

Sokak Aydınlatması Dönüşümü Fayda Maliyet Analizi Üzerine Bir Mühendislik Ekonomisi Çalışması

Emre YILMAZ^{*,a}, Orhan ERDEN^a, Nuri Yunus KOCADAĞ^b

^{a,*} Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, ANKARA 06500, TÜRKİYE

^{b,*} Bingöl Üniversitesi Teknik Bilimler MYO Elektrik ve Enerji Bölümü, BİNGÖL 12000, TÜRKİYE

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 05.12.2019
Kabul: 27.12.2019

Anahtar Kelimeler:

Sokak aydınlatması,
Yol aydınlatması,
LED aydınlatma,
LED armatür,
LED sokak armatürü

***Sorumlu Yazar:**

e-posta:
emre.yilmaz@aydinlat
ma.org

ÖZET

Aydınlatma teknolojileri geliştikçe daha verimli aydınlatma aygıtları geliştirilmiştir. Mevcut durumda kullanılan geleneksel aydınlatma sistemlerinin yeni teknolojilerle değiştirilmesiyle enerji tasarrufu sağlanacağı açıktır. Bu kapsamda ülkemizde sokak aydınlatmalarında uzun yıllar boyunca kullanılan geleneksel aydınlatma armatürlerinin LED aydınlatma armatürleriyle dönüşümü planlanmaktadır. LED aydınlatma sistemleri, geleneksel aydınlatmalara göre daha verimli ve daha uzun ömürlüdür. Bu sayede ciddi bir tasarruf sağlayacağı söylenebilir. LED teknolojisi gün geçtikçe ucuzlansa da milyonlarca sokak lambasının LED dönüşümü için hala büyük bir harcama yapılması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında ülkemizde yapılması planlanan sokak aydınlatması dönüşümünün 5 yıllık fayda maliyet analizi gerçekleştirilmiştir.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2019.03.09>

An Engineering Economy Study on Cost-Benefit Analysis of Street Lighting Transformation

ARTICLE INFO

Received: 05.12.2019
Accepted: 27.12.2019

Keywords:

Street lighting,
Road lighting,
LED lighting,
LED luminaire,
LED street light

***Corresponding**

Authors

e-mail:
emre.yilmaz@aydinlat
ma.org

ABSTRACT

As lighting technologies have evolved, more efficient lighting devices have been developed. It is clear that energy saving can be achieved by replacing the currently used traditional lighting systems with new technologies. It is planned to transform traditional lighting fixtures used in street lighting for many years with LED lighting fixtures in our country. LED lighting systems are more efficient and last longer than traditional lighting. In this way, it can be said that it will provide significant savings. Even though LED technology is getting cheaper every day, there is still a huge expense for the LED conversion of millions of street lamps. Within the scope of this study, a 5-year cost-benefit analysis of the street lighting transformation planned to be performed in our country was performed.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2019.03.09>

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnsanoğlu, aydınlatma ihtiyacını binlerce yıldır farkı yollarla karşılamaktadır. Güneş ışığı, ateş, mum ve akkor filaman lambalar gibi ışığın doğal yolla elde edilmesinin sonrasında floresan ve LED teknolojisine geçiş yapılmıştır. Yeni gelen her teknoloji bir önceki teknolojiyle kıyaslandığında pek çok avantaja sahiptir. Her yeni teknolojide öne çıkan ve bu teknolojilerin kolayca benimsenmesini sağlayan özellik ise ışık verimidir. Diğer bir deyişle, ışık kaynaklarının birim ışığı üretmek için harcadığı enerji miktarı yeni teknolojiler yardımıyla gün geçtikçe azalmaktadır.

Işık verimi, bir aydınlatma elemanının elektrik gücünü ışığa ne kadar verimle dönüştürdüğünü belirtir. Işık akısının güce oranı, watt başına lümen cinsinden ifade edilir ve lm/W şeklinde sembolize edilir. Işık verimi (ışık etkinliği), belirli bir miktar güç ile elde edilen aydınlatma gücünü ifade eder. Bir ışık kaynağı, bir watt güç harcayarak kaç lümen ışık çıktısı sunuyorsa bu ışık verimidir.

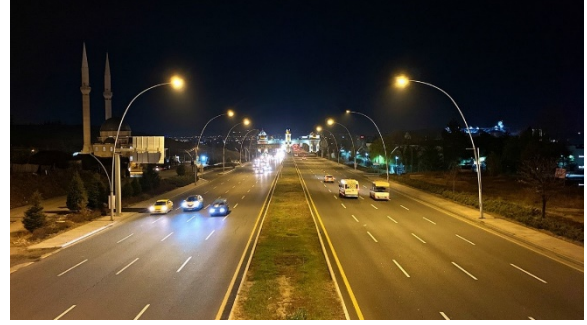
Dünyadaki gidişat diğer teknolojilerde olduğu gibi aydınlatma armatürlerinde de daha verimli, daha uzun ömürlü, bakım gerektirmeyen, zararlı maddeler içermeyen, gelişen ve değişen teknolojiye uyumlu ve yönetilebilen LED aydınlatma sistemlerine doğru gitmektedir [1].

Günümüzde, tüm dünyada iç ve dış mekân aydınlatmalarında LED teknolojisine dönüşüm süreci yaşanmaktadır. Bu dönüşümün ivmelenmesinde teknolojik gelişmelere bağlı iki ana etken bulunmaktadır. Birincisi, ışık veriminin güç geçtikçe artması, ikincisi ise ürün fiyatlarının düşmesidir.

