

LED'li Yol Aydınlatma Sistemlerinde Işık Renk Sıcaklığının, Çevresel ve Finansal Hususlara Etkisinin İncelenmesi

Investigation of the Environmental and Financial Impacts of Light Color Temperature in LED Road Lighting Systems

Kerem Can Yıldırım
ID 0009-0005-9232-8445
Elektrik-Elektronik Mühendisi
keremcanyildirim@outlook.com

Öz

Bu çalışmada LED'li yol aydınlatma sistemlerinde farklı ışık renk sıcaklıklarının yatırım ve işletme maliyetleri, çevresel koşullar ve kullanıcı deneyimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Modelleme ve simülasyon süreçlerinde ulusal ve uluslararası standartlar esas alınmış, tasarımların uygunluğu DIALux EVO yazılımı ile yapılan simülasyonlar aracılığıyla doğrulanmıştır. Analiz sonuçlarına göre, ışık renk sıcaklığı (Kelvin değeri) azaldıkça enerji tüketiminde ve toplam maliyetlerde artış olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, yüksek Kelvin değerine sahip ışıkların da yaban hayatı üzerinde daha olumsuz etkiler oluşturduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, düşük Kelvin değerindeki ışık kaynaklarının sisli hava koşullarında daha yüksek ışık geçirgenliği sağladığı belirlenmiştir. Tüm bulgular ışığında, ışık renk sıcaklığının yalnızca görsel bir unsur olmadığı; ekonomik, çevresel ve kullanıcı odaklı kararları etkileyen kritik bir parametre olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Yol Aydınlatma, LED, Işık Renk Sıcaklığı

Abstract

This study examines the effects of different correlated color temperatures (CCT) in LED-based road lighting systems on investment and operational costs, environmental conditions, and user experience. National and international standards were used as references in the modeling and simulation processes, and the compliance of lighting designs was verified through simulations conducted using DIALux EVO software. The analysis results indicate that as the color temperature (Kelvin value) decreases, both energy consumption and total costs increase. However, it was also determined that lighting with higher Kelvin values has more adverse effects on wildlife. Additionally, light sources with lower Kelvin values were found to provide better light transmittance under foggy weather conditions. In conclusion, the findings reveal that color temperature is not merely an aesthetic consideration but a critical parameter that influences economic, environmental, and user-centered decisions.

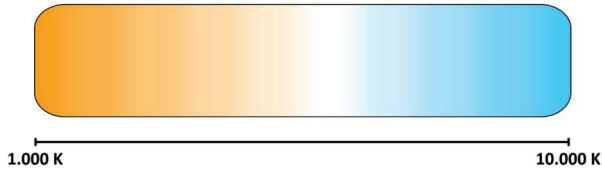
Keywords: Road Lighting, LED, Light Color Temperature

1.Giriş

Aydınlatma, güvenlik ve konfor ihtiyaçlarının karşılanması için modern yaşamın vazgeçilmez unsurlarından biridir. Bu ihtiyacın karşılanması için akkor telli lambanın icadından bugüne cıva buharlı lambalar, sodyum buharlı lambalar, floresan lambalar gibi birçok farklı teknoloji kullanılmıştır. Günümüzde ise aydınlatma ihtiyacımızın büyük bir kısmı LED'li ürünler ile sağlanmaktadır.

Yüksek enerji verimliliği, uzun ömür, düşük bakım maliyetleri ve bakım ihtiyacının daha az olması sebebiyle LED'li aydınlatma sistemlerinin kullanımı her geçen gün artmaktadır. Söz konusu bu avantajları ile LED'li armatürler sera gazı emisyonlarının ve küresel karbon ayak izinin azaltılması projelerinde önemli bir rol almaktadır. Örneğin, İngiltere otoyollarından sorumlu National Highways 2030/2040/2050 Net Zero Highways planında 2027 yılına kadar yol aydınlatmalarını %70 oranında LED armatür ile değiştireceğini belirtmiştir. [1]

İdari kurumların aydınlatma şartnamelerinde de eski teknoloji olarak tarif edebileceğimiz ürünler yerini LED'li armatürlere bırakmıştır. Yeni yapılan projelerde LED'li armatür kullanımı idareler tarafından zorunlu tutulmaktadır. Hatta yapımı tamamlanmış birçok tesiste, otoyolda, devlet ve belediye yollarında konveksiyonel aydınlatma armatürleri LED'li armatürler ile değiştirilmekte olup 13 Mayıs 2024 tarihli "Kamuda Tasarruf ve Verimlilik Paketi"nde "Sokak ve cadde ışıklandırmasında LED dönüşümünün hızlandırılması" maddesi, konunun hükümet nezdinde de önemsendiğini göstermektedir.[2][3] Yapılan tüm LED aydınlatma projelerinin şartnamelerinde teknik özelliklerin içerisinde tarif edilen bir husus da ışık renk sıcaklığıdır. Işık renk sıcaklığı Kelvin (K) değeri ile belirtilir. Düşük Kelvin değeri ışığın sarı renk yoğunluğunda olduğunu, yüksek Kelvin değeri ise ışığın mavi-beyaz renk yoğunluğunda olduğunu belirtir. Şekil 1'de ışık kaynaklarındaki ışık renginin Kelvin değeri karşılığı gösterilmiştir.



Şekil 1: Işık renk sıcaklığı skalası

Bu çalışmada, karayolu aydınlatma sistemlerinde kullanılan LED'li armatürlerin ışık renginin, yatırım/işletme maliyetlerine, çevresel hususlara ve kullanıcılara etkisi incelenmiştir.

