

Ofislerde LED Tüp Retrofit Uygulamalarının Tekno-Ekonomik Analizi

Bilal CANOL¹, Alpaslan DEMİRCİ^{2*}, Ramazan AYZAZ³

¹Elektrik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye

²Elektrik Mühendisliği Bölümü, Elektrik Elektronik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

³Temiz Enerji Teknolojileri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

¹bilal.canol@kocaeli.edu.tr, ^{2*}ademirci@yildiz.edu.tr, ³ayaz@yildiz.edu.tr

(Geliş/Received: 13/06/2023;

Kabul/Accepted: 23/08/2023)

Öz: Aydınlatma sektöründe enerji verimliliğini arttırmak için konvansiyonel aydınlatma aygıtlarının yerine yüksek enerji verimliliğine sahip LED aydınlatma ürünleri tercih edilmektedir. Bu çalışmada, ofislerde kullanılan 4x18W T8 armatürlerdeki floresan lambalarının yerine, farklı tiplerdeki T8 LED tüpler uygulanarak, retrofit işlemleri hem aydınlatma tasarımı hem de ekonomik açıdan incelenerek fayda-maliyet analizleri yapılmıştır. Gerçek bir ofis ortamı DIALux EVO aydınlatma tasarım programında modellenmiş olup; düşük, orta ve yüksek verimli olmak üzere toplam üç farklı T8 LED tüp modelinin minimum aydınlık düzeyi, ortalama aydınlık düzeyi, düzgünlük faktörü ve kamaşma performansları incelenmiştir. Ekonomik açıdan ise farklı verime sahip LED tüplerin retrofit uygulamalarındaki yatırım ve işletme maliyetleri, enerji tasarrufu ve geri ödeme süreleri hesaplanmıştır. Sonuç olarak; TS EN 12464-1:2021-09 standardına göre minimum aydınlatma kriterlerini orta ve yüksek verimli LED tüplerin sağladığı görülmüştür. Diğer taraftan düşük etkinlik faktörüne sahip LED tüplerin istenilen aydınlatma performansını sağlamadığı belirlenmiştir. Ayrıca yüksek verimli LED tüpler konvansiyonel floresan lambalara ve düşük verimli LED tüplere göre sırasıyla %57 ve %24 daha az enerji tüketimi sağlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Aydınlatma verimliliği, enerji tasarrufu, fayda-maliyet analizi, geri ödeme süresi, LED tüp lambalar.

Techno-Economic Analysis of LED Tube Retrofit Applications in Offices

Abstract: In the lighting sector, high energy-efficient LED lighting products are preferred instead of conventional lighting devices to increase energy efficiency. In this study, benefit-cost analyses were conducted by examining retrofit operations both in terms of lighting design and economically by applying different types of T8 LED tubes instead of fluorescent lamps in 4x18W T8 fixtures used in offices. A real office environment was modeled in the DIALux EVO lighting design program, and a total of three different T8 LED tube models with low, medium, and high efficiency were studied in terms of minimum luminance level, average luminance level, uniformity factor, and glare performance. Economically, investment and operating costs, energy savings, and payback periods in retrofit applications of LED tubes with different efficiencies were calculated. As a result, it was observed that medium and high-efficiency LED tubes provided the minimum lighting criteria according to the TS EN 12464-1:2021-09 standard. On the other hand, it was determined that LED tubes with low efficacy factor did not provide the desired lighting performance. Furthermore, high-efficiency LED tubes provided respectively 57% and 24% less energy consumption compared to conventional fluorescent lamps and low-efficiency LED tubes.

Keywords: Cost-benefit analysis, energy saving, lighting efficiency, LED tube lamps, payback period.

1. Giriş

Elektrik enerjisi tüketimi gün geçtikçe hızlı bir artış göstermekle birlikte bunun yanı sıra insanoğlunun yaşamını tehdit edebilecek boyutlarda karbon emisyonu değerlerini de arttırmaktadır. Dünyadaki toplam net elektrik enerjisi tüketiminin ABD Enerji Bilgi İdaresi verilerine göre 2021 yılında 25343 TWh/yıl'dır [1]. Aydınlatma ihtiyacı için kullanılan elektrik enerjisi ise Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) 2021 yılı verilerine göre dünya çapında %28,4'ü konut, %71,6'sı ticari alanda olmak üzere toplam 1805 TWh/yıl'dır [2]. Ayrıca IEA'ya göre dünya çapındaki aydınlatma enerjisi tüketiminin 2030 yılında, 2021 yılına göre azalarak, 1626 TWh/yıl olması tahmin edilmektedir [2]. Küresel boyutta aydınlatma için kullanılan elektrik enerjisi tüketiminin toplam enerji tüketimindeki payı incelendiğinde %7,12 ile büyük bir yer kapladığı görülmektedir. Aydınlatma sektörünün enerji tüketimindeki payının düşürülmesine yönelik olarak enerji verimliliği yüksek olan aydınlatma ürünlerinin tercih edilmesi gerektiği görülmektedir. Daha düşük enerji tüketimi sayesinde sera gazı emisyonlarının azaltılması açısından insanoğlunun yaşam döngüsüne fayda sağlamaktadır [3]. Geçmiş dönemlerde akkor flamanlı lambaların

* Sorumlu yazar: ademirci@yildiz.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹0000-0001-5618-9787, ²0000-0002-1038-7224, ³0000-0002-6201-1181.

floresan lambalara geçişi önerilirken [4]; son 10-15 sene içerisinde ise floresan lambaların yerini, fiyatlarının ucuzlaması ve teknolojisindeki gelişmelerden dolayı çoğunlukla LED ürünlerin tercih edildiği bilinmektedir. LED maliyetlerinin azalması, verimliliklerinin artması ve güvenilir yapılarıyla birlikte pazar payını kayda değer miktarda arttırarak günümüzde ana ışık kaynağı olarak geçmiş teknolojilerin yerini devralmaktadır [5, 6].