LED dönüşümünün uygulandığı alanlardan bir tanesi de sokak aydınlatmaları ya da diğer bir deyişle yol aydınlatmalarıdır. Dünyanın dört bir yanında hükümetler, belediyeler ve elektrik şirketleri enerji tüketimini ve buna bağlı giderlerini azaltmak için sokak aydınlatmalarında LED teknolojisine geçiş yapmaktadır.

Ülkemizde sokak aydınlatmalarındaki LED dönüşümü 2018 yılında açıklanan Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı'na dahil edilmiştir. Bu plan dahilinde Türkiye'deki 7,5 milyon sokak lambasının yüzde 30'unun (2,25 milyon sokak lambası) 2023 yılına kadar değiştirilmesi planlanmaktadır [2].

Sokak aydınlatmaları dönüşümüne ilişkin iki farklı görüş bulunmaktadır. Birincisi, sokak aydınlatmalarında mevcut durumda kullanılan yüksek basınçlı sodyum buharlı (YBSB) lambaların hala çok verimli ve uzun ömürlü olduğu bu sebeple dönüşümün mantıklı bir yatırım olmadığı yönündedir. Diğer bir görüş ise LED aydınlatma teknolojilerinin daha yüksek verim ve daha uzun ömür sunarak kendini kısa sürede amorti edeceği şeklindedir.



Resim 1. Ankara'da bir yol aydınlatma uygulaması (*A road lighting application in Ankara*)

Sokak aydınlatmalarında yapılacak yenileme bir kamu yatırımdır ve kamu yatırımları halkın faydası için yapılmalıdır. Bu çalışmada sokak aydınlatmalarında yapılması planlanan LED dönüşümünün fayda maliyet analizi gerçekleştirilerek yapılan yatırımın sağlanacak fayda ile karşılaştırması yapılacaktır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LITERATURE RESEARCH)

Hem iç hem de dış aydınlatmada enerji tasarrufunun en etkin yolu ihtiyaç duyulmayan ışık kaynaklarının kapatılmasıdır. 1980'lerde Japonya'da yolların aydınlatma kontrolü konsepti oluşturulmuştur. Fakat teknik imkanların yetersizliğinden dolayı gerçekleştirilememiştir. LED teknolojisi bu konseptin geliştirilmesini ve uygulanmasını sağlamıştır [3].

Yol güvenliği için yapılan ergonomik araştırmalar, daha fazla güvenlik ve konforlu yol aydınlatma seçenekleri önemli hale gelmiştir [4].

YBSB lambalar 1968'den beri yol aydınlatmalarında kullanılmıştır. Yol aydınlatmalarında YBSB yerine güncel aydınlatma verimliliğine sahip LED'ler kullanıldığında ne kadar enerji tasarrufu elde edileceğiyle ilgili 2009 yılında Çin'de yapılan bir çalışma ile günün şartlarına göre böyle bir değişimin çok gerekli olmadığı sonucuna

ulaşmıştır. Bu çalışmada YBSB ve LED lambaların verimlilikleri karşılaştırılmıştır. Yol aydınlatmalarında kullanılan YBSB lambaların armatür verimliliği 70.1 lm/W ve LED lambaların 72.9 lm/W olarak belirlenmiştir. Yakın gelecekte LED'lerin ilk maliyet, kullanım ömrü, sıcaklık ve aydınlatma verimliliklerinde yapılacak geliştirmelerle en tasarruflu ışık kaynağı olacağı belirtilmiştir [5].

LED armatürlerde ışık doğrudan aşağı yönlendirilebilirken YBSB armatürleri içerisinde yansımalarından dolayı kayıplar olmakta ve ışık verimsiz kullanılmaktadır. Çoğu insan ay ışığına benzediği için dış mekân aydınlatma uygulamalarında beyaz ışığı tercih ettiği görülmüştür. YBSB lambaların ışıkları sarımsı yani düşük renk sıcaklığına sahipken LED lambalar yüksek renk sıcaklıklarında daha verimli bir şekilde çalışabildiği belirlenmiştir [6][7].

ABD'de bazı bölgelerde yapılan HID-LED dönüşümlerinin maliyet, ürün ömrüyle ilgili bazı örnekler verilmiştir. 2012'de Minnesota'da HID lambaların 21.000 saat, LED lambaların 78.000 saat çalışma ömürleri baz alınarak yılda 3.550 saat çalışmaya karşılık 8-12 yıl aralığında LED'e yapılan yatırımın geri ödeneceği hesaplanmıştır. 2013'te Phoenix'te 95.000 HID armatürün LED'e dönüşümüyle ilgili yapılan çalışmada 1 milyon \$ yatırımın 9 yıllık basit geri ödeme süresi ve 10 yıl ve üzeri süre zarfında ise 5 milyon \$ yıllık getiri sağlayacağı hesaplanmıştır. 2016 yılında Charlotte Country'de 2145 noktada yapılacak YBSB-LED dönüşümünün maliyet analizinde 20 yıllık süre boyunca maliyetlerin yakın olduğu ancak düşen LED maliyetleriyle LED dönüşümünün daha ekonomik bir seçenek olacağı sonucuna varılmıştır [8].

Körfez Arap Ülkeleri İşbirliği Konseyi (KİK)'nin ulaşım yollarında kullanılan günlük çalışma süresi 11 saat olarak belirlenen, 1131 adet güç tüketimi 400W ve kullanım ömrü 18.000 saat olan YBSB aydınlatma armatürlerinin yerine yine aynı sayıda güç tüketimi 100W ve kullanım ömrü 80.000 saat olan LED armatürleri kullanıldığında 2015-2016 yılları arasındaki fiyat tekliflerine göre 20 yıllık maliyet analizi yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda yapılan dönüşümün şirkete ve doğaya yararları hesaba katılarak yıllık ortalama tasarrufun YBSB-LED dönüşümüyle oluşan toplam güç tüketimine oranı 433,36\$/kW ve şirketin 20 yıl sonunda yaptığı tasarruf \$4.492.317.72 olarak bulunmuştur [9].

