



T.C.

**ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

ENERJİ KAYNAKLARI VE YÖNETİMİ ANABİLİM DALI

**KARAYOLLARI TÜNEL AYDINLATMA SİSTEMLERİNDE
ENERJİ OPTİMİZASYONU ÖRNEK ÇALIŞMASI:
BELKAHVE TÜNELİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜVEN ERDİNÇ

Tez Danışmanı

DOÇ. DR. GAMZE KAYA

ÇANAKKALE – 2023



T.C.

ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENERJİ KAYNAKLARI VE YÖNETİMİ ANABİLİM DALI

**KARAYOLLARI TÜNEL AYDINLATMA SİSTEMLERİNDE
ENERJİ OPTİMİZASYONU ÖRNEK ÇALIŞMASI: BELKAHVE TÜNELİ**

Yüksek Lisans Tezi

Güven ERDİNÇ

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Gamze KAYA

Çanakkale - 2023



T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



Güven ERDİNÇ tarafından Doç. Dr. Gamze KAYA yönetiminde hazırlanan ve **23/06/2023** tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan “**Karayolları Tünel Aydınlatma Sistemlerinde Enerji Optimizasyonu Örnek Çalışması: Belkahve Tüneli**” başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **Enerji Kaynakları ve Yönetimi Anabilim Dalı**’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Gamze KAYA

(Danışman)

Dr. Öğr. Üyesi Arzu KURT

Dr. Öğr. Üyesi Yakup BORAN

İmza

.....

.....

.....

Tez No : 10554912

Tez Savunma Tarihi : 23/06/2023

.....
Prof. Dr. Ahmet Evren ERGİNAL
Enstitü Müdürü

.././20..

ETİK BEYAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Güven ERDİNÇ

23/06/2023

TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleŐtirilmesinde, çalıŐmam boyunca benden bir an olsun yardımlarını esirgemeyen saygı değer danışman hocam Doç. Dr. Gamze KAYA, savunma sınavıma katılan değerli hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Arzu KURT, Dr. Öğr. Üyesi Yakup BORAN, bu çalışmanın gerçekleŐtirilmesinde teknik destek sağlayan MAY Elektrik Sn. Murat Aydoğdu, Heper Group Aydınlatma ve İzmir Aktif Elektrik firmalarına, Karayolları Genel Müdürlüğü ve Karayolları Kamu Özel Sektör Ortaklığı Bursa Bölge Müdürlüğüne, çalıŐmam süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen, hayatımın her evresinde bana destek olan değerli ailem; kıymetli annem Güray ERDİNÇ ve kıymetli babam Alaattin ERDİNÇ'e sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

Güven ERDİNÇ
anakkale, Haziran 2023

ÖZET

KARAYOLLARI TÜNEL AYDINLATMA SİSTEMLERİNDE ENERJİ OPTİMİZASYONU ÖRNEK ÇALIŞMASI: BELKAHVE TÜNELİ

Güven ERDİNÇ

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Enerji Kaynakları ve Yönetimi Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Gamze KAYA

23/06/2023, 80

Gelişen teknoloji ve paralelinde artan ulaşım imkanlarıyla birlikte dünya üzerindeki insan hareketliliği her geçen gün artmaktadır. Bu gelişmeler kapsamında insan hayatını kolaylaştırmak üzere ulaşım araçları tünellerin yapımı da artmıştır. Bu doğrultuda rehber niteliğinde olan Uluslararası Aydınlatma Komisyonu Teknik Raporu'na göre ortalama 125m ve üzeri uzunluklardaki tünellerde sürekli aydınlatma ihtiyacı doğmuştur. Diğer yandan tükenmekte olan fosil yakıtlar, yeni ve alternatif yenilenebilir enerji kaynağı arayışlarını zorunlu hale getirmiştir. Ancak yeni kaynak arayışının yanında mevcut enerji tüketimimizi değerlendirmek, daha verimli hale getirmek ve optimizasyonu sağlayabilmek çok önemli hale gelmiştir.

Bu tez çalışmasında karayolları tünellerinin güvenli sürüş ve sürücü görüş kalitesini bozmadan, ancak enerji optimizasyonu sağlanacak şekilde tasarlanması açıklanarak örnek çalışma olarak, İzmir'in Bornova ve Kemalpaşa ilçeleri arasında bulunan Belkahve Tüneli mevcut HPS (Yüksek basınçlı sodyum) aydınlatma sistemleri ve alternatif olarak kullanılacak LED (Işık Yayan Diyot) aydınlatma tasarımı pek çok açıdan karşılaştırılmıştır. Her iki sistem için enerji verimliliği ve çevresel etkiler üzerine sonuçlar ortaya konularak karayolları tünelleri aydınlatma sistemlerinde enerji verimliliği ve optimizasyonu kapsamında alternatif çözüm önerileri sunulmuştur. Aydınlatma sistemlerinin en karmaşık noktasında bulunan tünel aydınlatma sistemlerinde bahsedilen enerji optimizasyonları sağlanarak, uzun vadede daha az enerji tüketen, emisyon miktarları daha düşük daha çevreci yapılar inşa etmenin mümkün olduğu ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Tünel Aydınlatması, Enerji Optimizasyonu, Sürdürülebilir Yapılar, LED Sistemler

ABSTRACT

ENERGY OPTIMIZATION CASE STUDY IN HIGHWAY TUNNEL LIGHTING SYSTEMS: BELKAHVE TUNNEL

Güven ERDİNÇ

Çanakkale Onsekiz Mart University

School of Graduate Studies

Master of Science Thesis in Energy Resources and Management

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Gamze KAYA

23/06/2023, 80

The people mobility around the world has been growing due to the related developing technology and progressing transportation opportunities. According to these developments, the construction of tunnels has been increased to facilitate the mobility. Within this context, for tunnels with length of approximately 125m and more, continuous lighting demand has been occurred according to the guidelines of the International Commission on Illumination. On the other hand, depletion of fossil fuels has made search on new and alternative renewable energy sources obligatory. However, besides the search of new sources, it has been important to evaluate, make more efficient and optimize the current energy consumptions.

In this thesis study, by explaining the design without impairing the quality of safe drive and driver view quality, but by providing the energy optimization; case study Belkahve Tunnel (between Bornova and Kemalpaşa districts of İzmir) current HPS (High Pressure Sodium) lighting system and LED (Light Emitting Diode) lighting design to be used as alternative have been compared in many aspects. For both systems, by presenting energy efficiency and environmental aspects results, alternative solution suggestions have been stated according to highway tunnel lighting systems energy efficiency and optimization. It has been presented that constructing more environmental friendly, less emission releasing and less energy consuming infrastructures are possible in long term for tunnel lighting systems, which stays at the most complicated field in lighting systems, by providing mentioned energy optimizations.

Keywords: Tunnel Lighting, Energy Optimization, Sustainable Infrastructure, LED Systems

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

JÜRİ ONAY SAYFASI.....	i
ETİK BEYAN.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	ix
TABLolar DİZİNİ.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

1

1.1. Enerjinin Tanımı.....	1
1.1.1. Enerji Verimliliği.....	2
1.1.2. Enerji Tasarrufu.....	2
1.1.3. Enerji Optimizasyonu.....	3
1.2. Tünel Tanımı.....	3
1.3. Aydınlatma ve Önemi.....	3
1.3.1. Tünel Aydınlatmasının Önemi.....	4
1.4. Temel Fotometrik Tanımlar.....	5
1.4.1. Işık Akısı.....	5
1.4.2. Işık Şiddeti.....	7
1.4.3. Lümen.....	7
1.4.4. Aydınlık Düzeyi.....	7
1.4.5. Parıltı.....	8
1.4.6. Temel Fotometrik Tanımların Karşılaştırılması.....	9
1.5. Fotometrik Bağıntılar.....	9
1.5.1. Işık Akısı ve Işık Şiddeti Arasındaki İlişki.....	10
1.5.2. Işık Akısı Işık Şiddeti ve Aydınlık Düzeyi Arasındaki İlişki.....	10

1.5.3. Ters Kare Yasası.....	11
1.5.4. Kosinüs Yasası.....	12
1.5.5. Işık Şiddeti ve Parıltı Arasındaki İlişki.....	14
1.5.6. Aydınlık Düzeyi ve Parıltı Arasındaki İlişki.....	14
1.6. Fizyolojik Optik Esaslar.....	15
1.6.1. Adaptasyon.....	16
1.6.2. Kontrast Duyarlılığı.....	16
1.6.3. Şekil Duyarlılığı.....	17
1.6.4. Düzgünlük.....	18
1.6.5. Titreşim (Flicker) Etkisi	19
1.6.6. Kamaşma Etkisi.....	21
İKİNCİ BÖLÜM	
ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	
2.1. Literatür Taraması ve Örnekler.....	22
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM	
MATERYAL VE YÖNTEM	
3.1. Relux Tunnel Uygulaması.....	27
3.2. Belkahve Tüneli.....	28
3.3. Aydınlatma Armatürleri Teknik Bilgi.....	28
3.3.1. HPS Aydınlatma Armatürleri	29
3.3.2. LED Aydınlatma Armatürleri	32
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM	
ARAŞTIRMA BULGULARI	
4.1. Belkahve Tüneli HPS Armatür Aydınlatma Tasarımı.....	37
4.1.1. Kapsam.....	37
4.1.2. Genel.....	37
4.1.3. Asgari Güvenlik Gereksinimleri.....	38

Normal Aydınlatma Sistemi.....	39
Güvenlik Aydınlatma Sistemi.....	39
Acil Tahliye Aydınlatma Sistemi.....	39
4.1.4. Normal Aydınlatma Sistemi.....	40
Yaklaşım ve Uzaklaşma Bölgesi Aydınlatması.....	41
Eşik Bölgesi ve Geçiş Bölgesi Aydınlatması.....	41
İç Bölge Aydınlatması.....	44
Acil Durum İki Yönlü Trafik.....	44
Çıkış Aydınlatması.....	45
4.1.5. Güvenlik Aydınlatma Sistemi.....	45
4.1.6. Gece Aydınlatması.....	46
4.1.7. Aydınlatma Hesaplarına Esas Parametreler.....	47
4.1.8. Optik Özellikler ve Aydınlatma Performansı.....	47
4.1.9. Armatürler.....	48
4.1.10. Aydınlatma Kontrolü.....	49
4.1.11. Belkahve Tüneli HPS Aydınlatma Tasarımı ReluxTunnel Hesaplamaları.....	50
4.2. Belkahve Tüneli LED Aydınlatma Tasarımı.....	58
4.2.1. Aydınlatma Hesaplarına Esas Parametreler.....	59
4.2.2. LED Tasarım Armatür Adetleri.....	59
4.2.3. Belkahve Tüneli LED Aydınlatma Tasarımı Relux	60
4.3. HPS-LED Kıyaslama Tabloları ve Sonuçlar.....	66
BEŞİNCİ BÖLÜM	
SONUÇ ve ÖNERİLER	
KAYNAKÇA	78

SİMGELER VE KISALTMALAR

CIE	Uluslararası Aydınlatma Komisyonu
LED	Işık Yayan Diyot
HPS	Yüksek Basıncılı Sodyum Buharlı Armatür
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
VIOLAX NAVT	Yüksek Basıncılı Sodyum Buharlı Armatür Modeli
GOLEDO LED	LED Aydınlatma Armatür Modeli
UPS	Kesintisiz Güç Kaynağı
gr	Gram
%	Yüzde oranı
Hz	Hertz
Φ	Işık Akısı
nm	Nanometre
Ko	Fotometrik Eşdeğer
F	Enerji Akısı
V	Radyasyon Spektral Duyarlılık Derecesi
cd	Işık Yoğunluğu Ölçü Birimi
m	Metre
Lux	Aydınlanma Şiddeti
W	Güç Birimi
L20	Dış Bölge Parıltı Değeri
Ltr	Geçiş Bölgesi Parıltı Değeri
Lth	Eşik Bölgesi Parıltı Değeri
Lex	Çıkış Bölgesi Parıltı Değeri
E	Aydınlık Düzeyi
λ_0	Işık Dalga Boyu
P	Güç
<i>e</i>	Etkinlik Faktörü
I	Işık Şiddeti
<i>Lα</i>	Parıltı
ΔA	Alandaki Değişim
Eort	Ortalama Aydınlanma Düzeyi

π	Pi Sayısı
$C\Delta$	Kontrast Duyarlığı
U_{ort}	Ortalama Düzgünlük
U_l	Boyuna Düzgünlük
kWh	Enerji Tüketim Birimi
SD	Durma Mesafesi
u	İzin Verilen Hız Limiti
t_o	Zaman
g	Yer Çekimi İvmesi
f	Sürtünme Katsayısı
s	Eğim



TABLULAR DİZİNİ

Tablo No	Tablo Adı	Sayfa No
Tablo 1	Çeşitli Işık Kaynaklarının Işık Akıları	6
Tablo 2	Parıltı Değerleri İçin Çeşitli Örnekler	8
Tablo 3	Genzano Tüneli Aydınlatma Tasarımları	25
Tablo 4	HPS Armatür Detayları	67
Tablo 5	LED Armatür Detayları	67
Tablo 6	HPS Aydınlatma Yatırım-Bakım Maliyetleri	68
Tablo 7	LED Aydınlatma Yatırım-Bakım Maliyetleri	69
Tablo 8	HPS-LED Enerji Giderleri	70
Tablo 9	HPS-LED İşletme Karı	71

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Şekil Adı	Sayfa No
Şekil 1	Işık Akısı ve Aydınlık Düzeyi	11
Şekil 2	Uzaklıkların Karesi ile Ters Orantı Bağıntısı	11
Şekil 3	Kosinüs yarası bağıntısı	12
Şekil 4	Yarı Saydam Bir Noktanın Aydınlık Düzeyi Bağıntısı	13
Şekil 5	Hız – Tehlikeli Titreşim Frekansısı	20
Şekil 6	Belkahve Tüneli	28
Şekil 7	150W HPS Aydınlatma Armatürü	29
Şekil 8	250W HPS Aydınlatma Armatürü	30
Şekil 9	400W HPS Aydınlatma Armatürü	31
Şekil 10	87W LED Aydınlatma Armatürü	32
Şekil 11	87W LED Armatür Teknik Çizim	33
Şekil 12	110W LED Aydınlatma Armatürü	33
Şekil 13	110W LED Armatür Teknik Çizim	34
Şekil 14	174W LED Aydınlatma Armatürü	34
Şekil 15	174W LED Armatür Teknik Çizim	35
Şekil 16	348W LED Aydınlatma Armatürü	35
Şekil 17	348W LED Armatür Teknik Çizim	36
Şekil 18	Normal Aydınlatma Sistemi İçin Tünel Bölümleri	40
Şekil 19	Sürekli Aydınlatma Gereksinim Algoritması	42
Şekil 20	Luminansmetre	49
Şekil 21	Durma Mesafesi Tayini	50
Şekil 22	Eşik ve Geçiş Bölgeleri Durma Mesafesi	51
Şekil 23	İç Bölge Parıltı Seviyesi – Gündüz Aydınlatması	52

Şekil 24	İç Bölge Parlıltı Seviyesi – Gece Aydınlatması	53
Şekil 25	Tünel Çizimi – Armatür Yol Yerleşimi	54
Şekil 26	Parametre Seçimleri	55
Şekil 27	Sonuç Ekranı	56
Şekil 28	Parametreler	60
Şekil 29	LED Aydınlatma Planı	61
Şekil 30	Tünel Teknik Çizimi	62
Şekil 31	CIE-LED Tasarım Göz Adaptasyon Eğrileri	63
Şekil 32	LED Tasarım Sonuç Ekranı	64

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

Gelişmekte olan teknoloji ve paralelinde gelişen ulaşım imkanlarıyla her geçen gün dünya üzerindeki insan hareketliliği artmaktadır. Bu hareketlilik mühendislik branşlarının konusu olmakla birlikte, ulaşım imkanlarını daha modernize etmek, konforu ve güvenliği arttırabilmek, ulaşım sürelerini kısaltmak gibi çeşitli amaçlar temelinde gelişim sürekli olarak devamlılığını sağlamaktadır. Karayolu, demiryolu ve yaya yolu olmak üzere birçok farklı alanda tünellerin yapımı zorunlu hale gelmiştir. İnşa edilen tünellerin kullanım amaçlarına göre farklı parametrelerde bir takım zorunlulukları doğmuştur. Karayolları tünellerini ele alırsak Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (CIE- Commission Internationale de l'Éclairage/International Commission on Illumination) Teknik Raporu'na göre ortalama 125 metre ve üzerindeki tünellerin sürekli aydınlatılma zorunluluğu ortaya çıkmıştır (C.I.E. 88, 2004). Gelişen teknoloji, artan insan nüfusu ve enerjiye duyulan ihtiyacın her geçen gün arttığı bilinmektedir. Aynı şekilde tükenmekte olan fosil yakıtlar insanlığı yeni enerji kaynağı arayışına sevk etmiştir. Son yıllarda üzerinde ciddi olarak konuşulmaya başlanan fosil yakıtların çevresel etkileriyle de birlikte, yeni ve alternatif yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim artmaktadır. Yeni enerji kaynakları arayışının yanında üzerinde ciddi şekilde durulan bir diğer konu da mevcut enerji tüketimlerimizde enerji verimliliği, mümkünse enerji tasarrufu, enerji optimizasyonu gibi konular gündeme gelmiştir. Belirli şartlar dahilinde sürekli aydınlatma zorunluluğu bulunan karayolları tünelleri de her geçen gün yaygınlaşmakta, enerji tüketimleri ve çevresel etkileri de aynı şekilde artmaktadır. Bu kapsamda karayolları tünellerinde sürüş güvenliği, sürücü görüş kalitesi gibi parametreleri bozmadan ancak enerjiyi daha verimli kullanacak şekilde enerji optimizasyonu sağlanmalıdır. Aydınlatma sistemlerinin en karmaşık noktasında bulunan tünel aydınlatma sistemlerinde bahsedilen enerji optimizasyonları sağlanarak, uzun vadede çok daha az enerji tüketen, emisyon miktarları daha düşük daha çevreci yapılar inşa etmek mümkündür.

1.1. Enerjinin Tanımı

Tek bir tanımı olmamakla ve direkt olarak gözlenememekle birlikte, kullanıldığı disipline göre farklı tanımları vardır. Ancak en temel haliyle tüm disiplinlerde kabul görmüş tanım olarak, bir sistemin iş yapabilme kapasitesi olarak tanımlanabilir. Kinetik, potansiyel,

kimyasal, ısı, manyetik, elektrik, ses, nükleer, mekanik, termal gibi farklı türleri vardır. Bunlar daha da çeşitlendirilebilir. Bu formlar arasında enerji dönüşümleri yapılabilmektedir. Tüm bu formlar arasındaki geçişlerin temelini oluşturan Termodinamik branşı temellerini oluşturan sistemlerin termodinamik dengesi, enerjinin yoktan var edilemediği gibi vardan da yok edilemeyeceği, enerji formları arasında belirli şartlar ve kayıplar altında dönüşümlerin yapılabildiği ve bunun karşılığında insan hayatını kolaylaştıracak etkende iş yapılabildiği bilinmektedir. Mühendisliğin en temel problemlerinden biri olan enerji üretimi, dönüşümleri, depolanması, iletilmesi gibi konular bu disiplinin temel noktalarını oluşturmaktadır. Bu bilgiler ışığında enerjinin kullanımıyla ilgili olarak alt tanımlar halinde enerji verimliliği, tasarrufu ve optimizasyonundan bahsedilecektir.

1.1.1. Enerji Verimliliği

Enerji verimliliği ürün veya hizmet kalitesini değiştirmeden aynı ürün veya hizmeti daha az enerji tüketerek elde etmektir. Bir başka tanım olarak, aynı birim enerji tüketimle aynı kalitede daha fazla iş üretmek denilebilir. Örnek olarak bilindiği üzere aydınlatma sektöründe bilinen akkor veya floresan armatürler yerine gelişmekte olan LED teknolojisiyle birlikte, aynı veya daha yüksek ışık şiddetleri ve parlaklık değerleriyle görüş kalitesini düşürmeden ancak daha düşük enerji tüketim maliyetleriyle aydınlatma sağlanabilmektedir. Enerji verimliliği değerlendirme kriterleri arasında sadece finansal parametreler değil çevresel faktörler de gün geçtikçe yerini almaktadır. Yukarıda verilen örneği ele aldığımızda, LED armatürlerle birlikte ekonomik ve kullanım ömürlerinin artmasının yanı sıra sera gazı emisyonlarında da ciddi azalmalar olduğu bilinmektedir.

1.1.2. Enerji Tasarrufu

Enerji verimliliği ile birbirine çok yakın kavramlardır. Ancak aralarındaki fark olarak enerji tasarrufu yaparken yapılan iş miktarında azalma öngörülmektedir. Fazla ve gereksiz tüketimleri azaltmak olarak tanımlanabilir. Örnek olarak yapılan iş miktarının ihtiyaçtan fazla olduğu durumlarda enerji tasarrufuna gidilebilir. Doğal olarak bu tasarruf enerjinin daha verimli kullanılması da olacaktır. Bir diğer somut örnek olarak çoklu ofislerde aydınlatma sistemleri bölgesel sensörlü olarak tasarlanarak aktif olmayan bölgelerin

gereksiz aydınlatılmasının önüne geçilecektir. Bu durum somut olarak enerji tasarrufu sağlayacak, sistem enerji verimliliğini arttıracaktır.

1.1.3. Enerji Optimizasyonu

Sistem ihtiyaçlarının doğru belirlenip, mümkünse enerji sistem taramasından sonra ürün, sistem veya hizmette konfor, yasal zorunluluk, kalite gibi şartları bozmadan enerjinin en doğru kullanımını hedeflemektedir. Örneğin bir tünel aydınlatmasında sürüş güvenliği, görüş kalitesi gibi parametreleri öncelik kabul ederek, bu değerleri azaltmayacak şekilde enerji tüketimlerini düşürmek ve verimli kullanmak diyebiliriz. Bahsedilen tünel aydınlatmasında otomatik kontrol esaslı LED teknolojisi kullanılarak ve diğer teknik tasarım detaylarıyla enerji optimizasyonu sağlanabilmektedir. Haliyle hem tasarruf hem de enerji verimliliği sağlanmış olacaktır. Bu üç kavram birbirine çok yakın ve birbiriyle doğrudan etkileşim halinde olan kavramlar olmakla birlikte birebir aynı anlama gelmemektedir.

1.2. Tünel Tanımı

Literatürde farklı tanımları ve kullanım şekilleri olmakla birlikte; en temel şekliyle yer altından kazı, yatay sondaj yöntemleriyle insanoğlunun dünya üzerindeki hareketliliğini kolaylaştırmak, modernize etmek veya ulaşım sürelerini kısaltmak amacıyla oluşturulan geçitlerdir. Kara ve deniz altına açılarak, karayolu, demir yolu, şehir içi ulaşım ağları veya yaya yolu gibi farklı kullanım şekillerine hizmet verebilmektedir. Daha özelleştirilmiş şekilleriyle bisiklet, vahşi hayvan yaşam alanlarının korunması gibi çeşitli kullanım amaçları da mevcuttur. Temel görevi insan veya canlı yaşamını kolaylaştırmaktır.

1.3. Aydınlatma ve Önemi

Çevremizde olup biteni doğru şekilde algılayabilmek için görsel biliş sağlayan ışık uygulamalarına aydınlatma adı verilmektedir. Hayatımızın her alanında çevresel uyaranlara karşı doğru olan karşı tepkiyi verebilmek için doğru aydınlatma kritik öneme sahiptir. Daha çok doğal ışık kaynaklarının bulunmadığı veya yetersiz olduğu durumlarda insan kaynaklı geliştirilmiş olan yapay aydınlatma sistemlerine ihtiyaç vardır. Doğru aydınlatmadan kasıt eksik veya fazla olmayan aydınlatma tasarımıdır. Örneğin karayolları veya tünel

aydınlatması gibi sistemlerde öncelik sürücüye en uygun görsel imkanı sağlayarak olası engel veya tehlikeleri erken teşhis edip hızlı karşı tepki verebilmeleri ve kazadan kaçınmalarıdır. Aynı şekilde endüstriyel tesis aydınlatmalarında doğru aydınlatmayla iş kazalarından kaçınıldığı, kaza oranlarının düştüğü bilinmektedir. Örnekleri çoğaltmak gerekirse ofis tipi çalışma ortamlarında doğru aydınlatma çalışan verimliliğini arttırmakta, üretim veya hizmet kalitesini yükseltmektedir.

Aydınlatmanın önemini daha somut örneklerle vermek gerekirse; New York ve Paris şehirlerinden iki uygulama örneği gösterilebilir. New York şehrinin kuzey kısmını iki ayrı şekilde aydınlatma testlerinden sonra trafik yoğunluğundaki artışa rağmen gece kazaları %36,4 oranında azalmıştır. Diğer bir örnekte ise, Paris-Versailles yolu aydınlatmasından sonra yıllık kaza sayısı 8'den 2'ye düşmüştür. Bu kazalar da ölümle sonuçlanma olmamıştır. (Akbulut, 2006)

1.3.1. Tünel Aydınlatmasının Önemi

Her geçen gün gelişmekte olan teknoloji ve dünya üzerindeki insan hareketliliği paralel olarak modernizasyon ve ulaşım imkanlarının da gelişmesini etkilemiştir. Bu kapsamda dünya üzerindeki tünellerin sayısı da her geçen gün artmaya devam etmektedir. Aydınlatma sistemlerinin tasarımında rehber niteliğinde olan Uluslararası Aydınlatma Komisyonu Teknik Raporuna göre bu tünellerin ortalama 125 metre ve üzerinde olanları için sürekli aydınlatma ihtiyacı söz konusu olmuştur. Bu sebeple hem teknik olarak zorunlu hale gelmiş olan hem de bu yapıları kullananların güvenli bir sürüş ile seyahat edebilmeleri için aydınlatma sistemleri önemli bir noktaya gelmiştir. Tünel aydınlatmasındaki en temel hedef; bu yapıyı kullanan araçların en güvenli şekilde geçişini tamamlamasıdır. Bunu sağlarken özellikle tünelin yaklaşım ve eşik bölgesi diye adlandırdığımız noktalarında görsel sorun yaşamamasıdır. Bunu sağlamanın en bilindik yöntemi de bahsedilen bölgelerde, özellikle eşik bölgesi olmak üzere gün ışığına en yakın ışık parıltı değerini yakalayacak aydınlatma yapılmalıdır.