Aydınlatma sektöründe; LED ürünleri hem kapalı mekânda hem de sokak ve yol aydınlatmasında tercih edilmekte olup, mevcut bulunan konvansiyonel tiplerdekilerle değiştirilmesi tavsiye edilmektedir. LED'lerin tercih edilmesinin sebebi her geçen gün artan ışıksal verimlilikleri, farklı renk sıcaklıklarının tercih edilebilmesi ile renksel geriverim indeksinin (CRI) yüksek olması, artan görsel konfor, uzun ömrü, floresan lambalara göre cıva içermediğinden daha güvenli işletim sunması, daha düşük titremeye (flicker) sahip olması, kontrol edilebilirliği yönünden avantajları, aydınlatma sistemlerinin işletme maliyetlerini düşürmesi ve daha büyük sürdürülebilirlik sağlamasıdır. Floresan lambalar; herhangi bir kompanzasyon işleminin olmadığı manyetik balast ile kullanıldığı durumda güç faktörü 0,50 – 0,60 seviyelerinde iken, LED lambalar ve elektronik balast ile floresan lambaların kullanıldığı durumda ise 0,90 – 0,99 seviyelerinde olduğu görülmektedir. Bu durum LED'leri avantajlı duruma koyarken diğer yandan lineer olmayan karakteristikleri nedeniyle LED sürücülerin yüksek derecede harmonik akımlar üretmesi, LED'lerin diğer ürünlere göre negatif taraflarından birisidir [7]. Bu harmonik akımlar, herhangi bir filtre işlemi yapılmadığı durumlarda elektrik güç sisteminde dolaşmakta ve güç sisteminin enerji kalitesini de düşürmektedir. Fakat LED'lerin genellikle ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olmasından kaynaklı olarak geri ödeme süresinin de fazla olması, LED'lerin ekonomik açıdan tercih edilmesinde dikkat edilmesi gereken bir konudur [8]. Mevcutta kullanılmakta olan aydınlatma ürün veya sistemlerinin verimli olanlarla değiştirilmesi işlemi retrofit olarak adlandırılmaktadır. Retrofit işlemleri; yönetmelikler ve yönergelere, ürünü kullanacak kişinin beklentilerine, bina özelliklerinden başlayarak insan faktörü gibi farklı tipteki etkenlere bağlı olabilmektedir [9]. Ofislerde genellikle 4x18 W T8 tip floresan lambalar kullanılmakta olduğundan dolayı üreticiler enerji tüketiminde ani bir düşüş sağlamak için floresan lambaların T8 LED tüp lambalarla değişimini önermektedirler [10, 11]. Aydınlatma ürünlerinin retrofit işlemlerinde güç tüketimini düşürmesinin yanı sıra yeni durum için de aydınlatma tasarımının yapılarak minimum aydınlatma kriterlerini ve diğer kullanıcılardan istenen özellikleri de sağlayacak şekilde ürün tercihinin yapılması gerekmektedir [12].

Floresan lambaların LED lambalara geçişini teknik ve ekonomik olarak inceleyen birçok çalışma yapılmıştır. Uken ve diğerleri [13], floresan lambaların LED tüplerle değiştirilmesinin armatürü değiştirme zorunluluğunu ortadan kaldırdığı için cazip hale geldiğine dikkat çekmiş ve 2 farklı çalışma için LED tüp retrofit işlemi uygulamıştır. Yol aydınlatmasıyla ilgili yapılan bir çalışmada ise yüksek basınçlı sodyum buharlı lambaların yerine LED ile aydınlatma yapılmasının renksel görünüm ile CRI'nın kayda değer ölçüde iyileşme gösterdiği ve bu retrofit işlemi sonucunda oluşan enerji tasarrufunun %80'nin üzerinde olabileceği belirtilmiştir [14]. Türkiye'de M1 ve M2 sınıfı yol aydınlatmasıyla ilgili olarak yapılan başka bir çalışmada ise M1 aydınlatma sınıfı için yüksek basınçlı sodyum lambalar yerine LED aydınlatma tercihinde toplam maliyetin yüksek basınçlı sodyum lambalardan yaklaşık %11,5 daha az olduğunu göstermiştir [15]. LED tüp ve lambalar ile retrofit işleminin yapılması halinde %44 oranında enerji tasarrufu elde edileceğini ve yatırımın geri ödeme süresinin 4 yıl olacağına dikkat çekmişlerdir [16]. LED tüp ile yapılan retrofit işlemlerinde güç tüketiminin azaltılmasıyla ilişkili tasarruflardan dolayı önermekte olup; aydınlık düzeyi ve ışık kalitesi gibi faktörlere de dikkat edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir [17]. Ayrıca, 6 saatten az işletme süresine sahip yapılarda yapılan LED retrofit işlemlerinde önemli bir ekonomik gelir sağlanmayacağına dikkat çekmişlerdir. Diğer bir çalışmada idari binalarda LED tüp retrofit performansı incelenmiş ve floresan lambalardaki aydınlık düzeyinden %33,84 daha fazla verimli olduğu ve ekonomik olarak uygulanabilirliği tespit edilmiştir [18]. Brezilya'da Juazeiro do Norte şehrindeki bir mağaza uygulaması için T5 ve T8 floresan lambaların LED tüplerle 3 farklı durum için retrofit işlemini uygulanmış ve 3,5 ay gibi kısa bir geri ödeme süresi belirlenmiştir [19]. ABD'nin Washington eyaletindeki Chelan ilçesinde 3693 adet yüksek basınçlı sodyum buharlı sokak lambalarının yerine LED lambalar ile retrofit işlemi yapılan bir çalışmada gökyüzünün gece parlaklığındaki değişiklik incelenmiş ve gökyüzü parlaklığında herhangi bir artış tespit etmemişlerdir [20]. İstanbul Şemsi Ahmet Paşa Camii'nde yapılan başka bir çalışmada ise akkor telli lambalar yerine LED tercih edilmiş olup ciddi enerji tasarrufları elde edilmiş ve camiinin içindeki tüm bölümlerde aydınlık düzeyi değerleri arttırılmış ancak bunun yanı sıra birleşik kamaşma endeksi (UGR) değerinde de artış gözlemlenmiştir [21].

Bu çalışmada, ofis ortamlarında sıklıkla kullanılan 60x60 cm boyutlarında 4x18W floresan armatürlerinin yerine, T8 tipi 4x9 W'lık LED tüplerin kullanılması, bununla birlikte bu LED tüplerin balast ve sürücü yapısının değişiklik gösterip – göstermediği ayrı ayrı senaryolar için ofis ortamının aydınlatma kriterleri açısından ve ekonomik açıdan detaylıca analiz edilmiştir. Ofis ortamı için aydınlatma tasarımı DIALux EVO 11.0 ortamında yapılarak minimum aydınlık düzeyi ve kamaşma gibi aydınlatma kriterleri için uygun olan LED tüpler seçilmiştir. Literatürde LED aydınlatmanın farklı çeşitleriyle retrofit işlemleriyle ilgili olarak birçok çalışma yapılmıştır.