Yunanistan'ın kuzeyinde 670 km'lik bir mesafeyi kapsayan Egnatia Odos bölgesinde, sokak

aydınlatmalarında kullanılan YBSB aydınlatma armatürlerinin, LED aydınlatmaya dönüşümüyle birlikte elde edilen enerji tasarrufu ve LED teknolojisinin gelişmesinin daha yakından incelenmesi amacıyla 2017 ve 2019 yıllarında kullanılan LED armatürlerle adaptif ve normal çalışma koşullarında karşılaştırmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda 2019 yılında LED teknolojisindeki gelişmelerle 2017 yılına göre adaptif ve normal kullanıma bağlı olarak enerji tasarrufunda %13,57-%27,93 aralığında verim artışı sağlanmıştır [10].

3. YOL AYDINLATMA SINIFLARI (ROAD LIGHTING CLASSES)

Yol aydınlatmalarının, aydınlatma sınıflarının belirlendiği EN 13201-1, performans özelliklerini içeren EN 13201-2, performans hesaplamalarını içeren EN 13201-3 ve aydınlatma performansını ölçme metodlarını içeren EN 13201-4 standart özelliklerini sağlaması gerekmektedir.

Uluslararası Aydınlatma Komisyonu CIE tarafından yayınlanan CIE 115:2010 teknik raporunda güç tüketiminin önemi, aydınlatma armatürlerinin parlaklık performansının geliştirilmesi, trafikte karşılaşma bölgelerinde parlaklık seviyesinin değişimi, teknoloji gelişiminin önemi gibi konulara değinilmiştir. Bu rapora göre yol aydınlatması sınıflandırması yapılırken motorlu araçlar M sınıfı, trafikte karşılaşma bölgeleri C sınıfı ve yayalar ile düşük hızlı trafik bölgeleri P sınıfı olarak kategorize edilmiştir. CIE 115:2010'a göre M yol aydınlatması sınıfının seçimi için aşağıdaki Tablo 1'de verilen parametreler kullanılmıştır.

Tablo 1. Yol aydınlatma sınıfı seçim parametreleri (Road lighting class selection parameters) [11]

Parametre	Seçenek	Ağırlık Değeri (Vw)
Hız	Çok Yüksek	1
	Yüksek	0.5
	Orta	0
Trafik yoğunluğu	Çok Yüksek	1
	Yüksek	0.5
	Orta	0
	Düşük	-0.5
Trafik dağılımı	Çok Düşük	-1
	Yüksek oranda motorlu araç olmayan trafikle karışık	2
	Karışık	1
	Sadece motorlu araç	0
Yolda refüj ayırımı var mı?	Hayır	1
	Evet	0
Kavşak yoğunluğu	Yüksek	1
	Orta	0
Park etmiş araç var mı?	Var	0.5
	Yok	0
Çevre aydınlatması	Yüksek	1
	Orta	0
	Düşük	-1
Görsel kılavuz/Trafik kontrolü	Zayıf	0.5
	Orta veya İyi	0

Tablo 1’de verilen parametrelere göre ağırlık değerleri toplanır ve Denklem 1 kullanılır. Eğer değer tam sayı değilse bir aşağıdaki sayıya yuvarlanarak Tablo 2’de belirtilen M aydınlatma sınıfı belirlenir.

$$Mx = 6 - Vx \quad (1)$$

Tablo 2. Değişik yol aydınlatma sınıflarında sağlanması gereken yol aydınlatması kriterleri (Road Lighting criteria for different road lighting classes) [12]

Aydınlatma sınıfı	$L_{ort} \geq$	$U_o \geq$	$U_i \geq$	TI (%) \leq	SR \geq
M1	2.0	0.4	0.7	10	0.5
M2	1.5	0.4	0.7	10	0.5
M3	1.0	0.4	0.5	10	0.5
M4	0.75	0.4	0.5	15	0.5
M5	0.5	0.35	0.4	15	0.5
M6	0.3	0.35	0.4	15	-

Tablo 2’de yer alan kısaltmalar aşağıda açıklanmıştır;

L_o : Yolun ortalama parlıltısı (cd/m^2)

U_o : Ortalama parlıltı düzgünlük değeri ($U_o=L_{min}/L_{ort}$)

U_i : Boyuna parlıltı düzgünlük değeri ($U_i=L_{min}/L_{maks}$)

TI : Bağıl eşik artışı ($TI=\{\Delta L_K-\Delta L_c\}/\Delta L_c$)

SR: Çevreleme oranı (Yolun enine sınırları göz önüne alınarak yolun dışındaki aydınlık düzeyinin yolun içindeki aydınlık düzeyine oranıdır.)

Tablo 3. Yolların aydınlatma sınıflarının belirlenmesi (Determination of lighting classes of roads) [12]