Aydınlatma zorunluluğumuz olan bu tünellerde gerekli teknik esaslar sağlanmadığında veya yanlış teknik tasarımlar yapıldığında tünele yaklaşan sürücüler için kara delik etkisi, tünelden çıkan sürücüler için göz kamaşması, tünel içerisinde seyreden

sürücüler için titreşim etkisi gibi görsel kusurlara sebebiyet verilebilmektedir. Yanlış veya yetersiz aydınlatma uygulamaları sonucu oluşabilecek olan bu görsel problemler tünel içerisinde ciddi sonuçlar doğurabilecek kazalara sebebiyet verebilir.

Özet olarak gözün karanlık ve aydınlık adaptasyon eğrileri dikkate alınarak; tünele yaklaşan, tünel içinde seyir halinde olan ve tünelden çıkmakta olan sürücüler için en doğru aydınlatma sistem tasarımı yapılmalıdır. Bunun en modern hali “luminance meter” adı verilen anlık olarak yüzeydeki gün ışığı parlaklığı seviyesini ölçen ve kontrol merkezine aktaran sensörler kullanılmalıdır. Buradan gelen veriyi işleyerek göz adaptasyonunu sağlayacak şekilde tünel bölgelere ayrılmalı ve kademeli aydınlatma sistem tasarımı yapılmalıdır.

Geçmişten günümüze bu konuda birçok çalışma yapılmış olmakta birlikte Uluslararası Aydınlatma Komisyonu Teknik Raporu en geçerli referans olarak kabul edilmektedir. Orada belirtildiği şekilde aydınlatma sistem tasarımları, matematiksel hesapları her tünel için kendine özel olacak şekilde özgün tasarımlardır.

1.4. Temel Fotometrik Tanımlar

Aydınlatma sistemlerinin daha iyi kavranabilmesi açısından bazı temel terimler ve büyüklükler aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

1.4.1. Işık Akısı

Fiziksel bir büyüklük olup nicel bir kavramdır. Literatürde; ışınım yapan bir kaynaktan insan gözü görme sınır frekanslarında birim zamanda yayılan toplam ışık enerjisi olarak tanımlanmaktadır. Diğer bir deyişle bir kaynaktan birim zamanda çıkan ışık miktarı olarak da tanımlanabilmektedir. Birimi lümen olup matematiksel denklemlerde gösterimi “ Φ ” şeklindedir. Tanım olarak, bir ışık kaynağının ışık akısı, bu ışık kaynağından çıkan ve normal gözün gündüz görmesine ait spektral duyarlık eğrisine göre değerlendirilen enerji akısıdır (Onaygil, 1990). İnsan gözü 380-740 nm (nanometre) arasındaki dalgalınlara duyarlıdır. Bu spektrumun uç noktalarında duyarlılık düşüktür. Maksimum duyarlılığın olduğu dalgalınlık (aydınlık ortamda) 555 nm dir (Onaygil, 1990).

Işık akısı matematiksel bağıntısı aşağıdaki gibidir (Onaygil, 1990).

$$\Phi = K_o \times F \times V \quad (1.1)$$

Bu denklemde F enerji akısını, Ko enerji akısının $V_{555} = 1$ için fotometrik eşdeğerini gösterir. $\lambda_o=555\text{nm}$ için $V_{555} = 1$ ve $K_o=683 \text{ lm/W}$ 'tır. V gözün radyasyonlara karşı spektral duyarlılık derecesidir.

Yaygın olarak bilinen bazı ışık kaynaklarının şebekeden çektikleri güç ve ışık akıları Tablo 1'de (Avcil, 2019) verilmiştir. Tablodaki verilere dikkat edildiğinde çekilen güç ile ışık akısı arasında doğrusal bir oran olmadığı görülecektir. Bu değişkenlik, ışık akısı ile çekilen toplam güç arasındaki oran literatürde "etkinlik faktörü" olarak adlandırılmaktadır. Birimsel olarak lümen/watt şeklinde açıklanabilir. Her kaynağın kendine özgün etkinlik faktörü vardır.

Tablo 1
Çeşitli Işık Kaynaklarının Işık Akıları (Avcil, 2019)

Kaynak	Güç	Işık Akısı
Bisiklet Farı	3 W	30 lm
Akkor Telli Lamba	75 W	900 lm
Kompakt Flüoresan	18 W	900 lm
Tüp Flüoresan	58 W	5400 lm
Yüksek Basınçlı Sodyum Buharlı Armatür	100 W	10000 lm
Alçak Basınçlı Sodyum Buharlı Armatür	130 W	26000 lm
Yüksek Basınçlı Civa Buharlı Armatür	1000 W	58000 lm
Metal Halojen	2000 W	190000 lm

Etkinlik faktörü matematiksel bağıntısı aşağıdaki gibidir. (Avcil, 2019)

$$e = \Phi/P \text{ (lm/W)} \quad (1.2)$$

1.4.2. Işık Şiddeti

Işık şiddeti bir ışık kaynağının belirli bir yön ve belirli bir açıda bulunan birim uzay alanı içindeki ışık akısının toplam miktarı demektir. Işık akısı ile ışık şiddeti arasındaki fark; ışık akısı terimsel olarak kullanıldığında kaynaktan yayılan toplam akıdan bahsedilmekte, ışık şiddetinde ise belirli bir açı ve doğrultudaki birim uzay içinde kalan toplam akıdan bahsedilmektedir. Diğer bir deyişle ışık şiddeti, bir ışık kaynağının belirli bir zamanda yaydığı foton sayısı ile orantılıdır diyebiliriz.

Işık akısının sembolü lümen (lm), ışık şiddetinin birimi ise candela/kandela (cd) olarak bilinmektedir. Terimsel gösterimi “I” şeklindedir.

1.4.3. Lümen

Temel olarak ışık şiddeti ve ışık akısı arasında kalmış bir terimdir. Teorik olarak 1 cd şiddetinde bir ışık yayan kaynaktan 1 m uzakta, kaynaktan gelen ışınların yüzeye tam dik düştüğü 1 m² lik yüzeye düşen ışık akısıdır.

Birimsel dönüşümler açısından; 1 Lümen = 0.00146 W

1.4.4. Aydınlık Düzeyi

Birim yüzey alanına düşen toplam ışık akısı ve o yüzey alanının aydınlık seviyesi olarak tanımlanır. Sembolik olarak “E” ile gösterilir ve birimi lux (lx)’ tür. Lux metrekaire başına düşen lümen değeridir.

Yukarıdaki tanımdan da anlaşıldığı üzere toplam ışık akısının yüzey alanına bölünmesiyle aydınlık düzeyi tespit edilmiş olacaktır.

Matematiksel olarak gösterimi (Avcil, 2019);

$$E = \Phi / A \quad (1.3)$$

1.4.5. Parıltı

Parıltı; ışık kaynağının yansıdığı birim yüzey alanından yayılan ışıkla ilgili bir terimdir. “L” ifadesi ile sembolize edilir ve birimi cd/m^2 ’dir. Bu kavramı tanımlarken, birincil bir ışık kaynağına direk maruz kalma zorunluluğumuz yoktur. Dolaylı yollarla veya farklı yansıtma elemanları kullanarak, veyahut yüzeylerin yansıtıcılık özellikleri sebebiyle kademeli ikincil veya üçüncül yüzeylerden yansıyan ışık için de bir parıltı söz konusudur. Literatürde parıltı: “Işık yayan bir yüzeyin bir M noktasının bu yüzeyin normali ile α açısı yapan doğrultudaki parıltısı, M noktasını içine alan ΔA yüzey elemanının bu doğrultuda doğurduğu ΔI_α ışık şiddetinin ΔA ’nın bu doğrultuya dik düzlemdeki ΔA_g görünen alanına oranının limitidir.”

Matematiksel olarak gösterimi (Onaygil, 1990);

$$L_\alpha = \lim \Delta I_\alpha / \Delta A_g = dI_\alpha / dA_g \quad (1.4)$$
$$\Delta A_g = 0$$

Örnek olarak Tablo 2’de (Avcil, 2019) görüldüğü gibi; aynı aydınlık düzeyinde aydınlatılmış olsalar bile farklı yüzeylerdeki parıltı düzeyleri birbirinden farklı olacaktır. Bunun sebebi olarak farklı yüzeylerin farklı yansıtma özelliklerine sahip olmaları gösterilebilir. Başka bir deyişle biri koyu diğeri açık renkli bir yüzeyde aynı parıltı düzeylerini görmek istiyorsak koyu renkli yüzeyi aydınlatan ışık kaynağının aydınlık düzeyi (lux) daha yüksek olmalıdır.

Tablo 2

Parıltı değerleri için çeşitli örnekler (Avcil, 2019)

Yüzey	Parıltı Değeri
Güneş Yüzeyi	1 650 000 000 cd / m^2
Şeffaf Akkor Telli Lamba Flamanı	7 000 000 cd / m^2
Opal akkor telli lambanın balonu	200 000 cd / nr
Fluresan Lamba	5 000- 15 000 cd/m^2
Ay Yüzeyi	2 500 cd / m^2
Güneş Işığı Altındaki Kumsal	15 000 cd/m^2
400 lx Altında Beyaz Kağıt (p=0.8)	100 cd / m^2
400 tx Altında Gri Kağıt (p=0.4)	50 cd / m^2
400 Lx Altında Siyah Kağıt (p=0.04)	5 cd / m^2
Aydınlatılmış Yol Yüzeyi	0.5 — 2 cd / m^2

1.4.6. Temel Fotometrik Tanımların Karşılaştırılması

Bazı uygulamalarda veya teorik anlatımlarda herhangi bir alanın iç veya dış mekân olmasına bakılmaksızın tanımlamalar yapılırken aydınlık düzeyi birimi olan lux kullanılmaktadır. Ancak bu teorik anlatım tam anlamıyla doğru değildir. Örneğin yol ve tünel aydınlatması gibi uygulamalarda parlıltı (cd/m^2) birimi kullanılmaktadır. Aydınlık düzeyini belirten lux kavramı birim bir yüzeye düşen ışığın miktarını belirtmektedir. Parlıltı (cd/m^2) ise yüzeyin insan tarafından algılanan parlaklığını belirtmektedir.

Aydınlık düzeyi için etkili olan parametreler; lümen değeri, ışık kaynağının yüzey ile yaptığı ışık açısı ve aydınlatılmak istenen yüzey ile kaynak arası uzaklık etkilidir. Ancak parlıltıda tüm bunlara ek olarak yüzeyin renk ve dokusu gibi özgün özelliklerinden kaynaklanan yansıtıcılık katsayısı da etki etmektedir.

Yol ve tünel aydınlatmalarında cd/m^2 parlıltı seviyesinin belirleyici parametre olarak kullanılmasının sebebi yol yüzeyinin parlaklığının insan gözü tarafından algılanabilen yol doku ve rengine göre (yansıtıcılık katsayısı) değişkenlik gösteren algılanan parlaklığa etkisiyle açıklanabilir.

Özetlemek gerekirse; ışık akısı kaynaktan gelen lümen miktarı, aydınlık (lux) birim yüzeydeki ışık miktarı, ışık şiddeti (kandela) ışığın bir doğrultuda belirli açıyla hangi yoğunlukta olduğunu ve parlıltı (cd/m^2) ise bir yüzeydeki ışık miktarını veya aydınlık düzeyini insan gözünün ne kadar algıladığını ifade etmektedir.

1.5. Fotometrik Bağıntılar

Fotometrik bağıntılar başlığı altında temel fotometrik terimler ve bunların matematiksel bağıntıları arasındaki bağlantılardan yola çıkarak aydınlatma sistem tasarımları yapılırken matematiksel olarak doğru kuramsal çerçeve içinde kalabilmek hedeflenmektedir.

1.5.1. Işık Akısı ve Işık Şiddeti Arasındaki İlişki

Bir ışık kaynağının her bir doğrultu için yaydığı ışık şiddetinin aynı değerde olduğunu düşünelim. Bu bağlamda sınırlı bir küre içerisinde olduğumuzu ve ışık kaynağının kürenin merkezinde olduğunu varsayarsak, kürenin yüzeyinde ışık şiddeti de her doğrultuda sabit olacaktır.

Işık şiddetinin değeri, kaynağın sahip olduğu ışık akısının 4π değerine bölünmesiyle bulunacaktır. Ancak ışık akısı (Φ) sabit kabul edildiği için değer sabit olacaktır. Matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir (Avcil, 2019) ;

$$I_{\alpha} = I = \Phi / 4\pi \quad (1.5)$$

1.5.2. Işık Akısı Işık Şiddeti ve Aydınlık Düzeyi Arasındaki İlişki

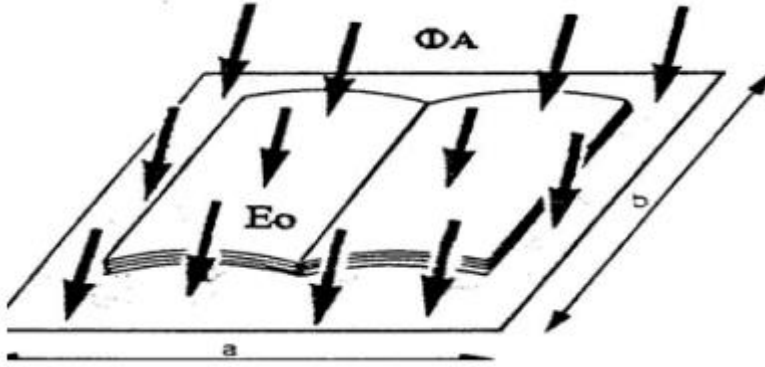
Yukarıdaki örnekte bahsettiğimiz üzere bir küre içerisindeki ışık akısı sadece kaynağın gücüne bağlıdır. Başka bir deyişle kaynaktan uzaklık veya yüzey alanının büyüklüğüyle matematiksel olarak bağıntılı değildir. Bahsettiğimiz kürenin çapını büyütsek bile merkezdeki kaynağın yüzeylere olan ışık akısı değişmeyecektir.

Ancak doğrusal ve küresel foton dalgaları halinde yayılan kaynaklar aynı durumu göstermeyecektir. Yani klasik örnek olan; kaynak olarak bir fener ve mum birebir kıyaslanamaz. Örneğin doğrusal demetler halinde bir perdeye yansıtılan ışıklarda perde yüzey alanını büyütme veya küçültme ışık akısını doğru orantılı olarak değiştirecektir. Daha basit olarak açıklamak gerekirse bir yüzey üzerinde oluşan ortalama aydınlık düzeyi yüzeye düşen ışık akısının ilgili yüzeyin alanına bölünmesiyle bulunacaktır.

Matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir; (Avcil, 2019)

$$E_{ort} = \Phi_{yüzey} / A \quad (1.6)$$

Aynı şekilde görsel olarak nitelendirmek gerekirse;



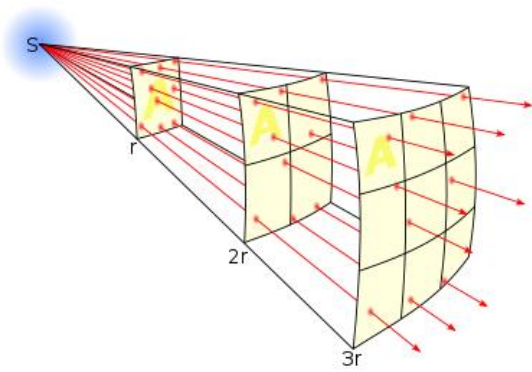
Şekil 1. Işık akısı ve aydınlık düzeyi (Sucugil,2000)

1.5.3. Ters Kare Yasası

Uzaklıkların karesiyle ters orantı yasası olarak da bilinen bu kavram adından da anlaşılacağı üzere belirli olan bir fiziksel büyüklüğün kaynağından uzaklaştıkça uzaklığın karesiyle ters orantılı olacak şekilde azalmasını temel almaktadır.

Işığın geliş noktasına dik bir düzlemdeki x noktasındaki aydınlık düzeyi matematiksel olarak (Avcil, 2019);

$$E_x = I / d^2 \quad (1.7)$$



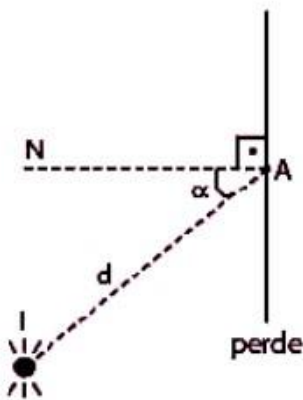
Şekil 2. Uzaklıkların karesi ile ters orantı bağıntısı (“Ters Kare Yasası”,2023)

Şekil 2’de görüldüğü gibi ileri yönlü oklar şeklinde gösterilmiş olan çizgiler kaynaktan çıkan ışığın akışını temsil etmektedir. Akış çizgilerinin alan üzerindeki yoğunluğu güçlü alan anlamına gelmektedir. Akış çizgi yoğunluğu kaynaktan saçılan okların karesiyle ters orantılı olacak şekilde orantılıdır. Ancak bu durum noktasal olarak kabul edilen kaynaklar için geçerlidir.

Diğer bir deyişle ışık kaynağının noktasal olduğunu kabul edersek, kaynaktan herhangi bir doğrultudaki düzlemlere dik olarak saçılan fotonların yüzeyde oluşturduğu aydınlık şiddetleri, bahsi geçen düzlemin ışık kaynağına olan uzaklığının karesiyle ters orantılıdır. Buradaki değişkenlerimiz düzlem ile ışık kaynağı arasındaki mesafe ve ışığın düzleme geliş açısıdır. Örneğimizde saçılan fotonların düzleme dik geldiğini varsayarak o değişken etkisiz hale getirilmiştir.

1.5.4. Kosinüs Yasası

Yukarıda bahsettiğimizin aksine ışık kaynağından gelen fotonlar yüzey normaline dik değil de bir açıyla geldiğinde ise kosinüs yasası kullanılmaktadır. Yüzeye gelen fotonlar yüzey normaliyle yaptıkları açıya göre aydınlık şiddetini değiştirmektedir. Eğer ışık akısı sabit kabul edilirse değişken parametremiz yüzey normaline göre ışığın geliş açısı ve kaynağın uzaklığı olacaktır.

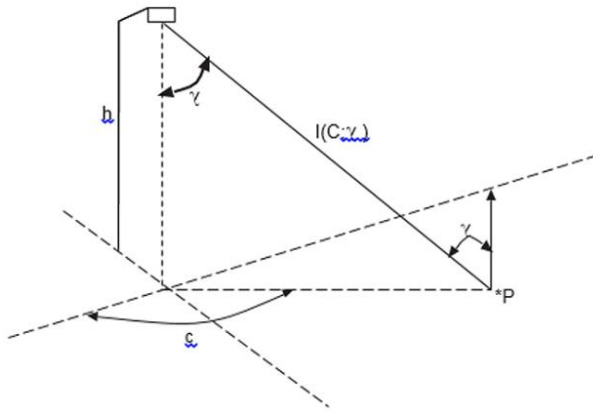


Şekil 3. Kosinüs yasası bağıntısı (“Aydınlanma”,2023)

Düsey düzlem üzerindeki aydınlık seviyesinin hesaplanmasında kullanacağımız bağıntı (Onaygil, 1990);

$$E_{düsey} = (I / d^2) \cdot \cos\alpha \quad (1.8)$$

Burada önemli nokta olarak, uygulamak isteyeceğimiz aydınlatma sistemlerinde fiziki koşullar yukarıdaki şartlardaki gibi olmayacaktır. Işık kaynaklarının düzenli ve aynı seviyede, aynı enerjide ışınım yapması mümkün olmadığı gibi fotonların çarpacağı yüzeyler de bu kadar kusursuz olmayacaktır. Bu yüzden teoride yarı silindirik düzeyler olarak da bilinen daha gerçekçi objeler aydınlatma kalitemizi arttıracaktır. Özellikle park, bahçe, yürüyüş yolu ve sokak aydınlatmalarında önemli olan bu nokta engellerin, şekillerin ve insan yüzlerinin daha uzaktan daha doğru seçilebilmesini sağlayacaktır.



Şekil 4. Yarı saydam bir noktanın aydınlık düzeyi bağıntısı (“Pelsan Aydınlatma Hesapları”, 2023)

$$E_p = \sum_{i=1}^n \frac{I(c\gamma)}{h^2} \times \cos^3\gamma \quad (1.9)$$

Bağıntımızdaki değişkenler; c düzlem açısı, h armatür fotometrik merkezinin yer yüzeyinden yüksekliği, n aydınlık hesaba yapmak istediğimiz noktaya katkıda bulunan armatür sayısı, γ noktaya gelen fotonun yüzey normaliyle yaptığı açı, $I(c \gamma)$ ilgili armatürden noktaya ulaşan ışık şiddetinin değeri şeklindedir.

1.5.5. Işık Şiddeti ve Parıltı Arasındaki İlişki

Bir ışık kaynağından veya dolaylı olarak yansıtıcı ikincil bir düzlemden gelen belirli bir yöndeki ışık şiddeti (I_{α}) düzlemin bu doğrultu normaliyile yaptığı dik yüzeydeki görünen alanı (A) kadarki bölümüne eşittir.

Bu iki kavram arasındaki matematiksel ifade (Avcil, 2019);

$$L_{\alpha} = I_{\alpha} / A \quad (1.10)$$

Denklem 1.10'u örneklemek gerekirse literatürde bulunan önceki çalışmalardan esinlenilerek özgün değerlerle bir armatürün ışık şiddetinden parıltı değerine nasıl ulaşılabileceği aşağıda verilmiştir. Aydınlatma armatürü olarak kullanılan sodyum buharlı yüksek basınçlı (HPS) lambasını ele alırsak; lamba çapı 12mm ve 120mm uzunluktaki deşarj tüpü yüzeyinden dik doğrultuda, 4500 candela şiddetinde ışık saçılmaktadır. Aynı dik düzlemden bakıldığında HPS armatür tüpünün parıltı değeri (Avcil, 2019);

$$L = 4500 / (0,12 \times 0,012) = 3\ 125\ 000\ \text{cd/m}^2 \text{ dir.}$$

1.5.6. Aydınalık Düzeyi ve Parıltı Arasındaki İlişki

Bu iki terim arasındaki bağıntıyı vermeden önce ön bilgi olarak Beer-Lambert yasaları hakkında fikir sahibi olmak gerekir. En temel haliyle; bir ortamdan geçen ışığın miktarı ışığın geçtiği ortam içinde aldığı yol ve ortam yoğunluğu (konsantrasyonu) ile logaritmik olarak ters orantılı olup, emilen ışık miktarıyla ise doğru orantılıdır temeline dayanmaktadır. Her doğrultuda aynı düzeyde ışık saçan bir yüzey düşünelim, bu yüzeye Lambert Yasası'na göre ışık yayan yüzey ya da uygun dağıtıcı yüzey denir.

Matematiksel bağıntı olarak (Avcil, 2019);

$$L_{\alpha} = L = \text{sabit} \quad (1.11)$$

Aydınlık düzeyinin (E) çok kolay ölçülebildiğini düşünürsek, uygun bir dağıtıcı yüzeyin aydınlık düzeyi (E) ve yansıtma faktörü (P) bilinirse;

Parıltı'nın bağıntısı aşağıdaki gibi ifade edilebilir. Ancak unutulmamalıdır ki bu ifade yalnızca uygun/ideal dağıtıcı yüzeyler için doğruluk sağlayacaktır (Avcil, 2019).

$$L = (P \times E) / \pi \quad (1.12)$$

1.6. Fizyolojik Optik Esaslar

Görme olayının algoritması biyolojik olarak cismin boyutları, göze uzaklığı ve ortamın aydınlık derecesine göre göz merceğinin incelik kalınlaşması, yani ortam şartlarına uyum sağlayarak en iyi görüntüyü işleyebilme yeteneğiyle görüntünün işlenmesi ve sinirsel iletimlerle beynin ilgili merkezlerine sinyalin iletilmesi olarak tanımlanabilir. Çalışmamız gereği burada bizi ilgilendiren nokta bir cismin görülebilmesi için öncelikle cismin belirleyici dış ve keskin hatlarının göz iç yapısında oluşturulan şekilde aydınlık şiddetinin, doğal olarak yukarıdaki bağıntılarda anlattığımız bu dış yüzeyler özellikle de belirleyici keskin hatlar üzerindeki yüzeylerden yansıyan parıltı değerine bağlıdır.

