

T.C.  
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KURP EKSENLİ TÜNELLERDE KOORDİNAT ESASLI AYDINLATMA TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖMER ÖNDER İSİYEL

TEZ DANIŐMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ NAZİM İMAL

BİLECİK, 2023

10529219

T.C.  
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KURP EKSENLİ TÜNELLERDE KOORDİNAT ESASLI AYDINLATMA TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖMER ÖNDER İSİYEL

TEZ DANIŐMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ NAZİM İMAL

BİLECİK, 2023

10529219

## BEYAN

"Kurp Eksenli Tünellerde Aydınlatma Tasarımı" adlı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığımı, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
<b>DESTEK ALINMIŞTIR</b>		<b>DESTEK ALINMAMIŞTIR</b>	<b>X</b>
<b>Destek alındı ise;</b>			
<b>Destekleyen kurum;</b>			
<b>Desteğin Türü</b>		<b>Proje Numarası</b>	
<b>1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)</b>			
<b>2- TÜBİTAK</b>			
<b>Diğer;.....</b> .....			
<b>ETİK KURUL onayı var ise;</b>			
<b>ETİK KURUL karar tarih/sayı:</b>		...../..... .....	

**Ömer Önder ISİYEL**

**Tarih**

.....

**İmza**

.....

## **ÖN SÖZ**

Tez yazımı süresince her türlü fedakarlıkla ve emekleriyle bana rehber olan ve destek veren değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Nazım İMAL'e teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Her zaman yanımda olan ve bugünlere gelmemde büyük emeği olan, hakkını ödeyemeyeceğim babam Nejdet ISİYEL'e, annem Elvida ISİYEL'e, kardeşim Özlem ISİYEL'e ve eşim Dilara ISİYEL'e sonsuz teşekkür ederim.

Yüksek lisans öğrenimimi destekleyen, bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren değerli mesai arkadaşlarıma teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

**Ömer Önder ISİYEL**

**2023**

## ÖZET

### KURP EKSENLİ TÜNELLERDE KOORDİNAT ESASLI AYDINLATMA TASARIMI

Tüneller, yol güzergâhlarında engebeli arazi geçişlerini kolaylaştıran önemli mimari yapılar olup, özellikle karayolları ve demiryollarında sıklıkla tercih edilirler. Tünel içi ortamların aydınlatılması parıltı değişiminin olumsuz etkisini azaltmak mümkünse ortadan kaldırabilmek için oldukça önemlidir. Demiryolları ve karayollarında da sıklıkla kullanılan tünel yapılar, yolcu ve sürücü emniyetinin sağlanması için hassas olarak aydınlatılmalıdırlar. Bu çalışmada, demiryolu ya da karayolu geçiş güzergahlarında bulunan kurp (viraj eğimli) eksenli tünellerde aydınlatma tasarımının özellikleri ve detayları üzerinde durulmuştur. Kurp eksenli tünellerde gerçekleştirilen aydınlatma tasarımları, lineer eksenli tünellerdeki aydınlatma tasarımlarına benzer olmakla birlikte, eğimin iç kısmında yer alan armatürlerin ve eğimin dış kısmında yer alan armatürlerin toplam ışık akısı olarak aynı olmamasını gerektirmektedir. Eğimin iç kısmında yer alan armatürlerin ve eğimin dış kısmında yer alan armatürlerin ışık akılarında sağlanan farklılık, tünel içi aydınlatmasının daha dengeli olmasını sağlamaktadır. Ayrıca, tünel giriş ve çıkışlarında gerçekleştirilen aydınlatma, gündüz saatlerinde kademeli soft geçiş şartları ile tasarlanarak, tünel yapıyı kullanan yolcu ve sürücülerin zebra etkisinden daha az etkilenmeleri hedeflenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kurp Eksenli Tünel, Demiryolu, Karayolu, Aydınlatma, Zebra Etkisi.

## ABSTRACT

### COORDINATE BASED LIGHTING DESIGN IN CURVED TUNNELS

Tunnels are important architectural structures that facilitate the passage of rough terrain on road routes, and they are frequently preferred especially in highways and railways. Lighting of the interior of the tunnel is very important in order to reduce the negative effect of the brightness change, if possible, to eliminate it. Tunnel structures, which are also frequently used in railways and highways, must be lighting sensitively to ensure passenger and driver safety. In this study, the features and details of the lighting design in the curved tunnels on the railway or highway transit routes are emphasized. Lighting designs realized in curved-axis tunnels are similar to lighting designs in linear-axis tunnels, but require that the armatures located on the inside of the slope and the fixtures located on the outside of the slope should not be the same in terms of total armatures flux. The difference in the armature flux of the armatures located inside the slope and the armatures located outside the slope ensures a more balanced lighting in the tunnel. In addition, the lighting at the tunnel entrances and exits is designed with gradual soft transition conditions during daylight hours, so that passengers and drivers using the tunnel structure are less affected by the zebra effect.

**Keywords:** Curved-Axis Tunnel, Railway, Highway, Lighting, Zebra effect.

# İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ .....	i
ÖZET .....	ii
ABSTRACT .....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	ix
GRAFİKLER LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Taraması .....	3
1.2. Tezin Amacı ve Yapısı.....	3
2. AYDINLATMANIN TEMEL KAVRAMLARI.....	5
2.1. Fotometrik Büyüklükler .....	5
2.1.1. Düzlem açısı ve uzay açısı.....	5
2.1.2. Işık akısı .....	6
2.1.3. Işık şiddeti .....	6
2.1.4. Aydınlanma düzeyi .....	6
2.1.5. Parıltı kavramı .....	7
2.1.6. Kontrast .....	7
2.1.7. Kamaşma.....	8
2.1.8. Adaptasyon.....	8
2.2. Aydınlatma Tasarımında Kullanılan Hesap Parametreleri .....	8
2.2.1. Yolun yansıtma özellikleri .....	8
2.2.2. Ortalama parıltı düzeyi (Lort) .....	10

2.2.3. Ortalama parıltı düzgünlüğü ( <i>UO</i> ) .....	10
2.2.4. Boyuna parıltı düzgünlüğü ( <i>UL</i> ) .....	11
2.2.5. Bağlı eşik artışı ( <i>TI</i> ) .....	11
2.2.6. Çevre aydınlatma oranı ( <i>SR</i> ).....	11
2.2.7. Görsel kılavuzlama .....	11
2.2.8. Uluslararası kuruluşlara göre yol aydınlatma kalitesi .....	12
2.3. Yolun Aydınlatılmasında Kullanılan Armatürler .....	14
2.3.1. Alçak basınçlı sodyum buharlı lambalar .....	15
2.3.2. Yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalar .....	15
2.3.3. Metal halide lambalar.....	16
2.3.4. LED ışık kaynakları.....	16
3. YOL VE TÜNEL AYDINLATMASI.....	18
3.1. Demiryolu Ulaşımı .....	18
3.1.1. Demiryolunun ülkemizdeki tarihçesi .....	18
3.1.2. Demiryolu ulaşım sistemlerinde aranan nitelikler .....	19
3.1.3. Demiryolu ulaşım sistemlerinin avantajları.....	19
3.1.4. Demiryolunu oluşturan yapı elemanları .....	19
3.2. Karayolu Ulaşımı .....	20
3.2.1. Karayolu ulaşımının ülkemizdeki tarihçesi .....	21
3.2.2. Karayolu ulaşımında aranan nitelikler .....	21
3.2.3. Karayolunu oluşturan yapı elemanları .....	21
3.3. Kurp Kavramı.....	22
3.3.1. Basit kurplar .....	23
3.3.2. Birleşik kurplar.....	23
3.3.3. Ters yerleştirilmiş yatay kurplar.....	23
3.4. Taşıt Hareketleri .....	23

3.4.1. Görüş uzunluğu.....	23
3.4.2. Durma mesafesi.....	23
3.5. Tünel Yapılar .....	24
3.6. Tünel Aydınlatma Tekniği.....	25
3.6.1. Uluslararası aydınlatma komisyonunun önerileri .....	26
3.6.2. Aydınlatma açısından tünel çeşitleri .....	27
3.7. Tünel Aydınlatma Bölgeleri.....	28
3.7.1. Giriş bölgesi.....	29
3.7.2. İç bölge .....	31
3.7.3. Çıkış bölgesi .....	31
3.8. Tünellerde Acil Durum Aydınlatması .....	32
4. TÜNEL AYDINLATMA UYGULAMALARI .....	33
4.1. Doğrusal Yapıdaki Yüksek Hızlı Tren Tünelinde Aydınlatma Tasarımı .....	33
4.1.1. Demiryolu tüneli aydınlatma tasarımının simüle edilmesi.....	35
4.1.2. Aydınlatma tasarımı yapılan tünelin saha ölçümleri.....	38
4.2. Kurp Eksenli Bir Tünel Modeli Üzerinde Koordinat Esaslı Aydınlatma Tasarım Uygulaması.....	39
5. SONUÇ.....	50
KAYNAKÇA .....	51

## TABLULAR LİSTESİ

Sayfa No

<b>Tablo2.1.</b> CIE' ye Göre Yolların Aydınlatma Sınıfları .....	12
<b>Tablo2.2.</b> CIE' ye Göre Trafik İçin Yol Parıltısına Bağlı Aydınlatma Sınıflarının Kalite Kriterleri .....	13
<b>Tablo2.3.</b> Türkiye'deki Yolların Aydınlatma Sınıfları .....	13
<b>Tablo 2.3.</b> Aydınlatma Sınıfı Parametreleri .....	14
<b>Tablo 2.4.</b> Lamba Çeşitlerinin Elektriksel Karakterleri .....	17
<b>Tablo 3.1.</b> Parıltı Düzeyinin Fren Mesafesi ve Trafik Yoğunluğuyla İlişkisi .....	31
<b>Tablo 4.1.</b> Adreslenen Armatürlerin Koordinatları .....	36
<b>Tablo 4.2.</b> Hesap Yüzeylerindeki Aydınlatma Değerleri .....	36
<b>Tablo 4.3.</b> Kurp Tünel İçerisinde Aydınlatma Hesap Noktaları .....	41
<b>Tablo 4.4.</b> Kurp Tünel İçerisindeki Armatürlerin Yerleşim Noktaları .....	41
<b>Tablo 4.5.</b> 0-1/4, 1/4-2/4, 2/4-3/4, 3/4-4/4 Arası Mesafeler .....	42
<b>Tablo 4.6.</b> A Noktası İçin K, L Ve B Değerleri .....	43
<b>Tablo 4.7.</b> B Noktası İçin K, L Ve B Değerleri .....	43
<b>Tablo 4.8.</b> C Noktası İçin K, L Ve B Değerleri .....	44
<b>Tablo 4.9.</b> D Noktası İçin K, L Ve B Değerleri .....	44
<b>Tablo 4.10.</b> E Noktası İçin K, L Ve B Değerleri .....	45
<b>Tablo 4.11.</b> F Noktası İçin K, L Ve B Değerleri .....	45
<b>Tablo 4.12.</b> Kullanılan Armatürün Karakteristik Özellikleri .....	47
<b>Tablo 4.13.</b> Aydınlatma Düzeyi Hesaplanan Noktalara, Armatürlerin Yönlendirdiği Işık Şiddetleri .....	47
<b>Tablo 4.14.</b> Her Bir Armatürün Aydınlatma Düzeyi Hesaplanan Noktalarda Oluşturduğu Yatay Aydınlik Düzeyleri .....	48
<b>Tablo 4.15.</b> Her Bir Armatürün Aydınlatma Düzeyi Hesaplanan Noktalarda Oluşturduğu Düşey Aydınlik Düzeyleri .....	48

<b>Tablo 4.16.</b> Tablo Aydınlatma Düzeyi Hesaplanan Noktalarda Oluşan Yatay ve Düşey Aydınlik Düzeyleri .....	<b>49</b>
<b>Tablo 4.17.</b> Aydınlatma Düzeyi Hesaplanan Noktalarda Oluşan Minimum, Maksimum ve Ortalama, Yatay ve Düşey Aydınlik Düzeyleri.....	<b>49</b>
<b>Tablo 4.18.</b> Aydınlatma Düzeyi Hesaplanan Noktalarda Oluşan Yatay ve Düşey Aydınlatma Dağılım Katsayıları.....	<b>49</b>

## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa No

Şekil 1.1. Yeterli düzeyde aydınlatılmış çevre yolu .....	1
Şekil 2.1. Düzlem açısı .....	5
Şekil 2.2. Uzay açısı .....	6
Şekil 2.3. Aydınlık düzeyi belirlemede kullanılan parametreler .....	7
Şekil 2.4. Parıltının belirlenmesinde kullanılan açılar .....	9
Şekil 2.5. Alçak basınçlı sodyum buharlı lamba.....	15
Şekil 2.6. Yüksek basınçlı sodyum buharlı lamba .....	16
Şekil 2.7. Işık yayan diyot temel yapısı.....	17
Şekil 3.1. Ray, travers ve balasttan oluşan demiryolu üstyapı elemanları .....	20
Şekil 3.2. Basit kurplu yol planı.....	22
Şekil 3.3. Ters yerleştirilmiş yatay kurp ve birleşik kurp.....	23
Şekil 3.4. Eşme-Salihli arası yapımına devam edilen demiryolu tüneli güzergahı.....	25
Şekil 3.5. Kısa tünel .....	27
Şekil 3.6. Tünel bölgelerinin aydınlık düzeyleri.....	28
Şekil 3.7. Uzunlukları farklı tüneller için gündüz aydınlatma önerileri.....	29
Şekil 3.8. Fren mesafesinin eğim ve hız ile ilişkisi.....	30
Şekil 3.9. Acil durum kaçış armatürü.....	32
Şekil 4.1. YHT tüneli kesit görünüşü .....	34
Şekil 4.2. Tünel yerleşim planı kesiti .....	35
Şekil 4.3. Armatürlerin yerleşim planı .....	35
Şekil 4.4. Armatürlerin adreslenmesi .....	36
Şekil 4.5. Tasarımın 3B görüntülenmesi .....	37
Şekil 4.6. Tasarımdaki yanlış renklerin görüntülenmesi .....	37
Şekil 4.7. Saha ölçümünün yapıldığı noktalar .....	38

<b>Şekil 4.8.</b> Belirlenen noktalardaki aydınlanma düzeyleri.....	<b>38</b>
<b>Şekil 4.9.</b> Tünelde aydınlatma düzeyi ölçülen bölge .....	<b>39</b>
<b>Şekil 4.10.</b> Çalışmada ele alınan kurp eksenli tünelin iç simülatif görünümü .....	<b>39</b>
<b>Şekil 4.11.</b> Çalışmada ele alınan kurp eksenli tünelin şematik görünümü.....	<b>40</b>
<b>Şekil 4.12.</b> Çalışmada ele alınan kurp eksenli tünelde armatür ve hesap noktaları .....	<b>40</b>
<b>Şekil 4.13.</b> Tasarımda kullanılan armatür ve ışık dağılım eğrisi .....	<b>46</b>
<b>Şekil 4.14.</b> Tasarımda kullanılan armatür ve ışık dağılım eğrisi .....	<b>46</b>