Yolun tanımı	Ayd. Sınıfı
Şehir bağlantı ve çevre yolları (tek veya iki yönlü, kavşaklar ve bağlantı noktaları ile şehir geçişleri dahil) - Hız ≥ 90 km/h ; - Hız < 90 km/h ;	M1 M2
Şehir içi ana güzergahlar (bulvarlar ve caddeler ; ring yolları ; dağıtıcı yollar) - $50 \text{ km/h} \leq \text{Hız} < 90 \text{ km/h}$; 3 km^2 den kısa aralıklarla kavşak, yonca ayırımı var ; - $50 \text{ km/h} \leq \text{Hız} < 90 \text{ km/h}$; 3 km^2 den kısa aralıklarla kavşak, yonca ayırımı yok ; - Hız < 50 km/h ;	M1 M2 M3
Şehir içi yollar (yerleşim alanlarına giriş çıkışın yapıldığı ana yollar ve bağlantı yolları) - Hız ≥ 50 km/h ; 3 km^2 den kısa aralıklarla kavşak, yonca ayırımı var ; - Hız ≥ 50 km/h ; 3 km^2 den kısa aralıklarla kavşak, yonca ayırımı yok ; - Hız < 50 km/h ; 3 km^2 den kısa aralıklarla kavşak, yonca ayırımı var ; - Hız < 50 km/h ; 3 km^2 den kısa aralıklarla kavşak, yonca ayırımı yok ;	M3 M4 M4 M5
Yerleşim (ikametgah) bölgelerindeki yollar - $30 \leq \text{Hız} < 50$ km/h ; suç oranı yüksek ; - $30 \leq \text{Hız} < 50$ km/h ; suç oranı normal ; - Hız < 30 km/h ; suç oranı yüksek ; - Hız < 30 km/h ; suç oranı normal ;	M4 M5 M5 M6

Tablo 3’te Türkiye şehir içi yol tanımları ve bu tanımlara uygun aydınlatma sınıfları verilmiştir.

IEC 60598-1 standardına göre M ve C sınıfı yollara ait armatürler IP65 veya daha yüksek korumaya, P sınıfı yollara ait armatürler ise IP55 veya daha yüksek korumaya sahip olmalıdır.

EN 13201-2'ye göre yol aydınlatması parlaklığına göre yol yüzeyinin kuru olduğu durumlar için altı sınıftan oluşan "ME" ve yol yüzeyinin nemli veya ıslak olduğu durumlarda "MEW" olarak sınıflandırılmıştır. ME6 yaya yolu, bisiklet yolu veya emniyet şeridi gibi anayolun bitişiğindeki bir şeridin asgari parlaklığını kontrol eder.

ME sınıfları bölgelerde parlaklık 0.3-2 cd/m² aralığında değişmektedir. Aydınlik düzeylerine göre "CE", "S" ve "A", "ES", "EV" olarak sınıflandırılmaktadır.

CE sınıfları alışveriş alanları gibi karmaşık kavşaklarda, trafik araç kuyruklarının fazla olduğu yerlerde ayrıca yayalar ve bisikletliler ile de ilgilidir. Yoldaki gereksinimlere göre 7.5-50 lux aralığında yatay düzlem aydınlatmalarıyla sınıflandırılmıştır.

S ve A sınıfları yaya yolları, bisiklet yolları, emniyet şeritleri gibi alanlara ilişkindir. S sınıfları 2-15 lux yatay düzlem aydınlığını belirtirken, A sınıfları 1-5 lux yarı küresel aydınlık düzeyini belirtmektedir.

ES sınıfı, suç ihtimalinin normalden fazla olduğu yollarda nesnelere ve insanların görünmesi için gerekli ek sınıflardandır. Yarı silindirik aydınlık düzeyi sınıfları 0.5-10 lux aralığındadır.

EV sınıfı, yol üzerinde gişe gibi geçiş bölgelerinde, kavşak alanlarında görülmesi gereken dikey yüzeyler için gerekli ek sınıftır. Dikey düzlemsel aydınlık düzeyi sınıfları 0.5-50 lux aralığındadır.

Tablo 4. Aydınlatma sınıflarının karşılaştırılması (Comparison of lighting classes) [13]

ME		CE		S	
Sınıflar	Parlaklık(cd/m ²)	Sınıflar	Aydınlık(lx)	Sınıflar	Aydınlık(lx)
-	-	CE0	50	-	-
ME1	2.0	CE1	30	-	-
ME2	1.5	CE2	20	-	-
ME3	1.0	CE3	15	S1	15
ME4	0.75	CE4	10	S2	10
ME5	0.5	CE5	7.5	S3	7.5
ME6	0.3	-	-	S4	5.0
-	-	-	-	S5	3.0
-	-	-	-	S6	2.0

Tablo 4'te farklı aydınlatma sınıflarının parametrelerine göre karşılaştırılması verilmiştir.

4. AYDINLATMA ARMATÜRLERİ (LIGHTING FIXTURES)

Ülkemizde sokak aydınlatmaları için mevcut durumda içerisinde yüksek basınçlı sodyum buharlı (YBSB) lambalar bulunan geleneksel aydınlatma armatürleri kullanılmaktadır.

Yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalar yüksek ışık verimine sahip olsa da lamba bir aydınlatma aygıtı içerisinde dahil edildiğinde ışık verimine etki eden bazı kayıplar ortaya çıkmaktadır. Bunlardan birincisi balast kaybı olarak bilinen lambayı çalıştırmak için kullanılan ateşleyici içerisinde harcanan enerjidir. Bir diğeri ise armatür gövdesi içerisindeki yansıtıcı yüzeylerde oluşan ışık kaybıdır.

Örneğin; 150W güçte çalışan yüksek basınçlı sodyum buharlı lamba 15.000 lümen ışık ürettiğinde bu 100 lm/W ışık verimi anlamına gelir ancak harici ateşleyici güç tüketimini artırır ve ışığın bir kısmı lambanın içerisine yerleştirildiği armatür içerisinde kaybolur. Bu da armatür geneli düşünüldüğünde ışık veriminin daha düşük olmasına sebep olur.



Resim 2. Yüksek basınçlı sodyum buharlı geleneksel aydınlatma armatürü (*High pressure sodium vapor lighting fixture*)

LED aydınlatma armatürlerinde ise, ışık kaynağı ve LED sürücü armatür gövdesi içerisine gömülüdür. LED teknolojisiyle donatılmış aydınlatma armatürlerinde ışık çıktısı sistem olarak ölçülür ve kayıplar bu ölçüme dahil edilmiştir.