2. Yol Aydınlatması

Karayolu aydınlatma sistemleri, bir yol üzerinde güvenli seyahat için en önemli unsurlardan biridir. Güney Afrika'da yapılan bir araştırmada gün içerisindeki doğal aydınlatma koşulları incelenmiş olup karanlık yollarda kaza risk oranının gündüz koşullarına göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. [4]

Yeni Zelanda'da yapılan bir diğer araştırmada ise aydınlatılmış bir yol üzerinde rapor edilen kazalar incelenmiştir. İncelemenin sonucunda artan parıltı değerine karşılık gündüz/gece kaza oranlarının da azaldığı gözlemlenmiştir. [5][6]

Karayolunda yapılacak aydınlatma sisteminin özellikleri ülkemizde de kullanılmakta olan EN 13201 (TS EN 13201) standardı ile belirlenmektedir. Standart içerisinde yol aydınlatmaları farklı sınıflara ayrılmış olup aydınlatma tesis edilecek yolun özelliklerine göre farklı sınıflar bulunmaktadır. Bu sınıflara ait temel özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Yol sınıflarına göre aydınlatma gereklilikleri

Yol Aydınlatma Sınıfı	L (cd/m ²)	U ₀ (Min.)	U ₁ (Min.)
M1	2,00	0,40	0,70
M2	1,50	0,40	0,70
M3	1,00	0,40	0,60
M4	0,75	0,40	0,60
M5	0,50	0,35	0,40
M6	0,30	0,35	0,40

L: Ortalama Parıltı
U₀: Ortalama üzgünlük
U₁: Boyuna Düzgünlük

Yol aydınlatma standardının karşılanması için en önemli husus aydınlatma armatürleridir. Ülkemizde yol aydınlatma sistemlerinde kullanılacak LED'li armatürler "TEDAŞ MLZ/2010-057 Led Işık Kaynaklı Yol Aydınlatma Armatürleri Teknik Şartnamesi" ile belirlenmiştir. Farklı proje şartnamelerinde aydınlatma yapılacak yoldan sorumlu idari kurumlar tarafından çeşitli değişiklikler yapılırsa dahi temel olarak TEDAŞ şartnamesi kullanılmaktadır. Bu şartname

gelişen teknolojiye ve farklı koşullara uyum sağlayacak şekilde zamanla yenilenmektedir.

TEDAŞ – MLZ/2010-057 şartnamesinin Revize Ekim 2020 yayınında ışık renk sıcaklığı 4.000 K olarak belirlenmiştir. [7] Ancak Şubat 2025 Taslak yayınında ışık renginin 3.000 K veya 4.000 K olarak seçilebileceği belirtilmiştir. [8]

Işık rengi her ne kadar estetik bir husus olarak görülse de güvenlikten enerji tüketimine kadar birçok hususu etkilemektedir. Kelvin değeri düştükçe armatürün güç ihtiyacı artmaktadır. Bunun sebebi ışık renk sıcaklığı mavi ışık veren bir LED çip üzerine fosfor katmanları eklenerek elde edilmesidir. Düşük Kelvin değerinde ışık renk sıcaklığı elde etmek için daha fazla fosfor kullanılması gerekmektedir. Bu durum verimi düşürerek enerji tüketimini artırmaktadır.

Çalışma kapsamında incelenmek üzere A ve B markasına ait dört LED'li yol aydınlatma armatürü seçilmiş olup Tablo 2'de verilmiştir. A markasına ait, aynı tipte iki armatür incelendiğinde de aynı güç değerine sahip olmalarına rağmen farklı ışık akılarına sahip olduğu, B markasına ait aynı tipte iki armatürün birbirine çok yakın ışık akısına sahip olmasına karşın farklı güç tüketimlerinin olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni ışık renk sıcaklıklarının farklı olmasıdır.

Tablo 2: LED armatürlerin teknik özellikleri

Özellik	A		B	
	1. Armatür	2. Armatür	3. Armatür	4. Armatür
Işık Rengi(K)	3.000	4.000	3.000	4.000
Armatür Gücü(W)	110	110	104,1	100,6
Işık Akısı(lm)	13.100	14.300	11.903	11.901
CRI	70	70	70	70
Etkinlik Faktörü (lm/W)	119	130	114,3	118.2

K: Kelvin
W: Watt
lm: Lümen
CRI: Renksel Geri Verim Endeksi

İlgili TEDAŞ şartnamesinde 3.000 ve 4.000 K ışık renk sıcaklıkları tariflendiği için diğer ışık renk sıcaklığındaki alternatifler inceleme dışı tutulmuştur.

2.1. Işık Renk Sıcaklığının Kullanıcılara Etkisi

Işık renk sıcaklığının sürücüyeye veya algıya etkisi merak edilen bir konu olmuştur. Bu durumun değerlendirilmesi için yapılan bir çalışmada 3.000 K, 4.000K ve 5.000 K ışık renk sıcaklığında ve 20-30 lx değerlerinde, farklı yaş gruplarında 18 kişi deneye tabi tutulmuştur. Deney sırasında EEG (Electroencephalography) verileri ve tepki süreleri

incelenmiştir. İnceleme sonucunda, özellikle 20 lux ışık koşullarında Kelvin değeri arttıkça uyanıklık, dikkat, zihinsel etkinlik ve uyarılma düzeyinin belirtisi olan β (beta) değerinin de arttığı, 30 lux ışık koşullarında ise 4.000 K değerinin 3.000 K değerine göre β dalgalarında artış gösterdiğini ancak 5.000 K değerinin 4.000 K değerine göre anlamlı bir artış göstermediği gözlemlenmiştir. Yani düşük ışık koşullarında ışık renk sıcaklığı artışı kullanıcıları daha çok etkilemiştir. En kısa tepki süresi ise 30 lx aydınlık seviyesinde 4.000 K ışık renk sıcaklığında sağlanmıştır. Deneye katılan sürücüler ise 4.000 K ışık renk sıcaklığında daha uyanık hissettiklerini belirtmişlerdir.^[9]

Işık renk sıcaklığının kullanıcıya etkisi üzerinde yapılan bir diğer çalışmada düşük ışık renk sıcaklığına sahip lambalarda gözün karanlığa adaptasyonunun daha kolay olduğu ve renk algısının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.^[10]