## GRAFİKLER LİSTESİ

Sayfa No

**Grafik 3.1.** Ülkemizdeki demiryolu hat uzunluklarının son 5 yıldaki değişimi .....19

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

**LED:** Işık Yayan diyot

**SR:** Steradyan

**$\Phi$ :** Işık Akısı

**Lm:** Lümen

**F:** Enerji Akısı

**$K_0$ :** Enerji Akısının Fotometrik Eşdeğeri

**$V_\lambda$ :** Spektral Duyarlılık

**I:** Işık Şiddeti

**E:** Aydınlik Düzeyi

**L:** Parıltı

**$L_f$ :** Fon Parıltısı

**$L_c$ :** Cisim Parıltısı

**$L_A$ :** Kontrast

**$L_{ort}$ :** Ortalama Parıltı Düzeyi

**$L_{th}$ :** Geçiş Bölgesindeki Parıltı Düzeyi

**$U_L$ :** Boyuna Parıltı Düzgünlüğü

**$TI$ :** Bağlı Eşik Artışı

**$\Delta L_k$ :** Parıltı Eşiği

**$\Delta L_e$ :** Kamaşma Olmadığındaki Eşik

**SR:** Çevre Aydınlatma Oranı

**M:** Yol Aydınlatma Sınıfı

**AFT:** Ağırlık Faktörü Terimi

**TCDD:** Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları

**KM:** Kilometre

**KGM:** Karayolları Genel Müdürlüğü

**$L_R$ :** Reaksiyon Mesafesi

**$T_R$ :** Reaksiyon İçin Geçen Süre

**$L_f$** : Fren Mesafesi

**$f$** : Araç Tekerleği ile Yol arasındaki Sürtünme Katsayısı

**CIE**: Uluslararası Aydınlatma Komisyonu

**DALI**: Dijital Adreslenebilir Aydınlatma Arayüzü

## 1. GİRİŞ

Yol aydınlatma amacıyla tasarlanmış sistemler çoğunlukla zaman ayarlı olmakla birlikte foto elektrik anahtarlama sayesinde aydınlatmaya ihtiyaç duyulan saatlerde ortama ışık akısı sağlanması esasına göre çalışmaktadır. Yollarda aydınlatmaya duyulan ihtiyaç; trafik yoğunluğu, meteorolojik etkenler gibi pek çok parametreye göre farklılık göstermektedir. Bu farklılıkla birlikte güvenli sürüş için gerekli olan parlaklıklar da farklılık gösterebilmektedir. Günümüz dünyasında yaşanmakta olan enerji krizleri, enerjiye olan talep fazlalığı göz önüne alındığında yapmayı amaçladığımız yol aydınlatma tasarımının bir diğer amacı da enerji tasarrufu olmalıdır. Öyle ki gelişen teknolojiyi aydınlatma tasarımında gerekli konforu minimum enerji sarfiyatı ile sağlamaya entegre edebilmek öncelikli amacımız olmalıdır. Bunu sağlayabilmek için de tasarruflu enerji tüketimi ile ilgili küresel gelişmeler güncel olarak takip edilmeli, mümkün olduğunca aydınlatma tasarımlarımızı günümüz koşullarına uygun şekilde yapmalıyız. Gün ışığının olmadığı ya da yeterli düzeyde bulunmadığı zamanlarda sürücüler taşıtlarda bulunan aydınlanma donanımı ile güvenli sürüş ortamını sağlamaya çalışırlar. Ancak taşıtlarda bulunan aydınlatma sistemi trafik yoğunluğu, hava koşulları gibi sebeplerden dolayı yeterli olmayabilir. Bu sebeple iyi tasarım yapılmış bir aydınlatma sistemi hem sürücüler hem de yolcu ve yayalar için oldukça önem arz etmektedir. Bu tasarımın gerektiği gibi yapılmasına yönelik çalışmalar ve öneriler üreten pek çok uluslararası kurum ve kuruluş bulunmaktadır. Bu çalışma içeriğinde yapmış olduğumuz aydınlatma tasarımına ülkemizde geçerliliği bulunan Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (CIE) standartlarına uygun olan parametreler kullanılmıştır.



**Şekil 1.1.** Yeterli düzeyde aydınlatılmış çevre yolu

Çalışmamızın 2. Bölümünde yol ve tünel aydınlatmasının temel unsurlarını ele alarak CIE standartlarına uygun aydınlatma ekipmanlarının nasıl seçilmesi gerektiğinden bahsedilmiştir.

3.Bölümde, tünel kavramı tünel yapımının gerekli olduğu durumlar, tünel güvenliğinin sağlanması, tünel aydınlatmasının özel durumları ve aydınlatma tasarım kriterleri üzerinde durularak kurp eksenli tünellerden bahsedilmiştir.

4. Bölümde tünel aydınlatma tasarımının yapıldığı lineer eksenli ve kurp eksenli olmak üzere iki farklı tünel örneğinden bahsedilerek tünel yapılarındaki farklılıkların aydınlatma tasarımlarında güvenli sürüş için yapılması gereken koordinat ve açısız değişimlerin simülasyon çıktılarına etkilerinden bahsedilmiştir.

Aşamalı aydınlatma kavramı sürücü ya da operatörlerin görme yetisini olumlu yönde etkilemektedir. Tünellerin aydınlatma tasarımı yapılırken CIE tarafından 1990 itibariyle düzenlenmiş olan ve günümüzde de revize hali bulunan kılavuz dikkate alınmaktadır (CIE NO 88, 1990). Karayolları ve demiryollarında sıklıkla kullanılan tünel yapılar mevcut olup; bu yapılar sayesinde mesafeler kısalabildiği gibi, tırmanma deşerlerinde de (tırmanma eğimi) optimumluk sağlanabilmektedir. Kullanılan tünellerin geometrik yapıları lineer ve kurp eksenli (viraj eğimli) olabilmektedirler. Burada tüneller için aydınlatma esasları üzerinde durularak örnek aydınlatma tasarımları ele alınmaktadır. Bu tasarımlar lineer yapılı tüneller için olduğu gibi kurp eksenli tüneller için de çalışma içerisinde ele alınmış ve aydınlatma kalitesi bakımından değerlendirilmiştir. Aydınlatma esaslı yapılan bu değerlendirmelerde; aydınlatma düzeyleri, aydınlatma dağılım katsayıları, parıltı etkileri ve zebra etkileri ele alınarak yorumlanmaktadır.

Kurp eksenli tüneller için yapılan aydınlatma tasarımlarında, kurpun iç çapına yakın olan eksenlerde daha az armatür kullanımının gerektiği, kurpun dış çapına yakın olan eksenlerde ise daha fazla armatür kullanımının gerektiği anlaşılmıştır. Zebra etkisinden daha az etkilenilmesi bakımından, gündüz şartlarında ve gece şartlarında yapılması gereken aydınlatma tasarımlarının farklılıklar arz ettiği görülmüştür.

### **1.1. Literatür Taraması**

Karayolu, demiryolu ve tünel esaslı aydınlatma kapsamında gerçekleştirilen bilimsel çalışmalar ele alındığında;

Cengiz M. S.'nin 2019 yılında gerçekleştirdiği çalışmasında tünel aydınlatmasında oluşan kirlenme ve yıpranma faktörlerinin aydınlatma düzeylerine etkileri üzerlerinde

durmuştur.

Büyükkınacı, B. (2008) yüksek lisans tezinde yol aydınlatmasında tasarımın temelini oluşturan fotometrik büyüklüklerden bahsetmiş, hesap parametrelerinin uygulamada nasıl kullanılacağı üzerinde durmuştur. Ayrıca aydınlatma sisteminin otomasyon sistemiyle entegre edilmesiyle kontrol mekanizmasının kullanım kolaylığı açısından öneminden bahsedilmiştir.

(Zhang vd., 2019) yaptıkları araştırmada dış ortamdan tünele girildiğinde ani kararına sebebiyle oluşacak anlık görme kayıplarına değinerek, gün ışığından tünele giriş esnasında ışık optimizasyonunun sağlanabilmesi için DIALux simülasyonu üzerinde çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalarda yardımcı aydınlatma sistemleri, ayarlanabilir karartma yöntemi ve yansıtıcı işaretlerden faydalanılmıştır.

(Chen vd., 2020) yaptıkları çalışmada tünel aydınlatmasında doğal ışıktan faydalanmanın önemine değinerek, bu durumun tünel aydınlatmasında kullanılan LED sayısını azaltacağını öngörerek tünel giriş ve çıkışlarında gün ışığından faydalanmayı esas alarak DIALux simülasyonunda uygulamalar yapmıştır. Ayrıca LED armatürlerin parlaklıklarının ayarlanabilir olmasının sürüş güvenliği açısından faydalı olacağı belirtilerek kullanılan armatür dizilişinin önemli olduğu vurgulanmıştır. Uygun yerleştirilmeyen LED'lerin sürücü ve yolcular için zebra etkisi yapabileceği anlatılmıştır.

(Su vd., 2022) aydınlatma optimizasyonunun tünel güvenliğine olan olumlu etkisi üzerinde durarak uygun parıltıyı sağlamak üzere LED armatürlerin bölgelere ayrılarak adres atanması, kendine ait adresi bulunan her bir armatüründe kontrol ve bakım kolaylığı sağlayacağından bahsedilmiştir.

(İmal ve Taşkan, 2016) yapılan çalışmada yol aydınlatmasında aydınlatma seviyesi kadar önem taşıyan flicker etkisinin canlılar üzerindeki olumsuz etkisinin engellenmesi amacıyla armatür direklerinin sahip olduğu açıklıkların belirlenmesiyle ışık dağılımının güvenli düzeyde tutulması amaçlanmıştır.

(Jianyou vd., 2021) yapılan çalışmada tünel içerisinde simetrik olarak yerleştirilen armatürlerin yola ve diğer armatürlere göre olan açılarında yapılan değişikliğin tünel ortamındaki görüş konforuna olan etkisi DIALux simülasyonu ile incelenmiştir.

## **1.2. Tezin Amacı ve Yapısı**

İnsanların birbirleriyle ve yakın çevresiyle iletişim kurabilmesi duyu organlarıyla verdiği ilk tepkiyle başlar. Görme olayı da iletişimin ilk adımı olarak tanımlanabilir. Işığın göze

gelmesi görme olayını başlatır. Ağ tabakaya ulaşan ışık biyolojik ve kimyasal tepkiler ortaya çıkarır. Bu tepkiler insan beynindeki görme merkezine iletilir. Burada yorumlanan tepkiler insanda algı oluşmasını sağlar, bu olaya görme denir. Işık görme olayının en önemli unsurlarındandır. Aydınlatma tasarımının iyi yapılmasıyla görme yeteneğinde belirgin artış sağlanır. Göz sağlığına olumlu etkisi vardır. Aydınlatmanın iyi olduğu ortamlarda kaza riski azalır, güvenliğin sağlanması kolaylaşır, iş hacmi ve verimi artar. Aydınlatma tasarımı mühendislik ve mimarlık faaliyetlerinin birlikte yürütülmesiyle yapılmalıdır. Öyle ki aydınlatma sadece temel ihtiyaçların karşılanması amacıyla değil özel istekler ve olağan dışı durumlarda da faaliyetlerin sürdürülebilmesi için zorunlu bir ihtiyaç haline gelmiştir.

Bu çalışmada, ışık ve görme kavramlarının bir bütün olarak düşünüldüğü aydınlatma konusunun yol ve tünellerdeki özel uygulamalarını incelenmiştir.

## 2. AYDINLATMANIN TEMEL KAVRAMLARI

Karayolu ve demiryolları taşıtlarını kullanan sürücülerin emniyetli seyir halini sürdürebilmesi için önlerinde uzanan yolu gerekli tüm detaylarıyla görebilmeleri gerekmektedir. Günümüzde yüksek hızlarda seyahat etmeye elverişli yolların yapılması, bu yollara uygun karayolu ve demiryolu taşıtlarının teknolojik gelişmelerden etkilenmesi görme olayının daha hızlı ve güvenilir sağlanması gerekliliğini beraberinde getirmiştir.

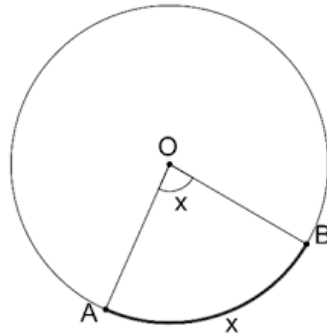
Taşıtların sürücülerinin görüşünü seyir halindeyken etkileyen pek çok parametre bulunur. Trafikteki diğer taşıtlar, yolcular, yayalar, çevredeki ışık yayan cisimler gibi. Ayrıca meteorolojik etkenlerde sürücünün görüş kalitesini doğrudan etkilemektedir. Yağışlı bir havada yol örtüsünün ayna gibi davranarak yansıtma yapması bu durumun da sürücülerin trafik güvenliğini olumsuz etkilediği bilinmektedir.

### 2.1. Fotometrik Büyüklükler

Bu bölümde yol ve tünel aydınlatmasında hesaplama ve tasarım yaparken kullanılacak olduğumuz fotometrik kavramlardan bahsedilmiştir.

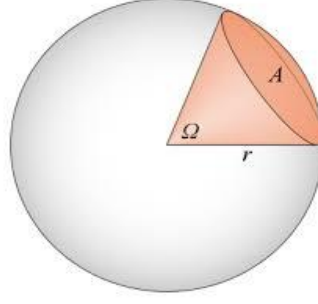
#### 2.1.1. Düzlem açısı ve uzay açısı

Düzlem açısı, başlangıç noktaları aynı doğrultuları farklı olan iki doğru parçası arasındaki açı olarak tanımlanabilir. İki doğru parçasının arasında kalan yay uzunluğunun yarıçapa bölünmesiyle ifade edilir birimi radyandır. Bir noktaya ait düzlemsel açı  $2\pi$  radyandır Şekil 2. 1' de düzlemsel açı gösterilmiştir (Özkaya, M., 2004).



Şekil 2.1. Düzlem açısı

Uzay açısı ise başlangıç noktaları aynı olan doğru parçalarının koni, üçgen piramit benzeri uzay parçası meydana getirmesiyle oluşur. Steradyan (SR) ile ifade edilir. Uzayda bir noktanın sahip olduğu uzay açısı  $4\pi$  steradyandır. Şekil 2. 2' de uzay açısı gösterilmiştir.



**Şekil 2.2.** Uzay açısı

### 2.1.2. Işık akısı

Bir kaynağa ait akının tanımı; aydınlıkta gözün görüşüne ait spektral duyarlık grafiğine göre ele alınan enerji akısıdır. Işık akısı  $\Phi$  harfiyle ifade edilir. Birimi ise lümen (lm)'dir (Özkaya, M., 2004).

$$\Phi = K_0 \cdot F \cdot V_\lambda \quad (2.1)$$

F enerji akısı,  $K_0$  enerji akısının fotometrik eşdeğeri,  $V_\lambda$  ise spektral duyarlılık olarak ifade edilir.

### 2.1.3. Işık şiddeti

Kaynak tarafından üretilen ışığın akısının farklı yoğunluklarda görülmesi mümkündür. Işık şiddeti her bir doğrultuda görünen ışınım büyüklüğü olarak tanımlanır.

Doğrultuya bağlı olarak değişkenlik gösteren ışık şiddetinin birimi kandela (cd) olmakla birlikte I harfi ile ifade edilir. Işık şiddeti matematiksel olarak:

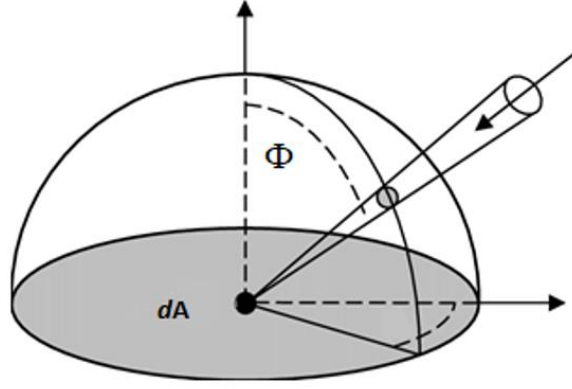
$$I_\alpha = \lim_{\nabla\Omega_\alpha \rightarrow 0} \frac{\nabla\Phi}{\nabla\Omega_\alpha} = \frac{d\Phi}{d\Omega_\alpha} \quad (2.2)$$

Formülüyle gösterilmektedir (Özkaya, M., 2004).

### 2.1.4. Aydınlık düzeyi

Birim yüzey alanına düşen ışık akısının dik bileşeni olarak ifade edilir. E harfi ile gösterilir. Birimi lux' tür.

$$E = \lim_{\nabla S \rightarrow 0} \frac{\nabla\Phi}{\nabla S} = \frac{d\Phi}{dS} \quad (2.3)$$



**Şekil 2.3.** Aydınlik düzeyi belirlemede kullanılan parametreler

Işık kaynağının dik bileşeni ile hesaplamada referans alınan düzlem arasındaki uzaklık olarak seçilirse, düzlem üzerinde seçilen herhangi bir P noktasının aydınlık düzeyi;

$$E_p = \frac{I}{d^2} \quad (2.4)$$

şeklinde ifade edilir.