Resim 3. LED sokak aydınlatma armatürü (*LED street lighting fixture*)

Sokak aydınlatmalarında kullanılan farklı üreticilere ait yüksek basınçlı sodyum buharlı aydınlatma armatürleri ve LED aydınlatma armatürlerinin güç tüketimleri, ışık çıktısı, etkinlik faktörü ve ekonomik ömrü Tablo 5'te yer almaktadır.

Tablo 5. Farklı üreticilere ait aydınlatma armatürlerinin performans değerleri (*Performance values of lighting fixtures from different manufacturers*)

Işık Kaynağı	Güç (W)	Işık Akısı (lm)	Etkinlik Faktörü (lm/W)	Ekonomik Ömrü (Saat)
YBSB 1	168	10505	63	20.000
YBSB 2	175	12530	72	
YBSB 3	169	11824	66	
LED 1	100	13000	130	50.000
LED 2	100	12300	123	
LED 3	100	12100	121	

Yukarıdaki tabloda görüldüğü üzere farklı üreticilere ait 100W güç tüketimine sahip LED armatürler, 168-175W güç tüketimine sahip YBSB aydınlatma armatürleri ile benzer ışık çıktısı sunmaktadır. Bu durum birebir değişim senaryosunda

aynı aydınlatma koşullarının sağlanması için 68-75W daha az enerji harcanacağı anlamına gelmektedir.

LED aydınlatma armatürlerinin bir diğer avantajı da daha uzun ekonomik ömre sahip olmasıdır. Işık kaynaklarında ışık akısı, kullanımdan kaynaklı yüzde 30 azaldığında ekonomik ömrünü tamamladığı kabul edilir. YBSB lambalarda bu süre 20.000 saat iken LED ışık kaynaklarında 50.000 saat ve üzerinde değerler elde edilebilmektedir.

LED aydınlatma dönüşümünde enerji tasarrufu sağlanır. Buna ek olarak LED'ler daha uzun ömürlü olduğundan lamba ve onarım maliyetlerinde de tasarruf sağlanır. Bunlar LED aydınlatma dönüşümünün başlıca faydalarıdır. Çalışmanın sonraki kısmında sokak aydınlatmalarında LED dönüşümünün fayda maliyet analizi gerçekleştirilecektir.

5. FAYDA MALİYET ANALİZİ (*COST BENEFIT ANALYSIS*)

Çalışmanın bu kısmında, Türkiye'de 2023 yılına kadar gerçekleştirilmesi planlanan 2.25 milyon sokak lambasının LED ile dönüşümünün 5 yıl için fayda maliyet analizi gerçekleştirilecektir.

Fayda maliyet analiz için yatırımdan elde edilecek fayda ve tasarruflar ile projenin gerçekleştirilmesi için yapılacak yatırım ayrı ayrı nakit akış diyagramlarında gösterilmelidir.

Yapılacak analiz sonrasında fayda maliyet oranı 1'den küçükse projenin yapımı reddedilir. Fayda maliyet oranı 1'den büyükse yatırımın gerçekleştirilmesi uygun olduğu sonucuna varılır.

Mevcut sokak aydınlatmalarının LED aydınlatma dönüşümünde toplam maliyet ürün bedeli ve montaj maliyetinin toplamından oluşur. Farklı üreticilere ait 5 yıl garanti ile sunulan 100W güç tüketimine sahip LED sokak armatürlerinin fiyatları aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 6. Farklı üreticilere ait LED sokak armatürü fiyatları (*LED street light prices from different manufacturers*)

Ürün Adı	Ürün Fiyatı (₺)
100W LED Sokak Armatürü 1	490
100W LED Sokak Armatürü 2	545
100W LED Sokak Armatürü 3	520

Hesaplamalarda yukarıdaki tabloda gösterilen farklı üreticilere ait aydınlatma armatürlerinin ortalama maliyeti olan 518 TL baz alınacaktır. Montaj maliyeti ise armatür başına 30 TL olarak hesaplanacaktır.

İşletme giderleri ise aydınlatma elemanından kaynaklı enerji tüketimi, lamba arızalarından kaynaklı lamba bedeli ve onarım maliyetinden oluşur.

Tablo 7. YBSB ve LED aydınlatma armatürlerinin güç tüketimi karşılaştırması (Power consumption comparison of MIS and LED lighting fixtures)

YBSB'li Armatür Güç Tüketimi (W)	Eşdeğer LED Armatür Güç Tüketimi (W)	Güç Tasarrufu Miktarı (W)	Tasarruf Yüzdesi
168	100	68	%40,48
175	100	75	%42,86
169	100	69	%40,83

Çalışmaya konu 3 farklı üreticiye ait YBSB lambalı aydınlatma armatürlerinin eşdeğeri LED aydınlatma armatürleri ile güç tüketimi karşılaştırması Tablo 7'de verilmiştir. Işık kaynağı olarak LED teknolojilerinden yararlanan LED armatürler aynı miktarda ışığı üretmek için geleneksel armatürler olan YBSB'li armatürlere göre yüzde 40-42 oranında daha az enerji harcamaktadır.

TEDAŞ (Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi) tarafından yayınlanan "Aydınlatma Mobil Takip Uygulaması" ile sokak lambalarının arızaları takip edilebilmektedir. TEDAŞ'ın verilerine göre 2019'un ilk 6 ayında 166 bin lamba onarılmıştır [14]. Bu da her yıl en az 332 bin lamba ve onarım maliyetinin ortaya çıktığını göstermektedir.