Yol aydınlatma sistemlerinde ışık ile ilgili en önemli hususlardan bir tanesi sis durumunda göstereceği performanstır. Sis, yoğunluğuna göre değişkenlik gösteren, yarı geçirgen bir meteorolojik oluşumdur ve içeriğinde su, organik veya inorganik bileşenler içerir.^[11] Işık renk sıcaklığı farklı değerlerde farklı dalga boylarına sahiptir. Dolayısıyla sis içerisinden geçen ışık farklı renk sıcaklıklarında farklı şekillerde yansımaktadır. Yapılan bir çalışmada dört farklı ışık kaynağının sis yoğunluklarına göre geçirgenlikleri incelenmiş olup LED’li yol aydınlatma armatürlerinde düşük ışık renk sıcaklığının sis içerisinden daha fazla geçiş yaparak ölçüm yüzeyine ulaştığı görülmüştür.^[10]

2.2. Yapay Aydınlatma ve Işık Renk Sıcaklığının Yaban Hayata Etkisi

Yapılan araştırmalar yapay aydınlatmanın hayvanlar üzerinde fizyolojik ve nörolojik etkisinin olduğunu göstermektedir. Bir kuş türü olan zebra ispinozu üzerinde yapılan çalışmada yapay gece ışığına maruz bırakılan deneğin beyindeki hipokampus bölgesinde yeni nöron sayısının arttığı gözlemlenmiştir. Araştırmacılar, bu artışın normal dengeyi bozabilecek patolojik bir tepki olabileceğini ve dolaylı olarak uyku bozukluğu veya artan gece hareketliliği gibi davranışsal değişimlere yol açabileceğini öne sürmektedir.^[12] Yapay aydınlatma üzerine Şikago bölgesinde yapılan bir diğer çalışmada ise gece aktif olan türlerin daha karanlık bölgelerde %19,6 daha fazla aktivite gösterdiği tespit edilmiştir.^[13]

Amerika Birleşik Devletleri Kaliforniya Eyaleti Ulaştırma Departmanı tarafından LED aydınlatmanın karasal yaban hayatı üzerine etkisi incelenmiştir. 3.000’in üzerinde kaynak ve 342 ayrı çalışmanın detaylı analiz edildiği bu çalışma incelendiğinde, kısa dalga boyuna sahip (beyaz, mavi) ışıkların yaban hayatın yön bulma, üreme, av-avcı ilişkileri gibi süreçlerini olumsuz etkilediği tespit edilmiştir.^[14]

2.3. Işık Renk Sıcaklığının Sera Gazı Salımına Etkisi

Fosil yakıtların kullanımı artan sera gazı salımları ile küresel çapta sıcaklık artışlarına da sebep olmaktadır. Bu durum

dünyanın ekolojik dengesini bozmakta ve iklim değişikliklerini beraberinde getirmektedir. IPCC’nin (Intergovernmental Panel on Climate Change) raporuna göre 2000 yılından 2018 yılına küresel CO₂ konsantrasyonundaki artış, on yılda yaklaşık 20 ppm olup, bu oran, son 800.000 yıl boyunca CO₂’nin sürdürülebilir artış hızının 10 katına kadar çıkmaktadır^[15]

Elektrik üretiminde fosil yakıt kullanımı ülkemizde ve dünyada devam etmektedir. TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi) tarafından yayınlanan 2024 yılı “Türkiye Brüt Elektrik Üretiminin Birincil Enerji Kaynaklarına Göre Aylık Dağılımı” tablosu incelendiğinde elektrik üretiminin %54,31’inin kömür, linyit, doğalgaz ve sıvı yakıt gibi fosil enerji kaynaklı olduğu görülmektedir.^[16] Bu durum ülke bazlı değişiklik göstermekte olsa da fosil yakıt tüketimi tamamen sıfırlanamamıştır.

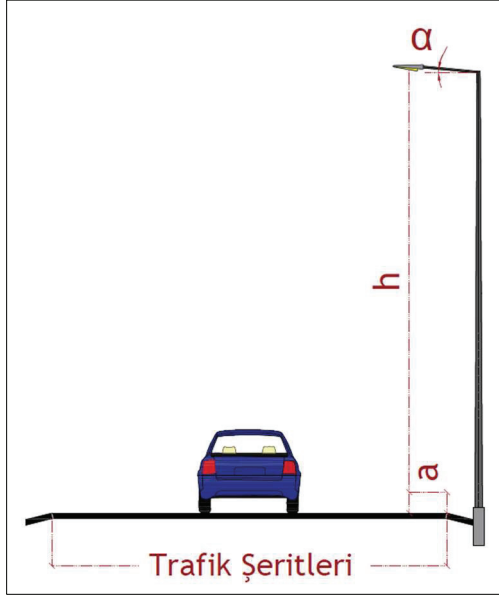
Benzer ışık akısına sahip farklı ışık renk sıcaklıklarının elektrik enerjisi tüketimindeki fark sera gazı emisyonlarını da etkileyecektir.

3. Maliyet Analizi İçin Modelleme ve Simülasyon

Yatırım ve işletme maliyet analizleri için yapılan simülasyonlarında DIALux EVO programı kullanılmıştır. Tablo 2’de verilen armatürlerin fotometrik özellikleri üretici firma veya DIALux programının kütüphanesinden alınarak program içerisine dahil edilmiştir. Maliyetlerin incelenmesi için yol modellemesinde ve aydınlatma direklerinde her bir yol alternatifi için aynı parametreler kullanılmıştır. Yol ve aydınlatma direk tasarımına ait parametreler Tablo 3’te verilmiş olup proje örnek kesiti Şekil 2’de verilmiştir.