### 2.1.5. Parıltı kavramı

Yüzeyde görülen parlaklığın ölçüsüne parıltı denir. L harfi ile gösterilen parıltı değerinin birimi ise  $cd/m^2$ 'dir. Parıltı ölçümü yüzeyin belirli bir gözlem noktasından sabit bir nokta için yapıldığından hesaplamalarda yer bilgisinin mutlaka doğru bir biçimde belirtilmesi gerekmektedir. Aydınlik düzeyi, parıltı ve yansıtma faktörü arasındaki ilişki;

$$L = \frac{\rho \cdot E}{\pi} \quad (2.5)$$

ile ifade edilir.

### 2.1.6. Kontrast

Görme olayının temelini cisimlerin aydınlık ve karanlık olarak algılanabilmesi oluşturur. Buna bağlı olarak bir ortamda görülen renk veya parıltı değişimlerine kontrast denilmektedir. Bu tanımda ifade edilen renk veya parıltıdan oluşan kontrast genellikle birlikte meydana gelmektedir. Kontrastı oluşturan iki farklı alana ait parıltıları  $L_f$  fon parıltısı ( $cd/m^2$ ) ve  $L_c$  cisim parıltısı ( $cd/m^2$ ) olarak gözün adaptasyon sağladığı parıltı ifadesi de  $L_A$  ile ifade edecek olursak; Birbirine komşu olan iki bölgenin birbirine göre bağıl kontrast farkı aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir (Sucugil, R.M., 2000).

$$L_A = L_f - L_c \quad (2.6)$$

### **2.1.7. Kamaşma**

Görme eylemini sorunsuz gerçekleştiren duyu organının ani gelişen dış etkenlerle görme yetisini geçici olarak kaybetmesine kamaşma denir. Görme alanındaki parıltının çok büyük değere çıkmasıyla oluşan kamaşmaya” Direkt Kamaşma”, ışık kaynağının dolaylı yoldan etki etmesiyle oluşan kamaşmaya” Endirekt Kamaşma” denir.

Yol aydınlatmasında görülen, fizyolojik açıdan görme yetisinde kayba yol açmayan anlık görme konforu kayıplarına sebep olan kamaşma; psikolojik kamaşma olarak, görme yetisini olumsuz etkileyecek hasarlara sebep olabilen kamaşma ise fizyolojik kamaşma olarak adlandırılır (Büyükkıncı, B., 2008).

### **2.1.8. Adaptasyon**

Gözün, farklı aydınlık seviyelerinde oluşan farklı düzeydeki parıltılara uyabilme yeteneğine adaptasyon denir. Aydınlık bir ortamdan karanlık ortama girildiğinde oluşan karanlık adaptasyonudur. Karanlık bir ortamdan aydınlık ortama geçişte oluşan ise aydınlık adaptasyonu olarak adlandırılır.

Aydınlık adaptasyonunun sağlanması hızlı olduğu için aydınlatma ortamında özel bir hazırlığa gerek duyulmazken, karanlık adaptasyonu için özel aydınlatma tasarımları günümüz koşullarında gereklilik haline gelmiştir.

## **2.2. Aydınlatma Tasarımında Kullanılan Hesap Parametreleri**

Kaliteli aydınlatmaya sahip olan yolların aydınlatma tasarımında en fazla tercih edilen yöntem parıltı yöntemidir. Bu yöntemdeki amaç; yolun yüzeyini aydınlık, üzerindeki cisimleri ise karaltı olarak algılanmasını sağlamaktır. Ayrıca kamaşmayı da kontrol altına almak amaçlanmıştır (CIE Pub 115, 1995).

### **2.2.1. Yolun yansıtma özellikleri**

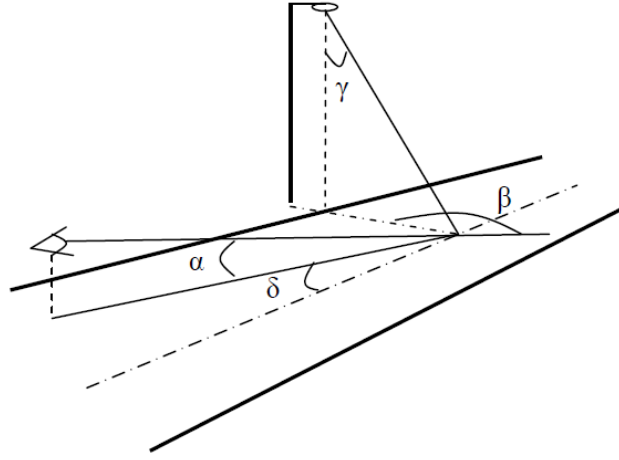
Parıltının oluşumu sadece ışık yayan yüzey veya alanlarda değil aynı zamanda ışığın yansıdığı karanlık alanlarda da gerçekleşebilir. Yol yüzeyi bu duruma örnektir. Yol yüzeyinin yansıtma ile ilgili davranışlarını bilmek aydınlatma tasarımı için oldukça önemlidir. Yol yüzeyine ait yansıtma karakteristikleri:

- Yolun yüzey yapısı
- Yolu oluşturan fiziksel özellikler
- Yolun ne kadar süredir kullanımda olduğu bilgisi

- Düşen ışının açısal özellikleri gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterirler.

Tasarımda ele alınan yol yüzeyinin yansıtma özellikleri; bir noktadaki parıltı değerinin yatay aydınlık düzeyine oranıyla ve belirlenmiş olan parıltı faktörüyle ifade edilir.

$$q(\alpha, \beta, \gamma, \delta) = \frac{L}{E_y} \quad (2.7)$$



**Şekil 2.4.** Parıltının belirlenmesinde kullanılan açılar

**Kaynak:** (Büyükkınacı, 2008)

Parıltı metoduna göre yolun 60-160 m'lik bölümünün hesaplanmaya dahil edilmesi yeterli görülmüştür. Yapılan ölçümler neticesinde 0,5-1,5 derece aralığındaki parıltı faktörü bulunurken  $\alpha=1$  olarak kabul edilmektedir. Gözlemcinin uzaklığının 60 m'den daha büyük olduğu durumlarda ise 0 ila 20 derece arasında değişen  $\delta$  açısı; sürücünün yolun ortasında seyir ettiği düşünülerek ihmal edilebilir (Büyükkınacı, B., 2008).

Bu tanımlamalardan parıltı faktörü değerini ( $q$ );  $\beta$  ve  $\gamma$  açılarının bir fonksiyonu olarak kabul edebilmek mümkündür.

$$E_{yatay} = (I/h^2) \cdot \cos^3 \gamma \quad (2.8)$$

Denklemine bağlı olarak yol üzerindeki herhangi bir noktanın parıltısı:

$$L = q \cdot E_{yatay} = (q \cdot I \cdot \cos^3 \gamma) / h^2 = r \cdot I / h^2 \quad (2.9)$$

$I$ , kullanılan armatürün hesaplama yapılan noktaya yansıttığı ışığın şiddetini,  $h$  hesaplamada kullanılan armatürün montaj edildiği yüksekliği,  $r$  parıltı faktörünün indirgenmiş halidir.

$$r = q \cdot \cos^3 \gamma \quad (2.10)$$

Uluslararası Aydınlatma Komisyonu'nun tasarımında kullanılacak hesaplamalar için kuru yolları yansıtma niteliklerine göre sınıflandırmıştır. Öncelikli sınıflandırma R1, R2, R3, R4 şeklinde dört yol yüzeyi için yapılmıştır, sonrasında ise bu sınıfların ara bölgelerinde kalan yansıtma değerlerine sahip olan kuru yollar için C1 ve C2 sınıfları belirlenmiştir.

CIE, yol aydınlatmasında yağışlı koşulların olması durumunu 1979 yılında çıkarmış olduğu 47 sayılı yayında ele almıştır. Bu yayında ıslak koşullar için W1, W2, W3, W4 yansıtma koşulları belirlenmiştir. Uygulamada en olumsuz koşulların beklentisi W4 sınıfından daha kötü koşullarda olamayacağı düşünülerek tasarıma referans olarak W4 sınıfının kullanılması kararlaştırılmıştır (CIE Pub 47, 1979).

### 2.2.2. Ortalama parıltı düzeyi ( $L_{ort}$ )

Her bir noktadaki parıltı değerinin toplamının referans alınan nokta sayısına oranı olarak bilinir. Sadece gözlemcinin bulunduğu şeritte bulunan noktalar için hesap yapılmaz. Değerler yolun tamamından alınarak hesaplama yapılır. Yolun orta şeridi takip edilerek farklı noktalar için değerler elde edilir. Bulunan değerlerin en küçük olanı hesaplama yapılan yolun ortalama parıltısını gösterir.

Uygulamada kullanılan armatürlerin, yolun belirli bölgesinde meydana getireceği parıltı; o bölgedeki yatay aydınlık düzeyinin değerine ve yolun sahip olduğu yansıtma özelliklerine bağlı olarak aşağıdaki gibi gösterilir.

$$L = \Sigma q((I \cdot \cos^3 \gamma)/h^2) = \Sigma I \cdot r/h^2 \quad (2.11)$$

$\Sigma$ ; Tüm ışık kaynaklarından gelen değerlerin toplanacağını

$q$ ; Seçilen noktadaki parıltı faktörünü ( $\text{cd/m}^2/\text{lux}$ )

$r$ ; Seçilen noktadaki indirgenmiş parıltı faktörünü

$I$ ; Seçilen nokta doğrultusundaki ışık şiddetini

$h$ ; Işık kaynağının yoldan olan yüksekliğini (m)

$\gamma$ ; Her ışık kaynağının düşey ile arasındaki açıyı ifade eder.

### 2.2.3. Ortalama parıltı düzgünlüğü ( $U_o$ )

Yol üzerinde en düşük parıltıya sahip hesap noktasının tüm noktaların parıltı ortalamasına oranıdır (CIE Pub 140, 2000).

$$U_o = L_{min}/L_{ort} \quad (2.12)$$

Formülüyle ifade edilir.

Yolun orta şeridinde bulunan her gözlemci için tek tek hesaplanarak en küçük değer seçilir. Parıltının düzgün olmasının görüş konforu üzerindeki olumlu etkilerinin yanı sıra psikolojik faydaları da vardır. Bu sebeple ortalama parıltı düzgünlüğü iyi olan tesisat seçilmelidir.

#### **2.2.4. Boyuna parıltı düzgünlüğü ( $U_L$ )**

Yol üzerinde en düşük parıltıya sahip hesap noktasının en yüksek parıltıya sahip hesap noktasındaki değere oranıdır (CIE Pub 140, 2000).

$$U_L = L_{min}/L_{max} \quad (2.13)$$

#### **2.2.5. Bağlı eşik artışı ( $TI$ )**

Işık kaynağından kaynaklanan mutlak kamaşmanın sürücüyeye yol açtığı görme zorluğudur.

$$TI = (\Delta L_k - \Delta L_e) / \Delta L_e \quad (2.14)$$

$TI$ ; bağlı eşik artışı

$\Delta L_k$ ; parıltı eşiği

$\Delta L_e$ ; kamaşma olmadığındaki eşik

#### **2.2.6. Çevre aydınlatma oranı ( $SR$ )**

Sürüş esnasında cisimlerin görülebileceği kadar kontrasta sahip olması yol aydınlatmasıyla sağlanır. Yol üstündeki virajlar, yol kotuna göre yüksekte veya alçakta bulunan yapı elemanları gibi unsurların da aydınlatma tasarım planı dahiline alınması sürüş güvenliği açısından önemlidir. Aydınlatma tasarımı yapılan yolun, kaldırıma yakın olan kısmının 5m'lik bölümünün aydınlık düzeyi ortalamasının, yolun iç tarafına yakın olan 5m'lik kısmının aydınlık düzeyi ortalamasına olan oranına çevre aydınlatma oranı denir.

Aydınlatma tasarımı yapılan yolda bulunan kaldırımlar CIE 115'te belirtilmiş olan standartlara uygun tasarıma sahipse  $SR$  oranının incelenmesine gerek yoktur (Büyükkınacı, B., 2008).

#### **2.2.7. Görsel kılavuzlama**

Yolların aydınlatılmasında görsel kılavuzlama; ışık vasıtasıyla sürücüyeye yolun ilerleyen kısımlarıyla alakalı ipucu vermek olarak nitelendirilebilir. Yol ayrımı, tali yol birleşimi,

yaklaşan kavşaklar, keskin virajlar, sisli ve yağışlı hava koşulları gibi sürüş konforunu kısıtlayan durumlarda, iyi kılavuzlama konfor ve güvenliği artırır. Kılavuzlama işleminin; armatürleri refüj olan bölgelerde refüj ortasına dahil ederek, virajlı yollarda ise virajın dış kısmındaki bölgelere yerleştirilerek yapılması durumunda iyi sonuçlar elde edilebilir (Büyükkınacı, B., 2008).

**Tablo2.1.** CIE’ ye göre yolların aydınlatma sınıfları

<b>Yolun Tanımı</b>	<b>Aydınlatma Sınıfı</b>
Bölünmüş yollar, ekspres yollar, otoyollar, (otoyola giriş ve çıkışlar, bağlantı yolları, kavşaklar, ücret toplama alanları) Trafik yoğunluğu ve yolun karmaşıklık düzeyi; Yüksek Orta Düşük	M1 M2 M3
Devlet yolu ve il yolları (tek yönlü veya iki yönlü; kavşaklar ve bağlantı noktaları ile şehir geçişleri ve çevre yolları dahil) Trafik kontrolü ve yol kullanıcılarının tiplerine göre ayrımı; Zayıf İyi	M1 M2
Şehir içi ana güzergahlar (bulvarlar ve caddeler), ring yolları, dağıtıcı yollar Trafik kontrolü ve yol kullanıcılarının tiplerine göre; Zayıf İyi	M2 M3
Şehir içi yollar (yerleşim alanlarına giriş çıkışın yapıldığı ana yollar ve bağlantı yolları) Trafik kontrolü ve yol kullanıcılarının tiplerine göre ayrımı; Zayıf İyi	M4 M5

**Kaynak:** (Büyükkınacı,2008)

### 2.2.8. Uluslararası kuruluşlara göre yol aydınlatma kalitesi

Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (CIE) tarafından 1995 yılında yayınlanan 115 numaralı yayında; motorlu taşıt ve yaya trafiği için yol aydınlatma önerilerinde bulunulmuştur. Bu öneriler; yolun ne amaçla kullanıldığına, trafik akış yoğunluğuna, bağlantı yollarının yerlerine, sinyalizasyon sisteminin konumlandırılmasına bağlı olarak M1-M5 arası sınıflandırılmıştır. Söz konusu sınıflandırma Şekil 2.5’te gösterilmiştir.

Aydınlatma sınıfının belirlenmesine yönelik 2008 yılında CIE tarafından yapılan öneride; Aşağıdaki formül kullanılarak yol aydınlatma sınıfının bulunabileceği belirtilmiştir.

Sonucun tam sayı olarak bulunamaması durumunda ondalık sayıyı yuvarlayarak elde ettiğimiz değer kullanılmaktadır.