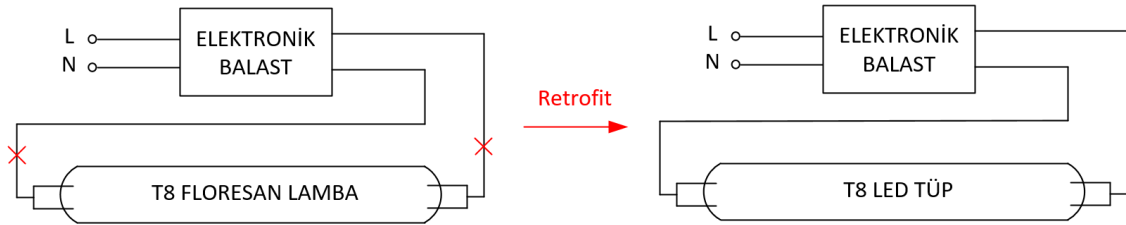
Ancak T8 LED tüpler hem aydınlatma tasarımı hem de ekonomik açıdan ilk defa bu çalışmada ele alınmıştır. Ayrıca bu çalışmada floresan lambaların LED tüp lambalarla yapılan retrofit işlemlerinde, balastın hurda değerinin yatırım maliyetinden düşülmesiyle balastsız kullanımı gibi farklı senaryolarda ekonomik analizler ilk defa bu çalışmada dikkate alınmıştır. Makalenin geri kalan kısmında; 2. bölüm olan LED tüp teknolojisi ve senaryolar kısmında retrofit işleminde kullanılabilecek olan tüm LED tüp lamba tipleri detaylıca incelenmiştir. Hemen ardından, geleneksel T8 floresan lambaların yerine gelebilecek farklı LED tüp modelleri seçilerek retrofit işlemleri senaryo tabanlı olarak açıklanmış ve LED tüp seçiminin nasıl yapıldığına ilişkin kullanılan akış diyagramı detaylıca anlatılmıştır. 3. bölümde belirlenen senaryolarda kullanılan lambalar için aydınlatma tasarımları yapılmıştır. 4. bölümde ise oluşturulan senaryoların ekonomik analizleri yapılmış ve yatırım yapılabilirliği ortaya konulmuştur. 5. bölüm olan Sonuç kısmında ise öne sürülen retrofit işlemlerini içeren tüm senaryolar hem aydınlatma kriteri hem de ekonomik analiz açısından birlikte tartışılmıştır.

2. LED Tüp Teknolojisi ve Senaryolar

İç aydınlatmada, özellikle konutlarda sıklıkla kullanılan E27 ve E14 tipi LED lambalar ile yapılan retrofit işlemleri için elektrik bağlantısında herhangi bir değişiklik yapılmamaktadır. Ancak bu durum LED tüplerle yapılan retrofit işlemleriyle karıştırılmamalıdır. LED üretici firmaları eski floresan lambaların balastıyla uyumlu olan veya eski balastın devre dışı bırakılmasıyla dahili LED sürücüsünün kullanılmasına imkân veren çeşitli ihtiyaca uygun LED ürünleri üretmektedirler [22]. LED tüp lambalar balast ile uyumluluklarına bağlı olarak toplamda dört farklı çeşide sahiptirler ve aşağıda detaylıca açıklanmıştır:

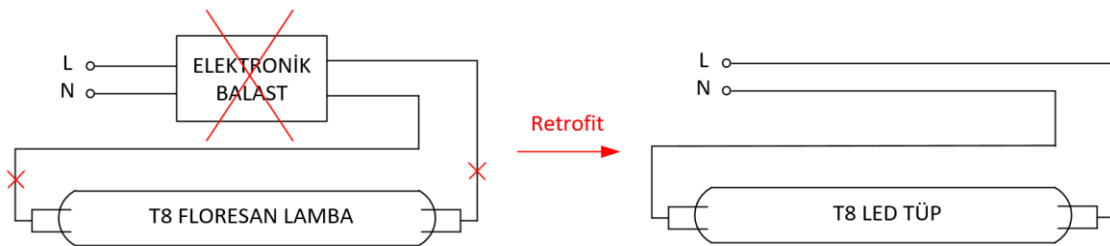
2.1. Balast ile uyumlu LED tüp

Balast ile uyumlu sadece LED tüpün değiştirilmesiyle kullanılabilen lamba çeşididir. LED tüp içerisinde balast ile uyumlu dahili bir sürücüye sahiptir ve mevcut bulunan elektronik veya manyetik balast, alınan LED tüp üretici firmanın katalogundaki balast çeşidiyle uyumlu olması koşuluyla kullanılabilir [23]. Diğer tiplere göre kurulumu çok kolaydır. Ancak ilgili balastın retrofit işlemi sonrasında da kullanılıyor olması, 2. tip LED tüplere göre hem güç tüketimini arttırmakta hem de balast arızası durumunda tekrar bağlantı yapılmasını gerektirmektedir. Şekil 1’de balast uyumlu LED tüplerin retrofit işlemlerine yönelik elektrik bağlantılarına ait devre şemaları verilmiştir. LED tüp üretici firmaları, ürünlerinin hangi balastlarla uyumlu oldukları ve devre şemalarını ilgili ürünlerinin veri sayfasında paylaşmaktadır.



Şekil 1. Balast uyumlu LED tüplerin elektrik bağlantısı.

2.2. Balast by-pass LED tüp

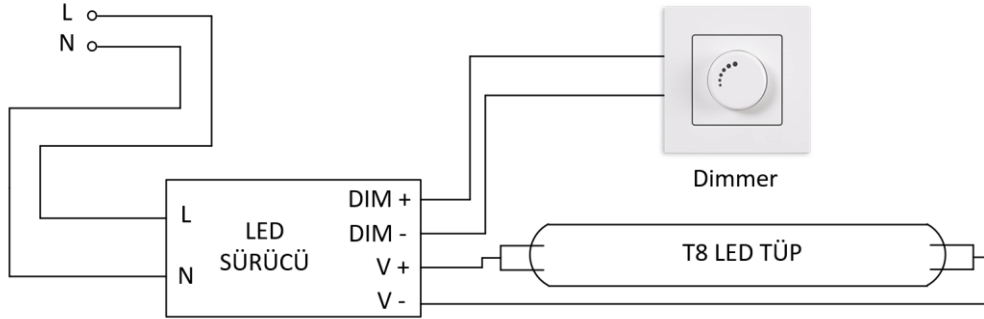


Şekil 2. Balastın devre dışı edilerek kullanıldığı LED tüplerin elektrik bağlantısı.