Tablo 3: Yol ve aydınlatma direk parametreleri

Parametreler	Yol-1	Yol-2
Yol Uzunluğu	60 km	50 km
Şerit Sayısı	3	2x2
Şerit Genişliği	3,50 metre	3,75 metre
Yol Kaplama Sınıfı	0,07 (CIE R3)	0,07 (CIE R3)
Yol Aydınlatma Sınıfı	M3	M4
Işık Noktası Yüksekliği (h)	12 metre	15 metre
Taşıyıcı Kol Açısı (α)	5°	0°
Işık Noktası Sarkması (a)	1 metre	0 metre
Bakım Faktörü	0,90	0,90
Aydınlatma Yerleşimi	Sağdan Tek	Sağdan Tek



Şekil 2: Aydınlatılmış karayolu kesiti

3.1. Yol-1 Yatırım Maliyetleri İçin Simülasyon

Yatırım maliyetlerinin belirlenmesi için öncelikle Tablo 2’de fotometrik özellikleri belirtilen 1. armatür ile Yol-1 için simülasyon yapılmıştır. EN 13201 standardının gereklilikleri 32 metre direk açıklığında sağlanmıştır. Daha sonra yine Tablo 2’de fotometrik özellikleri belirtilen 2. armatür ile Yol-1 için simülasyon yapılmıştır. EN 13201 standardının gereklilikleri 35 metre direk açıklığında sağlanmıştır. Simülasyonlar sonucunda oluşan veriler Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4: Yol-1 1. ve 2. armatür simülasyon sonuçları

Büyüklik	Nominal	1. Armatür Hesaplanan	2. Armatür Hesaplanan
L_m	$\geq 1,00 \text{ cd/m}^2$	$1,00 \text{ cd/m}^2$	$1,01 \text{ cd/m}^2$
U_o	$\geq 0,40$	0,64	0,63
U_i	$\geq 0,60$	0,78	0,72
TI	$\leq \%15$	$\%6$	$\%6$
R_{EI}	$\geq 0,30$	0,62	0,62

3.2. Yol-1 İşletme Maliyetleri İçin Simülasyon

İşletme maliyetlerinin belirlenmesi için öncelikle Yol-1 için Tablo 2’de fotometrik özellikleri belirtilen 3. armatür ile simülasyon yapılmıştır. EN 13201 standardının gereklilikleri 34 metre direk açıklığında sağlanmıştır. Daha sonra yine Tablo 2’de fotometrik özellikleri belirtilen 4. armatür ile Yol-1 için simülasyon yapılmıştır. EN 13201 standardının gereklilikleri 34 metre direk açıklığında sağlanmıştır. Simülasyonlar sonucunda oluşan veriler Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5: Yol-1 3.ve 4. armatür simülasyon sonuçları

Büyüklik	Nominal	3. Armatür Hesaplanan	4. Armatür Hesaplanan
L_m	$\geq 1,00 \text{ cd/m}^2$	$1,01 \text{ cd/m}^2$	$1,01 \text{ cd/m}^2$
U_o	$\geq 0,40$	0,60	0,60
U_i	$\geq 0,60$	0,88	0,88
TI	$\leq \%15$	$\%7$	$\%7$
R_{EI}	$\geq 0,30$	0,49	0,49

3.3. Yol-2 Yatırım Maliyetleri İçin Simülasyon

Yol-2 için yatırım maliyetlerinin belirlenmesi için öncelikle Tablo 2’de fotometrik özellikleri belirtilen 1. armatür ile simülasyon yapılmıştır. EN 13201 standardının gereklilikleri 41 metre direk açıklığında sağlanmıştır. Daha sonra yine Tablo 2’de fotometrik özellikleri belirtilen 2. armatür ile Yol-2 için simülasyon yapılmıştır. EN 13201 standardının gereklilikleri 45 metre direk açıklığında sağlanmıştır. Simülasyonlar sonucunda oluşan veriler Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6: Yol-2 1. ve 2. armatür simülasyon sonuçları

Büyüklik	Nominal	1. Armatür Hesaplanan	2. Armatür Hesaplanan
L_m	$\geq 0,75 \text{ cd/m}^2$	$0,76 \text{ cd/m}^2$	$0,76 \text{ cd/m}^2$
U_o	$\geq 0,40$	0,71	0,69
U_i	$\geq 0,60$	0,79	0,74
TI	$\leq \%15$	$\%5$	$\%5$
R_{EI}	$\geq 0,30$	0,74	0,74

3.4. Yol-2 İşletme Maliyetleri İçin Simülasyon

İşletme maliyetlerinin belirlenmesi için öncelikle Yol-2 için Tablo 2’de fotometrik özellikleri belirtilen 3. armatür ile simülasyon yapılmıştır. EN 13201 standardının gereklilikleri 44 metre direk açıklığında sağlanmıştır. Daha sonra yine Tablo 2’de fotometrik özellikleri belirtilen 4. armatür ile Yol-2 için simülasyon yapılmıştır. EN 13201 standardının gereklilikleri 44 metre direk açıklığında sağlanmıştır. Simülasyonlar sonucunda oluşan veriler Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7: Yol-2 3. ve 4. armatür simülasyon sonuçları

Büyüklik	Nominal	3. Armatür Hesaplanan	4. Armatür Hesaplanan
L_m	$\geq 0,75 \text{ cd/m}^2$	$0,76 \text{ cd/m}^2$	$0,76 \text{ cd/m}^2$
U_o	$\geq 0,40$	0,70	0,70
U_i	$\geq 0,60$	0,88	0,88
TI	$\leq \%15$	$\%6$	$\%6$
R_{EI}	$\geq 0,30$	0,80	0,80

4. Maliyet Analizleri

4.1. Yatırım Maliyet Analizleri

Yatırım maliyetlerinde kablo, enerji altyapısı gibi maliyetler proje bazlı değişiklik gösterebileceği için armatür miktarına göre sabit adetli ekipmanlar maliyeti olarak kabul edilmiştir. Bu ekipmanlar ve birim maliyetleri için TEDAŞ 2025 yılı birim fiyat listesi referans alınmıştır.^[17] Maliyet analizinin uluslararası geçerliliğin de olabilmesi için birim fiyatlar, 02.05.2025 tarihli TCMB (Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası) döviz alış kuru olan 38,3695 ile Amerikan dolarına çevrilmiştir.^[18]

Yatırım maliyetinin hesaplanabilmesi için kullanılacak toplam armatür sayısının da belirlenmesi gereklidir. Yol-1 için 1. Armatür ile yapılan simülasyonda direk açıklığı 32 metre olarak belirlendiği için referans yol olan 60 km için 1.875 adet, 2. armatür ile yapılan simülasyonda direk açıklığı 35 metre olarak belirlendiği için 1.715 adet armatür ihtiyacı hesaplanmıştır. Yol-1 için, 1. Armatür için yapılan maliyet analizi Tablo 8'de, 2. armatür için yapılan maliyet analizi Tablo 9'da verilmiştir.

