık kaynakları arasında güçlü bir aday olduğunu belirtmişlerdir. (Tsuno ve

ark., 2008) solar simülatörde LED'lerin yetenekleri üzerinden yeni bir yaklaşımda bulunmuşlar ve LED'lerin konvansiyonel ışık kaynaklarına göre, daha verimli, daha parlak bir ışık kaynağı olduğunu, uzun ömür ve her geçen gün düşen maliyeti açısından kullanılabilir olduğunu ortaya koymuşlardır. (Krebs ve ark., 2011) geometrik şekillerinin ayarlanabildiği lambalarla kendini kalibre eden bir LED tabanlı solar simülatör uygulaması gerçekleştirmişlerdir. (Kolberg ve ark., 2011) genişletilmiş ultraviyole ve kızılötesi spektral değerlerin LED solar simülatörde AM 1,5 standartlarıyla eşleştirme çalışması yapmışlardır. (Kolberg ve ark., 2012) önceki çalışmalarını geliştirerek solar simülatörde LED etkisini artırmışlar, gerçek gün ışığı değerlerine yakın ölçümler yapmışlardır. Güneşin AM 1,5 G spektrum değerleri ile uyuşan ölçümlerini ortaya koymuşlardır. Bu çalışma ile LED tabanlı solar simülatörlerin spektral değerlerinin ayarlanıp güneş spektrum değerlerinin %100'e yakın olarak elde etmişlerdir. (Plyta ve ark., 2013) LED solar simülatörün potansiyelini inceleyerek LED ışık kaynağının ilk olarak güçlü bir şekilde optik ışık toplama verimliliğine sahip olduğu ve kolimasyonu en üst seviyeye çıkardığını, ikinci olarak ise LED'lerin dalga boylarının A sınıfı bir simülatör için uygun ve ışığın homojen dağılımın gayet iyi seviyede olduğunu belirtmişlerdir. (Linden ve ark., 2014) spektrumu ayarlanabilir, imalatı kolaylaştıran ve modüler tasarıma dayalı bir LED solar simülatör geliştirmişlerdir. Bu simülatörde isteğe bağlı olarak tek hücreli veya çok hücreli fotovoltaik cihaz kullanmışlardır. Geliştirdikleri simülatörün, aydınlatma bütünlüğü ve spektral özellikleri ile A+ performansa sahip olduğunu göstermişlerdir. (Watjenatepin, 2017) yaptığı çalışmada altı farklı dalga boyunda, yüksek güç LED'lerine sahip bir solar simülatör tasarlamıştır ve uygun sayıda LED kullanımıyla orta büyüklükteki bir fotovoltaik cihaz üzerinde uygun bir test yapılabileceğini belirtmiştir. Günümüze daha yakın çalışmalar incelendiğinde; (Esen ve ark., 2020) çalışmalarında 6 farklı dalgaboyu içeren 24 adet LED ile performans kriterlerinin üçünde de A sınıfını yakalamışlardır. (Tavakoli ve ark., 2020) yaptıkları çalışmada 19 farklı dalga boyuna sahip yüksek güçlü LED'ler ile 2,3 x 2,3 test düzleminde performans kriterlerinin ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada spektral aralığın UV bölgesi genişletilmiş 250-1100 nm arası dalga boyunda çalışılmıştır. (Al-Ahmad ve ark., 2022) altıgen şeklinde test düzlemine sahip solar simülatörlerinde 10 farklı dalga boyunda LED kullanmış, 70 cm<sup>2</sup> test alanında AAA sınıfını elde etmişlerdir. Aynı zamanda bu çalışmada tasarlanan solar simülatörün düşük maliyetli olduğunu ifade etmişlerdir. (Sun et al. 2022; Esen ve ark., 2022) diğer çalışmalardan farklı olarak fotovoltaik cihazları hücre bazında değil panel bazında test edebilen büyük ölçekli ve aktif soğutma sistemli bir solar simülatör geliştirerek her üç performans kriterinde de A sınıfını yakalamışlardır.