Türkiye'de yaklaşık 7,5 milyon sokak lambası olduğu bilinmektedir. 6 ay içerisinde 166 bin lamba onarıldığı için yıllık hata oranı yüzde 4,43 olarak hesaplanabilir. 2.25 milyon sokak lambasının LED dönüşümünün fayda maliyeti hesaplanması istendiğinden bu armatürlerde her yıl yüzde 4,43 oranla ortaya çıkan lamba bedeli ve onarım maliyeti sağlanacak fayda bölümünde yer almalıdır.

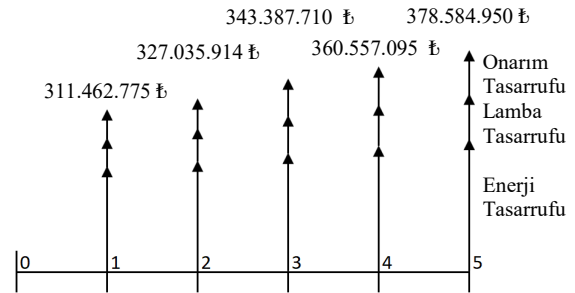
Mevcut durumda kullanılan 168W-175W güç tüketimine sahip sodyum buharlı armatürler yerine 100W LED armatürler kullanıldığında yaklaşık olarak yüzde 40 diğer bir deyişle 70 W daha az güç harcanacaktır. Bu da 2,25 milyon sokak armatürü için toplamda 157,5 MWh az enerji harcanması demektir. Ayda 30 gün ve günlük ortama 10 saat kullanımda ortaya çıkacak yıllık tasarruf miktarı Tablo 8'de gösterilmiştir.

Sodyum buharlı armatürlerde lamba bedeli yaklaşık olarak 23 TL'dir. İşçilik ve arıza bölgesine ulaşımı kapsayan onarım maliyeti ise yaklaşık olarak 30 TL'dir. Bu maliyetler toplam armatür sayısı ve hata oranıyla çarpılarak Tablo 8'deki veriler elde edilmiştir.

Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası (TCMB)'nin 2020 ve 2021 yılları için enflasyon hedefi yüzde 5'tir. Enflasyon hedefleri 3'er yıllık dönemler halinde belirtildiğinden 2022, 2023 yılları için bir değerlendirme henüz yapılmamıştır. Bu sebeple dördüncü ve beşinci yıllar için de enflasyon oranı yüzde 5 olarak hesaplanacaktır.

Tablo 8. Enerji tüketimi, lamba bedeli ve onarım maliyetinden kaynaklı tasarruf miktarı (Savings from energy consumption, lamp costs and repair costs)

Fayda	Tasarruf Miktarı (₺)				
	1.Yıl	2.Yıl	3.Yıl	4.Yıl	5.Yıl
Enerji Tüketimi	306.180.000	321.489.000	337.563.450	354.441.623	372.163.704
Lamba Bedeli	2.292.525	2.407.151	2.527.509	2.653.884	2.786.578
Onarım Maliyeti	2.990.250	3.139.763	3.296.751	3.461.588	3.634.668
Toplam	311.462.775	327.035.914	343.387.710	360.557.095	378.584.950



Şekil 1. Faydanın nakit akış diyagramı (Cash flow diagram of benefit)

Sokak aydınlatmalarında yapılacak LED dönüşümünde ortaya çıkacak maliyet ürün bedeli, montaj maliyeti ve onarım maliyetidir. LED'ler uzun ömürlü ışık kaynaklarıdır, herhangi bir bakım ya da onarıma ihtiyaç duymaz. Üreticiler de LED sokak armatürleri için 5 yıl garanti sunabilir. Ancak LED sokak armatürleri kullanıldıkları sürece bazı arızalar ortaya çıkabilir.

Kanada Ulaştırma Daimi Komitesi tarafından yayınlanan raporda 2014 yılında başlatılan 43.000 sokak armatürünün LED dönüşümüyle ilgili değerlendirmeler yapılmıştır. Raporda, LED sokak armatürlerinin yıllık hata oranının yüzde 1 ile yüzde 2 arasında olduğu belirtilmiştir. Arızaların çoğunun LED ışık kaynağı yerine bu kaynağı besleyen elektronik kontrol modülünden (sürücü) kaynaklandığı tespit edilmiştir [15].

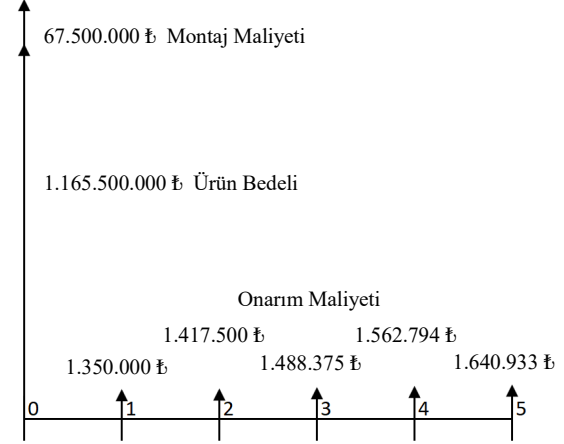
Arıza durumunda yeni sürücü devresi veya ürün değişimi için yeni ürün üretici tarafından garanti kapsamında sağlanacaktır. Ancak yine de mevcut sokak armatürünün veya armatür içerisindeki sürücünün değişimi için bir onarım maliyeti ortaya çıkacaktır. Yıllık yüzde 2 hata oranına göre ortaya çıkacak bu maliyet de maliyet tablosu ve akış diyagramına eklenmelidir.