Yol-2 için 1. Armatür ile yapılan simülasyonda direk açıklığı 41 metre olarak belirlendiği için referans yol olan 50 km için 1.220 adet, 2. armatür ile yapılan simülasyonda direk açıklığı 45 metre olarak belirlendiği için 1.112 adet armatür ihtiyacı hesaplanmıştır. Yol-2 için, 1. Armatür için yapılan maliyet analizi Tablo 10'da 2. armatür için yapılan maliyet analizi Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 8: Yol-1 1.Armatür Yatırım Maliyet Analizi

Poz Tanımı	Birim	Miktar	Birim Fiyat (USD)	Toplam Fiyat (USD)
209 Kg Pol. Ayd. Direği	Adet	1.875	522,85	980.344,16
Armatür (Sınıfı 11)	Adet	1.875	103,92	194.858,35
220 V/6A AOS	Adet	1.875	7,48	14.009,95
3 X 2.5 mm ² Kablo	Metre	22.500	3,72	83.800,99
Genel Toplam (USD)				1.273.013,45

Tablo 9: Yol-1 2.Armatür Yatırım Maliyet Analizi

Poz Tanımı	Birim	Miktar	Birim Fiyat (USD)	Toplam Fiyat (USD)
209 Kg Pol. Ayd. Direği	Adet	1.715	522,85	896.688,13
Armatür (Sınıfı 11)	Adet	1.715	103,92	178.230,44
220 V/6A AOS	Adet	1.715	7,48	12.814,44
3 X 2.5 mm ² Kablo	Metre	20.580	3,72	76.649,97
Genel Toplam (USD)				1.164.382,97

Tablo 10: Yol-2 1.Armatür Yatırım Maliyet Analizi

Poz Tanımı	Birim	Miktar	Birim Fiyat (USD)	Toplam Fiyat (USD)
287 Kg Pol. Ayd. Direği	Adet	1.220	717,98	875.936,73
Armatür (Sınıfı 13)	Adet	1.220	93,93	114.599,89
220 V/6A AOS	Adet	1.220	7,48	9.115,81
3 X 2.5 mm ² Kablo	Metre	18.300	3,72	68.158,14
Genel Toplam (USD)				1.067.810,56

Tablo 11: Yol-2 2.Armatür Yatırım Maliyet Analizi

Poz Tanımı	Birim	Miktar	Birim Fiyat (USD)	Toplam Fiyat (USD)
287 Kg Pol. Ayd. Direği	Adet	1.112	717,98	798.394,79
Armatür (Sınıfı 13)	Adet	1.112	93,93	104.454,98
220 V/6A AOS	Adet	1.112	7,48	8.308,83
3 X 2.5 mm ² Kablo	Metre	16.680	3,72	62.124,47
Genel Toplam (USD)				973.283,07

4.1. İşletme Maliyet Analizleri

İşletme maliyetlerinin en önemli kısmı olan elektrik tüketiminin belirlenebilmesi için armatürün günlük çalışma saatinin de belirlenmesi gerekmektedir. Bu süre, İstanbul'daki yıllık güneş doğuş ve batış saatleri referans alınarak elde edilmiştir. Armatürlerin güneş batımında çalışmaya başladığı, güneş doğumunda da kapandığı varsayıldığında, günlük ortalama 12,2 saat aydınlatma sisteminin çalışacağı hesaplanmıştır.^[19]

Enerji birim maliyeti için ise 05.04.2025 tarih ve 32861 sayılı Resmi Gazete'de yayınlanan EPDK (Enerji Piyasası Denetleme Kurulu) Tarafından Onaylanan ve 5 Nisan 2025 Tarihinden İtibaren Uygulanacak Faaliyet Bazlı Tarifeler tablosundaki alçak gerilim – tek zamanlı – aydınlatma tarifesinde belirtilen 488,9349kr/kWh değeri baz alınmıştır.^[20] Bu değer 02.05.2025 tarihli TCMB (Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası) döviz alış kuru olan 38,3695 ile Amerikan dolarına çevrilmiştir.^[20]

Enerji tüketiminin hesaplanabilmesi için kullanılacak toplam armatür sayısının da belirlenmesi gerekmektedir. Yol-1 için armatür ihtiyacı 34 metre direk aralığında 1.765 adet olarak hesaplanmıştır. Yol-2 için armatür ihtiyacı ise 44 metre direk aralığında 1.137 adet olarak hesaplanmıştır.

Tüm bu parametreler eşliğinde Tablo 2’de verilen 3. Ve 4. armatürlerin elektriksel özellikleri kullanılarak Yol-1 için yapılan hesaplamalar sonucunda Tablo 12, Yol-2 için Tablo 13 oluşturulmuştur.