Balastın devre dışı edildiği LED tüp çeşididir. LED tüp içerisinde balast kullanımına imkân vermeyen dahili sürücüye sahiptir ve bu sebeple balast kullanılmaz [23]. 1. tip LED tüplere göre daha düşük bakım masraflarına ve daha yüksek verimliliğe sahiptirler. Single-ended tipi elektrik bağlantısına sahip olan LED tüplerin AC Giriş kısımlarına oldukça dikkat edilmelidir. Double-ended tipi yapıya sahip bir T8 LED tüp bağlantısı Şekil 2’de verilmiştir. Elektrik bağlantısı 1.tip’e göre son kullanıcı açısından daha zor gözükmemektedir ve devre dışı bırakılan balast hurda değeri olarak düşünülebilmektedir.

2.3. Harici sürüclü LED tüp

Balastın devre dışı edildiği ve harici LED sürücünün armatüre yerleştirildiği LED tüp çeşididir. LED tüp içerisinde dahili bir sürücü bulunmamaktadır. Harici sürücü, balast ile birlikte kullanımına uygun değildir [24]. Şekil 3’te 3. tip harici sürüclü LED tüpe ait bağlantı şeması verilmiştir. 1. ve 2. tip LED tüpler ile karşılaştırıldığında, direnç, DC gerilim veya darbe genişlik modülasyonu yapılarıyla dimmer yeteneği olan, nesnelere interneti konseptine uyumlu olabilen, en uzun ömürlü ve verimliliğe sahip olan LED tüp çeşididir. Ancak ilk yatırım maliyetinin diğer LED tüplere kıyasla daha yüksek olması ve son kullanıcı açısından en zor bağlantı yapısına sahip olmasından dolayı diğer LED tüp tiplerine göre daha az tercih edilmektedirler.



Şekil 3. Harici sürüclü dimmerlenebilir LED tüp için elektrik bağlantısı.

2.4. Hibrit LED tüp

Hem balast ile uyumlu olarak hem de balastın devre dışı edilmesi halinde de çalışabilen LED tüp çeşididir. Bu bakımdan 1. tip ile 2. tipi kapsamaktadır. 1. tipte olduğu gibi mevcut balastın kullanılması durumunda sadece T8 LED tüp modelinin uyumlu olduğu balast modelleri ile kullanılabilir ve bu uyumlu modeller üretici firma tarafından paylaşılmaktadır. Bu LED tüp tipi tak-çalıştır olarak pazarlanmaktadır. Böylece kurulum sorunları ortadan kalkmakla birlikte kullanıcı açısından daha fazla güvenilirlik ve esneklik sağlamaktadır.

Retrofit işlemleri için gerçekleştirilmesi düşünülen senaryolar aşağıda açıklanmıştır:

Referans Senaryo (T8 Floresan Lamba Kullanımı): Ofis ortamında mevcut olarak halihazırda bulunan 60x60 cm ebatlarında 4x18 W T8 tipi floresan armatürlerin işletilmesi söz konusudur. Armatürde herhangi bir tadilat yapılmadan sadece floresan lamba ve/veya elektronik elemanların LED tüp veya LED sürücü ile değiştirilmesi düşünülmektedir. Bu mevcut durum, iyileştirilmesi için düşünülen retrofit işlemleriyle karşılaştırılacaktır.

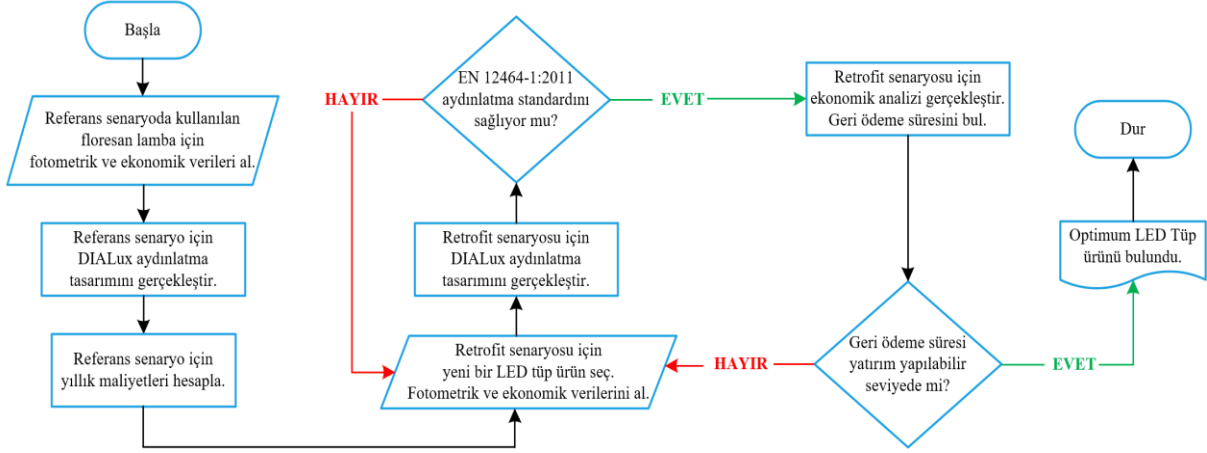
Senaryo 1 (Düşük Verimli T8 LED Tüp Kullanımı): Senaryo 1 için 2. tip balast by-pass LED tüp seçilmiştir. Bu LED tüp piyasada bulunan diğer LED tüplere göre etkinlik faktörü daha düşük olmasına rağmen daha ucuz olduğundan kullanıcı açısından tercih edilebilirliği yüksektir. Balastsız olarak çalıştığı için balast hurda değeri olarak yatırım maliyetinden düşülmüştür.

Senaryo 2 (Orta Verimli T8 LED Tüp Kullanımı): Senaryo 2 için 4. tip olan hibrit LED tüp seçilmiştir. Bu LED tüp hem elektronik balastlı hem de doğrudan şebekeye bağlanabilir şekilde kullanılabilir. Senaryo 1’de bahsedilen LED tüpten daha yüksek etkinlik faktörüne sahiptir. Diğer yandan harici elektronik balastlarla da çalışmaya uyumlu üretilmeleri nedeniyle maliyetleri diğer led tüp teknolojilerine göre yüksek olabilmektedir. Bu senaryoda da orta verimli LED tüp balastsız olarak çalıştırılmış olup; elektronik balast, hurda değeri olarak yatırım maliyetinden düşülmüştür.