Aydınlatma sistemleri ve daha da derininde tünel aydınlatma sistemlerine gelirse, bu sistemlerin disiplinler arası bir branş olduğunu yalnızca fizik-matematik temelleriyle ilerlenemeyeceğini sağlık bilimleri, malzeme bilimi ve diğer branşlarla da direkt veya dolaylı yollarla bağlantılı olduğunu unutmamalıyız. En temel noktadaki hedefimiz olan en doğru aydınlatmayı en düşük enerji tüketimleriyle sağlamaya çalışırken gözün görme yeteneğini doğrudan etkileyen gözün kamaşması, karadelik etkisi, kontrast, titreşim ve düzgünlük gibi kavramları unutmamalıyız. Tüm bu sistemler tasarlanırken örneğin gözün görme adaptasyonu veya bir noktadaki parıltı değeri gibi değişkenler lineer veya sabit kalan parametreler değildir. Bu yüzden doğru sistem tasarımı yaparken her ortam veya tünelin kendine özgün tasarım gerekliliğini, doğru diye nitelendirdiğimiz parametrelerin tek bir değer olmadığı aksine birer eğri veya en doğru aralıklar olarak belirlendiği ve optimizasyon çerçevesinde kalınmaya çalışıldığını unutmamalıyız. Nasıl ki tünel aydınlatması disiplinler arası bir sistem ise, aynı şekilde optimizasyon da matematiksel veya madde boyutunda düşünüldüğünde de birçok alanda gereklidir.

1.6.1. Adaptasyon

İnsan göz yapısı diğer tüm duyu organlarımız gibi mevcut ortam koşullarını en iyi şartlarda algılayabilmek ve en doğru görüntüyü alabilmek için düzenli olarak veri işleyerek mevcut şartlara uyum sağlamaya çalışan bir otomatik kontrol sistemi gibi düşünülebilir. Karanlık bir ortama uyum sağlamış bir gözün aydınlığa veya parlıltı seviyesinin daha yüksek olduğu bir ortama çıktığında yaşadığı kamaşma ve akabinde uyum sağlamasıyla, aydınlık veya parlıltı seviyesinin daha yüksek olduğu ortamdan karanlık bir ortama girerken yaşadığı geçici kara delik etkisi ve akabinde uyum sağlaması gözün farklı parlıltı değerlerine göre adapte olmasıdır. Ancak bu ikisi arasında şöyle bir fark vardır; gözün aydınlık (kamaşma) adaptasyonu parlıltı seviyelerine göre değişmekle beraber genel anlamıyla özel, ek bir önleme gerek duymayarak çok hızlı gerçekleşir. Fakat karanlık adaptasyonu daha yavaş geliştiği için görsel ve bilişsel görüntü işleme ve algılama üzerine daha ciddi etkilere sahiptir. Diğer bir deyişle görsel adaptasyon olarak da adlandırılan bu terim, parlıltı seviyelerinin ani değiştiği ortamlarda görsel ve bilişsel algılama sistemlerindeki değişimdir. Tünel aydınlatma sistemlerinde tünel girişi olarak bahsettiğimiz eşik bölgesinde göz adaptasyonu ne kadar hızlı sağlanabilirse eşik bölgesi uzunluğu o kadar kısaltacak, paralel olarak tüm aydınlatma sistem tasarımı değişecektir. Dolaylı olarak enerji tüketim miktarları birim zamanda azalma gösterecektir.

1.6.2. Kontrast Duyarlılığı

Bir nesneyi ayırt edebilme duyarlılığı noktasında gözün nesneyi algılayabilmek için değerlendirme kriterlerinden olan renk ve parlıltı farkına verilen isimdir. Daha da basit haliyle aydınlatma üzerine tanımlamak gerekirse bir nesnenin parlıltı düzeyi yüksek olan noktalar ile parlıltı düzeyi düşük olan noktaları arasındaki farktır diyebiliriz. Yukarıdaki tanımlamalarda değindiğimiz başlıklardan birisi olan kamaşma da çok ciddi kontrast farkları var ise oluşmaktadır. Bir nesnenin veya ortamın farklı noktalarında çok düşük ve çok yüksek parlıltı farkları bir arada bulunuyorsa göz adaptasyonu hızlı sağlanamayacağı için kamaşma yaşanması ihtimali çok yüksektir. Doğru kontrast duyarlılığını yakalayabilmek için bir nesnenin parlıltı, aydınlık seviyesi arttırılırken çevrenin de paralel şekilde parlıltı düzeyi arttırılmalıdır. Bu sayede kamaşma gibi sorunların yaşanmasının önüne geçilecektir.

Bahsedilenleri matematiksel ifade olarak göstermek istersek, iki farklı alanın parlılıklarını L_a ve L_b , gözün adapte olabildiği parlılık değerini de $L_{göz}$ olarak kabul edelim (Avcil, 2019).

$$C\Delta (\%) = \frac{L_a - L_b}{L_{göz}} \quad (1.13)$$

Aydınlatma sistemlerinde önemli bir nokta olan kontrastın kullanımıyla ilgili olarak; gözün görüş açısında bulunan alanda oluşan parlılık çok yüksek olduğunda, kontrasta sebebiyet veren yüzeylerin parlaklık seviyeleri olduğundan daha fazla algılanacaktır.

Bunu çalışmalarının merkezine alan Etienne, Tesson ve Chase (1989) bilim insanları tünel aydınlatma sistemlerinde parlılık düzeylerini daha da azaltabilmek, dolayısıyla aydınlatma enerji tüketim miktarlarını azaltabilmek için cisimlerin trafik akışına göre cisim kontrast oranlarını arttırmanın daha verimli olacağını fark etmişlerdir. Bu teoriden ilham alan bilim insanları Mantes La Ville tüneline counter-beam (zıt ışın) aydınlatma sistemi tasarlamışlardır.

1.6.3. Şekil Duyarlığı

Bir nesnenin veya engelin tek bir parça halinde görülebilmesi, fark edilebilmesi gözün şekil duyarlığına ve keskinliğine bağlıdır. Cismin ayırt edici iki noktası arasındaki fark çok küçük ise göz cisme olan uzaklığına bağlı olarak bu cismi fark edemez. Şekil duyarlığı tek başına bir kavram olmamakla birlikte, cismin parlılık seviyesine, cismin bulunduğu ortamın veya düzlemin parlılık seviyesine ve cisme bakılma, odaklanma süresine göre değişiklik gösterebilir. Keskinlik ile yaş arasında ters orantı olduğu söylenebilir. İnsan yaşının artışı keskinlik üzerinde negatif etki yaratmaktadır (Avcil, 2019).

Görme keskinliğinin aydınlık şiddetine göre grafiği en yüksek değerine yaklaşık olarak 500 lux dolaylarında varmakta, yine yaklaşık olarak 10000 lux'e kadar değişmemektedir. Bahsettiğimiz en yüksek değer olan 10000 lux'ten sonra keskinlik seviyesi kamaşma sebebiyle düşmektedir (Akbulut, 2006).

1.6.4. Düzgünlük

Tünel aydınlatması üzerinden tanımlamak gerekirse, sürücünün tünel içerisinden geçtiği süreçte en iyi şartlarda görsel şartları sağlayabilmek için tünel boyunca asfalt yüzeyinde ve yan betonarme yüzeylerin en fazla yerden 2 metre yüksekliğine kadar tüm noktalarda parlıtlı dağılımında düzgün bir oransallık yakalanmalıdır (Onaygil, 1990). Ortalama parlıtlı miktarı arttıkça, diğer yüzeyler ve tünel boyunca belirli değerler arasında değişkenlik gösterecek olan asfalt parlıtlı seviyeleri arasındaki değişkenliğe müsaade edildiği görülmüştür. Ancak güvenli aralıktaki makası geniş tutabilmek için çok yüksek ortalama parlıtlı seviyelerine çıkmak enerji sarfiyatı ve maliyetler açısından verimi oldukça düşürecektir. Bundan dolayı optimizasyon sağlanarak ortalama parlıtlı değerleri güvenli aralıkta minimum düzeyde tasarlanarak düzgünlük sağlanmalı ve bahsedilen yüzeylerde kararlı bir parlıtlı dağılımıyla düzgünlük sağlanmalıdır.

Düzgünlük kavramı enine (ortalama) düzgünlük ve boyuna düzgünlük olarak ikiye ayrılmaktadır.

Enine (Ortalama) Düzgünlük (U_{ort}): Aydınlatma tasarımı yaptığımız tünelin bir tüpünün genişliğini düşünürsek bu mesafenin, yani yol genişliğinin $1/4$ 'ü mesafesinde duran göze göre ölçülen en düşük parlıtlı seviyesinin (L_{min}) tünelin aydınlatılan yüzeylerinin ortalama parlıtlısına (L_{ort}) oranıdır. Bu matematik yapılırken yolun betonarme olarak adlandırdığımız yan yüzeylerinin 2 metre ve altında kalan kısımlarının da parlıtlı düzeylerinin etkisi olduğu unutulmamalı, bu yüzeylerin parlıtlı seviyelerinin temiz ve kirli yüzey oluşuna göre değişkenlik gösterdiği bilinmelidir. Enine(ortalama) düzgünlük ortalama olarak 0.4 'ten büyük veya eşit olmalıdır.

Boyuna Düzgünlük (U_l): Şeritlerin, yol genişliğinin tam ortasında duran bir göze göre tünel boyunca bir çizgi olduğunu hayal edelim. Bu çizgi üzerindeki en düşük parlıtlı miktarının maksimum parlıtlı miktarına oranıdır. Bu değer güvenli olarak kabul edilebilmesi için 0.6 'dan büyük veya eşit olmalıdır.

KGM teknik şartnameleri ve CIE Teknik Raporu'na göre; boyuna düzgünlük sağlanabilmesi için ortalama olarak, aydınlatma sistem tasarımı yapılırken armatürler arası mesafenin, armatürün ışık saçma merkezinden asfalt yüzeyine olan mesafesinin üç katını aşmamalıdır. Bu genel kabul ortalama hesaplarda bize kolaylık sağlasa da sistem tasarımlarında armatür cinsine, asfalt cinsine ve diğer değişkenlere (malzeme teknolojisi, fren mesafeleri, yansıtıcı yan yüzey seviyeleri ve kirlilik miktarları gibi) göre farklılıklar gösterebilmektedir. Kesin doğru düzgünlük elde edebilmek için enine ve boyuna düzgünlük limit değerlerinin altında kalmayacak şekilde sistem analizi yapılarak tasarım ve armatür yerleşim planı oluşturulmalıdır.

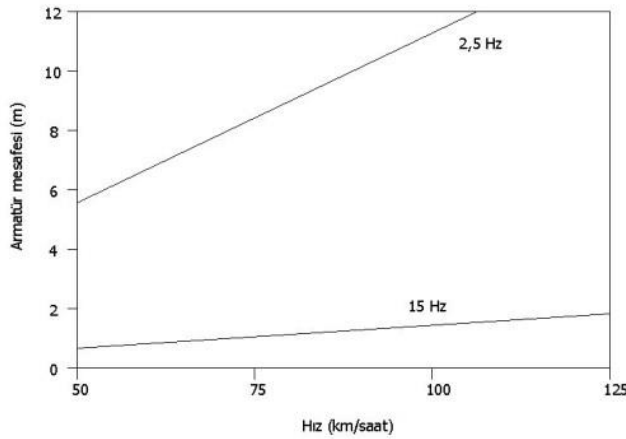
1.6.5. Titreşim (Flicker) Etkisi

Ortamdaki ışık şiddetinin, paralel olarak parıltı seviyesinin çok hızlı olarak farklılık oluşturmasıyla ortaya çıkan dalgalanmalara titreşim etkisi denir. Bu dalgalanma farklı dalga boylarındaki, farklı renklerdeki ışık kaynaklarına göre değişebilmekle birlikte sürücü tarafında rahatsızlığa sebep olacaktır. Tüm aydınlatma sistemlerinde önemli bir konu olmakla birlikte özellikle tünel aydınlatma sistemlerinde daha da kritik bir konudur. Titreşim etkisinin oluşumunda, ışık parıltı seviyelerindeki dalgalanma miktarının büyük önemi vardır fakat aynı şekilde bu dalgalanmanın gerçekleşme sıklığı (periyodu) da ayrı bir önemli parametredir. İnsan gözü tarafından değerlendirdiğimizde ciddi boyutlarda bir dalgalanma olduğunu yani yanıp sönen bir ışığı düşünelim, tekrarlama sıklığına göre bu duruma kısa süreli maruz kalındığında çok ciddi rahatsızlık yaratmasa da uzun süreli maruz kalmada ciddi rahatsızlığa sebep olacaktır. Bu rahatsızlık ışık şiddetine ve titreşim frekansı ve maruz kalma sürelerine göre göz şekil duyarlılığında ve düzgünlük parametrelerinde olumsuz etkilere sebebiyet verecek ve görüş kalitesini düşürecektir.

Jantzen (1960) ve Schreuder (1964) titreşim etkisini, saniyede oluşan titreşim sayısına göre, Walthert (1977) ise tünel uzunluğuna göre inceleyen araştırmalar yapmışlardır. Sonuç olarak; Jantzen tehlikeli titreşim frekansı aralığını 3,5 Hz – 15 Hz aralığında bulmuş ve maksimum göz rahatsızlığının 8,5 Hz dolaylarında olduğunu bulmuştur.

Schreuder ise Jantzen'e göre daha düşük yol yüzeyi parlıltısı (8 cd/m^2) ve daha kaynak parlıltısı (9000 cd/m^2) değerlerinde aynı çalışmalarını yaparak, tehlikeli titreme frekansı aralığını 2,5 Hz – 12,5 Hz arasında ve maksimum rahatsızlık seviyesini de 6,5 Hz dolaylarında belirlemiştir.

Bu iki çalışmadan ortak çıkarım olarak, armatürlerin orta noktaları arasındaki mesafenin 2,5 Hz ile 15 Hz arasına karşılık gelen değerler olmaması gerektiği ve yanıp sönme sıklığının 5 ile 10 Hz arasında olduğunda rahatsızlık derecesinin en yüksek olduğunu söyleyebiliriz (Onaygil, 1990), (C.I.E, 1990), (Bommel, 1980).



Şekil 5. Hız – Tehlikeli titreşim frekansı (Akbulut, 2006)

1.6.6. Kamaşma Etkisi

Göz adaptasyonunun etkilerinden biri olarak görülen kamaşma normal bir gözün parlıltı değerleri farklı olan ortamlar arasında hareketi sırasında oluşabilecek olan anlık görme kalitesinin bozulması olarak tanımlanabilir. Normal aydınlatma sistemleri veya açık alanları göz ardı edecek olursak, tünel aydınlatma sistemlerinde genel olarak kamaşma etkisi yaşanması pek mümkün değildir. Tünelde kamaşmanın yaşanma ihtimalinin olduğu en muhtemel alan tünelin çıkış bölgesidir. Aydınlatma sistem tasarımı olarak tünel aydınlatmalarında ışık şiddeti kademeli olarak düşürülmektedir. Bu sebeple tünel içerisindeki mevcut ışık şiddetine göre göz adaptasyonu sağlanmış olacak ve ani bir ışık şiddeti değişimi (Bir anda virajı dönerek tünelden çıktığımızı düşünebiliriz.) aydınlık adaptasyonu için yeteri süre olmadığından kamaşmaya sebep olacaktır. Ancak birçok tünelde çıkış aydınlatmasına ihtiyaç duyulmamaktadır. Çıkış bölgesinde ekstra aydınlatma maliyeti yerine, betonarme tasarım ve tünel çıkışının kademeli şekilde sürücü tarafından

daha erken görülebileceği bir yapı inşa ederek göz adaptasyonunu doğal yollarla sağlamak şeklinde gerçekteşebilmektedir.

Teorik olarak kamaşma, armatür ışık dağılım eğrileri ve parıltı seviyelerine, sürücü görüş alanında bulunan armatürlerin gözle görünen yüzeylerine, armatür yerleşim planına, armatür sayısına ve görüş alanı içindeki en yüksek parıltı değerlerine bağlıdır diyebiliriz (Sucugil, 2000).



İKİNCİ BÖLÜM

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Literatür Taraması ve Örnekler

Enerji verimliliği, birim enerjinin doğru yöntem ve materyal kullanımı ile daha çok hizmet ve ürüne dönüştürülmesidir. Aynı koşullar altında kaliteden ödün vermeden enerji tüketiminin azaltılması, enerji kaynaklarının en etkin şekilde kullanılması anlamına gelmektedir. Enerji maliyetlerinin ve enerjiye olan ihtiyacın artması, enerji tasarrufunu mecburi hale getirmiştir ve enerji verimliliği ülkenin enerji politikalarında mühim bir yere sahip olmuştur. Enerji verimliliğinin artması, ek yeni enerji kaynaklarının kullanılması için yapılacak yatırımlardan daha ekonomiktir. (Perdahacı, vd., 2011)

Cebeci S.E, enerji tüketimini incelediğimizde dünya genelinde tüketilen enerjinin %19'u aydınlatma için kullanılmaktadır (bu oran ülkemizde de %20 dolaylarındadır). Geri kalan %80'i profesyonel alanlar dediğimiz, endüstriyel tesisler, ofisler, mağazalar, park ve yollar gibi alanlarda tüketilmektedir. (Cebeci, 2009)

Aydınlatma sistemlerinde enerji tasarrufu, aydınlatmanın konforunu düşürmeden ve mevcut şartların en iyi şekilde kullanıldığı haliyle yapılmalıdır. İyi bir aydınlatma, verimliliğin daha yüksek olduğu aydınlatma materyalleriyle sağlanacağı için, aynı kalitede aydınlatmanın daha düşük enerji tüketimiyle sağlanması mümkündür. Verimsiz olarak görülen veya kullanılmayan alanların aydınlatılması veya ilgili alanların yetersiz aydınlatılması yahut gereğinden fazla aydınlatma yapılarak hem kamaşma gibi görsel hem de tüketim açısından daha verimsiz uygulamalara başvurulmamalıdır. (Gençoğlu, Özbay, 2007)

Uygun fotometrik özelliklere sahip armatürlerin içinde etkin ışık kaynakları kullanılarak hem yatırım hem işletmede büyük tasarruf sağlanabilir. Akkor lamba, kompakt flüoresan lamba ile değiştirildiğinde %80 dolaylarında aydınlatma maliyetleri azaltılmış olacaktır. Örneğin; akkor flamanlı 100 W'lık normal bir ampulle bir ailenin aylık tüketimi 100 kWh'e ulaşırken aynı ışık akısını veren kompakt flüoresan ampul kullanıldığında aylık tüketim 20 kWh'a kadar düşebilmektedir. Türkiye'de toplam elektrik enerjisi tüketiminin

yaklaşık yüzde 25'inin aydınlatma amaçlı olarak kullanıldığı düşünüldüğünde bu küçük değişiklik, Türkiye genelinde ayda 1.120.000.000 kWh'lık bir tasarruf anlamına gelir. (Bozkurt, 2009)

Günümüz teknolojisiyle üretilerek geliştirilecek olan LED tünel aydınlatma armatürlerinin bakım operasyonu daha kolay, birim zamanda enerji tüketimleri daha düşük olması sebebiyle eski tasarım olarak kalan geleneksel ve tüketim miktarları çok daha yüksek seviyelerde olan armatürlere ciddi bir alternatif olmaktadır. Hem yeni teknoloji olan hem de otomatik kontrol sistemleriyle merkezi bir scada'dan kontrol edilebilen sistemler geliştirilmelidir. Bu şekilde hem trafik güvenliği yüksek oranda sağlanmış olacak hem de enerji tüketim miktarları azaltılarak verimliliği daha yüksek aydınlatma sistemleri tasarlanmış olacaktır. (Çelebi, 2014)

LED'lerin aydınlatmada kullanımı her geçen gün artmaktadır. Beyaz ışığın LED'lerde kullanımının başlamasıyla birlikte iç mekân aydınlatmasında, yol aydınlatmasında kullanılmaya başlamıştır. İlk yatırım maliyetinin LED'lerde yüksek olmasına rağmen etkinlik faktörlerinin 90- 100 Lümen/Watt, ekonomik ömürlerinin 35000-50000 saat gibi diğer lambalara kıyasla çok yüksek olması nedeniyle tercih edilmektedir. (Çelebi, 2014)

Enerji Verimliliği Kanunu'nun doğru ve etkin bir şekilde uygulanabilmesi ancak gerekli yönetmelik, standart ve şartnamelerin uygun düzenlenmeleri ile mümkün olabilecektir. Lamba seçimi yapılır iken, etkinlik faktörünün yüksek verimlilik sınıflandırmasına sahip olmasına dikkat edilmelidir. LED ile yapılacak aydınlatma sistemlerinde % 75 ile 93 arasında bir enerji tasarrufu sağlamak mümkün hale gelmiştir. LED teknolojisi iç mekân ve dış mekân aydınlatma uygulamalarında kullanıcı ve tasarımcılara sayısız çözümler sunmaktadır. (Perdahcı, Hanlı, 2009)

Tünel aydınlatma sistem tasarımlarında, ilgili tünelin tasarımı, armatür seçimleri, yerleşim planları önemli olduğu kadar işletmesinin doğru yapılması da çok kritik bir öneme sahiptir. Farklı tip armatürlerin bakım faktörlerinin değerlendirildiği bir çalışma sonucunda LED armatürlerin bakım maliyetlerinde %40 dolaylarında tasarruf sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. (Nail, t.y.)

Tünel aydınlatma sistemleri üzerine yapılan başka bir araştırmada, tünel giriş bölgesinden fren mesafesi kadar uzağa parıltı ölçer yerleştirilerek dış ortam parıltı seviyesi ölçülmüş ve tünel aydınlatması kademeli olarak armatürlerin yakılıp söndürülmesi ile sağlanarak hem enerji tüketim maliyetlerinin düşürüleceği hem de bakım maliyetlerinin azaltılmış olacağı gösterilmiştir. (Akbulut, 2006)

İstanbul Halit Ulukurt tüneline yapılan bir çalışmada ise, tünelde şu anda kullanılan sodyum buharlı armatürler yerine LED armatürler olması halinde yıllık enerji tüketiminin %45,5 oranında azalacağı görülmüştür. (Çelebi, 2014)

Tünel aydınlatma tasarımı yapılırken kritik uzunluktan daha uzun tünellerde mutlaka gece ve gündüz aydınlatması arasında ayırım yapılmalıdır. Her tünelin kendi özelinde özgün ihtiyaçları olduğu unutulmamalı, bu ihtiyaç değişkenler ve matematik hesapları yapılırken özellikle geceleri gereksiz enerji tüketimine sebep olmamak için mutlaka gece ve gündüzü ayıracak şekilde aydınlatma tasarımı yapılmalıdır. Ayrıca güvenlik açısından da gece aydınlatmasının ciddi önemi olduğu unutulmamalıdır. Gece şartları düşünüldüğünde dış bölgedeki parıltı seviyesi oldukça düşük olacağından, tünel eşik bölgesinde gece şartlarına uygun bir aydınlatma tasarımı yapılmazsa sürücüde gözün aydınlık adaptasyonu sürecinde kamaşma etkisi yaratılabilir. Bu durum ciddi tehlikelere sebep olabilir. (Sucugil, 2000)

Sürekli aydınlatma ihtiyacı olan tünellerde, normal yol aydınlatmalarına göre 3 kat kadar fazla yıpranma ve performans kaybı görülmektedir. Bu veriyle tünel aydınlatmasındaki enerji tüketim giderlerinin yol aydınlatmalarına göre ne kadar ciddi bir fark yarattığını görebiliyoruz. Benzer şekilde yol aydınlatmalarının gün doğum-batımına göre çalıştığını ancak tünel aydınlatma sistemlerinin sürekli olarak aktif olduğunu düşündüğümüzde bu işletme giderlerinin ülkemiz üzerine ne denli yük getirdiğini daha net görebiliriz. Bu nedenle enerji optimizasyonu sağlanabilmiş, verimli aydınlatma sistemleriyle dizayn edilmiş tünellerin ne kadar önemli olduğu görülmektedir. (Cengiz, 2019)

Yapılan bir çalışmada İtalyan yarımadası üzerinde A24 otoyolu üzerinde bulunan Genzano Tüneli örneğinde farklı aydınlatma sistemi ve asfalt tipleri için dört farklı tip aydınlatma sistem tasarımı yapılmış ve hem yatırım hem de işletme ve bakım maliyetleri

olarak bu dört tip aydınlatma karşılaştırılmıştır. Bu çalışmayla ilgili olarak dört farklı durum aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Tablo 3

Genzano tüneli aydınlatma tasarımları

	Aydınlatma Sistemi	Asfalt Tipi
Tasarım 1	HPS	Geleneksel
Tasarım 2	HPS + LED	Geleneksel
Tasarım 3	HPS	Özel
Tasarım 4	HPS + LED	Özel

Özet olarak aydınlatma tasarımlarında LED teknolojisinin sistemlere dahil edildiği ve asfalt tipinin değiştirildiği görülmüştür. Asfalt yapısının değişimiyle geleneksel tasarımlarda %7 olan yansıtıcılık katsayısı özel tip kullanılarak %14 seviyelerine çekilmiştir. Hem LED sistemi kullanarak enerji tüketimlerinin ne kadar düşürülebileceği, hem de enerji ihtiyacını düşürebilmek için tünel içi doğal bir yapı olan asfaltın yansıtıcılık katsayısı yükseltilerek optimizasyon çalışması yapılmıştır. Tüm bu çalışmaların sonucunda yatırım, operasyon, enerji tüketimleri ve bakım giderleri kıyaslandığında Tasarım-4'ün en verimli uygulama olacağı görülmüştür. (Salata, 2015)

Bu tez çalışmasındaki temel motivasyonumuz tünel aydınlatması alanında yapılan çalışmaların detayına girildiğinde bir çok çalışmanın rehber ve teorik bilgilendirme temellerinde olup deneysel özellik gösteren çalışmaların sayısının oldukça kısıtlı olmasıdır. Bu noktada çalışmamızın özgünlüğü ve deneyselliği ile gelecek çalışmalara da destek olabilecek nitelikte olduğu düşünülmektedir. Bu çalışmaya konu olan Belkahve Tüneli 2017 yılında hizmete girmiş olup güncel bir tünel olarak nitelendirilmektedir. İlgili tünelde uygulanmış olan aydınlatma sistem dizaynı, kullanılan armatür tipleri ve aydınlatma projeleri Karayolları Genel Müdürlüğü ve Kamu Özel Sektör Ortaklığı Bursa Bölge Müdürlüğü yetkililerinin desteğiyle tarafımızla paylaşılmış olup uygulanmış ve halen kullanılmaya devam eden aydınlatma sistemini analiz etme imkanı sağlamıştır. Kullanımda olan aydınlatma sisteminin analizine ek, alternatif olarak LED armatür kullanımıyla alternatif bir aydınlatma sistem tasarımı yapılmıştır. LED sistem projelendirilmesi ve simüle

edilmesinde endüstriyel destek alınmış olup her iki sistem birbiriyle kıyaslanmıştır. Kıyaslama parametrelerimiz yatırım, işletme ve bakım maliyetleri şeklinde olmuştur. Buna ek olarak çevresel bakışla, armatür tiplerinin karbon emisyonları kıyaslanmış ve LED sistem tasarımının yatırım maliyetleri yüksek olmasına rağmen tüm diğer parametrelerde çok daha verimli olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar kısmında ilgili kıyaslamalar detaylı verilmiş olup LED aydınlatma armatür kullanımının sağladığı avantajlar üzerinde de durulmuştur.