Tablo 12: Yol-1 İşletme maliyet analizi

Kod	Parametre	3. Armatür	4. Armatür
A	Armatür Miktarı (Adet)	1.765	
B	Armatür Gücü (W)	104,1	100,6
C	Günlük Çalışma Süresi (Saat)	12,2	
D	Armatür Enerji Tüketimi (kWh/gün)	1,270	1,227
E	Toplam Enerji Tüketimi (kWh/yıl)	818.178,63	790.670,23
F	Toplam Enerji Bedeli (USD/kWh)	0,127	
G	Yıllık Toplam Enerji Bedeli (USD)	104.258,87	100.753,53

Tablo 13: Yol-2 İşletme maliyet analizi

Kod	Parametre	3. Armatür	4. Armatür
A	Armatür Miktarı (Adet)	1.137	
B	Armatür Gücü (W)	104,1	100,6
C	Günlük Çalışma Süresi (Saat)	12,2	
D	Armatür Enerji Tüketimi (kWh/gün)	1,270	1,227
E	Toplam Enerji Tüketimi (kWh/yıl)	527.064,65	509.343,94
F	Toplam Enerji Bedeli (USD/kWh)	0,127	
G	Yıllık Toplam Enerji Bedeli (USD)	67.162,80	64.904,68

$$D = B \cdot C \quad (1)$$

$$E = A \cdot D \cdot 365 \quad (2)$$

$$G = E \cdot F \quad (3)$$

5. Sonuçlar ve Değerlendirme

5.1. Çevresel ve Kullanıcı Etkilerinin Değerlendirilmesi

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen literatür araştırması sonucunda, yol aydınlatma sistemlerinde kullanılan ışık kaynaklarının yalnızca enerji verimliliği değil, aynı zamanda insan görsel algısı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Özellikle ışık renk sıcaklığının, sürüş konforu, göz yorgunluğu, karanlığa adaptasyon ve görsel dikkat gibi birçok işlevi üzerinde doğrudan etkilediği görülmüştür. Yüksek Kelvin değerine sahip LED aydınlatmalar, mavi spektrum yoğunlukları nedeniyle gece görüşünde kamaşma etkisini artırabilmekte, insan gözünün karanlığa uyum yeteneğini baskılayarak görsel rahatsızlık oluşturabilmektedir. Buna karşılık, düşük Kelvin değerine sahip ışık kaynakları daha az kamaşma yaratmakta ve sürücülerde daha yumuşak bir görsel deneyim sağlamaktadır.

Yol aydınlatmalarının çevresel etkisi ile ilgili literatür araştırmaları incelendiğinde ise tıpkı insan üzerinde olduğu gibi ışık renk sıcaklığının yaban hayat üzerinde de etkisi olduğu görülmüştür. Yüksek Kelvin değerine sahip ışık renk sıcaklıklarının yaban hayatı olumsuz etkilediği, denge ve uyku bozukluklarına sebep olabildiği tespit edilmiştir.

Yol aydınlatma sistemleri ile ilgili olarak değerlendirilen bir diğer husus ise sis oluşumunda ışık renk sıcaklığıdır. Yapılan araştırma Kelvin değeri düştükçe sis içerisinde ışığın daha fazla geçtiğini göstermiştir. Buradan hareketle, yol aydınlatma sistemlerinde düşük Kelvin değerine sahip LED armatürlerin, sisli hava koşullarında daha etkin bir görüş sağlayarak sürüş güvenliğine katkı sağladığı sonucuna varılabilir.

Aydınlatma sistemlerinin yalnızca aşağı yönlü değil, yukarı yönlü ışık yayılımı da çevresel etkiler açısından önemlidir. DarkSky International, gökyüzü kirliliğini azaltmak amacıyla 3000 K ve altı ışık renk sıcaklığı kullanımını tavsiye etmektedir.^[21] Bu öneri, düşük Kelvin değerli ışık kaynaklarının, yüksek Kelvin değerli ışık kaynaklarına göre gökyüzünde daha az yayılarak ışık kirliliğine daha az sebep olması ile ilişkilendirilmiştir.^[22] Bu yönüyle değerlendirildiğinde, düşük Kelvin değerine sahip LED armatürler yalnızca sisli hava koşullarında değil, aynı zamanda gökyüzü koruma stratejilerinde de avantaj sağlar.

Işık renk sıcaklığının küresel bir çevresel etki olarak sera gazı salımına da etki edebileceği belirlenmiştir. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı elektrik tüketim noktası emisyon faktörlerine ^[23] ve Birleşik Krallık Department for Energy Security and Net Zero ^[24] verilerine göre Tablo-2’de bulunan B marka armatürlerin Yol-1 için sera gazı emisyon salımları Tablo-14’te verilmiştir.

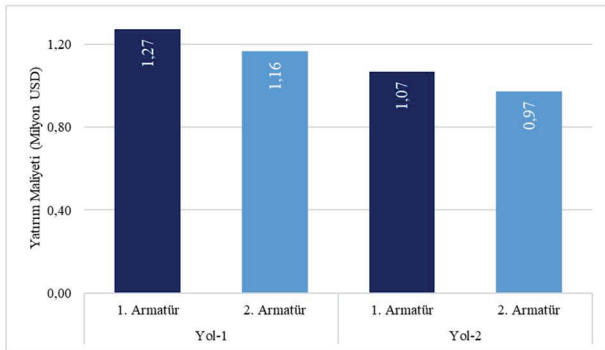
Tablo 14: Yol-1 için alternatif armatürlerin sera gazı salımları

Parametre	3. Armatür	4. Armatür
Işık Renk Sıcaklığı (K)	3.000	4.000
Işık Akısı (lm)	11.903	11.901
Armatür Gücü (W)	104,10	100,60
Toplam Enerji Tüketimi (kWh/yıl)	818.178,63	790.670,23
T.C. Emisyon Katsayısı (tCO ₂ e/MWh)	0,478	
U.K. Emisyon Katsayısı (tCO ₂ e/MWh)	0,207	
T.C. Emisyon Miktarı (tCO ₂ e)	391,09	377,94
U.K. Emisyon Miktarı (tCO ₂ e)	169,40	163,71
kWh: Kilowattsaat MWh: Megawattsaat tCO ₂ e: Ton Eşdeğer Karbondioksit		

Tablo incelendiğinde, aynı yol için teknik gerekliliklerin karşılanması koşulunda 4.000 K lambaların 3.000 K lambalara göre daha az enerji tüketmesi sebebi ile daha az sera gazı salımına sebep olacaktır.