**Tablo2.2.** CIE' ye göre trafik için yol parıltısına bağlı aydınlatma sınıflarının kalite kriterleri

Aydınlatma sınıfı	$L_0$ (cd/m <sup>2</sup> )	$U_0$	$U_L$	TI (%)
M1	$\geq 2.0$	$\geq 0.4$	$\geq 0.7$	$\leq 10$
M2	$\geq 1.5$	$\geq 0.4$	$\geq 0.7$	$\leq 10$
M3	$\geq 1.0$	$\geq 0.4$	$\geq 0.5$	$\leq 10$
M4	$\geq 0.75$	$\geq 0.4$		$\leq 15$
M5	$\geq 0.5$	$\geq 0.4$		$\leq 15$

**Kaynak:** (Büyükkınacı,2008)

**Tablo2.3.** Türkiye'deki yolların aydınlatma sınıfları

Yolun Tanımı	Aydınlatma
Şehir bağlantıları ve çevre yolları (tek veya iki yönlü, kavşaklar ve bağlantı noktaları ile şehir geçişleri dahil) -Hız $\geq 90$ km/h; -Hız $< 90$ km/h	M1 M2
Şehir içi ana güzergahlar (bulvarlar ve caddeler; ring yolları, dağıtıcı yollar) -50 km/h $\leq$ Hız $< 90$ km/h; 3 km'den kısa aralıklarla kavşak, yonca ayrımı var; -50 km/h $\leq$ Hız $< 90$ km/h; 3 km'den kısa aralıklarla kavşak, yonca ayrımı yok;	M1 M2
Şehir içi yollar (verleşim alanlarına giriş çıkışın yapıldığı yollar ve bağlantı yolları) -Hız $\geq 50$ km/h; 3 km'den kısa aralıklarla kavşak, yonca var; -Hız $\geq 50$ km/h; 3 km'den kısa aralıklarla kavşak, yonca yok; -Hız $< 50$ km/h; 3 km'den kısa aralıklarla kavşak, yonca var; -Hız $< 50$ km/h; 3 km'den kısa aralıklarla kavşak, yonca yok;	M3 M4 M4 M5
Yerleşim bölgelerindeki yollar -30 $\leq$ hız $< 50$ km/h; suç oranı yüksek, -30 $\leq$ hız $< 50$ km/h; suç oranı normal, -Hız $< 30$ km/h; suç oranı yüksek, -Hız $< 30$ km/h; suç oranı yüksek;	M4 M5 M5 M6

**Kaynak:** (Büyükkınacı,2008)

M=6-AFT

M; Yol aydınlatma sınıfı

AFT; Ağırlık faktörü terimi

**Tablo 2.3.** Aydınlatma sınıfı parametreleri

Parametre	Seçenekler	Ağırlık Faktörü (AF)	Seçilen AF
Hız	Yüksek	1	1
	Orta	0	
Trafik yoğunluğu	Çok yüksek	1	1
	Yüksek	0.5	
	Orta	0	
	Düşük	-0.5	
	Çok düşük	-1	
Trafik düzeni	Yüksek oranda motorlu olmayan trafik ile karışık	1	1
	Karışık	0.5	
	Yalnızca motorlu araç	0	
Yol refüj ile ayrılmış mı	Hayır	1	0
	Evet	0	
Kesişme yoğunluğu	Yüksek	1	0
	Orta	0	
Park etmiş araç	Var	1	0
	Yok	0	
Çevre aydınlatması	Çok yüksek	1	0,5 0,5
	Yüksek	0.5	
	Orta	0	
	Düşük	-0.5	
	Çok düşük	-1	
Görsel Kılavuzlama / trafik kontrolü	Zayıf	0.5	0
	İyi	0	
	Çok iyi	-0.5	
Ağırlık Faktörlerinin Toplamı (AFT)			4
Yol sınıfı			M2

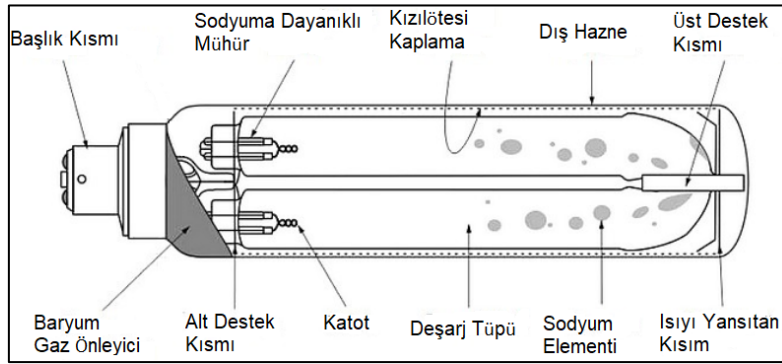
**Kaynak:** (Büyükkıncı,2008)

### 2.3. Yolun Aydınlatılmasında Kullanılan Armatürler

Günümüzdeki teknolojik gelişmelerle birlikte, yol aydınlatmasında fazla kullanım alanına sahip olan; alçak basınçlı sodyum lambalar, yüksek basınçlı sodyum lambalar ve metal halojen lambalar yerlerini gündün güne ekonomik verimlilik ve ömür açısından çok daha avantajlı olan LED (light-emitting diode) lambalara bırakmaya başlamıştır.

### 2.3.1. Alçak basınçlı sodyum buharlı lambalar

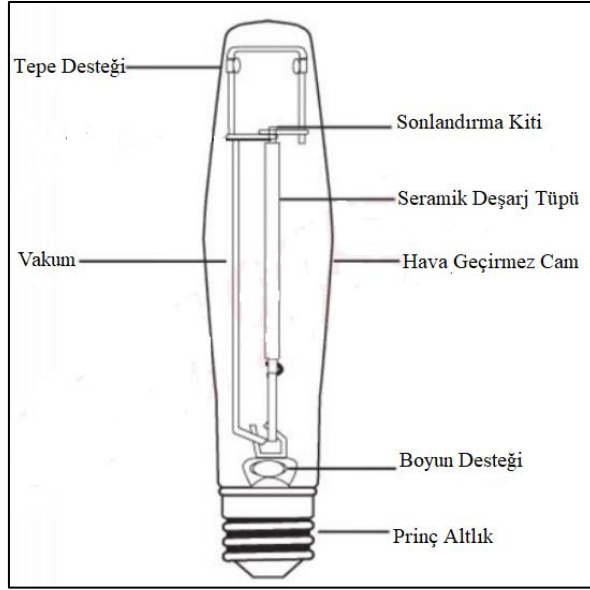
Alçak basınçlı sodyum buharlı lambalar içerisinde bulunan gaz sebebiyle çalışmaya başladığı esnada pembe, sonrasında ise turuncuya doğru evrilen ışık yayarlar. Etkinlikleri 100-192 lm/w arasındadır. Ekonomik ömürleri ortalama 15000-16000 saat arası değişmektedir. Çalışma prensipleri gereği trafo ve kapasitör gibi yardımcı devre elemanlarına ihtiyaç duyulur. Gelişen teknolojiyle birlikte yaygın kullanımını yitirmeye başlamıştır.



Şekil 2.5. Alçak basınçlı sodyum buharlı lamba

### 2.3.2. Yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalar

Alçak basınçlı sodyum buharlı lambalarda bazı teknik iyileştirmeleri yapılmasıyla piyasaya sürülen çalışma prensibi hemen hemen aynı olan lambalardır. Lambada bulunan deşarj tüpündeki sodyum gazına cıva ve ksenon eklenir. Ksenonun eklenme amacı kolay ateşleme özelliği olmasıdır. Cıva ise tüpteki direncin ayarlanmasına bu sayede gerilimin istenen düzeyde tutulmasına yardımcı olur. Boyutları alçak basınçlı sodyum buharlı lambaya göre daha küçüktür. Etkinlikleri 85-135 lm/w arasındadır. Renksel olarak geriveriminin çok iyi olduğu söylenemez. Bu tür lambaların çalışması için yardımcı devre elemanı olarak; balast, ateşleyici ve kapasitör gereklidir.



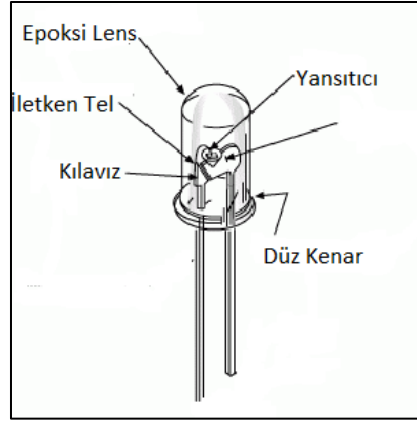
**Şekil 2.6** Yüksek basınçlı sodyum buharlı lamba

### **2.3.3. Metal halide lambalar**

Yapısında argon gazı, cıva ve metal halojenürler bulunur. Yüksek basınçlı cıva buharlı lambalara oranla içerisinde bulunan cıva buharının basıncı daha fazladır. Yapısında bulunan cıva kullanımda etrafa ultraviyole ışınım yapmasına sebep olur. Bu durumun zararını aza indirmek için kullanılan lambaya özel filtreleme yapılması önerilir. Renksel geriverim olarak cıva ve sodyum buharlı lambalardan oldukça iyidir. Bu sebeple pek çok alanda kullanımı mevcuttur. Deşarj süreleri dış ortamda tercih edilmeyecek kadar düşük olsa da renksel geriverimin çok önemsendiği ortamlarda tercih edilebilmektedirler.

### **2.3.4. LED ışık kaynakları**

LED'ler yarı iletken malzemelerin bir araya gelmesiyle oluşurlar. Çalışma prensibi n tipi yarı iletken malzeme ile p tipi yarı iletken malzemenin akım verilerek birbirine kenetlenmesi ile ışık yaymasıyla açıklanabilir. Oluşan ışığın rengi kullanılan yarı iletkenin çeşidine göre değişmektedir. Aynı şekilde ışığın şiddetini de kullanılan yarı iletkenin çeşidine bağlı olarak değiştirebilmek mümkündür.



**Şekil 2.7.** Işık yayan diyot temel yapısı

Günümüzdeki teknolojik gelişmelerle birlikte yol aydınlatmasında oldukça fazla kullanıma sahip olan alçak basınçlı sodyum lambaları, yüksek basınçlı sodyum lambalar ve metal halojen lambalar yerini günden güne LED (light emitting diode) lambalara bırakmaya başlamıştır. LED lambaların tercih edilme oranının artma nedenleri; Kullanım ve ekonomik ömrünün uzun olması, yüksek etkinliğe sahip birçok renk seçeneğiyle kullanım imkânı, enerji sarfiyatının genel anlamda diğer türdeki lambalara oranla daha ekonomik olması, dekor amaçlı kullanımlarda oldukça estetik görünüm vermesi olarak sıralanabilir.

**Tablo 2.4.** Lamba çeşitlerinin elektriksel karakterleri

Lamba Tipi	Güç (Watt)		e (lm/watt)	Ömür(saat)
Enkandesan	15	500	10	1000
Tungsten Halojen	20	2000	20	2000
Flüoresan	9	65	90	8000
Cıva	50	2000	55	8000
Metal Halojen	35	2000	85	6000
Alç. Bas. Sod.	18	180	200	10000
Yük. Bas. Sod	35	1000	138	12000
Endüksiyon	55	85	70	60000
LED	0,2	0,6	200	>50000

### **3. YOL VE TÜNEL AYDINLATMASI**

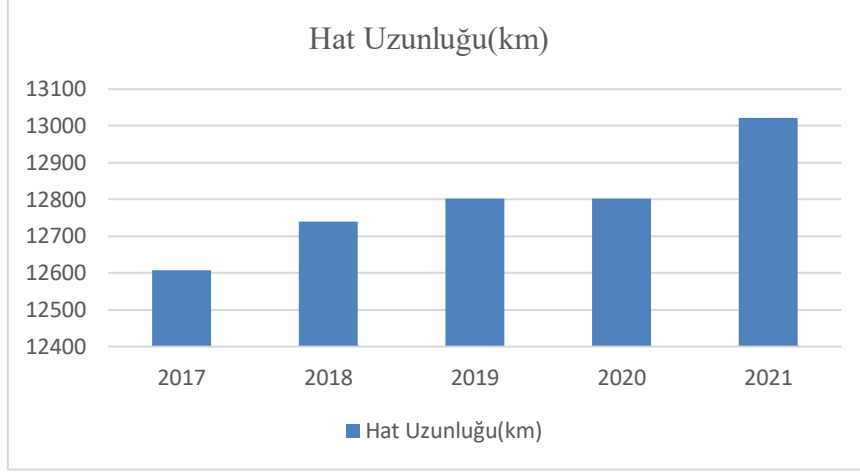
İnsanların ve diğer varlıkların belli bir amaç doğrultusunda yer değiştirme eylemine ulaşım denilmektedir. Bu amacın yerine getirilmesi işlemine ise ulaştırma adı verilir. Ulaştırma konusunu en genel haliyle kara, su, hava ve boru hatları ulaştırması olarak inceleyebilmek mümkündür. Çalışmamıza konu olan kara ulaştırması; karayolu ulaştırması ve demiryolu ulaştırması olmak üzere iki bölümde incelenmektedir.

#### **3.1. Demiryolu Ulaşımı**

Madeni bir yol üzerinde mekanik güçle hareket ettirilen araçlarla yolcu ve yük taşıma işlerinin yapıldığı tesisin tümüne demiryolu adı verilir.

##### **3.1.1. Demiryolunun ülkemizdeki tarihçesi**

Madeni bir yol üzerinde mekanik güçle hareket ettirilen araçlarla yolcu ve yük taşıma işlerinin yapıldığı tesisin tümüne demiryolu adı verilir. Osmanlı Döneminde demiryolu ilk olarak 1854 yılında Kahire-İskenderiye arasında yapılmıştır. Ülke sınırlarımızda bulunan demiryollarının yapımına 23 Eylül 1856 yılında 130 km'lik İzmir-Aydın Demiryolu hattının tamamlanmasıyla başlanmıştır. Osmanlı Dönemi'nde Nafia Nezareti tarafından yönetilen demiryolları, 24 Eylül 1872 tarihinde de demiryolu yapım ve işletmesini gerçekleştirmek üzere Demiryolları İdaresi'nin idaresine bırakılmıştır. Osmanlı Döneminde toplam 8.619 km uzunluğunda demiryolu hattı yapılmıştır. Günümüzde ise Ulaştırma Bakanlığı'na bağlı Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları bünyesinde demiryolu yapım, bakım ve modernizasyon işleri yürütülmektedir. 2003 yılında Ankara-İstanbul Yüksek Hızlı Tren Hattının yapımına başlanmış olup sırasıyla; Sincan-Eskişehir, Ankara-Eskişehir, Polatlı-Konya, Ankara-Konya, Eskişehir-Pendik etapları tamamlanmıştır. Ülkemizde gerçekleşen yük taşımacılığının yaklaşık %5'i, yolcu taşımacılığının ise yaklaşık olarak %3'ü demiryollarıyla gerçekleşmektedir (TCDD, 2022).



**Grafik 3.1.** Ülkemizdeki demiryolu hat uzunluklarının son 5 yıldaki değişimi  
**Kaynak:** (TCDD, 2022)

### 3.1.2. Demiryolu ulaşım sistemlerinde aranan nitelikler

Ulaştırma esnasında yolcu veya yükün herhangi bir zarar görmeden güvenli şekilde taşınması en önemli ilke olan güvenlik ilkesiyle açıklanır. Taşınmakta olan yolcu ya da yükün belirtilen sürede bir yerden başka yere götürülebilmesi demiryolu ulaşımının düzenlilik özelliğinin gereğidir. Düzenlilik koşulunun sağlanabilmesi için sürüşün şartların elverdiği düzeydeki hızda yapılması gerekir. Yolcu taşımacılığında seyahat eden için gerekli konfor sağlanmalı, gerçekleştirilen yolculuk mümkün olan en ekonomik şekilde gerçekleştirilmelidir.

### 3.1.3. Demiryolu ulaşım sistemlerinin avantajları

Toplu taşımacılığın daha ekonomik olmasını sağlar. Büyük kütlelerin ve kalabalık kitlelerin taşınması için uygundur. Hız, konfor, güvenlik, düzen koşullarını bir arada sunan en önemli ulaşım seçeneğidir. Çevreye verdiği zarar diğer ulaşım türlerine göre daha azdır. Tüm bu olumlu yönlerinin yanında işletme maliyetlerinin yüksek olması ve işletmedeki hatta değişim yapmanın oldukça masraflı olması olumsuz yönleri olarak gösterilebilir.