Senaryo 3 (Yüksek Verimli T8 LED Tüp Kullanımı): Senaryo 3 için 2. tip balast by-pass LED tüp kullanılmıştır. Senaryo 1 ve 2’de kullanılan LED tüplere göre daha yüksek etkinlik faktörü değerine sahiptir.

Lamba fiyatı ise senaryo 1'den pahalı olmasına karşılık senaryo 2'den ucuzdur. Bu senaryoda da elektronik balast, led tüp retrofit işleminde hurda değeri olarak düşünülmüştür.

Bu çalışmada kullanılan metodoloji şu şekildedir: İlk olarak ofis odasında mevcut bulunan geleneksel floresan lambaların fotometrik ve ekonomik verileri kullanılarak sırasıyla aydınlatma ve ekonomik hesaplamaları yapılır. İlgili işlemler sonrasında retrofit işlemi için düşünülen uygun bir LED tüp ürünü seçilir. Seçilen LED tüp ürünün öncelikle aydınlatma tasarımı daha sonra geri ödeme süreleri hesaplanarak yatırım yapılabilirliği ölçülür. Hem aydınlatma hem de ekonomik kriterleri sağlayan optimum LED tüp ürünü, retrofit işlemi için uygun bir seçim olduğu anlaşılır. Retrofit işlemi için LED tüp seçiminde kullanılan akış diyagramı Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. LED tüp ürün seçiminde kullanılan akış diyagramı.

3. Aydınlatma Tasarımı

Retrofit işlemindeki ekonomik kriterleri uygulamadan önce seçilen lambaların aydınlatma tasarımı yapılmıştır. Retrofit işlemi için uygulanacak olan örnek ofis ortamının özellikleri dosyalama-kopyalama gibi işlemler için kullanılan bir alan niteliği taşımaktadır. Modellenen odanın uzunluğu, genişliği ve yüksekliği sırasıyla 7 m, 3,3 m ve 2,8 m'dir. İlgili çalışma masasının yerden yüksekliği ise 0,85 m'dir. Odada tavan, duvar ve zemin bölümleri ile çalışma düzleminin yansıtma katsayıları sırasıyla 0,9, 0,8, 0,4 ve 0,35 olarak alınmıştır. Referans senaryoda mevcut olarak bulunan 4x18 W T8 floresan armatür 7 lamelli çift parabolik özelliğine sahiptir. Modellenen odanın 2D ve farklı açılardan 3D görünümü sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 5. DIALux ortamında modellenen odanın 2D görünümü.



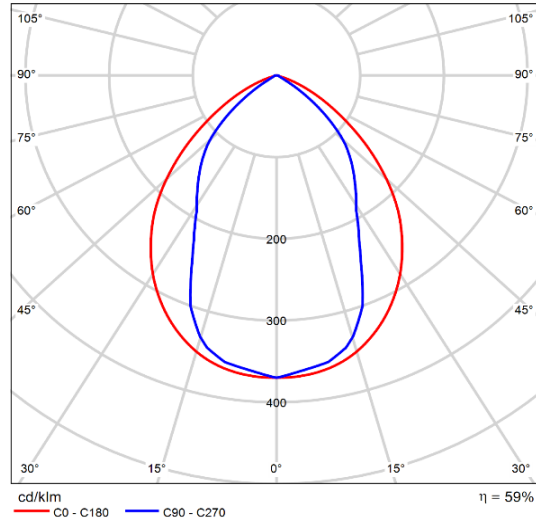
Şekil 6. DIALux ortamında modellenen odanın farklı açılardan 3D görünümüleri.

Tablo 1’de tüm senaryolarda kullanılan lambaların uyumlu oldukları balast tipleri, ışık akısı, güç, armatür etkinlik faktörü, armatür ömrü, açma-kapama sayıları, renk sıcaklıkları, renksel geriverim gibi özellikleri sırasıyla belirtilmiş olup; hacim, duvar, çalışma masası ortalama aydınlık düzeyleri ile UGR değerleri de verilmiştir.

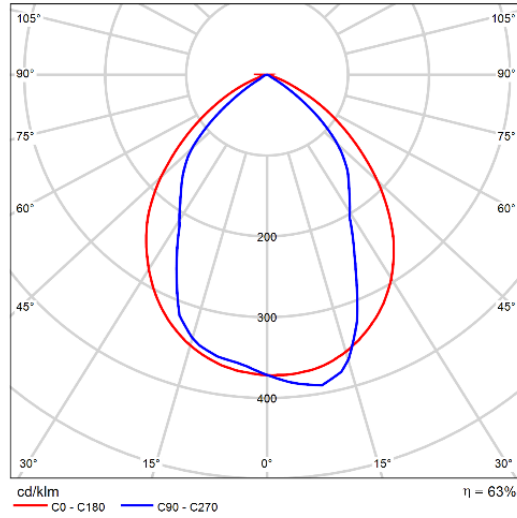
Tablo 1. Tüm senaryolardaki lamba tiplerinin özellikleri.

Lamba Tipi	T8 Floresan	Düşük Verimli LED Tüp	Orta Verimli LED Tüp	Yüksek Verimli LED Tüp
Kullanılabilecek Balast Tipleri	- Manyetik - Elektronik*	- Balastsız*	- Balastsız* - Elektronik	- Balastsız*
Lamba Işık Akısı (lm)	1300	720	1050	1050
Lamba Güç Değeri (W)	18	9	10,5	8
Lamba Etkinlik Faktörü (lm/W)	72,2	80	100	131,25
Lamba Ömrü (saat)	15000	30000	50000	75000
Açma / Kapama Sayısı	20000	20000	50000	200000
Renk Sıcaklığı (°K)	4000	4000	4000	4000
Renksel Geriverim (Ra)	75	>80	83	83
Çalışma Masası (E_{ort} , lüx)	515	300	438	445
Aydınlığın Dağılım Düzgünlüğü (U_0)	0,72	0,74	0,75	0,75
UGR	16,7	15,1	16,6	16,7

* ile işaretlenen balast tipi ilgili senaryoda kullanılmıştır.



Şekil 7. DIALux ortamında floresan armatüre ait ışık dağılım eğrisi.



Şekil 8. DIALux ortamında LED armatüre ait ışık dağılım eğrisi.