5.2. Finansal Etkilerin Değerlendirilmesi

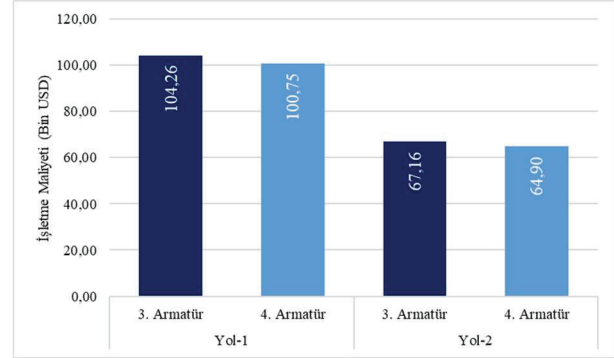
Yatırım maliyetleri için yapılan simülasyonlar sonucunda modellenen Yol-1 ve Yol-2 için M3 sınıfı aydınlatma gerekliliklerinin karşılandığı gözlemlenmiştir. Yol-1 için yatırım maliyetlerini içeren Tablo 9 ve Tablo 10 karşılaştırıldığında 108.630,48 USD maliyet farkı olduğu hesaplanmıştır. Yöntemin doğrulanması için yapılan Yol-2 yatırım maliyetlerini içeren Tablo 11 ve Tablo 12 karşılaştırıldığında 94.527,49 USD maliyet farkı olduğu hesaplanmıştır. Bu da Yol-1 için 4.000 K armatür kullanmanın yaklaşık %9,3 Yol-2 için yaklaşık %9,7 tasarruflu olacağı anlamına gelmektedir. Yatırım maliyetleri karşılaştırması Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3: Yatırım maliyetleri grafiği

İşletme maliyetlerini içeren Tablo 13 ve Tablo 14 incelendiğinde, yıllık enerji tüketim farkının Yol-1 için, 27.508,41 kWh, maliyet farkının 3.505,34 USD olduğu hesaplanmıştır. Yol-2 için ise enerji tüketim farkının 17.720,71 kWh, maliyet farkının 2.258,12 USD olduğu hesaplanmıştır. Bu

da Yol-1 ve Yol-2 için 4.000 K armatür kullanmanın yaklaşık %3,5 tasarruflu olacağı anlamına gelmektedir. İşletme maliyetleri karşılaştırması Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4: İşletme maliyetleri grafiği

Bu çalışma kapsamında modellenen yollar yalnızca 50-60 km uzunluğundadır. Ülke çapında yapılan yol aydınlatma projeleri veya LED dönüşüm çalışmaları dikkate alındığında, yalnızca ışık renk sıcaklığından elde edilebilecek enerji tasarrufu daha büyük ölçekte olacaktır. Örneğin, 25.000 armatürün olduğu bir projede Yol-1 referans alındığında 3000 K ile 4000 K ışık renk sıcaklığı arasında yıllık enerji tüketiminde 389.637,50 kWh ve 49.650,73 USD işletme maliyet farkı elde edilebilir. Bir diğer örnek olarak yol uzunluğunu Yol-2 olarak belirlenen 50 km yerine 300 km olarak incelersek 567.164,95 USD yatırım maliyet farkı oluşacaktır.

İşletme maliyetlerinin hesaplanmasında en etkili faktörler olan lambaların gücü ve çalışma zamanlarının değişiklik göstermesi durumu da değerlendirilmiştir. Bunun için 500 farklı senaryo oluşturulmuştur. Senaryonun ilk girdisi olan armatür güç tüketimi için 3. ve 4. armatürde, $\pm 5\%$ aralığında rastgele değer ataması yapılmıştır. Çalışma süresinin de $\pm 10\%$ değişiklik gösterebileceği senaryonun ikinci girdisi olarak belirlenmiştir. Verilerin karşılaştırılabilmesi için her yol tipinde armatürlerin çalışma süreleri aynı kabul edilmiştir. Bu senaryo ile oluşturulan Yol-1 için yıllık elektrik enerjisi tüketimleri Tablo 15'te Yol-2 için yıllık elektrik enerjisi tüketimleri Tablo-16'da verilmiştir. Yapılan analiz ile 4.000 K armatürün 3.000 K armatüre göre daha az enerji tüketimine sahip olduğu teyit edilmiştir.

Tablo 15: Yol-1 değişken senaryo analizi

Parametre	3. Armatür	4. Armatür
Armatür Miktarı (Adet)	1.765	
Ortalama Armatür Gücü (W)	103,69	100,82
Ortalama Günlük Çalışma Süresi (Saat)	12,17	
Ortalama Toplam Enerji Tüketimi (kWh/yıl)	813.079,68	790.211,64

Tablo 16: Yol-2 değişken senaryo analizi

Parametre	3. Armatür	4. Armatür
Armatür Miktarı (Adet)	1.137	
Ortalama Armatür Gücü (W)	103,98	100,56
Ortalama Günlük Çalışma Süresi (Saat)	12,12	
Ortalama Toplam Enerji Tüketimi (kWh/yıl)	522.936,53	505.941,52

İki farklı yol tipinde yapılan simülasyonlar, hesaplamalar ve değişken parametre senaryoları ile ışık renk sıcaklığının maliyetlere etkisinin olduğu kanıtlanmıştır.

5.3. Sonuç

Sonuç olarak, ışık renk sıcaklığının yalnızca estetik bir unsur olmadığı yaban hayatına, çevresel konulara, sürüş güvenliğine ve finansal hususlara kadar birçok alana etki ettiği tespit edilmiştir. Tüm finansal verilere rağmen ışık renk sıcaklığı seçimi yalnızca maaliyet ile ilişkilendirilmemeli, projenin meteorolojik koşulları, çevredeki yaban hayatı, kullanıcıların güvenliği, sürdürülebilirlik ve karbon salımı gibi konular detaylı olarak değerlendirilerek ışık kirliliklerinden kaçınılacak ihtiyaçlara uygun ışık renk sıcaklığı tercih edilmelidir.