Tablo 9. Ürün bedeli ve montaj maliyeti (Product cost and installation cost)

Maliyet	Toplam Maliyeti (₺)
Ürün Bedeli	1.165.500.000
Montaj Maliyeti	67.500.000

Tablo 10. Arızalardan kaynaklı ortaya çıkacak yıllık onarım maliyeti (Annual repair costs due to malfunctions)

Maliyet	Toplam Maliyeti (₺)				
	1. Yıl	2. Yıl	3. Yıl	4. Yıl	5. Yıl
Onarım Maliyeti	1.350.000	1.417.500	1.488.375	1.562.794	1.640.933



Şekil 2. Maliyetin nakit akış diyagramı (Cash flow diagram of cost)

$$\text{Maliyet} = \text{Ürün Bedeli} + \text{Montaj Maliyeti} + \text{Onarım Maliyeti} = 1.165.500.000 \text{ ₺} + 67.500.000 \text{ ₺} + 5 \times 1.350.000 = 1.239.750.000 \text{ ₺}$$

Fayda hesaplamasında sağlanan faydalar yatırımın yapıldığı yıla indirgenmiştir. Bu sebeple toplam fayda yıllık enflasyon etkisinde arındırılmış 5 yıllık toplamdır.

$$\text{Fayda} = 311.462.775 \text{ ₺} \times 5 = 1.557.313.875 \text{ ₺}$$

$$\text{Fayda/Maliyet} = 1.557.313.875 / 1.239.750.000 = 1,26 > 1 \text{ olduğu için projenin yatırımı uygundur.}$$

6. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

LED teknolojisi ile geliştirilmiş sokak armatürleri yüksek ışık çıktısı ve uzun ömür beklentisiyle uzun yıllardır sokak aydınlatmaları için kullanılan yüksek basınçlı sodyum buharlı armatürlere göre iyi bir alternatiftir. Geçmişte yapılan çalışmalar böyle bir dönüşümü gereksiz bulsa da günümüzde artık LED teknolojisi daha verimli ve daha kararlı bir aydınlatma çesidi haline gelmiştir.

En güncel LED aydınlatma çözümlerinin mevcut durumda kullanılan geleneksel aydınlatmalarla karşılaştırıldığı bu çalışmada; fayda maliyet analizi yapılarak sonucun 1'den büyük olduğu yani 5 yıl içerisinde sağlanacak faydanın bugünkü değerinin maliyetin bugünkü değerinden daha büyük olduğu sonucuna varılmıştır. Dolayısıyla, ülkemizde gerçekleştirilmesi planlanan sokak aydınlatması dönüşümü için yapımı uygundur sonucuna varılabilir.

LED sokak armatürlerinin sağladığı fayda yalnızca enerji tüketimi, lamba bedeli ve onarım maliyeti ile sınırlı değildir. LED'ler yönlü ışık kaynakları olduğundan ışık kirliliğinin de azaltılmasına yardımcı olmaktadır.

LED'ler uzun ömürlü (50.000, 60.000 ya da 90.000 saat) olsa da bir sistem içerisine dahil edildiklerinde giriş gerilimi, sürüş akımı, sıcaklık gibi etkenlerle ömürlerinde düşüş görülebilir. Üreticiler de ürünlerin kullanım ömrü ve garanti süresini belirlerken bu gibi etkenleri göz önüne almaktadır. Sokak aydınlatması dönüşümünde üretici firmalardan daha uzun garanti süreleri (8, 10, 12 yıl) talep edilebilir. Bu sayede sağlanacak fayda ve fayda maliyet oranı da artırılmış olacaktır.

Diğer bir taraftan LED sokak armatürlerinin kullanım sürelerini uzatmak için endüstri genelinde bir standardizasyon çalışması yapılabilir. LED modülleri ve elektronik kontrol tertibatı (LED sürücü) için standart bir arayüz (LED dizilerinin dağılımı, elektriksel özellikleri, ölçüleri, vida delikleri vb.) oluşturulursa aydınlatma armatürlerinin içerisinde kullanılan bileşenlerin tam değişebilirliği sağlanabilir. Bu sayede bir üretici tarafından sağlanan armatür içerisindeki LED modül veya LED sürücü arızalandığında başka bir üretici tarafından sağlanan parçalar ile onarımı yapılabilir. Bu yöntemle LED'leri dış etkenlerden koruyan ve çalışması için gerekli koşulları sağlayan armatür gövdesi uzun yıllar boyunca kullanılabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] E. Yılmaz, İ. Şahin, N. Y. Kocadağ. "LED Işık Kaynaklı, Enerji Tasarruflu ve Yüksek Verimli Ofis Aydınlatma Armatürü Tasarımı" *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi (GMBD)*, 2019, 5(2), 138-150.
- [2] M. Öztoprak, "LED Aydınlatma Dönüşümü Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı'na Girdi," *aydinlatma.org*, Mar. 30, 2018. [Online]. Available: <http://www.aydinlatma.org/led-aydinlatma-donusumu-ulusal-enerji-verimliliği-eylem-planina-girdi.html>. [Accessed: Dec. 7, 2019].
- [3] K. Yamada, T. Honda, "ROad - VEhicle Lighting Integration. A Study of the Phase I Roveli System," *The 3rd International Conference on Vehicle Navigation & Information Systems*, 2-4 Sept. 1992, Oslo [Online]. Available: IEEE Xplore, <https://ieeexplore.ieee.org>. [Accessed: 15 Nov. 2019].
- [4] S. Zalewski, "Concurrent Lighting System on Roads in Practice," *Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen V4)*, 13-16 Sept. 2016, Karpacz [Online]. Available: IEEE Xplore, <https://ieeexplore.ieee.org>. [Accessed: 15 Nov. 2019].
- [5] F. Li, D. Chen, X. Song, Y. Chen, "LEDs: a Promising Energy-Saving Light Source for Road Lighting," *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 27-31 Mar. 2009, Wuhan [Online]. Available: IEEE Xplore, <https://ieeexplore.ieee.org>. [Accessed: 17 Nov. 2019].
- [6] M. Oxley, "HIDing Light in the Landscape," *outdoorilluminating.com*, Mar. 2005. [Online]. Available: <http://outdoorilluminating.com/PDF/HIDingLightArticle.pdf>. [Accessed: 10 Nov. 2019].
- [7] Burlington Department of Planning & Zoning, "Design Review Guide: Outdoor Lighting," *burlingtonvt.gov*, 1999. [Online]. Available: <https://www.burlingtonvt.gov/sites/default/files/PZ/Design-Guides/DG-Lighting.pdf>. [Accessed: 10 Nov. 2019].
- [8] J. A. Puigarnau, "EU green public procurement criteria for road lighting and traffic signals," *data.consilium.europa.eu*, Dec. 21, 2018. [Online]. Available: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-15852-2018-INIT/en/pdf>. [Accessed: Oct.28 , 2019].
- [9] Muhammad M. A. S. Mahmoud, "Typical Economic Model for Calculating the Saving Norm of Replacement HPS Street Lighting by LED Fixtures in Access Road of Gas Production Company at GCC," *5th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE)*, 3-5 May 2018, Istanbul [Online]. Available: IEEE Xplore, <https://ieeexplore.ieee.org>. [Accessed: 25 Nov. 2019].
- [10] E. Anthopoulou, L. Doulos, "The effect of the continuous energy efficient upgrading of LED street lighting technology: The case study of Egnatia Odos" *Second Balkan Junior Conference on Lighting (Balkan Light Junior)*, 19-21 Sept. 2019, Plovdiv [Online]. Available: IEEE Xplore, <https://ieeexplore.ieee.org>. [Accessed: 1 Dec. 2019].
- [11] Commission Internationale de l'Eclairage "CIE 115-2010: Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic," *cie.co.at*, 2010. [Online]. Available: <http://www.cie.co.at/publications/lighting-roads-motor-and-pedestrian-traffic>. [Accessed: Nov. 8, 2019].