Şekil 7 ve Şekil 8’de sırasıyla referans senaryoda kullanılan floresan ve diğer senaryolarda kullanılan LED armatürlere ait fotometrik çıktılar görülmektedir. Bu senaryolarda kullanılan floresan ve LED armatürlerin aygıt verimleri sırasıyla %59,5 ve %62,6’dır. Her üç senaryo içinde armatür verimlilikleri de dikkate alınarak yapılan işlemlerde aydınlatma düzeylerinde bir düşüş olsa da TS EN 12464-1:2021-09 – Işık ve aydınlatma – Çalışma yerlerinin aydınlatılması [6] standardına göre çalışma masası düzleminde ortalama aydınlık düzeyinin uygun olduğu yani ofis ortamı için minimum aydınlık düzeyi şartlarını sağladıkları gözlemlenmiştir. LED tüplerin açma kapama sayısının floresan lambalara göre fazla olması ömrünü arttırmakta olup, mevcut durumdaki balastla uyumlu olan tipleri ile değişim maliyetini de azaltmaktadır. LED tüplerin dezavantajı fiyatlarının floresan lambalara göre fazla olmasının yanı sıra incelenen 0,6 m uzunluğundaki LED tüplerde ışık akısının floresan lambalara göre biraz daha düşük olmasıdır. Yapılan incelemelerde LED tüp ürünlerinin etkinlik faktörleri floresan lambalara göre yüksek olmakla birlikte; güç tüketimi floresan lambalara göre yarı yarıya düşüktür ve elektrik enerjisinde kayda değer bir tasarruf sağladığı görülmektedir.

4. Aydınlatma Tasarımı

Bu bölümde LED tüpler için yapılacak retrofit işleminin fayda-maliyet analizi yapılmıştır. Ofiste mevcut olarak bulunan 4x18 W T8 floresan armatürün yerine diğer lamba tiplerinin armatüre yerleştirilmesiyle oluşacak durumdaki ekonomik durum ve yatırım kârlılığı ortaya konulmuştur. Ofisin cumartesi ve pazar günleri kapalı olduğu varsayımı yapılmış olup, üç armatürün de hafta içi beş gün olmak üzere günde sekiz saat çalıştığı kabul edilmiştir. Elektrik birim fiyatı, lamba değişimi için birim işçilik maliyeti, balast hurda değeri gibi diğer değerleri içeren parametreler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Tüm senaryolardaki lamba tiplerinin özellikleri.

Ofisteki toplam armatür sayısı	3 adet
Günlük çalışma saati	8 saat/gün
Yıldaki çalışılan gün sayısı	261 gün/yıl
Yıldaki çalışma saati	2088 saat/yıl
Elektrik birim fiyatı	3,78 TL/kWh
Lamba değişimi birim işçilik maliyeti	5 TL/lamba değişimi
Balast hurda değeri	50 TL/lamba

Elektrik enerjisinden ne kadar tasarruf edilebileceği retrofit işlemleri için ilk başta düşünülmesi gereken konudur. Öncelikle ele alınan sistemin 1 yıl boyunca çalışma saati (T_i), Denklem 1’de verilmiştir.

$$T_i = \text{Günlük çalışma saati} \left(\frac{\text{saat}}{\text{gün}} \right) \times \text{Yıldaki aktif gün sayısı} \left(\frac{\text{gün}}{\text{yıl}} \right) \quad (1)$$

Mevcut sistemdeki armatürlerin 1 yılda harcadığı enerjiyi (W_i) bulabilmek için Denklem 2 kullanılmıştır ve böylece sistem tek zamanlı, üç zamanlı veya dinamik fiyatlandırmayı içeren herhangi bir elektrik tarifesinin kullanılmasına göre armatürlerin 1 yılda tükettiği elektrik enerjisi fiyatı ($C_{el,i}$) Denklem 3 ile hesaplanmıştır.

$$W_i = \frac{n \cdot z_i \cdot P_i \cdot T_i}{1000} \quad (2)$$

$$C_{el,i} = E_{birim} \cdot W_i \quad (3)$$

Denklem 1-3'te, önerilen sistem için de sırasıyla uygulanır. Önerilen sistemin mevcut durumdaki yapıya göre 1 yılda oluşturacağı enerji tasarrufu ($C_{ts,el}$) Denklem 4 ile belirlenir. Burada sırasıyla; n , toplam armatür sayısını, z_i , i armatüründe bulunan toplam lamba sayısını, P_i , i lamba tipinin gücünü, $C_{el,i}$, i lamba tipinin oluşturduğu tüm armatürlerin 1 yılda tükettiği elektrik enerjisinin fiyatını, $C_{ts,el}$ ise 1 yılda oluşacak olan toplam elektrik enerjisi tasarrufunu ifade etmektedir.

$$C_{ts,el} = C_{el,floresan} - C_{el,LED} \quad (4)$$

LED'lerin ömrünün daha uzun olması ve böylece LED'lerin mevcut sistemdeki lamba tipinden daha az değişim gerektireceği ve maliyetinin daha az olduğu düşünülür. Diğer yandan LED'lerin fiyatının mevcut sistemdeki lamba fiyatından daha yüksek olduğu bilinmektedir. Bu yüzden yıllık yedek lamba sayısının tasarruf mu yoksa gidere mi yol açtığı belirlenmelidir. Her iki sistem için de toplam yıllık yedek lamba sayısı ($n_{deg,i}$) ile maliyeti ($C_{deg,i}$) ve elde edilen tasarruf veya gider ($C_{ts,deg}$) sırasıyla Denklem 5, Denklem 6 ve Denklem 7 ile bulunmaktadır. Burada sırasıyla; $h_{ömür,i}$, i lamba tipinin ömrünü, $C_{m,i}$, i lamba tipinin birim fiyatı belirtmektedir.

$$n_{deg,i} = \frac{n \cdot z_i \cdot T_i}{h_{ömür,i}} \quad (5)$$

$$C_{deg,i} = C_{m,i} \cdot n_{deg,i} \quad (6)$$

$$C_{ts,deg} = C_{deg,floresan} - C_{deg,LED} \quad (7)$$

Aynı durum yıllık işçilik maliyetinden elde edilecek tasarruf için de uygulanacak olursa; her iki durum için de değişecek lambaların yıllık işçilik maliyeti $C_{iş,i}$ ve işçilik maliyetinden elde edilen tasarruf veya gider $C_{ts,işçilik}$ sırasıyla Denklem 8 ve Denklem 9 ile hesaplanmaktadır. Yıllık lamba değişimi nedeniyle oluşabilecek başka durumlar benzer ifadelerle de elde edilebilir. Hesaplanan tasarruflar toplam yıllık tasarruf $C_{ts,toplam}$ olarak Denklem 10 ile ifade edilir. Burada; L_{birim} , birim lamba başına işçilik maliyetini göstermektedir.