6. Kaynakça

- [1] National Highways, URL: <https://nationalhighways.co.uk/media/uxjpf0b1/net-zero-highways-our-2030-2040-2050-plan.pdf> (Erişim Zamanı; 05,16,2025)
- [2] Yavuz Sultan Selim Köprüsü Ve Kuzey Çevre Otoyolu İşletmesi URL: <https://www.ysskoprusuveotoyolu.com.tr/TR/detay/enerji-tasarufu-hedefledigimiz-led-donum-proje-mizde-sona-yaklasiyoruz-220> (Erişim Zamanı; 05,16,2025)
- [3] T.C. Hazine ve Maliye Bakanlığı URL: https://ms.hmb.gov.tr/uploads/2024/05/SN-BAKAN_KAMUDA-TASARRUF-VE-VERİMLİLİK-PAKETİ.pdf (Erişim Zamanı; 05,16,2025)
- [4] P.Nteziyaremye, ve M.Sinclair, "Investigating the effect of ambient light conditions on road traffic crashes: The case of Cape Town, South Africa", *Lighting Res. Technol.* Vol. 56: 443-468, 2024
- [5] S.Fotios, ve R.Gibbons, "Road lighting research for drivers and pedestrians: The basis of luminance and illuminance recommendations", *Lighting Res. Technol.* Vol. 50: 154-186, 2018
- [6] M. Jackett, ve W.Frith, "Quantifying the impact of road lighting on road safety — A New Zealand Study", *IATSS Research*, Vol. 36: 139-145, 2013
- [7] TEDAŞ MLZ/2010-057.D "LED Işık Kaynaklı Yol Aydınlatma Armatürleri Teknik Şartnamesi", 2020
- [8] TEDAŞ MLZ/2010-057.E "(Taslak) LED Işık Kaynaklı Yol Aydınlatma Armatürleri Teknik Şartnamesi", 2025
- [9] Q.Chen, Z.Pan, J.Wu ve C. Xue, "An Investigation into the Effects of Correlated Color Temperature and Illuminance of Urban Motor Vehicle Road Lighting on Driver Alertness", *Sensors* 2024
- [10] H.Jin, S.Jin, L.Chen, S.Cen, ve K.Yuan, "Research on the Lighting Performance of LED Street Lights With Different Color Temperatures", *IEEE Photonics Journal*, 2015, Vol.7 Num.6
- [11] D.Khoury, M.Millet, Y.Jabali ve O.Delhomme, "Fog Water: A General Review of Its Physical and Chemical Aspects", *Environments*, 2023
- [12] S.Moaraf, R.Heiblum, Y.Vistoropsky M.Okuliarová, M.Zeman ve A.Barnea, "Artificial Light at Night Increases Recruitment of New Neurons and Differentially Affects Various Brain Regions in Female Zebra Finches" *International Journal of Molecular Sciences*, 2020
- [13] A.Schirmer, C.Gallemore, T.Liu, S.Magle, E.DiNello, H.Ahmed ve T.Gilday "Mapping Behaviorally Relevant Light Pollution Levels To Improve Urban Habitat Planning", *Scientific Reports* 9, 2019
- [14] California Department of Transportation, "Effects of LED Lighting on Terrestrial Wildlife" 2023
- [15] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), "Global Warming of 1.5 °C" Chapter 1, 2018
- [16] TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim A.Ş.) Türkiye Brüt Elektrik Üretim Birincil Enerji Kaynaklarına Göre Aylık Dağılımı URL: <https://www.teias.gov.tr/aylik-elektrik-uretim-tuketim-raporlari> (Erişim Zamanı; 05,20,2025)
- [17] TEDAŞ (Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş.) "Birim Fiyat Kitabı", 2025
- [18] Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası, URL: https://www.tcmb.gov.tr/kurlar/kurlar_tr.html, Bülten No: 2025/83 (Erişim Zamanı; 05,16,2025)
- [19] turkishastro.space, URL: <https://turkishastro.space/sun/istanbul/> (Erişim Zamanı; 02,28,2025)
- [20] EPDK (T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu), URL: <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalar-ina-esas-tarife-tablolari> (Erişim Zamanı; 05,16,2025)
- [21] DarkSky URL: <https://darksky.org/news/the-promise-and-challenges-of-led-lighting-a-practical-guide/> (Erişim Zamanı; 05,16,2025)
- [22] International Dark-Sky Association, "Visibility, Environmental, and Astronomical Issues Associated with Blue-Rich White Outdoor Lighting", 2010
- [23] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, "Türkiye Ulusal Elektrik Şebekesi Emisyon Faktörü Bilgi Formu" 2022

[24] U.K. Department for Energy Security and Net Zero
“Greenhouse Gas Reporting: Conversion Factors 2024”, 2024

[25] TSE CEN/TR 13201-1, “Yol Aydınlatması-Bölüm 1:
Aydınlatma sınıflarının seçimiyle ilgili kılavuz bilgiler”,
Ankara, 2015

Özgeçmiş



Kerem Can Yıldırım, 1990 yılında İstanbul’da doğdu. Dumlupınar Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü’nden 2012 yılında mezun oldu. 2013 yılında profesyonel iş hayatına başladı. 2017 yılından itibaren ulaştırma sektöründe çalışmaktadır. Türkiye’nin en büyük otoyol ve tünel projelerinin hem yapım hem işletme aşamalarında görev almıştır. Ulaştırma sektöründe aydınlatma, enerji sistemleri konusunda faaliyet göstermektedir. Aydınlatma sistemlerine olan ilgisi akademik eğitimde başlamış sonrasında profesyonel çalışma hayatında da devam etmiştir. Tüm bu sistemler yanında enerji yönetim sistemleri ve karbon ayak izi hesaplamalarında da görev almaktadır.