## 5. LED Solar Simülatör Standartları

ASTM E927-10 ve IEC 60904-9 standartlarına göre LED solar simülatörlerin simülasyon performansları A sınıfı, B sınıfı ve C sınıfı olmak üzere üç sınıfta tanımlanmıştır (Georgescu ve ark., 2008). Kriterleri en yüksek olan sınıf A iken en düşük olan ise C sınıfıdır. Bu sınıflandırmalarda

spektral eşleşme (spectral match), uzamsal uyumsuzluk (spatial non-uniformity) ve zamansal istikrarsızlık (temporal instability) olmak üzere üç ana kriter belirtilmiştir (Kim ve ark., 2014). Bu üç performans kriterinde de A sınıfında olan solar simülatörler AAA sınıfı olarak nitelendirilmektedirler. Bu kriterler Tablo 3’te gösterilmiştir (Grandi ve Ienina, 2013; Sun ve ark., 2022). ASTM E927-10 ve IEC 60904-9 standartlarına göre kriterlerden biri olan spektral eşleşmeyi belirlemek için LED ışık kaynaklı solar simülatörlerde 400 - 1100 nm spektrum bölgesi altı dalga boyu bandına bölünmüştür (Vosylius ve ark., 2022). Bu bantların her biri, toplam entegre ışımanın belirli bir yüzdesini içerir. Spektral Eşleşme, ilgili dalga boyu aralığı boyunca düşen ışığın gerçek yüzdesinin gerekli ışıma yüzdesine oranı olarak hesaplanır (Denklem 2).

Denklem 3’teki  $S(\lambda)$  ışık kaynağının spektral ışımasıdır. Spektral ışıma, ışığın dalga boyunun bir fonksiyonu olarak dağılımıdır.  $\lambda_n$  ilgili dalga boyu aralığının başlangıç noktasını,  $\lambda_{n+1}$  ise bitiş noktasını ifade eder. Spektral eşleşmenin solar simülatörde kullanılan ışık kaynağı ile doğrudan ilgili olduğu açıktır. Kaynağın spektral ışıması, AM1.5G referans spektral ışımasıyla eşleşiyorsa, spektrum mükemmel şekilde eşleştirilecektir. Beklenen spektral ışımayı simüle etme yeteneği, bir solar simülatörün tasarımına büyük ölçüde yardımcı olacaktır.

Tablo 4’te dalga boyu aralıklarında farklı AM faktörleri için solar simülatörlerde gereken ışıma yüzdeleri verilmiştir (Bazzi ve ark., 2012; Watjanatepin ve ark., 2022).

**Tablo 3.** Solar simülatör performans sınıflandırması (Bazzi ve ark., 2012)

PERFORMANS KRİTERLERİ	STANDARTLAR	
	ASTM	IEC
<i>Spektral Eşleşme</i>		
A Sınıfı	0.75 - 1.25	0.75 - 1.25
B Sınıfı	0.6 - 1.4	0.6 - 1.4
C Sınıfı	0.4 - 2.0	0.4 - 2.0
<i>Uzamsal Uyumsuzluk</i>		
A Sınıfı	≤ 3%	≤ 2%
B Sınıfı	≤ 5%	≤ 5%
C Sınıfı	≤ 10%	≤ 10%
<i>Zamansal İstikrarsızlık</i>		
A Sınıfı	≤ 2%	≤ 2%
B Sınıfı	≤ 5%	≤ 5%
C Sınıfı	≤ 10%	≤ 10%

$$SM = \frac{\text{Aralıktaki gerçek ışıma yüzdesi}}{\text{Aralıktaki gerekli ışıma yüzdesi}} \quad (2)$$



$$\text{Aralıktaki gerçek ışınım yüzdesi} = \frac{\int_{\lambda_n}^{\lambda_{n+1}} S(\lambda) d\lambda}{\int_{400}^{1100} S(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

**Tablo 4.** Toplam ışıma yüzdeleri (Bazzi ve ark., 2012; Watjanatepin ve ark.,2022)

TOPLAM IŞIMA YÜZDELERİ			
DALGA BOYU (nm)	AM1.5D	AM1.5G	AM0
300 - 400	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	8.0%
400 - 500	16.9%	18.4%	16.4%
500 - 600	19.7%	19.9%	16.3%
600 - 700	18.5%	18.4%	13.9%
700 - 800	15.2%	14.9%	11.2%
800 - 900	12.9%	12.5%	9.0%
900 - 1100	16.8%	15.9%	13.1%
1100 -1400	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	12.2%

Uzamsal uyumsuzluk (SNU=Spatial Non Uniformity), belirli noktalarda, özellikle geniş yüzey alanlarına sahip simülörlerde, hücre performans testlerini ve tekrarlamaya ihtiyacı etkileyen ışığın yoğunlaşması nedeniyle sağlanması en zor performans kriteridir. SNU, Denklem 4 ile hesaplanır. Bu denklemde  $E_{max}$ , ışığın en yoğun olduğu noktanın değerini,  $E_{min}$  ise ışığın en düşük olduğu noktanın değerini ifade eder.

$$SNU = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}} \times \% 100 \quad (4)$$

Üçüncü ve son performans kriteri ise zamansal istikrarsızlıktır. Bu test ölçüme direkt etki etmeyecektir ancak ışığın zamanla değişimini belirlemek için kullanılır. IEC 60904-9 standardına göre bu test kısa ve uzun vadeli olmak üzere iki aşamada yapılmalıdır. Bu performans kriterini belirlemek için yine Denklem 2.8 kullanılır ancak bu testte ışık tek bir noktadan belirli zaman aralıklarında ölçülür. En yoğun ve en düşük ışık noktaya göre değil zaman göre belirlenir.

2003 yılında başlayan LED ışık kaynaklı güneş simülörleri çalışmaları yeni bir dönem açmış ve LED'lerin kullanıldığı çeşitli çalışmalar hız kazanmaya başlamıştır. LED'ler uygun maliyetli ve uzun ömürlü oldukları için xenon ark lambalarına göre daha çok tercih edilmektedirler. 2011 yılı itibari ile süper continuum lazerlerle yapılan güneş simülörleri öne çıkmaya başlamıştır. Süper sürekli lazerler, xenon ark lambalarına ve LED'lere alternatif olma potansiyeline sahiptir. LED'lerin doğrudan ulaşamayacağı UV ve IR spektral değerleri kapsadıkları için gelecekteki uygulamalarda kullanılacak ışık kaynağıdır. Bununla birlikte, bazı dezavantajları da vardır. Örneğin, düşük ışık

açıları nedeniyle sadece küçük alanlarda güneş spektrumunu simüle edebilirler ve kontrol devreleri karmaşıktır. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda, ışık kaynakları avantaj ve dezavantajları göz önünde bulundurularak kullanım amaçlarına göre seçilmişlerdir. Bazı çalışmalarda, araştırmacılar, ana ışık kaynağının verimsiz yönlerini aşarak ikinci bir ışık kaynağı kullanmışlardır. Tablo 5, ışık kaynaklarının daha kolay karşılaştırılması için avantajlarını ve dezavantajlarını özetlemektedir.

**Tablo 5.** Işık kaynaklarının karşılaştırılması (Esen ve ark., 2017)

<b>IŞIK KAYNAĞI</b>	<b>AVANTAJLARI</b>	<b>DEZAVANTAJLARI</b>
<b>Karbon Ark Lambası</b>	AM 0 ile uyum Erken dönem uzay solar simülatörleri için uygunluk	Sınırlı dalga boyu Kararsızlık Kısa ömür
<b>Yüksek Basınçlı Sodyum Buhar Lambası</b>	Yüksek verim Uzun ömür Geniş spektral aralık	Yüksek maliyet Güç regülasyonu için yardımcı elektronik eleman ihtiyacı
<b>Argon Ark Lambası</b>	Geniş spektral aralık	Optik filtre ihtiyacı
<b>Kuvars-Tungsten Halojen Lamba</b>	Yüksek ışık yoğunluğu Düşük maliyet Doğal güneş ışığına yakın spektral aralık	Aşırı ısınma
<b>Mercury Xenon Lamba</b>	Geniş spektral aralık Keskin ve yoğun UV spektrumu	Yüksek güç tüketimi Bakım ihtiyacı Kısa ömür
<b>Xenon Ark Lambası</b>	Yüksek güç çıkışı Kararlılık Doğal güneş ışığına yakın spektral aralık	Yüksek güç tüketimi Bakım ihtiyacı Kısa ömür
<b>Xenon Flaş Lambası</b>	Kısa sürede konsantrasyon Düşük ısı Kararlılık	Optik filtre ihtiyacı Yüksek maliyet
<b>Metal Halide Lamba</b>	Düşük maliyet Yüksek ışık yoğunluğu	Yüksek güç tüketimi Kısa ömür Yardımcı elektronik eleman maliyeti
<b>LED</b>	Düşük maliyet Düşük güç tüketimi Uzun ömür	Limitli spektral aralık (350-1100 nm)
<b>Süper Continuum Lazer</b>	Yüksek güç Geniş bant aralığı	Dar spektrum

## 6. Sonuç

Fotovoltaik cihazların testi için 1960'lardan günümüze kadar uzanan solar simülatör çalışmalarında, bilim insanları güneş ışığını simüle etmek için birbirinden farklı birçok ışık kaynağını tercih etmiştir. Bu seçimlerde, günün teknolojik koşullarının elverdiği ölçüde, spektrum aralığı, ömür,

fiyat, düşük ısı, kullanım kolaylığı gibi çok sayıda etkiyi göz önünde bulundurmuşlardır. Günümüze kadar solar simülatörlerde kullanılan ışık kaynaklarının hepsinin belirli avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Tüm literatüre bakıldığında konvansiyonel ışık kaynakları arasında Xenon ve Halojen lambaların kullanımın öne çıktığı, günümüze yaklaştıkça LED ışık kaynağının tercih edildiği görülmektedir. Bu çalışmada, solar simülatör çalışmalarında kullanılan ışık kaynakları incelenerek LED ışık kaynaklı solar simülatörlere odaklanılmıştır.

LED'ler konvansiyonel ışık kaynaklarına göre birçok avantaja sahiptir:

-Solar simülatörlerde istenilen spektrum değerlerine ulaşabilmek için mikro saniyeler mertebesinde hassas bir şekilde kontrol edilebilirler.

-Çeşitli yazılımlar ve mikroişlemciler kullanılarak LED'lerin ışığı uzun süre sabit tutulabilir.

-Tek tek olduğu gibi grup halinde de kontrol edilebilirler.

-Konvansiyonel ışık kaynaklarına göre daha düşük gerilimlerde çalıştıkları için elektriksel olarak daha verimli ve daha güvenlidirler.

-Teknolojileri geliştikçe cevap verme süreleri artacağından solar simülatör flaş testlerinde de kullanılabilirler.

-Isınma problemleri minimum düzeydedir.

-Çalışma süreleri 40000 saate kadar çıkabilir.

-Maliyetleri konvansiyonel ışık kaynaklarına göre daha düşüktür.

-Zararlı UVC ışını yaymadıklarından çevre dostudurlar.

-Solar simülatörlerde fotovoltaik cihaz testleri için belirlenen  $1000 \text{ W/m}^2$  ışınım şiddetine ulaşabilirler ve performans kriterlerini AAA sınıfında sağlayabilirler.

Tüm bu avantajlarından dolayı ve üretim teknolojileri geliştikçe ultraviyolede kızılötesine kadar dalga boyu skalasının genişlemesiyle daha geniş kullanım alanına sahip olmaya başlayan LED'ler gelecekte de solar simülatörler için önemli ışık kaynağı olmaya devam edeceklerdir.

### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

### **Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti**

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

### **Kaynakça**

Al-Ahmad AY., Clark D., Holdsworth JL., Vaughan B., Belcher WJ., Dastoor PC. An economic led solar simulator design. IEEE Journal of Photovoltaics 2022; 12(2): 521–525.

Alagöz İ. Rüzgâr elektrik santrallerinin kontrolü için kullanılacak doğrulamalı kod

- kütüphanesi geliştirilmesi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi* 2021; 8(2):841–858.
- Alxneit I. Measuring temperatures in a high concentration solar simulator – demonstration of the principle. *Solar Energy* 2011; 85(3): 516–522.
- Barış K., Küçükali S. Availability of renewable energy sources in turkey: current situation, potential, government policies and the eu perspective. *Energy Policy* 2012; 42: 377–391.
- Bazzi AM., Klein Z., Sweeney M., Kroeger KP., Shenoy PS, Krein PT. Solid-state solar simulator. *IEEE Transactions on Industry Applications* 2012; 48(4): 1195–1202.
- Bliss M., Betts TR., Gottschalg R. Advantages in using leds as the main light source in solar simulators for measuring pv device characteristics. *Proc. SPIE 7048, Reliability of Photovoltaic Cells, Modules, Components, and Systems, 704807* 10 September 2008, San Diego, California, United States
- Bliss M.,Wendlandt S., Betts TR., Gottschalg R. Towards a higher power, all led solar simulator closely matching realistic solar spectra. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, sayfa no: 3321-3326, Hamburg, Germany.
- Brandhorst H., Hickey J., Curtis H., Ralph E. Interim solar cell testing procedures for terrestrial applications. 1975. No. TID-26871
- Codd DS., Carlson A., Rees J., Slocum AH. A low cost high flux solar simulator. *Solar Energy* 2010; 84(12): 2202–2012.
- Çapık M., Yılmaz AO., Çavuşoğlu İ. Present situation and potential role of renewable energy in turkey. *Renewable Energy* 2012; 46: 1–13.
- Dennis T., Schlager JB., Bertness KA. A novel solar simulator based on a supercontinuum laser for solar cell device and materials characterization 2014. *IEEE Journal of Photovoltaics* 4(4): 1119–1127.
- Dennis T., Schlager JB., Yuan HC., Wang Q., Friedman D. A novel solar simulator based on a super-continuum laser. 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, sayfa no: 1845-1848, 2012, Austin, Teksas.
- Ekman BM., Geoffrey Brooks G., Rhamdhani MA. Development of high flux solar simulators for solar thermal research. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2015; 141: 436–446.
- Esen V., Sağlam Ş., Oral B. Light sources of solar simulators for photovoltaic devices: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2017; 77: 1240–1250.
- Esen V., Sağlam Ş., Oral B., Esen ÖC. Spectrum measurement of variable irradiance controlled led-based solar simulator. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)* 2020; 10(1): 109–116.

- Esen V., Sağlam Ş., Oral B., Esen ÖC. Toward class aaa led large scale solar simulator with active cooling system for pv module tests. *IEEE Journal of Photovoltaics* 2022; 12(1): 364–371.
- Georgescu A., Damache G., Gîrţu MA. Class a small area solar simulator for dye-sensitized solar cell testing. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials* 2008; 10(11): 3003–3007.
- Gök SG., Kavasoglu R. The renewable energy policy of turkey. 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, IEEE 2013; 1334-1339.
- Grandi G., Ienina A. Analysis and realization of a low-cost hybrid led-halogen solar simulator .International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). IEEE. sayfa no: 794-799, 2013.
- Hakki HK., Allahyari S. Intensification of photocatalytic wastewater treatment using a novel continuous microcapillary photoreactor irradiated by visible led lights. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification* 2022; 175: 108937.
- Irwan YM., Leow WZ., Irwanto M., Amelia R., Gomesh N., Safwati I. Indoor test performance of pv panel through water cooling method. *Energy Procedia* 2015; 79: 604–611.
- Khan TQ., Bodrogi P., Vinh QT., Winkler H. Led lighting: technology and perception. John Wiley & Sons. 2015.
- Kim KA., Dostart N., Huynh J., Krein PT. Low-cost solar simulator design for multi-junction solar cells in space applications. Power and Energy Conference at Illinois (PECI). IEEE, sayfa no: 1-6, 2014.
- Kohraku S., Kurokawa K. New methods for solar cells measurement by led solar simulator. 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, sayfa no: 1977-1980, 2003.
- Kohraku S., Kurokawa K. A fundamental experiment for discrete-wavelength led solar simulator. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2006; 90(18–19): 3364–3370.
- Kolberg D., Schubert F., Klameth K., Spinner DM. Homogeneity and lifetime performance of a tunable close match led solar simulator. *Energy Procedia* 2012; 27: 306–311.
- Kolberg D., Schubert F., Lontke N., Zwigart A., Spinner DM. Development of tunable close match led solar simulator with extended spectral range to uv and ir. *Energy Procedia* 2011; 8: 100–105.
- Krebs FC., Sylvester-Hvid KO., Jørgensen M. A self-calibrating led-based solar test platform. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 2011; 19(1): 97–112.
- Krusi P., Schmid R. The cs1 1000 w lamp as a source for solar radiation simulation. *Solar*

- Energy 1983; 30(5): 455–462.
- Liao CH., Ou HH., Lo SL., Chiueh PT., Yu YH. A challenging approach for renewable energy market development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011; 15(1): 787–793.
- Linden KJ., Neal WR., Serreze HB. Adjustable spectrum led solar simulator. *Light-Emitting Diodes: Materials, Devices, and Applications for Solid State Lighting XVIII*, 2014, California, United States
- Novickovas A., Baguckis A., Mekys A., Tamosiunas V. Compact light-emitting diode-based aaa class solar simulator: design and application peculiarities. *IEEE Journal of Photovoltaics* 2015; 5(4): 1137–1142.
- Öcal O., Aslan A. Renewable energy consumption–economic growth nexus in turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013; 28: 494–499.
- Plyta F., Betts TR., Gottschalg R. Potential for led solar simulators. *IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, sayfa no: 701-705, 2013.
- PV Education, <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/air-mass> (Erişim tarihi: 03.05.2022)
- Sun C., Jin Z., Song Y., Chen Y. Led-based solar simulator for terrestrial solar spectra and orientations. *Solar Energy* 2022; 233: 96–110.
- Tavakoli M., Jahantigh F., Zarookian H. Adjustable high-power-led solar simulator with extended spectrum in uv region. *Solar Energy*. 2020; 220: 1130-1136
- Tawfik M., Xavier Tonnellier X., Sansom C. Light source selection for a solar simulator for thermal applications: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2018; 90: 802–813.
- Tsuno Y., Kamisako K., Kurokawa K. New generation of pv module rating by led solar simulator - a novel approach and its capabilities. *33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, sayfa no: 1-5, 2008.
- Tükenmez M., Demireli E. Renewable energy policy in turkey with the new legal regulations. *Renewable Energy* 2012; 39(1): 1–9.
- Twidell J., Weir T. *Renewable energy resources*. 2015 Routledge.
- Vosylius Z., Novičkovas A., Laurinavičius K., Tamošiūnas V. Rational Design of scalable solar simulators with arrays of light-emitting diodes and double reflectors. *IEEE Journal of Photovoltaics* 2022; 12(2): 512–520.
- Wang W., Laumert B. *Simulate a ‘sun’ for solar research: A Literature Review of Solar Simulator Technology* 2014.

- Watjanatepin N., Sritanauthaikorn P. Rectangular module for large scale solar simulator based on high-powered leds array. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)* 2022; 20(2): 462–474.
- Watjenatepin N. Design construct and evaluation of six-spectral leds-based solar simulator based on iec 60904–9. *International Journal of Engineering and Technology* 2017. 9.
- Xu J., Woodyard JR. Investigation of carbon arc source as an am0 solar simulator for use in characterizing multijunction solar cells. *Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp:1324-27, 2000.