Gün geçtikçe gelişen teknoloji, bilim dünyasında yaşanan gelişmeler, küresel enerji krizleri ve çevresel faktörler de göz önünde bulundurularak ilerleyen dönemler için uygulanabilirliği olabilen; örneğin yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının tünel aydınlatma sistemlerine entegrasyonu gibi alternatif öneriler verilmiştir.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmamızın merkezinde ana materyal olarak Belkahve Tüneli bulunmaktadır. Belkahve Tüneli mevcut aydınlatma sisteminde Yüksek Basıncılı Sodyum Buharlı (HPS) armatür kullanılmış olup tasarım detayları ayrıntılı analiz edilmiştir. Ek olarak alternatif aydınlatma sistem tasarımı olarak LED sistem tasarımı program yardımıyla simülasyon yapılmış ve veriler karşılaştırılmıştır.

3.1. Relux Tunnel Uygulaması

Relux Tunnel uygulaması mühendislik uygulamalarında neredeyse herkes tarafından bilinen AutoCAD, MATLAB gibi bir tasarım programıdır. Tahmin edileceği üzere aydınlatma tasarımlarında oluşturmak istediğimiz aydınlatma sistemini test etme ve projelendirme süreçlerinde kullanıcıya ciddi avantajlar sağlayan bir programdır. Tünel aydınlatma sistemlerinin tasarım ve simülasyonunda endüstride en çok tercih edilen programlardan biridir. Otomatik pozisyonlama, tünel şablonunun oluşturulması, tünel geometrisinin tasarlanması ve üç boyutlu görsel desteği, tünel değişken parametreleri olan; uzunluk, genişlik, şerit sayıları, yaya yolu detayları, asfalt ve betonarme yüzeylerin yansıtıcılık katsayıları, hız sınırları, durma mesafesi, yol +/- eğimi gibi parametrelerin girilmesiyle istenen sistem çok hızlı şekilde planlanabilmektedir. Akabinde detaylı aydınlatma yoğunlukları, farklı parametrelerdeki grafik yorumlamaları ve tasarlamak istediğimiz aydınlatma sisteminin verimliliği detaylı döküm olarak kullanıcıya sunulmaktadır.

Analiz raporları noktasında ise uygulamanın aktif kütüphanesinde uluslararası standartlar (C.I.E.) kullanıma hazırdır. Ancak buna ek olarak, yerel/bölgesel standartlar var ise veya kullanıcı farklı bir tasarımın simülasyonunu yapmak istiyorsa ilgili hesaplama formüllerinde kullanıcı tarafından gerekli değişiklikler yapılabilmekte veya yeni formüller yazılabilmektedir.

Buna ek olarak yine uygulamanın kütüphanesinde hazır olacak şekilde, yerel veya çevrimiçi veri tabanından armatürler seçilebilir, yeni armatür veri tabanına eklenebilir ve otomatik olarak çekilebilir durumdadır. Tasarıma konu istediğimiz armatürün kütüphanede

bulunmadığı durumlarda ilgili armatür verileri sisteme işlenerek kütüphaneye tanımlanabilmektedir.

3.2. Belkahve Tüneli

Projeye esas inceleme tüneli olarak seçmiş olduğumuz yapı İstanbul-Bursa-İzmir otoyolu (Otoyol 5) kapsamında, İzmir'in Bornova ve Kemalpaşa ilçeleri arasında bulunan bir tüneldir.

- Uzunluk : 1.653 m (5.423 ft)
- Yükseklik : 6 m (20 ft)
- Genişlik : 2 x 12 m (39 ft)
- Konum : İzmir, Türkiye
- Koordinatlar : 38°27'47"K 27°19'18"D
- Açılış : 8 Mart 2017

Uzunluğu sebebiyle sürekli aydınlatma ihtiyacı olması, KGM yetkililerinin tavsiye tünel niteliğinde görüş bildirmesi ve yeni hizmete girmiş bir yapı olması sebebiyle proje, teknik şartname, proje uygulama firmalarına ulaşılabilirlik gibi sebeplerden dolayı inceleme/çalışma tüneli olarak tercih edilmiştir.



Şekil 6. Belkahve Tüneli ("*Belkahve Tüneli Akıllı Ulaşım ve Network Sistemi*", 2023)

3.3. Aydınlatma Armatürleri Teknik Bilgi

Belkahve Tüneli aydınlatma sistem tasarımında kullanılmakta olan HPS armatürleri ve alternatif sistem tasarımı olarak düşünülen LED aydınlatma armatürlerinin teknik özellikleri aşağıdaki alt başlıklarda verilmiştir.

3.3.1. HPS Aydınlatma Armatürleri

Belkahve Tüneli'nde uygulanmış aydınlatma tasarım projesinde bulunan ve günümüzde kullanılmaya devam eden armatürler ve detayları aşağıda verilmiştir.

- **VIALOX NAV-T 150W SUPER 4Y Armatür 738 Adet**



Şekil 7. 150W HPS aydınlatma armatürü (*“inventronics”, 2023*)

Ürün Datasheet Verileri

○ Ateşleme Gerilimi	: 3.3/5.0 kVp
○ Nominal Akım	: 1.8 A
○ Ortalama Anma LLMF 2000 Saat	: 0.98
○ Ortalama Anma LLMF 4000 Saat	: 0.97
○ Ortalama Anma LLMF 6000 Saat	: 0.96
○ Ortalama Anma LLMF 8000 Saat	: 0.95
○ Ortalama Anma LLMF 12000 Saat	: 0.94
○ Ortalama Anma LLMF 16000 Saat	: 0.94

- Ortalama Anma LLMF 20000 Saat : 0.94
- Işık Akısı : 17500 lm
- Işık Merkezi Uzunluğu : 132 mm
- Ürün Ağırlığı : 115 g
- Ürün Uzunluğu : 211 mm
- Maksimum İzin Verilen Çalışma Sıcaklığı : 210 °C
- Yaşam Ömürleri : 36000 – 24000 Saat

- **VIALOX NAV-T 250W SUPER 4Y Armatür 32 Adet**



Şekil 8. 250W HPS aydınlatma armatürü (*“inventronics”, 2023*)

Ürün Datasheet Verileri

- Ateşleme Gerilimi : 3.3/5.0 kVp
- Nominal Akım : 2.95 A
- Ortalama Anma LLMF 2000 Saat : 0.98
- Ortalama Anma LLMF 4000 Saat : 0.97
- Ortalama Anma LLMF 6000 Saat : 0.96
- Ortalama Anma LLMF 8000 Saat : 0.95
- Ortalama Anma LLMF 12000 Saat : 0.94
- Ortalama Anma LLMF 16000 Saat : 0.94
- Ortalama Anma LLMF 20000 Saat : 0.94
- Işık Akısı : 33200 lm
- Işık Merkezi Uzunluğu : 158 mm
- Ürün Ağırlığı : 135 g

- Ürün Uzunluğu : 257 mm
- Maksimum İzin Verilen Çalışma Sıcaklığı : 250 °C
- Yaşam Ömürleri : 36000 – 24000 Saat

- **VIALOX NAV-T 400W SUPER 4Y Armatür 416 Adet**



Şekil 9. 400W HPS aydınlatma armatürü (*“inventronics”*, 2023)

Ürün Datasheet Verileri

- Ateşleme Gerilimi : 3.3/5.0 kVp
- Nominal Akım : 4.42 A
- Ortalama Anma LLMF 2000 Saat : 0.98
- Ortalama Anma LLMF 4000 Saat : 0.97
- Ortalama Anma LLMF 6000 Saat : 0.96
- Ortalama Anma LLMF 8000 Saat : 0.95
- Ortalama Anma LLMF 12000 Saat : 0.94
- Ortalama Anma LLMF 16000 Saat : 0.94
- Ortalama Anma LLMF 20000 Saat : 0.94
- Işık Akısı : 56500 lm
- Işık Merkezi Uzunluğu : 175 mm
- Ürün Ağırlığı : 150 g

- Ürün Uzunluğu : 285 mm
- Maksimum İzin Verilen Çalışma Sıcaklığı : 250 °C
- Yaşam Ömürleri : 36000 – 24000 Saat

3.3.2 LED Aydınlatma Armatürleri

Belkahve Tüneli'ndeki mevcut aydınlatma tasarımına alternatif aydınlatma sistemi olarak tasarlanmış olan LED armatür teknik verileri aşağıdaki gibidir.

- **GOLEDO-T 40 LED Armatür 40 Adet**

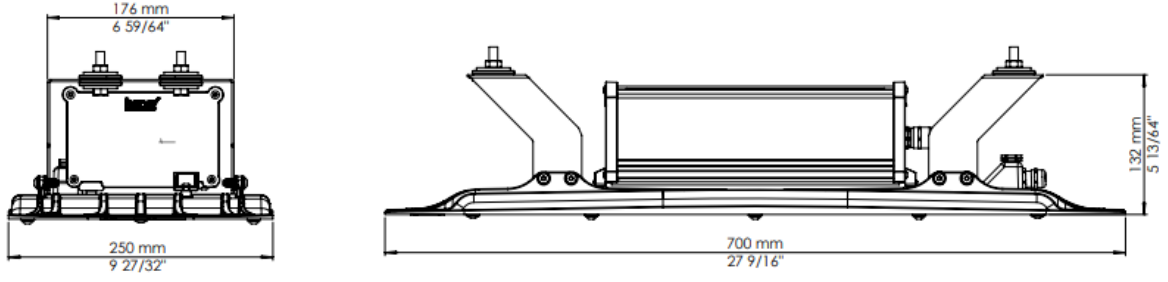


Şekil 10. 87W LED aydınlatma armatürü (“Heperlighting Goledo-T”, 2023)

Ürün Datasheet Verileri

- Işık Dağılımı : [T-ASYM-A], [T-CB-A], [T-SYM-A]
- Nominal LED Işık Akısı : 6987 – 13760 lm
- Nominal LED Gücü : 57 W (500 mA) – 80 W (700 mA)
- Ölçülen Armatür Işık Akısı : 5579 – 11696 lm
- Ölçülen Armatür Gücü : 64 – 90 W
- Renk Sıcaklığı : 2200 K CRI 70, 3000 K CRI 70, 4000 K CRI 70
- BUG Derecelendirmesi : B3-U0-G3, B4-U0-G3
- Ömür L90B50 (Saat) : >102, 000, >100

Ürün Teknik Çizimi



Şekil 11. 87W LED armatür teknik çizim (“Heperlighting Goledo-T”, 2023)

- **GOLEDO-T 64 LED Armatür 531 Adet**

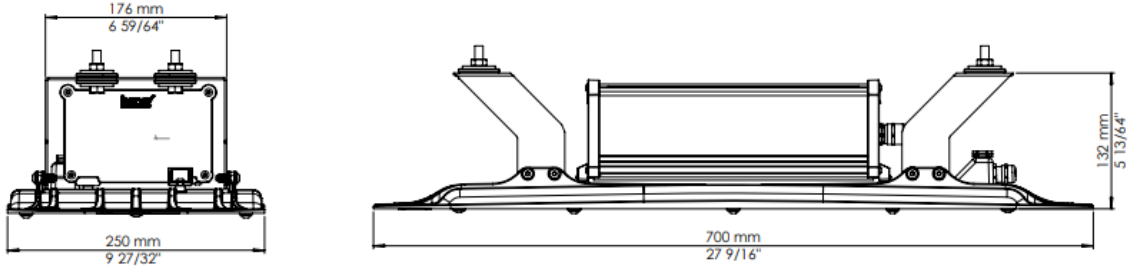


Şekil 12. 110W LED aydınlatma armatürü (“Heperlighting Goledo-T”, 2023)

Ürün Datasheet Verileri

- Işık Dağılımı : [T-ASYM-A], [T-CB-A], [T-SYM-A]
- Nominal LED Işık Akısı : 11562 – 22015 lm
- Nominal LED Gücü : 91 W (500 mA) – 128 W (700 mA)
- Ölçülen Armatür Işık Akısı : 8927 – 18712 lm
- Ölçülen Armatür Gücü : 97 – 136 W
- Renk Sıcaklığı : 2200 K CRI 70, 3000 K CRI 70, 4000 K CRI 70
- BUG Derecelendirmesi : B3-U0-G3, B5-U0-G4
- Ömür L90B50 (Saat) : >102, 000, >100

Ürün Teknik Çizimi



Şekil 13. 110W LED armatür teknik çizim (“Heperlighting Goledo-T”, 2023)

- **GOLEDO-T 80 LED Armatür 28 Adet**

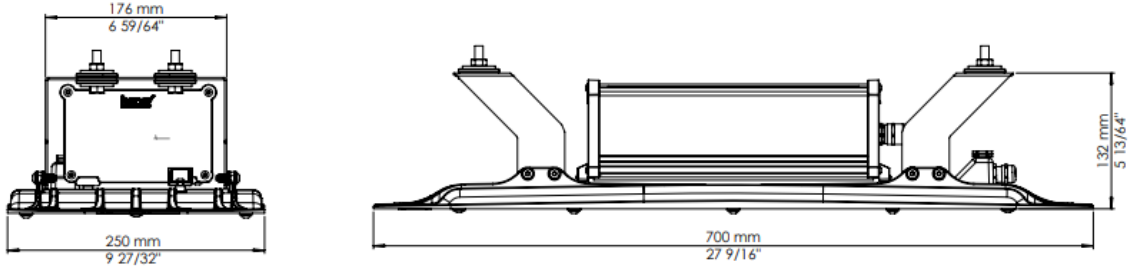


Şekil 14. 174W LED aydınlatma armatürü (“Heperlighting Goledo-T”, 2023)

Ürün Datasheet Verileri

- Işık Dağılımı : [T-ASYM-A], [T-CB-A], [T-SYM-A]
- Nominal LED Işık Akısı : 14333 – 27520 lm
- Nominal LED Gücü : 114 W (500 mA) – 160 W (700 mA)
- Ölçülen Armatür Işık Akısı : 11132 – 23392 lm
- Ölçülen Armatür Gücü : 121 – 170 W
- Renk Sıcaklığı : 2200 K CRI 70, 3000 K CRI 70, 4000 K CRI 70
- BUG Derecelendirmesi : B4-U0-G4, B5-U0-G4
- Ömür L90B50 (Saat) : >102, 000, >100

Ürün Teknik Çizimi



Şekil 15. 174W LED armatür teknik çizim (“Heperlighting Goledo-T”, 2023)

- **GOLEDO-T 160 LED Armatür 264 Adet**

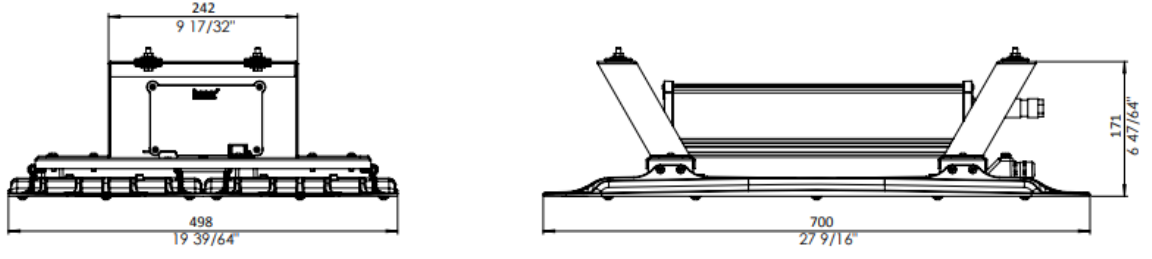


Şekil 16. 348W LED aydınlatma armatürü (“Heperlighting Goledo-T”, 2023)

Ürün Datasheet Verileri

- Işık Dağılımı : [T-ASYM-A], [T-CB-A], [T-SYM-A]
- Nominal LED Işık Akısı : 51200 – 55050 lm
- Nominal LED Gücü : 320 W (700 mA)
- Ölçülen Armatür Işık Akısı : 11132 – 23392 lm
- Ölçülen Armatür Gücü : 340 W
- Renk Sıcaklığı : 3000 K CRI 70, 4000 K CRI 70
- Ömür L90B50 (Saat) : >102, 000

Ürün Teknik Çizimi



Şekil 17. 348W LED armatür teknik çizim (“*Heperlighting Goledo-T*”, 2023)



DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

ARAŞTIRMA BULGULARI

Çalışmamızın bu bölümünde bu başlık altında bulunan parametreler CIE (Uluslararası Aydınlatma Komisyonu) Tünel Aydınlatma Sistemleri Teknik Raporu ve Karayolları Genel Müdürlüğü teknik şartnamelerince belirlenen temel parametreler “Relux Tunnel” uygulamasına girilerek sistem tasarımları yapılmış olup, ilgili program ve tasarıma ait görüntüler paylaşılmıştır. İlk olarak mevcut tünelimizde kullanılmış olan HPS (Yüksek Basıncılı Sodyum Buharlı Aydınlatma Armatürü) tip armatürlere göre aydınlatma sistemi analiz raporu şeklinde inceleme yapılacaktır. Akabinde alternatif aydınlatma sistemi olarak LED armatür tercih edilecek ve her iki sistem arasında kıyaslama yapılacaktır.

4.1. Belkahve Tüneli HPS Armatür Aydınlatma Tasarımı

4.1.1. Kapsam

Bu aydınlatma sistem analizi, Belkahve Tüneli'nin, Karayolları Genel Müdürlüğü şartnameleri ve Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (C.I.E.) Teknik Raporu standartları esas alınarak yapılmıştır. Aydınlatma sistemlerinin tanımları için aşağıda belirtilen standart ve tanımlar esas alınmıştır.

4.1.2. Genel

Güvenli trafik akışı için tünellerin aydınlatılması gerekliliği, Avrupa parlamentosu 29 Nisan 2004 tarihli, “Trans-Avrupa Karayolu Ağındaki tüneller için asgari seviyede olması gereken güvenlik şartları” isimli 2004/54/EC yönergesinde yer almaktadır.

Tünel aydınlatma sistemleri, tünel içerisinde güvenli trafik akışının sağlanabilmesi için gerekli en önemli elektromekanik alt sistemlerden biri durumundadır. Tünel aydınlatma sisteminin tünel bölümlerinde gerekli aydınlatma seviyelerini, aydınlatma homojenliğini ve nesnelerin algılanabilmesi için gerekli kontrastı oluşturacak şekilde olması gerekmektedir. Bütün bu parametrelerin aynı anda sağlanması gerekirken ışık kaynaklarının kamaşmaya neden olmaması esas kabul edilmektedir.

Artan enerji maliyetleri göz önüne alınarak, sürekli devrede olan tünel aydınlatma sistemlerinin enerji verimliliklerinin yüksek olması öngörülmektedir. Bu nedenle, aydınlatma tasarımında teknolojinin sağladığı özellikleri içeren, modern aydınlatma gereçleri tavsiye edilmektedir.

Tünel bakım zorlukları ve yüksek maliyetleri en az bakım gerektirecek tesis özelliklerine dikkat edilmesini gerektirmektedir. Armatürlerin tesis özellikleri, yükseklikleri ve montaj şekillerinin yanı sıra armatürlerin kolay açılıp kapanabilmeleri, toza ve suya karşı kirlenme sınıflarının yüksekliği bakım işletme kolaylıkları sağlayabilmektedir.

4.1.3. Asgari Güvenlik Gereksinimleri

Güvenli trafik akışı için gerekli asgari şartlar direktifte belirtilmiştir. Aydınlatma sistemleri her şartta gerekli görülmüş ve tünellerin ayrılmaz parçası olarak tanımlanmıştır. Direktif çerçevesinde üç farklı aydınlatma sisteminin tanımı yapılmaktadır; (Türkiye Cumhuriyeti Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Şartnamesi)

Normal Aydınlatma Sistemi

Gece ve gündüz şartlarında, tünel girişi ve tünel içinde sürücülerin yolu ve yol üzerinde yer alan nesnelere algılayabilecek şekilde görebilmeleri için gerekli aydınlatma sistemidir. Daha önce de belirtildiği üzere, gece ve gündüz olacak şekilde değişken bir aydınlatma sistemidir. Gündüz ve gecenin getireceği ihtiyaçlar karşılığında tanımlanmış olan matematiksel ifadeler ile sınırlandırılmış olan dış ortam parlaklığı seviyesine göre eşik bölgesindeki minimum aydınlatma ihtiyacı hesaplanacaktır. Buna paralel Uluslararası Aydınlatma Komisyonu ve TSE ilgili aydınlatma yasal zorunluluklarına ek olarak ilgili proje teknik şartnameleri doğrultusunda eşik, geçiş ve iç bölgeler için gerekli parlaklık değerleri hesaplanarak buna uygun armatür seçimi yapılacaktır. Bu armatür seçimi esnasında yatırım, işletme ve bakım maliyetleri de mutlaka göz önünde bulundurularak armatür seçimi yapılmalıdır. Normal aydınlatma sisteminden kasıt tüm parametre seçimlerinin ve güvenlik katsayılarının dahil edilerek yapıldığı tasarımdır. Normal olmayan durum örneği olarak; yağışlı veya sisli havalarda görüş mesafesinin düşmesi ve yol asfalt yüzeyindeki

sürtünmenin azalması kaynaklı güvenlik gerekçesiyle azami hız sınırının aşağıya çekildiği görülecektir. Bunun temel sebebi olarak oluşabilecek herhangi bir olumsuzlukta durma mesafesini düşürerek tünel giriş, çıkış ve iç bölgelerinde herhangi bir sorun yaşanmasını engellemektir.

Güvenlik Aydınlatma Sistemi

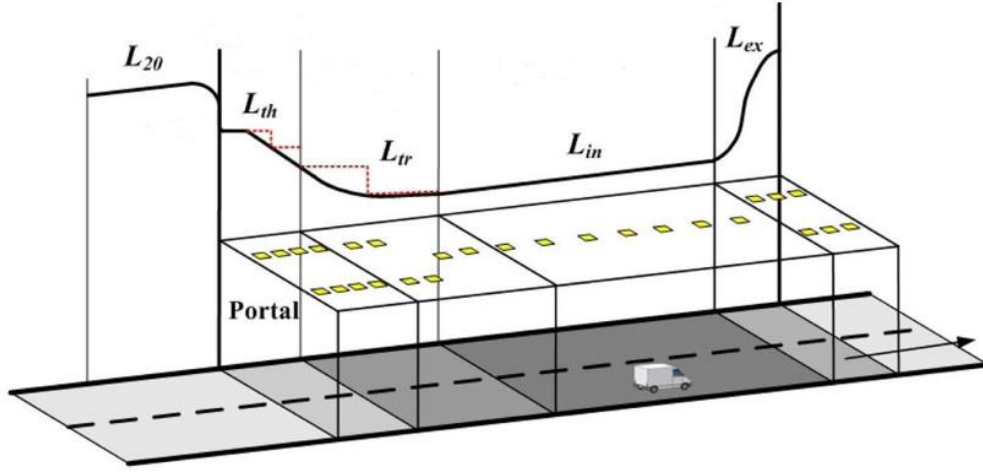
Şebeke enerjisinin kesilmesi durumunda, tünel içerisinde bulunan araç ve yayaların güvenli bir şekilde tünel dışına çıkabilmeleri için gerekli asgari aydınlık düzeyini sağlayan aydınlatma sistemidir.

Acil Tahliye Aydınlatma Sistemi

Acil durumlarda, tünel içerisinde bulunan insanların, yaya olarak güvenli bir şekilde tünel dışına çıkabilmeleri için gerekli asgari aydınlık düzeyini ve yönlendirmeyi sağlayan aydınlatma sistemidir. Bu projedeki aydınlatma tasarımında, her üç aydınlatma sistemi de öngörülmuş, tesis şekli ve işletme şartları aşağıda ilgili aydınlatma sistemi başlığında detaylı olarak verilmiştir.

4.1.4. Normal Aydınlatma Sistemi

Normal aydınlatma sistemi, yol için tanımlanmış trafik hızında ilerleyen sürücünün güvenli bir şekilde tünele girebilmesini ve tünel içerisinde güvenli bir şekilde yol alması ve tünel dışına çıkabilmesi için gerekli aydınlatma sistemleridir. Normal aydınlatma sistemi; yaklaşım, eşik bölgesi, geçiş bölgesi, iç bölge, çıkış bölgesi ve uzaklaşma bölgesi olmak üzere altı farklı bölge için farklı özellikler taşımaktadır. Ayrıca aydınlatma sistemlerinde kullanılması düşünülen bütün ekipmanlar ilgili yapının bulunduğu coğrafya ve o bölgenin şartlarına ve ayrıca işletme şartlarına uygun olarak seçilecektir. (Türkiye Cumhuriyeti Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Şartnamesi)



Şekil 18. Normal aydınlatma sistemi için tünel bölümleri (*Karayolları Tünelleri ve Bağlantı Yolları Elektrik, Elektronik, Mekanik ve Çeşitli Kontrol Sistemleri Teknik Şartnamesi*)

Şekil 18’de görüldüğü gibi tünel aydınlatması kademeli olarak yapılmaktadır. İç bölümlere doğru girdikçe parlaklık seviyesi düşürülmektedir.

- L20 : Tünel Yaklaşım Bölgesi
- Lth : Eşik Bölgesi
- Ltr : Geçiş Bölgesi
- Lin : İç Bölge
- Lex : Çıkış Bölgesi

Şekil 18’de sembolize edildiği gibi tünel eşik bölgesi olarak belirtilmiş olan bölgede armatür yoğunluğunun ve parlaklık seviyesinin yüksek olduğu anlatılmak istenmiştir. Bunun sebebi olarak yaklaşım bölgesindeki parlaklık seviyesine yakın bir değer yakalayarak tünel girişinde sürücünün kara delik etkisi ve herhangi bir problem yaşamaması hedeflenmektedir. Eşik bölgesi itibariyle aydınlatma sistemi göz adaptasyonunu destekleyecek şekilde kademeli olarak azaltılır, iç bölgede minimum seviyesine ulaşmıştır. Çıkış bölgesi itibariyle göz kamaşmasına karşı parlaklık seviyesi yükseltilir ve sürücü tünel geçişini güvenli şekilde tamamlamış olur.

Yaklaşım ve Uzaklaşma Bölgesi Aydınlatması

Yaklaşım aydınlatmasında, gece şartlarında, standart yol yapısından farklı bir kesime yaklaşılmakta olduğunun bilgisi verilmekte, tünele giriş için hazırlık şartları oluşturulmaktadır. Aynı sebeplerle tüneli terk eden sürücülerin ortama uyumları için tünel çıkışlarında da aydınlatma yapılmaktadır.

Yaklaşım yollarının, mevcut bölgede hız sınırlarına göre belirlenmiş durma mesafelerine göre aydınlatma eşik değerleri esas alınarak; tünel girişine asgari 330 metrelik mesafede, yolun tek tarafına, 45 metre ara mesafe ile tesis edilecek 15m boyundaki aydınlatma direkleri ile aydınlatılması gerekmektedir. Direkler 3 metre uzunluğunda konsola sahip olacak ve üzerindeki armatürler 400W gücünde sodyum buharlı lambalı olacaktır. Yol yüzeyi parlaklığı seviyesi asgari 2.0 cd/m², parlaklık düzgünlüğü 0.4, boyuna düzgünlük 0.7 olacak ve en büyük görebilme eşik değeri artışı %10 ile sınırlandırılmış olacaktır.

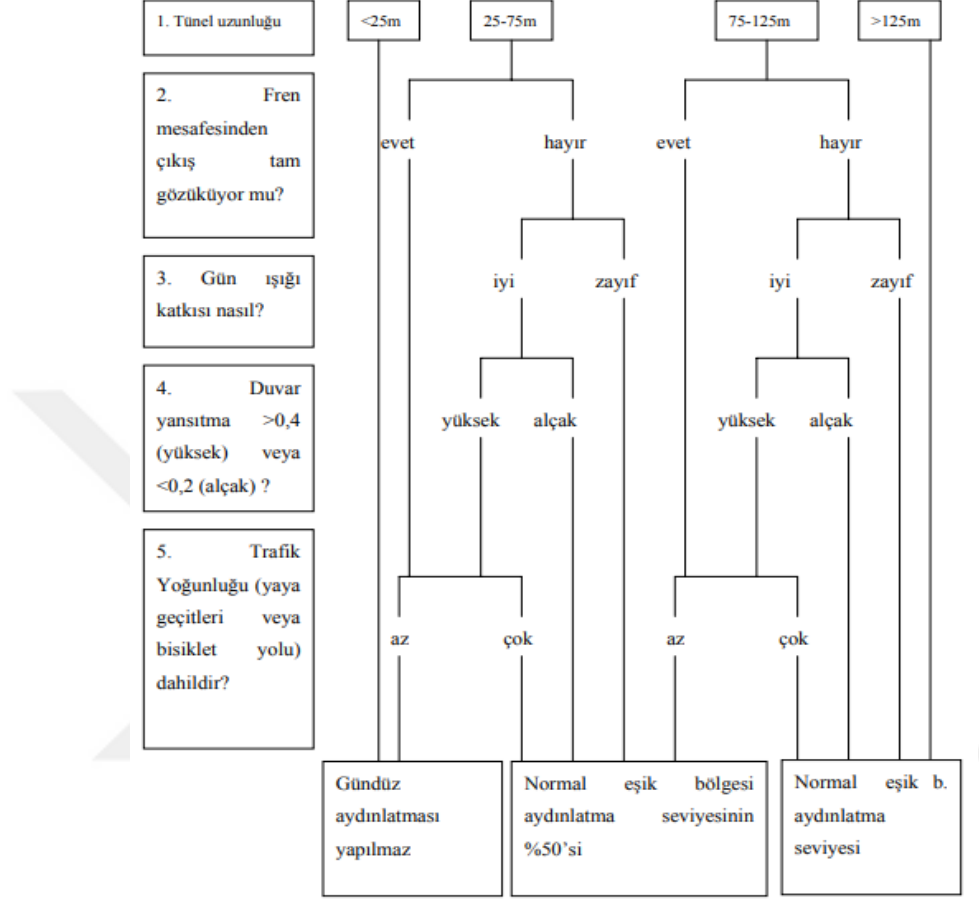
Yukarıda belirlenen yaklaşım yolu aydınlatma sınırları, tünel giriş ve çıkışlarındaki yolların durumuna göre ve aydınlatılmış alanlar arasındaki mesafelere bağlı olarak uzatılabilmektedir.

Eşik Bölgesi ve Geçiş Bölgesi Aydınlatması

Özellikle güneşli bir günde açık bir yolda ilerleyen sürücü için yeterince aydınlatılmamış bir tünel girişi 'kara delik' etkisi yaratır. Aydınlik bir ortamdan karanlık tünele giren sürücünün görme koşullarının bozulmaması için, tünelin ilk bölgesinde yoğun bir aydınlatmaya ihtiyaç vardır. Tünel aydınlatma maliyetinin önemli bir bölümünü oluşturan eşik bölgesi (ilk girişteki bölge) parlaklığı düzeyi, tünele yaklaşılırken karşılaşılan dış bölge parlaklığı seviyesine bağlıdır. Bu nedenle ekonomik ama gerekli görüş koşullarını sağlayan en uygun tünel aydınlatmasının ilk başlangıç noktası, tünel yaklaşma bölgesindeki dış bölge parlaklığı düzeyinin doğru olarak saptanmasıdır.

Eşik ve geçiş bölgesi aydınlatma gereksinimi, durma mesafesi, dış ortam parlaklığı ve tünel boyuna bağlı olarak belirlenmektedir. CIE 88 kılavuzuna göre, boyu 125 metreden uzun tünellerin giriş aydınlatılmasının yapılması gerekmektedir. (C.I.E. 88, 2004)

Aşağıdaki tablo tünel aydınlatma tasarımı yapılırken ilgili tünelin sürekli aydınlatma ihtiyacı olup olmadığını belirlemek için kullanılmaktadır.



Şekil 19. Sürekli aydınlatma gereksinim algoritması (C.I.E. 88, 2004)

Daha önce de bahsedildiği üzere her tünel kendi özelinde özgün tasarımlar gerektirmektedir. Ancak bu noktada ilk olarak belirlenmesi gereken tasarlanan tünelin sürekli aydınlatma ihtiyacının olup olmadığının tespit edilmesi gerekmektedir. Şekil 19'da görüldüğü şekliyle tünelimizin sürekli aydınlatma ihtiyacının olup olmadığına bu tabloyla karar verilebilmektedir. Uluslararası Aydınlatma Komisyonu'nun karayolları tünel aydınlatmalarında rehber niteliğinde olan yayınından Türkçeleştirilmiş olan kurallara göre yukarıdaki şablon tasarlanmış olup, pratik kullanıma uygundur. (C.I.E. 88, 2004)

Durma Mesafesinin Belirlenmesi

Tünel aydınlatma tasarımına başlanırken belirlenmesi gereken en önemli parametrelerden biri, tünele yaklaşılan açık yolda müsaade edilen araç hız sınırlaması ve bu hızda hareket eden aracın durma mesafesidir. Projelendirilen yol için tasarım hızı 90 km/saat olarak alınmıştır. 90 km/saat hızda yolda ilerleyen sürücünün, tehlikeli olabilecek bir cismi görüp aracını emniyetle durdurabileceği 'fren mesafesi' ise 130 metre olarak hesaplanmıştır. Yukarıda verilmiş olan parametreler Belkahve Tüneli bölgesindeki resmi hız sınırları olup, tasarım parametreleri olarak kullanılmıştır.

Matematiksel gösterim aşağıda belirtilmiş olup değişkenler sırasıyla şu şekildedir;

SD (stopping distance) durma mesafesi, u izin verilen en yüksek hız, t_o zaman, g yer çekimi ivmesi, f araç lastikleri ile zemin arasındaki sürtünme katsayısı ve s artı veya eksi yöndeki eğimi sembolize etmektedir. (CIE:88, 2004)

$$SD = u \times t_o + \frac{u^2}{2 \times g \times (f \pm s)} \quad (3.1)$$

Dış Ortam Parıltı Seviyesinin Belirlenmesi

Dış bölge parıltısı (L20), tünel girişinden fren mesafesi kadar uzaktan 20°lik tepe açılı koniden görünen alanın parıltısıdır. (C.I.E. 88, 2004)

Aslında en iyi çözüm, tünelin inşası sırasında yıl içinde belli dönemlerde, sözü edilen alanda gerçekleştirilen ölçümlerle elde edilmektedir. Bu ölçümler sonucunda, yıl içinde en çok rastlanılan en yüksek parıltı düzeyi esas alınmaktadır. Sözü edilen tüneller için, dış bölge parıltısı, 130 metre durma mesafesi için 3300 cd/m² olarak hesaplanmıştır.

Tünel giriş aydınlatması, Giriş ve Eşik Bölgesi boyunca 400W, 250W ve 150W NAV-T (Yüksek Basıncılı Sodyum Buharlı lambalı) armatürlerle sağlanmaktadır.

Yukarıda verilmiş olan yöntemler tünel yaklaşım bölgesindeki ortalama parıltı ve yasal hız sınırlarına karşılık belirlenmiş olan durma mesafesine göre aşağıdaki parametreler elde edilmiştir.

Giriş Aydınlatma Planı Tasarım Parametreleri

- Portalların Önündeki Parıltı (L20) : 3300 cd/m²
- Giriş Bölgesindeki Parıltı (Lth) : 198 cd/m²
- Durma Mesafesi : 130 m

İç Bölge Aydınlatması

İç bölge aydınlatma sistemi, tünel içerisinde güvenli trafik akışı için gerekli parıltı seviyesine uygun aydınlatma sistemidir. Tünel aydınlatma sistemleri yalnızca matematiksel tasarımlar olarak düşünülmemelidir. İnsan doğasında kapalı alan korkusu, yer altında kalma korkusu gibi psikolojik faktörlerin de olduğu unutulmamalıdır. Bu nedenle iç bölge aydınlatma sistemi, tünel içerisindeki insanların kapalı ve karanlık ortamda kalma korkularını yenebilmeleri için de önemli bir rol oynamaktadır.

Tünellerin iç bölge aydınlatması, 150W NAV-T (Yüksek Basıncılı Sodyum Buharlı Lambalı) simetrik ışık dağılımlı armatürler ile sağlanacaktır. İç bölge aydınlatması iki kademe olarak tasarlanmış, trafik durumuna göre anahtarlanabilmesi öngörülmüştür.

İç Bölge Aydınlatma Planı Tasarım Parametreleri

- İç Bölge Parıltı (Lint Gündüz) : 6 cd/m²
- İç Bölge Parıltı (Lint Gece) : 3 cd/m²

Acil Durum İki Yönlü Trafik

Tüplerden birinin çeşitli nedenlerle kapatılmış olması sebebi ile diğer tüpün çift yönlü olarak kullanılması mümkün durumunda tünel çıkışları sınırlandırılmış trafik hızı için giriş olacaktır. Bu uygulama için, tünelin çıkışına giriş aydınlatması yapılması gerekmektedir. Tünel çıkışlarının giriş amaçlı kullanılması durumlarında, acil aydınlatma senaryosu için belirlenmiş aydınlatma seviyesi, tünel çıkışına da tesis edilecek, tünelin çift yönlü kullanılması durumlarında devreye alınacaklardır. İki yönlü trafik durumunda trafik hızı 30km/saat olmakla beraber, güvenlik sebebi ile aydınlatma sistemi 50km/saat olarak öngörülmüştür.

İki yönlü trafik durumunda, birinci ve ikinci kademe iç bölge armatürlerinin hepsi %100 seviyesinde olmaktadır.

Çıkış Aydınlatması

Çıkış aydınlatmasının tünel çıkışından içeri giren gün ışığına oranla etkisiz kalması sebebi ile tercih edilmemesinden dolayı bu projede öngörülmemiştir.

Ancak yukarıda bahsedilen herhangi bir sebeple acil durum iki yönlü trafik durumuna geçilerek tek tüpten çift yönlü trafik akışı sağlanmak zorunda kalınırsa, belirtilmiş olan mevcut azami hız limitlerinden dolayı ters yönden gelen araç için kara delik etkisi yaratılmayacaktır. Göz adaptasyonu kendiliğinden gerçekleşeceği için bu durumda bile ihtiyaç olmayacağından çıkış aydınlatması tasarımı yapılmamıştır.

4.1.5. Güvenlik Aydınlatma Sistemi

Elektrik şebekesinde oluşabilecek muhtemel kesintiler, arıza, bakım gibi durumlara istinaden oluşacak kesintiler halinde sistemin jeneratörler tarafından beslenmesi sırasında, trafiğin güvenli şekilde akışını sağlayabilmek için aydınlatma asgari şekilde yapılmalıdır. Bu işletme şartlarında trafik akış hızı düşürüldüğünden, paralel olarak fren durma mesafesi de azalacağı için aydınlatma ihtiyacı azalmaktadır.

Belkahve Tüneli ve Türkiye’de kullanımda olan birçok tünelde de bahsedilen olumsuz hava koşullarında (yağmur, sis) veya bakım çalışması gibi sebeplerden dolayı şerit kapatmaların olduğu durumlarda tünel içi hız limitleri 90 km/saat iken 70 km/saat’e düşürülmektedir. Bu gibi doğal etkenlerin dışında yukarıda bahsedildiği üzere acil durum veya herhangi bir sebeple enerji kesintisi oluşması durumunda ise sistem acil durum ihtiyaç jeneratörleri tarafından beslendiği için parlıtlı seviyeleri daha düşük olmaktadır. Bu sebeple muhtemel tehlikelerin önüne geçmek adına durma mesafesini azaltabilmek için azami hız limiti daha da aşağıya çekilmektedir.

Trafik hızının 50km/saat mertebesine düşürüldüğü güvenlik aydınlatma sistemi, normal aydınlatma sisteminin %25 giriş aydınlatma kademesi ve iç bölge aydınlatma sisteminin tamamının kullanılması ile gerçekleştirilecek şekilde tasarım yapılmıştır. Bu amaca uygun anahtarlama sistemi için giriş aydınlatma 4, iç bölge 5 kademelerinin UPS üzerinden dizel jeneratör sistemine aktarılması gerekmektedir.

Doğal afet, yangın veya buna sebebiyet verebilecek trafik kazası gibi acil durumlarda, tünel içerisinde bulunan insanların, yaya olarak güvenli bir şekilde tünel dışına çıkabilmeleri için gerekli asgari aydınlık düzeyinin kesintisiz biçimde sağlanması gerekmektedir. Acil aydınlatma sistemlerinin devamlılığı için UPS ve dizel jeneratör sisteminden beslenmesi gerekmektedir.

Acil durum şartlarında taşıt yolu üzerinde asgari aydınlık şiddetinin sağlanmış olması gerekmektedir. Ortalama aydınlık düzeyinin 10Lux, en düşük aydınlık düzeyinin ise 2 Lux olması gerekmektedir.

UPS üzerinden beslenmekte olan iç bölge aydınlatma sistemi, en düşük aydınlatma kademesi olan gece şartlarındaki kademe, ortalama 69Lux, en düşük ise 45 Lux mertebesinde aydınlık düzeyi oluşturmaktadır.

Yukarıdaki tüm veriler Türkiye Cumhuriyeti Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü, Karayolu Tünelleri ve Bağlantı Yolları Elektrik, Elektronik, Mekanik ve Çeşitli Kontrol Sistemleri Teknik Şartnamesi ve projelendirme süreçlerinde yasal mevzuatlara uyularak proje firmalarına bildirilmiş ve bu şekilde uygulanmıştır.

4.1.6. Gece Aydınlatması

Gece şartlarında tünel giriş aydınlatması gerekli görülmediğinden sadece yaklaşım/uzaklaşma bölgesi aydınlatma sistemi ile tünel iç bölge aydınlatma sistemi devrede kalmaktadır.

Gece şartlarında iç bölge aydınlatması parlıltı değeri 3cd/m^2 olarak tasarlanmıştır ve iç bölge armatürlerinin %50 DIM edilmesi esasına göre projelendirilmiştir. Trafik

yoğunluğunun azaldığı dönemlerde ve bakım sonrası dönemlerde, iç bölge parlıltı seviyesi 3cd/m^2 mertebesine düşürülerek enerji tasarrufu mümkün olabilecektir.

4.1.7. Aydınlatma Hesaplarına Esas Parametreler

Aydınlatma hesaplarında esas olarak kabul edilecek Belkahve Tüneli çalışmamıza ait özellikler aşağıda belirtildiği gibi projelendirilmiş, Relux Tunnel programında bu parametreler kullanılmıştır.

- Yol Kaplaması : Asfalt Sınıfı R3 $q(o) = 0,07$
- Duvar Kaplaması : Beton
- Duvar Yansıtıcılık Katsayısı : 0,4
- Armatür Yüksekliği : 6,0 m
- Bakım Faktörü : 0,7

4.1.8. Optik Özellikler ve Aydınlatma Performansı

Aydınlatma armatürleri için bakım faktörü 0,7 olarak alınmıştır ve tüm hesaplanan parlıltı değerleri düzeltilmiş değerlerdir. Tünel aydınlatması hesaplarında en küçük parlıltı değerinin ortalama parlıltı değerine oranı 0.4' den iyi olduğu, en küçük parlıltı değerinin gözlemcinin enlem koordinatındaki en büyük parlıltı değerine oranı 0.6' dan iyi olması sağlanmıştır.

Sürüş emniyeti için çok önemli olan, tünel duvarlarındaki parlıltı düzeylerinin ve düzgünlüklerinin ilgili standartlara uygunluğuna dikkat edilmiştir.

Zıt ışın uygulamalarında en önemli kriter olarak belirlenmiş olan kontrast katsayısının 0,6'dan büyük olmasına dikkat edilmiştir.

Tüm aydınlatma armatürleri, iki sıra olarak, 6,0 metre yüksekliğe tesis edileceklerdir. İç bölge aydınlatma armatürlerinin Flicker (Titreşim Etkisi) frekansının, CIE' de ifade edildiği şekilde yasaklanmış olan 2.5-15 Hz aralığının dışında kalmasına dikkat edilmiştir.

4.1.9. Armatürler

Armatürlerde maliyet ve bakım koşulları düşünülerek eşik ve geçiş bölgelerinde dimleme (loşlaştırma) kullanılmadan çözümler geliştirilmiştir. Aydınlatma kontrolü, armatürlerin yakılıp söndürülmesi esasına göre yapılmıştır. İç bölge armatürlerinde dim edilme özelliği kullanılmış, enerji tasarrufu hedeflenmiştir. İç bölgedeki düzgünlüklerin sağlanmasına dikkat edilmiştir.

Aydınlatma projesi optik tasarımında, paslanmaz çelik gövdeli armatürlerin kullanılması öngörülmüştür. Armatürler, AISI316Ti gövdeli, 5mm temperli camlı olup IP66 koruma sınıfına sahiptir ve basınç dengeleyici eleman ihtiva etmektedir. İşletme ve bakım kolaylığı için balast armatürlerin alet gerektirmeden el ile açılabilmesi öngörülmüştür. Armatürlerin içerisinde yer alan elektriksel elemanları taşıyan şase modüler yapıda olması ve alet gerektirmeden el ile dışarı alınabilir olması öngörülmüştür. Klemensler, 16mm² kesite kadar uyum olup, 16mm² kesitli kablonun kolaylıkla montajı yapılabilecek dönüş mesafelerini sağlamaktadır. Klemens grubu ile birlikte olan mikro sigorta sistemi ile arızaların sisteme sirayet etmesinin önüne geçilmiş olacak, aydınlatma sisteminin güvenlik riski oluşturmaması sağlanabilecektir. Kullanılan bölgeye göre (giriş-geçiş-iç) armatür içindeki reflektör tipi counter-beam (zıt yönlü) veya simetrik olarak belirlendiği şekilde aydınlatma planlarına işlenmiştir. Armatürlerde yüksek basınçlı sodyum buharlı ampuller kullanılmakta ve reaktif güç kompanzasyonu yapılmıştır.

Tünel yapılarındaki kaza veya yangın gibi durumlardaki hasar boyutunun yüksekliği nedeni ile tünel armatürlerinin yangın durumlarında devrede kalabilmesi öngörülmüştür. AB direktifinde yer alan, teçhizatın yangına dayanıklılığı ve bu özelliği öne çıkararak vurgulayan RVS tünel şartnamelerinde, armatürlerin 250 derecelik ortam sıcaklığında en az 1 saat süre ile çalışmaya devam etmesi gerekmektedir. Olası faciaların önlenmesinde ve ışığın en gerektiği durumlarda tünel içerisindeki insanların tahliyesini sağlayacak bu özellik projede

dikkate alınmıştır. Tasarım, yangın durumlarında devrede kalabildiğini sertifikalandırılmış armatürlerin optik karakteristiklerine uygun olarak hazırlanmıştır.

Bu proje kapsamında kullanılmış olan armatürlerin teknolojik özelliklere uygunluğu proje kabulü öncesi yapılacak testler, armatürlere ait bilgi ve sertifikalar da proje ekinde Karayolları Genel Müdürlüğü'ne sunulmuştur.

Belkahve Tüneli aydınlatma projesinde kullanılan aydınlatma armatürleri;

- VIALOX NAV-T 400W SUPER 4Y 416 Adet
- VIALOX NAV-T 250W SUPER 4Y 32 Adet
- VIALOX NAV-T 150W SUPER 4Y 738 Adet

4.1.10. Aydınlatma Kontrolü

Giriş aydınlatma kontrolü her tüp için luminansmetre kullanılarak yapılmalıdır. Bu luminansmetrelerin biri tünelin dışına, tünel dışındaki parıltı değerini ölçmek için diğeri tünel içine giriş bölgesindeki parıltı değerini ölçmek amacıyla yerleştirilmelidir. PLC aracılığıyla her iki parıltı değeri karşılaştırılmalı ve buna göre eşik bölge parıltı değeri gerekli olan kademeye göre armatürlere kumanda edilmelidir.



Şekil 20. Luminansmetre (“Tünel Giriş Fotometresi”, 2023)

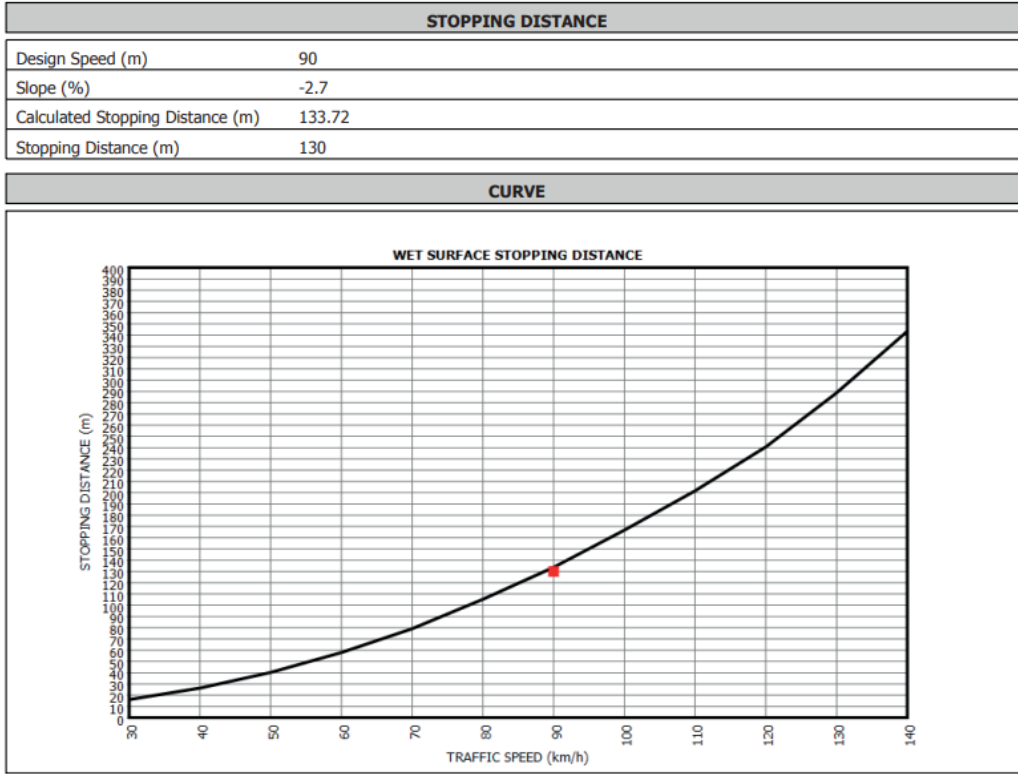
Luminansmetreler aşağıdaki özellikleri taşımaktadır.

- Ölçüm aralığı : Dış 0-9000 cd/m² İç 0-500 cd/m²
- Çıkış sinyali : 4-20 mA veya RS485
- Çalışma gerilimi : 220-240 VAC
- IP Koruma sınıfı : IP66
- Gövde : Paslanmaz çelik

4.1.11. Belkahve Tüneli HPS Aydınlatma Tasarımı ReluxTunnel

Hesaplamaları

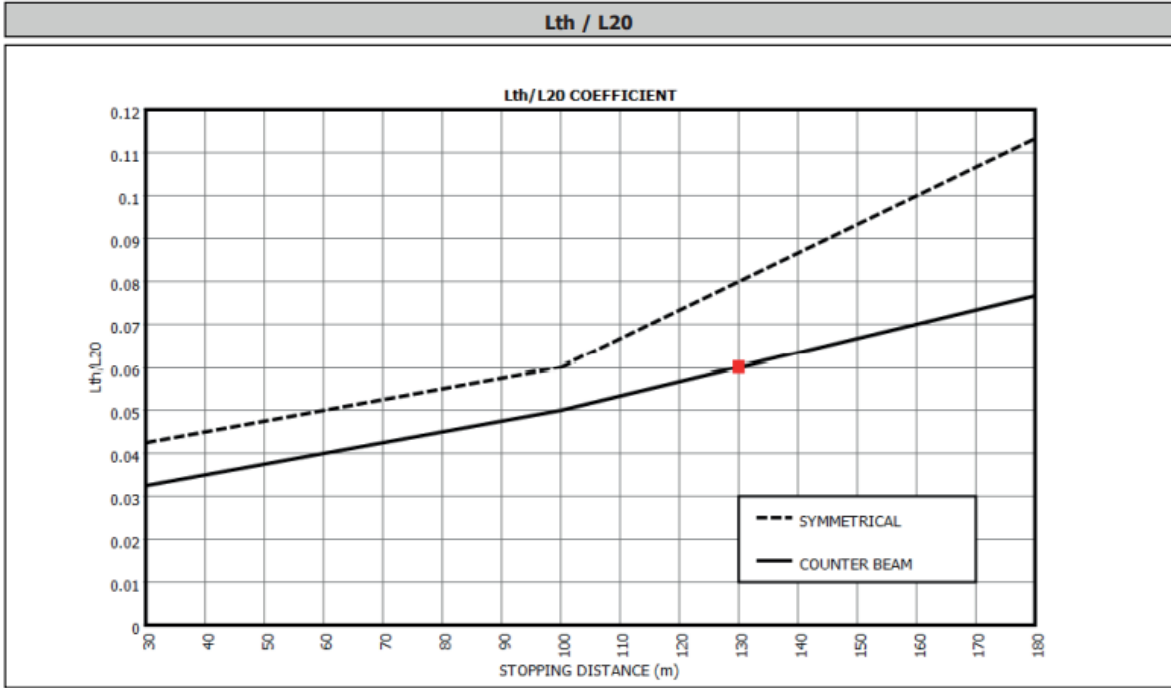
Aşağıdaki şekillerde tasarım programı hesaplama ve sonuç ekranları paylaşılmış olup, program kullanıcı ara yüzü orijinal formatında gösterilmiştir. İngilizce terimler her bir şeklin altında açıklanmıştır.



Şekil 21. Durma mesafesi tayini

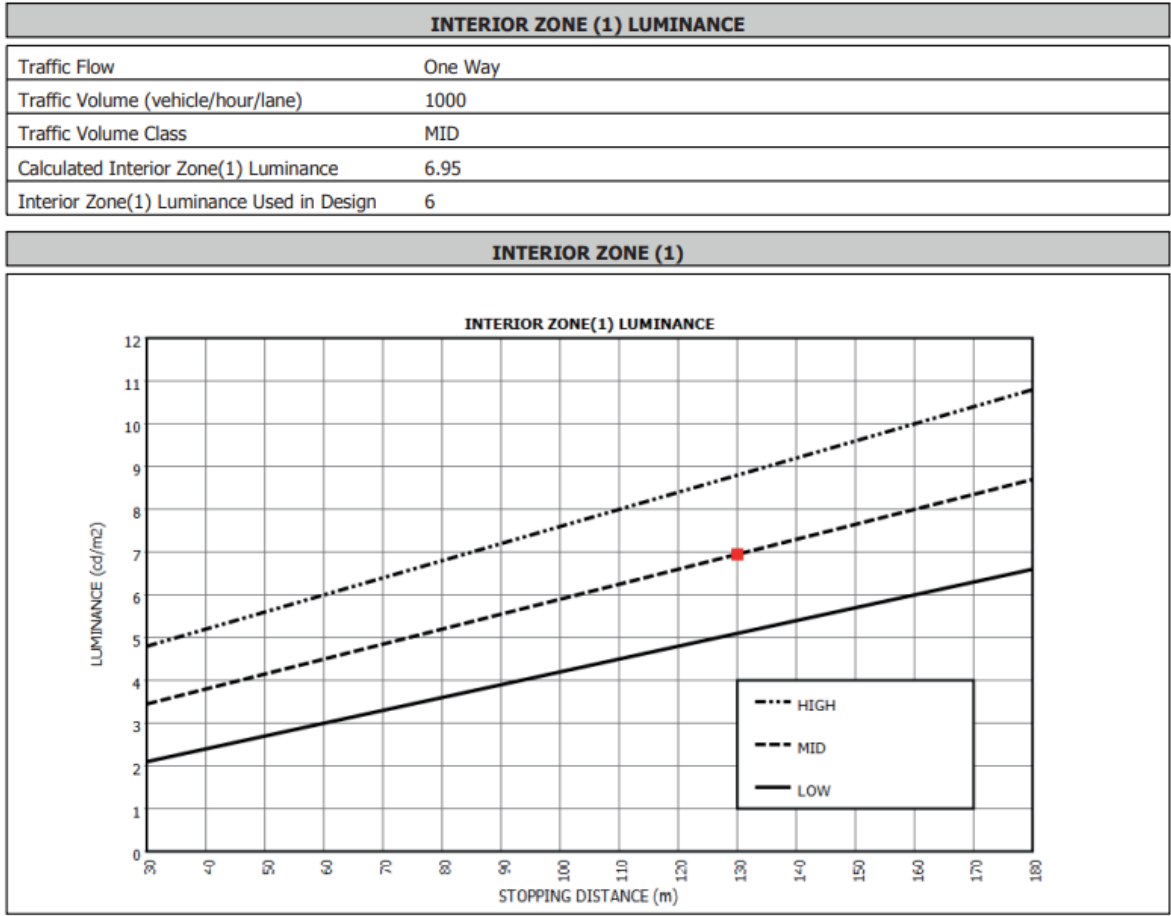
- Stopping Distance : Durma Mesafesi
- Slope : Eğim
- Calculated Stopping Distance : Hesaplanan Durma Mesafesi
- Curve : Eğri
- Traffic Speed : Trafik Hızı

Optics for Threshold & Transition Zone	Counter Beam
Optics for Interior Zone	Symmetrical Beam
Calculated Lth/L20 Coefficient	0.06



Şekil 22. Eşik ve geçiş bölgeleri durma mesafesi

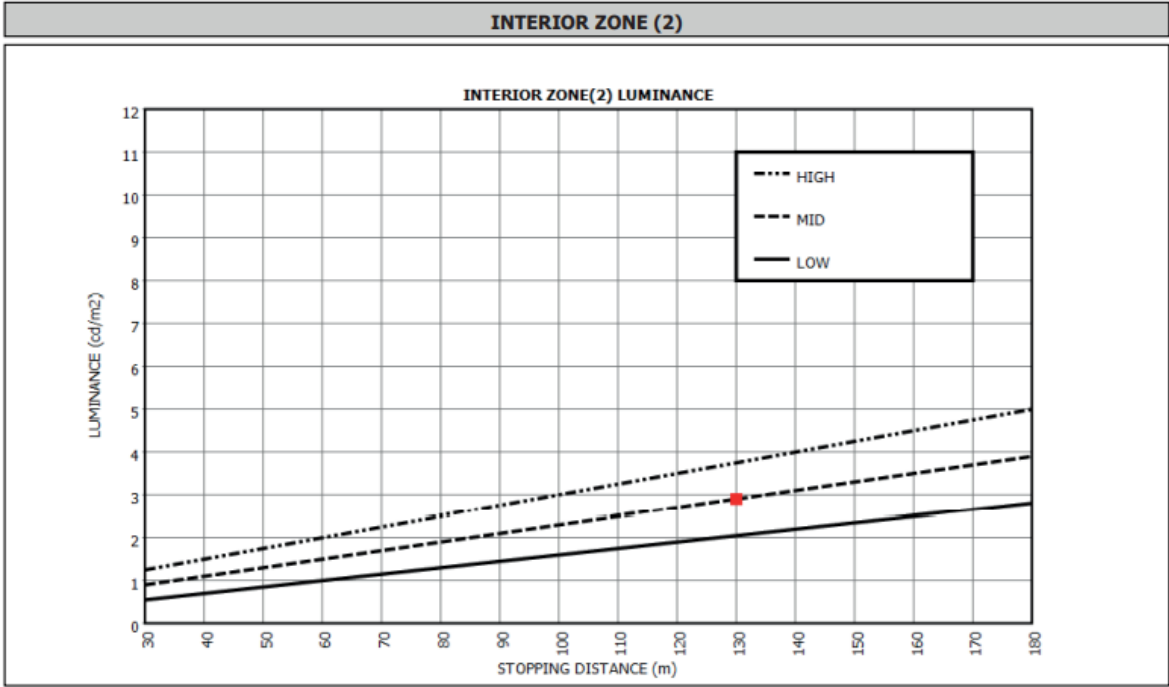
- Optics for Threshold & Transition Zone : Eşik ve Geçiş Bölgeleri Armatürleri
- Optics for Interior Zone : İç Bölge Armatürleri
- Calculated Lth/L20 Coefficient : Hesaplanan Lth/L20 Katsayısı



Şekil 23. İç bölge parlaltı seviyesi – gündüz aydınlatması

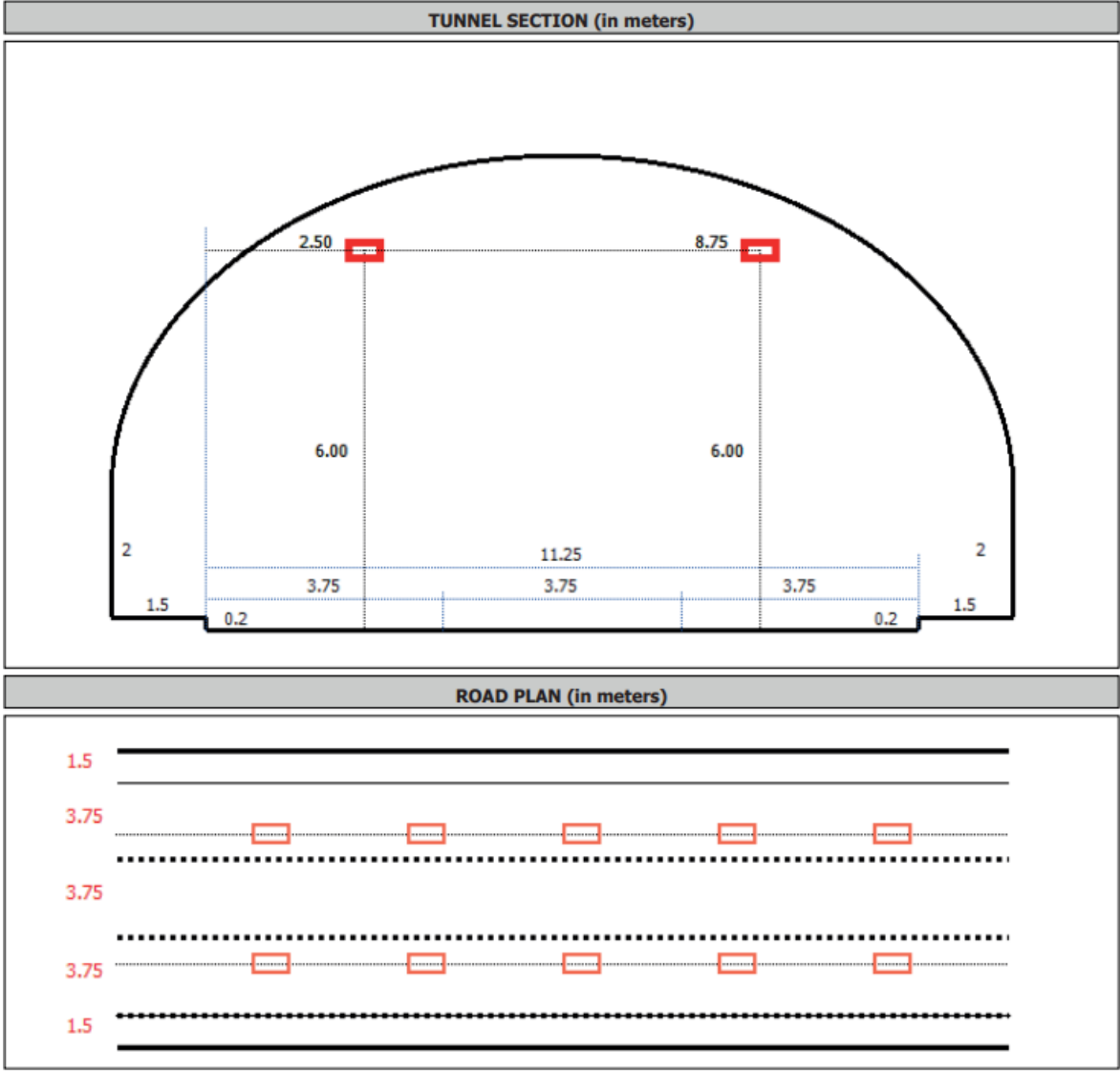
- Interior Zone : İç Bölge
- Traffic Flow : Trafik Akışı
- Traffic Volume (vehicle/hour/lane) : Trafik Yoğunluğu/Hacmi
- Traffic Volume Class : Trafik Yoğunluk Sınıfı
- Calculated Interior Zone Luminance : Hesaplanan İç Bölge Parlaltısı
- Interior Zone Luminance Used in Design : Tasarımda Kullanılan İç Bölge Parlaltısı
- One Way : Tek Yönlü
- High/Mid/Low : Yüksek/Orta/Düşük
- Luminance : Parlaltı
- Stopping Distance : Durma Mesafesi

Calculated Interior Zone(2) Luminance	2.9
Interior Zone(2) Luminance Used in Design	3



Şekil 24. İç bölge parlaltı seviyesi – gece aydınlatması

- Calculated Interior Zone Luminance : Hesaplanan İç Bölge Parlaltısı
- Interior Zone Luminance Used in Design : Tasarımda Kullanılan İç Bölge Parlaltısı



Şekil 25. Tünel çizimi – armatür yol yerleşimi

- Tunnel Section : Tünel Kesiti
- Road Plan : Armatür Yerleşim Planı

TUNNEL SPECIFICATION										
		GRID			OBSERVER		SURFACES			
# of lanes	3	# in X	98	DX	2.58	X	-130	Road q0	0.07	CIE-R3
Lane width	3.75	# in Y	9	DY	1.25	Y	4	Wall q0	0.13	
Road width	11.25	# in Z	3	DZ	0.67	Z	1.5	Road ro	0.22	Road back ro 0.07
								Wall ro	0.4	Wall back ro 0.2
LIGHTING ROW PROPERTIES										
Row	1	2	3	4						
Optic Data	asym_3.txt	sym_8.txt	asym_3.txt	sym_8.txt						
Mounting height (m)	6	6	6	6						
Distance from left (m)	2.5	2.5	8.75	8.75						
Luminaire Flux (kl)	55.5	17.5	55.5	17.5						
Luminaire Rotation (deg)	0	0	0	0						
Luminaire Inclination (deg)	0	0	0	0						
Maintenance Factor	0.7	0.7	0.7	0.7						

Şekil 26. Parametre seçimleri

- Tunnel Specification : Tünel Spesifikasyonları
- Grid/Observer/Surfaces : Sistem/Gözlemci/Yüzeyler
- Lane Width : Şerit Genişliği
- Road Width : Yol Genişliği
- Lighting Row Properties : Aydınlatma Sırası Özellikleri
- Row : Sıra, Dizin
- Optic Data : Armatür Verisi
- Mounting Height : Montaj Yüksekliği
- Distance From Left : Soldan Mesafe
- Luminaire Flux : Işık Akısı
- Luminaire Rotation : Işık Dönüş Açısı
- Luminaire Inclination : Işık Eğim Açısı
- Maintenance Factor : Bakım Faktörü

SUMMARY			
Grid starts-ends	0 - 48.97		
Average Road Illuminance (Lux)	2742.5		
Max Road Illuminance (Lux)	3364.2		
Min Road Illuminance (Lux)	1112.2		
Overall Road Illuminance Uniformity	0.41		
Average Road Vertical Illuminance (Lux)	194.94		
Max Road Vertical Illuminance (Lux)	251		
Min Road Vertical Illuminance (Lux)	37.3		
Overall Road Vertical Illuminance Uniformity	0.19		
Required Road Luminance (cd/sqm)	200		
Average Road Luminance (cd/sqm)	215.89		
Max. Road Luminance (cd/sqm)	263.7		
Min. Road Luminance (cd/sqm)	112.1		
Overall Road Luminance Uniformity	0.52		
Longitudinal	Lane-1	Lane-2	Lane-3
Observer position on Y direction	1.88	5.63	9.38
Maximum Luminance on Observer Axis (cd/sqm)	236.2	220.9	224.9
Minimum Luminance on Observer Axis (cd/sqm)	177.5	161.6	166.5
Longitudinal Uniformity	0.75	0.73	0.74
Required Left Wall Luminance (cd/sqm)	120		
Average Left Wall Luminance (cd/sqm)	160.12		
Max. Left Wall Luminance (cd/sqm)	172.5		
Min. Left Wall Luminance (cd/sqm)	80.3		
Overall Left Wall Luminance Uniformity	0.5		
Required Right Wall Luminance (cd/sqm)	120		
Average Right Wall Luminance (cd/sqm)	160.12		
Max. Right Wall Luminance (cd/sqm)	172.5		
Min. Right Wall Luminance (cd/sqm)	80.3		
Overall Right Wall Luminance Uniformity	0.5		
Average Contrast Coefficient of Road (cd/sqm/Lux)	1.32		
Max. Contrast Coefficient of Road (cd/sqm/Lux)	5.12		
Min. Contrast Coefficient of Road (cd/sqm/Lux)	0.79		
Overall Contrast Coefficient of Road Uniformity	0.6		
Maximum Veiling Luminance	0.04		
Maximum Threshold Increment (%)	0.01		

Şekil 27. Sonuç ekranı

- Summary : Özet/Sonuç
- Grid Starts-Ends : Sistem Başlangıç-Bitiş
- Average Road Illuminance : Ortalama Aydınlatma Şiddeti
- Max Road Illuminance : Maksimum Aydınlatma Şiddeti

- Min Road Illuminance : Minimum Aydınlatma Şiddeti
- Overall Road Illuminance Uniformity : Toplam Aydınlatma
Düzensünlüğü
- Average Road Vertical Illuminance : Ortalama Dikey Işık Akısı
- Max Road Vertical Illuminance : Maksimum Dikey Işık Akısı
- Min Road Vertical Illuminance : Minimum Dikey Işık Akısı
- Overall Road Luminance Uniformity : Toplam Işık Aydınlatma
Düzensünlüğü
- Longitudinal : Dikey
- Observer Position on Y Direction : Y İstikametinde Gözlemci
Pozisyonu
- Maximum Luminance on Observer Axis : Gözlemci Aksında Maksimum
Parıltı
- Minimum Luminance on Observer Axis : Gözlemci Aksında Minimum
Parıltı
- Longitudinal Uniformity : Dikey Düzensünlük
- Required Left Wall Luminance : İhtiyaç Duyulan Sol Duvar
Parıltısı
- Average Left Wall Luminance : Ortalama Sol Duvar Parıltısı
- Max. Left Wall Luminance : Maksimum Sol Duvar Parıltısı
- Min. Left Wall Luminance : Minimum Sol Duvar Parıltısı
- Overall Left Wall Luminance Uniformity : Toplam Sol Duvar Parıltı
Düzensünlüğü
- Required Right Wall Luminance : İhtiyaç Duyulan Sağ Duvar
Parıltısı
- Average Right Wall Luminance : Ortalama Sağ Duvar Parıltısı
- Max. Right Wall Luminance : Maksimum Sağ Duvar Parıltısı
- Min. Right Wall Luminance : Minimum Sağ Duvar Parıltısı
- Overall Right Wall Luminance Uniformity : Toplam Sağ Duvar Parıltı
Düzensünlüğü
- Average Contrast Coefficient of Road : Ortalama Kontrast
- Max. Contrast Coefficient of Road : Maksimum Kontrast

- Min. Contrast Coefficient of Road : Minimum Kontrast
- Overall Contrast Coefficient of Road Uniformity : Toplam Kontrast Düzgünlüğü
- Maximum Threshold Increment : Maksimum Eşik Artışı

Şekil 27’de sonuç ekranında görüldüğü üzere farklı yüzeylerin farklı açılardan ihtiyaç duyulan aydınlatma gereksinimleri verilmiştir. Bu aydınlatma gereksinimlerinin belirlenmesinde en önemli iki faktör bölgedeki karayolunda ve tünelde müsaade edilen azami hız limiti ve tünel girişindeki parlıltı seviyesidir. İlgili hız sınırına karşılık gelen durma mesafesi de yukarıdaki Şekil 21’de grafik olarak verilmiştir. Bu iki değişkene göre tünel aydınlatma limitleri belirlenmiş olup sonuç ekranındaki yatay ve dikeydeki gözlemci noktalarına göre alt, üst ve ortalama limit aydınlık şiddetleri, parlıltı değerleri, kontrast seviyeleri, tünel içerisindeki betonarme yapının sağ ve sol yüzeylerindeki gerekli parlıltı seviyeleri ve aydınlatma sisteminin getirdiği sonuçlar detaylı olarak verilmiştir. Sonuçlara göre gereklilikler sağlanmakta ve teknik olarak doğru aydınlatma sistemi tasarlandığı görülmektedir.

Ancak aydınlatmanın sistem tasarımının matematiksel olarak doğru olması en doğru aydınlatmanın yapıldığını göstermemektedir. HPS tip armatürlerin bakım sıklığı, armatür ampul değişim sıklıkları, bakım sırasında şerit kapatma zorunluluğu, sürekli olarak aydınlatma zorunluluğundan dolayı düzenli yüksek enerji tüketim miktarları, karbon emisyonları gibi değişkenler düşünüldüğünde daha verimli sistem tasarımları noktasında arayışları zorunlu hale getirmiştir.

4.2. Belkahve Tüneli LED Aydınlatma Tasarımı

Belkahve Tüneli alternatif aydınlatma tasarımı yapılırken mevcut gerçek veriler kullanılarak tasarlanmış olan parametreler aynı şekliyle kullanılmış, LED tasarım gerçeklemeye en yakın şekilde tasarlanmıştır.

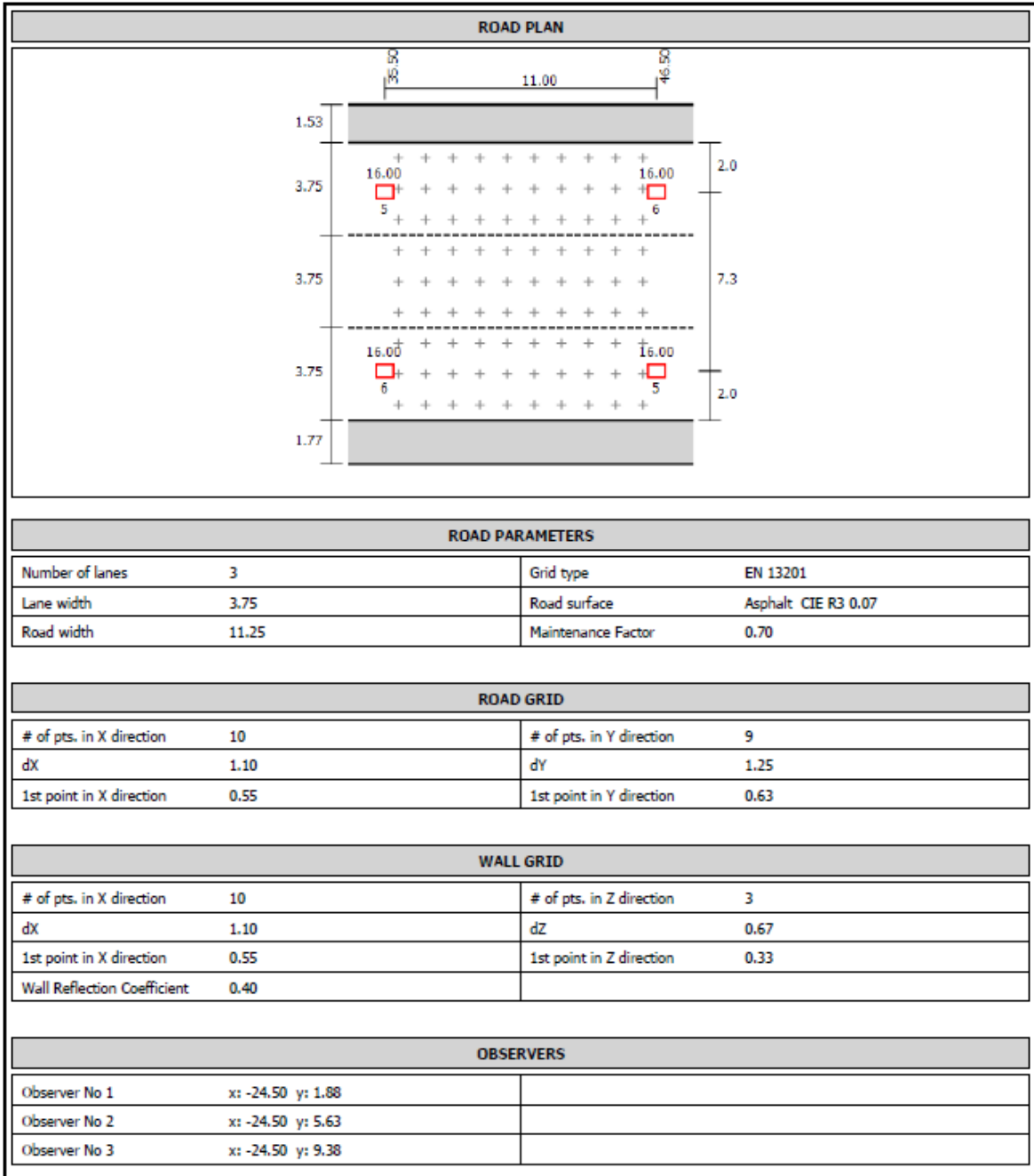
4.2.1. Aydınlatma Hesaplarına Esas Parametreler

- Tasarım Hızı : 90 km/saat
- Durma Mesafesi : 130m
- Eğim : % \pm 1,5
- Yol Kaplaması : Asfalt Sınıfı R3 $q(o) = 0,07$
- Duvar Kaplaması : Beton
- Duvar Yansıtıcılık Katsayısı : 0,4
- Armatür Yüksekliği : 6,0 m
- Bakım Faktörü : 0,7
- Giriş-Eşik Bölgesi Ortalama Parıltı Seviyesi: 198 cd/m²
- İç Bölge Gündüz Ortalama Parıltı Seviyesi : 6 cd/m²
- İç Bölge Gece Ortalama Parıltı Seviyesi : 3 cd/m²
- Çıkış Bölgesi için özel bir aydınlatma tasarımına ihtiyaç duyulmamıştır.

4.2.2. LED Tasarım Armatür Adetleri

- GOLEDO-T 40 LED LT2037.765-EN : 40 Adet
- GOLEDO-T 64 LED LT2037.767-EN : 531 Adet
- GOLEDO-T 80 LED LT2037.766-EN : 28 Adet
- GOLEDO-T 160 LED LT2037.760-EN : 264 Adet

4.2.3. Belkahve Tüneli LED Aydınlatma Tasarımı Relux

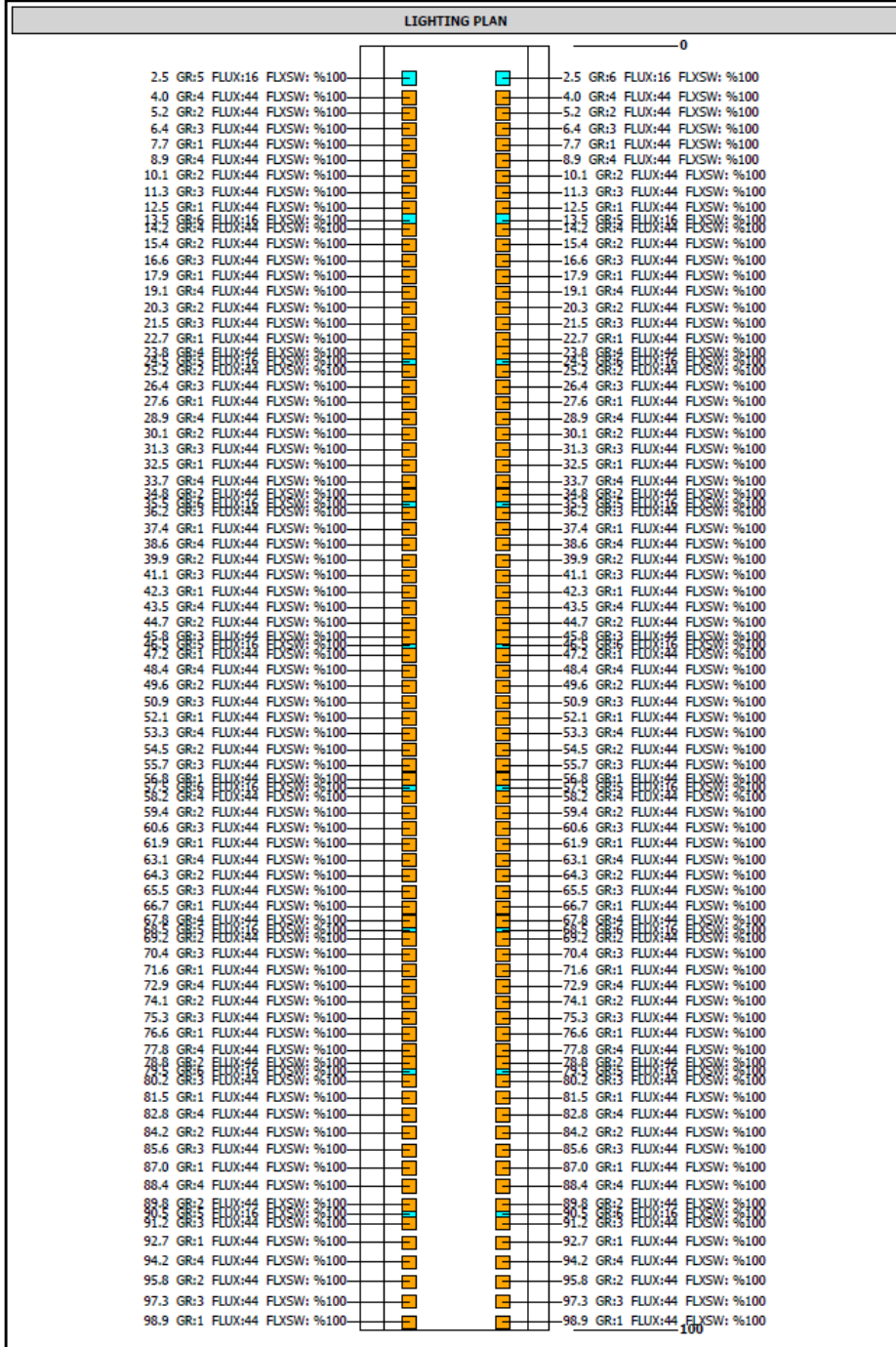


Şekil 28. Parametreler

- Road Plan : Yol Planı
- Road Parameters : Yol Değişkenleri
- Number of Lanes/Lane Width/Road Width : Şerit Numarası
- Road Grid : Yol Tipi

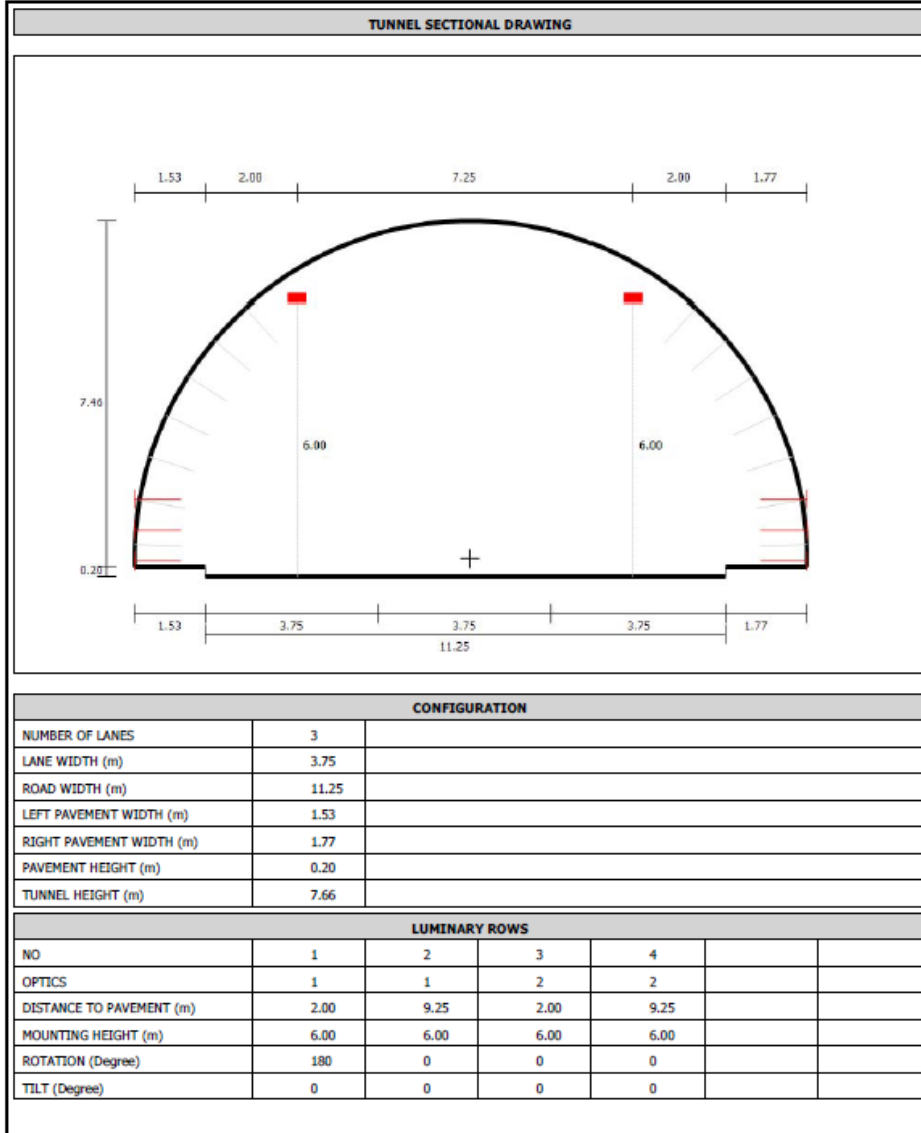
- Wall Grid : Duvar Tipi
- Wall Reflection Coefficient : Duvar Yansıtıcılık Katsayısı
- Observers : Gözlemciler

Yukarıda Şekil 28’de yol planı, yol ve duvarlarla ilgili sabit değişkenler, asfalt tipi, beton tipi gibi tünel mimari yapısı, bakım faktörü gibi değişkenler programa işlenmiştir.



Şekil 29. LED aydınlatma planı

- Lighting Plan : Aydınlatma Planı

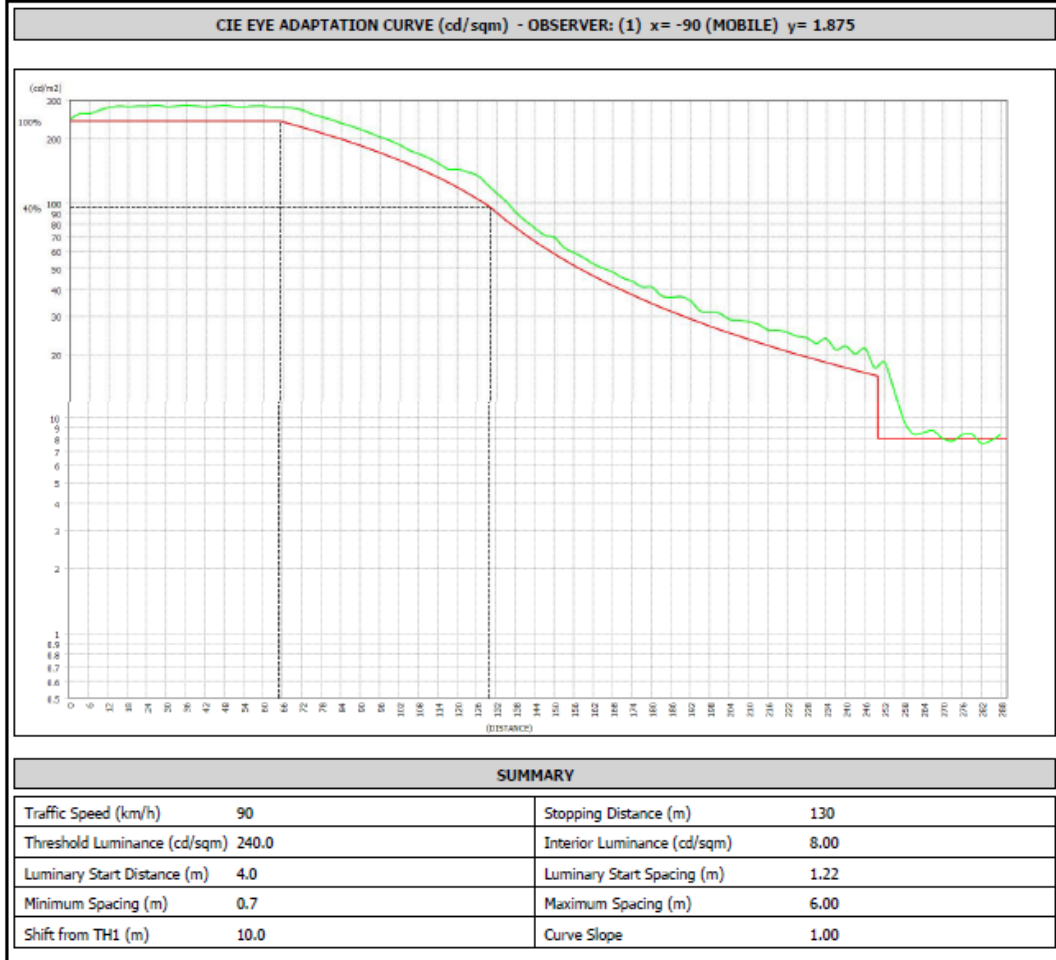


Şekil 30. Tünel teknik çizimi

- Tunnel Sectional Drawing : Tünel Bölgesel Çizim
- Configuration : Konfigürasyon/Tasarım Yapısı
- Lane Width/Road Width : Şerit Genişliği/Yol Genişliği
- Pavement Width : Kaldırım Genişliği
- Tunnel Height : Tünel Yüksekliği
- Optics : Armatürler
- Distance to Pavement : Kaldırıma Uzaklık
- Mounting Height : Montaj Yüksekliği

• Luminary Rows

: Armatür Yerleşimi



Şekil 31. CIE-LED tasarım göz adaptasyon eğrileri

• CIE Eye Adaptation Curve

: CIE Göz Adaptasyon Eğrisi

• Summary

: Özet

• Traffic Speed

: Trafik Hızı

• Threshold Luminance

: Eşik Parlıltısı

• Luminary Start Distance

: Işık Başlangıç Mesafesi

• Minimum Spacing

: Minimum Ara

• Stopping Distance

: Durma Mesafesi

• Interior Luminance

: İç Parlıltı

• Maximum Spacing

: Maksimum Ara

• Curve Slope

: Eğri Eğimi

SUMMARY			
Grid starts-ends	10 - 39.54546		
Average Road Illuminance (Lux)	3,162.83		
Max Road Illuminance (Lux)	3,979.35		
Min Road Illuminance (Lux)	2,214.88		
Overall Road Illuminance Uniformity	0.70		
Average Road Vertical Illuminance (Lux)	443.99		
Max Road Vertical Illuminance (Lux)	525.73		
Min Road Vertical Illuminance (Lux)	253.48		
Overall Road Vertical Illuminance Uniformity	0.57		
Road Luminance	Obs:1	Obs:2	Obs:3
Observer position on Y direction	1.88	5.63	9.38
Required Road Luminance (cd/sqm)	240.00	240.00	240.00
Average Road Luminance (cd/sqm)	282.39	283.12	282.21
Max. Road Luminance (cd/sqm)	408.30	397.93	406.37
Min. Road Luminance (cd/sqm)	163.17	160.70	163.10
Overall uniformity (min/ave)	0.58	0.57	0.58
Minimum Luminance on Observer Axis (cd/sqm)	394.39	160.70	392.58
Maximum Luminance on Observer Axis (cd/sqm)	408.30	167.68	406.37
Longitudinal Uniformity	0.97	0.96	0.97
Wall Luminance	Left	Right	
Required Left Wall Luminance (cd/sqm)	169.33	169.33	
Average Luminance (cd/sqm)	186.04	177.45	
Max. Luminance (cd/sqm)	193.69	187.32	
Min. Luminance (cd/sqm)	170.23	159.43	
Overall Luminance Uniformity	0.91	0.90	
Contrast Coefficient	Obs:1	Obs:2	Obs:3
Average Contrast Coefficient of Road (cd/sqm/Lux)	0.65	0.65	0.65
Max. Contrast Coefficient of Road (cd/sqm/Lux)	1.31	1.26	1.32
Min. Contrast Coefficient of Road (cd/sqm/Lux)	0.08	0.09	0.08
Overall Contrast Coefficient of Road Uniformity	0.52	0.52	0.52
Maximum Veiling Luminance	9.87	8.87	9.81
Maximum Threshold Increment (%)	1.72	1.54	1.71

Şekil 32. LED tasarım sonuç ekranı

- Summary : Özet/Sonuç
- Grid Starts-Ends : Sistem Başlangıç-Bitiş
- Avarage Road Illuminance : Ortalama Aydınlatma Şiddeti
- Max Road Illuminance : Maksimum Aydınlatma Şiddeti
- Min Road Illuminance : Minimum Aydınlatma Şiddeti
- Overall Road Illuminance Uniformity : Toplam Aydınlatma Düzgünlüğü

- Average Road Vertical Illuminance : Ortalama Dikey Işık Akısı
- Max Road Vertical Illuminance : Maksimum Dikey Işık Akısı
- Min Road Vertical Illuminance : Minimum Dikey Işık Akısı
- Overall Road Luminance Uniformity : Toplam Işık Aydınlatma Düzgünlüğü
- Longitudinal : Dikey
- Observer Position on Y Direction : Y İstikametinde Gözlemci Pozisyonu
- Maximum Luminance on Observer Axis : Gözlemci Aksında Maksimum Parıltı
- Minimum Luminance on Observer Axis : Gözlemci Aksında Minimum Parıltı
- Longitudinal Uniformity : Dikey Düzgünlük
- Required Left Wall Luminance : İhtiyaç Duyulan Sol Duvar Parıltısı
- Average Left Wall Luminance : Ortalama Sol Duvar Parıltısı
- Max. Left Wall Luminance : Maksimum Sol Duvar Parıltısı
- Min. Left Wall Luminance : Minimum Sol Duvar Parıltısı
- Overall Left Wall Luminance Uniformity : Toplam Sol Duvar Parıltı Düzgünlüğü
- Required Right Wall Luminance : İhtiyaç Duyulan Sağ Duvar Parıltısı
- Average Right Wall Luminance : Ortalama Sağ Duvar Parıltısı
- Max. Right Wall Luminance : Maksimum Sağ Duvar Parıltısı
- Min. Right Wall Luminance : Minimum Sağ Duvar Parıltısı
- Overall Right Wall Luminance Uniformity : Toplam Sağ Duvar Parıltı Düzgünlüğü
- Average Contrast Coefficient of Road : Ortalama Kontrast
- Max. Contrast Coefficient of Road : Maksimum Kontrast
- Min. Contrast Coefficient of Road : Minimum Kontrast
- Overall Contrast Coefficient of Road Uniformity : Toplam Kontrast Düzgünlüğü
- Maximum Threshold Increment : Maksimum Eşik Artışı

Şekil 32’de ihtiyaç parametreler ve bunun karşılığında alt ve üst limitlerde gördüğümüz değerler, ortalama sonuçlar, kontrast, parlaklık, aydınlık şiddeti düzgünlükleri gibi değerler görüntülenmiştir. Tüm bu referans tasarım parametrelerine karşılık çıkan sonuç ekranının en objektif yorumlaması Şekil 31’de görülen CIE adaptasyon eğrisi ve tünel aydınlatma tasarım eğrisidir. Görüldüğü üzere CIE eğrisine oldukça paralel bir tasarım eğrisi yakalanmıştır.

4.3. HPS-LED Kıyaslama Tabloları ve Sonuçlar

Aşağıdaki finansal analiz hesapları yapılırken elektrik birim fiyatı olarak Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. (EPIAŞ) verilerinden yararlanılarak Ticarethane (Yüksek Kademe) sınıfında aktif enerji birim fiyatı, dağıtım bedeli birim fiyatı ve vergiler de dahil edilerek 01.01.2023 itibariyle 4,4516 TL/kWh birim fiyatı referans olarak kabul edilmiştir. Çalışmamızın ve ürün fiyatlarının Euro üzerinden olduğu göz önünde bulundurularak belirtilen tarih itibariyle Euro/Türk Lirası kuru T.C. Merkez Bankası efektif satış verilerine göre 20,0007 olarak referans alınmıştır. İlgili dönüşümler yapıldığında 1 kWh için enerji birim fiyatı Euro/kWh değeri 0,2225 Euro olarak hesaplanmıştır. Finansal analiz yapılırken yıllık tüketim gibi değerler bu referans değeri baz alınarak yapılmıştır.

Yukarıda bahsedilen finansal hesaplara esas parametreler ve sonuçlar aşağıdaki gibidir. İlgili sonuçlara yönelik finansal hesap tabloları aşağıda paylaşılmıştır.

• Enerji Birim Fiyatı (Euro/kWh)	0,22 €
• Günlük Çalışma Saati	24
• Yıldaki Çalışma Günü	365
• HPS Teknik Kullanım Ömrü (Yıl)	3
• LED Teknik Kullanım Ömrü(Yıl)	11
• Ortalama Yıllık Enerji Tasarrufu(Yıl)	257.971,88 €
• LED Sistem Geri Kazanım Süresi(Yıl)	2,11
• Azaltılan CO ₂ Salınımı (Ton)	484

Tablo 4

HPS armatür detayları

HPS ARMATÜRLER					
ÜRÜN NO	ÜRÜN AÇIKLAMASI	ADET	BİRİM GÜÇ (W)	TOPLAM GÜÇ (kW)	YILLIK ENERJİ TÜKETİMİ (Euro)
No.1	VIALOX NAV-T 150W SUPER 4Y	738	150 W	110,70 kW	215.835,39 €
No.2	VIALOX NAV-T 250W SUPER 4Y	32	250 W	8,00 kW	15.597,86 €
No.3	VIALOX NAV-T 400W SUPER 4Y	416	400 W	166,40 kW	324.435,50 €

Tablo 4’de armatür cins, adet, toplam güç ve yıllık tüketim maliyetleri verilmiştir. Bu verilere göre HPS sistem tasarımında toplam 1186 adet armatür kullanılmış, 285,10 kW toplam güç tüketimi oluşmuş ve 555.868,75 Euro yıllık tüketim miktarıdır.

Tablo 5

LED armatür detayları

LED ARMATÜRLER					
ÜRÜN NO	ÜRÜN AÇIKLAMASI	ADET	BİRİM GÜÇ (W)	TOPLAM GÜÇ (kW)	YILLIK ENERJİ TÜKETİM (Euro)
No.1	GOLEDO-T 40 LED LT2037.765-EN	40	87 W	3,48 kW	6.785,07 €
No.2	GOLEDO-T 64 LED LT2037.767-EN	531	110 W	58,41 kW	113.883,88 €
No.3	GOLEDO-T 80 LED LT2037.766-EN	28	174 W	4,87 kW	9.499,10 €
No.4	GOLEDO-T 160 LED LT2037.760-EN	264	348 W	91,87 kW	179.125,83 €

Tablo 5’de armatür cins, adet, toplam güç ve yıllık tüketim maliyetleri verilmiştir. Bu verileri göre alternatif LED sistem tasarımında toplam 863 adet armatür kullanılmış, 158,63 kW toplam güç tüketimi oluşmuş ve 309.293,87 Euro yıllık tüketim miktarıdır.

Tablo 6

HPS aydınlatma yatırım-bakım maliyetleri

HPS ARMATÜRLER YATIRIM VE BAKIM MALİYETLERİ					
ÜRÜN NO	ÜRÜN AÇIKLAMASI	ADET	ARMATÜR BİRİM FİYATLARI	YATIRIM MALİYETLERİ (Euro)	YILLIK BAKIM MALİYETLERİ (Euro)
No.1	VIALOX NAV-T 150W SUPER 4Y	738	19,01 €	14.029,38 €	3.468,6 €
No.2	VIALOX NAV-T 250W SUPER 4Y	32	23,59 €	754,88 €	176 €
No.3	VIALOX NAV-T 400W SUPER 4Y	416	22,69 €	9.439,04 €	1456 €

Tablo 6’da HPS armatürlerin birim fiyatları 04.01.2023 tarihi itibarıyla tabloya işlenmiş olup yukarıda belirtildiği gibidir. Tablodaki armatür birim fiyatları esas alınarak HPS tip armatürlerin toplam yatırım maliyeti 24.223,30 € şeklindedir. Yıllık bakım maliyetleri esas alınırken HPS armatürlerin ortalama ömürlerinin 30.000 saat olduğu kabul edilmiş ancak uygulamada ve gerçekleştirilmede karşılaşılan bir takım problemler de göz önünde bulundurularak projenin uygulayıcısı ve projelendirme firmalarının bu alandaki bilgi, beceri ve tecrübesine de danışılarak yıllık bakım maliyetleri yaklaşık olarak yukarıda görüldüğü gibi hesaplanmıştır. Bu hesaba esas veriler olarak HPS ampul birim fiyatı olarak 3,2 € ve ampul değişim adeti başına işçilik maliyeti 1,5 € olarak alınmış ve yıllık bakım maliyeti çıkarılmıştır. Sonuç olarak yıllık bakım maliyetleri yaklaşık olarak toplam 5.100,6 € belirlenmiştir.

Tablo 7

LED aydınlatma yatırım-bakım maliyetleri

LED ARMATÜR YATIRIM VE BAKIM MALİYETLERİ					
ÜRÜN NO	ÜRÜN AÇIKLAMASI	ADET	ARMATÜR BİRİM FİYATLARI	YATIRIM MALİYETLERİ (Euro)	YILLIK BAKIM MALİYETLERİ (Euro)
	GOLEDO-T 40 LED				
No.1	LT2037.765-EN	40	600 €	24.000 €	0 €
	GOLEDO-T 64 LED				
No.2	LT2037.767-EN	531	600 €	318.600 €	0 €
	GOLEDO-T 80 LED				
No.3.	LT2037.766-EN	28	700 €	19.600 €	0 €
	GOLEDO-T 160 LED LT2037.760-				
No.4	EN	264	800 €	211.200 €	0 €

Tablo 7’de LED armatürlerin birim fiyatları 04.01.2023 tarihi itibariyle tabloya işlenmiş olup yukarıda belirtildiği gibidir. Önemli bir not olarak belirtilmelidir ki, alternatif aydınlatma tasarımı olarak LED sistem armatürleri Heper Grup Aydınlatma firmasının teknik desteğiyle seçilmiş ve armatür yerleşim planı yapılmıştır. Benzer şekilde ilgili firmanın Türkiye Satış Müdürü Sn. Umut Yıldırım’ın tavsiyesi üzerine yatırım ve bakım maliyetleri birlikte olarak şekilde verilmiş ancak yatırım ve bakım maliyetleri oransal olarak dağıtılmış ve tabloya işlenmiştir. Bakım maliyetleri oldukça düşük olduğu ve pratik uygulamada HPS sistemde olduğu gibi lamba değişimi söz konusu olmadığı için sık bakım gerektiren tipte armatürler değildir. Bu sebeple bakım maliyetleri yatırım maliyetinin içinde olacak şekilde finansal analize dahil edilmesi gerektiği endüstriyel tasarım ve uygulama firmasının tavsiyesiyle bakım maliyetleri sıfır olarak kabul edilmiştir. İlgili LED armatürlerin kullanım ömürleri olarak üretici firma tarafından 100.000 saat öngörülmüştür. LED sistem yatırım maliyeti toplam 573.400 Euro olarak belirlenmiştir.

Tablo 8

HPS-LED enerji giderleri

Yıl	HPS Sistem Enerji Gideri	LED Sistem Enerji Giderleri	Enerji Tasarruf Tutarı
1y	555.868,75 €	309.293,87 €	246.574,88 €
2y	561.427,44 €	312.386,81 €	249.040,63 €
3y	567.041,71 €	315.510,68 €	251.531,03 €
4y	572.712,13 €	318.665,79 €	254.046,34 €
5y	578.439,25 €	321.852,45 €	256.586,81 €
6y	584.223,65 €	325.070,97 €	259.152,67 €
7y	590.065,88 €	328.321,68 €	261.744,20 €
8y	595.966,54 €	331.604,90 €	264.361,64 €
9y	601.926,21 €	334.920,95 €	267.005,26 €
10y	607.945,47 €	338.270,16 €	269.675,31 €
TOPLAM	5.815.617,04 €	3.235.898,26 €	2.579.718,78 €

Tablo 8’de HPS sistem ve LED sistem enerji giderleri 10 yıllık akışta gösterilmiştir. Çalışmamıza konu olan LED armatürlerin datasheetlerinde öngörülen kullanma ömürleri yaklaşık olarak 10 yıla karşılık geldiği için bu şekilde gösterim yapılmıştır. Yıllar arasındaki elektrik birim fiyatındaki artış değeri net olarak öngörülemezle birlikte %1 olarak kabul edilerek hesaplamalar yapılmıştır. Tabloda net olarak görüldüğü üzere 10 yıllık sürecin sonunda toplam enerji tasarrufumuz 2.579.718,78 Euro olarak hesaplanmıştır.

Tablo 9

HPS-LED işletme karı

Yıl	HPS Sistem Enerji Gideri ve Ampul Değiştirme Gideri	LED Sistem Enerji Gideri	Yıllık Enerji Tasarruf Tutarı	İşletme Karı
1y	560.969,35 €	314.394,47 €	246.574,88 €	0,00 €
2y	566.579,05 €	317.538,42 €	249.040,63 €	0,00 €
3y	572.244,84 €	320.713,80 €	251.531,03 €	203.070,44 €
4y	577.967,29 €	323.920,94 €	254.046,34 €	457.116,78 €
5y	583.746,96 €	327.160,15 €	256.586,81 €	713.703,59 €
6y	589.584,43 €	330.431,75 €	259.152,67 €	972.856,26 €
7y	595.480,27 €	333.736,07 €	261.744,20 €	1.234.600,46 €
8y	601.435,07 €	337.073,43 €	264.361,64 €	1.498.962,11 €
9y	607.449,43 €	340.444,17 €	267.005,26 €	1.765.967,37 €
10y	613.523,92 €	343.848,61 €	269.675,31 €	2.035.642,68 €
TOTAL	5.868.980,60 €	3.289.261,82 €	2.579.718,78 €	2.035.642,68 €

Tablo 9’da işletme giderleri üzerine bakım maliyetleri de eklenerek aynı tabloda gösterilmiştir. İki ayrı sistem tasarımı üzerinden giderleri farkı alınarak her yıl başına işletmenin LED tasarımıyla aydınlatılması durumunda elde edeceği işletme karı hesaplanmıştır. Bu tabloyu takiben yatırım, işletme ve bakım maliyetleri üzerinden eğer LED sistem tasarımı yapılmış olsaydı maliyetin kendini yenileme (amorti etme) süresi üzerinden fikir sahibi olunmuştur.

Yatırımın kendini yenileme hesabı maliyet farkının ortalama yıllık enerji tasarrufuna bölünmesiyle elde edilmiştir. Bu denklemden toplam maliyet farkı 544.076,10 Euro, ortalama yıllık enerji tasarrufu 10 yıllık verilmiş tablonun yıllık enerji tasarrufu sütununun aritmetik ortalaması alındığında 257.971,88 Euro olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak teoride 2,11 yılda LED sistem tasarımıımızın kendini amorti ettiği görülmüştür.

Karbondioksit salınımları konusunda 2020 yılına kadar kWh başına 563 gram olarak kabul görmüş referans değer 2020 itibariyle yıllık ortalama %2.1 düşüşle kWh başına 437 gram, 0,437 ton olarak güncellenmiştir. (şahin ve Esen, 2022)

Yukarıda verilmiş olan kWh başına salınım miktarını HPS ve LED sistemlerin yıllık enerji tüketim farkıyla çarptığımızda azaltılmış olan emisyon sonucuna ulaşılmaktadır. HPS ve LED sistemler arasındaki enerji tasarrufu miktarımız 1.107.842 kWh olarak tespit edilmiştir. Referans değerimiz 0.437 ton ile çarptığımızda 484,13 ton zararlı CO₂ emisyon salınımını gerçekleşmeyeceği tespit edilmiştir.



BEŞİNCİ BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapmış olduğumuz bu çalışmada tünel aydınlatma sistemleriyle ilgili detaylı teorik bilgiler verilmiş, uygulamada dikkat edilmesi gereken tasarım parametreleri üzerinde durulmuştur. Çok net şekilde görülmektedir ki tünel aydınlatma sistemleri aydınlatma sistemlerinin en karmaşık olduğu ve titiz çalışma gerektirdiği bir kez daha anlaşılmıştır. Bu bilgiler ışığında Belkahve Tüneli mevcut aydınlatma sistemi HPS sistem tasarımı detaylı analiz edilmiş olup, alternatif olarak bölgesel parıltı hesaplarına sadık kalarak aynı kalitede ancak daha düşük enerji tüketecek şekilde LED sistem tasarımı yapılmıştır. Bu iki sistem analiz edilirken sistem tasarım gerçeklemlerinde daha önce belirttiğimiz gibi Relux Tunnel paket programı kullanılmıştır. Diğer tüm aydınlatma sistemlerinde olduğu gibi tünel aydınlatma sistemlerinde de en temel amaç sürücülerin tünele günün herhangi bir saatinde güvenli şekilde yaklaşması, girmesi ve tüneli terk etmesidir. Bu süreçte aydınlatma teknik esasları oluşturulurken insan gözünün ve algı mekanizmasının ve tüm fizyolojik esasların dikkate alındığı ve yıllarca süren çalışmalar ve uygulamalar sonucunda rehber niteliğinde olan Uluslararası Aydınlatma Komisyonu Teknik Raporu gerekli oldukça güncellenecek şekilde yayımlanmıştır. Bu teknik rapora paralel şekilde ülkemiz özelinde Karayolları Genel Müdürlüğü teknik şartnameleri de mevcuttur. Tüm bu çalışmalar ve resmi yayınların ortak amacı yukarıda belirttiğimiz üzere tüneldeki seyir süresi boyunca sürücünün emniyet ve rahatlık içinde geçişini tamamlaması ilkesine dayanmaktadır.

Yapmış olduğumuz çalışmamızda hayatımızın bir çok alanında yer bulmakta olan, her geçen gün kullanım alanları ve teknolojisi gelişen LED aydınlatma teknolojilerinin her alanda olduğu gibi tünel aydınlatması alanında da büyük avantajlar sağladığı tespit edilmiştir. Özellikle uzun kullanım ömürleri (Yaklaşık olarak günümüz teknolojisiyle 80.000 – 100.000 saat kullanım ömrü olarak değişkenlik gösterebilmektedir.) ve enerji tasarrufu sağlamaları ve aydınlatma konforu açısından daha verimli olmaları her alanda tercih edilirliliğini de arttırmaya başlamıştır. Enerji üretimi ve hammadde sıkıntılarının da artışı ve kaynak arayışlarıyla birlikte mevcut enerjimizi verimli kullanmak da çok kritik öneme sahip bir konu haline gelmiştir. Enerjinin yönetilebilirliğiyle birlikte tasarrufun ve verimliliğin her geçen gün daha çok önem kazandığı dünyamızda LED teknolojilerini diğer aydınlatma armatürleriyle genel olarak kıyasladığımızda;

- Enerji tüketimlerini yönetebilmek ve tasarruf
- Aydınlatma proje uygulamalarında fotometrik uygunluk
- Armatür bakım maliyetlerinin neredeyse sıfır olması
- Ürün mukavemetinin yüksek olması
- Otomatik kontrol tasarımlarına kolay entegrasyon
- SCADA sistemleriyle haberleşmede kolay sinyalizasyon
- Aydınlatma kalitesi, ışığın kontrol edilebilirliği ve dağılımının denetimi
- Ürün performans sürekliliği
- Kolay kurulum, montaj
- Hızlı tedarik
- Uzun kullanım ömürleri ve daha çevreci olmaları

gibi daha da çeşitlendirilebilecek bir çok noktada diğer aydınlatma armatürlerine kıyasla ciddi farklar yaratmaktadır.

Bununla birlikte LED aydınlatma armatürleriyle ilgili olarak olumsuz görülebilecek yönleri belirtmemiz gerekirse;

- Yatırım maliyetlerinin oldukça yüksek olması
- Ölçüm kriteri ve standart yetersizliği
- Armatür sıcaklığının artması
- Çok eski bir teknoloji olmaması nedeniyle üretim tecrübesizliği (Onaygil, 2016)

Belkahve Tüneli gerçekleştirilmiş aydınlatma sistemi ve bilgisayar destekli LED sistem tasarımı göz önünde bulundurulduğunda Belkahve Tüneli bölgesindeki en sık rastlanan dış koşullar ve birim alan parlıltı seviyelerini karşılayacak şekilde tasarım yapılmıştır. Ancak LED armatür yatırım maliyetleri ve ekonomik koşullar ve yatırımcı veya proje uygulayıcılar da göz önünde bulundurulurken daha verimli çözümler gerçekleştirilebilir. Çözüm önerisi olarak göz adaptasyon eğrileri ve diğer görüş konforu parametreleri göz önünde bulundurulurken kademeli şekilde ve otomatik kontrolle işletilen, anlık gün ışığı parlıltı seviyelerine göre değişkenlik gösterebilen daha akıllı sistem tasarımları günümüze çok da uzak görünmemektedir. Bu noktada projelendirmede dikkat edilmesi gereken en önemli noktalar arasında bahsedilen otomatik kontrollü değişken sistemin haberleşme tasarımı,

sensör ve veri akışındaki diğer önemli ölçüm elemanlarından gelen sinyalizasyonun doğru sağlanabilmesi, ilgili haberleşme ve kontrolör sistem elemanlarının kalibrasyon ve bakım maliyetleri gibi noktalara dikkat edilmelidir.

- Daha önce de bahsedildiği üzere en ciddi yatırım maliyetlerine ve enerji giderlerine sebep olarak bölgenin tünelin eşik bölgesi olduğu bilinmektedir. Eşik bölgesi ve buna bağlı olarak tüm tünel aydınlatma sistem tasarımı yapılırken en önemli değişkenimiz durma mesafesidir. Bu sebeple durma mesafesini daha aşağıya çekebilmek adına en basit yöntemlerden birisi hız sınırlarını daha aşağıya çekmek olacaktır. Teoride en basit yöntem olarak görülse de, uygulama noktasında sürüş konforu ve zaman kayıplarından dolayı bir takım sorunlar doğuracağı düşünülmektedir.
- Tünel yaklaşım bölgesi ve tünelin hemen girişindeki betonarme yapı mümkün olduğunca yansıtacak şekilde değil, onun yerine ışığı soğuracak ve daha düşük yansımalara sebep olacak mat yapılar, yıl boyu yeşil kalabilecek tipte ağaçlandırmalar veya sarmaşık şeklinde büyük yüzeyleri kaplayacak yapılar tercih edilmelidir. Buna ek olarak betonarme veya taş yapıların kullanıldığı bölgelerde de ne kadar mat, ışık yansıtıcılığı düşük materyel kullanılırsa tünele yaklaşımda olan sürücüyü çeyre uyarılarından o kadar çok korumuş olacağız. Buna paralel olarak göz adaptasyonu daha hızlı sağlanabilecek ve eşik bölgesinin uzunluğu kısaltılabilecektir, enerji tüketim giderleri düşürülecektir.
- Giriş bölgesindeki yansıtıcılığı düşük mat yapı tasarımına ek olarak, arazi şartları ve uygulanabilirliği de değerlendirilerek tünel giriş bölgesine PV (Fotovoltaik) güneş panelleri montajı ile doğal mat bir yüzey sağlanabilir. Doğal mat tasarım görüntüsüne ek olarak PV panel kapasitelerine göre acil aydınlatma, yaya kaçış yollarının enerji beslemeleri veya bilgilendirme tabelalarının enerji beslemeleri bu paneller tarafından sağlanabilir. Hem dış tasarımda yaklaşma yolunda ve tünel girişinde mat bir yapı inşa edilmiş olacak hem de sarfiyat miktarlarına bakmaksızın işletme ömrü boyunca sürdürülebilir, yenilenebilir bir kaynak kullanılarak işletme enerji tüketim giderleri belirli ölçekte azaltılmış olacaktır.
- Daha önce de belirttiğimiz gibi akıllı kontrol sistemlerine bağlı olarak anlık olarak dış bölge aydınlık şiddetine entegre edilmiş değişken bir aydınlatma tasarımıyla optimizasyon sağlanarak enerji tüketimleri en aza indirilebilir.

- Tüm çalışmamıza konu olduğu üzere, LED armatür kullanımı çok önemlidir.
- Tünelin giriş bölgesinden başlayacak şekilde yaklaşım bölgesine doğru uzayan pergule tarzı filtreli betonarme veya farklı içerikte perguleli yapılar oluşturularak eşik bölgesinin başlangıcını tünel dışına taşıyarak doğal ışık kaynağı kullanımını arttırabilir, göz adaptasyon sürecine tünel içerisine girmeden başlanabilmektedir. Bu durumda daha önce de çokça kez bahsedildiği üzere eşik bölgesi maliyetleri azaltılacaktır.
- Bir diğer alternatif çözüm önerisi olarak “light-pipes” ve “heliostat” şeklinde nitelendirilen gün ışığını tünel iç bölgelerine taşıyabilecek yapılar inşa edilebilir. Özet olarak aynalama yöntemleri ve fiber optik kabloların çalışma mantığı kullanılarak gün ışığının tünel iç bölgelerine taşınabilmesi ve yapay aydınlatmalara duyulan ihtiyaçların belirli oranlarda azaltılması hedeflenmiştir. A. Pena-García (2022)’de daha sürdürülebilir altyapılar, enerji tasarrufu ve tünel aydınlatmaları konusunda tavsiyelerin paylaşıldığı çalışmada uygulama yöntemleri daha detaylı olarak açıkça belirtilmiştir.
- Her tünelin kendi içerisinde kendine özgü iç ihtiyaçlarından, aydınlatma ihtiyaçlarından ve kendine özgün tasarımlarından daha önce bahsetmiştik. Benzer şekilde alternatif çözüm önerilerinin ve uygulanabilirliklerinin de her tünel özelinde olduğu unutulmamalıdır. Bu kapsamda sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılabilirlik durumuna göre rüzgar, güneş, jeotermal, hidroelektrik veya akıntı gibi doğal hareketlerin kaynak olarak kullanan sürdürülebilir enerji kaynaklarına entegrasyonu teoride önemli bir alternatif olabilir.

Ek olarak tüm mühendislik branşlarının entegre bir sistem olduğu ve her birinde yaşanan gelişmelerin bir diğerini etkileyebileceği unutulmamalıdır. Tasarım, armatür seçimleri, armatür tiplerine göre daha verimli aydınlatma sistemleri, gün ışığını daha verimli kullanma yöntemleri, yansıtıcılık katsayılarındaki değişkenlikler gibi daha önce bahsettiğimiz çözümlere ek olarak; malzeme biliminde olabilecek bir gelişmeyle tünel yan yüzeylerinin ve asfalt yüzeyinin yansıtıcılık katsayılarında artış sağlanabilmesi, araç fren teknolojilerinin gelişme veya henüz kullanımda olmayan yeni tip aydınlatma armatür tasarımlarıyla daha farklı ve verimli çözümlerin de üretilebileceği unutulmamalıdır.

KAYNAKÇA

- Akbulut, A., (2006). Tünel Aydınlatması. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Avcil, S., (2019). Tünel Aydınlatması ve Aydınlatmanın Karşılaştırmalı Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bitlis.
- Aydınlanma (2023, 24 Mayıs). Erişim adresi: <https://www.fizik.net.tr/site/aydinlanma/>
- Baykal, E., (1997). Metro Sisteminin Aydınlatılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Belkahve Tüneli Akıllı Ulaşım ve Network Sistemi (2023, 24 Mayıs) Erişim adresi: <https://gsl.com.tr/belkahve-tuumlneli-ak30511305-ula351305m-ve-network-sistemi.html>
- Bommel, W. J. M., Boer J. B., (1980). *Road Lighting*, Philips Technical Library.
- Bouroussis, C. A., Nikolaou, D. T., Topalis, F. V., (2019). *Optimization of Tunnel Lighting control by re-aiming of external L20 Luminance meter.Proceedings of 29th CIE Session 2019*, Washington D.C., USA, June 14 – 22, 2019.
- Bozkurt, İ., (2009). Aydınlatmada Verimlilik. *3e Electrotech Dergisi*, 15(5): 32-38.
- Cebeci, S. E., (2009). Aydınlatma Tasarımı ve Enerji Tasarrufu. *Bina Elektronik Sistem Teknolojileri Dergisi*, Bileşim Yayıncılık A.Ş., 8(9): 22-27.
- Cengiz, M. S., (2019). Tünel Aydınlatma Sistemlerinde Aydınlik Düzeyi Toleransının Bakım Faktörüne Göre Saptanması. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*. 11(2), Haziran.
- Çelebi, F., Karatekin, C., (2014). İstanbul Halit Ulukurt Tünelinde Eşik Parlıltı Değeri ve Fren Mesafesine Göre LED Armatür ile Aydınlatma Tasarımı. *Eleco 2014 Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, 27–29 Kasım 2014, Bursa.
- Eren, N., (t.y.). Yol Aydınlatma Armatürleri İçin Bakım Faktörünün Belirlenmesi, Ankara.

Farsakoğlu, O. M., Atık, İ., Hasırcı, H. Y., (2014). LED Aydınlatma Sistemlerinin Çevre Kirliliğini Azaltmadaki Etkileri. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19:(1-2) 94-103.

Gençoğlu, M. T., Özbay E., (2007). Aydınlatmada Enerji Verimliliği Yöntemleri. *XII. Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Kongresi*, 4-6 Kasım 2007, Eskişehir, s: 28-29.

Guide for The Lighting of Road, (1990). CIE International Commission on Illumination.

Heperlighting Goledo-T (2023, 24 Mayıs) Erişim adresi:

<https://heperlighting.com/tr/goledo-t-lt-goledo/>

Inventronics (2023, 24 Mayıs) Erişim adresi: https://www.inventronics-light.com/ecat/VIALOX%20NAV-T%20SUPER%204Y-High-pressure%20sodium%20vapor%20lamps%20for%20open%20and%20enclosed%20luminaires-High%20intensity%20discharge%20lamps-Lamps-OSRAM%20Products/com/en/GPS01_1028106/ZMP_58295/

Inventronics (2023, 24 Mayıs) Erişim adresi: https://www.inventronics-light.com/ecat/VIALOX%20NAV-T%20SUPER%204Y-High-pressure%20sodium%20vapor%20lamps%20for%20open%20and%20enclosed%20luminaires-High%20intensity%20discharge%20lamps-Lamps-OSRAM%20Products/com/en/GPS01_1028106/ZMP_58295/

Inventronics (2023, 24 Mayıs) Erişim adresi: https://www.inventronics-light.com/ecat/VIALOX%20NAV-T%20SUPER%204Y-High-pressure%20sodium%20vapor%20lamps%20for%20open%20and%20enclosed%20luminaires-High%20intensity%20discharge%20lamps-Lamps-OSRAM%20Products/com/en/GPS01_1028106/ZMP_58297/

Karayolu Tünelleri ve Bağlantı Yolları Elektrik, Elektronik, Mekanik ve Çeşitli Kontrol Sistemleri, (2013). Karayolları Genel Müdürlüğü.

- Onaygil, S., (1990). Tünel Aydınlatmasında Eşik Bölgesi Parlıltısının Tayini. Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği, İstanbul.
- Onaygil, S., Ö. Güler, Ö., Erkin, E., (2009). Yol Aydınlatmalarında LED Kullanımı, V. *Ulusal Aydınlatma Sempozyumu*, İzmir.
- Pelsan Aydınlatma Hesapları (2023, 24 Mayıs). Erişim adresi: <https://pelsan.com.tr/aydinlatma-hesaplari>
- Peña-García, A. (2022). Sustainable tunnel lighting: One decade of proposals, advances and open points. *Tunneling and Underground Technology*, 119.
- Peña-García, A., Gil-Martín, L.M. (2013). Study of pergolas for energy savings in road tunnels. Comparison with tension structures. *Tunneling and Underground Space Technology*, 35, 172-177.
- Pena-García, A., Gil-Martín, L.M., Espín-Estrella, A., Aznar-Dols, F., (2010). Energy saving in road tunnels by means of transparent tension structures. In: International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10). Granada (Spain).
- Perdahcı, C., Hanlı, U, (2009). Verimli Aydınlatma Yöntemleri. *III. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, 21-22 Mayıs 2009, Kocaeli, 323-327.
- Perdahcı, C., Hanlı, U., Karaca, S., (2011). Led Technology. *The 10th International Conference on Sustainable*, 4-7 September 2011, İstanbul, 12-23.
- Salata, F., Golasi, I., Bovenzi, S., Vollaro, E.D.L., Pagliaro, F., Cellucci, L., Coppi, M., Gugliermetti, F., Vollaro, A.D.L. (2015). Energy Optimization of Road Tunnel Lighting Systems. *Sustainability*, 7(7), 9664-9680.
- Sucugil, R. M., (2000). Tünel Aydınlatma Sistemlerinde Enerji Tasarrufu ve Aydınlatma Teknolojisi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Şahin, H., Esen, H., (2022). The usage of renewable energy sources and its effects on GHG emission intensity of electricity generation in Turkey. *Renewable Energy*, 192, 859-869.

Technical Report Guide For The Lighting of Road Tunnels And Underpasses, (2004). CIE International Commission On Illumination. CIE 88:2004, 2nd Edition.

Technical Report Road Lighting Calculations, (2000). CIE International Commission On Illumination. CIE 140:2000.

Tünel Giriş Fotometresi (2023, 24 Mayıs) Erişim adresi: <https://www.windltd.net/lumiport>

Uzaklığın karesiyle ters orantılı (2023, 24 Mayıs). Erişim adresi: https://tr.wikipedia.org/wiki/Ters_kare_yasas%C4%B1#:~:text=%C4%B0ki%20elektrik%20g%C3%BCc%C3%BCyle%20y%C3%BCkl%C3%BC%20par%C3%A7ac%C4%B1klar,1015%20i%C3%A7inde%20bir%20k%C4%B1s%C4%B1mdan%200azd%C4%B1r.

Vollaro, A., (2016). Management optimization of the luminous flux regulation of a lighting system in road tunnels. A first approach to the exertion of predictive control systems. *Sustainability* 8 (11), 1092.

Yol Aydınlatma Armatürleri Teknik Şartnamesi, (1995). Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. Malzeme Yönetimi ve Satınalma Dairesi Başkanlığı.