### 3.1.4. Demiryolunu oluşturan yapı elemanları

Demiryolunun güzergahında bulunan arazideki çukur yerlerin doldurularak, yüksek yerlerin ise kazılarak veya delinmesiyle düzleştirilmiş bölüme platform adı verilir. Platformun ortaya çıkabilmesi için yapılan tüm çalışmalara altyapı çalışması denir. Altyapı işleri; tünelleri, köprüleri, geçitleri, dolgu ve yarmaları kapsar. Yolun geçeceği seviyeyi elde edene kadar kazılarak açılmasına yarma adı verilir. Ters durumda yolun geçeceği seviyeyi elde etmek için çukur kısmın doldurulmasına dolgu denir. Yarma işleminin gerekli olduğu bazı durumlarda ise yarma işlemi uygulanamayacak kadar yükseltinin olması durumunda arazide delme işlemi uygulanarak elde edilen yapıya tünel adı verilir. Demiryolu güzergahında bulunan akarsu, nehir

gibi engelleri aşabilmek amacıyla yapılan en az 8 metre açıklığa sahip birleştirme yapılarına köprü, 8 metreden daha az açıklığa sahip yapılara ise menfez denir. Altyapı çalışmalarında rastlanan doldurulması için 20 metreden fazla dolgu malzemesi gereken durumlarda dolgu yapmak yerine vadiye yapılan yüksek köprülere viyadük adı verilir. Demiryolunun bir tarafından diğer tarafına geçebilmek geçitlerle mümkündür. Bu geçitler alt geçit, üst geçit ve hemzemin geçit olabilir.

Demiryolu araçlarının hareket ettiği, aracın sahip olduğu yükü platforma aktararak hareketin sebep olduğu basıncı azaltmak için yapılan yol kısmı üstyapı olarak adlandırılır. Aracın hareketini sağlaması için konulan iki adet ray, raydaki yükü balastlara taşımak için kullanılan traversler, platforma yükü aktaran balast ya da beton tabaka üstyapıyı oluşturur. Demiryolunda kullanılan taşıtların tekerlerindeki sürtünmeyi en aza indirmesi planlanarak güç kaybının önüne geçilmesi amaçlanan seyir halinde sönümlenmesi gereken gücü traversler aracılığıyla alan demiryolu elemanına ray adı verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi rayları dik kesen yapı elemanına travers denir. İki travers arası mesafe genellikle 60 cm civarına seçilmektedir. Raylardaki yükü dağıtarak balasta aktarmak, birbirine paralel yerleştirilen iki rayın oluşturduğu yol genişliğini (ekartman) korumak, rayların sahip olması gereken içe doğru eğimi sağlamak, yolun eksene bağlı kalmasını önlemek traversin görevleridir. Bu görevleri yerine getirebilecek traversin; aşınma, kırılma ve ezilmeye karşı mukavemete sahip olması, hararet ve rutubete dayanıklı olması beklenmektedir.



**Şekil 3.1.** Ray, travers ve balasttan oluşan demiryolu üstyapı elemanları

### **3.2. Karayolu Ulaşımı**

Taşıt ve yayaların ulaşımını sağlaması için toplumun kullanımına açık arazi şeridine karayolu denir. Karayolunun asli amacı ulaşımı sağlanan yolcu, yaya ve eşyaların güvenli hızlı ve ekonomik koşullardan faydalanmasını sağlamaktır. Bu durumun sağlanması uyulması gereken standartlara uymayı, toplum ve çevre dengesine sadık kalmayı gerektirmektedir.

### **3.2.1. Karayolu ulaşımının ülkemizdeki tarihçesi**

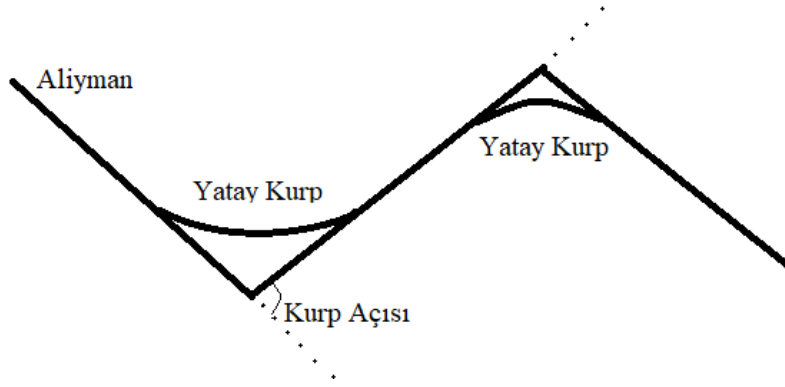
1948 yılında insan gücüyle yol yapımı felsefesi yerini makinalı çalışma yöntemine bırakmıştır. Ayrıca bu yıldan itibaren ülkemizdeki mevcut yolların envanteri çıkarılarak ihtiyaç duyulan yol ağı belirlenmiştir. 1950 yılında Karayolları Genel Müdürlüğü'nün kurulmasıyla yol ağının genişlemesi oldukça hız kazanmış, mevcut yollardaki bakım ve onarım faaliyetleri iyileştirilmiştir. 1960'lı yıllara gelindiğinde karayolu ağı 60000 km'nin üzerine çıkmış ve asfalt kaplamalı yolları genişletilmesi ilke haline gelmiştir. 1970 yılından itibaren ülkemizde motorlu taşıt sanayisinin gelişmeye başlamasıyla büyük şehirlerde yüksek standartlı yolların yapımı hız kazanmıştır (KGM, 2022).

### **3.2.2. Karayolu ulaşımında aranan nitelikler**

Karayollarının tasarımında hız, güvenlik ve konfor koşullarını bir arada taşıyan yolculuk sunabilmek öncelikli kriterimiz olmalıdır. Tasarımın yüksek geometrik standartları karşılması taşıt işletme maliyetini düşürme konusunda katkı sağlar. Fakat standartların gereksinimden daha yüksek tutulması ekonomik yönden çok tercih edilen bir durum değildir. Ayrıcalıklı olarak anayol sınıfına giren ve hız ve konforu bir arada taşıması öncelik olan yollarda bu durum doğal karşılanabilmektedir. Yollarda bulunan şerit sayısı, yolu kullanması öngörülen araç sayısına bağlı değişkenlik göstermektedir. Yolun tasarımı yapılırken sadece o günün koşulları değil yaklaşık 20-25 yıl sonra oluşabilecek trafik ihtiyaçlarını karşılayabilecek potansiyelde olması beklenmektedir. Önemli olan bir diğer nitelik ise söz konusu yoldaki trafiği oluşturan taşıtların çeşidine göre oransal ilişkilerini göz önünde bulundurarak; şerit genişliği, kurp tasarım kriterleri gibi değerlerin belirlenmesi gerekmektedir. Belirlenen geometrik standartların uygulanabilirliği arazinin sahip olduğu topografik özellikler ve çalışmanın oluşturacağı mali yük ile doğrudan alakalıdır. Söz konusu geometrik standartların esnek bir uygulanabilirlik sunması ve istenildiği takdirde yüksek geometrik standartların tercih edilebilmesi maddi olanaklarla alakalı bir durum olmakla birlikte, kısıtlı maddi olanak olması durumunda inşaatın kademeli ilerlemesi önerilen bir çözüm yöntemidir (KGM, 2022).

### **3.2.3. Karayolunu oluşturan yapı elemanları**

Yolun arazi üzerinde izlediği doğrultuya güzergâh adı verilir. Yolun varsayılan yatay bir düzlemdeki izdüşümüne plan denir. Yol ekseni planda görünen düz kısımlarla düz kısımlar arasındaki eğri kısımların birleşiminden oluşmaktadır. Eksende görünen düz kısımlara aliymen eğri görünümündeki kısımlara ise kurp adı verilir.



**Şekil 3.2.** Basit kurplu yol planı

Demiryollarında olduğu gibi karayollarında da altyapı ve üstyapı ayrı yapım elemanlarına sahiptir. Toprak işi tamamlanmış yol inşaatında daha önceki aşamada belirlenmiş olan kot ve en kesit halinde gelmiş halidir. Drenaj tesisleri, menfez, istinat duvarı gibi yapılar altyapı işleri kapsamına girmektedir. Altyapı yolun taşınmasını sağlamaktadır. Yağış esnasında yola düşen yağış sularının platformdan ayrılabilmesi için yolun enkesitine kaplama dış kenarına ya da bankete doğru verilen eğime enine eğim denir. Bu değer akan yağmur suları miktarına ve yolda mevcut olan kaplama çeşidine göre değişmektedir. Yol eksenine aynı eksende verilen eğim ise boyuna eğim olarak adlandırılmaktadır. Arazinin topografik yapısı, yolun sınıfı boyuna eğimi etkilemektedir. Geometrik standardı yüksek olan düz arazilerde boyuna eğimin az tutulması önerilmektedir. Yolun maruz kalabileceği; yağmur, kar suyu, sel, su baskını gibi yer altı ve yer üstünden gelebilecek sulara karşı korunmasını sağlayarak, suları kontrol altına almaya yardımcı olan sistemlere drenaj denir. Az da olsa akışı sürekli olan yağışlar sebebiyle oluşan küçük akarsuların gövdesinin bir yerden başka yere geçmesini sağlayan yapılara ise menfez denir. Bir yönde akan trafiğin, karşı yönde gelen trafikle orta refüj, korkuluk benzeri fiziki engellerle ayrılmış olduğu yollara bölünmüş yol adı verilir. Gidiş ve dönüş istikameti ayrı olan yolları birbirinden ayıran yapı elemanına orta refüj adı verilmektedir (KGM, 2022).

### **3.3. Kurp Kavramı**

Yolun yatay eksende eğri olan kısmına yatay kurp adı verilir. Kurpların bulunduğu karayolu ya da demiryollarında; sürüş esnasında taşıtların seyir edebilmesi için çeşitli kuvvet engellerini aşabilmiş olması gerekmektedir. Seyir halindeki araca göstermiş oldukları mukavemet çeşidine ve aksenal değerlere göre yollarda bulunan kurplar; basit, birleşik, ters yerleştirilmiş olmak üzere üç başlıkta incelenmektedir.

### 3.3.1. Basit kurplar

Karayolu ya da demiryollarında bulunan yolların düz bir eksenle ilerlediği kısma aliyman adı verilmektedir. Uygulamada iki aliymanı birbirine bağlamak amacıyla kullanılan kurplara basit kurp olarak adlandırılmaktadır.

### 3.3.2. Birleşik kurplar

Birinci yola ait ikinci kurpun, ikinci yola ait ilk kurpla aynı olması durumudur. Engebenin fazlalığı, imar durumuna bağlı engeller, maliyetle ilgili problemler güzergahın ortak kurpla tamamlanmasını gerektirebilmektedir.

### 3.3.3. Ters yerleştirilmiş yatay kurplar

Yatay kurplar arazi koşullarının çok zorlu olduğu yerlerde birbirlerine zıt yönlü ve sık şekilde kurp kullanılmasıyla oluşur. Şekil 3.3'te ters yerleştirilmiş yatay kurpların birbirine zıt yönlere kıvrıma sahip kurpların ardışık sıralanması gösterilmektedir. Aynı şekilde birleşik kurp yapısının farklı bölünmüş yolların aynı ekseni ortak kullanmasıyla oluştuğunu göstermektedir.



Şekil 3.3. Ters yerleştirilmiş yatay kurp ve birleşik kurp

## 3.4. Taşıt Hareketleri

Trafikte seyir halinde bulunan taşıtların görme duyusuyla başlayan, hızlanma, manevra yapma, durma gibi eylemlerin tamamı taşıt hareketleri olarak adlandırılmaktadır.

### 3.4.1. Görüş uzunluğu

Seyir halindeki sürücünün görüş alanındaki yolun uzunluğu olarak adlandırılır. Görüş uzunluğu yatay kurpların olduğu yollarda yarma sevi ve ağaçlardan etkilenmekte olup düşey kurplarda ise doğrudan hava koşullarıyla alakalı bir durumdur.

### 3.4.2. Durma mesafesi

Sürücünün aynı şeritte seyir ettiği diğer taşıta çarpmadan durabilmesi için gereken en

küçük görüş mesafesidir. Fren mesafesi olarak ta bilinmektedir.

*Reaksiyon Mesafesi:* Hareket halinde iken öndeki aracın ya da engelin fark edilmesi, düşünülmesi, ne yapılacağına karar verilmesi sürecince alınan mesafedir.

$$L_R = V * T_r \quad (3.1)$$

$L_R$ : Reaksiyon Mesafesi

$V$ : Aracın Hızı (m/sn)

$T_r$ : Reaksiyon için geçen süre (sn)

*Fren uzunluğu:* Durma eyleminin gerçekleşmeye başladığı andan itibaren tekerleklerin yol üzerinde ilerlediği mesafe olarak adlandırılmaktadır.

$$L_f = 0,00394 \frac{V^2}{f \pm s} \quad (3.2)$$

$L_f$ : Fren Mesafesi

$f$ : Araç tekerleği ile yol arasındaki sürtünme katsayısı

$s$ : Eğimin % olarak değeri; çıkışlarda(+), inişlerde (-) alınmaktadır.

### 3.5. Tünel Yapılar

Arazi kotunun yol kotunun çok üzerinde kaldığı durumlarda yüksekte kalan arazinin delinmesiyle elde edilen, iki ucu açık olan sanat yapılarına tünel denir.

Tünel inşasını gerekli kılacak durumlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Öncelikli olarak yer yüzünden aşılamayacak kadar engebe bulunan tepeleri aşılması amacıyla
2. Tünellerin inşasının maliyeti ve işletme masrafları; Geçiş ücretleri ve yolun kısalmasından dolayı sağlanan tasarruf ile belli bir sürede kendini amorti edebiliyorsa.
3. Tünelin inşasıyla birlikte yol güzergahında olası çığ, toprak kayması ve kaya yuvarlanmalarını engellemek amacıyla
4. Yol üzerinde seyir yoğunluğunu azaltmak amacıyla
5. Doğal görünümü bozmamak için akarsu, nehir, deniz, boğaz gibi yapıların altından geçmek amacıyla
6. Kendinden tutunamayan büyük yarma işlemleriyle maliyet artışı olan yollarda maliyeti azaltmak amacıyla

7. Büyük şehirlerdeki hafif raylı sistemlerin trafik akışına engel olmaması ve yoğunluğa sebep olmaması için yeni güzergâh oluştururken
8. Trafiğin oldukça yoğun olduğu yerlerde yeni yolun yapılmasının başka bir yol ile kesişeceği durumlarda
9. Birbirinden tepe, akarsu, sırt gibi yer şekilleri ile ayrılan iki semtin birbirine bağlanabilmesi amacıyla
10. Yer yüzü istimal ihtimalinin tünel açma maliyetinden daha fazla olduğu durumlarda tünel inşası gereklidir (Sucugil, 2000).



**Şekil 3.4.** Eşme-Salihli arası yapımına devam edilen demiryolu tüneli güzergahı

### **3.6. Tünel Aydınlatma Tekniği**

Yollarda seyahat edilen mesafenin kısılması amacıyla, sürücünün ve yolcuların güvenliğini tehlikeye sokabilecek şekildeki doğal engebelerin bulunduğu yerlerde tünel yapılardan yararlanılmaktadır. Trafikte güvenliği ve zaman kazancını sağlayan tüneller ilk yatırım maliyetleri bakımından diğer yol yapım giderlerine göre çok daha pahalı olarak bilinmektedir. Büyük altyapı yatırımlarının yapılmış olduğu tünellerde emniyet ve hız yönünden güvenliğin sağlanması açısından en önemli unsurlardan biri olan aydınlatmanın büyük titizlikle yapılması gerekmektedir. Gün ışığının olduğu ortamdan aydınlatma gerekliliği duyulacak kadar karanlık olan bir tünele girildiğinde öncelikli olarak sürücülerde kara bir deliğe yaklaşıyor izlenimi oluşmaktadır. Bu durumun etkisi dışarıdaki havanın çok güneşli olduğu zamanlarda daha belirgin hissedilmektedir. Kara bir deliğe yaklaşma izlenimini engellemek için tünellerde adaptasyon problemini çözmeye yönelik kademeli aydınlatma tasarımı yapılması gerekmektedir. Yapılacak tasarımda beklenti; tünel içerisini açıkta bulunan bir yolun aydınlık düzeyine getirebilmektir. Fakat bu koşulların sağlanabilmesi yüksek altyapı ve işletme maliyeti

doğuracağı için çok mümkün görünmemektedir. Olası tasarımın karşılanabilir maliyetle yeterli düzeyde görme yetisi sağlayan aydınlatma sağlaması beklenmektedir. Bundan yola çıkarak bölgelere ayrılmış olan tünelin ilk bölgesindeki yoğun aydınlatmanın adaptasyon sağlandıktan sonra gittikçe şiddetini azaltması beklenmektedir. Yolların ve tünellerin aydınlatmasında temel aydınlatma kriterleri geçerli olup, iki tasarımı farklı kılan başlıca üç özellik bulunmaktadır.