[12] "Yol Aydınlatma Armatürleri Teknik Şartnamesi TEDAŞ- MYD/95-009.B," *tedas.gov.tr*, 2008. [Online]. Available: http://www.tedas.gov.tr/sx.web.docs/tedas/tedas_arg e/docs/sartnameler/tedas_arge/TEDA%C5%9E-MYD-95-009.B-10.05.2018.pdf. [Accessed: Nov. 12, 2019].

[13] Türk Standardları Enstitüsü "TS EN 13201-2 Standardı, Yol aydınlatması bölüm 2: Performans özellikleri", 2016.

[14] N. Karanfil, "6 ayda 166 bin lamba onarıldı," *hurriyet.com.tr*, Sept. 5, 2019. [Online]. Available: <http://www.hurriyet.com.tr/ekonomi/6-ayda-166-bin-lamba-onarildi-41321793>. [Accessed: Dec. 2, 2019].

[15] B. Anguish, "Issues with New LED Streetlights," *halifax.ca*, Feb. 25, 2019. [Online]. Available: <https://www.halifax.ca/sites/default/files/documents/city-hall/regional-council/190326rci01.pdf>. [Accessed: Dec. 5, 2019].

Emre YILMAZ

Emre Yılmaz, 1990 yılında Trabzon'da dünyaya gelmiştir. Atılım Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümü Lisans mezunudur. Gazi Üniversitesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği bölümünde Yüksek Lisans öğrenimini tamamlamıştır, aynı bölümde Doktora yapmaktadır. Aydınlatma sektöründe devlet destekli projelerin yönetimi ve ürün geliştirme faaliyetlerinde görev almaktadır. Asya Trafik A.Ş. firmasında proje yöneticisi olarak çalışmaktadır. Türkiye'de aydınlatma sektörünün lider medya organizasyonu ve en büyük topluluğu olan Aydınlatma Portalı'nın kurucusudur. Aydınlatma Uygulamaları ve Aydınlatma Sözlüğü kitaplarının yazarıdır.

Orhan ERDEN

1969 yılında Ankara'da doğdu. Gazi Üniversitesi Endüstriyel San. Eğitim Fakültesi Endüstriyel Teknoloji Eğitimi Bölümü'nden 1991 yılında mezun oldu. 1996 yılında yüksek lisansını, 2001 yılında doktorasını. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstriyel Teknoloji Eğitimi Anabilim Dalında tamamladı. 1991-1996 yılları arasında öğretmenlik görevinde bulundu. Gazi Üniversitesi Endüstriyel San. Eğitim Fakültesi Endüstriyel Teknoloji Eğitimi Bölümü'nde 1996-2001 yılları arasında araştırma görevliliği yaptı, 2001-2009 yılında aynı bölümde Öğretim görevlisi olarak çalıştı. 2009-2017 yılları arasında Yardımcı Doçent Doktor görevinde bulundu. 2017 yılından itibaren Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü'nde Dr. Öğretim Üyesi olarak görevine devam etmektedir. Yurtiçi ve yurtdışında yayınlanmış çok sayıda yayını ve 2 kitabı bulunan Orhan ERDEN, evli ve 3 çocuk babasıdır.

Nuri Yunus KOCADAĞ

Nuri Yunus Kocadağ, 1991'de Ankara'da doğmuştur. Kırıkkale Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümü 2013 yılı Lisans ve 2017 yılı Yüksek Lisans mezunudur. Bingöl Üniversitesi Teknik Bilimler MYO Elektrik ve Enerji bölümünde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır.