

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TÜNEL AYDINLATMASI

Elektrik Müh. Aykut AKBULUT

**FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Tesisleri Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr.Ferit ATTAR

İSTANBUL, 2006

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ	1
1.1 Aydınlatma ve Önemi	1
2. TEMEL FOTOMETRİK TANIMLAR	3
2.1 Fotometrik Büyüklükler	3
2.1.1 Işık Gücü	3
2.1.2 Işık Akısı	3
2.1.3 Işık Şiddeti	4
2.1.4 Aydınlik Düzeyi	4
2.1.5 Parıltı	4
2.2 Fotometrik Bağıntılar	5
2.2.1 Işık Şiddeti ile Aydınlik Düzeyi Arasındaki Bağntı	5
2.2.1.1 Uzaklıkların Karesiyle Ters Orantı Yasası	5
2.2.1.2 Kosinüs Yasası	5
2.3 Fizyolojik-Optik Esaslar	6
2.3.1 Adaptasyon	6
2.3.2 Kontrast Duyarlılığı	7
2.3.3 Şekil Duyarlılığı (Keskinlik veya Seçicilik)	8
2.3.4 Düzgünlük	9
2.3.5 Titreşim (Flicker) Etkisi	10
2.3.6 Kamaşma (Glare)	13
3. IŞIK KAYNAKLARI VE ARMATÜRLER	15
3.1 Lambalarda Kullanım Süresi / Ömür	17
3.2 Işık Verimi	18
3.3 Lamba Çeşitleri	20
3.3.1 Metal Halide Lamba	21
3.3.2 Yüksek Basınçlı Civa Buharlı Lamba	22
3.3.3 Yüksek Basınçlı Sodyum Buharlı Lamba	23
3.3.4 Alçak Basınçlı Sodyum Buharlı Lamba	24

3.3.5	Tünel Aydınlatması Açısından Lambaların Kıyaslanması	25
3.4	Armatürler	31
3.5	Aydınlatma Sistemleri ve Kontrast	37
3.5.1	Enine (Transverse)	37
3.5.2	Boyuna (Longitudinal)	38
3.5.3	Zıt-Yönlü (Counter-beam)	38
3.5.4	Eş – Yönlü (Pro-beam)	38
4.	TÜNELLER VE AYDINLATMA	42
4.1	Genel Anlamda Tünel Tanımı	42
4.2	Tünel Aydınlatma Tekniği	44
4.2.1	Uluslararası Aydınlatma Komisyonu’nun Önerileri	46
4.2.2	Aydınlatma Açısından Tünel Tipleri	46
4.2.2.1	Kısa Tüneller	46
4.2.2.2	Uzun Tüneller	48
4.2.3	Tünellerde Gündüz Aydınlatması ve Bölgeler	49
4.2.3.1	Yaklaşma Bölgesi	52
4.2.3.1.1	Yaklaşma Bölgesi Parıltısının Tayini	52
4.2.3.1.1.1	Birinci Yöntem	52
4.2.3.1.1.2	İkinci Yöntem	54
4.2.3.2	Giriş Bölgesi	56
4.2.3.2.1	Eşik Bölgesi	57
4.2.3.2.1.1	Eşik Bölgesi Parıltısının Tayini	57
4.2.3.3	Geçiş Bölgesi	60
4.2.3.4	İç Bölge	61
4.2.3.5	Çıkış Bölgesi	62
4.2.4	Gece Aydınlatması	63
4.2.5	Aydınlatma Sisteminin Dış Aydınlığa göre Kontrolü	64
4.2.6	Acil İhtiyaç Aydınlatması	65
4.2.7	Diğer Faktörler	66
5.	TÜNEL AYDINLATMA UYGULAMALARI (DEVREN TÜNELİ)	67
5.1	Tasarım ve Projelendirme Aşamaları	67
5.2	Tünel Aydınlatma Sisteminin Bilgisayar Destekli Analizi	69
5.2.1	TunLight Programının Kullanımı	69
5.2.2	Hesaplamalar Sonucu Elde Edilen Değerler	78
5.2.2.1	Gündüz Aydınlatması için	78
5.2.2.2	Gece Aydınlatması için	81
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	83
	KAYNAKLAR	88
	EKLER	90
	Ek 1 Devren Tüneli Aydınlatma Tasarımı	91
	ÖZGEÇMİŞ	92

SİMGE LİSTESİ

C	Kontrast oranı
d	Uzaklık
E_V	Dikey aydınlık düzeyi
h	Yükseklik
I	Işık şiddeti
L	Parıltı
L_{20}	Yaklaşma bölgesi parıltısı
L_C	Gökyüzü parıltısı
L_E	Çevresel parıltısı
L_{ex}	Çıkış bölgesi parıltısı
L_{in}	İç bölge parıltısı
L_{tr}	Geçiş bölgesi parıltısı
L_R	Yol parıltısı
L_{th}	Eşik bölgesi parıltısı
p	Yansıtma faktörü
Q	Işık akısı
S	Şekil duyarlılığı
U_l	Boyuna düzgünlük
U_o	Ortalama düzgünlük
γ	Gökyüzü %'si
ρ	Yol %'si
ε	Çevrenin %'si
τ	Tünel girişinin %'si

KISALTMA LİSTESİ

ABASO	Alçak Basıncılı Sodyum Buharlı Lamba
BS	British Standarts
CIE	Commission Internationale de L'éclairage
DIN	Deutsches Institut für Normung
HID	High Intensity Dicharge
IEC	International Electrotechnical Commission
SEV	Schweizerischen Elektrotechnischen Verein
YÜBACI	Yüksek Basıncılı Cıva Buharlı Lamba
YÜBASO	Yüksek Basıncılı Sodyum Buharlı Lamba

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Zıt ışıklı aydınlatma düzeninin prensibi.....	8
Şekil 2.2 Keskinliğin aydınlık şiddetine göre değişimi.....	9
Şekil 2.3 Tehlikeli titreme frekansı bölgesi.....	11
Şekil 2.4 Armatürler arası mesafenin araç hızına bağlı olarak değişimi.....	12
Şekil 2.5 Titreme frekansı ve (L_{max}/L_{min})'a göre müsaade edilen sınırlar.....	13
Şekil 3.1 Metal halide lamba.....	21
Şekil 3.2 Yüksek basınçlı cıva buharlı lamba.....	22
Şekil 3.3 Yüksek basınçlı sodyum buharlı lamba.....	23
Şekil 3.4 Alçak basınçlı sodyum buharlı lamba.....	25
Şekil 3.5 C / Gama Sistemi.....	32
Şekil 3.6 Simetrik Armatür için Farklı Düzlemlerdeki Işık Dağılım Eğrileri.....	33
Şekil 3.7 Asimetrik bir Armatürün 3 farklı Düzlemdeki Dağılım Eğrileri.....	34
Şekil 3.8 Yatay Aydınlatma Armatürleri için Armatür Siperlik Sınıflandırması.....	35
Şekil 3.9 Aydınlatma Sistemlerinden Görüntüler.....	40
Şekil 3.10 L/E_v Oranının Tespiti.....	41
Şekil 4.1 Tünel aydınlatma tekniğinde büyük önem arz eden giriş bölgesi.....	45
Şekil 4.2 Kısa mesafeli tüneller için “Karanlık Çerçeve” modellemesi.....	47
Şekil 4.3 Bölgelere göre Aydınlık Düzeyleri.....	49
Şekil 4.4 Tünel Aydınlatmasında Bölgeler ve önemli Noktalar.....	50
Şekil 4.5 CIE farklı uzunluklardaki tüneller için gündüz aydınlatması.....	51
Şekil 4.6 Tünel Girişinde Çevresel Faktörler.....	55
Şekil 4.7 Tünel giriş bölgesindeki “Kara delik Etkisi”.....	56
Şekil 4.8 Trafik hızına ve yol eğimine bağlı olarak güvenli duruş mesafeleri.....	57
Şekil 4.9 DIN standardına göre araç hızına bağlı olarak L_{th} değerleri.....	60
Şekil 4.10 Çıkış bölgesinde farklı kaplamaların görüşe etkisi.....	62
Şekil 4.11 Çift yönlü bir karayolu tünelinin giriş ve çıkış bölgeleri.....	63
Şekil 4.12 Gün ışığının zamana göre değişim faktörü.....	65
Şekil 5.1 TunLight Konfigürasyonlar Menüsü.....	69
Şekil 5.2 Devren Tüneli Enine Kesit Görünümü.....	70
Şekil 5.3 Tünel Geometrisiyle ilgili Veriler.....	71
Şekil 5.4 Yansıtma ile ilgili Veriler.....	72
Şekil 5.5 Armatürlerle ilgili Veriler.....	74
Şekil 5.6 Armatürlerin Anahtarlanmasıyla ilgili Veriler.....	74
Şekil 5.7 Ölçüm Detaylarıyla ilgili Veriler.....	75
Şekil 5.8 Hesaplama işlemlerinin başlatılması.....	76
Şekil 5.9 Hesaplama sonuçlarının görüntülenmesi.....	77
Şekil 5.10 Hesaplama sonuçlarının görüntülenmesi.....	77
Şekil 6.1 Armatür Kademelendirilmesi durumunda Bağlı Parıltı Oranları.....	84
Şekil 6.2 Tünel Eşik Bölgesinin Ledler Yardımıyla Kılavuzlanması.....	86
Şekil 6.3 Tünel Yaklaşım ve Giriş Bölgelerine eklenecek Parıltı Ölçerler.....	87

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Uygulamada sık karşılaşılan ışık kaynaklarının akı değerleri	4
Çizelge 3.1 Renksel geriverim endeksi grupları	17
Çizelge 3.2 Yübaso Lamba Ortalama Verileri.....	28
Çizelge 3.3 Abaso Lamba Ortalama Verileri.....	29
Çizelge 3.4 ABASO ve HID Lambalar Karşılaştırma Tablosu	30
Çizelge 3.5 Aydınlatma Sistemleri Teknik Verileri	39
Çizelge 3.6 Aydınlatma sistemleri için L/E_v oranları	41
Çizelge 4.1 Dış Bölge Parıltısının Farklı Durumlar için Değerleri	53
Çizelge 4.2 Yaklaşma Bölgesindeki Aydınlık Düzeyine Bağlı Olarak Giriş Bölgesindeki Parıltının Değişimi.....	56
Çizelge 4.3 Yaklaşma Bölgesi ve Eşik Bölgesi için Önerilen Oran Değerleri.....	58
Çizelge 4.4 Onaygil'in çalışmaları sonucu elde edilen L_{20} ve L_{th} değerleri.....	59
Çizelge 4.5 Fren mesafesi ve Trafik yoğunluğuna bağlı olarak Tünel iç bölgesi parıltı düzeylerinin bulunması.....	62
Çizelge 4.6 Yaklaşma Bölgesindeki Aydınlık Düzeyine Bağlı Olarak Giriş Bölgesindeki Parıltının Değişimi.....	64

ÖNSÖZ

Tünel aydınlatması günümüze kadar üzerinde fazla durulmamış konulardan olmasına rağmen, karayollarındaki sürüş güvenliği açısından son derece önemli olan ve tasarım/kurulum aşamalarında da titizlikle ele alınması gereken bir konudur.

Bu tez hazırlanırken güdülen ana amaç, temel aydınlatma üzerinde çeşitli tanımlamalar da yaparak gerek yapısal gerekse elektriksel anlamda tünel aydınlatması hakkında teoriye dayanan bilgiler vermek ve bu bilgilerin pratiğe aktarılma yolları hakkında incelemeler yapmak olmuştur.

Tünel aydınlatmalarında deneysel sonuçların da büyük önem arz ettiği bir gerçektir. Bu bağlamda teoride verilen bilgilerin uygulamaya dönüştürülebilmesi amacı ile “Alanya-Antalya Karayolu / Devren Tüneli” için tasarım aşamaları açıklanmış ve bu tasarım üzerinde TunLight tünel aydınlatması yazılımı ile bilgisayar destekli ölçümler yapılmış, ortaya çıkan değerler ışığında bir takım öneriler dile getirilmiştir.

Çalışmalarım esnasında beni yönlendiren, bilgi ve tecrübeleri ile önemli katkılar sağlayan tez danışmanım Sayın Yrd.Doç.Dr. Ferit ATTAR’a; hayatımın her aşamasında göstermiş oldukları destek ile bu günlere gelmemi sağlayan aileme; manevi destek ve katkılarından dolayı değerli arkadaşım Sayın Mat.Müh. Seda ŞAHİNLİ’ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Trafik yoğunluğu artışına paralel olarak tünellere duyulan ihtiyaç özellikle dağlık alanlarda büyük ihtiyaç haline gelmiştir. Karayolu tünellerinden beklenen adeta açık ve güvenli bir yoldaki gibi sürüş güvenliği ve rahatlığını sağlaması, ayrıca sürücünün görüş kabiliyetini maksimize etmesidir.

Uzun bir tünel, eğer iyi aydınlatılmamış ise, özellikle güneşli günlerde yaklaşan sürücülere “Kara Delik” gibi görünür. Bu durumun ortaya çıkmasını engelleyip sürücüye görüş kabiliyetini kazandırmak amacıyla, gözün karanlık adaptasyonunu da hesaba katılarak, tünelin eşik (ilk) bölgesi için kuvvetli bir aydınlatma sistemi tasarlanması çok büyük önem arz eder.

Gerek kurulum gerekse işletme masrafları bakımından tünel aydınlatma maliyetinin önemli bir bölümünü oluşturan ve önemi itibarıyla titizlikle üzerinde durulması gereken eşik bölgesi aydınlatma tasarımında, temel olarak yaklaşma bölgesi parıltısı ve trafik hızı baz alınır. Eşik bölgesinin ardından ise tünel çıkışına kadar kademeli olarak parıltı seviyeleri düşürülerek gözün sinirsel adaptasyonuna da uygun şekilde maliyetlerde iyileşme sağlanır.

Çalışmada tünel aydınlatmasındaki optimizasyonun en uygun şekilde sağlanabilmesi için öncelikle temel ışık ve fotometrik tanımlar hakkında bilgiler verilmiş, ardından tünel aydınlatması ve bu alanda uygulamalarına rastlanan armatür çeşitleri hakkında incelemeler ve karşılaştırmalar yapılmıştır.

Tezin son bölümlerinde ise; örnek seçilen “Devren Tüneli” üzerinde pratik anlamda tasarım aşamalarına yönelik bilgilendirmeler yapılmıştır. TunLight bilgisayar yazılımı yardımıyla bazı değişkenlere, karşılaştırılması muhtemel değerler verilerek, çeşitli senaryolara uygun olarak işletme süreciyle ilgili de çeşitli tespitler yapılmış ve bir takım öneriler sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Aydınlatma tekniği, dış aydınlatma, tünel aydınlatması, karayolu tünelleri, armatürler, tünel mimarisi, karayollarında sürüş güvenliği, aydınlatma otomasyonu, bilgisayar destekli aydınlatma hesapları.

ABSTRACT

In parallel to the increase in traffic volume, the requirement of tunnels becomes vital particularly in mountainous areas. It is expected that tunnels should provide a driver's safety and comfort and maximize his/her visual ability as if on a safe open road.

A long tunnel, particularly on bright sunny days, appears as a black hole for approaching drivers when it is not well illuminated. In order to assist the driver's visual ability, and to take the dark adaptation of the eye into account, it is necessary to have intensive lighting in the threshold (first) zone of the tunnel.

The lighting design of the threshold zone, which took a major part in tunnel lightning costs in terms of total installation and operating costs, is fundamentally related with the luminance level of the access zone and the speed of traffic. After the threshold zone, with increasing the illumination levels step by step unique to adaptation of the human eye, some improvement is achieved for the costs.

In this work, in order to provide the optimum tunnel lightning, firstly, information regarding the basics of light and photometric definitions are given. In the following chapters, researches and comparisons are carried out regarding tunnel lightning and lighting lamps in this field.

In the conclusion of the thesis, practical information with regard to design stages of "Devren Tunnel", which was taken as an example, are given. In assistance of TunLight software, possible values are assigned to some variables in comply with some scenarios whereon some determinations and suggestions are presented.

Keywords: Lighting techniques, exterior lighting, tunnel lighting, highway tunnels, lighting armatures, tunnel architecture, highway driving safety, lighting automation, computer aided lighting calculations

1. GİRİŞ

1.1 Aydınlatma ve Önemi

Temel anlamda aydınlatma, nesnelere ya da çevreye “görme” amaçlı ışık uygulanmasıdır. İnsanoğlu için ışık enerjisi çok büyük önem arz etmektedir. Şöyle ki; yapılan eylemlerin doğru ve düzgün olarak yapılması için en önemli algılayıcı gözdür. Çevrenin göz tarafından algılanması ise yansıyan ışıkların toplanıp impuls ve kimyasal tepkimeler meydana getirmek suretiyle beynin ilgili merkezlerine iletilmesinden ibarettir. Güneş, ay ve yıldızlar yüzyıllar boyu doğal birer ışık kaynağı olmuşlar ve görme olayının gerçekleşmesini sağlamışlardır. Doğal ışık kaynaklarının mevcut olmadığı veya yeterli olmadığı durumlarda aydınlatmada yapay ışık kaynaklarından faydalanılır. Uygarlığın ve özellikle uygulamalı bilimlerin gelişmesine kadar, yani 19.yüzyılın ortalarına kadar, çıra, mum ve yağ lambaları ile yapılan yapay aydınlatma, akkor telli lambaların bulunmasıyla birlikte süratle gelişmeye başlamış ve sonraki yıllarda flüoresan lambalarla başlamak üzere deşarj lambalarındaki gelişmelere paralel olarak bugünkü düzeyine ulaşmıştır.

2004 yılında ülkemizde üretilen 149608 GW elektrik enerjisinin yaklaşık olarak %22’si aydınlatma amaçlı kullanılırken; yol aydınlatması için bu oran %3,7 düzeyindedir [1]. Kişi başına düşen fazla aydınlatma tüketimi, o toplumun geniş kesimlerine modern yaşam olanaklarının daha fazla sunulması, daha fazla sosyo-ekonomik aktivite ve günün güneş ışığından yoksun bölümünün dolaylı ya da dolaysız daha fazla üretime katkısı demektir. Bu anlamda aydınlık; çağdaş ve zengin olmak ile eşdeğerdir.

Amacına uygun yapılmış aydınlatma birçok gereksinmeye yanıt verdiği için aydınlatma dizaynı yapılırken genel olarak gereksinimlerden birine öncelik verilir ve bu durumda aydınlatmanın ana amacı öne alınan bu gereksinmeye yanıt vermek olur. Bu gereksinme yerine göre farklılık gösterebilir. Örneğin; bir otel aydınlatmasında estetik ve dekoratif amaçlar güdüldükçe iken, yol aydınlatmasında tamamen trafik ve sürüş emniyetiyle ilgili gereksinimler ön plana çıkar.

Bu şekilde ortaya çıkan iyi bir aydınlatma ile genel olarak çeşitli yararlar sağlanır;

Endüstri kuruluşlarında gece vardiyalarında iş veriminin gündüz elde edilen ile aynı olması için iyi bir aydınlatma gereklidir. Ayrıca eğitim ve öğretimde de gece çalışmalarının verimi ve teşviki için iyi bir aydınlatmanın etkisi göz ardı edilemeyecek derecededir. Aydınlatmanın ekonomik potansiyeli artırıcı etkisi bu noktada göze çarpmaktadır.

İyi görme koşullarını sağlayan iyi bir aydınlatma ile gözün gereksiz yere yorulması ve dolayısıyla görme hızı ve görüş keskinliğinin artırılması ile yapılan işin hızı da arttırılmış olur. Hata oranı azalır ve sonuç olarak da iş verimi yükselir. Yapılan bir araştırmada endüstriyel tesislerde aydınlık düzeyinin 200 lüks'den 300 lüks'e çıkartılması halinde iş veriminin %1.6, 500 lüks'e çıkartılması halinde ise %3.1 oranında bir artış gösterdiği tespit edilmiştir.

Kontrast (aydınlık-karanlık farkı) duyarlılığı, şekil duyarlılığı (keskinlik) ve görme hızı gibi gözün görme yeteneğiyle ilgili faktörlerin arttırılabilmesi iyi bir aydınlatmaya bağlıdır.

Gözün iyi aydınlatılmamış bir ortam nedeni ile yorulması ve rahatsız olması göz sağlığına olumsuz yönde etki yapar. Gözün yapısı, işleyişi, özellikleri ve fizyolojik-optik esaslar göz önüne alınarak yapılacak iyi bir aydınlatma göz sağlığını korumanın yanı sıra psikolojik olarak da olumlu yönde bir etki yapar.

Trafiği yoğun olan yollarda kazaları oluşturabilecek etkenler iyi bir aydınlatma ile zamanında ve tüm açıklığıyla fark edileceği için kazalardan sakınılabılır. Yol aydınlatması "Fizyolojik Aydınlatma" sınıfına girer ve bu tür aydınlatmadaki amaç cisimleri şekil, renk ve ayrıntıları ile rahat ve hızla görebilmektir. CIE uluslararası aydınlatma komisyonunun ilgili yayınında yol aydınlatmasının trafik kazalarına etkisi açıkça ortaya konmuştur. Bunu dünyanın sayılı metropollerinden New York ve Paris şehirlerinden vereceğimiz iki örnekle açıklarsak; New York şehrinin kuzey bölümünün iki ayrı kısmında iki ayrı kesimde yapılan aydınlatmadan sonra gece kazaları %36,4 oranında azalmıştır; bu azalma trafiğin artmasına rağmen gözlenmiştir. İkinci örnekte ise Fransa'da Paris-Versailles yolu aydınlatıldıktan sonra yıllık kazaların sayısı 8'den 2'ye düşmüştür. Ölümle sonuçlanan kazalar ise sona ermiştir.

İyi bir aydınlatmanın en önemli yararlarından biri de güvenliğin sağlanmasına olan katkısıdır. Meşru olmayan davranışlar genellikle karanlık veya iyi aydınlatılmamış ortamlarda gerçekleşir. Şehir içi sokaklarında ve şehir dışı yollarındaki aydınlatma, gece saldırılarına karşı etkili bir önlem oluşturur. Hırsızlık ve gasp amaçlı eylemde bulunanlar için aydınlık kışkırtıcı yönde bir faktördür.

Günümüzde, belirli bir yaşam standardının üstünde estetik duygular cevaplandırılması gerekli hayati ihtiyaçlar halindedir. Bu psikolojik ihtiyaçlardan başka görme konforu ile ilgili fizyolojik ihtiyaçlar da iyi bir aydınlatma ile karşılanarak insanlara huzur ve ferahlık sağlanır (Philips, 1984; Özkaya, 1985).

2. TEMEL FOTOMETRİK TANIMLAR

Aydınlatma tekniği, ışığa ve aydınlatmacılığa ait hesap, ölçme ve değerlendirmeleri yapabilmek için bazı temel büyüklükleri tarif ve kabul etmiştir. Fotometrik büyüklükler normal gözün radyasyonları algılama özelliği ve ışık kaynaklarının bu radyasyonlarda ürettikleri enerji miktarları ile açıklanabildiği için diğer enerji büyüklüklerinden daha farklı kavramlardır.

2.1 Fotometrik Büyüklükler

2.1.1 Işık Gücü

Işık, Kuantum Teorisine göre enerji seviyeleri dalga boylarına bağlı olan elektromagnetik dalgaların bir bölümünü oluşturur ve bilinen etkilerinden biri görsel duyulanmadır.

Gözün duyarlılığı dalga boyuyla değişir. Maksimum duyarlılık 555nm. dalga boyunda yayılan gücün 1 watt'ı bir "ışık-watt" olarak tanımlanabilir. Hesaplamalara göre 555nm. dalga boyunda yapılan gücün bir watt'ı 683 lümene eşittir. Bu şekilde lümen insan gözünün spektral duyarlılığına karşı saniyede yayılan belli bir enerji miktarı olarak tanımlanabilir.

2.1.2 Işık Akısı

Yol ve tünel aydınlatmalarında kullanılan fotometrik büyüklüklerden en önemlisi olup, "Işık Verimi", "Işık Şiddeti" ve "Parıltı" gibi kavramlarının da çıkış noktasıdır. Işık akısı, bir ışık kaynağı tarafından saniyede yayılan toplam ışık miktarını gösteren bir kavramdır. İnsan gözünün duyarlılığına karşı bir ışık kaynağı tarafından saniyede yayılan enerjidir. "Q" harfi ile ifade edilir ve birimi lümen (lm).

Işık kaynağından doğrudan insan gözüne gelen ışık akısı, özelliklerine göre, insan görme sistemine bir etki yapsa da; bu etki genel anlamda "çevreyi görme" ye hizmet etmez. Aydınlatma tekniğinde akı, ya bir kaynaktan doğrudan ya da bir kaynaktan çıktıktan sonra en az bir yüzeyde yansıtıldıktan sonra göze ulaşır.

Çizelge 2.1'de bazı ışık kaynaklarının yaymış olduğu ışık akısı miktarları görülmektedir.

Çizelge 2.1 Uygulamada sık karşılaşılan ışık kaynaklarının akı değerleri

	Güç (W)	Akı (Lm)
Bisiklet farı	3	30
Enkandesan lamba	74	900
Flüoresan lamba	65	5.000
Yüksek-basınçlı sodyum lambası	100	10.000
Alçak-basınçlı sodyum lambası	180	32.000
Yüksek-basınçlı cıva lambası	1.000	58.000
Metal halide lamba	2.000	190.000

2.1.3 Işık Şiddeti

Noktasal bir kaynağın belirli bir doğrultuda birim uzay açısı içinde verdiği ışık akısı miktarıdır. “I” harfi ile gösterilir, birimi “Kandela” (cd) dır. Bu kavram her zaman sabit bir ışık gücü veya şiddeti olarak anlaşılmamalıdır. Aynı ışık şiddetini tanımlayan akı, göz için farklı mesafe ve yüzeylerde farklı etkiler yapar.

Her biri 100 w gücünde olmak koşulu ile, genel olarak enkandesan lambalar için 480-1350 cd; halojen akkor lambalar için 2800-48000 cd; ksenon kısa ark lambası (elektrotlar arası uzaklık 1-10 mm olan çok yüksek basınçlı lamba) için 220-270 cd; cıva buharlı kısa ark lambası için 260-400 cd ışık şiddeti yaratacak ışık akısı miktarları ürettikleri söylenebilir.

2.1.4 Aydınlık Düzeyi

Aydınlık düzeyi birim zamanda sonsuz küçük bir yüzey parçasına gelen ışık akısının yüzey alanına oranıdır. Birimi “Lüks” (lx) tür ve 1 metrekare yüzey üzerine eşit dağılmış 1 lümen değerindeki akının o yüzeyde oluşturduğu aydınlık düzeyi “1 lüks” olarak tanımlanır. Ölçümü için “lüksmetre” kullanılmaktadır.

Genel olarak ay ışığında 0,2 lüks, cadde aydınlatmasında 40 lüks, yaz aylarında öğle saatlerinde 100.000 lüks ortalama aydınlık düzeyi değerlerinden söz edilebilir (İzbek, 1999).

Göz, aydınlık düzeyini değil; onun katkısıyla oluşan sonuçları görür.

2.1.5 Parıltı

Parıltı yüzeyin birim alanından belli bir doğrultuda yayılan ışık şiddetiyle ilgili bir kavram olup ışığın insan gözünde görme duygusu yaratan boyutudur. Işık yayan yüzey kendisi ışık üreten bir lamba veya ışık geçiren bir armatür yüzeyi gibi birincil ışık kaynağı olabileceği gibi, başka bir kaynaktan ulaşan ışığı yansıtan ikincil bir ışık kaynağı da olabilir. “L” harfi ile

ifade edilir ve birimi “cd/m²” dir. Aynı aydınlık düzeyine sahip fakat değişik yansıtma özellikleri olan yüzeylerin değişik parıltıları vardır. Örneğin asfaltların değişik yansıtma özellikleri mevcuttur.

2.2 Fotometrik Bağıntılar

Fotometrik büyüklüklerin tanım formüllerinden; aydınlatma mühendisliği için pratik açıdan yararlı olacak bağıntılar çıkarılmıştır. Aşağıda, büyüklükler arasındaki ilişkileri ortaya koyan bu pratik bağıntılardan yalnızca tünel aydınlatması hesapları için önem arz edenler açıklanmıştır.

2.2.1 Işık Şiddeti ile Aydınlık Düzeyi Arasındaki Bağıntı

Bu bağıntıyla ilgili iki farklı kanun söz konusudur.

2.2.1.1 Uzaklıkların Karesiyle Ters Orantı Yasası

Işığın geliş doğrultusuna dik düzlem üzerindeki bir noktanın aydınlık düzeyi, bu nokta doğrultusundaki ışık şiddetinin, söz konusu nokta ile noktasal ışık kaynağı arasındaki mesafenin karesine bölünmesine eşittir. Uzaklık “d” ile gösterilirse, ışığın geliş doğrultusuna dik düzlem üzerindeki P noktasındaki aydınlık düzeyi;

$$E_P = \frac{I}{d^2} \quad (2.1)$$

şeklinde bulunur. Bu bağıntı “uzaklıkların karesi ile ters orantı yasası” olarak bilinir ve sadece noktasal kabul edilebilen kaynaklar için geçerlidir. Uygulamada, ışık kaynağı ile hesap noktası arasındaki uzaklık, ışık kaynağının en büyük boyutundan 3 kat daha fazla olduğunda söz konusu kaynak noktasal kabul edilebilmektedir. Bu itibarla, tünel aydınlatmasında da tüm ışık kaynakları noktasal kabul edilecektir.

2.2.1.2 Kosinüs Yasası

Yüzeyin normali ile gelen ışık doğrultusu arasındaki açı γ olduğunda, yüzey üzerindeki bir P noktasının aydınlık düzeyi, bu nokta doğrultusundaki ışık şiddetinin, ışık kaynağı ile nokta arasındaki uzaklığın karesine bölümünün yaptığı γ açısının kosinüsü ile çarpımına eşittir.

$$E_P = \frac{I}{d^2} \cdot \cos \gamma \quad (2.2)$$

Yatay aydınlık düzeyi hesabında noktasal aydınlatma formülündeki ışık kaynağı ile nokta arasındaki uzaklığının yerine, ışık kaynağı ile düzlem arasındaki dik mesafenin kullanılması daha pratik olmaktadır. Bu durumda formül şu şekli almaktadır:

$$E_{yatay} = \frac{I}{h^2} \cdot \cos^3 \gamma \quad (2.3)$$

2.3 Fizyolojik-Optik Esaslar

Etrafımızdaki cisimleri ancak göz yardımı ile ve gözün görme yeteneği sayesinde görmekteyiz. Biliyoruz ki bir cismin görülebilmesi, her şeyden önce o cismin gözün ağ tabakasında meydana getirdiği görüntünün aydınlık şiddetine, dolayısıyla cismin muhtelif noktalarının parıltılarına bağlıdır. Bunun için tünel aydınlatmasında; tünel boyunca, sürücünün emniyetle durabileceği bir mesafeden tünel içini seçebilmesine yetecek kadar parıltı düzeylerinin sağlanması gerekir. Bunun yanı sıra gözün görme yeteneğini etkileyen düzgünlük, titreşim ve kamaşma gibi olaylar da tünel aydınlatmasının kalitesini belirleyen büyüklüklerdendir.

Kişi gözlerini bir noktadan diğerine hareket ettirirken alanların parıltıları da değişebilir. Farklı parıltı düzeyleri karşısında adaptasyon sorunları ortaya çıkar. Bu bölümde fizyolojik-optik esaslar ve tünel aydınlatmasıyla olan temel alakaları incelenecektir.

2.3.1 Adaptasyon

Gözün değişik değerlerdeki aydınlık düzeylerine, dolayısıyla parıltılara uyma kabiliyetine "adaptasyon" denir. Temel olarak iki türlü adaptasyon vardır: Karanlık adaptasyonu ve aydınlık adaptasyonu. Karanlık adaptasyonu deyince, aydınlık bir yerden karanlık bir yere geçişteki adaptasyon, aydınlık adaptasyonu deyince de karanlık bir yerden aydınlık bir yere geçişteki adaptasyon anlaşılır. Aydınlık adaptasyonu çok çabuk olur ve özel bir tedbire ihtiyaç göstermez. Karanlık adaptasyonu ise oldukça yavaş gerçekleşir.

Adaptasyon, gözbebeği boyutundaki değişim, fotokimyasal ve sinirsel mekanizmalarla açıklanabilir. Tam karanlık olmayan ve uygun düzeylerde aydınlatmaya çalıştığımız tünellerde bizim için önemli olan nispeten hızlı sinirsel adaptasyon işlemidir. α -adaptasyonu diye de adlandırılan bu hızlı adaptasyon kabiliyetini sağlayan sinirsel mekanizma, ağ tabakadaki sinirlerle beyindeki görme sinirlerinin karşılıklı etkileşimleri ile açıklanabilir. Göz duyarlığında yaklaşık 1/50'lik bir değişim oranına karşı düşer. Bu adaptasyon mekanizması

sayesinde 1,5 ile 2 logaritmik birimi aşmayan parlaltı farklarında uygun görme şartları gerçekleşebilmektedir (Onaygil, 1990).

2.3.2 Kontrast Duyarlılığı

Bir cismin görülebilmesi, her şeyden önce bu cismin aydınlık ve karanlık farklılıklarının algılanabilmesine bağlıdır. Ortamdaki parlaltı veya renk değişimleri "kontrast" olarak adlandırılır. Tanımdan da anlaşıldığı gibi iki tip kontrasttan söz edilebilir: Parlaltı ve renk kontrastı. Çoğunlukla bu iki kontrast birlikte oluşur.

Kontrast teşkil eden iki alanın parlaltıları L_F ve L_C , gözün adapte olduğu parlaltı da L_A ise, iki komşu bölge arasındaki bağıl kontrast veya bağıl parlaltı farkı aşağıdaki formülle ifade edilebilir;

$$C(\%) = \frac{L_F - L_C}{L_A} = \frac{\Delta L}{L_A} \quad (2.4)$$

Fon teşkil eden alan cisme oranla çok geniş ise, ya da cismin parlaltısı L_C , fon parlaltısına göre çok düşükse $L_A = L_F$ alınabilir. Bu koşulların dışındaki diğer bütün durumlar için adaptasyon parlaltısı, kontrast teşkil eden iki alanın ortalama parlaltısı olarak düşünülebilir. Yani,

$$L_A = 1/2 (L_F + L_C) \quad (2.5)$$

değeri kullanılabilir.

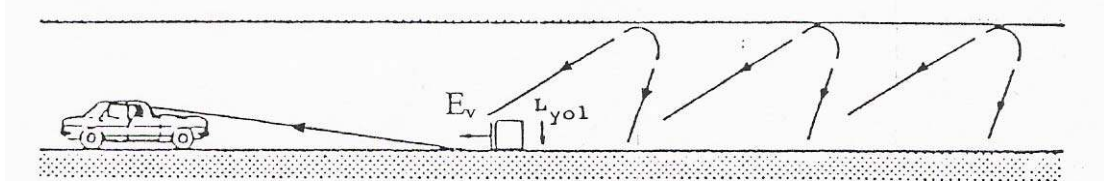
Kontrast, yüzeylerin yansıtma faktörlerinin oranı olarak da ifade edilebilir. Örneğin aynı aydınlık düzeyine sahip P_1 ve P_2 yansıtma faktörlü iki komşu yüzeyin kontrastı (2.6) 'da olduğu gibi parlaltılarının, dolayısıyla, yansıtma faktörlerinin oranı şeklinde verilebilir.

$$C = \frac{L_y}{L_d} \quad (2.6)$$

Burada; C: kontrast oranı, L_y :yüksek parlaltı (cd/m^2) ve L_d :düşük panltı (cd/m^2) dir.

Eğer görüş alanında oluşan parlaltı kontrast oranları çok yüksek olursa, kontrast teşkil eden yüzeylerin parlaklık izlenimleri de daha abartılı algılanacaktır. Örneğin, siyah fon üzerindeki beyaz detay olduğundan daha beyaz, parlak bir fon üzerindeki karanlık bir detay ise olduğundan daha karanlık algılanacaktır. Bunun nedeni, gözün büyük parlaltı farklarına anında adapte olamamasıdır.

Bu prensipten hareketle Etienne, Tesson ve Chase (1989) adlı araştırmacılar tünelde gereken parlıltı düzeyini azaltmak (dolayısıyla aydınlatma maliyetini düşürmek) için, cisimlerin yola göre kontrastlarını arttırmanın daha doğru olacağını düşünmüşler ve Fransa'daki Mantes La Ville tüneline zıt ışıklı bir aydınlatma gerçekleştirmişlerdir. Bu tür bir aydınlatmada cisimlerin üzerine doğrudan hiç ışık düşmediğinden tünel içindeki cisimlerin düşey aydınlık düzeyleri çok küçük, dolayısıyla tüm sistemin kontrast kalite parametresi K (yol parlıltısının cisimlerin düşey aydınlık düzeylerine oranı) ise büyük olmaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Zıt ışıklı aydınlatma düzeninin prensibi

Bu şekildeki zıt ışıklı aydınlatma sistemi (Counter Beam Lighting System) ile alışlagelmiş bant şeklindeki düzene kıyasla hemen hemen 1/4 oranında daha az parlıltı düzeyi yeterli olabilmektedir. İleriki konularda zıt ışıklı aydınlatma sistemi üzerinde daha detaylı olarak durulacaktır.

2.3.3 Şekil Duyarlılığı (Keskinlik veya Seçicilik)

Bir cismin çeşitli noktalarının ayırt edilebilmesi gözün şekil duyarlılığına veya keskinliğine bağlıdır. Eğer bir cismin iki noktasının görüntüleri birbirine çok yakın ise bu durumda göz bu iki noktayı ayırt edemez. Bu iki noktanın iki ayrı nokta olarak görülebilmesi için bunların göründükleri α görme açısının belirli bir δ değerinden daha büyük olması gerekir. δ açısının tersine şekil duyarlılığı, keskinlik veya seçicilik derecesi denir ve “s” ile gösterilir (Özkaya, 1985).

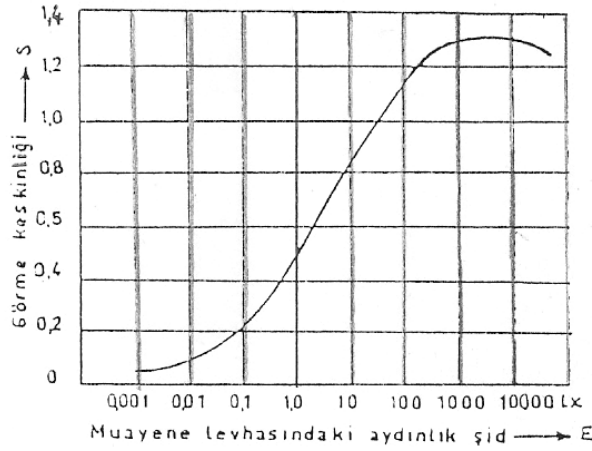
$$s = 1 / \delta \text{ (l/dak)} \quad (2.7)$$

Normal bir göz için $\delta = (3/4)' = 0,75' = 2,2 \cdot 10^{-4}$ radyan, $s = 4,5 \cdot 10^3$ (l/rad) dır.

Şekil duyarlılığı görme organına, bakılan cismin fon parlıltısına ve kontrastına, gözlem süresine göre değişir. Yaşın da keskinlik üzerinde negatif bir etkisi vardır.

Şekil 2.2, keskinliğin aydınlık şiddetine bağlı değişimini beyaz levha üzerindeki kara Snellen kancaları için göstermektedir. Buna göre, keskinlik 500 lx civarında en büyük değerine erişir

ve aşağı yukarı 10.000 lx' e kadar sabit kalır. Bundan sonra kamaşma sebebiyle keskinlik tekrar azalmaya başlar.



Şekil 2.2 Keskinliğin aydınlık şiddetine göre değişimi.

2.3.4 Düzgünlük

Sürücüye görüş imkânı ve konfor sağlanması için tünel içinde (yol yüzeyinde ve 2 m yüksekliğe kadar tünel duvarlarında) düzgün bir parıltı dağılımı gerekmektedir. Yapılan araştırmalar, yol yüzeyinin ortalama parıltısı arttıkça, parıltıda daha yüksek kısmi değişimlere müsaade edildiğini ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle tünellerde bilhassa parıltının düşük olduğu iç bölgede ve gece aydınlatmasında tüm tünel boyunca parıltı düzgünlüğünün sağlanmasına dikkat edilmelidir (Onaygil, 1990).

Tünel aydınlatmasında önemli olan iki tür düzgünlükten söz edilebilir:

Ortalama (bileşke) düzgünlük (U_0): Trafik sağ taraftan olduğunda yolun sağ kenarından yol genişliğinin 1/4 mesafesinde yer alan bir gözlemciye göre saptanan minimum parıltı (L_{min})nın, yolun ortalama parıltısı (L_{ort}) na oranıdır. Trafik için bir zemin teşkil eden duvarların alt bölümleri de aynı yol yüzeyi gibi dikkate alınmalıdır. Yol yüzeyi ve yerden 2 m yüksekliğe kadar duvarların ortalama parıltı düzgünlüğünün kirli olmayan tüneller için,

$$U_0 = \frac{L_{min}}{L_{ort}} \geq 0,4 \quad (2.8)$$

olması tavsiye edilmiştir (Philips, 1981; CIE, 1990).

Boyuna düzgünlük (U_1): Yol şeridinin orta çizgisi üzerinde bulunan gözlemciye göre, bu orta çizgi boyunca geçerli olan minimum parıltının maksimum parıltıya oranıdır.

Yol üzerindeki boyuna parıltı düzgünlüğü için,

$$U_1 = \frac{L_{\min}}{L_{\max}} \geq 0,6 \quad (2.9)$$

oranı önerilmektedir (Philips, 1981; CIE, 1990).

Boyuna düzgünlükle ilgili ölçüt, armatürler arası mesafe (tüp şeklindeki lambalarla aydınlatma halinde, birbirini takip eden armatürlerin orta noktaları arasındaki uzaklık) ışık noktası yüksekliğinin üç katını aşmadığında sağlanabilmektedir. Tünellerde yükseklik 4,5 m; ile 6 m arasında olduğundan, armatürler arası açıklık yüksekliğe bağlı olarak 13,5 m ile 18 m yi geçmemelidir (Onaygil, 1990).

Yolun ve duvarların eskimesi ve kirlenmesi de düzgünlüğü değiştirebilmektedir. Bunun için tünellerde bakım ve onarım çalışmalarına ayrı bir önem verilmelidir.

2.3.5 Titreşim (Flicker) Etkisi

Işık uyarıları birbirinin ardından hızla periyodik olarak düzenli aralıklarla gelirse, armatürlerin kendileri veya armatürlerin araçların metal kısımlarında oluşan görüntüleri titreşim (flicker) olayına neden olurlar. Bu etkinin sürücü üzerinde oluşturacağı rahatsızlık derecesi, saniyede oluşan titreşim sayısına bağlı olduğu kadar etkinin devam süresine de bağlıdır. Zira yanıp sönen bir ışığa kısa süre dayanabildiğimiz halde, süre uzadığında bu etki bizi son derece rahatsız eder. Dolayısıyla titreşim olayının önlenmesi için belirlenecek armatürler arası mesafe, tünel uzunluğu ve tünelde müsaade edilen araç hızına göre tayin edilmelidir.

Göz zamana göre değişen ışık uyarımlarını iki durumda ayırt edemez. Bunlardan biri, doğal aydınlatmada olduğu gibi ışık uyarımlarının çok yavaş değişmesi hali, diğeri ise alternatif akımla çalışan deşarj lambalarında olduğu gibi ışık uyarımlarının çok çabuk değişmesi halidir. Eğer bir ışık kaynağının parıltısı periyodik olarak değişir ve bu değişim göze sabit parıltılı bir ışık kaynağı gibi gözükürse bu durumda kaynağın bu titreme frekansına "kritik titreme frekansı" denir.

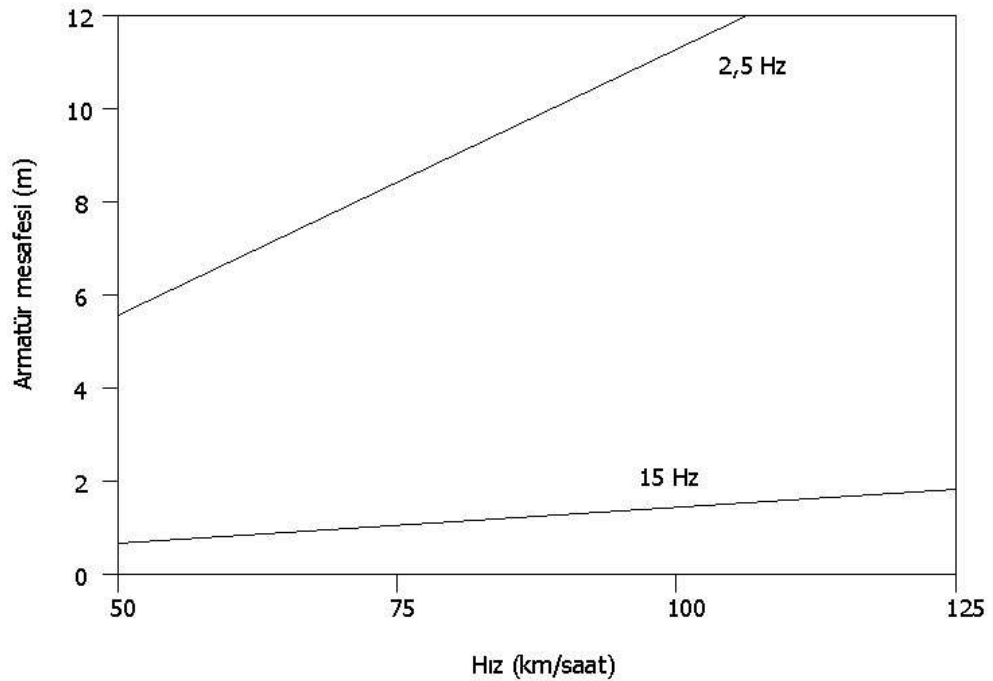
Büyük parıltılarda, dolayısıyla yüksek aydınlık düzeylerinde kritik titreme frekansı büyük olduğundan, aydınlatmanın mümkün olduğu kadar titreşimsiz olmasına çalışılmalıdır. Kesikli ışıktaki gözlenen periyodik hareketler, hareket yanılmalarına neden olabilir (stroboskopik olay). Örneğin; periyodik bir dönme hareketi, bununla aynı frekanstaki bir ışık kaynağı ile aydınlatıldığında duruyormuş gibi gözükür.

Jantzen (1960) ve Schreuder (1964) titreşim etkisini, saniyede oluşan titreşim sayısına göre, Walthert (1977) ise tünel uzunluğuna göre inceleyen araştırmalar yapmışlardır. Bunların sonucunda;

Jantzen tehlikeli titreşim frekansı bölgesini 3,5 Hz ile 15 Hz arasında bulmuş ve maksimum rahatsızlığın da 8,5 Hz civarında olduğunu tespit etmiştir.

Schreuder ise Jantzen 'e göre daha düşük yol yüzeyi parlaklığı (8 cd/m²) ve daha yüksek kaynak parlaklığı (9000 cd/m²) değerlerinde aynı çalışmaları yaparak, tehlikeli titreşim frekansı bölgesini 2,5 Hz ile 12,5 Hz arasında ve maksimum rahatsızlık derecesini de 6,5 Hz civarında belirlemiştir.

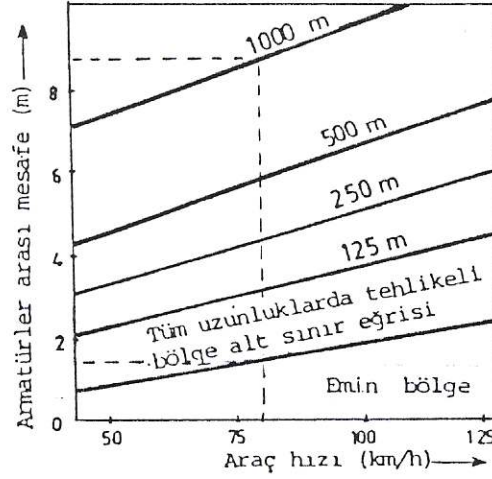
Bunlardan hareketle armatürlerin orta noktaları arasındaki mesafenin 2,5 Hz ile 15 Hz arasına tekabül eden değerler arasında olmaması gerektiği ve yanıp sönmeye sıklığının 5 ila 10 Hz arasında olduğunda rahatsızlık derecesinin maksimum olduğu söylenebilir (Şekil 2.3) (Bommel, 1980; Philips, 1981; CIE, 1990; Onaygil, 1990).



Şekil 2.3 Araç hızı ve armatürler arası mesafeye bağlı olarak tehlikeli titreşim frekansı bölgesi

Walthert ise titreşim etkisini tünel uzunluğuna bağlı olarak incelemiş ve tünel uzunluğu arttıkça tehlikeli titreşim frekansı bölgesinin de genişlediğini ortaya çıkarmıştır.

Şekil 2.4'te Jantzen, Schreuder ve Walthert 'in çalışmalarından çıkan sonuçlar doğrultusunda tespit edilmiş tehlikeli titreme frekansı bölgesi, araç hızı ve armatürler arası mesafeye bağlı olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.4 Tünel uzunluğu parametre olmak üzere, armatürler arası mesafenin araç hızına bağlı olarak değişimi.

Şekilden de görülebileceği gibi hız sınırlaması 80 km/h olan 1000 m uzunluğundaki bir tünelde, titreşim etkisinin rahatsız edici olmaması için, armatürler arası mesafe 1,5 m ile 8,8 m arasında olmamalıdır. Bu durumdaki titreme frekansı;

$$\text{Titreme frekansı (Hz)} = \text{araç hızı (m/s)} / \text{armatürler arası mesafe (m/s)} \quad (2.10)$$

$$\text{Araç hızı} = 80 \text{ km/saat} = 22,2 \text{ m/s}$$

$$\text{Armatürler arası mesafe (1)} = 1,5 \text{ m}$$

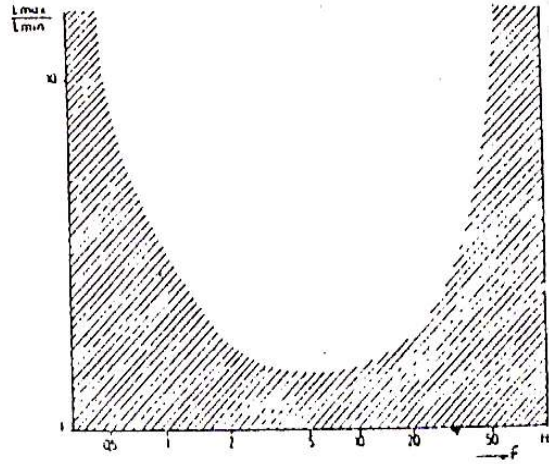
$$\text{Armatürler arası mesafe (2)} = 8,8 \text{ m}$$

$$\text{Titreme frekansı (1)} = (22,22 / 1,5) \approx 15 \text{ Hz}$$

$$\text{Titreme frekansı (2)} = (22,22 / 8,8) \approx 2,5 \text{ Hz}$$

Görüldüğü gibi belirtilen armatürler arası açıklık değerleri kritik titreme frekansı limitlerini sağlamaktadır.

Sürücünün titreşim olayından etkilenmesi titreme frekansına olduğu kadar, en büyük parıltı değerinin en küçük parıltıya oranına da bağlıdır. Şekil 2.5 'de titreme frekansı ve $(L_{\max}/L_{\min})$ 'e göre müsaade edilen sınırlar taralı alan olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Titreme frekansı ve $(L_{\max}/L_{\min})$ 'a göre müsaade edilen sınırlar (taralı alan)

Tüneller genellikle alçak yapılar olduğu için armatürler arasının çok fazla açık olması, bilhassa tünel iç bölgesinde yol ve duvar yüzeylerinde istenilen parlıltı düzgünlüğünün gerçekleştirilmesini güçleştirir. Bu durumda, ait sınır gerçekleştirilerek sürekli bant şeklinde aydınlatma ile daha kolay sonuca varılır.

Mevcut aydınlatma düzeni ile yapılan gece aydınlatmasında, titreşim etkisinin en aza indirilmesi amacıyla, lambaların aralıklı olarak söndürülmeleri yerine, ışık akıları azaltılarak bütün lambaların yanmasının sağlanması tavsiye edilir. Lambaların ışık akılarının değiştirilmesi, gerilim ayarıyla yapılabilir. Güç elektroniği düzenlerinden istifadeyle oluşturulacak aydınlatma kumanda sisteminde, tristörler aracılığıyla gerilim değerini (dolayısıyla ışık akılarını) değiştirmek mümkündür. Gerilim ile ışık akısı birbirine bağımlı büyüklüklerdir. Örneğin akkor telli lambalar için bu bağıntı;

$$\phi = \phi_n (U / U_n)^{1,613} \quad (2.11)$$

şeklindedir. Burada endissiz yazılmış karakteristik büyüklükler herhangi bir U değerindeki şebeke gerilimine, n endisli karakteristik büyüklükler de lambanın imal edildiği U_n değerindeki şebeke gerilimine tekabül ederler.

2.3.6 Kamaşma (Glare)

Sağlam bir gözün dış etkilerle geçici olarak etrafındaki cisimleri göremez hale gelmesine "kamaşma" denir. Tünel içinde de armatürler ve onların yansımaları ile oluşacak kamaşma sınırlandırılmalıdır.

Adaptasyonun sabit olmaması ve ışık noktası yüksekliği ile ışık noktaları arasındaki mesafelerin geçerlilik sahasının dışında kalması nedeniyle, yol aydınlatmasında kullanılan kamaşma formülleri tünellerde geçersizdir. Ancak tünelde de kamaşma, armatürlerin ışık dağılım eğrilerine, görüş alanı içindeki armatürün görünen yüzeyine, konumuna, sayısına ve en yüksek parlaltısına bağlıdır.

3. IŞIK KAYNAKLARI VE ARMATÜRLER

Günümüzde tünellerde ışık kaynağı olarak kullanılan lambalar, enerji dönüşümü ile ışık yayımlayan “Birincil Işık Kaynakları” sınıfına giren yapay kaynaklar olup, verdikleri ışık akısı zamanla azalır. Genellikle görünür ışık üretmek için kullanılırlarsa da; özel amaçlarla göz ile görülmeyen dalga boylarında ışık üreten lambalar da üretilmektedir. Bazen karıştırıldığı üzere, lambanın içindeki ışık elemanlarını saran, gaz geçirmeyen saydam ya da yarı saydam kılıf olan ampul, lambanın sadece bir parçasıdır.

Tünel aydınlatmasında kullanılan lambalar için temel olarak aşağıdaki özellikler aranır:

- Etkinlik faktörünün yüksek olması;
- Ömrünün uzun olması;
- İçinde kullanılacağı armatüre kolayca uyabilmesi.

Bunun yanında her lambayı teknik yönden diğer türlerden farklı kılıp belirlemek ve nitellemek için, üreticisi tarafından bildirilen karakteristik tanımlar vardır. Aydınlatma ve seçim açısından diğerlerine nazaran daha fazla önem arz eden karakteristikler aşağıda listelenmiştir.

Nominal Güç: Belirli koşullarda çalışan lambanın, o koşullar için üreticisinin bildirdiği güç değeri olarak nitelendirilir.

Lamba Gerilimi: Deşarj lambalarında, durağan rejime ilişkin AC gerilimin efektif değeridir.

Nominal Işık Akısı: Üretici kataloglarında bildirilen lamba başlangıç akı değeridir. (genellikle 100 saatlik kullanımdan sonra ölçülür)

Işık Şiddeti: Daha önceden de değinildiği gibi bir lambanın birim uzay açısı içinde verdiği akı miktarıdır.

Toplam Akı: Lambanın 4 π steradyan uzaya yaydığı tüm akı değeridir.

Ortalama Küresel Işık Şiddeti: Lambaya ait ışık akısının 4 π steradyana bölünmesiyle bulunan her doğrultudaki ışık şiddetinin ortalama değeridir.

Işık Verimi: Bir lambanın birim zamanda harcadığı enerjiye karşılık verdiği akıdır.

Renk sıcaklığı: Bir ışımanın, Plank Işıyıcısı'nın (*) geometrik yerine ilişkin kıyas ile bildirilen renk uyartısı bilgisi lambaların verdikleri renkleri tanımlamakta kullanılır. Birimi KELVİN 'dir. Bir lamba kızgın hale geldikçe, verdiği ışığın tayfında yer alan görünür ışınlardan dalga boyu küçük olanlar büyüklere göre baskın duruma geçerler. Her lambanın renk sıcaklığı, üreticisi tarafından kataloglarda verilir. Renk sıcaklığı arttıkça daha doğal bir ışığa ulaşılır. Kataloglarda flüoresan lambalar için "sıcak beyaz" olarak tanımlanan spektral bütünlüğün renk sıcaklığı genel olarak 3000 K. dolayında iken, "doğal beyaz" (veya soğuk beyaz) için bu değer 4000 K.; ve "gün ışığı beyazı" için 6000- K. dolayındadır. Akkor Flamanlı lambalar genel olarak 2600-3100 K. dolayında renk sıcaklığına sahip iken; açık gökyüzü için 11000-25000 K seviyeleri söz konusudur.

Renksel geriverim: Görece Spektral Enerji Dağılımı tanımlanmış bir ışımanın, bir referans ışıma ile karşılaştırılarak ona göre değerlendirilen o ışıma ile aydınlatılmış nesneye ilişkin renk algılama etkisidir. Farklı dalga boy ve frekans harmanlarından oluşan farklı iki ışıma, spektral enerji dağılımı sonuç etkisi itibarı ile aynı renk sıcaklığı ile ifade edilseler bile, çok farklı renksel geriverime sahip olabilirler. İşte bu aydınlatılan nesnelere ilişkin algılanan görece psiko-fizik renk uyum farkı, referans ışıma ile karşılaştırılarak, o ışımanın doğallığının ölçütü olarak verilir. "Renksel Geriverim Endeksi" adı verilen bu ölçüt R_a ile gösterilir ve 1-100 arasında bir sayı ile değerlendirilir. Yapay kaynaklar için 20-99 arasında olan bu sayı, ne kadar büyük ise o kadar daha iyi renksel geriverim söz konusu olacaktır. 100 ideal hal olup bugün için yapay kaynaklarla buna erişilememektedir (İzbek, 1999).

Renk sıcaklığı ve bunun sonucu olarak renksel geriverim endeksinden söz edebilmek için; bir lambaya ait ışımanın Spektral enerji dağılımı, görülür ışıma aralığını nispeten kapsayan çoklukta dalga boylu ışımalara sahip olmalıdır. Aksi taktirde, alçak basınçlı sodyum buharlı lambada (ABASO) olduğu gibi (590 nm bölgesinde dar bir dalga boyu aralığı) bir renk sıcaklığından söz edilirse de renksel geriverim endeksinden söz edilemez.

* Plank Işıyıcısı CIE 845-04-04 no'lu tanımına göre üzerine gelen tüm ışınlamaları hiç yansıtma yapmaksızın emebilen, farklı sıcaklıklarda farklı renk veren özelliğiyle ikincil kaynakların renklerini tanımlamakta kullanılan "tam-ışyıcı" ütopik bir cisimdir.

DIN 5035 'e göre “Renksel Geriverim Endeksi” yedi ayrı gruba ayırır;

Çizelge 3.1 Renksel geriverim endeksi grupları

GRUP	R _a Değeri	Renksel Geriverim Endeksi
Grup 5	1-19	Yok
Grup 4	20-39	Kötü
Grup 3	40-59	Kabul edilebilir
Grup 2B	60-69	İyi
Grup 2A	70-79	Oldukça iyi
Grup 1B	80-89	Çok iyi
Grup 1A	90-100	Mükemmel

Üç akı Değeri: Bir lambanın aşağıya doğru 90,180 ve 270 derecelik uzay açılardan verdiği üç adet toplam akı bilgileridir.

Dişi Duy: Lambayı mekanik anlamda tutarak çoğu kez elektrik devresine de bağlayan armatür içindeki bölümdür.

Erkek Duy: Armatüre mekanik anlamda tutturmak aynı zamanda elektrik devre temasını sağlamak için, lambanın dişi duy içinde döndürülerek iletiletilen kontak kısmıdır. E27,E40 gibi; E harfini izleyen bir sayı ile standartlaştırılmıştır. (bu sayı erkek duyun dişli kısmının mm olarak çapını verir)

3.1 Lambalarda Kullanım Süresi / Ömür

Çalışan lambaların verdikleri ışık akısı çeşitli etmenler sebebiyle zaman içerisinde azalma gösterir. Tek bir H.I.D. lambasının ömrünü doldurup doldurmadığının göstergeleri şu şekildedir;

- Durağan rejimde çalışırken, düzenli veya düzensiz aralıklarla deşarj yineleme sorunu varsa;

- Ateşleme süresinden sonra, ışık normal rengini almıyorsa;
- Ateşleme yapmıyorsa;
- Lamba ışık akışı arzu edilenin altına düşmüşse, lambanın yenisi ile değiştirilmesi gerekir.

Belirli koşullarda çalışmakta olan bir lambanın, belirli süre (lambanın ekonomik ömrü veya ortalama ömrü kadar) sonunda verdiği akının, aynı lambanın ilk 100 saatlik çalışma süresi sonunda iken (lamba yeniyken) verdiği akıya oranına “Lümen Düşüş Faktörü” (luminous flux maintenance factor) denir. O halde bir aydınlatma sisteminin tasarımı yapılırken; lambaların verecekleri akıların zamanla azalacağı düşünülmeli ve gereken tasarım toplam akısına, lambaların yenileneceği ana kadar azalacak olan miktar hesaplanarak eklenmelidir.

Aynı tip lamba için, bazı üretici firmalar “Ekonomik Ömür”, bazıları ise “Ortalama Ömür” kavramıyla ürünlerinin ömürlerini bildirirler. Bu durumda “Lamba Ömrü” adı altında ortalama ömür bildirildiğinde, ekonomik ömür bildirilen ürüne göre daha yüksek bir ömre sahip imiş gibi göze çarpar. Oysaki bu iki kavram tanım olarak birbirinden ayrılır.

Ekonomik ömür; yeter sayıda lambadan 100 saatlik ilk kullanım süresinden sonra ölçülen toplam ışık akısının % 30 azalması için geçen süredir. Bu süre dolduğunda (yani toplam akı % 30 azaldığında), yanıyor olsun olmasın ve Lümen Düşüş Faktörü ne olursa olsun tüm lambalar yenilenir.

Ortalama ömür kavramında ise; devreye alınmalarından sonra toplam lamba sayısının en az yarısının (% 50) işlevinin yerine getirmediği (lümen düşüş faktör'lerinin sıfır olduğu) ana kadar geçen süre ifade edilir. Ortalama ömür değerleri, lambalarda orijinal kontrol donanımlarının kullanıldığı ve lambaların her yakılıştta en az on saat devrede kaldığı koşullar içindir.

3.2 Işık Verimi

Lambalarda harcanan tüm enerjinin bir kısmı kayıplara harcanır. Kalan enerjiye karşılık gelen “ışık akı”nın da sadece bir kısmı insan gözünde görme duygusunu uyandıran dalga boyu aralıklarında bulunur. Yani gözün algılamadığı ışığın, o ışığı üretmek için lambada tüketilen toplam ışınım enerjisine oranı düşüktür. Örneğin 400 W gücünde bir yüksek basınçlı sodyum buharlı lamba yandığında tüketilen enerjinin %14,9'u balast, %22,2'si ısı ve konveksiyon için tüketilirken, %0,2'si ultraviyole ve % 37,2'si de kızılötesi ışın elde etmek için harcanır. Sonuç

olarak Yüksek Basıncılı Sodyum Buharlı Lamba, toplam tükettiği enerjinin ancak % 25,5'ine karşılık gelen oranda “göz ile görülebilen ışık” vermiş olur.

Yüksek enerjili lambalar için, “göz ile algılanan ışık enerjisi” nin, bu enerjiyi yaratmak için tüketilen enerjiye oranı genel olarak, sırasıyla akkor flamanlı lambalarda %10, alçak basınçlı cıva buharlı lambalarda %15, flüoresan lambalarda %20, YÜBACI lambalarda %20, YÜBASO lambalarda %25 ve ABASO lambalarda %35 mertebesinde dir. Sözü edilen “verim” kavramı, lambaların enerji verimlerini kıyaslamada kullanılabilir. Ancak, pratikte gerçek kıyas; ışık verimi kavramı ile yapılır.

Işık verimi, belirli koşullarda kararlı çalışan bir ışık kaynağının birim zamanda harcadığı enerjiye karşılık verdiği ışık akışı miktarı olup birimi LÜMEN/WATT 'tır. (NOT: Işık Verimi; “verilen bir zaman dilimi için ışık akışının o süreye göre integrali” olarak tanımlanan ışık miktarına göre de tanımlanabilir. Şöyle ki, “Belirli koşullarda kararlı çalışan ışık kaynağının belirli sürede harcadığı enerji ile verdiği ışık miktarı. (LÜMEN.SN/WATT.SN veya LÜMEN.SN/JOULE). Genellikle yapay ışık kaynaklarında ışık akısı zamanla azaldığından, ışık verimi için de aynı şey söylenebilir. İnsan gözünde görme duyusu uyandıran bir büyüklük olmayıp ışık kaynağının toplam ışık akısı bilgisine verimlilik boyutu ekler. Örneğin 125 wattlık bir YÜBACI lamba 6500 lümen Işık Akısı verirse Işık Verimi $6500/125 = 52 \text{ lm/W}$; aynı şekilde 70 wattlık bir YÜBASO lamba için bu değer $5900/70 = 84 \text{ lm/W}$ olur. Bundan hareketle, eğer tek kıstas; toplam kurulu güç ve diğer değişle tüketilen birim enerji karşılığı alınacak ışık akı 'sının değeri ise, YÜBASO lamba YÜBACI lambaya göre daha ekonomiktir.

Günümüzde yüksek wattlı lambalar için sırasıyla ortalama ışık verimi olarak, akkor flamanlı lamba (standart enkandesan) için 6-22 lm/w, akkor flamanlı halojen lamba için 10-33 lm/w, kompakt flüoresan lamba için 11-87 lm/w, flüoresan lamba için 26-104 lm/w, YÜBACI lamba için 19-60 lm/w, YÜBASO lamba için 70-150 lm-w, ABASO lamba için ise 100-199 lm/w değerleri verilebilir. Lamba gücü (watt) büyüdükçe ışık verimi genel olarak artmaktadır.

Günümüzün önde gelen üretici firmalarının kataloglarında, 50-70-100-150-250-400-1000 watt gücünde ve sırasıyla 84-84-100-113-132-139-130 lm/w ışık verimine sahip YÜBASO lambaların yanı sıra, 37-56-91-135-185 watt güçlerinde ve gene sırasıyla 124-145-148-167-173 lm/w verimde ABASO lambalar da yer almaktadır.

Konu gereği yüksek tüketimlerin söz konusu olduğu tünel aydınlatmalarında kullanılan lambalarda “Işık Verimi” konusuna bu tezin verdiği önem, yaşamın diğer alanlarında

kullanılan tüm lambalar için elbet geçerli değildir. Örneğin tıpta tedavi amacıyla kullanılan morötesi ve kızılötesi dalga boylu ışık üretme amacıyla kullanılan lambaların (örneğin yeni doğan bebeklerde görülen anemi türlerinin tedavisinde kullanılan özel lambalar) ışık verimleri bu şekilde değerlendirilmez (İzbek, 1999).

3.3 Lamba Çeşitleri

Elektrik enerjisinin elektromanyetik ışıma enerjisine dönüştürülmesi ve bundan "görülebilir akı üretmek" amacı baz alınarak teorik olarak pek çok, uygulamada ise çok sayıda, amaç, özellik ve tipte lamba tasarımdan söz etmek mümkünse de teknik, yöntem ve sonuçlar anlamında lambalar beş ayrı grupta incelenir;

- Standart akkor flamanlı lambalar (incandescent lamp)
- Halojen akkor lambalar (tungsten halogen lamp)
- Flüoresan Lambalar (fluorescent lamp)
- Kompakt Flüoresan Lambalar (compact fluorescent lamp)
- Deşarj Lambaları (discharge lamp)

Konusu gereği bu tezde daha çok, yukarıda sayılan gruplardan "DEŞARJ LAMBALARI" üzerinde duracaktır.

Deşarj Lambaları, ışığın dolaylı ya da dolaysız bir biçimde, bir gazın, bir metal buharının ya da birçok gaz ve buhar karışımının içinde “Elektrik Deşarjı” ile üretildiği lambalar olup hemen tüm tipleri doğrudan şebekeye bağlanıp çalıştırılmadıklarından balast ve ateşleyici ile çalışırlar. Balast, elektrik akımını gerekli değerde sınırlama amacı ile; ateşleyici ise, ön elektrot ısıtması gerektirmeksizin gerilim darbeleri ile ateşlemeyi başlatmak için kullanılır. Bazen her ikisi yerine, aynı zamanda gerilim düzenleme ve koruma görevlerini de yerine getiren “Elektronik Balastlar” kullanılır. Balastlarla ilgili bir diğer tanım “Balast Lümen Çarpanı” olup, bir referans lambanın sıradan bir balast ile verdiği akının aynı lambanın kendi referans balastı ile çalıştığında verdiği akıya oranı olarak tanımlanır.

Hangi tip lambanın hangi balast ve ateşleyici ile çalıştırılacağı, diğer bilgilerle birlikte üretici firma kataloglarında verilir.

Deşarj lambalarında gazlı ortamın nitelikleri, lambanın verdiği ışığın rengini ve verimini belirler.

Günümüzde, yol ve tünel aydınlatmalarında en çok tercih edilen lambalar, "Deşarj Lambaları" grubu içinde "Yüksek Yoğunluklu Deşarj Lambası-(HID)" olarak anılan özel bir grupta yer alırlar. Bu grubu oluşturan lambalar ise; Metal Halide Lamba, Yüksek Basınçlı Cıva Buharlı Lamba ve Yüksek Basınçlı Sodyum Buharlı Lamba 'dır.

3.3.1 Metal Halide Lamba

Metal ve metal tuzları buharında deşarj prensibine göre çalışırlar. Verdikleri ışık, bir metal buharı karışımının uyarılması ve tuzun ayrışması sonucu oluşur. Lamba standardı IEC 167 dir. Çeşitli aşamalarla 1965 yılından beri kullanılmaktadır.

Ark tüpü içinde bir metal tuzu bulunması dışında, yapı olarak YÜBACI lambalara benzerler. Yüksek basınçlı cıva lambalarınınkinden daha küçük olan ark tüpünde “renk iyileştirme” amacıyla argon ve cıva gazlarına ek olarak indiyum, skandiyum, talyum, sodyum gibi metallerin iyotlu bileşikleri kullanılır. Cıvalı lambalarda olduğu gibi metallerin iyotlu bileşikleri kullanılır ve ark tüpü kuvarzdır. İçten ateşlemeli tiplerde, sodyum iyonür tuzları kullanılan lambalarda, erimiş silisteki elektrolizi önlemek gerekir. Renk sıcaklık ve geri verimleri çok iyidir. Işık verimleri ve ömürleri dezavantaj oluştursa da; daha çok “renkte kalite” istenen durumlarda kullanılırlar (Philips, 1985; İzbec, 1999); [5].



Şekil 3.1 Metal halide lamba

3.3.2 Yüksek Basınçlı Cıva Buharlı Lamba

Yanma durumunda kısmi buhar basıncı 100000 paskalın üstünde olan, ışımasının büyük kısmı cıva atomlarının uyarılmasıyla sağlanan deşarj lambasıdır. (Tezde kısaca YÜBACI olarak adlandırılmaktadır.). Lamba standardı IEC 188 dir. 1934 yılından beri geliştirilerek kullanılmıştır. İç kısımda gazlı ortamı içeren ark tüpü ve bunun dışında onu hava akımlarından ve ısı değişikliklerinden koruyan dış tüp olmak üzere iç içe iki saydam tüpten oluşur. Ark tüpü içinde bir ateşleme elektrodu bulunur. Mavimsi-beyaz bir ışık verir. 750–850 NM dalga boyları açısından fakirdir, bu yüzden aydınlatığı nesnelerde mavi, yeşil ve sarı renkler vurgulanır; kırmızı tonlar kahverengi görünür. Bunu önlemek için fosfor sırlı cıva lambalar geliştirilmiştir. Düşük ışık veriminden ötürü YÜBACI lambaların çok tercih edildiği söylenemez (Philips, 1985; İzбек, 1999); [5].



Şekil 3.2 Yüksek basınçlı cıva buharlı lamba

YÜBACI ve Metal Halide lambaların tüm tipleri, ciddi deri yanıkları ve göz iltihaplarına neden olan kısa dalgalı “Morötesi (Ultraviyole) Işıma”yı da içine alan dalga boyu aralığında ışık üretirler. Bu yüzden, bu lambalar, deşarj tüplerini dıştan sarıp morötesi ışımayı filtre eden “lamba dış zarfları” kırıldığında büyük tehlike yaratırlar. Bu tehlikeyi önlemek için, lamba dış zarfı herhangi bir nedenle kırıldığında otomatik olarak lambayı söndüren donanıma sahip YÜBACI ve Metal Halide Lamba tipleri geliştirilmiştir.

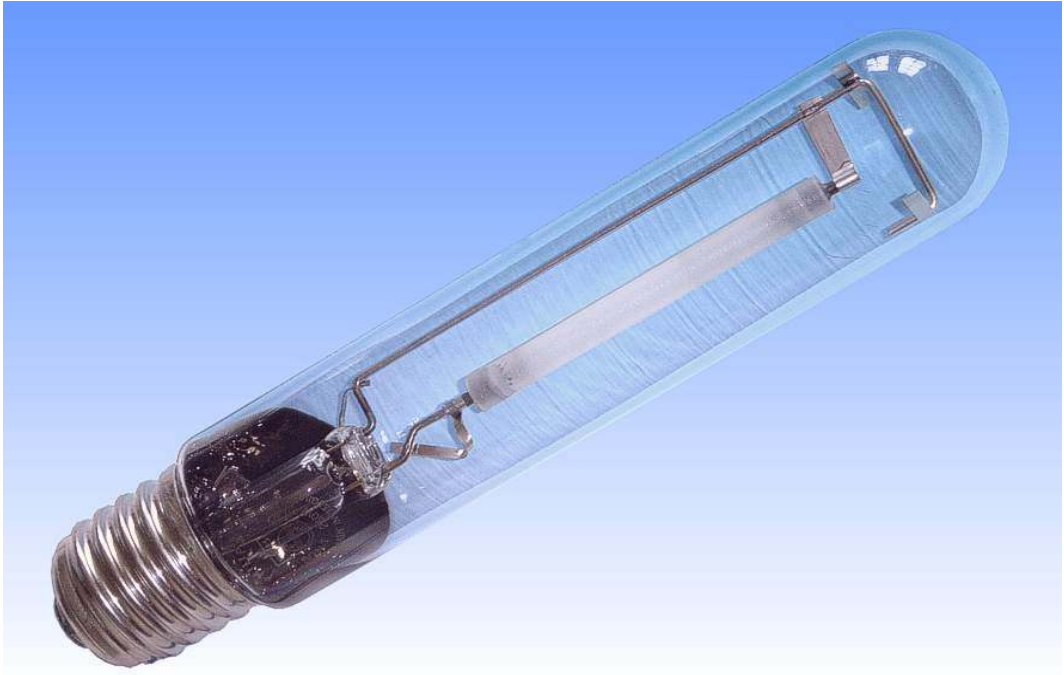
3.3.3 Yüksek Basınçlı Sodyum Buharlı Lamba

Yanma durumunda, kısmi buhar basıncı 10000 paskal civarında olan ve daha çok sodyum buharının uyarılmasıyla ışık veren deşarj lambasıdır. (Tezde kısaca YÜBASO olarak adlandırılmaktadır.) Standardı I.E.C. 662'dir. Çeşitli aşamalarla 1961 yılından beri kullanılmaktadır.

Ark tüpünde sodyum, cıva ve ksenon gazı bulunur. Ark tüpü çapı küçük olduğundan, YÜBASO lambada başlatma elektrotu bulunmaz. Bir dış kaynaktan (BALAST) elde edilen yüksek gerilimli (2250–4000 V.) ve düşük enerjili gerilim darbeleri başlatma gazı olarak kullanılan ksenon gazını iyonlaştırarak deşarj ateşlemesini başlatır. Tüp ısındıkça cıva ve sodyum gazları buharlaşır, bu buharlaşma ilerledikçe lambanın ışığı değişerek 2–6 dakika içinde hafif ve pembemsi sarı olan kararlı ışığa ulaşılır. Bu ışımda var olan bir miktar ultraviyole ışınımın filtre edilmesi için dış ampulün iç yüzeyi fosforla kaplanır.

Ark tüpleri, yüksek ısı derecelerinde sodyum buharının aşındırıcı etkisi nedeniyle yetersiz kalan kuvars yerine; seramik yapıya sahip dayanıklı, şeffaf, “polikristalin alüminyum oksit”den yapılırlar.

Yüksek ışık verimi ve ömrü; kahverengi ve gri renklere yani karayolları ve dolayındaki yapılara ilişkin iki ana renge yeterince iyi uyum, bu lambayı uzun yıllar “istenir” kılmıştır. Bu talep, günümüzde de sürmektedir (Philips, 1985; İzbec, 1999); [5].



Şekil 3.3 Yüksek basınçlı sodyum buharlı lamba

3.3.4 Alçak Basıncılı Sodyum Buharlı Lamba

“H.I.D. lamba” kategorisinde yer almamakla birlikte, günümüzde yol aydınlatmalarında öne çıkmaktadır. Yanma durumunda, kısmi buhar basıncı 0,1 –1,5 paskal arasında olan sodyum buharlı deşarj lambası olup tezde kısaca ABASO olarak anılmaktadır. Standardı I.E.C. 192’dir. Ark tüpü içinde sodyum ve neon’un yanı sıra az miktarda helyum veya argon (veya ksenon) gazı bulunur. Neon gazı ateşleme için kullanılır. Ateşlemenin ilk safhası, kırmızı neon deşarjının rengini verir. Sodyum buharlaştıkça, lamba rengi karakteristik renk olan monokromatik sarıya döner. ABASO lambalar, insan sağlığını tehdit eden morötesi ışınım yaymazlar. Yayımları kızılötesi ışınım ise, dış ampulün iç yüzeyine sürülen indiyum oksit ile filtrelenir. Işık verimi en yüksek olan, yani en ekonomik lambadır.

ABASO lamba, amaçdaşlarına göre daha boyutludur. Örneğin; yaygın kullanıma sunulmuş ABASO lambalar içinde en fazla ışık akısı verebilen ABASO lambanın (180 W-33.000 lm) çapı 6,8 cm ve uzunluğu 1120 cm.dir. Armatürü ile birlikte 1,4 metre uzunluğunda olması, “rüzgarlı yolda” dikkat edilmesi gereken bir montaj konusu olduğu halde “tüneller” için böyle bir durum söz konusu değildir. Bir adet armatür içine iki adet lamba konarak bir armatür ile toplam 66.000 lm değerinde akı elde edebilmek ABASO lambaların bir diğer avantajıdır. Öte yandan yüksek ışık veriminden ötürü doğal kaynakların korunmasına katkıda bulunur.

Sonuç olarak, yeterince yüksek bir lamba ömrü ve çok yüksek ışık verimleri ile, tüm dikkatlerin kısıt enerji kaynaklarına çevrildiği günümüzde “enerjiden çok büyük tasarruf” yapabilen ve –20 / + 80 °C çevre sıcaklığı aralığında kararlı çalışabilen bu lambalar özellikle yol ve tünel aydınlatmalarında idealdir. ABASO lambalara yöneltilen tek ciddi eleştiri olan “monokromatik rengin, renksel geri verimi yok etmesi yani yoldaki nesnelere ilişkin renk detaylarının algılanmaması” ise çok ciddi görülmemektedir. Çünkü yolda giden “araç sürücüsü” için, “yola ansızın çıkan köpeğin” görülmesinin önemli olduğu; köpeğin renginin ise önem arz etmediği bilinmektedir (Philips, 1985; İzbec, 1999); [5].



Şekil 3.4 Alçak basınçlı sodyum buharlı lamba

3.3.5 Tünel Aydınlatması Açısından Lambaların Kıyaslanması

Bir tesiste kullanılacak lamba tipinin seçiminde; amacı, kullanılacağı ortam koşulları (nemli, tozlu, darbeli, yanıcı veya patlayıcı ortamlar gibi), çalışma gerilim aralığı (volt), ısır hale getirmek için gerekli donanım (ateşleme sistemi) tipi, boyutları, ekonomik ömrü, kalitesi, fiyatı, montaj ve bakım zorluk ve giderleri, üretici tarafından verilen yedek parçalarının uzun vadede üretimde bulunma güvencesi, bağlantı (soket) tipi, ışık rengi, renksel geri verim derecesi, ateşleme ve tekrar ateşleme süresi, armatürünün özellikleri gibi pek çok faktör değerlendirilir. Fakat tünel aydınlatmasında, lamba seçiminde en önemli ölçüt olarak ömür ve ışık verimi değerleri baz alındığından en iyi tercihin ABASO (alçak basınçlı sodyum buharlı lamba) olacağı görülür.

Her ne kadar monokromatik ışığa nedeniyle bu lambadan alınan ışıkta “renk ayırt etme” zorlaşsa da; ABASO lamba, rengin fazla önemli olmadığı yol, anayol, çevre yolu, otoyol ve tünel aydınlatmalarında her zaman tercih edilmelidir. Ancak bu sonuç; özellikle yaya trafik katılımının fazla olduğu ve/veya çok yönlü karışık yoğun trafik bulunan şehir içi sokak ve cadde aydınlatmalarında; H.I.D. lamba grubunun diğer üyeleri olan, YÜBACI (Yüksek Basınçlı Cıva Buharlı Lamba), YUBASO (Yüksek Basınçlı Sodyum Buharlı Lamba) ve hatta Metal Halide lambalara olan gereksinmeyi dışlamak anlamına gelmemektedir.

Renk ayırt etme özelliğinin önemli olmadığı anayol ve bu yollar üzerindeki tünellerin uzun saatler boyunca çalışacak olan aydınlatmaları tasarlanırken, lamba seçiminde ekonomiklik en önemli faktörlerden biridir. Örnek ile açıklamak gerekir ise; bir tünel aydınlatma projesinde boyutlarıyla birlikte aydınlatılacak yolun uzunluğu ve aydınlatma talep kriterlerinin belirlediği hesap sonuçlarına göre gereken anlık toplam ışık miktarı 2.000.000 lm.sn. dir. Varmak istenilen sonuç üzerinde fazla etkisi olmadığı bilinen bazı kriterlerin sonuçlarını ihmal etmek koşuluyla; bu ışık miktarı önce YÜBACI, sonra YÜBASO ve sonrada ABASO lambalar ile üretilir ise;

400 w YÜBACI lamba (24.200 lm) ile 83 adet lamba kullanmak gerekir. Lambaların devrede olduğu “gece” süresinin on saat kabul edilmesiyle 10 yıl için ortalama tüketim 1.195.200 kwh olur.

400 w YÜBASO lamba (36.000 lm) ile 56 adet lamba kullanmak gerekir. Lambaların devrede olduğu “gece” süresinin on saat kabul edilmesiyle 10 yıl için ortalama tüketim 806.400 kwh olur.

180 W ABASO lamba (32.500 lm) ile 62 adet lamba kullanmak gerekir. Lambaların devrede olduğu “gece” süresinin on saat kabul edilmesiyle 10 yıl için ortalama tüketim 401.760 kwh olur.

Görüldüğü gibi, sadece 1000 metre dolayında uzunluğu olan geniş bir tünelde on yıl boyunca YÜBACI ve YÜBASO tipi lamba yerine ABASO tipi lamba kullanılması durumunda; ülkemiz enterkonnekte sisteminin en önemli enerji kaynaklarından biri olan Soma-B Termik Santrali’nin bir grubunun (165 MW) tam yükte sırasıyla 4,8 saatte ve 2,5 saatte üretebileceği kadar enerji tasarruf edilecektir. (Balast kayıpları da düşünülürse, rakamlar daha da büyümetedir)

Tünel aydınlatmaları sadece gece (günde on saat) değil, gündüz de devrededir ve gündüz saatlerinde tünel aydınlatmalarında tüketilen enerji, aynı tünelde “gece tüketilenin” onlarca katıdır. Durum bu şekilde olunca enerji sarfıyatı ve maliyeti bir kademe daha ön plana çıkmaktadır.

ABASO lambalar, YÜBASO ve YÜBACI lambalara göre watt başına daha pahalıdır. Ancak bu saptama sadece “lamba” bazındadır. Öbür yandan yüksek ışık verimlerinden ötürü belirli bir “aydınlatma tesisi” nin gerçekleştirilmesinde, ABASO lambaların diğer tip lambalarla yapılacak eşdeğer aydınlatmaya göre “daha az sayıda lamba”, “daha az sayıda balast”, “daha

az sayıda armatür ve topraklama”, “daha az kablo”, “daha az kurulu güç” ve nihayet uzun vadede “daha az tüketilen enerji” gerektirmeleri uygulamada tercih edilmelerinin başlıca nedenlerindendir.

Monokromatik özelliğinden ötürü ABASO lambalar H.I.D. lambalara göre uçan böcekleri daha az çekerler. (cıva buharı ışığına göre % 5 dolayında, sodyum buharı ışığına göre ise % 10’dan az olmak üzere) Dolayısıyla bu lambalar, diğer H.I.D. lambalara göre uzun vadede “böcek kirinden” çok daha az etkilenirler. Bakım periyotlarını ve giderlerini etkileyen bu durum, işletmede tutulan tünel aydınlatmalarında zaman içinde akı azalmasının önemli nedenlerindendir.

ABASO lamba, insan sağlığına zararlı olan ve diğer lambalarda filtre edilmeye çalışılan morötesi ışık yaymadığı gibi doğal çevreye cıva zehiri taşımaz.

Ayrıca, 16.000 saatlik ortalama ömürleri sonunda dahi başlangıç akılarının yaklaşık aynısını üreten, 199 lm/w a kadar varan ışık verimleriyle ABASO lambalar; gece görmesine insan gözünün en duyarlı olduğu dalga boyu aralığında (589 ve 589,6 nm) ürettikleri sarı tonlu ışık ile sınıflarında idealdirler (İzbek, 1999).

Çizelge 3.2 Yübaso Lamba Ortalama Verileri

Nominal Lamba Gücü (W)	50	70	100	150	250	400
Balast tüketimi dahil devre gücü (W)	~62 (63)	~83	~115	~170	~275	~440
Lamba Gerilimi (V)	90 (80)	90 (85-86)	100	100	100	105
Lamba Akımı (A)	0,8	1	1,2	1,8	3	4,5 (4,4)
Ateşleme Gerilimi (min/max) (kV)	1,8/2,3	1,8/2,3	4/5	3/4,5 (3,5-4/4,5-5)	3/4,5 (3,5-4/4,5-5)	3/4,5 (3,5-4/4,5-5)
Işık Akısı (lm)	3500	5600 (4800)	(9500-10000)	14000 (12000-12500)	25000 (22000-23000)	47000 (36000-38000)
Işık Verimi (lm/W)	70 (84)	80 (69-100)	(95-100)	93 (80-113)	100 (88-132)	118 (90-139)
Renk Sıcaklığı (K)	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Renksel Geriverim Endeks Grubu	4	4	4	4	4	4
Çap (mm)	70	70	(46-75)	90	90	120
Boy (mm)	156	156	(186-211)	226	226	290
Duy Tipi	E27	E27	E40	E40	E40	E40
Yanma Konumu	Her Konumda	Her Konumda	Her Konumda	Her Konumda	Her Konumda	Her Konumda

Not 1: 400W üzerindeki güçler değerlendirilmemiştir.

Not 2: Parantez içinde verilen değerler özel tiplere aittir.

Çizelge 3.3 Abaso Lamba Ortalama Verileri

Nominal Lamba Gücü (W)	18	35	55	90	135	180
Balast tüketimi dahil devre gücü (W)	25	56	76	113	175	220
Lamba Gerilimi (V)	220	220/480*	220/480*	220/480*	220/660*	220/660*
Lamba Akımı (A)	0,35	1,4/0,6*	1,4/0,6*	2,1/0,9*	3,1/0,9*	3,1/0,9*
Işık Akısı (lm)	1800	4800	8000	13500	22500	33000
Işık Verimi (lm/W)	100	137	145	150	166	183
Çap (mm)	53	52	52	66	66	66
Boy (mm)	216	310	425	528	775	1120
Duy Tipi	BY22d	BY22d	BY22d	BY22d	BY22d	BY22d
Yanma Konumu	bU150	bU110	bU110	h20	h20	h20

* : Primer/Sekonder

Çizelge 3.4 ABASO ve HID Lambalar Karşılaştırma Tablosu

	Lamba Gücü (watt) (*1)	Başlangıç Akısı (lumen) (*1) (*4)	Işık Verimi (lm/watt) (*4)	Ortalama Ömür (saat) (*4) (*2)	Ortalama Ömür Sonunda Işık Verimi (*4) (%)	Renk Sıcaklığı (K) (*4)	Renk Geriverim Endeksi (Ra) (*4)	Aydınlatılan Nesnede Renklerin Ayırılabilirliği Yorumu	Ateşleme Süresi (dk.) (*4) (%)	Tekrar Ateşleme Süresi (dk.) (*4) (%)
Metal Halide Lamba	35-400 (*5)	2400-41000 (*5)	69-102	6000-20000	55-80	2900-6100	60-93	Çok İyi	1~4	2~15
Yüksek Basınçlı Cıva Buharlı Lamba (YÜBAC)	50-400 (*5)	1600-24000 (*5)	32-60	12000-24000	60-75	2900-4200	40-69	İyi	3-5	1-4
Yüksek Basınçlı Sodyum Buharlı Lamba (YÜBASO)	50-400 (*5)	3300-56500 (*5)	66-141	12000-55000	75-80	2000-2200	20-60	İyi-Orta	2-6	1
Alçak Basınçlı Sodyum Buharlı Lamba (ABASO)	18-180	1800-33000	100-199	16000	100	1800	-	Kötü	8~12	1~10

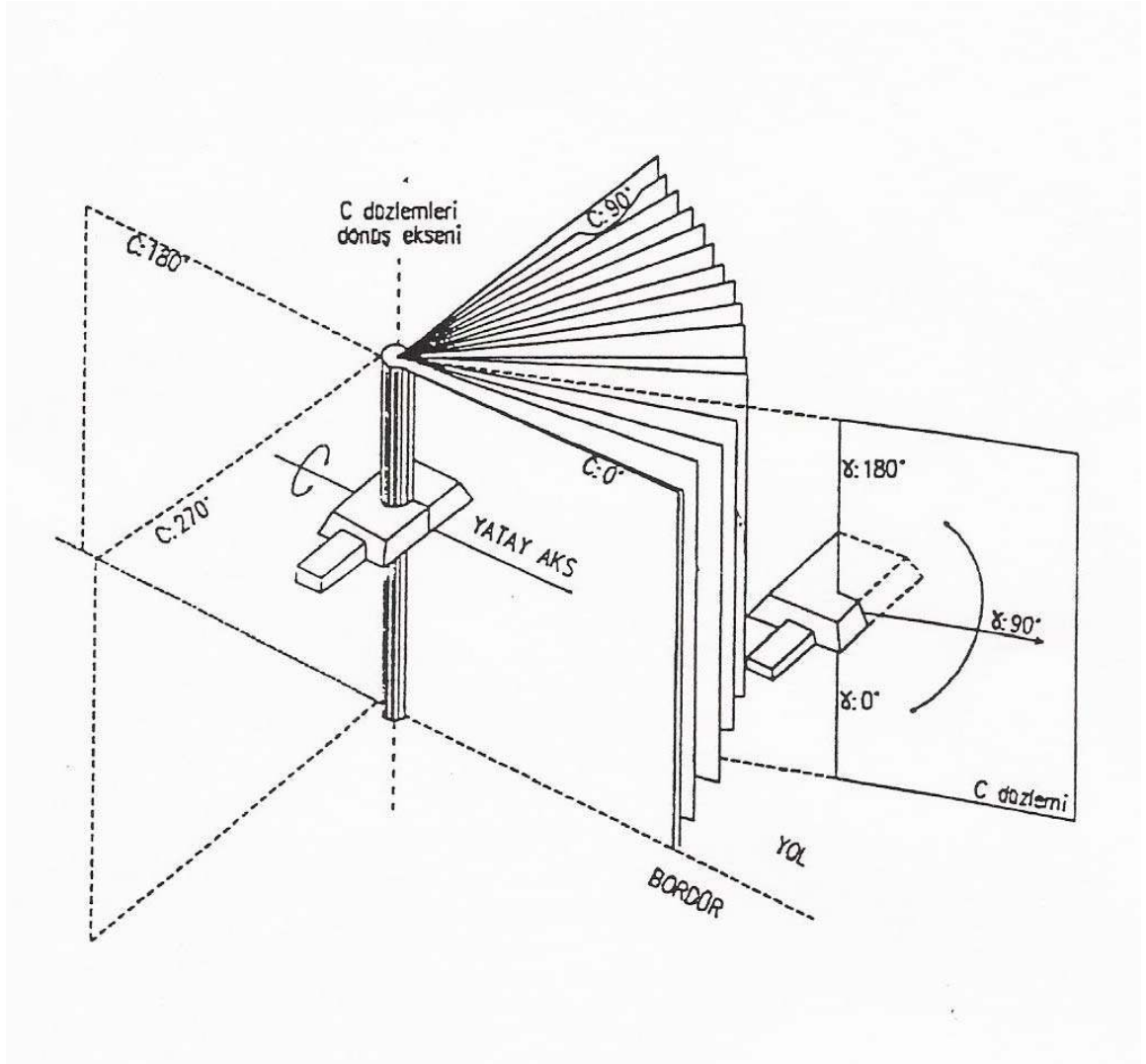
3.4 Armatürler

Bir lambanın ürettiği ışığın dağıtımı, ışığı belirli açı ve doğrultuda yönlendirmek, süzmek, değiştirmek amacıyla kullanılan ve lambanın elektrik devresine bağlanması ve çalışması için gerekli donanıma sahip bir “Aydınlatma Armatürü” aracılığı ile yapılır.

Bir aydınlatma armatürünün ışık şiddetini dağıtması ile ilgili bilgi polar diyagramlarda “Işık Dağılım Eğrileri” ile verilir. Aydınlatma armatürünün fotometrik eğrileri, farklı doğrultulardaki ışık şiddetinin ölçülerek polar koordinatlı bir grafik üzerine işlenebilmesi için, armatürü birbirine dik iki ekseninde aynı anda döndüren “Goniophotometer” adı verilen mekanik ölçüm aygıtları kullanılır. Her ne kadar üç boyutlu ortamda sonsuz sayıda düzlem üzerinde bu eğrileri irdelemek mümkün ise de; Ulusal Aydınlatma Komitesinin (IEC) 30.2 sayılı yayını, armatür ışık dağılımlarını armatürün ısıma merkezinden geçen düşey ekseninde barındıran C düşey düzlemleri üzerinde ve bu düzlemler içinde düşeyle belirli açılar yapan ışık şiddeti vektörleri aracılığıyla inceler. Armatür ışık dağılımının, lamba akısından bağımsız değerlendirilebilmesi için bu eğriler 1000 lm için verilirler. Eğer armatür yola düşey bakmayıp belirli bir gama acısı yapıyorsa, eğride aynı açıda etkin ışık şiddetleri esas alınır. Bu sistemde 0-180 derecelik C düzlemi yola paralel, 90-270 derecelik C düzlemi aydınlatılacak olan yol eksenine dik olup bu düzlemin 90 derecelik bölümü yol tarafındadır. (C / Gama sistemi için bkz. şekil 3.5)

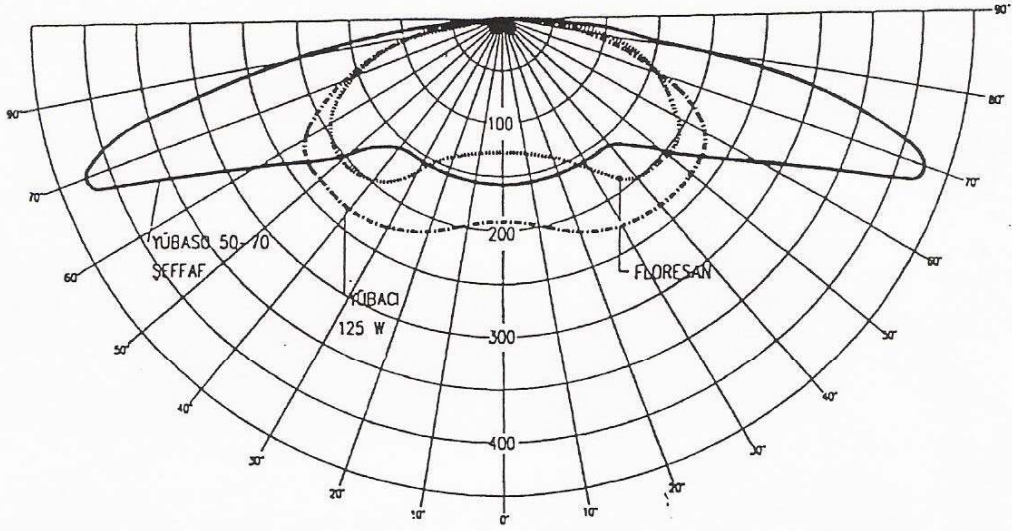
Bir tünel aydınlatması hesabında kullanılan bilgisayar programı, kendisine veri olarak bildirilen lamba akı değeri ve aydınlatma armatürü ışık dağılım eğrisi bilgileri ile kendisinden bekleneni başarabilir. Farklı simetrik armatür tipi için bu eğriler şekil 3.6 de verilmiştir.

Yol ve tünel aydınlatma armatürleri, armatürden geçen ve yol boyuna eksenine dik olan düşey düzlemdeki ışık şiddeti dağılımlarının simetrik olup olmamasına göre “Simetrik Armatür” ve “Asimetrik Armatür” olarak adlandırılırlar ve küçük bir katı açı içinde yüksek seviyelerde ışık şiddeti elde etmekte kullanılan projektörlerin tersine “Geniş Açılı Armatür” sınıfına girerler.

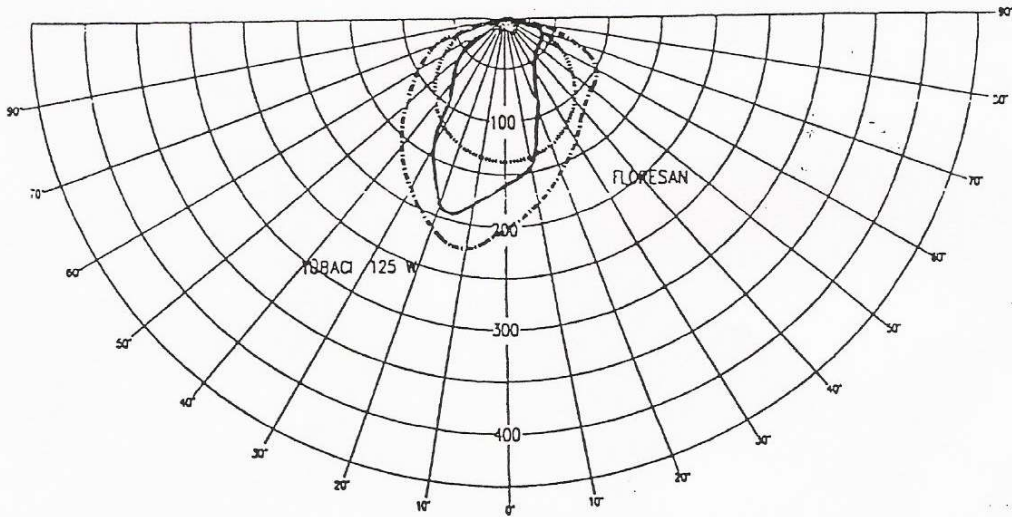


Şekil 3.5 C / Gama Sistemi

C90-C270 DÜZLEMİNDE IŞIK EĞRİLERİ



C0-C180 DÜZLEMİNDE IŞIK EĞRİLERİ

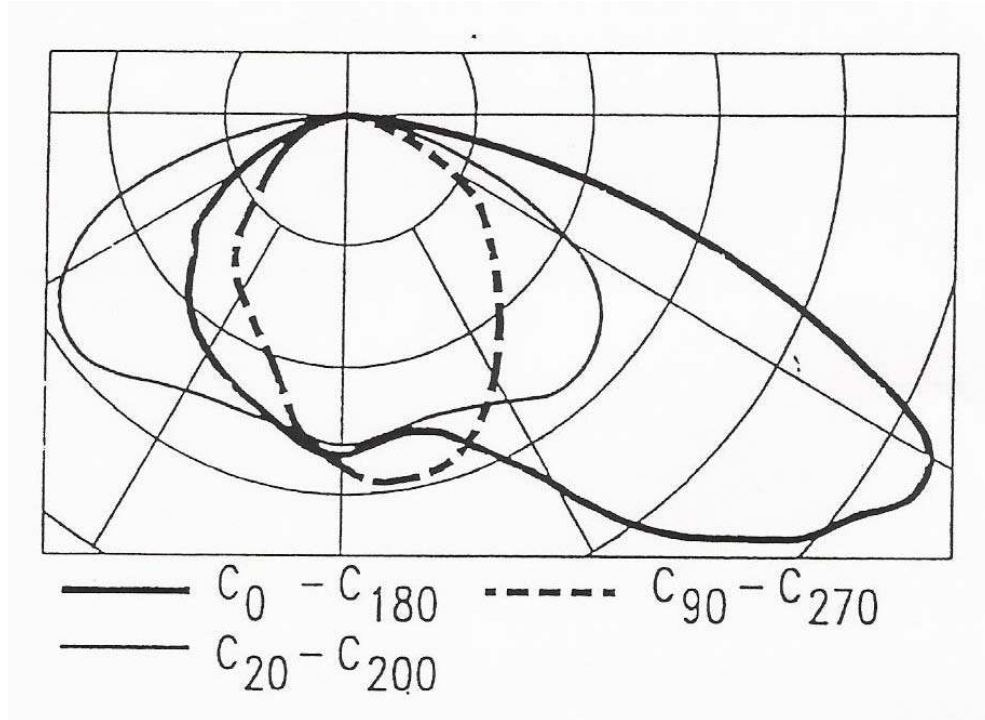


Şekil 3.6 Simetrik Armatür için Farklı Düzlemlerdeki Işık Dağılım Eğrileri

Armatür ışık dağılımını iki etmen belirler;

- Armatür içine tasarlanan şekilde yerleştirilen, genellikle yüksek saflıkta alüminyumdan üretilmiş yansıtıcı plakalar
- Armatür koruma camının iç veya dış (veya her ikisi) yüzeyine özel şekil verilerek oluşturulan kırıcılar

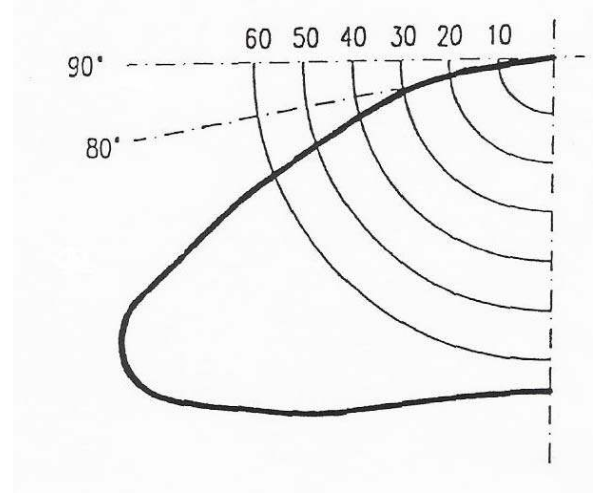
Asimetrik bir armatürün üç farklı düzlemdeki eğrisi şekil 3.7’de verilmiştir.



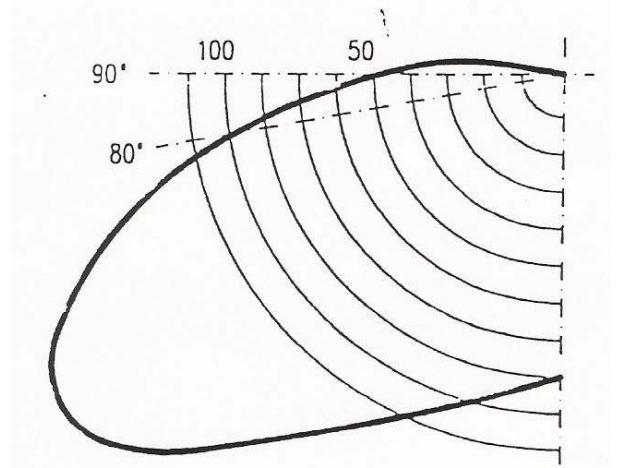
Şekil 3.7 Asimetrik bir Armatürün 3 farklı Düzlemdeki Dağılım Eğrileri

Tünel aydınlatmalarında sürücünün aydınlatma armatürleri içindeki lambalar ile direkt göz teması kamaşma nedeni olup genel kural olarak arzu edilmez. Aydınlatma armatürü içindeki lambanın direkt olarak görülmesini önlemek için armatürlerde siperlikler kullanılır. Siperlik kullanılmış bir armatürde, lamba akısının görülmesini sona erdiren doğrultu ile yatayın yaptığı açıya “Siperlik Açısı” denir. Günümüzde oluşturdukları kamaşma açısından tünel aydınlatma armatürleri, C0-C180 düzleminde ışık dağılım eğrilerine göre; “Siperlikli”, ”Yarı Siperlikli” ve “Siperliksiz“ adı ile irdelenirler. Bu sınıflandırmaya ilişkin değerler şekil 3.8’de verilmiştir.

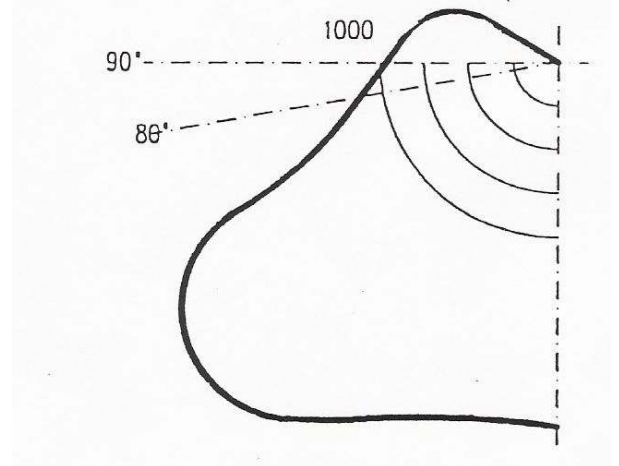
SİPERLİKLİ



YARI SİPERLİKLİ



SİPERLİKSİZ



Şekil 3.8 Yatay Aydınlatma Armatürleri için Değerleri ile Birlikte Armatür Siperlik Sınıflandırması

(NOT: Günümüzde armatür yapısında bir değişiklik yapmaksızın, armatür içindeki lambayı tutan duyun armatür içindeki konumunu değiştirmek mümkündür. Sonuçta, lamba aynı armatür içinde farklı konuma alınabilir. Böylece aynı armatür, duy konumunda yapılan değişiklikle siperlikli veya yarı siperlikli olarak kullanılabilir.)

Armatürler çeşitli dış koşullara dayanımlarına göre IPxx şeklinde koruma sınıflarına ayrılırlar. IEC 'nin 529 ve 598 no'lu standartları bu konuyla ilgilidir. 529 no'lu standart armatürün katı maddelere karşı koruma sınıfını belirtir ve IP koruma kodunun ilk rakamı ile ifade edilir. Tanımlanan altı ayrı koruma sınıfı şunlardır:

0: Katı maddeye karşı korumasız

1: Özellikle insan temasını dikkate alan "50 mm den büyük katı maddelere karşı korumalı"

2: 12 mm den büyük katı maddelere karşı korumalı

3: 2,5 mm den büyük katı maddelere karşı korumalı

4: 1 mm den büyük katı maddelere karşı korumalı

5: Toza karşı korumalı

6: Toza karşı tam korumalı.

598 no'lu standart ise armatürün sıvı maddelere karşı koruma sınıfını IP koruma kodunun ikinci rakamı ile ifade eder. Tanımlanan sekiz ayrı koruma sınıfı şunlardır:

0: Sıvı maddelere karşı korumasız

1: Dik düşen su damlalarına karşı korumalı

2: 15 derecelik açıya kadar eğik damlayan su damlalarına karşı korumalı

3: 60 derecelik açıya kadar eğik damlayan su damlalarına karşı korumalı

4: Tüm yönlerden gelen su damlalarına karşı korumalı

5: Tüm yönlerden gelen su püskürtmelerine karşı korumalı

6: Şiddetli deniz dalgası gibi su kütle düşümlerine karşı korumalı

7: Su içine batırılmaya karşı korumalı

8: Su içinde basınç altında uzun süre kalmanın etkilerine karşı korumalı.

Örnek olarak yoğun tozlu ortamda kullanılacak ama asla su ve yağmurla temas etmeyecek bir armatür IP60 koruma sınıfına göre üretilmiş olmalıdır. Ancak genel olarak, hiçbir koruma sınıfına ihtiyaç duyulmasa dahi, elektriksel güvenlik için projelerde minimum IP23 koruma sınıfı armatürler kullanılır. Tünel aydınlatma armatürlerinin fotometrik anlamda yeter süreler verimli olarak hizmet etmeleri için gereken koruma en az IP54 olup önerilen sınıf ise IP55 dir. Yeterli seçilmeyen armatür koruma sınıfı, ya bakım giderlerini arttırır ya da kısa süreler sonunda armatürlerin iş görmez hal almalarıyla sonuçlanır. Ulusal Aydınlatma Komitesinin 598 no’lu yayınına göre ise koruma sınıfları IP65 olarak seçilmelidir.

3.5 Aydınlatma Sistemleri ve Kontrast

Tünel içinde, yol üzerindeki bir cisim ve arka planı arasındaki yüksek aydınlatma kontrastının sağlanması, sürücü için cisim üzerinde daha yüksek görüş kabiliyeti verir. Dolayısıyla tünel içinde gereken parıltı değeri azalır. Parıltı kontrastı cisimlerin yansıtma özelliklerine, yol yüzeyi ve tünel duvarlarına ve kullanılan aydınlatma sisteminin tipine bağlıdır.

Yol üzerindeki nesneler için yüksek kontrast değerleri elde etmede en etkin kavram olan “ L/E_v ” oranı tünel aydınlatmalarında iki temel aydınlatma kategorisini tanımlamakta kullanılır.

Bunlardan biri, yol aydınlatmalarında da sıkça kullanılan simetrik armatürlerle yapılan aydınlatma, diğeri de asimetrik armatür ışık dağılımı ile sağlanan aydınlatmadır. Simetrik aydınlatmanın “Boyuna” ve “Enine”, asimetrik aydınlatmanın da “Zıt Yönlü” ve “Eş Yönlü” olmak üzere ikiye ayrılır.

3.5.1 Enine (Transverse)

Bu sistemde ışık, tünelin eksenine dik olarak yönelir. Enine aydınlatmanın en bilinen örneği, tüp şeklindeki flüoresanların bant şeklinde yerleşimiyle elde edilmiş sistem olup ABASO lambaların kullanımı da uygundur.

Sistemin avantajları; iyi görsel kılavuzlama, minimum kamaşma, ışığın araçların arasına girmesi ve kolay anahtarlama ve kontrol mekanizmasıdır. Dezavantajları ise; armatür araları mesafenin azalması ile armatür adetinde artış, titreşim etkisini engellemek için ekstra dikkat sarfedilmesidir.

3.5.2 Boyuna (Longitudinal)

Işık, tünel eksenine paralel olacak şekilde yönelir ve aydınlatma daha çok ışık saçar. Sistemde YÜBASO tipi noktasal aydınlatma kaynaklarının kullanımı uygun olduğu gibi, ABASO kaynaklar da kullanılabilir.

Yüksek verim, ara mesafenin artmasına bağlı olarak armatür sayısındaki azalma sistemin avantajları arasındadır. Dezavantajlar olarak ise; gölgeler, duvardaki parıltının değişken ve düzgünsüz olması, gece aydınlatmasında çift lambalı armatürlerin kullanılması sayılabilir.

3.5.3 Zıt-Yönlü (Counter-beam)

Yüksek yol yüzeyi parıltısı (L) üreten bir aydınlatma sistemi ve düşük düşey aydınlık düzeyi (R), yoldaki çoğu cisimler için yüksek karşıtlık değeri verir. Zira bu durumda tüm sistemin karşıtlık kalite parametresi K (yol parıltısının cisimlerin düşey aydınlık düzeylerine oranı) büyük olmaktadır. Böyle bir sistem asimetrik dar açılı armatürlerde yüksek güçlü lambalar kullanılarak ışınların sürücü istikametine zıt yönde yönlendirilmesi ile elde edilir. Bu sistem "Zıt Yönlü Aydınlatma (Counter Beam Lighting)" olarak isimlendirilir. Bu sistemde yoldaki cisimler negatif kontrastta görülür.

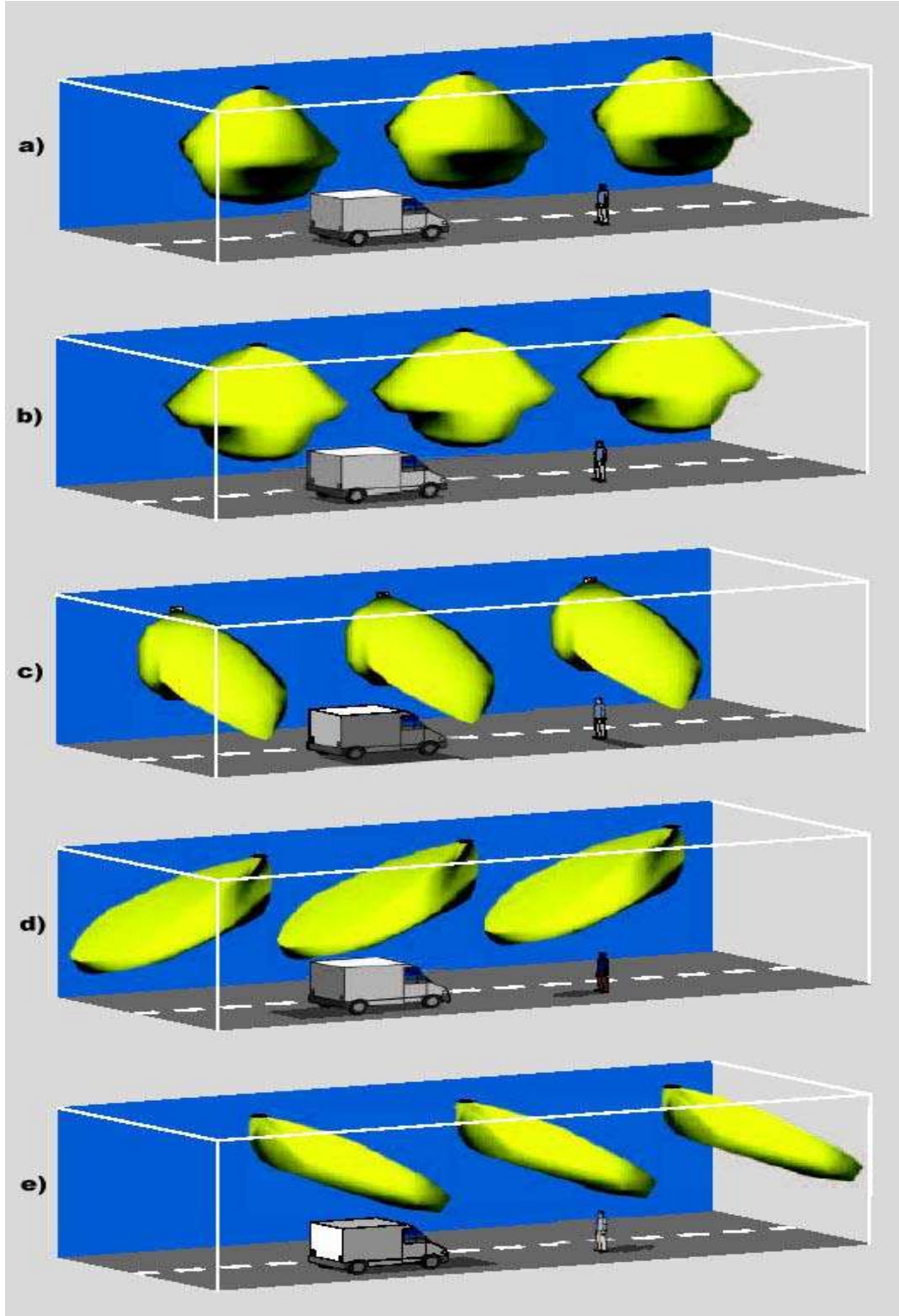
Sistemin ana avantajı, zıt yönlü ışık ile yol üzerinde kamaşma olmaksızın maksimum aydınlanma sağlanmasıdır. Dezavantajları ise, tünel girişinin daha karanlık olması (sürücülerin kendilerini güvensiz bir ortama girecek şekilde hissetmelerine neden olur), büyük araçların kendilerinden daha küçük araçların üzerine düşen gölgeleri ve karanlık veya değişken aydınlıktaki duvarlardır.

3.5.4 Eş – Yönlü (Pro-beam)

Bu tip sistemde, cismin üzerine düşen ışık trafik ile aynı doğrultudadır. $C90^\circ - 270^\circ$ düzleminde ışık dağılım eğrisi asimetrik olan armatürlerle gerçekleştirilir. Yeni bir sistem olan bu aydınlatma sistemi altındaki cisimlerin kontrastı hakkında henüz kesin bir değer verilememektedir. Ancak cisimlerin detayları daha rahat görüldüğünden, tanınmaları kolaylaşmaktadır. Genel olarak çıkışları görülebilir olan tünellerde, çıkış bölgesindeki pozitif kontrast gereksinimini karşılamak için kullanılabilir. Çift yönlü trafiğe hizmet veren tünellerde çıkış bölgesinde kullanılan eş-yönlü aydınlatma, aynı zamanda karşı yönden akan trafik için giriş bölgesindeki zıt-yönlü aydınlatma görevini görür (Philips, 1985; Thorn, 2004).

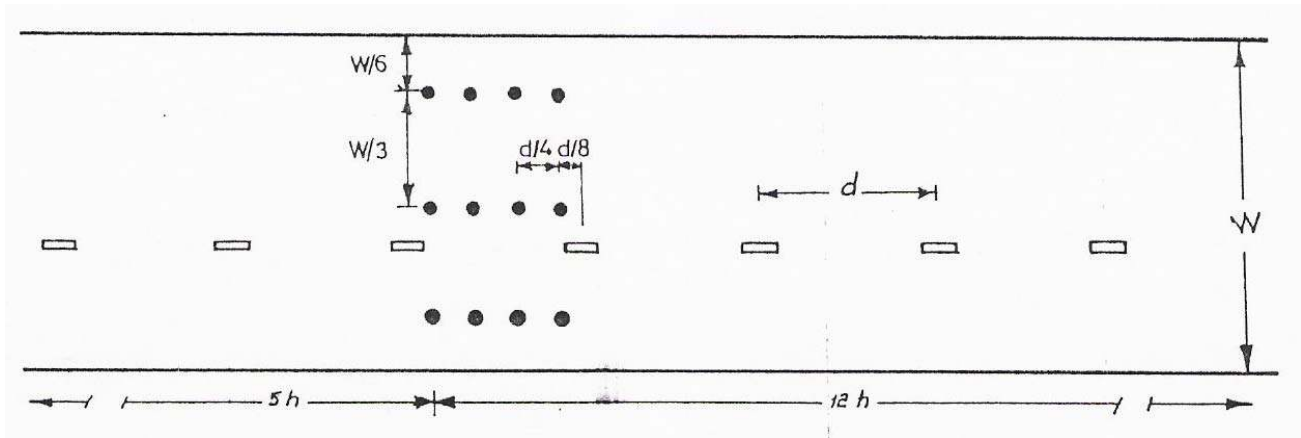
Çizelge 3.5 Aydınlatma Sistemleri Teknik Verileri

Aydınlatma Sistemi	max. sp/m.h. oranı	Tercih edilen lamba tipi	Verim cd/W ($q_0=0,1$)
Enine	1,5	TLD (flüoresan)	2
		SOX-E (abaso)	4
	2	SON-T (yübaso)	
Boyuna	3,5	SOX-E (abaso)	4,5
	4	SON-T (yübaso)	3,5-4
Zıt Yönlü	2-2,5	SON-T (yübaso)	4,5



Şekil 3.9 a) Enine, b) Boyuna, c) Duvar Montajlı Asimetrik d) Zıt Yönlü e) Eş Yönlü Aydınlatma Sistemlerinden Görüntüler

Aydınlatma sisteminin asimetri derecesi düzenli bir şebeke üzerinde elde edilen L/E_V oranının minimum değeri olarak tanımlanır. Düzenli bir şebekede, aydınlatma hesabı yapılırken iki armatür arasında, bir şeritte enine 3, boyuna 4 olmak üzere toplam 12 nokta tespiti yapılır. (Şekil 3.10) Bu 12 nokta için aydınlatma (aydınlık düzeyi ve parıltı) hesapları yapılacaktır. L/E_V oranının hesabı için, dikkate alınan her hesap noktasının önünde (tünel girişine doğru) armatür yüksekliğinin 5 katı kadar, arkasında ise armatür yüksekliğinin 12 katı kadar mesafe düşünülür. Düşey aydınlık düzeyinin hesabı için direkt ve endirekt katkıları göz önüne almak önemlidir (CIE, 1990).



Şekil 3.10 L/E_V Oranının Tespiti (d: iki ışık kaynağı arası mesafe, w: trafik şerit genişliği, h: armatürün yüksekliği)

Çizelge 3.6 Aydınlatma sistemleri için L/E_V oranları

Aydınlatma Sistemi	L/E_V Oranı
Simetrik	$\leq 0,2$
Zıt Yönlü	$\geq 0,6$

4. TÜNELLER VE AYDINLATMA

4.1 Genel Anlamda Tünel Tanımı

Demiryolu, karayolu, yaya yolu, kanal vb. gibi bir nakliye yolunun bir kısmının yeryüzünden geçirilmesinin teknik bakımdan imkânsız olduğu ya da ekonomik bakımdan uygun bulunmadığı yerlerde bu kısmın yeraltından geçirilmesi için başvurulanan yapılara tünel denir. Karada ve denizde gittikçe artan trafik hacmi yeni tüneller yapılmasını gerekli kılmaktadır. Trafik yoğunluğu artışına paralel olarak tünellere duyulan ihtiyaç özellikle dağlık alanlarda can alıcı hale gelmiştir. Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde ise tünel yapımları yoğun yol geliştirme programları dâhilinde ele alınmaktadır.

Tünel inşasını gerektiren nedenler kısaca şu şekilde sıralanabilir;

- Eğimi sınırlı olan güzergâhlarda, dağlık arazide yeryüzünden aşılamayan sırt ve tepelerin geçilmesi amacıyla,
- Güzergâhın bir kısmında tünel inşası ile önemli bir kısalma meydana gelecek ve tünel için gereken masraf bu kısaltmadan elde edilecek tasarruf ile karşılanabilecekse ya da tünelden geçilmesi halinde maliyet artsa bile bu artış işletme masraflarından elde edilecek tasarruf ile karşılanabilecekse,
- Güzergâhın bir kısmının önemli toprak kaymaları, kaya yuvarlanmaları veya çığlardan korunması amacıyla,
- Gerek askeri bakımdan, gerekse üzerindeki seyri aksatmamak, doğal yapıyı bozmamak için akarsuların veya boğaz teşkil eden deniz sularının altından geçilmek istendiği zaman,
- İnşası ve bakımı fazla masraflı olan kendini tutamayan zeminlerdeki büyük yarmalardan kurtulmak amacıyla,
- Büyük şehirlerde çok önemli yere sahip olan şehir içi ulaştırmasında başlıca şu nedenlerle tünel inşası gerekir:
 - Yer üstü istimlaklerinin çok pahalı olduğu yerlerdeki yolların genişletilmesi veya yeni yolların açılması imkanının bulunmadığı durumlarda ya da kitle halinde toplu ulaşım gerektiği zaman metro inşası için,
 - Trafiği çok yoğun olan yolların veya bir yolla bir demiryolunun aynı düzeyde birbirini kesmesi istenmediği zaman,

- Birbirlerinden tepe, sırt, akarsu, boğaz vb. gibi doğal engellerle ayrılmış şehir semtlerinin birleştirilmesi amacıyla.

Şu bir gerçektir ki bir tünelin aydınlatması ne kadar kusursuz ve eksiksiz olursa olsun, inşası sürecinde alınan bir takım yapısal önlemler ile mükemmel düzeye ulaşır. Bu önlemler şu şekilde sıralanabilir;

- Güneşin doğuşu ve batışı esnasında yol yüzeyinde çok yüksek parıltı değerleri oluşacağından ve aydınlatma tekniğinde özel zorluklar, dolayısıyla da ek maliyetler getireceğinden, mümkünse tüneller doğu-batı doğrultusunda inşa edilmemelidir.
- Çıkışlarda oluşabilecek kamaşmanın önlenmesi için, doğrusalların yerine hafif virajlı giriş-çıkışlar tercih edilmelidir. Ayrıca tünel içinde de hafif virajlı bir gidiş, cismin açık renk duvarlar üzerinde kontrastını yükselteceğinden, görme koşulları açısından da yararlıdır.
- Tünel yaklaşma bölgesindeki yol kaplaması ve tünel kapı yüzeyi koyu renk ve pürüzlü olmalıdır. Ayrıca tünel girişinden önce yola dik olarak inşa edilen duvarlar da mat, koyu renk malzemeden yapılmalıdır. Tünel içinde mümkün olduğu kadar aynasal yansıtıcı yüzeylerden kaçınılmalı duvarlar ise kolay temizlenir malzemeden yapılmış olmalıdır
- Nispeten karanlık olan tünel girişinin görüş alanındaki yerini arttırmak için tünel kapısı geniş ve yüksek yapılmalıdır. (su altı tünelleri için çok faydalı olan bu çözüm, dağ tünelleri için çok pahalıya mal olmaktadır)
- Tünel girişinin bitişiğindeki ve üstündeki açık arazi; yıl boyu yeşil kalan kışa dayanıklı, iğne yapraklı bitkiler ve bodur ağaçlarla ağaçlandırılmalıdır.
- Yüksek hız ile yaklaşılan tüneller kurulum aşamalarında yüksek maliyetler getireceğinden hızı limitleyecek bazı önlemler alınmalıdır. Örneğin; tünele yaklaşılırken bir rampanın mevcut olması ya da hız uyarı işaretleri hızı azaltacağından eşik bölgesi parıltı düzeyi ve uzunluğu da düşecektir. Ödeme veya kontrol noktaları oluşturulacak ise bunların çıkış yerine girişte yapılması tercih edilmelidir. Bu sayede giriş bölgesinde gereken parıltı değeri büyük ölçüde azaltılabilir.
- Aydınlatmanın verimini yükseltmek için tünel içindeki yol kaplaması ve tünel duvarları yüksek yansıtma faktörüne sahip olmalıdır. Bu amaç için açık renk yol kaplamalarının, kolay temizlenebilen aydınlık duvarların kullanılması uygundur. Ancak aydınlatmanın

kalitesi ve endirekt kamaşmanın önlenmesi bakımından yol kaplaması ve tünel duvarları dağıtıcı/yansıtıcı nitelikte olmalıdır (Bommel 1980; Philips, 1981).

4.2 Tünel Aydınlatma Tekniği

Yoldaki seyahat mesafesini kısaltmak ve sürücüyü zorlayacak, rahatsız edecek, doğa koşullarının durumuna göre sürüş güvenliğini tehlikeye atabilecek rampaları azaltmak için yol güzergâhındaki engeller (dağ, tepe vb.) yüzeyden değil de bu engellerin içinden tüneller açılmak suretiyle geçilmektedir. Trafik emniyeti ve akıcılığı açısından son derece yararlı yapılar olan tüneller, yapımları esnasında büyük yatırım maliyetleri gerektirmektedirler. Tünel içinde de yaklaşılan yoldaki ile aynı düzeyde rahatlık, hız ve emniyette trafik akışının sağlanması beklenildiğinden, tünellerin aydınlatılmaları da ayrı bir önem kazanmaktadır. Aydınlatılması gerekecek kadar uzun olan tüneller yeterince aydınlatılmadıkları takdirde yaklaşan bir sürücü için "karanlık delik" izlenimi doğururlar. Özellikle güneşli bir günde tünele yaklaşan sürücünün tünel girişini karanlık delik gibi görmesini ve tünelde görüş kaybına uğramasını önlemek için, gözün karanlık adaptasyonu kabiliyeti dikkate alınarak, tünellerde kademeli sistem mantığına dayanan bir aydınlatma yapılması gerekmektedir. Tabi ki ideal durum, tünelin açık yol parıltı düzeyinde aydınlatılmasıdır. Ancak gerek tesis ve gerekse işletme maliyeti çok yüksek olacağından böyle bir çözüm kesinlikle düşünülmez. Mühendislikte amaç yeterli ve ekonomik optimum çözümü bulmak olduğundan, tüneldeki aydınlatmanın görme yeteneğini bozmayan minimum düzeyde olması beklenir. Gözün karanlık adaptasyonu dikkate alındığında, tünelin ilk bölgesinde yoğun bir aydınlatma yapılmasının ve bunun tünel içinde ilerlerken kademeli olarak azaltılmasının, görme yeteneği açısından yeterli olduğu anlaşılmaktadır.

Aydınlatmanın, nesnelere ya da çevreye “görme” amaçlı ışık uygulanması olduğuna daha önceden değinilmişti. “Yol” ve “Tünel” aydınlatmalarında da tanım aynı olup, her ikisinde de aydınlatma teknikleri az sayıda istisna dışında aynı temele dayanır. Her ikisinde de sınırlı sayıda “sürücü adına talep ve kriter” den söz edilir. Bununla birlikte yol ve tünel aydınlatma teknikleri arasında 3 önemli temel farktan söz edilebilir;

- Yol yüzeyinin her yerinde her zaman aynı değerde bir ortalama parıltı talep eden Yol Aydınlatma Tekniğine karşın; Tünel Aydınlatma Tekniğinde, tünel içindeki her farklı bölge için farklı zamanlarda ve daima “tünel dışı”na bağımlı ve değişken parıltı değerleri talep edilir.

- Tünellerde; yol aydınlatma tekniğinden ayrı olarak aydınlatılma zorunluluğu bulunan tünel duvarları vardır.
- Tünel aydınlatmasında; yol aydınlatma tekniğinde söz konusu olmayan gündüz aydınlatması, acil aydınlatma gibi sistemler mevcuttur.

Tünellerin aydınlatılmasında oldukça büyük maliyetlerin ortaya çıkması nedeniyle, bu konuda 1950'li yıllardan beri laboratuvar ve tünellerde deneysel araştırmalar yapılmakta ve bazı tavsiyeler verilmektedir. Bu çalışmada daha çok Uluslararası Aydınlatma Komisyonu'nun (CIE) 1990' da yayınladığı (No.88) tünel aydınlatmasına dair "Teknik Rapor"dan istifade edilmek suretiyle tünel bölgelerinde sağlanması gereken parıltı seviyeleri verilmektedir (Philips, 1981; İzбек, 1999).



Şekil 4.1 Tünel aydınlatma tekniğinde büyük önem arz eden giriş bölgesi

4.2.1 Uluslararası Aydınlatma Komisyonu’nun Önerileri

Uluslararası Aydınlatma Komisyonu’na (CIE) göre;

- Tünel aydınlatmasının amacı, araçların tünel içinde dıştaki yol ile aynı hızda, can güvenliği ve rahatlıkta yolculuk yapmalarının sağlanmasıdır.
- Trafik, ancak trafik akışı ile ilgili yeterli görsel bilginin algılanması ile güvenli ve açık olur. Bu algılamanın içinde diğer araçların varlığının veya yokluğunun tespiti, hareketlerinin gözlemlenmesi gibi engeller mevcuttur.
- Tünel trafiğinde en kritik koşullar gündüz vakti, uzun tünellerin girişlerinde olur. Etrafı açık ve gün ışığını iyi alan bir yolun tünele giriş noktasında, tünel sürücüyü çok daha karanlık gelecektir. Ve aydınlatma noktasında bu konuya baktığımızda 3 grup sorunla karşılaşabiliriz:
 - Kara delik etkisi
 - Adaptasyon eksikliği etkisi
 - Tünel içi aydınlatma seviyesi

Tünel girişinden dikkate alınabilecek bir uzaklıkta olan sürücü için tünelin iç kısmı bir kara delik görüntüsü alabilir. Tünelin iç kısmı ayrıca aydınlatılmış olsa bile gözün gün ışığından bu aydınlık seviyesine adaptasyonu arasında belli bir süre geçecektir ve bu adaptasyon için gerekli süreyi minimize edecek son sınır değerini belirleyen tünel içi aydınlatma seviyesidir.

Bu sorunlar için olan önerilerini CIE temelde; kısa tünel aydınlatması, tünel giriş/çıkışlarının aydınlatması ve uzun tünellerde gece aydınlatması olarak belirlemiştir. Bunların dışındaki diğer tüm oluşabilecek koşullar da bu öneriler baz alınarak çözümlenebilir.

4.2.2 Aydınlatma Açısından Tünel Tipleri

Tüneller iki tip olarak sınıflandırılabilir.

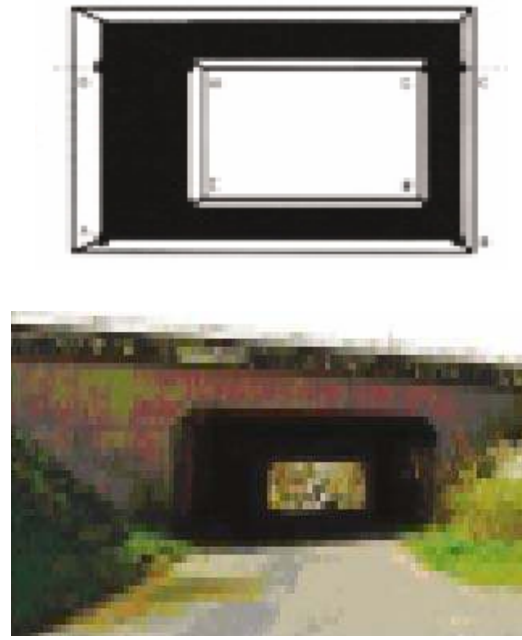
- Kısa Tüneller
- Uzun Tüneller

4.2.2.1 Kısa Tüneller

Tünel girişinden fren mesafesi kadar uzaktaki bir noktadan, tünel içindeki bir engel çıkış açıklığı fonunda belirgin bir siluet şeklinde görülebiliyorsa, tünel kısa olarak sınıflandırılır ve

bu tür yapıların gündüz aydınlatılmaları gerekmez. Kısa tüneller görüş alanında "karanlık çerçeve" şeklinde görünürler. (Şekil 4.2)

Düz bir tünelde 100 metre mesafeden 20 cm yüksekliğindeki bir engele bakıldığında gözlem alanı yaklaşık olarak 20 m.dir. Giriş ve çıkıştaki gün ışığının katkıları da düşünülerek, gündüz aydınlatması gerektirmeyen düz tünel uzunluğu 50 m olarak kabul edilebilir. Tünel virajlı veya yokuşlu olduğunda, ya da trafik yoğunluğunun çok fazla olduğu hallerde bu uzunluktan daha kısa olan tünellerin de gündüz aydınlatılmaları gerekebilir.



Şekil 4.2 Kısa mesafeli tüneller için “Karanlık Çerçeve” modellemesi ve bu tanıma uyan Hollanda’da bir tünel

Gündüz aydınlatması gerektirmeyenlerden daha uzun olan kısa tünellerde gerekli görüş koşullarının elde edilebilmesi için, tünel içinde aynen uzun tünellerin ilk bölgesindeki eşit yüksek parıltı düzeyleri sağlanmalıdır. Fakat genellikle böyle bir aydınlatma tesisatının yapımı ekonomik değildir. Bunun yerine tünelin yaklaşık olarak ortasından mümkünse doğal, değilse yapay aydınlatılması yeterli ve ekonomik bir çözüm olur. Bunun için ya tünel tavanında geniş bir açıklık bırakılır, ya da takriben ortasında ışık kaynakları ile tünelin tüm enini kaplayan parlak bir şerit oluşturulur. Neticede tünel daha kısa iki tünele bölünmüş olur. Perspektif görünüş nedeniyle, parlak şeridin genişliği minimum 10 m olmalıdır. Artık tünel içindeki bir engel ya parlak şerit üzerinde ya da çıkış fonunda bir karanlık silüet şeklinde çıkıntı yapabileceğinden, kolaylıkla görülebilecektir (CIE, 1973; BS, 1992).

4.2.2.2 Uzun Tüneller

Çıkış ve çıkış arkasındaki fonun, girişe belli bir mesafeden, trafiğin normal olduğu bir anda görülememesi durumunda, o tünelin uzunluğu önemsensemeksizin “Uzun Tünel” olarak nitelendirilebilir.

Bir tüneldeki aydınlatma seviyelerinin kontrolünde en basit yöntem güneşin doğuş ve batışı ile bağlantılı olarak zamanı baz almaktır. Akşam karanlığının aniden azalması araç sürücüsünü 5 kattan daha fazla bir faktörle tehlikeye sokacaktır. Bu nedenle gündüz seviyesinden gece seviyesine geçiş kademeleri 3:1 ‘den büyük olmayacak şekilde sürekli dim edilmelidir. Fotosel röleler kullanarak o bölgedeki en yüksek gün ışığı aydınlık seviyesinin kontrolü ve bu seviye ile tünel bölgeleri arasındaki uyum ayarı sürekli kontrol edilebilir.

Tünelin, tünel girişinden belli bir mesafe ötesinde algılanmasını engelleyebilecek faktörler olabilir. Bu faktörlerin başında girişteki araç yolu yüzeyinin koyu renkte olması, kullanılan malzeme ve bu malzemelerin yansıtma faktörlerinin 0,2 ’den düşük olması, etraftaki ağaçlar veya tünelin dönüşlerde gerideki girişten hiçbir şekilde gün ışığı almayacak şekilde tasarlanması gibi etkenler olabilir.

Diğer taraftan, sürücünün dikkatini tünel girişine çekmek için, eşik bölgesi aydınlatmasında gün ışığı renklerinden farklı bir renk kullanmak veya armatürün belirgin şekilde dışarıdan fark edilmesini sağlamak gibi uygulamalara gidilebilir. Ancak bu öneriler çok işlek trafiğin olduğu tüneller için geçerli değildir.

Işık kaynağı için gerekli enerjinin en aza indirgenebilmesi ve daha az miktarda armatür kullanılmasının sağlanması için tünel içi araç yolu yüzeyinin ve eşikteki tünel duvarlarının daha yansıtıcı renk ve malzemeden yapılmasına dikkat edilmesi gerekir.

Tünel kapısı yüksek olmalıdır. Yüksek bir kapı, gerekli eşik bölgesi uzunluğunu kısaltarak tünel dış ve içi arasındaki adaptasyona yardım eder.

1:10 parıltı oranının geçerli olduğu yerlerde, eşik bölgesi uzunluğu hızla orantılıdır ve güvenli fren mesafesinin hesabı dikkate alınmalıdır. Örneğin, 100km/s hıza kadar hız sınırlarında bu mesafe 200m olmalıdır. Ancak gerçekte bu tünelin eşik bölgesi uzunluğu tünel girişinin yapı ve şekline göre daha kısa olabilir.

Gündüz saatlerinde tünelin iç kısımlarındaki ortalama parıltı değeri şöyle olmalıdır:

Şehir içi (merkezi yerlerdeki) tünellerde; 10 ve 20 cd/m²

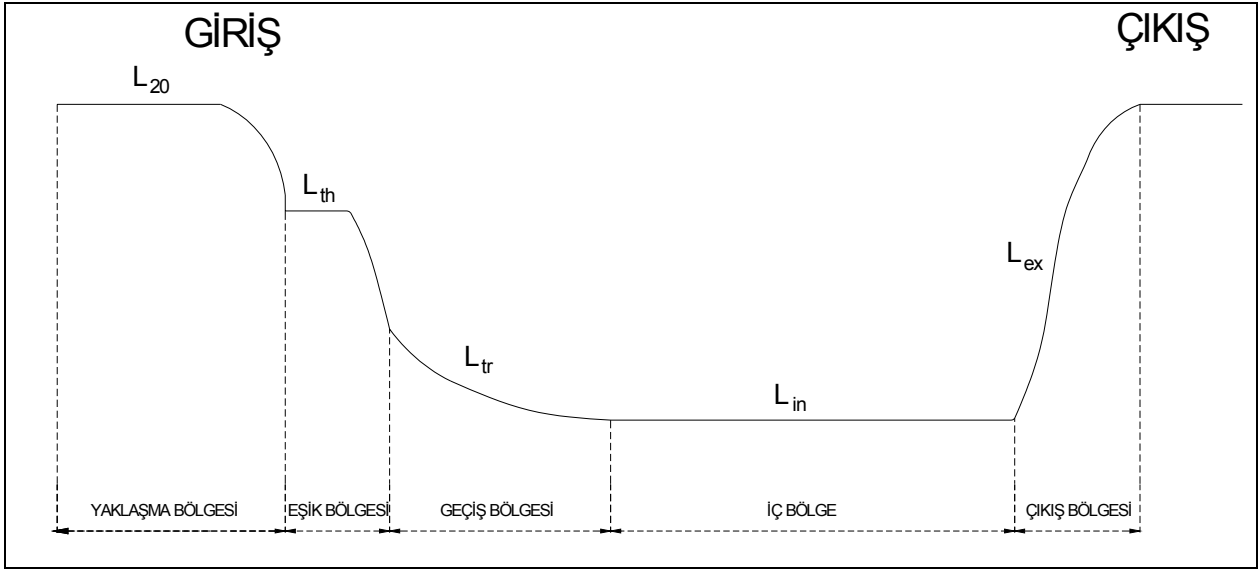
Şehir dışı (kırsal yerlerdeki) tünellerde; 5 ve 10 cd/m²

Çok uzun tünellerde veya hız sınırının olduğu tünellerde yahut trafik yoğunluğunun az olduğu yollarda (örn bazı dağ tünelleri); 3 ve 5 cd/m²

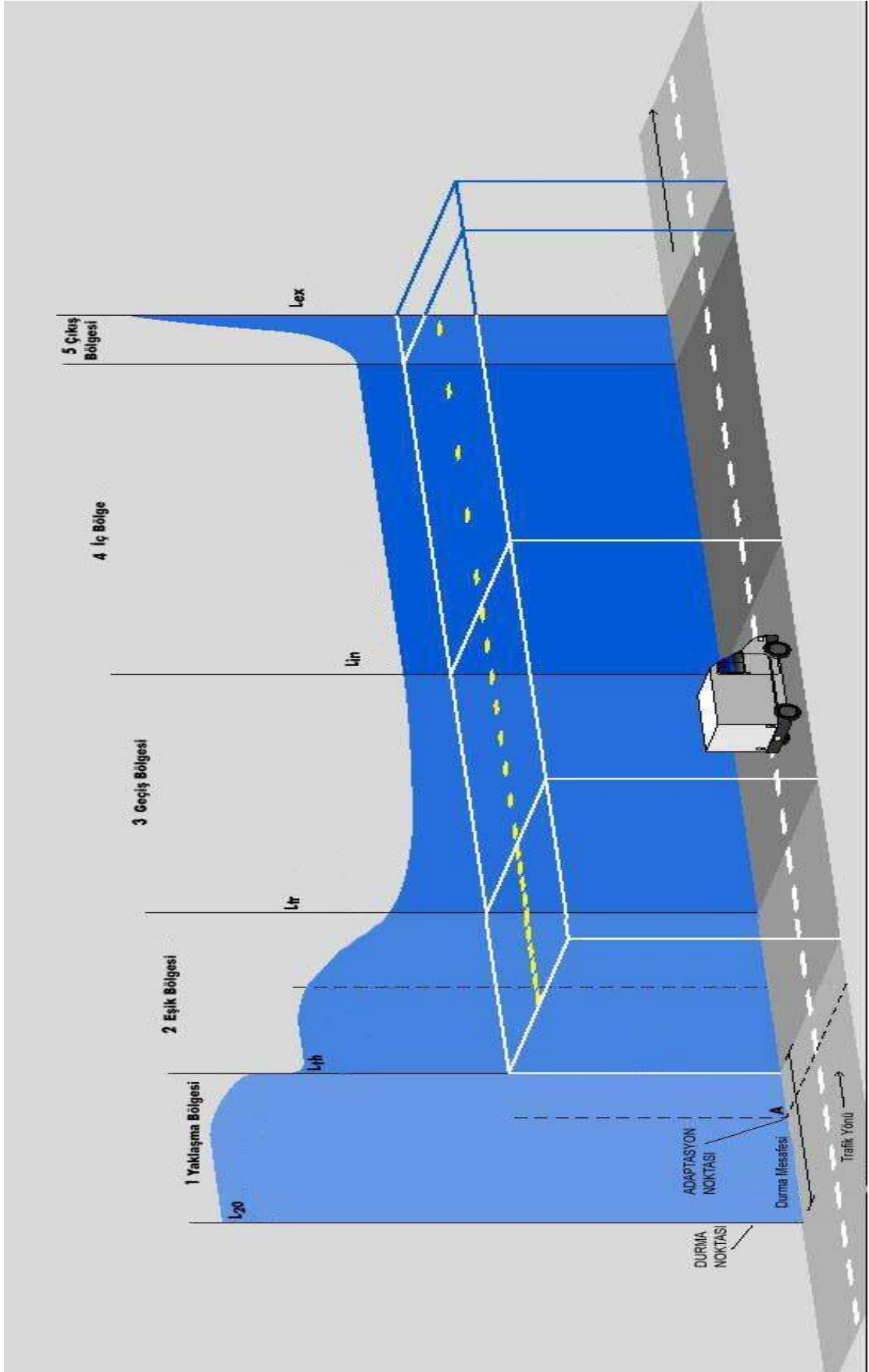
4.2.3 Tünellerde Gündüz Aydınlatması ve Bölgeler

Kritik uzunluktan daha uzun tünellerde gündüz aydınlatması, gece aydınlatmasına göre daha ağır koşulları yerine getirmek zorundadır. Gündüz saatlerinde ortaya çıkan aydınlatma sorunu adaptasyonla ilgilidir. Yani gündüz parlıltısına adapte olmuş insan gözü birdenbire tünel girişindeki çok düşük parlıltı düzeyine girildiğinde ilk anda karanlık adaptasyonu nedeniyle bir süre etrafını göremez. Bu nedenle tünelin ilk kısmındaki aydınlatma karanlık adaptasyonunu hesaba katacak şekilde yani yüksek aydınlık düzeyinden alçak aydınlık düzeyine kademeli geçişi sağlayacak şekilde yapılmalıdır.

Tünel aydınlatmaları bu farklılıkların kılavuzluğuyla 5 farklı adaptasyon bölgesine ayrılmıştır.

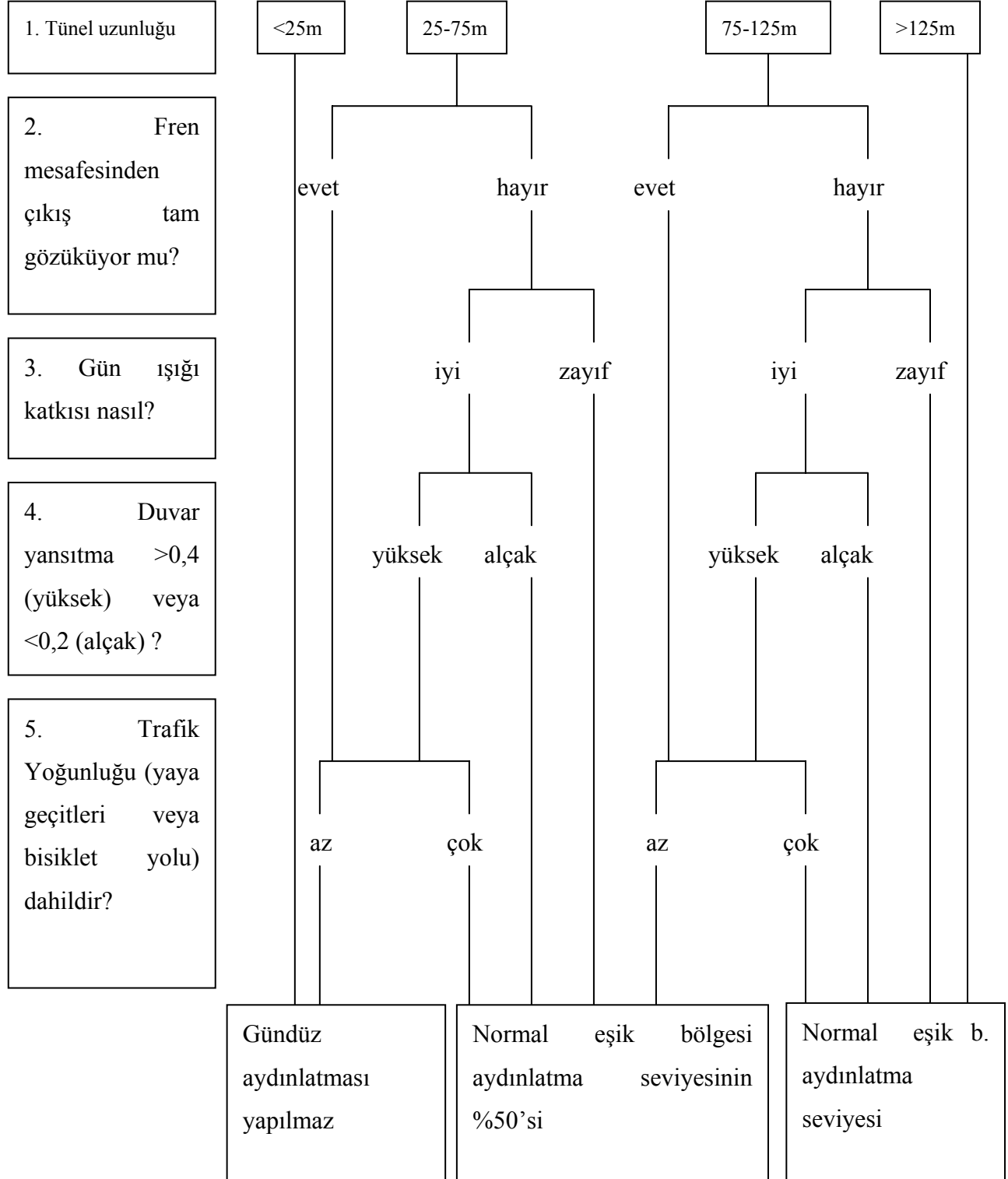


Şekil 4.3 Bölgelere göre Aydınlık Düzeyleri



Şekil 4.4 Tünel Aydınlatmasında Bölgeler ve önemli Noktalar

Ayrıca Uluslararası Aydınlatma Komisyonu'nun (CIE) gündüz aydınlatma esaslarıyla ilgili yayınlamış olduğu grafik aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.5 CIE farklı uzunluklardaki tüneller için gündüz aydınlatması

4.2.3.1 Yaklaşma Bölgesi

Adından da anlaşılacağı üzere tünel içinde olmayıp, şartlara göre tünel girişinden 100 ila 200 m. önce başlayan ve tünel girişinde sona eren bölgedir. Tünel girişi, tünel kapısı veya var ise gün ışığı ekranının başlangıcıdır. Sürücü gözünün tünel girişine adaptasyonu, bu bölgenin parıltısı ile doğrudan ilişkilidir. Çevredeki yapılaşma veya arazi koşullarının etkisi ya da gün ışığı ekranları veya karanlık tünel ağzının görünmesi ile girişten önce adaptasyonun başladığı "adaptasyon noktası" da bu bölgenin sınırları içindedir. Girişteki çevre koşulları, gidiş hızı ve sürücüye göre değişebilen bu noktanın yerinin tayini konusunda literatürde büyük farklılıklar mevcuttur. Örneğin İsviçre Yönetmeliği'nde (SEV) tünel girişinin 20° lik açı ile görülebildiği nokta olduğu ifade edilirken, Schreuder adlı araştırmacı tarafından da araç ön camının engelleme açısının ortalama 7° olduğu kabul edilerek, adaptasyon noktası tünel girişinin 7° lik açı ile görüldüğü nokta olarak tanımlanmıştır. İzlenecek en doğru yol, tünel inşası esnasında mümkün olabilen her türlü yapısal önlemler alınarak adaptasyon noktasının tünel girişinden olan uzaklığının artırılması ve tünelden tünele büyük farklılıklar gösteren adaptasyon noktası yerinin tünel aydınlatması tasarımına başlanmadan önce tünel girişinde yapılan bir dizi ölçmeler sonucunda yaklaşık olarak belirlenmesidir (Schreuder, 1971).

4.2.3.1.1 Yaklaşma Bölgesi Parıltısının Tayini

Eşik bölgesinin başlangıcında gerekli olan parıltı değeri, tünel girişinde duruş mesafesine eşit mesafede elde edilen giriş bölgesi parıltısına (L_{20}) bağlıdır. Değişken gün ışığı durumları nedeniyle oluşacak farklı çevre görüntüleri nedeniyle L_{20} zamana ve şartlara bağlı olarak farklı değerler alır.

Bir tünel aydınlatma sisteminin tasarımı için L_{20} 'nin, referans duruş mesafesi kadar uzaklıktan bir yıl içinde yeterli sayıda alınan veriler yardımıyla, maksimum değerini bulmak gerekmektedir.

Mevsim ve hava şartları da değiştirici faktör olduğundan birçok durumda bu L_{20} değeri tam olarak ölçülemez. Bu noktada 2 farklı basitleştirilmiş yöntem uygulanmaktadır.

4.2.3.1.1.1 Birinci Yöntem

Dış bölge parıltısı L_{20} 'nin seçimi altta verilmiş olan tablo değerlerine göre yapılır (CIE, 1990).

Çizelge 4.1 Dış Bölge Parıltısının Farklı Durumlar için Değerleri

Görüş alanındaki parlaklık durumları	20° Konik Görüş Açısı İçindeki Gökyüzü Yüzdeleri									
	35%		25%		10%		0%			
	Normal	Karlı	Normal	Karlı	Normal	Karlı	Normal	Karlı		
Düşük-Yüksek	Düşük-Yüksek	Düşük-Yüksek	Düşük-Yüksek	Düşük-Yüksek	Düşük-Yüksek	Düşük-Yüksek	Düşük-Yüksek	Düşük-Yüksek	Düşük-Yüksek	Düşük-Yüksek
(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(2)	(3)	(2)	(3)	(3)	(3)
Durma mesafesi 60m	(4)	(4)	4000-5000	4000-5000	2500-3500	3000-3500	1500-3000	1500-4000		
Durma mesafesi 100m ve 160m	4000-6000	4000-6000	4000-6000	4000-6000	3000-4500	3000-5000	2500-5000	2500-5000		

Bu tablo şu alt bilgiler dikkate alınarak okunmalıdır:

(1) Tünelin yönüne bağlı olan etmen;

Düşük: Kuzey yarımkürede, güney girişi

Yüksek: Kuzey yarımkürede, kuzey girişi

(2) Çevrenin aydınlığına bağlı olan etmen;

Düşük: Giriş çevresindeki yüzeylerin yansıtma faktörü düşük

Yüksek: Giriş çevresindeki yüzeylerin yansıtma faktörü yüksek

(3) Tünelin yönüne bağlı olan etmen;

Düşük: Kuzey yarımkürede, kuzey girişi

Yüksek: Kuzey yarımkürede, güney girişi

(4) 60m'lik duruş mesafesi için; görüş alanının %35'lik kısmının gökyüzü tarafından kaplanması durumuna uygulamada pek rastlanmaz.

Not:

Kuzey Girişi: Güneye doğru ilerleyen trafik için tünel girişi;

Güney Girişi: Kuzeye doğru ilerleyen trafik için tünel girişidir.

4.2.3.1.1.2 İkinci Yöntem

Tünel girişinden güvenli duruş mesafesi kadar uzaklıkta 20 derecelik konikal görüş alanında olan gökyüzü, yol, çevre ve yaklaşım bölgesi parıltısı gibi faktörlerin (4.1) formülüne tabi tutulmasıyla L_{20} değeri elde edilebilir.

$$L_{20} = \gamma L_C + \rho L_R + \varepsilon L_E + \tau L_{th} \quad (4.1)$$

$$\gamma + \rho + \varepsilon + \tau = 1 \quad (4.2)$$

Bu formülde;

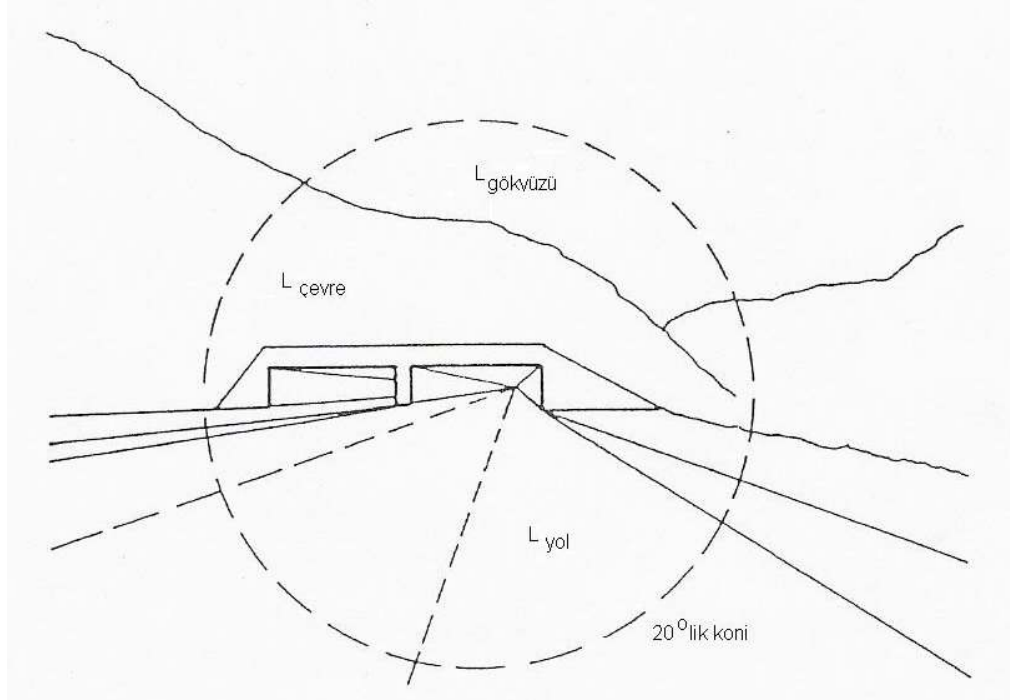
L_C : Gökyüzü parıltısı

L_R : Yol parıltısı

L_E : Çevresel parıltısı

L_{th} : Eşik bölgesi parıltısı

- γ : Gökyüzü %'si
 ρ : Yol %'si
 ε : Çevrenin %'si
 τ : Tünel girişinin %'si



Şekil 4.6 Tünel Girişinde Çevresel Faktörler

Bu hesaplamamanın amacı L_{th} 'ı elde etmeye dayanır. (4.1) no'lu denklemde 2 farklı bilinmeyen olmasına rağmen bunlardan bir tanesi geçici olarak ihmal edilebilir. 100-160m duruş mesafeleri için, diğer parıltı değerlerine nazaran çok küçük olduklarından τ ve L_{th} terimleri denklemde ihmal edilebilirler. Yeni denklem şu şekilde yazılabilir;

$$L_{20} \approx \gamma L_C + \rho L_R + \varepsilon L_E \quad (4.3)$$

(4.3) formülünde yer alan parıltı değerleri ölçülerek bulunabileceği gibi tünel konumuna göre Çizelge 4.2 yardımıyla da bulunabilir (Philips, 1981; CIE, 1990; Onaygil, 1990).

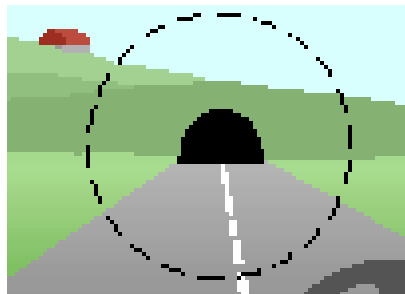
Çizelge 4.2 Yaklaşma Bölgesindeki Aydınlık Düzeyine Bağlı Olarak Giriş Bölgesindeki Parıltının Değişimi

Sürüş Yönü	L_C (kcd/m ²)	L_R (kcd/m ²)	$L_{\text{çevre}}$ (kcd/m ²)			
			Kayalar	Binalar	Kar	Çayır
Doğu-Batı	12	3	3	8	15 (dikey) 15 (yatay)	2
Güney	16	4	2	6	10 (dikey) 15 (yatay)	2
Kuzey	8	5	1	4	5 (dikey) 15 (yatay)	2

Yaklaşma bölgesi pırıltısıyla ilgili farklı yönetmeliklerin çeşitli yaklaşımları mevcuttur. En yüksek parıltı düzeyi olarak; İngiliz Yönetmeliği'nde (BS 5489:Part 7/1971) güneşli bir gündeki 2000 cd/m², Alman Yönetmeliği'nde (DIN 67524/1972) 6500 cd/m², İsviçre Yönetmeliği'nde ise çevresinde yapılaşma olan bölgeler için 2500–4000 cd/m², görüş alanının büyük kısmının gökyüzü tarafından kaplandığı açık arazilerde 6000–8000 cd/m² değerlerinin temel alınmasının uygun olacağı belirtilmiştir.

4.2.3.2 Giriş Bölgesi

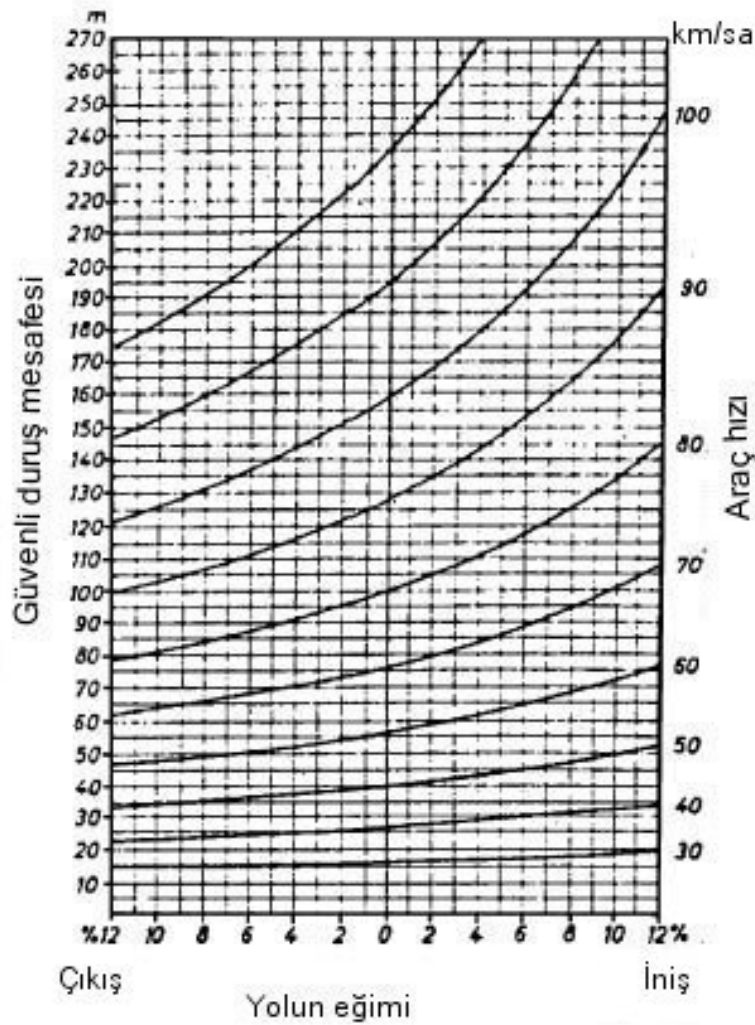
Sürücünün gözlerinin adaptasyon durumunda olduğu ve tünele girişi ifade eden ve iç bölgeye kadar devam eden bölgedir. Gün ışığında, çok yüksek parıltılarda araç kullanan sürücü için iyi aydınlatılmamış tünel girişi gözün adaptasyonu için yeterli olmayacak, tünel girişi sürücüye kara delik gibi görünecek ve müteakibinde de geçici körlük hali ortaya çıkacaktır. Ancak aynı yetersiz aydınlatma gece karanlığında daha etkili olacaktır. Yani gözün daha karanlık ortama olan adaptasyonu, aydınlık ortama olan adaptasyonundan zor olacaktır. Giriş bölgesi; eşik ve geçiş bölgeleri adı altında iki farklı bölge olarak incelenir.



Şekil 4.7 Tünel giriş bölgesindeki yetersiz aydınlatma sonucu ortaya çıkan “Kara delik Etkisi”

4.2.3.2.1 Eşik Bölgesi

Eşik bölgesi mesafesi, maksimum trafik hızına ve dolayısıyla fren mesafesine eşit olan bölgedir. Giriş bölgesindeki sürücünün, tünelin eşiğindeki detay ve engelleri görmesi gereklidir. Bu suretle eşik bölgesinin uzunluğu; bir cismin yaklaşma bölgesindeki sürücü tarafından en azından aracın durabilme mesafesine eşit bir uzaklıktan görebilmesi esasıyla fren mesafelerinden yararlanılarak belirlenir. Bu güvenli fren mesafesi CIE önerilerine göre yolun eğimine ve araç hızına bağlı olan şekil 4.8'den belirlenebilir (DIN, 1972).



Şekil 4.8 Trafik hızına ve yol eğimine bağlı olarak güvenli duruş mesafeleri

4.2.3.2.1.1 Eşik Bölgesi Parıltısının Tayini

Eşik bölgesi parıltısı (L_{th}), tünel aydınlatma tekniğinde gerek maliyet gerekse emniyet açısından en önemli husus olmakla birlikte amaç bu ikisi arasındaki dengenin en optimize şekilde sağlanabilmesidir. Örneğin; tünel girişini neredeyse gün ışığına yakın bir düzeyde aydınlatmak belki göz adaptasyonu ve dolayısıyla emniyet açısından şartları sağlıyor olsa bile

ortaya çıkacak maliyetler ile sistemin optimize bir çözüm olmasına engel olacaktır. Burada önemli olan doğru aydınlatma sistemi ve yeterli düzeyde minimum aydınlık düzeyi seçimi ile hem maliyetleri kontrol etmek hem de göz adaptasyonunu tehlikeye atmamaktır.

Eşik bölgesi parıltısı; yaklaşma bölgesi parıltısı, seçilen karşıtlık parametresi ve fren mesafesi verilerine doğrudan bağlılık gösterir. Eşik bölgesinin başlangıcında sağlanması gereken ortalama yol yüzeyi parıltısı, farklı fren mesafeleri ve L/E_v oranları için çizelge 4.3 'den bulunabilir (Philips, 1981; CIE, 1990).

Çizelge 4.3 Yaklaşma Bölgesi ve Eşik Bölgesi için CIE tarafından Önerilen Oran Değerleri

<i>Fren Mesafesi (m)</i>	L_{th}/L_{20}	
	<i>Simetrik Aydınlatma Sistemi</i> ($L/E_v \leq 0,2$)	<i>Zıt Yönlü Aydınlatma Sistemi</i> ($L/E_v \geq 0,6$)
60	0,05	0,04
100	0,06	0,05
160	0,1	0,07

L/E_v oranının 0,2–0,6 arası değer aldığı aydınlatma sistemlerine nadir olarak rastlanır. Bu tip durumlarda, simetrik sistemi uygulayabilmek için bir “k” değeri önerilir.

Uluslararası deneylerin gösterdiğine göre yüksek L/E_v oranlı sistemlerde (Zıt Yönlü Aydınlatma) sistemlerde eksiklik vardır. Bu tip uygulamalarda yüksek L_{th}/L_{20} değerleri özel olarak seçilir. Özel olan bütün L_{th}/L_{20} değerleri her türlü trafik koşulları için geçerlidir. Koşulların çok uygun olduğu durumlarda çizelge 4.3'deki oranlar 0,75 ile çarpılabilir. Bu faktör sadece şu haller için düşünülmelidir;

- Tünel içinde tek yönlü trafik
- Kar yağışı ve hızlı trafiğin olmaması
- Eşik ve geçiş bölgelerine girişte ve çıkışta şerit değiştirme olmaması
- Tünel içinde duraklama yapmaya izin verilmemesi
- Düşük trafik hacmi (örneğin 100 araç/saat 'den daha düşük)
- Boyuna tünel profilinin düz olması

Tünel girişinden önce gün ışığında kalan yol parıltısı düşürmek ve dolayısıyla eşik bölgesi adaptasyonuna katkıda bulunmak amacıyla güneş ekranları ya da pencereleri gibi loşlaştırıcı

ilaveler kullanıldığında, simetrik sistemler için kullanılan “k” faktörü uygulanmalıdır. Bu faktör $L_{th}/L_{20}=0,3$ olarak kabul edilmeli ve çizelge 4.3 okunurken dikkate alınmalıdır.

Eşik bölgesinin toplam uzunluğu en az durma mesafesine eşit olmalı ve bu mesafenin ilk yarısında da L_{th} parıltı seviyesi sağlanmalıdır. Durma mesafesinin yarısından sonra aydınlatma seviyesi yavaş, kademeli ve lineer bir şekilde $0,4 L_{th}$ değerine kadar azaltılmalıdır. Kademeler arasındaki aydınlık oranı $3/1$ ‘i aşmamalıdır ve böylece de aydınlatma seviyesi lineer azaltmada belirtilen limitin altına düşmemiş olmaktadır.

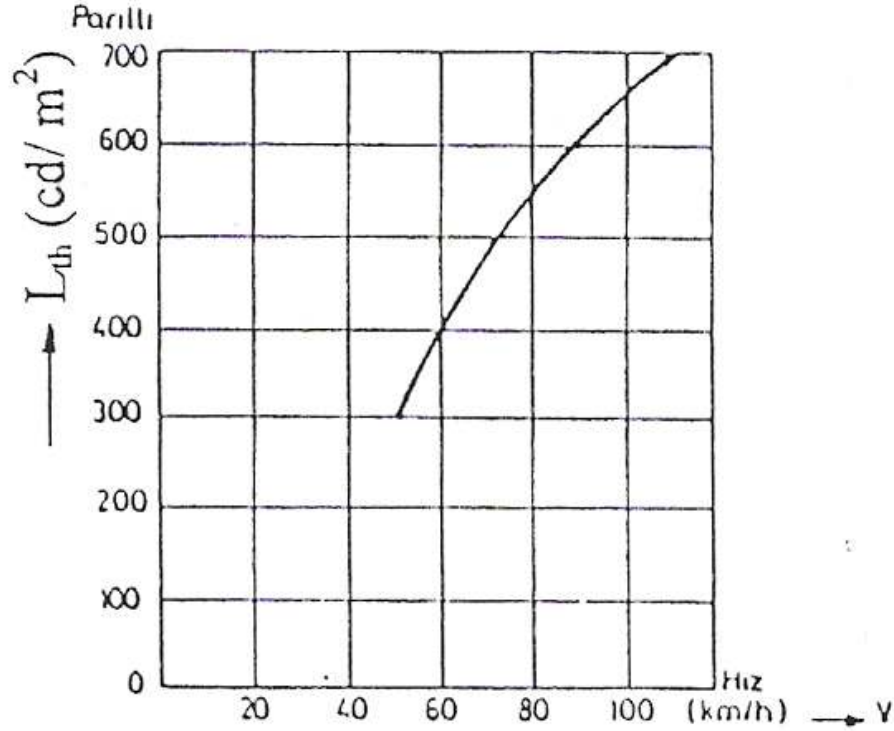
2 m yüksekliğe kadar olan tünel duvarlarında sürüş emniyeti açısından en az yol yüzeyi parıltısı kadar bir ortalama aydınlık düzeyi sağlanmalıdır (CIE, 1990).

Onaygil (1990) tarafından yapılmış olan eşik bölgesi aydınlatma parıltısının tayinine yönelik çalışmalarda bir tünel giriş simülatörü ile bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Çeşitli adaptasyon parıltılarında, %26, %53, %81’lik kontrastlara sahip 7’ görme açılı cismin 0,1 saniyede %75 olasılıkla görülebilmesi için gereken minimum fon parıltıları belirlenmiştir. Fakat ölçümler sabit bir gözlemci ve yeri bilinen cisimler için yapıldığından ve oysaki gerçek trafik koşullarında sürücünün nerde, ne zaman ve ne büyüklükte bir cisim ile karşılaşacağı bilinmediğinden; simülatör tarafından elde edilen değerler “2,78” katsayısı ile çarpılmıştır. Elde edilen sonuçlar çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4 Onaygil’in çalışmaları sonucu elde edilen L_{20} ve L_{th} değerleri

L_{20} (cd/m ²)	C (%)		
	26	53	81
	L_{th} (cd/m ²)		
7500	206	45	24
5000	142	40	23
3000	100	33	21
1000	53	28	20
500	42	24	20
100	31	22	19

DIN 67524 standardına göre araç hızı temel alınmak suretiyle eşik bölgesi maksimum parıltı değerleri şekil 4.9’den elde edilebilir. Eşik bölgesinin ilk yarısı geçildikten sonra aydınlatma seviyesi yavaş bir şekilde bu maksimum değer %40’ına kadar azaltılır.



Şekil 4.9 DIN standardına göre araç hızına bağlı olarak L_{th} değerleri

4.2.3.3 Geçiş Bölgesi

Eşik bölgesinde gerekli olan yüksek parıltı değeri, tüneli iç bölge parıltısına ulaşıncaya kadar kademeli olarak azaltılır. Giriş ve iç bölge arasındaki bu parıltı seviyelerinin düşüşü geçiş bölgesini oluşturur. Bu bölgenin mesafesi, müsaade edilen trafik hızı ve eşik bölgesi-iç bölge aydınlık seviyeleri farkına göre belirlenir.

Deneyler sürücülerin %75'i için 15 saniyelik bir sürenin 6500cd/m^2 'lik bir parıltı düzeyinden 15cd/m^2 'lik bir parıltı düzeyine geçişe yettiğini göstermektedir. Araç hızları ve Schreuder eğrisi yardımıyla geçiş bölgesine ait adaptasyon bölgeleri sayısı ve uzunlukları kolayca bulunabilir. Geçiş bölgesinin sonunda iç bölgenin 3 katına eşit aydınlık seviyesine erişilmelidir. 2m yüksekliğindeki tünel duvarlarının ortalama aydınlığı en az yol yüzeyi aydınlığı kadar olmalıdır.

Uzun adaptasyon deneyleri sonucunda geçiş bölgesi parıltısı (L_{tr}) şu şekilde formüle edilmiştir;

$$L_{tr} = L_{th} (1,9+t)^{-1,4} \quad (4.4)$$

Burada;

L_{tr} : geçiş bölgesi parlıltısı (cd/m^2)

L_{th} : eşik bölgesi parlıltısı (cd/m^2)

t : eşik bölgesinin bitiminden itibaren tünelde geçen süre (sn)

Geçiş bölgesindeki aydınlatma eşik bölgesindeki ile aynı karakterde olmalıdır. Lamba sayısının veya ışık akısının azaltılması ile parlıltının sürekli değişimini sağlamak hayli zordur. Bu nedenle parlıltı eğrisinin basamaklar şeklinde oluşturulması yoluna gidilir. Ancak birbirini takip eden basamakların parlıltı değerleri arasındaki oran hiçbir zaman 3/1'den büyük olmamalıdır. Bölgedeki parlıltı dağılımı, eşik ve iç bölge parlıltı düzeylerine bağlı olduğu için geçiş genellikle 2 ila 4 basamak şeklinde gerçekleştirilir. Sabit parlıltı düzeyli basamakların uzunlukları en az 3 sn'de alınan mesafe kadar olmalıdır (CIE, 1990; Onaygil, 1990).

4.2.3.4 İç Bölge

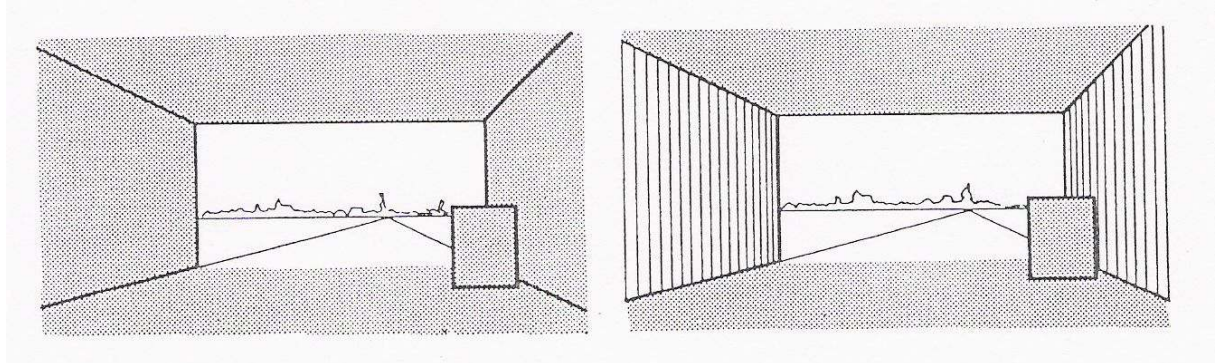
Tünelin giriş ve çıkış bölgeleri arasındaki gün ışığından en uzak noktadaki bölgesidir. Fakat uzunluğu 300 metrenin altında olan tünellerde gün ışığından arınmış kısım bulunmadığından bu bölgenin varlığından söz edilmez. Sürücünün tüm görüşü yapay aydınlatmayla sağlanır ve aydınlatma seviyesi iç bölge boyunca sabittir. Bu bölgede sağlanması gereken parlıltı, büyük ölçüde giriş bölgesindeki aydınlatmanın tipine ve kalitesine bağlıdır. İç bölgeye kadar tam bir adaptasyon sağlanabilirse, bu bölgede gece yol aydınlatması için geçerli olan kurallar uygulanabilir. Bilindiği gibi trafiği yoğun olan yolların gece aydınlatılmalarında yaklaşık 2 cd/m^2 lik parlıltı değeri önerilmektedir. Çok uzun dağ tünelleri dışında, hiç bir tünelde giriş bölgesinin boyu tam bir adaptasyon sağlanacak kadar uzun değildir. Bunun için tünel iç bölgesinde yaratılması gereken parlıltı düzeyi, Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (CIE) tarafından trafik yoğunluğu ve fren mesafesine bağlı olarak 1 cd/m^2 ila 15 cd/m^2 arasında önerilmesine rağmen, karanlık adaptasyonunun uzun sürede gerçekleşmesi nedeniyle bu bölgedeki parlıltı asla 3 cd/m^2 den daha düşük olmamalıdır. Tünelin konumu ve hız sınırlamasına göre iç bölge parlıltı düzeyleri için çizelge 4.5'ten yararlanılabilir (CIE, 1973, 1990; Onaygil, 1990).

Çizelge 4.5 Fren mesafesi ve Trafik yoğunluğuna bağlı olarak Tünel iç bölgesi parlıltı düzeylerinin bulunması

<i>Fren Mesafesi (m)</i>	<i>Trafik Yoğunluğuna bağlı olarak Tünel iç Parlıltıları (cd/m)</i>		
	<i>Düşük (Araç/h<100)</i>	<i>Orta (100<Araç/h<1000)</i>	<i>Yüksek (Araç/h>1000)</i>
160	5	10	15
100	2	4	6
60	1	2	3

4.2.3.5 Çıkış Bölgesi

Tünelin iç bölge bitiminden çıkışına kadar olan ve tek yönlü tünelde, çıkışa yaklaşan sürücü görüşünün tünelin dışındaki parlaklıktan tekrar etkilendiği bölgedir. Göz açısından düşük parlıltı düzeyinden yüksek parlıltı düzeyine geçişi (aydınlık adaptasyonu) çok hızlı olduğundan tünel çıkışındaki aydınlatma koşulları tünel girişine göre çok daha elverişlidir. Bu sebeple genel olarak tünel çıkışı için herhangi bir aydınlatma önlemi almaya gerek yoktur ve günümüzde pratikte de büyük bir çoğunlukla iç bölge aydınlatma mantığı çıkış bölgesinde de devam ettirilmektedir. Bunun yanında çıkış bölgesinin gün ışığı etkisinin daha yaygınlaştırılabilmesi ve kademeli bir artışın sağlanabilmesi için çıkışa yakın bölümlerde yüksek yansıtma özellikli duvar ve yol kaplamaları kullanılması yararlı olacaktır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 Çıkış bölgesinde farklı kaplamaların görüş etkisi

Şu da bir gerçektir ki tünel çıkışında, giriş bölgesi gibi bir aydınlatma yapılması çeşitli üstünlükler sağlayacaktır. Bunlar (Onaygil, 1990);

- Tünel çıkışının içerdeki sürücüye "aydınlık delik" şeklinde gözükmesinin engellenmesi ve bu suretle ayrıntıların görülebilir olması.

- Arıza ve bakım gibi durumlar nedeniyle tünelin çift yönlü olarak kullanılabilmesi. (çıkış bölgesi karşı yönlü trafik için giriş bölgesi olacaktır)
- Tüneli terk eden bir sürücü için dikiz aynasından arkasındaki araçların görülebilir olması.



Şekil 4.11 Çift yönlü bir karayolu tünelinin giriş (sağ şerit) ve çıkış (sol şerit) bölgeleri

4.2.4 Gece Aydınlatması

Tünel aydınlatma tekniği bakımından gece aydınlatmasında, gündüz aydınlatmasına göre ters bir durum ortaya çıkmaktadır. Şöyle ki gündüz saatlerinde tünel dışı daha aydınlık iken, gece saatlerinde tünelin iç kısımları daha aydınlıktır. Bu durum gündüz ortaya çıkan adaptasyon sorunlarını ve kara delik etkisini ortadan kaldırmış olur.

Gözün düşük parıltılara adaptasyonu yüksek parıltılara adaptasyonundan daha yavaş gerçekleştiğinden trafiği az, belli bir hız sınırlaması olan çok uzun tünellerde bile gece aydınlatmasında bütün tünel boyunca 3 ila 5 cd/m² lik bir parıltı düzeyi sağlanmalıdır. Tünel içindeki parıltı düzeyinin dıştaki yol parıltı düzeyine oranı 3/1 den büyük olmadığı sürece hiçbir güçlük ortaya çıkmaz. Eğer tünelde gündüz aydınlatması, gece aydınlatması için de kullanılır ise bu koşul sağlanamaz. Çıkış yolları aydınlatılmamışsa, yaklaşık 10 saniyelik gidiş mesafesi boyunca (200-250 m.) uygun şekilde yol aydınlatması yapılarak bir geçiş bölgesi yaratılmalıdır. Ayrıca gündüz saatlerinde tünel girişinde yüksek aydınlık düzeyi sağlayan lambalar da devre dışı bırakılmalıdır (Onaygil, 1990).

4.2.5 Aydınlatma Sisteminin Dış Aydınlığa göre Kontrolü

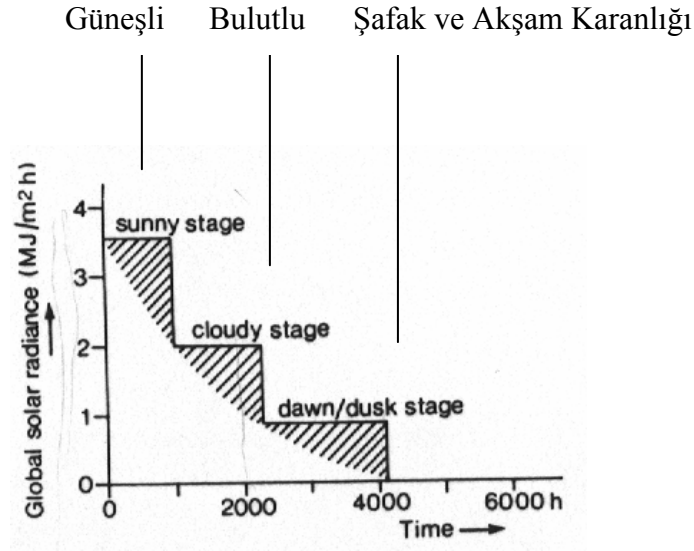
Önceki konularda değinildiği üzere, tünel içinde sağlanması gereken parıltı düzeyleri doğrudan yaklaşma bölgesi parıltısına bağlıdır. Bu sebeple aydınlatma tekniği ve ekonomiklik açısından tünelin eşik ve geçiş bölgelerindeki aydınlık düzeyleri dışarıdaki aydınlık düzeyine göre otomatik olarak kumanda edilebilmesi gerekir. Bu kumanda ya dışarıdaki yatay aydınlık düzeyine veya parıltı düzeyine göre yapılır. Kumandanın dışarıdaki parıltı düzeyine göre yapılması tercih edilmelidir çünkü bu sebeple yol örtüsünün muhtelif durumlarına (ıslak, kuru, kar örtülü vb.) daha doğru uyum sağlanır. Bu amaçla tünel girişinden takriben 100 metre uzaklıkta girişe uygun bir yere bir parıltı ölçü aleti yerleştirilir. Bu alet parıltısını tünel girişinden önceki yol örtüsünün parıltısını çevrenin parıltısını hesaba katar. Bundan alınan işaret eşik ve geçiş bölgelerindeki parıltı düzeylerini istenilen düzeylere otomatik olarak ayarlar. Bunun yanında gün ışığı aydınlık seviyesi (L_{20}) bir fotometre kullanılarak (20 derece açılı) direkt olarak, fotosel kullanılarak (180 derece açılı) veya CCD kamera kullanılarak endirekt olarak ölçülebilir. Bazı basit montajlarda basit güneş kadranlı zaman saatleri de kullanılabilir.

Elde edilen dış aydınlık düzeyine ilişkin veriler aydınlatma otomasyon merkez panosuna gönderilir ve burada elde edilen sinyallere göre de gerekli miktarda aydınlatma armatürü devreye alınır/devreden çıkartılır veya armatürler dim edilir. Ekonomi ve konfor göz önüne alınarak, giriş bölgesi parıltısı birbirini takip eden parıltı düzeylerinin oranı 3/1 'i aşmayacak şekilde azaltılabilir. (%100; %33; %11; %3,3; %1,1 gibi) Yaklaşma bölgesindeki yatay aydınlık düzeyine bağlı olarak kademeler yaklaşık çizelge 4.6 'deki gibi olabilir.

Çizelge 4.6 Yaklaşma Bölgesindeki Aydınlık Düzeyine Bağlı Olarak Giriş Bölgesindeki Parıltının Değişimi

Yaklaşma Bölgesindeki Yatay Aydınlık Düzeyi (lx)	Giriş Bölgesindeki Bağlı Parıltı (%)
45.000 'den fazla	100
20.000-45.000	50
8.000-20.000	25
3.000-8.000	12
1.000-3.000	6

Güneşliğin zamana göre değişim faktörü, anahtarlama kumandasıyla enerji tasarrufu sağlar. Bu değişim faktörünün zamanla orantısı şekil.4.12 de görülmektedir.



Şekil 4.12 Gün ışığının zamana göre değişim faktörü

İyi bir kontrol sistemi için lümen seviyesi düşen lambaların vermiş olduğu aydınlık seviyesini telafi edebilmek gerekir. Bu sebeple tünel içindeki aydınlık seviyesi de ölçülmeli ve dışarıdaki aydınlık seviyesi ile karşılaştırılıp aydınlatma sistemi kontrol edilmelidir.

Tüneldeki aydınlık seviyelerinin kontrolü otomasyon sistemine bağlandığında, bu sistemin bakımı büyük önem arz eder. Dolayısıyla sistemdeki fotosel, parıltı ölçer ve CCD kamera gibi cihazların periyodik olarak muhakkak bakımları yapılmalı ve en az her yıl laboratuvar ortamında kalibrasyonlarının yapılmaları gerekmektedir (DIN, 1972; Bijlaardt, 1976; CIE, 1990).

4.2.6 Acil İhtiyaç Aydınlatması

Acil ihtiyaç aydınlatması kaza oranının azalması ve acil servis çalışmalarına yardım etmek amaçlıdır. Şebeke enerjisinin kesildiği durumlarda, acil ihtiyaç aydınlatmasının otomatik olarak devreye girmesi gereklidir. Kesinti süresince yedek güç sistemiyle mevcut aydınlatmanın bir bölümü devrede kaldığı gibi, sadece bu tip durumlarda devreye giren ve kendi içinde depoladığı enerjiyi kullanan ya da genel bir kesintisiz güç sisteminden beslenen özel acil durum armatürleriyle de aydınlatma görsel olarak desteklenmelidir. Oluşabilecek faz arızalarına karşı önlem olarak birbirini takip eden armatürler farklı fazlardan beslenmelidir. Bu şekilde arıza halinde tünelin bir bölümünün tamamen karanlık kalması önlenmiş olacaktır.

Acil ihtiyaç aydınlatması, tünel girişinden 100-150m geride bir hız-sınır işareti ile kombine çalışmalıdır.

Eşik ve geçiş bölgesindeki aydınlatma seviyeleri acil hız-sınırlarının ihtiyacını karşılayabilecek gibi ve tünel içi bölgesindeki seviye en az gece aydınlatmasındaki kadar olmalıdır.

4.2.7 Diğer Faktörler

Gündüz ve gece aydınlatmasıyla ilgili bahsedilen kriterler aydınlatma tasarımında dikkat edilecek temel faktörler olmakla beraber aydınlatma kalitesini etkileyen başka yardımcı faktörler bulunmaktadır. Bunlardan başlıcaları; daha çok ampul / armatür seçimlerini ve dikey düzlemde aydınlatma yerleşim şekillerini etkileyen fizyolojik-optik etmenler, işletme sürecinde kirlenme, tozlanma ve egzoz gazları gibi durumlar sonucu ortaya çıkacak ve armatürlerin aydınlatma kabiliyetlerini zayıflatacak bir katsayının ortaya çıkmasına neden olan etmenler, yapısal aşamada göz önüne alınması gereken aydınlatmaya yardımcı nitelikteki etmenler ve direk insan psikolojisiyle ilgili olan etmenler olarak sıralanabilir.

5. TÜNEL AYDINLATMA UYGULAMALARI (DEVREN TÜNELİ)

5.1 Tasarım ve Projelendirme Aşamaları

Alanya – Antalya karayolu üzerinde bulunmakta olan Devren Tüneli için uluslararası aydınlatma komisyonunun 1990 tarihli 88 nolu 'Guide for The Lighting of Road Tunnels and Underpasses' (yol tüneller ve alt geçitlerinin aydınlatması için kılavuz) adlı Teknik Raporu'ndaki ve Avrupa komisyonunun CEN/TC 169/WG 6 kodlu 2001 tarihli Tünel aydınlatması adlı Teknik Raporu'ndaki öneriler esas alınmıştır. Öncelikle bu öneriler ışığında parlıltı değerleri seçimleri yapılmıştır. Daha sonra, bu aydınlık düzeyini sağlamak için kullanılacak armatür seçimleri yapılmış ve uygun adaptasyon ve güvenlik şartlarını sağlayacak şekilde armatür yerleşimleri yapılmıştır.

Alanya-Antalya yolu üzerinde yer alan Devren Tüneli 406m'lik uzunluğu itibariyle gündüz aydınlatması gerektiren bir tüneldir.

Tünel aydınlatma tasarımına başlanırken belirlenmesi gereken diğer bir konu da, tünele yaklaşılan açık yolda müsaade edilen araç hız sınırlamasıdır. Alanya-Antalya yolunda hız limiti 90km/saat olarak dikkate alınmıştır. Önerilerde verilen donelerden 90km/saat hız limitinde yaklaşık %2 eğimli yokuş yukarı bir yolda ilerleyen sürücünün, tehlikeli olabilecek bir cismi görüp aracını emniyetle durdurabileceği 'fren mesafesi' 120m olarak saptanmıştır. (Syf:57, Şekil 4.8)

Bilindiği gibi optimum bir tünel aydınlatmasının ilk başlangıç noktası, tünel yaklaşma bölgesindeki dış bölge parlıltı düzeyinin doğru olarak saptanmasıdır. Dış bölge parlıltısı (L_{20}), tünel girişinden fren mesafesi kadar uzaktan 20°lik tepe açılı koniden görünen alanın parlıltısıdır ve belirlenmesinde en iyi çözüm tünelin inşası sırasında yıl içinde belli periyotlarda, sözü edilen alanda gerçekleştirilen ölçümlerle elde edilmesidir. Bu ölçümler sonucunda, yıl içinde en çok rastlanılan en yüksek parlıltı düzeyi esas alınır. Ancak Devren Tüneli inşaat aşamaları sırasında böyle bir çalışma gerçekleştirilemediğinden, dış bölge parlıltısı ilgili Teknik Raporlar'daki yaklaşım yöntemleri ile belirlenmiştir. 7,3m yüksekliğinde at nalı şeklinde ki, bir tarafı deniz, diğer tarafı dağlık arazi olan tünelde, 20°lik konik açı içinden görünen alanın %20'sini gökyüzü ($\gamma=0,20$), %30'unu yol ($\rho=0,30$), %50'sini çevredeki dağlık arazinin ($\epsilon=0,50$) kapladığı kabul edilmiştir. CIE-88 nolu yayının 15. sayfasında verilen Tablo 5.2'den (syf:56, Çizelge 4.2) doğu-batı doğrultusunda yer alan tüneller için gökyüzü parlıltısının yaklaşık $L_C=12000 \text{ cd/m}^2$, yol parlıltısının $L_R=3000 \text{ cd/m}^2$,

dağlık çevre parıltısının $L_E = 3000 \text{ cd/m}^2$ olduğu saptanmıştır. Belirlenen değerler $L_{20} = \gamma L_C + \rho L_R + \epsilon L_E$ formülünde yerine konarak, 20° konik açıdan görünen tünel dış bölge parıltısı yaklaşık 4800 cd/m^2 olarak bulunmuştur.

Açık yol üzerinde bulunan, tek yönlü tüneller için gerek ekonomik gerekse görüş koşulları açısından eşik ve geçiş bölgeleri için counter-beam (zıt ışınli aydınlatma) sistem ile en iyi sonuçlar alındığından, bu tüneller için de eşik ve geçiş bölgelerinde aydınlatma sistemi olarak ‘counter-beam’ seçilmiştir. İç bölge ve tünelin tamamında devam edecek olan gece aydınlatmasında ise görsel kılavuzlama açısından daha uygun olan simetrik aydınlatma sistemi tercih edilmiştir.

Sayfa 51, şekil 4.5’e göre 120m fren mesafesi için, tünel eşik bölgesinde ortalama 270 cd/m^2 parıltı düzeyi gerekmektedir. Bu değer, tüm eşik bölgesi boyunca sabit olmalıdır. Ancak, ekonomik zorlamalar nedeni ile ilgili önerilerde, parıltı düzeyinin eşik bölgesinin ilk yarısında sabit olması, eşik bölgesinin ikinci yarısının sonuna kadar ise %40’ına kadar azaltılabileceği ifade edilmektedir. Eşik bölgesinin toplam uzunluğu en az fren mesafesi kadar olmalıdır. Bu bilgiler ışığında, aydınlatma tasarımı yapılan tünellerde girişteki ilk 60 metrede 275 cd/m^2 lik sabit parıltı düzeyi yaratılmış, daha sonra 60-120m arasında ise değer %40’ına kadar düşürülmüştür.

Geçiş bölgesinde (120 metreden sonra) armatür mesafeleri ayarlanarak gözün adaptasyon eğrisi ile uyumlu bir azalma yaratılıp, iç bölge parıltısına inilmiştir. İç bölgede ise trafik yoğunluğu orta kabul edilerek sayfa 62, çizelge 4.5’den yararlanılarak ($100 \leq \text{araç/saat} \leq 1000$) 7.6 cd/m^2 sabit parıltı değerinin yeter miktarda olacağı görülmüştür. Aydınlik adaptasyonu (karanlıktan aydınlığa geçiş) çok daha çabuk gerçekleştiğinden, ekonomik nedenlerle tünellerde ayriyeten bir çıkış bölgesi aydınlatması düşünülmemiştir.

Egzoz gazları ve koroziif atmosfer nedeniyle tünellerde kullanılacak armatürlerin kolay temizlenebilir, bakım yapılabilir yapıda ve koruma sınıfının yüksek olması gerekir. Bu projede kullanılan tünel aydınlatma armatürleri IP65 koruma sınıfli, çelik döküm gövdelidir. Dış yüzeyi minimum 80 mikron galvaniz kaplama olan (RAL7035 açık gri, elektrostatik boya) armatürlerin 5mm kalınlığında ısı değişimine dayanıklı cam kapakları, herhangi bir alete gerek duyulmadan kolayca açılıp kapanabilmektedir. Kontak korozyonundan kaçınmak için, dış kapaklar ve montaj elemanları paslanmaz çelikten yapılmıştır.

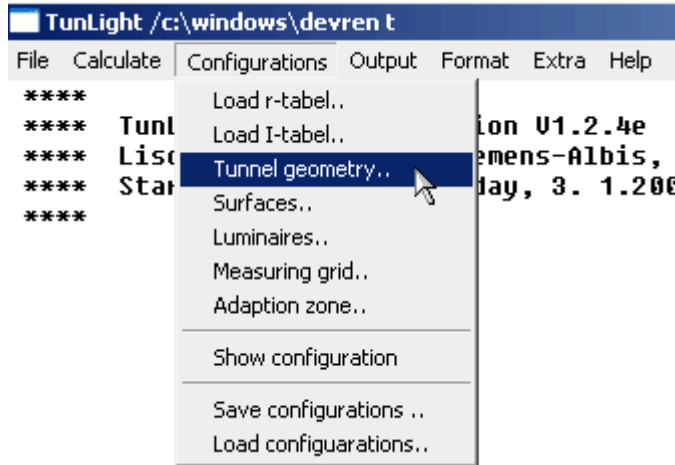
Tünelin giriş ve çıkışındaki 170m uzunluğundaki kısımlarda 35m ara ile h:10m yüksekliğinde L:1.8m uzunluğunda tek konsollu direkler üzerinde 150W sodyum buharlı harici tip yol

aydınlatma armatürleri kullanılarak yol üzerinde $1,32 \text{ cd/m}^2$ parıltı düzeyi oluşturulmuştur. İlgili teknik raporlarda tünel içindeki gece aydınlatmasında yaratılan parıltı düzeyi ile yol aydınlatmasında elde edilen parıltı düzeyi arasındaki oranın $3/1$ 'ü geçmemesi istenmektedir. Gece aydınlatmasında tüm tünel boyunca ortalama $3,8 \text{ cd/m}^2$ parıltı düzeyi yaratılmıştır. Gece aydınlatmasında devrede olacak armatürler (Ek.1'de altlarına konulan "k" harfiyle belirtilmişlerdir) bünyesinde 2 tane yüksek basınçlı sodyum buharlı ampul bulundurmaktadır. Gündüz saatlerinde her iki ampul de devrede olmasına karşın gece saatlerinde bunlardan bir tanesi kullanımda olacaktır.

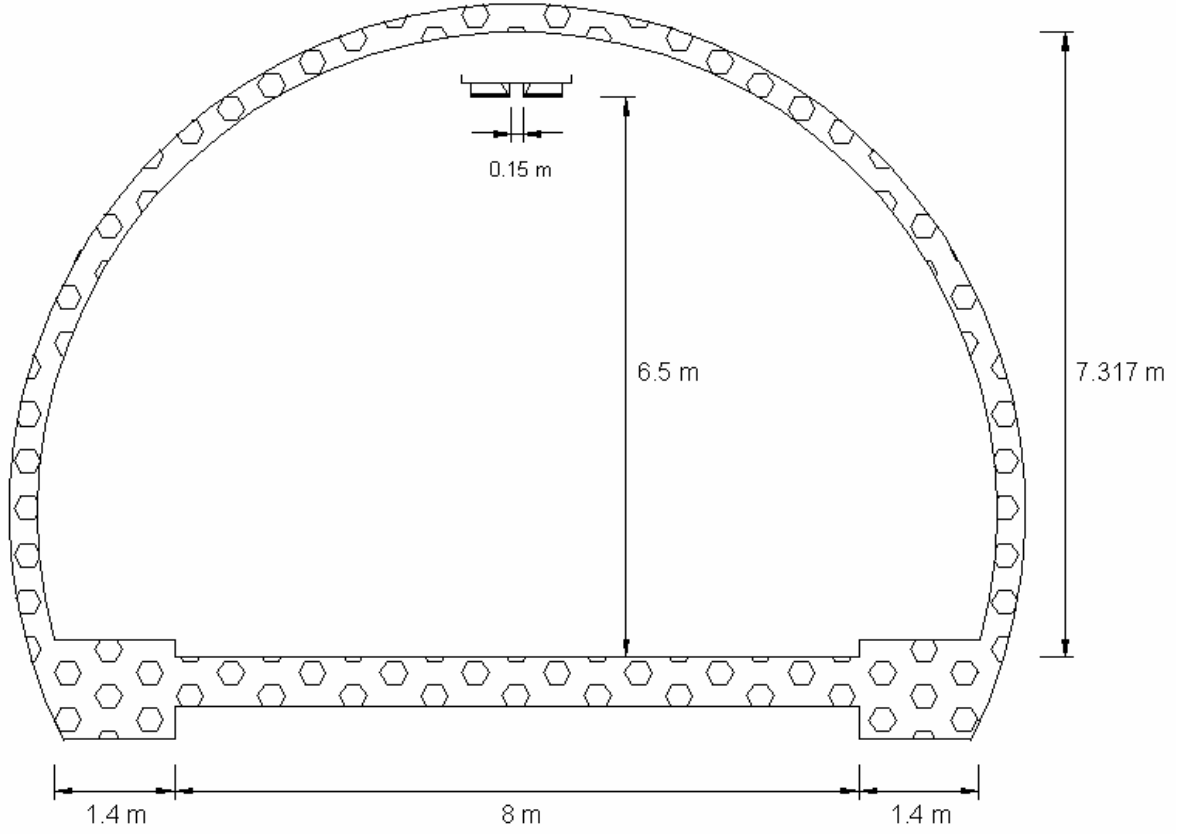
5.2 Tünel Aydınlatma Sisteminin Bilgisayar Destekli Analizi

5.2.1 TunLight Programının Kullanımı

Son yıllarda bilişim alanında meydana gelen gelişmelerle tünel aydınlatması gibi uzun ve karmaşık hesaplar gerektirecek hesaplamalar süre ve doğruluk oranlarında ciddi faydalar sağlayan bilgisayar simülasyon programları vasıtasıyla kolaylıkla yapılmaktadır. TunLight yazılımı da bu amaçla yazılmış olup Devren Tüneli ile ilgili mimari ve aydınlatmayı kapsayan projeden (Ek-1) yararlanılıp hesaplamalar için gerekli bilgiler elde edilmiş ve programa yüklenmiştir. Hesaplamalar sonucu ortaya çıkan değerler olasılıklarla birlikte tablolar halinde verilmiş gerekli önerilerle birlikte irdelenmiştir.



Şekil 5.1 TunLight Konfigürasyonlar Menüsü



Şekil 5.2 Devren Tüneli Enine Kesit Görünümü

Program ilk açıldığında Şekil 5.1’de gösterildiği şekilde “Configurations” başlığı altında “Tunnel Geometry” menüsüne girilmek suretiyle tünel duvarlarına ve yola ait yatay ve dikeydeki konum bilgileri, şerit bilgileri ve armatür sıra bilgileri programa yüklenir. İlgili değerler Şekil 5.3’de verilmiştir.

Şekil 5.3’deki menü altındaki veri alanlarının tanımları:

Reflecting parts of walls : Duvarların yansıtıcı yüzeyleri

Left wall : Sol duvar

Right wall : Sağ duvar

R-coordinate : Duvarların yatay konumları (Yol alanın sol kenarı orijin kabul edilerek sol duvar için -1,4m ve sağ duvar için 9,4m’dir.)

H-coordinate bottom : Duvarların dikey konumdaki alt kotu (Her iki duvar için de alt kot yol kotunun 0,2m üzerindedir.)

H-coordinate top : Duvarların dikey konumdaki üst kotu (Duvar parıltıları için hesapların 2m’lik görüş alanı içinde yapılması uygun olduğundan bu değer 2 olarak alınmıştır.)

- Reflecting part of road* : Yolun yansıtıcı yüzeyi
- R-coordinate of right edge* : Yolun yataydaki sağ kenar konumu (8. m’de bulunmaktadır.)
- R-coordinate of left edge* : Yolun yataydaki sol kenar konumu (Orijinde bulunmaktadır.)
- # of tracks* : Yol üzerindeki şerit sayısı (Tünel içinde 2 şerit bulunmaktadır)
- # of rows* : Kullanılan armatür sırası sayısı (3 armatür sırası mevcuttur.)

Reflecting parts of the walls:		Left wall:	Right wall:
R-coordinate [m]		-1.400	9.400
H_coordinate bottom: [m]		0.200	0.200
H_Koordinate top: [m]		2.000	2.000

Reflecting part of road:	
R-coordinate of right edge [m]	8.00000
R-coordinate of left edge: [m]	0.00000
# of tracks:	2

Luminaires:	
# of rows:	3

Şekil 5.3 Tünel Geometrisiyle ilgili Veriler

Yansımalarla ilgili menüye geçmeden önce “r-Table” ların yüklenmesi gerekmektedir. Bu tablolar yansımayı simüle etmektedir. Program açıklamalarında önerildiği şekilde duvarlar için klasör içindeki R1 ve yol için de R3 yansıtma tabloları yüklenip q0 için Sol ve Sağ Duvar:0.13; Yol için: 0.07 değerleri girilir. Ayrıca yansıtma dereceleri (Reflection Degree) için tünellerde sık kullanılan değer olan 0.3 kullanılmıştır. (Şekil 5.4)

Şekil 5.4’deki menü altındaki veri alanlarının tanımları:

- Left wall* : Sol duvar
- Right wall* : Sağ duvar
- Road* : Yol

nr. of r-table : İlgili alanın yüklenen yansıtma karakteristik tablolarından hangisine karşılık geldiği yazılır (Programdaki öneriler dahilinde duvarlar için 1, yol için 2 numaralı tablo seçilmiştir.)

q0 value of r-table : Yansıtma tablolarının q0 değerleri olup yüzeye göre farklılık gösterir. (1 numaralı yansıtma tablosu için 0.13, 2 numaralı için 0.07 değerlerinin kullanılması önerilmektedir.)

Reflection degree : Bu değer deneyimlere göre seçilmesinin gerektiği öngörülmektedir ve benzeri projelerde de kullanılıp başarılı sonuçlar alınan 0.3 değerleri bu projede de uygulanmıştır.)

	Left wall	Right wall	Road
nr. of r-table	1	1	2
q0 value of r-table	0.130000	0.130000	0.070000
Reflection degree (q.Pi)	0.300000	0.300000	0.300000

For indirect contributions of the object only:

	Left wall	Right wall	Road
Reflection degree (backward)	0.300000	0.300000	0.300000

OK Help Cancel

Şekil 5.4 Yansıtma ile ilgili Veriler

Yansıtma ile ilgili işlemler tamamlandıktan sonra armatür kısmına geçilir. (“Configurations” başlığı altında “Luminaires” menüsü) Kullanılan armatür çeşitleri için dağılım tabloları (I-Table) klasördeki dosyalardan seçilerek yüklenir. 3 farklı sıra armatür kullanıldığından bu menüdeki 1,2 ve 3 numaralı sıralar için değerler girilecektir. Şekil 5.5 ‘de gösterildiği gibi sırasıyla armatürün dağılım tablo numarası (yükleme esnasında verilen numara), akı değerleri, bakım faktörleri, tek tek konum ve var ise açılma yönlendirme bilgileri menü vasıtasıyla yüklenir. Şekil 5.6 ‘da görülmekte olan gruplar menüsü vasıtasıyla ise her bir armatür sırası kapatılıp açılabilir ya da belli oranlarda dim edilebilir. İleriki aşamalarda 0,8 olarak seçilen bakım faktörü, 0,7 ve 0,6 değerlerine çekilip değişimler gözlenecektir.

Şekil 5.5'deki menü altındaki veri alanlarının tanımları:

<i>Row Nr.</i>	: Armatür sıra numarası
<i>Nr. of I-table</i>	: Armatüre özel dağılım tabloları (Tablo yüklenirken hangi numara ile yüklenildi ise o numara girilir. Bu hesaplamada ilk sıra armatürler için 1, diğer sıralar için 2 numaralı tablo seçilmiştir.)
<i>R-coordinate for Row</i>	: Armatür sırası için yatay koordinat (İlk sıra için:4m, ikinci sıra için 3,75m ve son sıra için 4,25 dir.)
<i>H-coordinate for Row</i>	: Armatür sırası için dikey koordinat (Tüm sıralar için 6,5m dir.)
<i>Nominal flux for Row</i>	: Armatür sırası için nominal akı değeri (İlk sıra için:34, diğer sıralar için 55,5 dir.)
<i>Maintenance factor</i>	: Bakım faktörü (0,8 olarak seçilmiştir.)
<i>Angle to road in C-0 plain</i>	: Armatürler için C-0 düzleminde yol ile olan açı (Tüm sıralar için 0'dır)
<i>Angle to road in C-90 plain</i>	: Armatürler için C-90 düzleminde yol ile olan açı (Tüm sıralar için 0'dır)
<i>Angle to S-direction</i>	: Armatürler için boysal yöndeki açı (Tüm sıralar için 0'dır)
<i>Change configurations</i>	: Konfigürasyon değerlerinin değiştirilmesi
<i>New</i>	: Yeni armatür eklemek için kullanılır
<i>Show</i>	: Mevcut armatürleri görüntülemek için kullanılır
<i>Delete</i>	: Mevcut armatürleri silmek için kullanılır
<i>Change</i>	: Mevcut armatürleri değiştirmek için kullanılır
<i>Groups</i>	: Armatür grupları üzerinde anahtarlama yapmak için kullanılır.

Şekil 5.6'daki menü altındaki veri alanlarının tanımları:

<i>Group 1..6</i>	: Armatür grup numaraları
<i>Main Switch</i>	: Ana anahtarlama (açık konumda olacaktır)
<i>Dimming Switch</i>	: Dim anahtarlama (kapalı konumda olacaktır)
<i>Dimming Percentage</i>	: Dim oranı (dim anahtarı kapalı olduğu için önemsizdir)

Luminares

Row nr: 1

Nr. of l-table: 1

R_coordinate for row: 4.000 m

H_coordinate for row: 6.500 m

Nominal flux for row (default): 34.0000 klm

Maintenance factor (default): 0.8000

Angle to road in C-0 plain: 0.0000 deg

Angle to road in C-90 plain: 0.0000 deg

Angle to S-direction: 0.0000 deg

Change configurations..

Specify new luminaires in row: New...

Show luminaires in row: Show..

delete individual luminaires: Delete..

change individual luminaires: Change..

Row nr. 1, 2, 3, 4

Close

Help

Luminaire groups (on-off, dimming)

Groups ..

Şekil 5.5 Armatürlerle ilgili Veriler

Schaltgruppen für Reihe 2

	Main-switch	Dimming-switch	Dimming percentage
Group 1	on off	on off	50 %
Group 2	on off	on off	50 %
Group 3	on off	on off	50 %
Group 4	on off	on off	50 %
Group 5	on off	on off	50 %
Group 6	on off	on off	50 %

OK

Cancel

Help

Şekil 5.6 Armatürlerin Anahtarlanmasıyla ilgili Veriler

Measuring grid

of points accross road: 10

of H-abscissa on wall: 4

of points in S-direction: 61

1. measuring point in S: [m]: 0.000

Last measuring point in S: [m]: 120.00

Start of extended range in S: [m]: 0.000

Stop of extended range in S: [m]: 120.00

of inserted points for each measuring field in ..

..S-direction	..R-direction	..H-direction
1	1	1

If this is 1 a Gaussian integration scheme will be used.

OK ? Help X Cancel

Şekil 5.7 Ölçüm Detaylarıyla ilgili Veriler

Şekil 5.7'deki menü altındaki veri alanlarının tanımları:

of points accross road : Yolun enine kesitinde ölçüm yapılacak nokta sayısı (10 noktada ölçüm yapılacaktır)

of H-abscissa on wall : Duvarın dikey kesitinde ölçüm yapılacak nokta sayısı (4 noktada ölçüm yapılacaktır)

of points in S-direction : Tünel boyunca ölçüm yapılacak nokta sayısı (Eşik bölgesi için her 2 metrede bir ölçüm yapılmak üzere 61 olarak alınmıştır.)

1. measuring point in S : Boylamasına eksende ilk ölçüm noktası (Eşik bölgesi için başlangıç noktası olan 0'dır)

Last measuring point in S : Boylamasına eksende son ölçüm noktası (Eşik bölgesi için bitiş noktası olan 120'dir)

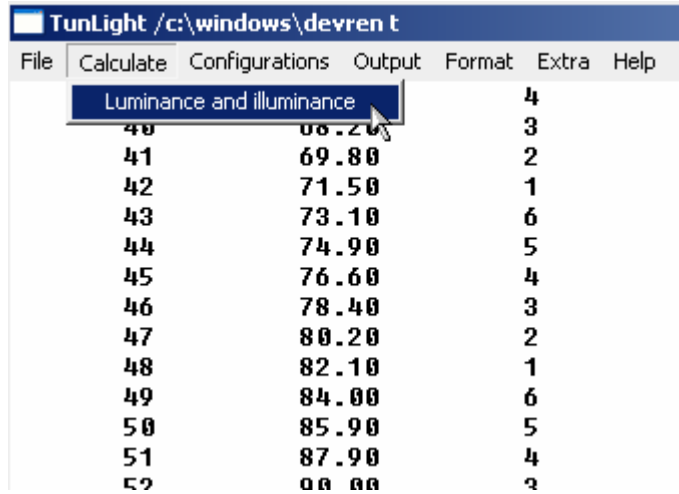
Start of extended range in S : Genişletilmiş ölçüm nokta başlangıcı (Gerek olmadığı için ilk ölçüm noktası değeri olan 0 alınmıştır.)

Stop of extended range in S : Genişletilmiş ölçüm nokta sonu (Gerek olmadığı için ilk ölçüm noktası değeri olan 120 alınmıştır.)

of pts. for each m. f. : Yatay, dikey ve boyuna eksende seçilen ölçüm nokta sayısı (Gauss integrasyon yöntemiyle program tarafından belirlenmesi için 1 değerleri verilmiştir.)

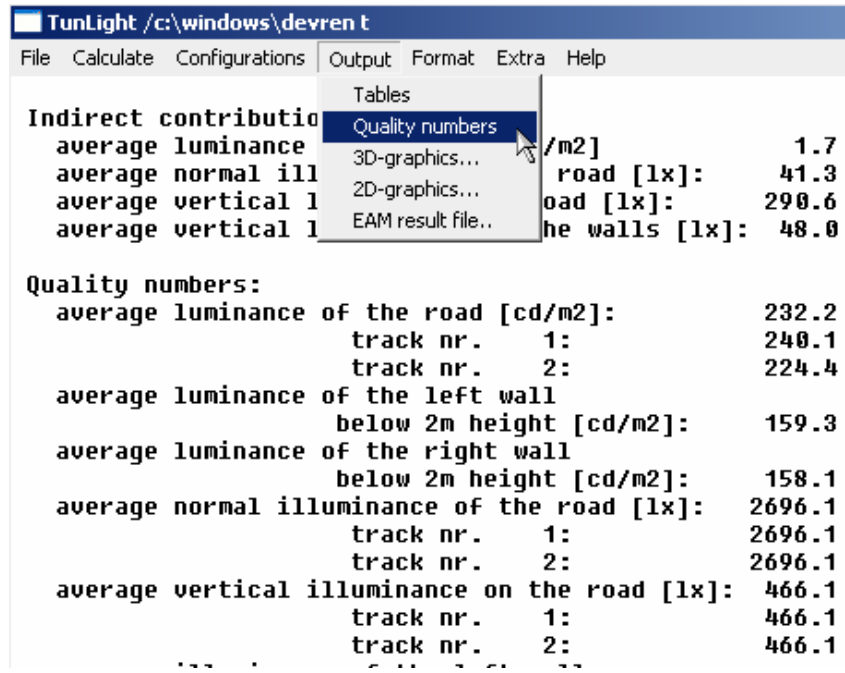
Bu işlemlerin tamamlanmasının ardından yine “Configurations” başlığı altında bulunan “Measuring Grid” menüsünden programın hesap edeceği aralığın ve gözlemcinin koordinatları, ayrıca belirlenen bu aralık için kaç noktada ölçüm yapılacağı bilgileri de girilerek program hesap aşamalarına hazır hale getirilmiş olur. (Şekil 5.7)

Bu aşamadan sonra hesaplama proseslerine geçilir ve bunun için “Calculate” başlığı altında bulunan “Luminance and Illuminance” menüsünden işlemler başlatılır. (Şekil 5.8) Belli bir süre işlem yaptıktan sonra program sonuçları görüntüleyecek duruma gelmiş olur. Sonuçlara “Output” başlığı altından ulaşılabilir. “Quality Numbers” menüsü vasıtasıyla aydınlatmayla ilgili parıltı değerleri ve bazı kalite faktörleri elde edilir. “Tables” menüsünden faydalanılarak ise ayrıntılı olarak ve daha önce “Measuring Grid” menüsünden girilmiş olan ölçüm kriterlerine göre noktasal bazda ayrıntılı aydınlatma değerleri elde edilir. (Şekil 5.9 ve Şekil 5.10)



Point	Luminance (cd/m²)	Illuminance (lx)
40	68.20	4
41	69.80	3
42	71.50	2
43	73.10	1
44	74.90	6
45	76.60	5
46	78.40	4
47	80.20	3
48	82.10	2
49	84.00	1
50	85.90	6
51	87.90	5
52	89.80	4

Şekil 5.8 Hesaplama işlemlerinin başlatılması



Şekil 5.9 Hesaplama sonuçlarının görüntülenmesi

The screenshot shows the TunLight software window with the title bar 'TunLight /c:\windows\devren t'. The 'Output' menu is open, showing options: 'Tables', 'Quality numbers', '3D-graphics...', '2D-graphics...', and 'EAM result file...'. The 'Luminance for measuring range of the road [cd/m²m]' table is displayed, showing the following data:

s/r	0.40	1.20	2.00	2.80	3.60	4.40	5.20	6.00	6.80	7.60
120.00	69.7	89.0	108.0	131.5	148.7	144.6	125.2	102.4	85.1	66.6
118.00	75.9	97.2	118.1	143.8	160.5	156.9	136.8	112.3	93.2	73.3
116.00	77.4	97.8	120.5	147.1	165.6	161.9	139.5	114.4	94.3	74.3
114.00	80.3	103.2	126.9	153.8	173.0	168.4	145.2	120.8	97.9	77.7
112.00	85.4	108.3	133.5	161.3	178.8	174.9	153.4	126.5	103.2	82.1
110.00	88.1	110.7	137.0	167.4	186.6	181.9	158.4	130.3	105.3	84.8
108.00	90.8	115.4	144.1	173.7	192.7	187.7	165.5	136.9	109.7	86.8
106.00	95.0	119.5	147.5	179.0	200.0	195.6	169.1	139.0	114.2	90.9
104.00	98.3	125.4	153.4	187.7	209.9	204.5	177.1	145.9	119.0	94.1
102.00	102.6	130.7	162.8	196.4	219.0	213.4	186.7	153.3	124.0	97.5
100.00	103.7	132.3	163.1	200.2	225.5	220.2	188.4	154.4	126.6	99.3
98.00	108.7	138.4	172.4	208.4	232.4	226.1	196.5	162.8	131.8	104.0
96.00	112.3	143.3	174.7	214.4	240.1	234.2	201.7	165.5	135.4	106.5
94.00	114.2	145.7	180.9	220.0	246.1	239.7	207.5	170.8	138.3	109.5
92.00	120.5	152.6	189.1	229.8	254.2	247.7	216.9	178.4	144.9	115.0
90.00	123.5	154.5	193.4	235.0	264.0	256.2	221.2	182.1	146.3	117.6
88.00	127.0	160.4	200.1	244.5	272.8	265.0	229.7	187.7	152.3	121.5
86.00	130.4	166.8	205.5	252.2	280.8	272.7	235.8	193.8	157.6	124.3
84.00	133.6	169.7	211.6	257.5	288.1	279.8	241.2	199.8	160.3	127.6
82.00	137.5	173.6	218.6	265.0	295.8	286.8	249.2	205.3	163.9	131.0
80.00	139.1	177.7	222.0	271.5	302.7	293.7	254.7	208.3	166.0	132.6

Şekil 5.10 Hesaplama sonuçlarının görüntülenmesi

5.2.2 Hesaplamalar Sonucu Elde Edilen Değerler

(Not: Bu başlık altındaki tüm hesaplamalar 0,8 bakım faktörü baz alınarak yapılmıştır.)

5.2.2.1 Gündüz Aydınlatması için

Eşik bölgesinin ilk yarısı için (0-60m) elde edilen ortalama parlıltı değerleri:

ortalama yol parlıltısı [cd/m ²]	: 275.9
şerit no.1 [cd/m ²]	: 286.8
şerit no.2 [cd/m ²]	: 265.1
ortalama sol duvar parlıltısı (2m'nin altında) [cd/m ²]	: 185.4
ortalama sağ duvar parlıltısı (2m'nin altında) [cd/m ²]	: 183.9

Eşik bölgesinin ikinci yarısı için (60-120m) elde edilen ortalama parlıltı değerleri:

ortalama yol parlıltısı [cd/m ²]	: 190.5
şerit no.1 [cd/m ²]	: 195.3
şerit no.2 [cd/m ²]	: 185.7
ortalama sol duvar parlıltısı (2m'nin altında) [cd/m ²]	: 135.9
ortalama sağ duvar parlıltısı (2m'nin altında) [cd/m ²]	: 134.8

Eşik bölgesi için koordinatsal olarak elde edilen [cd/m²] cinsinden ayrıntılı noktasal parlıltı değerleri:

s/r (m)	0.40	1.20	2.00	2.80	3.60	4.40	5.20	6.00	6.80	7.60
120.00	69.7	89.0	108.0	131.5	148.7	144.6	125.2	102.4	85.1	66.6
118.00	75.9	97.2	118.1	143.8	160.5	156.9	136.8	112.3	93.2	73.3
116.00	77.4	97.8	120.5	147.1	165.6	161.9	139.5	114.4	94.3	74.3
114.00	80.3	103.2	126.9	153.8	173.0	168.4	145.2	120.8	97.9	77.7
112.00	85.4	108.3	133.5	161.3	178.8	174.9	153.4	126.5	103.2	82.1
110.00	88.1	110.7	137.0	167.4	186.6	181.9	158.4	130.3	105.3	84.8
108.00	90.8	115.4	144.1	173.7	192.7	187.7	165.5	136.9	109.7	86.8
106.00	95.0	119.5	147.5	179.0	200.0	195.6	169.1	139.0	114.2	90.9
104.00	98.3	125.4	153.4	187.7	209.9	204.5	177.1	145.9	119.0	94.1
102.00	102.6	130.7	162.8	196.4	219.0	213.4	186.7	153.3	124.0	97.5
100.00	103.7	132.3	163.1	200.2	225.5	220.2	188.4	154.4	126.6	99.3
98.00	108.7	138.4	172.4	208.4	232.4	226.1	196.5	162.8	131.8	104.0
96.00	112.3	143.3	174.7	214.4	240.1	234.2	201.7	165.5	135.4	106.5
94.00	114.2	145.7	180.9	220.0	246.1	239.7	207.5	170.8	138.3	109.5
92.00	120.5	152.6	189.1	229.8	254.2	247.7	216.9	178.4	144.9	115.0
90.00	123.5	154.5	193.4	235.0	264.0	256.2	221.2	182.1	146.3	117.6
88.00	127.0	160.4	200.1	244.5	272.8	265.0	229.7	187.7	152.3	121.5
86.00	130.4	166.8	205.5	252.2	280.8	272.7	235.8	193.8	157.6	124.3
84.00	133.6	169.7	211.6	257.5	288.1	279.8	241.2	199.8	160.3	127.6
82.00	137.5	173.6	218.6	265.0	295.8	286.8	249.2	205.3	163.9	131.0
80.00	139.1	177.7	222.0	271.5	302.7	293.7	254.7	208.3	166.9	132.6
78.00	142.3	183.4	229.4	278.6	311.3	302.2	261.0	214.7	172.2	135.6
76.00	147.1	188.6	235.7	287.9	322.2	312.2	269.5	220.1	177.3	139.9
74.00	152.6	193.2	241.6	296.3	329.8	319.8	277.1	225.9	181.7	144.3
72.00	157.1	198.8	248.0	303.6	337.2	327.5	283.7	231.8	186.9	148.5
70.00	160.7	203.7	251.9	309.3	344.4	333.6	289.0	235.5	191.5	152.4
68.00	163.1	208.4	255.6	314.8	352.2	340.9	293.2	238.4	195.0	154.6
66.00	165.6	211.1	261.9	321.2	360.5	348.7	298.7	243.5	199.3	156.7
64.00	166.7	214.3	267.8	325.9	366.7	354.3	302.5	248.6	201.3	158.3
62.00	171.0	218.4	270.2	332.5	370.9	358.7	308.1	250.7	204.8	160.8
60.00	174.0	221.4	274.4	339.1	378.4	365.8	314.5	256.0	206.2	164.3
58.00	175.5	224.0	278.9	342.8	383.5	370.4	318.1	258.4	209.9	165.4
56.00	175.8	225.6	281.4	346.0	388.9	374.5	319.6	259.4	210.9	166.5
54.00	177.1	226.3	280.9	346.5	388.9	375.4	318.8	260.2	210.5	165.7
52.00	179.3	226.5	284.3	350.4	391.9	377.9	322.7	262.6	211.8	168.1
50.00	178.9	229.0	285.1	351.7	393.7	378.6	324.3	262.3	212.7	167.5
48.00	179.1	229.0	286.4	353.1	395.5	379.7	325.1	263.3	214.0	167.8
46.00	178.7	228.5	286.1	352.7	396.6	381.3	322.7	263.2	212.2	166.8
44.00	180.9	229.5	287.7	355.4	398.5	382.6	325.2	263.9	213.9	168.7
42.00	180.1	231.5	288.2	356.9	399.4	383.3	327.2	264.0	213.0	167.7
40.00	180.4	231.1	290.1	358.1	400.5	383.3	328.3	265.2	214.4	168.2

s/r (m)	0.40	1.20	2.00	2.80	3.60	4.40	5.20	6.00	6.80	7.60
38.00	178.8	229.6	289.0	356.1	400.2	383.1	324.1	263.9	212.2	167.4
36.00	180.5	230.1	288.2	356.2	399.4	382.3	323.5	262.5	212.9	167.1
34.00	179.5	230.5	286.8	357.6	398.9	381.7	325.4	262.5	210.6	166.8
32.00	180.5	231.6	290.0	358.4	400.4	382.9	326.5	263.7	213.9	167.5
30.00	179.0	230.4	290.2	358.1	402.9	384.2	325.1	263.2	212.3	167.6
28.00	179.9	231.5	288.6	357.7	401.2	382.9	323.5	262.0	212.2	165.9
26.00	180.4	230.4	288.2	359.6	402.0	383.6	325.1	262.7	210.2	167.1
24.00	180.6	232.0	290.4	359.8	402.4	383.6	325.5	262.6	212.8	167.1
22.00	179.3	230.6	290.5	359.4	403.4	383.1	324.7	261.8	212.0	166.9
20.00	178.6	230.2	287.3	357.0	400.8	381.2	320.6	260.7	209.3	165.0
18.00	180.1	228.9	289.2	358.3	400.4	380.7	321.7	261.2	209.9	166.3
16.00	180.1	231.1	289.3	359.7	402.6	382.7	323.7	260.2	210.0	165.6
14.00	180.1	231.0	290.6	360.8	403.8	383.0	324.8	261.6	211.5	166.1
12.00	177.8	229.6	289.8	358.2	403.1	381.7	319.9	260.7	208.5	164.5
10.00	179.2	228.6	289.2	358.8	401.7	379.9	320.0	258.6	208.7	164.2
8.00	178.4	229.6	287.1	359.6	401.0	379.5	320.8	257.2	206.6	163.9
6.00	177.8	228.4	287.7	357.9	400.2	377.5	319.4	257.4	207.4	162.7
4.00	165.3	214.7	273.0	340.1	383.8	360.4	299.9	241.4	192.7	152.2
2.00	152.4	194.8	249.9	315.6	357.8	334.7	274.6	217.9	173.6	136.5
0.00	137.4	176.5	225.8	291.5	329.5	307.5	250.9	195.5	153.1	121.9

Geçiş bölgesi için elde edilen ortalama parıltı değerleri:

ortalama yol parıltısı [cd/m ²]	: 34.9
şerit no.1 [cd/m ²]	: 35.5
şerit no.2 [cd/m ²]	: 34.4
ortalama sol duvar parıltısı (2m'nin altında) [cd/m ²]	: 25.9
ortalama sağ duvar parıltısı (2m'nin altında) [cd/m ²]	: 25.7

Geçiş bölgesi için koordinatsal olarak elde edilen ayrıntılı [cd/m²] cinsinden noktasal parıltı değerleri:

s/r(m)	0.40	1.20	2.00	2.80	3.60	4.40	5.20	6.00	6.80	7.60
310.00	5.1	6.4	8.3	10.2	11.5	11.4	10.0	8.1	6.2	5.0
308.00	4.9	6.2	7.7	9.7	10.8	10.7	9.5	7.6	6.2	4.9
306.00	4.9	6.1	7.7	9.6	10.4	10.3	9.4	7.6	5.8	4.9
304.00	4.4	5.9	7.2	8.6	9.7	9.5	8.5	7.1	5.7	4.3
302.00	4.8	6.0	7.3	9.0	10.3	10.2	8.9	7.1	5.9	4.7
300.00	5.3	6.6	7.9	9.8	11.3	11.2	9.6	7.7	6.4	5.2
298.00	5.2	6.7	8.4	10.4	11.7	11.7	10.3	8.3	6.6	5.2
296.00	5.1	6.8	8.2	10.4	11.9	11.8	10.0	7.8	6.7	5.0
294.00	5.1	6.7	8.0	10.1	11.1	11.2	9.8	7.8	6.6	5.1
292.00	5.0	6.3	8.0	9.8	10.9	10.8	9.6	7.8	6.2	5.0
290.00	5.0	6.1	7.5	9.4	10.4	10.3	9.2	7.4	5.9	4.9
288.00	5.6	6.8	8.5	9.9	10.6	10.5	9.8	8.3	6.8	5.4
286.00	8.2	10.1	12.0	14.8	16.9	16.8	14.5	11.8	9.9	8.1
284.00	12.4	15.4	18.5	21.5	23.9	23.7	21.4	18.3	15.2	12.4
282.00	13.0	16.5	20.6	23.0	25.5	25.4	22.8	20.2	16.3	12.8
280.00	13.3	16.9	20.2	23.8	26.1	26.0	23.5	20.2	16.4	13.2
278.00	14.9	17.8	21.4	25.8	28.4	28.2	25.4	20.9	17.7	14.6
276.00	14.8	17.9	21.5	26.2	29.1	28.9	25.6	21.2	17.4	14.5
274.00	12.5	16.0	19.7	23.8	27.2	26.9	23.1	19.2	15.6	12.1
272.00	11.7	14.6	18.3	23.1	26.4	26.1	22.5	17.6	14.1	11.3
270.00	11.0	13.8	17.2	22.0	25.7	25.2	21.1	16.6	13.3	10.7
268.00	9.8	13.1	16.7	21.0	23.7	23.3	20.3	16.2	12.5	9.6
266.00	8.6	11.3	14.2	18.6	21.8	21.3	17.7	13.1	10.9	8.3
264.00	7.7	10.2	12.5	16.4	18.7	18.6	15.7	12.0	9.9	7.3
262.00	7.2	9.1	11.7	14.8	16.9	16.6	14.2	11.1	8.8	6.9
260.00	6.7	8.1	10.5	13.6	15.5	15.2	12.9	10.1	7.8	6.5
258.00	11.4	13.9	17.4	20.5	21.8	21.5	20.1	17.0	13.9	11.1
256.00	12.7	16.3	19.7	23.5	25.9	25.7	22.9	19.3	16.0	12.4
254.00	13.5	18.0	21.7	25.2	28.0	27.8	24.9	21.2	17.5	13.4
252.00	14.3	18.0	21.9	24.9	28.6	28.2	24.5	21.2	18.0	14.0
250.00	15.1	18.9	23.1	27.7	31.3	30.9	27.1	22.6	18.4	14.8
248.00	14.5	18.3	22.0	26.7	30.4	30.0	25.8	21.4	17.9	14.1
246.00	13.2	16.5	20.9	25.6	28.4	28.0	24.8	20.2	15.8	12.8
244.00	11.2	14.4	18.7	23.0	26.1	25.5	22.3	17.9	13.8	10.8

s/r(m)	0.40	1.20	2.00	2.80	3.60	4.40	5.20	6.00	6.80	7.60
242.00	10.8	13.5	16.6	21.7	25.1	24.6	20.5	16.0	13.0	10.3
240.00	10.3	13.2	16.4	21.1	23.9	23.4	20.1	15.8	12.6	9.9
238.00	13.6	17.6	21.8	26.8	29.6	29.2	26.1	21.1	17.1	13.3
236.00	14.3	19.0	22.9	28.1	31.4	31.0	27.4	22.0	18.8	13.9
234.00	14.8	19.8	23.8	28.5	31.1	30.9	27.7	22.9	19.3	14.5
232.00	14.9	18.6	22.5	27.1	30.4	30.0	26.1	21.7	18.6	14.6
230.00	15.7	19.2	23.6	28.6	32.4	31.8	27.8	23.0	18.6	15.3
228.00	15.6	19.4	23.7	28.1	31.6	31.1	27.2	22.8	19.0	15.1
226.00	14.8	18.4	23.3	28.4	32.2	31.8	27.4	22.5	17.8	14.3
224.00	18.5	23.1	28.8	34.9	39.2	38.5	34.1	27.9	22.5	18.3
222.00	18.3	23.0	29.5	35.2	40.3	39.6	33.9	28.7	22.3	17.9
220.00	17.1	23.0	29.0	34.9	38.5	37.8	33.6	28.1	22.2	16.8
218.00	17.1	21.7	26.8	32.9	37.1	36.5	31.7	25.9	20.9	16.8
216.00	17.5	21.6	26.7	33.2	37.2	36.7	32.0	25.8	20.9	16.9
214.00	15.8	20.1	24.9	30.5	34.4	33.8	29.6	23.6	19.3	15.0
212.00	16.1	20.0	25.1	31.1	36.7	36.1	29.8	24.2	19.4	15.5
210.00	19.7	24.6	30.4	37.0	42.0	41.3	35.8	29.2	23.9	19.2
208.00	19.0	24.0	30.9	37.5	41.3	40.8	36.3	29.8	23.3	18.6
206.00	18.0	22.9	28.6	35.2	39.5	38.7	33.7	27.2	22.2	17.7
204.00	18.7	23.9	28.2	35.5	39.1	38.7	34.1	27.2	23.0	18.4
202.00	19.8	24.4	29.9	36.5	42.4	41.7	35.0	28.7	23.8	19.2
200.00	22.0	27.6	33.3	40.8	45.9	45.2	39.3	32.2	26.8	21.4
198.00	21.5	26.7	33.8	40.4	44.6	44.1	39.2	32.7	26.0	20.7
196.00	20.2	24.9	31.7	38.8	44.0	43.1	37.0	30.5	24.0	19.9
194.00	21.0	26.3	32.3	39.8	44.7	43.9	38.5	31.0	25.2	20.6
192.00	21.7	27.1	33.6	40.6	48.0	46.9	39.0	31.9	26.2	21.0
190.00	23.5	30.1	36.6	45.0	50.6	49.9	43.2	35.3	29.1	22.7
188.00	22.2	27.9	35.3	43.0	48.2	47.6	41.4	34.1	27.1	21.4
186.00	21.0	25.9	33.3	40.9	45.8	44.8	39.0	31.9	24.9	20.6
184.00	21.6	27.4	33.8	41.3	46.0	45.0	39.7	32.4	26.2	21.0
182.00	25.5	31.6	37.9	46.9	53.0	52.0	45.0	36.3	30.7	24.9
180.00	24.3	30.9	38.5	46.8	52.9	52.1	45.0	37.1	29.7	23.6
178.00	22.7	30.0	37.5	45.3	51.1	50.2	43.8	36.0	28.8	22.2
176.00	23.3	29.7	37.0	45.9	52.8	51.7	43.7	35.0	28.7	22.9
174.00	28.2	36.5	44.1	53.3	58.8	58.0	51.2	42.8	35.0	27.4
172.00	26.3	33.2	41.7	50.9	57.1	56.0	48.9	39.8	31.9	25.4
170.00	24.9	31.2	39.3	48.0	53.5	52.4	46.1	37.8	30.2	23.8
168.00	30.1	37.0	45.0	54.5	60.3	58.9	52.4	43.1	36.1	28.9
166.00	29.6	36.3	45.7	56.0	62.9	61.5	53.3	43.6	35.1	28.7
164.00	28.0	36.0	45.0	54.8	61.7	60.4	52.4	43.2	34.5	27.1
162.00	31.3	40.1	49.3	58.5	66.2	65.0	56.3	47.2	38.6	30.2
160.00	31.7	39.4	49.7	60.5	68.4	66.7	57.8	47.4	38.1	30.8
158.00	31.3	40.4	50.3	60.9	68.3	66.8	58.5	48.5	38.5	30.0
156.00	33.8	42.9	52.6	64.3	71.6	70.3	61.3	50.5	41.2	32.8
154.00	33.3	42.6	53.6	64.6	72.2	70.6	61.6	51.0	41.0	32.0
152.00	40.3	50.2	61.2	74.1	81.5	79.9	71.4	58.5	48.9	39.1
150.00	41.4	51.1	62.9	76.9	85.3	83.8	73.8	60.4	49.5	39.9
148.00	40.1	52.1	64.8	77.6	85.9	84.0	74.4	61.9	50.4	38.8
146.00	41.1	52.2	64.2	78.0	89.5	88.0	73.9	60.6	50.3	40.0
144.00	47.9	59.7	72.4	88.3	99.7	97.6	84.5	69.2	57.7	46.2
142.00	45.0	57.7	70.9	86.4	95.8	94.1	82.3	68.3	54.8	43.4
140.00	44.7	56.6	71.0	86.3	97.1	95.2	82.2	68.0	53.3	43.4
138.00	51.7	63.0	78.5	95.3	106.1	103.3	91.7	73.9	61.2	50.1
136.00	49.7	62.2	76.0	94.4	105.3	103.4	89.1	73.0	59.3	47.6
134.00	53.3	68.1	82.6	100.8	112.4	110.0	95.7	79.1	64.7	51.6
132.00	54.6	68.2	84.9	102.7	115.3	112.8	98.4	80.4	65.3	52.7
130.00	57.8	73.5	90.7	110.4	124.1	121.0	105.0	86.4	71.7	56.0
128.00	57.4	75.0	92.4	110.9	123.5	121.2	105.1	88.0	71.5	55.4
126.00	63.3	79.8	98.6	120.2	135.6	132.4	114.5	94.1	76.8	61.3
124.00	62.7	82.0	98.3	119.9	134.1	131.2	113.9	94.0	78.5	60.0
122.00	69.9	88.7	110.3	132.5	146.1	143.0	126.8	105.8	84.8	67.6
120.00	69.7	89.0	108.0	131.4	148.7	144.6	125.2	102.4	85.1	66.7

İç bölge için elde edilen ortalama parıltı değerleri:

ortalama yol parıltısı [cd/m2]	: 7.6
şerit no.1 [cd/m2]	: 7.6
şerit no.2 [cd/m2]	: 7.5
ortalama sol duvar parıltısı (2m'nin altında) [cd/m2]	: 6.5
ortalama sağ duvar parıltısı (2m'nin altında) [cd/m2]	: 6.5

İç bölge için koordinatsal olarak elde edilen ayrıntılı $[cd/m^2]$ cinsinden noktasal parlıtlı değerleri:

s/r (m)	0.40	1.20	2.00	2.80	3.60	4.40	5.20	6.00	6.80	7.60
400.00	2.6	3.0	3.5	3.8	3.9	3.9	3.8	3.5	3.0	2.6
398.00	3.0	3.5	4.1	4.5	4.8	4.8	4.6	4.1	3.5	3.0
396.00	3.5	4.0	4.8	5.6	5.9	5.9	5.6	4.8	4.0	3.5
394.00	3.4	4.5	5.4	6.0	6.4	6.4	5.9	5.4	4.5	3.3
392.00	4.4	5.2	6.3	7.6	8.6	8.6	7.5	6.2	5.2	4.3
390.00	5.0	6.2	7.4	9.1	10.4	10.4	9.0	7.3	6.1	5.0
388.00	5.1	6.6	8.2	10.1	11.3	11.3	10.0	8.1	6.5	5.1
386.00	5.1	6.7	8.1	10.2	11.7	11.6	9.9	7.7	6.6	5.0
384.00	5.0	6.6	7.9	10.0	11.0	11.1	9.7	7.8	6.5	5.0
382.00	4.9	6.2	7.9	9.6	10.7	10.6	9.4	7.7	6.1	4.9
380.00	4.8	5.9	7.2	9.1	10.1	9.9	8.9	7.1	5.7	4.7
378.00	5.1	6.2	7.9	9.2	9.9	9.8	9.1	7.7	6.3	5.0
376.00	5.0	6.0	7.5	9.4	10.9	10.8	9.2	7.4	5.9	4.9
374.00	5.2	6.5	8.1	10.0	11.6	11.6	9.9	8.0	6.4	5.1
372.00	5.1	6.5	8.7	9.7	11.8	11.7	9.6	8.4	6.4	5.0
370.00	5.1	6.4	8.3	10.2	11.5	11.4	10.0	8.1	6.3	5.0
368.00	4.9	6.2	7.7	9.7	10.8	10.7	9.5	7.6	6.2	4.9
366.00	4.9	6.1	7.7	9.6	10.4	10.3	9.5	7.7	5.9	4.9
364.00	4.4	5.9	7.2	8.6	9.7	9.5	8.5	7.1	5.8	4.3
362.00	4.8	6.0	7.3	9.0	10.3	10.2	8.9	7.1	5.9	4.7
360.00	5.3	6.6	7.9	9.8	11.3	11.2	9.6	7.8	6.4	5.2
358.00	5.2	6.7	8.4	10.4	11.7	11.7	10.3	8.3	6.6	5.2
356.00	5.1	6.7	8.2	10.3	11.8	11.8	10.0	7.8	6.7	5.0
354.00	5.1	6.7	8.0	10.1	11.1	11.2	9.8	7.8	6.6	5.1
352.00	4.9	6.2	7.9	9.7	10.8	10.7	9.5	7.8	6.1	4.9
350.00	4.8	5.9	7.2	9.1	10.1	10.0	9.0	7.1	5.7	4.7
348.00	5.1	6.2	7.9	9.3	9.9	9.8	9.1	7.7	6.3	5.0
346.00	5.0	6.0	7.5	9.4	10.9	10.8	9.2	7.4	5.9	4.9
344.00	5.2	6.5	8.1	10.0	11.6	11.6	9.9	8.0	6.4	5.1
342.00	5.1	6.5	8.7	9.7	11.8	11.7	9.6	8.4	6.4	5.0
340.00	5.1	6.4	8.3	10.2	11.5	11.4	10.0	8.1	6.3	5.0
338.00	4.9	6.2	7.7	9.7	10.8	10.7	9.5	7.6	6.2	4.9
336.00	4.9	6.1	7.7	9.6	10.4	10.3	9.4	7.6	5.8	4.9
334.00	4.4	5.9	7.2	8.6	9.7	9.5	8.5	7.1	5.7	4.3
332.00	4.8	6.0	7.3	9.0	10.3	10.2	8.9	7.1	5.9	4.7
330.00	5.3	6.6	7.9	9.8	11.3	11.2	9.6	7.7	6.4	5.2
328.00	5.2	6.7	8.4	10.4	11.7	11.7	10.3	8.3	6.6	5.2
326.00	5.1	6.7	8.2	10.3	11.8	11.8	10.0	7.8	6.7	5.0
324.00	5.1	6.7	8.0	10.1	11.1	11.2	9.8	7.8	6.5	5.1
322.00	4.9	6.2	7.9	9.7	10.8	10.7	9.5	7.7	6.1	4.9
320.00	4.8	5.9	7.2	9.1	10.1	10.0	9.0	7.1	5.7	4.7
318.00	5.1	6.2	7.9	9.3	9.9	9.8	9.1	7.7	6.3	5.0
316.00	5.0	6.0	7.5	9.4	10.9	10.8	9.2	7.3	5.9	4.9
314.00	5.2	6.5	8.1	10.0	11.6	11.6	9.9	8.0	6.4	5.1
312.00	5.1	6.5	8.7	9.7	11.8	11.7	9.6	8.4	6.3	5.0
310.00	5.1	6.4	8.3	10.2	11.5	11.4	10.0	8.1	6.2	5.0
308.00	4.9	6.2	7.7	9.7	10.8	10.7	9.5	7.6	6.2	4.9
306.00	4.9	6.1	7.7	9.6	10.4	10.3	9.4	7.6	5.8	4.9
304.00	4.4	5.9	7.2	8.6	9.7	9.5	8.5	7.1	5.7	4.2
302.00	4.8	5.9	7.3	9.0	10.3	10.2	8.8	7.1	5.9	4.7
300.00	5.3	6.5	7.9	9.8	11.3	11.2	9.6	7.7	6.4	5.2

5.2.2.2 Gece Aydınlatması için

(Not: Ölçümler 30m boyunca (S=33.5 - 63.5m) her metrede bir adet olmak üzere yapılmıştır.)

Tüm tünel boyunca elde edilen ortalama parlıtlı değerleri:

ortalama yol parlıtlısı $[cd/m^2]$	: 3.8
şerit no.1 $[cd/m^2]$	: 4.0
şerit no.2 $[cd/m^2]$	: 3.5
ortalama sol duvar parlıtlısı (2m'nin altında) $[cd/m^2]$	: 3.3
ortalama sağ duvar parlıtlısı (2m'nin altında) $[cd/m^2]$	: 3.3

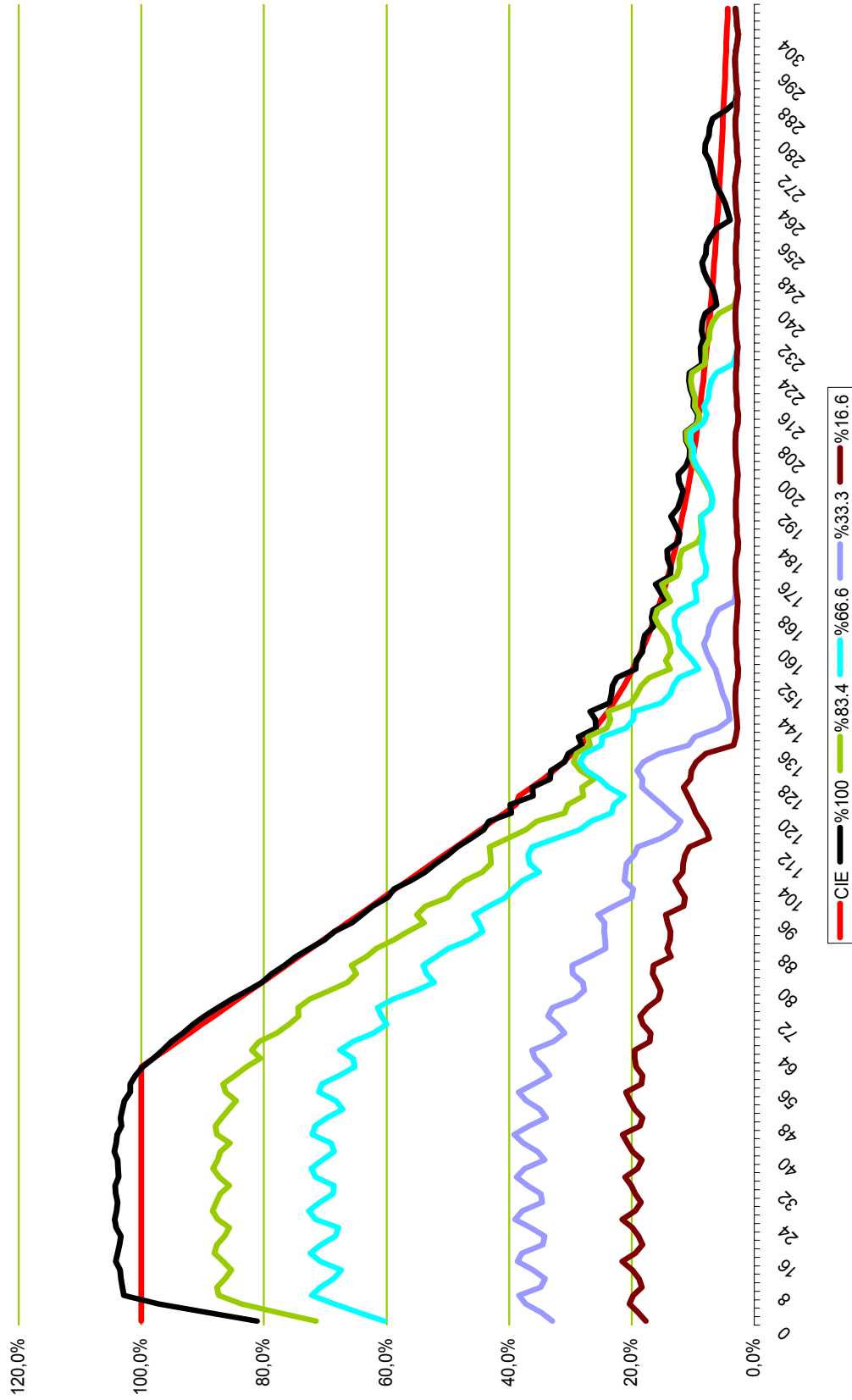
Tüm tünel boyunca koordinatsal olarak elde edilen ayrıntılı [cd/m^2] cinsinden noktasal parlıtlı değerleri:

s/r(m)	0.40	1.20	2.00	2.80	3.60	4.40	5.20	6.00	6.80	7.60
63.50	2.2	2.9	3.7	4.5	4.9	4.5	3.9	3.3	2.7	2.0
62.50	2.2	3.1	3.9	4.7	5.1	4.8	4.1	3.6	2.9	2.1
61.50	2.4	2.8	3.6	4.7	5.4	5.0	4.1	3.3	2.7	2.1
60.50	2.4	3.1	3.8	4.9	5.6	5.3	4.2	3.5	2.8	2.2
59.50	2.5	3.2	4.0	5.1	5.8	5.5	4.5	3.6	2.8	2.3
58.50	2.4	3.4	4.2	5.1	5.9	5.6	4.6	3.7	3.0	2.3
57.50	2.4	3.2	4.1	5.2	6.0	5.7	4.7	3.6	2.8	2.1
56.50	2.5	3.3	4.3	5.2	6.0	5.6	4.7	3.8	2.8	2.2
55.50	2.5	3.0	4.2	5.5	5.9	5.5	4.6	3.6	2.8	2.2
54.50	2.4	3.1	4.3	5.2	5.7	5.3	4.4	3.4	2.9	2.2
53.50	2.3	3.1	3.9	5.2	5.6	5.1	4.3	3.5	2.8	2.1
52.50	2.3	3.2	3.9	5.0	5.5	5.0	4.1	3.4	2.7	2.1
51.50	2.3	3.0	3.9	4.9	5.4	5.0	4.1	3.3	2.7	2.1
50.50	2.3	2.9	3.8	4.8	5.2	4.8	4.0	3.2	2.5	2.2
49.50	2.2	2.8	3.6	4.6	5.0	4.6	3.8	3.1	2.5	2.0
48.50	2.2	2.9	3.7	4.5	4.8	4.5	3.8	3.2	2.6	2.0
47.50	2.2	3.1	3.9	4.7	5.1	4.7	4.1	3.4	2.8	2.0
46.50	2.4	2.8	3.6	4.7	5.3	5.0	4.0	3.2	2.6	2.1
45.50	2.3	3.1	3.8	4.9	5.6	5.2	4.1	3.4	2.8	2.1
44.50	2.5	3.2	4.0	5.2	5.8	5.4	4.4	3.5	2.7	2.2
43.50	2.4	3.4	4.2	5.2	5.9	5.4	4.4	3.6	2.8	2.1
42.50	2.4	3.2	4.1	5.2	6.0	5.5	4.4	3.5	2.8	2.1
41.50	2.4	3.3	4.3	5.2	6.0	5.5	4.4	3.5	2.6	2.1
40.50	2.5	3.0	4.2	5.5	5.9	5.4	4.4	3.4	2.7	2.1
39.50	2.3	3.1	4.3	5.2	5.7	5.2	4.2	3.2	2.7	2.2
38.50	2.3	3.1	3.9	5.2	5.7	4.9	4.1	3.3	2.8	2.2
37.50	2.2	3.2	3.9	5.1	5.6	4.9	3.9	3.2	2.7	2.1
36.50	2.3	3.0	3.9	5.0	5.4	4.8	4.0	3.2	2.6	2.1
35.50	2.2	2.9	3.8	4.8	5.2	4.6	3.9	3.1	2.4	2.2
34.50	2.2	2.8	3.6	4.6	5.0	4.4	3.7	3.1	2.5	1.9
33.50	2.3	2.8	3.7	4.6	4.8	4.3	3.7	3.1	2.3	2.0

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tasarımın uygulanması sonucu elde edilecek eşik ve geçiş bölgeleri için parıltı düzeyi değerleri, dış bölgede en sık rastlanan en yüksek parıltı düzeyi değerlerini sağlamak üzere tasarlanmıştır. Oysaki ekonomik koşullar ve gözün adaptasyon yeteneği dikkate alındığında bu bölgelerde parıltı değerlerinin, dış bölge parıltısına bağlı olarak kademeli olarak kontrol edilmesi daha efektif bir çözüm olacaktır. Bunun için, tünel girişinden fren mesafesi kadar uzağa, tünel ağzının merkezine yönlendirilecek şekilde parıltı ölçerler (luminansmetre) yerleştirilmesi uygun olacaktır. Parıltı ölçerlerle saptanan dış bölge parıltı düzeylerine göre tünel eşik ve geçiş bölgesi aydınlatmaları %100, %83,4, %66,6, %33,3, %16,6 olacak şekilde sadece armatürlerin yakılıp söndürülmesi ile kademelendirilecektir. Bu sayede armatürlerde maliyet ve bakım koşullarını da olumsuz yönde etkileyen dimmerleme (loşlaştırma) olasılığı kullanılmadan çözüm getirilmiş olacaktır. Kademelendirmeler armatür sembollerinin altında grup numarası belirtilirerek Ek-1’de gösterilmiştir. Kademelendirme sonrası TunLight programı ile yeniden hesaplama yoluna gidilmiş ve elde edilen sonuçlardan şekil 6.1 elde edilmiştir.

Kurulan aydınlatma sistemi için düzenli bakım periyotları (yılda 2 kez) baz alındığında, 5.2.2 başlığı altında da yapılan hesaplar ışığında, Uluslararası Aydınlatma Komisyonu’nun uygun gördüğü değerleri sağlanmaktadır. Bu suretle TunLight bilgisayar programı vasıtasıyla yapılan hesaplamalarda kullanılan bakım faktörü 0,8 olarak seçilmiştir. Fakat tünel aydınlatma sisteminde düzenli bakım yapılmaması muhtemel olup uygulamada bu faktörün 0,7–0,6 değerlerine indiği gözlemlenir. Bakım faktöründeki bu düşüşün anlamı ise zaman içinde armatürlerin verdikleri akı değerlerinin azalması demektir. Dolayısıyla tüm tünel bölgelerine yansıyacak olan bu problem özellikle gözün adaptasyon sürecinin sağlandığı eşik bölgesi aydınlatmasında kendini gösterecektir.



Şekil 6.1 Armatür kademelendirilmesi durumunda metre bazındaki ortalama parıltı değerlerinin 270 cd/m² eşdeğer parıltı değerine göre oranları (Bağıl Parıltı Oranları)

TunLight programı kullanılarak bu bakım faktörü değerleri için ayrı ayrı tekrar hesaplamalar yapılmış ve zaman içinde karşılaştırılması muhtemel sonuçlar aşağıda ortaya koyulmuştur. (Bakım faktörü için ön görülen değerler aydınlatmanın en hassas yapıldığı eşik bölgesi için değerlendirilmiştir.)

Buna göre 0,7 bakım faktörü için şu ortalama değerler elde edilmiştir;

ortalama yol parlıltısı [cd/m2]	: 203.2
şerit no.1 [cd/m2]	: 210.0
şerit no.2 [cd/m2]	: 168.3
ortalama sol duvar parlıltısı (2m'nin altında) [cd/m2]	: 119.5
ortalama sağ duvar parlıltısı (2m'nin altında) [cd/m2]	: 118.6

Bakım faktörünün 0,6 değeri için ise şu ortalama değerler elde edilmiştir;

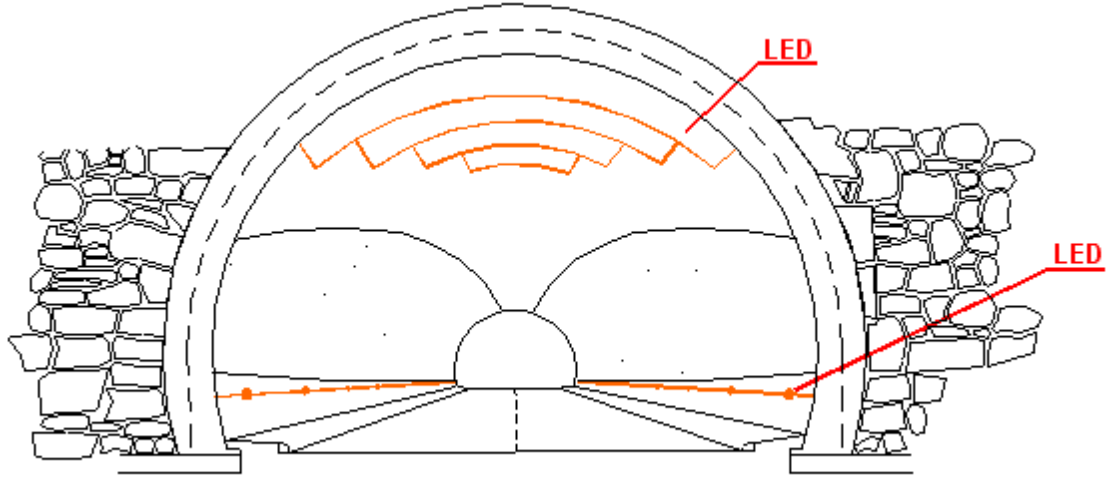
ortalama yol parlıltısı [cd/m2]	: 174.2
şerit no.1 [cd/m2]	: 180.0
şerit no.2 [cd/m2]	: 224.4
ortalama sol duvar parlıltısı (2m'nin altında) [cd/m2]	: 159.3
ortalama sağ duvar parlıltısı (2m'nin altında) [cd/m2]	: 158.1

Oysa ki bakım faktörünün 0,8 değeri için yapılan hesaplamalarda şu ortalama değerler elde edilmiştir;

ortalama yol parlıltısı [cd/m2]	: 232.2
şerit no.1 [cd/m2]	: 240.1
şerit no.2 [cd/m2]	: 224.4
ortalama sol duvar parlıltısı (2m'nin altında) [cd/m2]	: 159.3
ortalama sağ duvar parlıltısı (2m'nin altında) [cd/m2]	: 158.1

Zaman içindeki değişim sayılarla ortaya koyulduğunda bakım faktörünün aydınlatma sistemi için ne kadar önem arz ettiği ve tedbir alınması gerekliliği rahatlıkla görülebilmektedir.

Bu tip, zaman içerisinde aydınlık düzeylerini etkileyecek ya da başka bir deyişle tünel içindeki sürüş güvenliğini tehlikeye sokabilecek olan bakımla ilgili azaltıcı faktörler için göz adaptasyonunu kolaylaştıracak ve tünel içindeki görüş kabiliyetini arttıracak yönde çeşitli önlemler alınması uygun olacaktır. Bunun için tünel girişinde aydınlatma sistemiyle sağlanan kademeli geçişin yanında güneş ekranları kullanmak ya da tünel girişinde yapısal olarak parlıltı geçişini yumuşatacak mimari değişiklikler yapılmak suretiyle oluşabilecek bu problemlerin önüne geçmek mümkün olur. Ayrıca sürücünün göz adaptasyonu esnasında duvarların ve tünel geometrisinin daha iyi seçebilmesi için eşik bölgesinde tünel yan duvarlarına ve tavanına görsel kılavuzlama amaçlı ledlerin eklenmesi yine sürüş güvenliğini arttıracak tedbirler arasındadır. (Şekil 6.2)



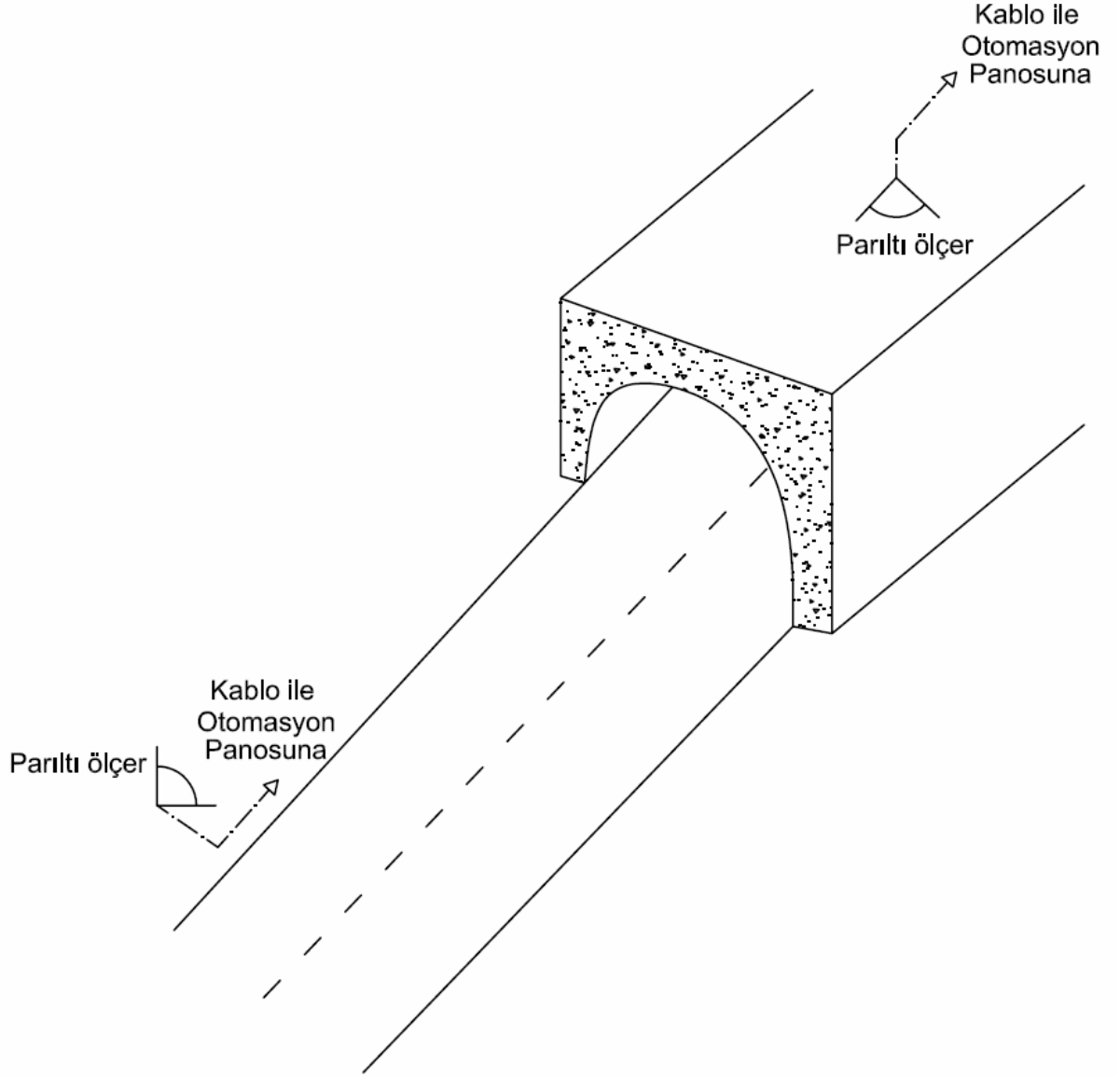
Şekil 6.2 Tünel Eşik Bölgesinin Ledler Yardımıyla Kılavuzlanması

Bu konuda getirilebilecek bir diğer öneri ise trafik hızıyla ilgilidir. Yaklaşma bölgesinde bulunan otomasyon kontrollü değişken bir hız uyarıcı levhasıyla, eşik bölgesi ve dış parıltıların oranına göre güvenli sürüş hızı tespit edilip bu değer ışıklı levha üzerinde görüntülenebilir. Bu devre için, yaklaşma bölgesine konumlandırılan ve kademelendirme amaçlı otomasyon panosuna bilgi göndermekte olan parıltı ölçerden ve tünelin giriş bölgesinde konumlandırılacak ikinci bir parıltı ölçerden alınan bilgiler gerekli olacaktır. (Şekil 6.3) İlgili yönetmeliklere de uygun olarak yazılacak otomasyon programı yapılan hesaplamaların ardından ışıklı levhaya hız limit bilgisini gönderecektir.

Tünel giriş bölgesinde konumlandırılacak söz konusu parıltı ölçer ile ayrıca bakım süreleriyle ilgili bir uyarı sistemi kurmak da mümkün olacaktır. Bu sistem, güvenliği tehlikeye düşürecek parıltı oranları ile karşılaşıldığında otomasyon panosuna ilave edilecek modem vasıtasıyla merkeze (bölge karayolu müdürlüğü) uyarı sinyalleri ya da düzenli olarak bilgi raporları gönderecektir. Bu sayede zamanında yapılacak bakım işlemleriyle armatürlerin bakım faktörlerinin kontrol altında tutulması ve güvenliği tehlikeye sokacak değerlere düşüşün engellenmesi daha kolay olacaktır.

Üzerinde durulması gereken bir diğer husus acil aydınlatma düzeneğidir. Enerjide meydana gelecek kesintilerde tünel bölgelerinin karanlık kalmaması amacıyla acil durumda devreye girecek bir aydınlatma devresi düşünülmelidir. Bu konuda gece aydınlatması devresinin şebekenin yanında, gereklilik hallerinde devreye girecek 3 fazlı bir jeneratörden beslenmesi gerekmektedir. Şebeke ve jeneratör arasındaki geçiş transfer panosu aracılığıyla yapılacaktır. Ayrıca söz konusu armatürlerin arkasına monte edilecek küçük aküler, herhangi bir kesinti

halinde jeneratörün devreye girebilmesi için gereken süre esnasında tünelin karanlık kalmasını önleyecektir. Montaj aşamasında birbirini takip eden armatürlerin farklı fazlardan beslenmesi devrelerde gelebilecek arızalara karşı iç kısımlarda bölgesel karanlıklar oluşmasını engellemiş olacaktır.



Şekil 6.3 Tünel Yaklaşım ve Giriş Bölgelerine eklenecek Parıltı Ölçerler

KAYNAKLAR

Bijlaardt Ir. D. (1976), "Some New Aspects of Public Lighting, International Lighting Review (ILR), Vol.27, No.1

Bommel, W.J.M., Boer, J.B. (1980), Road Lighting, Philips Technical Library

BS 5489 (1992), Road Lighting, Part 7, Code of practice for the lighting of tunnels and underpasses

CIE, Publication No.26 (1973), Technical Report, International Recommendations for Tunnel Lighting

CIE, Publication No.31 (1976), Technical Report, Glare and Uniformity in Road Lighting Installations

CIE, Publication No.88 (1990), Technical Report, Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses

Demirdeş, H. (1979), Yol Aydınlatmasının esasları ve Çeşitli Hesap Yöntemleri, İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Fakültesi, İstanbul

DIN, 67524 (1972), Beleuchtung von Strassentunneln und Unterführungen

Henderson, S.T. (1972), Marsden, A.M., Lamps and Lighting, Edward Arnold

İzбек, K.K. (1999), C.I.E. Tanım ve Kriterleri Işığında Tünel Aydınlatma Tekniği Prensipleri ve İzmir-Osman Kibar Tünel Aydınlatmalarına İlişkin Görüşler

Onaygil, S. (1990), Tünel Aydınlatmasında Eşik Bölgesi Parıltısının Tayini, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Özkaya, M. (1985), Aydınlatma Tekniği, İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi, Değiştirilmiş 5. Baskı, İstanbul

Özkaya, M. (1990), Yol Aydınlatması, İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi, İstanbul

Pan American Institute of Highways (2001), European Road Lighting Technologies, U.S. Department of Transportation

Philips (1984), Aydınlatma Elemanlarındaki Son Gelişmeler ve Enerji Tasarrufuna Katkıları, Seminer Notları

Philips (1981), Lighting Manuel, Third Edition

Philips (1985), Tunnel Lighting No:3, Netherlands

Schreuder, D.A. (1971), Tunnels Entrance Lighting-a Comparison of Recommended Practice, Lighting Research and Technology, Vol. 3

Siemens, CIE International Recommendation for Tunnel Lighting

Simons, R.H., Bean, R. (2001), Lighting Engineering: Applied Calculations, Architectural Press, U.K.

Siteco Aydınlatma Tekniği, Karayolu Tünel Projeleri

Soylu, Murat, (2002), Tünel Aydınlatmasında Giriş Bölgesindeki Işık Akısının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Sucugil, Ramazan Mete, (2000), Tünel Aydınlatma Sistemlerinde Enerji Tasarrufu ve Aydınlatma Teknolojisi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Thorlux (2004), Tunnel Lighting Catalogue, U.K.

Thorn Lighting (2004), Tunnel Lighting, Pub. No. 283, U.K.

Walther R. (1977), Tunnel Lighting Systems, International Lighting Review (ILR)

Yılmaz, K.K. (1995), Tünel Aydınlatması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksel, R. (1991), Karayollarında Yol ve Tünel Aydınlatması, Yıldız Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

İNTERNET KAYNAKLARI

[1]<http://www.die.gov.tr>

[2]<http://www.emo.org.tr>

[3]<http://www.etmd.com.tr>

[4]<http://www.lamptech.co.uk>

[5]<http://www.siteco.si>

EKLER

Ek 1 Devren Tüneli Aydınlatma Tasarımı

Ek 1 Devren Tüneli Aydınlatma Tasarımı

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 7.11.1980

Doğum yeri İstanbul

Lise 1995-1998 Beşiktaş Atatürk Anadolu Lisesi

Lisans 1998-2003 Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fak.
Elektrik Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2003-2006 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Müh. Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri
Programı

Çalıştığı kurumlar

2003-2004 Net Mühendislik Elektrik Sanayi ve Tic. A.Ş.
2004-Devam ediyor Pirimer Makina Endüstrisi ve Tic. A.Ş.