1. Parıltı değerinin yollarda her bölgede aynı olması beklenmektedir. Buna karşın tünellerde ise dışarıdaki parıltı değerine adapte olmaya yönelik sürekli değişkenlik gösteren parıltı değerleri tercih edilmektedir.
2. Yol aydınlatma tasarımında bulunmadığı halde tünellerin aydınlatmasında tünel içi duvarlarında aydınlatma hesaplamasına dahil edilmesi gerekmektedir.
3. Tünellerde kara delik etkisini bertaraf edebilmek için ayrıca kapalı ortam olduğu için gündüzleri de aydınlatma gereksinimi duyulurken yollarda böyle bir gereksinim bulunmamaktadır (Akbulut, 2006).

Tünel aydınlatması, diğer dış mekân aydınlatmalarına göre fazla maliyet gerektiren bir uygulama olarak bilinmektedir. Uluslararası Aydınlatma Komisyonu tünel aydınlatmasında bölgesel parıltı düzeyine erişmeyi amaçlamanın aydınlatmanın maliyet yönünden kabul edilebilir düzeye indirgenebileceği konusunda öneriler içermektedir (İzбек, 2006).

### **3.6.1. Uluslararası aydınlatma komisyonunun önerileri**

Tünellerdeki aydınlatmada hedef; tünel ortamındaki aydınlığın, dışarıdaki ortamdan geçiş yapılmış olduğunu sürücü ve yolculara hissettirmeden hız ve güvenlik koşullarını aynı şekilde sağlanabilmesi olarak bilinmektedir.

Akan trafikte güvenliği sağlayabilmenin öncelikli koşulu etraftaki hareketliliği algılayabilmektir. Algının sağlığı olabilmesi çevredeki cisimlerin olup olmamasına, fazlalığı ya da azlığına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Sürücü için en kritik etkinin gündüz ve açık havada uzun tünellerin girişinde görüldüğü bilinmektedir. Bunun sebebi çok aydınlık ortamdan birdenbire karanlık ortama geçilmiş olunmasıdır. Bu görünüm ilk bakışta kara deliğe benzetildiği için bu tanımlama uygun görülmüştür. Gözün bu algıdan kurtulabilmesi için geçen süre adaptasyon süresi olarak bilinmektedir. Tünel aydınlatmalarındaki amaç bu süreyi en aza indirebilmektir (CIE Pub. 154, 2003).

### 3.6.2. Aydınlatma açısından tünel çeşitleri

Aydınlatma yönünden incelendiğinde; Kısa tüneller ve uzun tüneller olmak üzere iki çeşit tünel vardır.

#### *Kısa Tüneller*

Tünele aniden durabilecek kadar yakından bakıldığında çıkış kısmında aydınlık olan kısımda görülebiliyorsa kısa tünel olarak sınıflandırılmaktadır. Kısa tüneller uzaktan bakıldığında karanlık çerçeve gibi görünmektedirler. Aç-kapa tünel olarak adlandırılan yapılar kısa tünellere örnektir.



**Şekil 3.5.** Kısa tünel

Kısa tünellerin giriş bölgesinde uzun tünellerdeki gibi adaptasyon amaçlı aydınlatma yapımı ekonomik açıdan uygun görülmemektedir. Bunun yerine; uygun ışık kaynakları kullanarak tünelin orta kısmından tüm enini kaplayacak şekilde minimum 10m genişliğinde bir şerit oluşturarak tüneldeki karanlık bölgeyi kısaltarak görüşü kolaylaştırmak mümkündür (Akbulut, 2006).

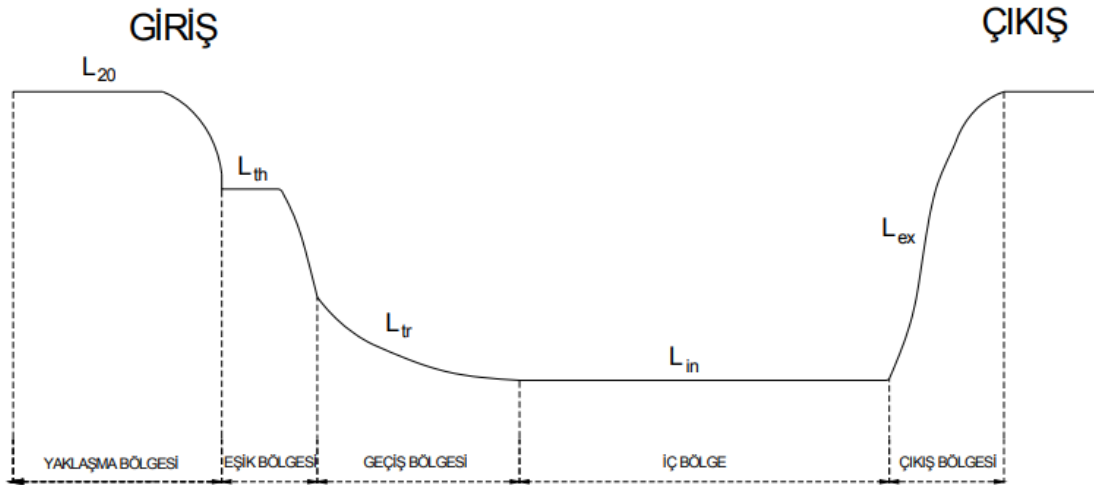
#### *Uzun Tüneller*

Tünele girildikten belli bir süre sonra arka fonda çıkışı ya da normal akan trafiği göremediğimiz her tünel mesafe farkı olmaksızın uzun tünel olarak adlandırılmaktadır. Uzun tünellerde geçen süre boyunca güneşin hareketi değişkenlik gösterebilmektedir. Bu sebeple fotosel röleler yardımıyla kullanılan armatürlerin dim edilerek aydınlatmadaki geçiş koşullarının sağlanması gerekmektedir. Bu koşulları güvenliğin sağlanabilmesi için anlık olarak değiştirebilme olanağı bulunmaktadır. Seyir halinde iken tünel yapının varlığını fark edemediğimiz durumlar bulunmaktadır. Bu durumun sebepleri; asfaltın renginin koyu olması, yol yapımında kullanılan malzemelerin yansıtma faktörünün istenilen değerden düşük olması,

tünel giriş kısmında bulunan ağaçların varlığı olarak sıralanabilmektedir. Trafiğin çok yoğun olmadığı tünellerde; tünel girişini odak noktası haline getirmek, aydınlatma eşik bölgesinde değişik renkli armatürlerden faydalanmak gibi uygulamalar sürücünün algılarını direkt uyararak tünel varlığını fark etmesine yardımcı olmaktadır. Tünel duvarlarında, yol yüzeyinde kullanılan malzemenin renk ve çeşidinin yansıtma özelliğinin yüksek olması; tünel içerisinde aydınlatmada harcanmakta olunan enerji miktarını azalttığı bilinmektedir. Tünellerin giriş kısmının yüksek olması da içeriye girmekte olan gün ışığını arttırarak özellikle gündüz saatlerinde maruz kalınan adaptasyon probleminin çözüm süresini kısaltmaktadır.

### 3.7. Tünel Aydınlatma Bölgeleri

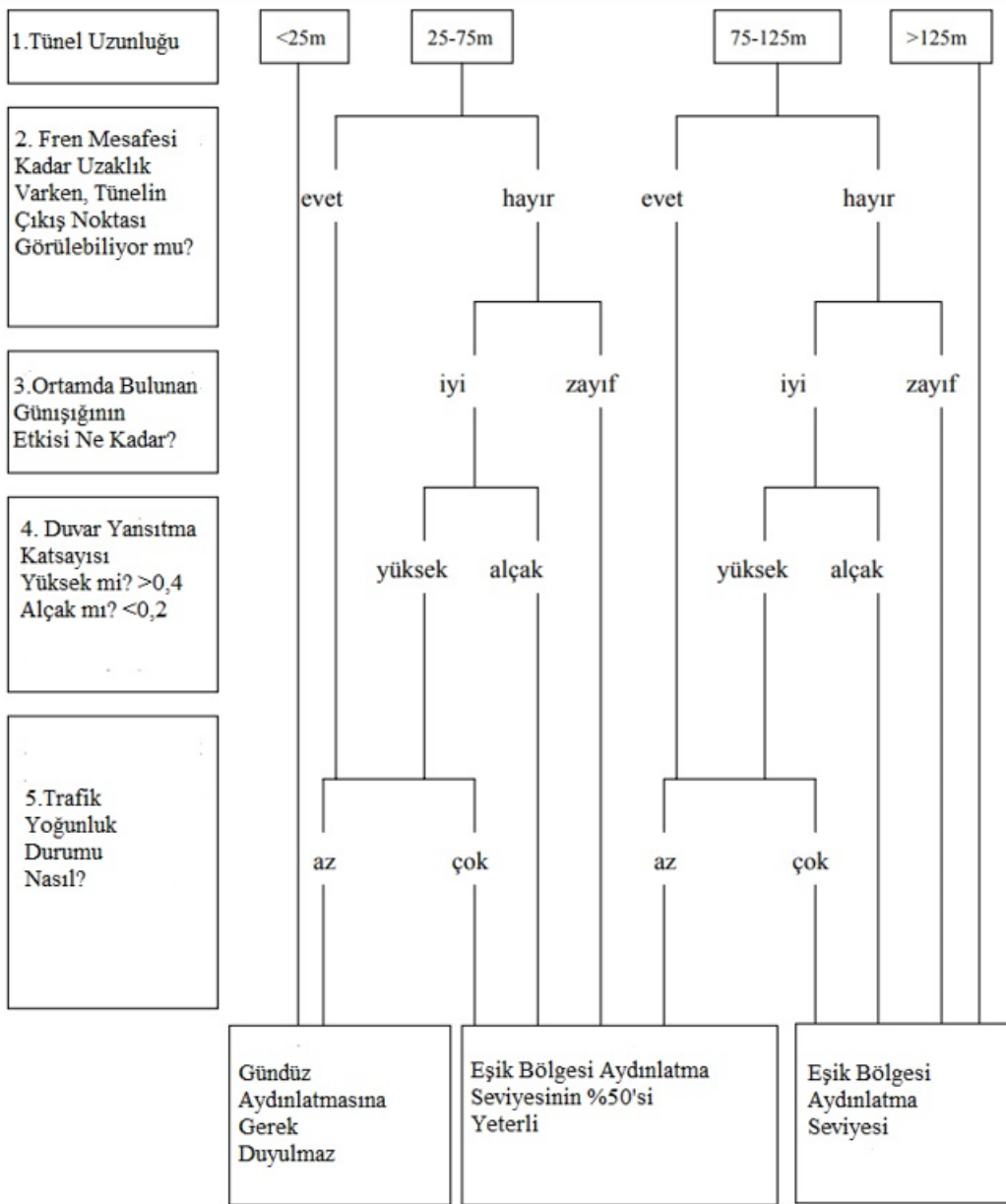
Aydınlatılmasında hassasiyet gerektiren uzunluğa sahip tünellerin gündüz koşullarında aydınlatılması için daha önemli şartların sağlanması gerekmektedir. Bunun sebebi gündüz var olan gün ışığıdır. Adaptasyon sorunu yaşanabilmektedir. Tünele ilk girildiği zaman kısa süreliğine körlük hissi yaşanabilmektedir. Bu olumsuz durumu ortadan kaldırmak adına tüneller aydınlatma bölgelerine ayrılarak tasarımın gerçekleştirilmesi uygun görülmektedir. Bu tasarım alışma süreci boyunca kademeli parlaklığı düzeyi sağlamayı amaçlamaktadır. Bu kademe yüksek parlaklığı düzeyinden alçak parlaklığı düzeyine geçişi öngörmektedir.



Şekil 3.6. Tünel bölgelerinin aydınlık düzeyleri

**Kaynak:** (Akbulut,2006)

Uluslararası Aydınlatma Komisyonu, gündüz aydınlatma esaslarıyla ilgili olarak aşağıdaki grafiği yayınlamıştır.



**Şekil 3.7.** Uzunlukları farklı tüneller için gündüz aydınlatma önerileri

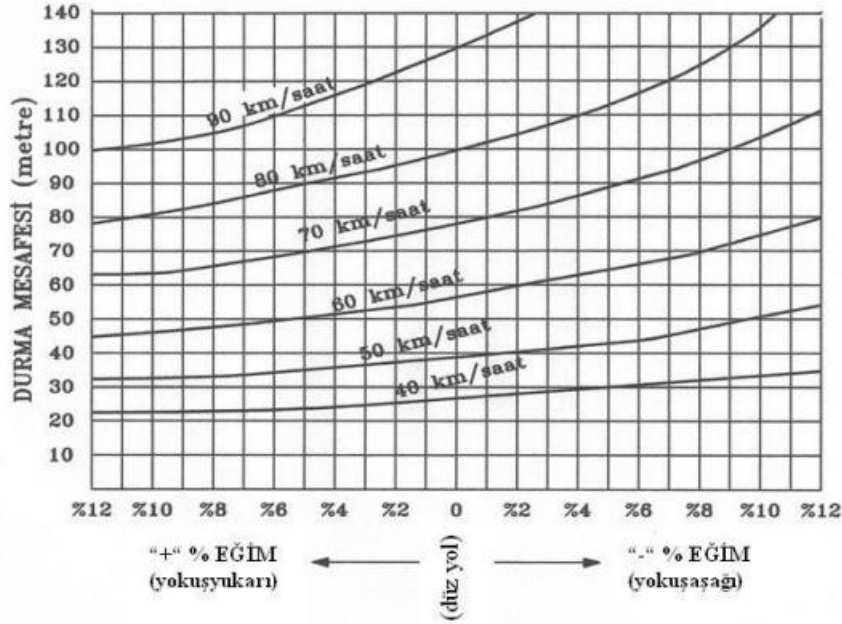
**Kaynak:** (CIE)

### 3.7.1. Giriş bölgesi

Göz adaptasyonunun sağlanmaya başlandığı bölgedir. Tünelin iç bölgesine kadar giriş bölgesi olarak ifade edilmektedir. Çok yüksek parıltılara maruz kalınan gün ışığından tünele geçişte karşılaşılan ilk bölge olan giriş bölgesinde sürücüyeye kara delik şeklinde görünen tünel girişini kademeli aydınlatma yapılması önerilmektedir. Gece aydınlatmasında ise karanlık ortamdan başka bir karanlık ortama geçiş olduğundan gündüz olduğundan daha zayıf bir aydınlatma yeterli olabilmektedir. Bu koşulun sağlanması dimlenebilir armatürlerle mümkün kılınmıştır. Enerjinin korunması için de büyük avantaj sağlayan bu tasarım günümüzde gittikçe

yaygınlaşmaktadır. Tünellerin giriş bölgeleri; eşik ve geçiş bölgeleri olarak ikiye ayrılmaktadır.

Eşik bölgesi, tünele giriş anından itibaren fren mesafesi kadar olan mesafe olarak ifade edilmektedir. Giriş yapılan tünelde bulunan engellerin fark edilmesi büyük önem taşımaktadır. Fren mesafesi daha önceki başlıklarda incelendiği gibi aracın sahip olduğu hıza ve ilerlediği yolun eğimine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Çelebi ve Karatekin, 2014).