$$C_{iş,i} = L_{birim} \cdot n_{deg,i} \quad (8)$$

$$C_{ts,işçilik} = C_{iş,floresan} - C_{iş,LED} \quad (9)$$

$$C_{ts,toplam} = C_{ts,el} + C_{ts,deg} + C_{ts,işçilik} \quad (10)$$

İlk yatırım maliyetinin hesaplanmasında değiştirilmesi önerilen tüm lambaların maliyetleri, işçiliği ve önceki sistemden kalan varsa hurda değerlerinin de dikkate alınması gerekmektedir. Bu yüzden toplam yatırım maliyeti ($C_{yt,toplam}$) Denklem 11, değiştirilmesi önerilen LED'lerin toplam satın alma maliyeti ($C_{tm,LED}$) Denklem 12 ile lamba değişimi için ilk yatırım işçilik maliyetinin ($C_{iş,LED}$) Denklem 13 toplamıyla önceki sistemden kalan hurda tasarruflarının oluşturduğu gelirlerinin ($C_{ts,hurda}$) Denklem 14 çıkarılmasıyla belirlenmektedir. Burada C_{hurda} mevcut balast için hurda değerini gösterir.

$$C_{yt,toplam} = C_{tm,LED} + C_{iş,LED} - C_{ts,hurda} \quad (11)$$

$$C_{tm,LED} = n \cdot z_{LED} \cdot C_{m,LED} \quad (12)$$

$$C_{i\dot{s},LED} = n \cdot z_{LED} \cdot L_{birim} \quad (13)$$

$$C_{ts,hurda} = n \cdot z_{floresan} \cdot C_{hurda} \quad (14)$$

Son olarak geri ödeme süresi Denklem 15 ifade edilmiş olup yıllık tasarrufların oluşturduğu kazançların yatırım maliyetine ne kadar sürede ulaştığını tanımlamaktadır. Kısaca geri ödeme süresi önerilen sistemin yatırım yapılabilirliğini başka bir ifadeyle fizibilitesini göstermektedir.

$$\text{Geri ödeme süresi} = \frac{\text{Yatırım maliyeti}}{\text{Yıllık tasarruf}} = \frac{C_{yt,toplam}}{C_{ts,toplam}} \quad (15)$$

Mevcut bulunan floresan lambaların yerine değiştirilecek LED tüp lamba durumları ayrı ayrı senaryolarla ekonomik olarak incelenmiştir. Tüm senaryolar için Denklem 1-15'te uygulanmış olup; elde edilen toplam maliyet, yıllık tasarruf ve geri ödeme süreleri gibi sonuçlar Tablo 3'te paylaşılmıştır. Tablo incelendiğinde, toplam yıllık tasarruf miktarı Senaryo 1, 2 ve 3'te sırasıyla 925,38 ₺/yıl, 779,30 ₺/yıl ve 1035,96 ₺/yıl olarak hesaplanmıştır. Böylece bu senaryolarda geri ödeme süreleri sırasıyla 5 ay, 13 ay ve 7,3 ay olarak belirlenmiştir. Bu çalışma, geçmişte yapılan araştırmalarla [16] karşılaştırıldığında LED retrofit sonucunda hesaplanan 4 yıl geri ödeme süresinden daha iyi bir sonuç alınmıştır.

Tablo 3. Fayda-maliyet analizi.

Özellikler		Referans	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3
Lamba tiplerinin özellikleri	Armatür başına lamba sayısı (adet)	4	4	4	4
	Lamba başına güç değeri (W)	18,55*	9	10,5	8
	Lamba fiyatı (₺)	30	40	78	60
	Lamba ömrü (saat)	15000	30000	50000	75000
	Yedek lamba sayısı (adet)	1,6704	0,8352	0,5011	0,3341
Retrofit sonucu oluşan yatırım maliyeti	Toplam lamba fiyatı (₺)	-	480	936	720
	Teslimat ve kurulum (₺)	-	60	60	60
	Diğer, hurda değeri (₺)	-	150	150	150
	Toplam yatırım maliyeti (₺)	-	390	846	630
Retrofit sonucu oluşan yıllık maliyetler	Yedek lamba satın alma maliyeti (₺/yıl)	50,11	33,41	39,09	20,04
	Enerji tüketimi (kWh/yıl)	38,732	18,792	21,924	16,704
	Enerji tüketim maliyeti (₺/yıl)	1756,90	852,41	994,47	757,69
	İşçilik (₺/yıl)	8,35	4,18	2,51	1,67
	Toplam yıllık maliyet (₺/yıl)	1815,37	889,99	1036,07	779,41
Retrofit sonucu yatırımın kârlılığı	Toplam yıllık tasarruf (₺/yıl)	-	925,38	779,30	1035,96
	Geri ödeme süresi (ay)	-	5	13	7,3

* Elektronik balast güç kaybı dahil edilmiştir.

5. Tartışma ve Sonuç

LED ürünleri artan enerji verimliliğine ve satın alma maliyetlerindeki azalışa bağlı olarak hızla yaygınlaşmaktadır. Dahası, yıllık maliyetlerde büyük bir paya sahip olan enerji tüketiminin floresan lambalara göre düşük olması amortisman sürelerini kısaltmaktadır. Bu nedenle yatırım maliyetleri görece floresan lambalara yakın olan LED tüp ürünlerinin floresan lambalarla değişimi halinde geri ödeme sürelerinin avantajlı olacağı ve bu yatırımların kârlı olacağı görülmektedir. Bu çalışmada; ofislerde yaygın olarak kullanılan floresan lambaların yerine LED tüp lambaların kullanılması durumunda aydınlatma kalitesi, enerji verimliliği ve ekonomisi yönetsel olarak karşılaştırılmıştır.

TS EN 12464-1:2021-09 standardına göre orta ve yüksek verimli LED tüplerin kullanıldığı senaryolarda minimum aydınlık düzeyi şartları sağlanmış, ancak düşük verimli LED tüplerin kullanılmasında ortalama aydınlık düzeyi sağlanamamıştır. Ayrıca düşük verimli LED tüp kullanılan 1. senaryoda UGR değerinin mevcut durumdaki floresan armatürlü yapıdaki UGR değerine göre düşük olduğu hesaplanmış olup diğer 2. ve 3. senaryolarda kamaşma değerinin referans senaryoya neredeyse aynı değere sahip olduğu görülmüştür.