Şekil 3.8. Fren mesafesinin eğim ve hız ile ilişkisi

**Kaynak:** (Çelebi ve Karatekin, 2014)

Geçiş bölgesi, yüksek parıltı değerleriyle aydınlatılan eşik bölgesindeki parıltı büyüklüğü iç bölgeye doğru giderken aşamalı olarak azaltılmaktadır. İç bölge ile giriş bölgesi arasında yumuşak geçişin sağlandığı bu bölgenin uzunluğu; söz konusu yolda izin verilen hız limitine, eşik bölgesinin uzunluğuna, aydınlatma bölgeleri arasındaki parıltı seviyesi farklarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Yapılmış olan adaptasyon deneyleri neticesine geçiş bölgesi olarak adlandırılan  $L_{tr}$  aşağıdaki şekilde elde edilmektedir.

$$L_{tr} = L_{th} (1,9 + t)^{-1,4} \quad (3.3)$$

$L_{tr}$  : Geçiş bölgesine ait parıltı değeri

$L_{th}$  : Eşik bölgesine ait parıltı değeri

$t$  : Eşik bölgesi sona erdikten sonra geçen zaman (sn)

### 3.7.2. İç bölge

Gün ışığının etki ettiği giriş ve çıkış bölgelerinin ortasında kalan, tünellerin güneş ışığından en uzakta kalan kısmıdır. Ancak 300 metreden daha kısa olan tünellerde gün ışığı etkisinden kaçış mümkün olmayacağı için iç bölgenin varlığından bahsedilememektedir. İç bölgede aydınlatma düzeyi sabittir, değişkenlik göstermez. Tünelin iç kısmı giriş bölgesinin devamı niteliğinde olduğundan adapte olunmuş aydınlatma düzeyi giriş kısmındaki aydınlatma düzeyine ve kalitesine göre değişkenlik göstermektedir. Bu değişkenlik gözün adaptasyonu ile ilgilidir; eğer iç bölgeye gelene yeni aydınlatma düzeyine adapte olunmuşsa tasarım kriterleri gece aydınlatmasına göre uyarlanabilmektedir, aksi takdirde kademeli aydınlatma tasarım kriterleri devreye sokulmaktadır. Uluslararası Aydınlatma Komisyonu'nun önerilerine göre tünellerin iç bölgelerinde parlaklı düzeyleri  $1-15\text{cd/m}^2$  arasında seçilmesi tavsiye edilmiştir. Fakat adaptasyon süresi aydınlıktan karanlığa geçildiğinde uzun zaman aldığı için minimum parlaklık değerinin  $3\text{cd/m}^2$  değerinin altında olmaması istenmektedir (Onaygil vd., 2009).

**Tablo 3.1.** Parlaklık düzeyinin fren mesafesi ve trafik yoğunluğuyla ilişkisi

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

**Kaynak:** (CIE, 1990)

### 3.7.3. Çıkış bölgesi

Tek yönlü olduğu düşünülen tünelde, sürücünün dış ortamın parlaklığından yeniden etkilenmeye başladığı bölge olarak adlandırılır. Adaptasyon olayı düşük parlaklıktan yükseğe doğru olduğu için aydınlık adaptasyonu olarak adlandırılır ve diğer duruma göre daha kolay olur. Kolay adaptasyon sebebiyle çoğu uygulamada iç bölgede sağlanan parlaklık düzeyinde değişikliğe gidilmeyerek yeni tasarım gereksinimi görülmemiştir. Ayrıca giriş bölgesinde olduğu gibi çıkış bölgesinde de gün ışığından daha fazla yararlanabilmek adına duvar ve yollarda kullanılan malzemelerin yansıtma özelliğinin yüksek olanlarının tercih edilmesinde yarar görülmektedir. Aydınlatma tasarımında; tünel çıkışında giriş kısmında olduğu gibi farklı parlaklık düzeyine sahip ortama geçiş yapıldığı için bazı durumlara dikkat edilmesi gerekmektedir.

Tünelden çıkmak üzere olan aracı süren sürücünün maruz kalacağı aydınlık delik görüntüsünün engellenebilmesi için tünelin çıkış kısmında özel aydınlatma önlemlerinin alınması gerekebilir.

Gidiş ve dönüş olmak üzere iki farklı tünelin olduğu yerlerde, arıza olduğu durumda veya bakım gereken anlarda iki yönünde tek tünelden işletilmesi zorunlu olması halinde kullanıma uygun olması beklenmektedir.

Tünelden çıkış yapan sürücünün arkada seyir halinde olan araçları belirgin şekilde görebileceği bir aydınlatmanın bulunması gerekmektedir (Akbulut, 2006).

### 3.8. Tünelde Acil Durum Aydınlatması

Acil durum aydınlatmasının amacı, olası kazaların önüne geçmek, kaza durumunda acil müdahale ekiplerine yol göstermek, az da olsa olası enerji kesintisi durumunda kesintisiz aydınlanma sağlamaktır. Tasarımın niteliğine bağlı olarak değişkenlik gösteren bazı armatürlerin enerji kesintisi sırasında da faaliyet gösterebilmesi durumu her zaman mümkün olmayabilir. Genel aydınlatmaya güç kesintisinde sürekli çalışabilme koşulunu dahil etmek oldukça maliyetli bir durumken acil durum aydınlatma armatürlerine bu özelliği entegre edebilmek daha ekonomiktir. Fazlardan kaynaklı arıza durumlarına karşı önlem olarak ta ardışık iki armatürün aynı fazdan beslenmemesi önerilmektedir. Bu sayede belli bir fazda meydana gelen arıza durumunda bölgesel olarak büyük bir alanın karanlıkta kalması engellenmiş olur. Uzun tünellerde belli mesafelerde acil durum kaçış kapısı bulundurmamak zorunludur. Acil durum armatürlerinin üzerinde ışığı engellemeyecek renkte olmak koşuluyla aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi en yakın çıkış kapısına olan mesafeyi belirten şekil bulunmalıdır.



Şekil 3.9. Acil durum kaçış armatürü

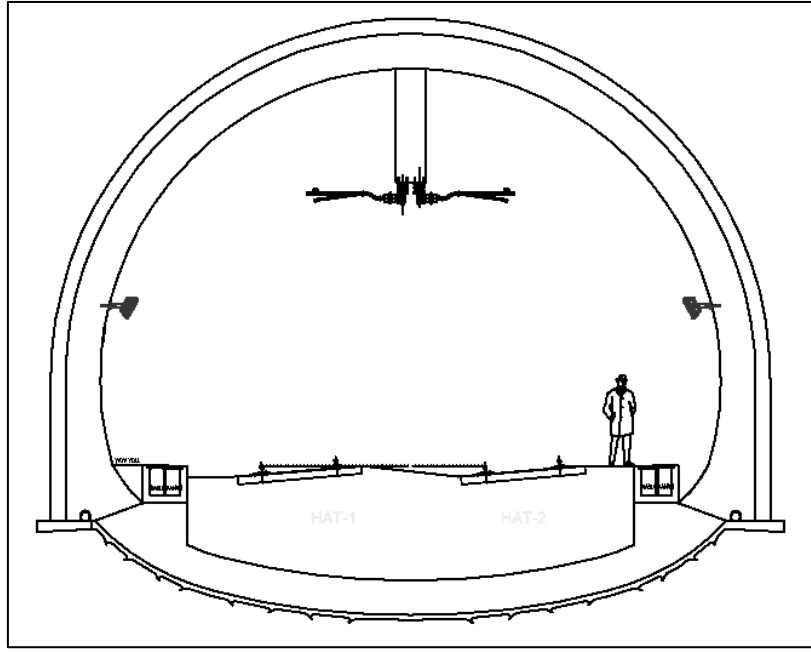
#### **4. TÜNEL AYDINLATMA UYGULAMALARI**

Bilindiği üzere ülkemizde yüksek hızlı tren ağı günden güne gelişim göstermektedir. Coğrafi koşullar, gelişmekte olan bu ağın ancak tüneller aracılığıyla sürekliliğini sağlamasını mümkün kılmaktadır. Ülkemizde 2009 yılından itibaren faaliyet göstermeye başlayan yüksek hızlı trenin günümüzde hızı saatte 300km/saat' e kadar çıkabilmektedir. Yüksek hızlı trenin yolculuğu sırasında güvenlik önlemlerinin alınması oldukça önemlidir. Yüksek hızlı tren tünel güvenliği; aydınlatma, sinyalizasyon sistemleri, elektrifikasyon sistemleri, yangın algılama ve alarm sistemi, yangın söndürme tertibatının etkin ve birlikte çalışmasıyla mümkün olmaktadır.

##### **4.1. Doğrusal Yapıdaki Yüksek Hızlı Tren Tünelinde Aydınlatma Tasarımı**

Tünellerin güvenliğinin sağlanması konusunda geçerliliğini koruyan çoğu kabul demiryolu tünellerinde de geçerli olmakla birlikte ekstra önlemlerin alınması ve yeni sistemlerin geliştirilmesi gereken pek çok konu bulunmaktadır. Karayolu tünellerine kıyasla çok daha uzun tünellerin peş peşe sıralandığı yüksek hızlı tren hattında; aydınlatma tasarımının etkinliği, sürücü ve yolcuların seyahat esnasında güvende hissetmelerinin önemli koşullarından biridir. Ayrıca gece ve gündüz saatlerinde faaliyet göstermekte olan yüksek hızlı trende; mevcut hızıyla yolcu ve makinistlerin, anlık parıltı değişimlerinin çok sık frekanslarda yaşanması sebebiyle maruz kalabileceği olumsuz etkilerden korunması amacıyla gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir.

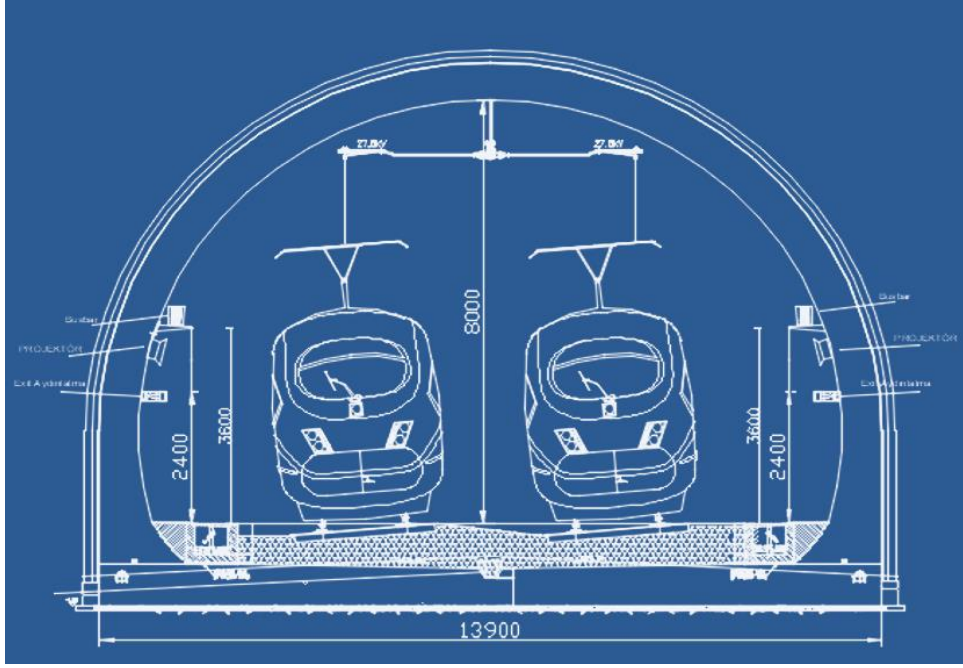
Çalışmamızda, Ankara-İstanbul arasında hizmet veren yüksek hızlı trenin Bilecik iline bağlı Bozyk ilçesi sınırlarında bulunan 3304m uzunluğundaki demiryolu tünelinin lineer yapıya sahip olan kısmının aydınlatma tasarımı incelenmiştir.



**Şekil 4.1.** YHT tüneli kesit görünüşü

Şekil 4.1' de görüldüğü üzere demiryolu tünellerinde mevcut olan katener sistemi sebebiyle aydınlatma armatürlerinin kesitin tepe kısmına yerleştirilmesi mümkün olmamaktadır. Armatürlerin yerleşimi mevcut hatta kullanılan araçlara, tünelin uzunluğuna, tünel güvenliği amacıyla yerleştirilmiş diğer ekipmanların konumuna, uzun tünellerde bulunan kaçış tünellerinin konumuna göre değişiklik göstermektedir. Demiryolu tünellerinin karayolu tünellerine göre farklı olduğu bir diğer husus ise jet fan olarak adlandırılan havalandırma sisteminin konumlandırılmasıdır. Yine katener sisteminin varlığı, işletme ve bakım maliyetleri sebebiyle kullanılması güvenlik açısından oldukça önemli olmasına rağmen demiryolu trafiğinin çok yoğun olduğu tüneller haricinde rastlamak oldukça zordur.

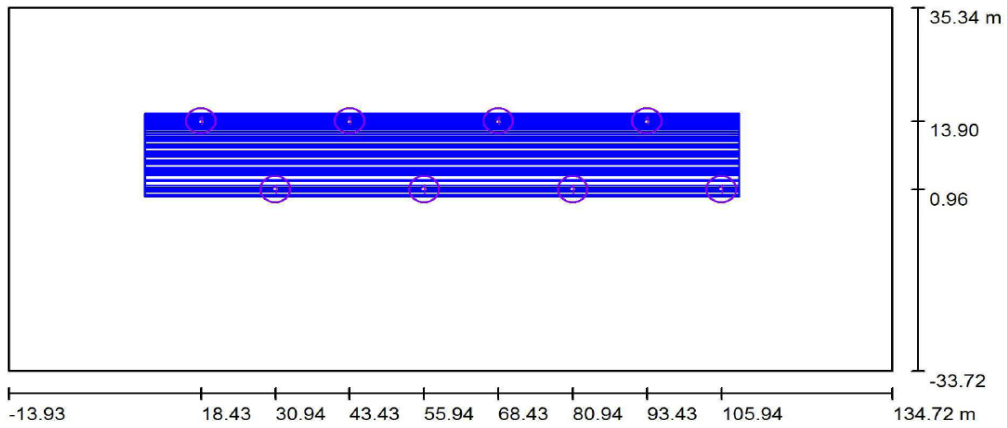
Tünel yerleşim planında görüldüğü üzere ana aydınlatma armatürlerine ve acil durum kaçış armatürlerine enerji iletimi busbar aracılığıyla sağlanmaktadır. Ayrıca armatürler ve iletim hatlarının konumlandırılmasında katener hattından geçen 27500 volt gerilim göz önünde bulundurularak hassasiyet gösterilmiştir. Yerleşim planında 50W LED armatür kullanılmıştır. Seçilen armatürler; tünel uzunluğuna ve tüneldeki kurp etkilerine göre ihtiyaç halinde parlıltı değerini değiştirebilme imkânı sunmaktadır. Ayrıca DALI sistemi ile entegre olabilme özelliğine sahip olan armatürler sayesinde, uzun tünellerde armatürleri gruplara ayırarak parlıltı değerlerini değiştirebilmek, kurulu otomasyon sistemiyle istenildiği zaman istenilen armatürün manuel olarak açılıp kapatılması mümkündür.