Fayda-maliyet analizleri; düşük, orta ve yüksek verimli LED tüplerde geri ödeme sürelerinin sırasıyla 0,42 yıl, 1,08 yıl ve 0,6 yıl olduğunu göstermiştir. Yıllık enerji tüketimi açısından bakıldığında ise yüksek verimli LED tüplerin; düşük verimli LED tüp versiyonlarına göre %24, geleneksel floresan lambalara göre %57 daha az enerji

harcadığı görülmüştür. LED tüp ile yapılan retrofit işlemlerinde, incelenen orta ve yüksek verimli LED tüpler için yatırım yapılabilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Sonuçlar, LED tüp retrofit uygulamalarının ofisler için uygun olduğunu, ayrıca uzun aydınlatma süreleri olan ve sayıca daha fazla ışık kaynağına sahip kamu binaları, endüstriyel ve ticari tesislerde daha ekonomik sonuçlar elde edilebileceğini göstermiştir. Sonraki çalışmalarda, doğal ışık etkisi ve LED armatürlerin dimmerlenmesi dikkate alınarak aydınlatma kalitesi ve enerji verimliliği performanslarının incelenmesi planlanmaktadır.

Kaynaklar

- [1] International Energy Statistics- World. <https://www.eia.gov/international/data/world> (Erişim Tarihi: 02.04.2023).
- [2] IEA, Global electricity consumption by lighting in the Net Zero Scenario, 2010-2030, IEA, Paris. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electricity-consumption-by-lighting-in-the-net-zero-scenario-2010-2030> (Erişim Tarihi: 02.04.2023).
- [3] Soori PK, Vishwas M. Lighting control strategy for energy efficient office lighting system design. *Energy and Buildings* 2013; 66: 329–337.
- [4] Khan N, Abas N. Comparative study of energy saving light sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011; 15(1): 296–309.
- [5] Esteki M, Khajehoddin SA, Safaee A, Li Y. LED Systems Applications and LED Driver Topologies: A Review. *IEEE Access* 2023; 11: 38324-38358.
- [6] TS EN 12464-1:2021-09 – Işık ve aydınlatma – Çalışma yerlerinin aydınlatılması – Bölüm 1: Kapalı çalışma alanları. Türk Standartları Enstitüsü, Eylül 2021.
- [7] De D, Sahana S, Roy B. Performance analysis of fluorescent and led lamp system. In: *International Conference on Computer, Electrical & Communication Engineering*; 16-17 December 2016; India.
- [8] Vahl FP, Campos LMS, Filho NC. Sustainability constraints in techno-economic analysis of general lighting retrofits. *Energy and Buildings* 2013; 67: 500-507.
- [9] Ma Z, Cooper P, Daly D, Ledo L. Existing building retrofits: methodology and state-of-the-art. *Energy and Buildings* 2012; 55: 889–902.
- [10] Ryckaert WR, Smet KAG, Roelandts IAA, Gils MV, Hanselaer P. Linear LED tubes versus fluorescent lamps: An evaluation. *Energy and Buildings* 2012; 49: 429-436.
- [11] Myer MA, Paget ML, Lingard RD. CALiPER Benchmark Report–Performance of T12 and T8 Fluorescent Lamps and Troffers and LED Linear Replacement Lamps, Prepared for the U.S. Department of Energy by Pacific Northwest National Laboratory, 2009. https://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-18076.pdf (Erişim Tarihi: 02.04.2023).
- [12] Fantozzi F, Bail LL, Leccese F, Rocca M, Salvadori G. General lighting in offices building: Techno-economic considerations on the fluorescent tubes replacement with LED tubes. *International Journal of Engineering and Technology Innovation* 2017; 7(3): 143–156.
- [13] Uken E, Bevan G, Smith R. LED tube retrofits for fluorescent lighting in offices. In: *Proceedings of the 10th Industrial and Commercial Use of Energy Conference*; 20-21 August 2013; South Africa. pp. 1-4.
- [14] Davidovic M, Kostic M. Comparison of energy efficiency and costs related to conventional and LED road lighting installations. *Energy* 2022; 254(B): 124299.
- [15] Ayaz R, Ozcanli AK, Nakir I, Bhusal P, Unal A. Life Cycle Cost Analysis on M1 and M2 Road Class Luminaires Installed In Turkey. *Light & Engineering* 2019; 27(1): 61-70.
- [16] Ganandran GSB, Mahlia TMI, Ong HC, Rismanchi B, Chong WT. Cost-Benefit Analysis and Emission Reduction of Energy Efficient Lighting at the Universiti Tenaga Nasional. *The Scientific World Journal* 2014; 11.
- [17] Gan, CK, Sapar AF, Mun YC, Chong KE. Techno-Economic Analysis of LED Lighting: A Case Study in UTeM's Faculty Building. *Procedia Engineering* 2013; 53: 208-216.
- [18] Lusijarto TT, Subekti RA, Susanti V. In: *Economic analysis and energy consumption approaches for lighting improvement of government building facilities. International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application*; 23-24 October 2017; Indonesia. pp. 106-112.
- [19] Pereira LS, Pontes Y, da Costa FMPR. Energy efficiency in the replacement of fluorescent lamps by led: Application in a store. In: *Brazilian Power Electronics Conference*; 19-22 November 2017; Brazil. pp. 1-4.
- [20] Hung L, Anderson SJ, Pipkin A, Fristrup K. Changes in night sky brightness after a countywide LED retrofit. *Journal of Environmental Management* 2021; 292: 112776.
- [21] Atılğan LE, Enarun D. A case study of lighting Turkish historic mosques using LEDs: Semsî Ahmet Pasha Mosque. *Lighting Research & Technology* 2017; 50(6): 894-910.
- [22] Dubnička R, Lipnický L, Barčík M, Gašparovský D. Comprehensive view of LED products in luminaires. In: *Diagnostic of Electrical Machines and Insulating Systems in Electrical Engineering*; 20-22 June 2016; Slovakia. pp. 66-70.
- [23] RAB Lighting, LED T8 Tube Series – Ballast Compatible & Ballast Bypass, 2019. https://www.rablighting.com/sites/default/files/features/instructions/hybrid_led_tubes_0.pdf (Erişim Tarihi: 02.04.2023).
- [24] LEDISON Lighting, “Wiring Instructions T8/T5 Dimmable LED Tubes – 3 in 1 Dimming Function”, Ver. 4.0. https://ledison-led-lights.co.uk/mpattachments/file/download/id/102/product_id/733/ (Erişim Tarihi: 02.04.2023).