**Şekil 4.2.** Tünel yerleşim planı kesiti

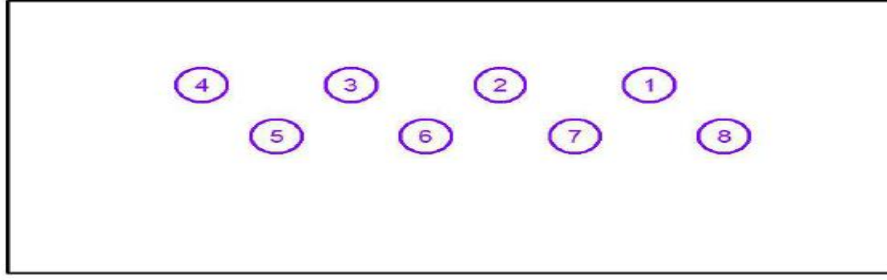
Armatürlerin sadece tren geçişi esnasında yanmasını sağlayan sensörler mevcuttur, bu sensörler sayesinde gereksiz enerji sarfiyatının önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Acil durum kaçış armatürleri ise 5W güce sahip olup IP65 koruma sınıfı niteliklerini bulundurmaktadır. Enerji kesintisi durumunda 3 saat çalışmaya devam edebilme özelliğine sahiptir. Çalışmamızda söz konusu tünelin aydınlatma değerlerini DIALux programında inceledikten sonra aydınlatma tasarımı yapılan bölgeden lux metre ile belli bir aydınlatma bölgesi için ölçüm alınmıştır.

#### 4.1.1. Demiryolu tüneli aydınlatma tasarımının simüle edilmesi



**Şekil 4.3.** Armatürlerin yerleşim planı

Led armatürler Hat-1 ve Hat-2' de 25' er metre aralıklarla konumlandırılmıştır. Çapraz ardışık iki armatür arasında 12,5 metre mesafe bulunmaktadır. DIALux programında simüle edilecek armatürlere adres atanarak koordinat bilgilerinin programa girilmesi gerekmektedir.



**Şekil 4.4.** Armatürlerin adreslenmesi

Adreslenen armatürlerin X eksen, Y eksen ve Z eksenine göre koordinat bilgileri, aynı eksenlere göre dönme açılarının değerleri aşağıdaki tabloda gösterilmektedir.

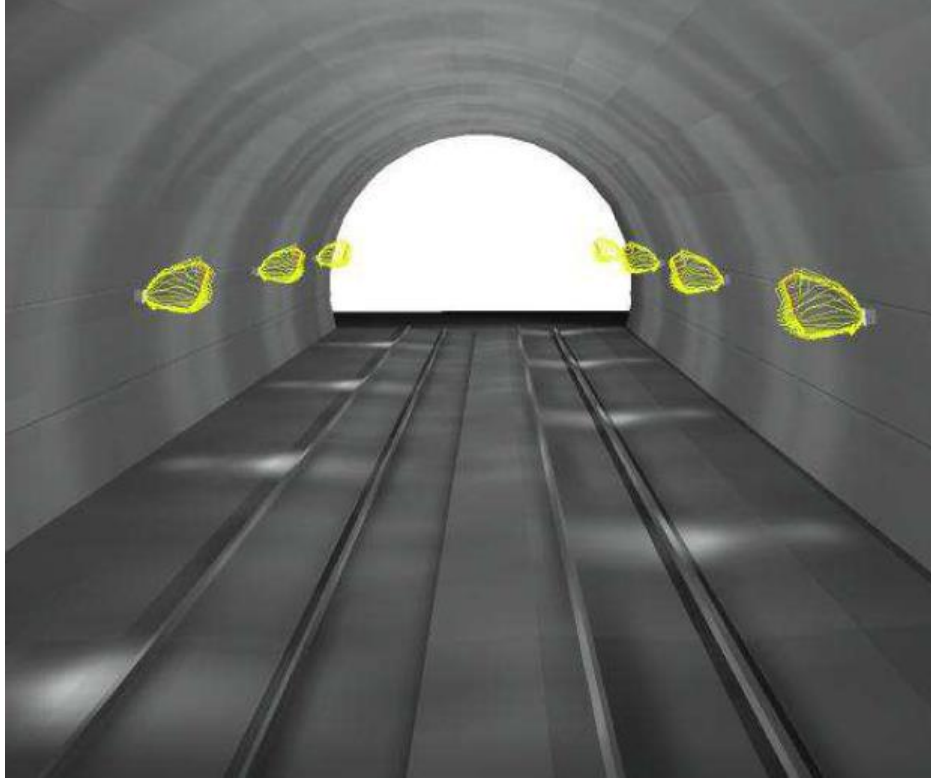
**Tablo 4.1.** Adreslenen armatürlerin koordinatları

Numara	Konum(metre)			Dönme Açısı (°)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	93.432	13.902	3.500	0.0	-84.0	-90.0
2	68.432	13.902	3.500	0.0	-84.0	-90.0
3	43.432	13.902	3.500	0.0	-84.0	-90.0
4	18.432	13.902	3.500	0.0	-84.0	-90.0
5	30.940	0.962	3.500	0.0	-84.0	-90.0
6	55.940	0.962	3.500	0.0	-84.0	-90.0
7	80.940	0.962	3.500	0.0	-84.0	-90.0
8	105.940	0.962	3.500	0.0	-84.0	-90.0

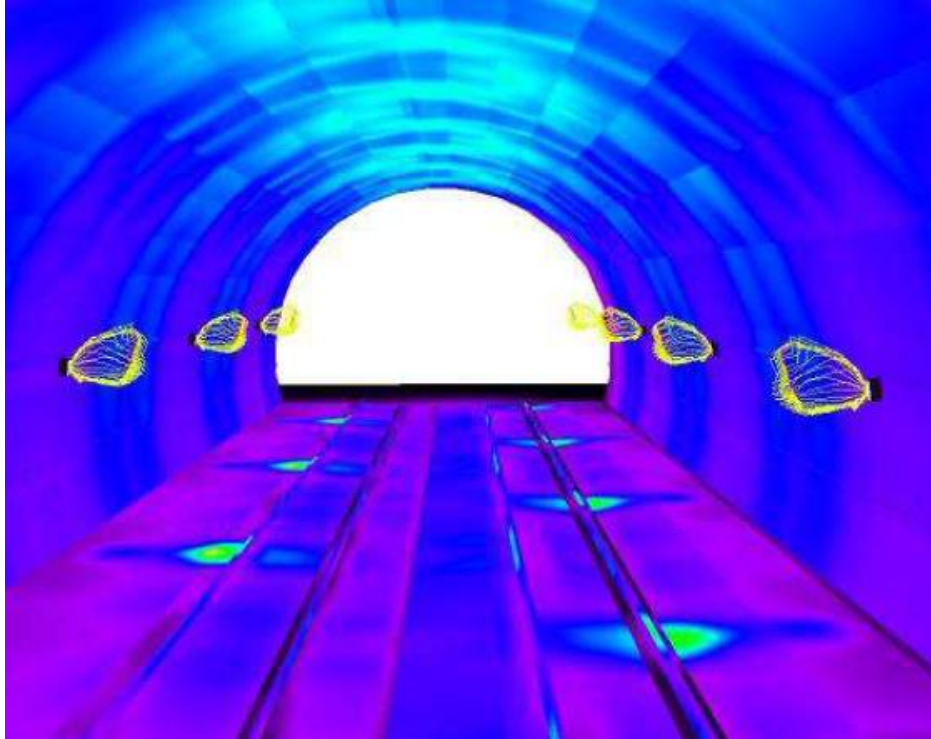
Tablodaki koordinatlara ve açı değerlerine göre yerleştirilmiş armatürlerin tünel kesitinde gösterilmiş olan ray üzeri, yürüyüş yolu ve zemine etki eden aydınlık düzeyleri program tarafından hesaplanmıştır.

**Tablo 4.2.** Hesap yüzeylerindeki aydınlatma değerleri

Numara	Yüzey	Tip	Ağ	$E_m[fc]$	$E_{min}[fc]$	$E_{max}[fc]$	$E_{min}/E_m$	$E_{min}/E_{max}$
1	Zemin	Dikey	128X128	1.12	0.80	2.49	0.71	0.32
2	Yürüyüş Yolu	Dikey	128X128	0.70	0.49	3.19	0.69	0.15
3	Ray Üstü	Dikey	128X128	0.69	0.54	0.88	0.77	0.61



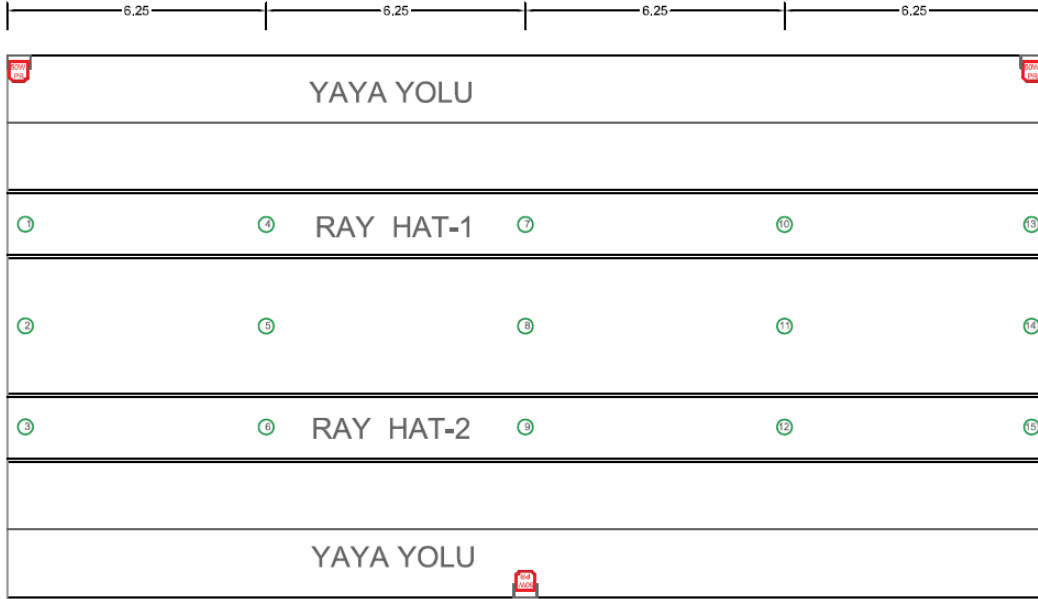
Şekil 4.5. Tasarımın 3B görüntülenmesi



Şekil 4.6. Tasarımdaki yanlış renklerin görüntülenmesi

#### 4.1.2. Aydınlatma tasarımı yapılan tünelin saha ölçümleri

Söz konusu tasarıma ait saha ölçümlerini ardışık iki, biri çapraz yerleşmiş toplam 3 armatür arasında belirlenmiş 15 nokta üzerinden lux metre yardımıyla yapılmıştır.



Şekil 4.7. Saha ölçümünün yapıldığı noktalar

Seçilen noktaların her bir armatürden elde ettiği aydınlanma düzeyi farklı olup bu farklılık o noktadaki ölçülen değere yansımıştır.

① =20lux	⑥ =17lux	⑪ =16lux
② =25lux	⑦ =16lux	⑫ =15lux
③ =16lux	⑧ =21lux	⑬ =18lux
④ =16lux	⑨ =20lux	⑭ =21lux
⑤ =16lux	⑩ =15lux	⑮ =15lux

○ =...lux

└─┬─> ÖLÇÜM SONUCU

└─┬─> ÖLÇÜM NOKTASI

Şekil 4.8. Belirlenen noktalardaki aydınlanma düzeyleri

Ölçüm yapılan noktalara ait lux cinsinden ölçülen aydınlanma düzeyi değerlerinin ortalama değeri:

$$E_{ort} = 17,8 \text{ lux} = 1,65 \text{ fc} > 1 \text{ fc} \text{ olduğundan şartnamede belirtilen koşulu sağlamaktadır.}$$



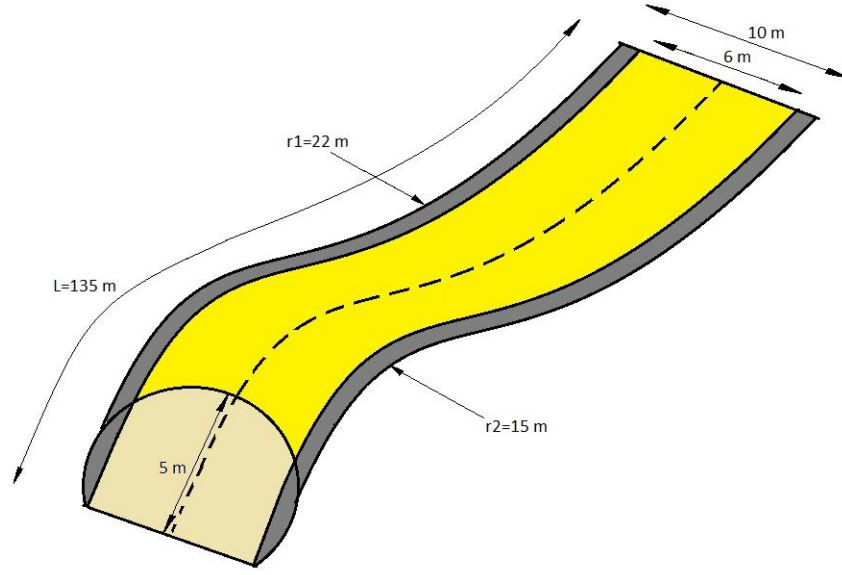
**Şekil 4.9.** Tünelde aydınlatma düzeyi ölçülen bölge

#### **4.2. Kurp Eksenli Bir Tünel Modeli Üzerinde Koordinat Esaslı Aydınlatma Tasarım Uygulaması**

Burada, 22 m ve 15 m yarıçaplarında iki adet kurp eksenlerini barındıran, 5 m iç yüksekliğe sahip, iç yol genişliği 6 m, taban genişliği 10m, uzunluğu 135 m olan simülatif olarak tasarlanmış bir tünel üzerinde aydınlatma tasarımının gerçekleştirilmesine yönelik aşamaların açıklamaları gerçekleştirilecektir (Şekil 4.10 ve Şekil 4.11).

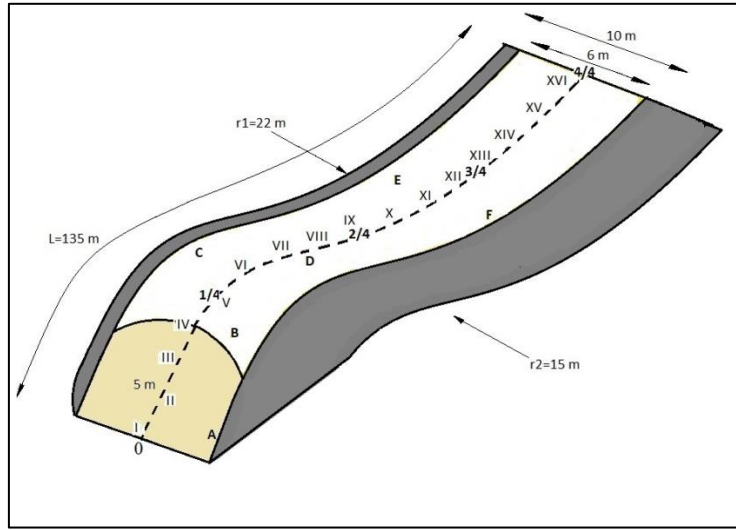


**Şekil 4.10.** Çalışmada ele alınan kurp eksenli tünelin iç simülatif görünümü



**Şekil 4.11.** Çalışmada ele alınan kurp eksenli tünelin şematik görünümü

Tasarımın ilk aşaması, Şekil 4.12’de görüldüğü gibi armatür montaj konumlarının ve aydınlatma düzeyleri hesaplanacak konumların belirlenmeleridir. Burada, aşamaların açıklanmasını mümkün kılabildiğinden, tünelin üst eksenine mümkün olduğunca dengeli yerleştirilmiş 16 adet armatür ve 6 adet hesap noktası ile aydınlatma tasarımı gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 4.12.** Çalışmada ele alınan kurp eksenli tünelde armatür ve hesap noktaları

Tasarımın ikinci aşaması ise, Tablo 4.1’de görüldüğü gibi armatür montaj konumlarının ve Tablo 4.2’de görüldüğü gibi aydınlatma düzeyleri hesaplanacak konumların koordinatlarının belirlenmesidir. Burada, 16 adet armatür ve 6 adet hesap noktasına ait koordinat konumları yatay zeminde X ve Y olarak Tablo 4.1’de verilmiştir.

**Tablo 4.3.** Kurp tünel içerisinde aydınlatma hesap noktaları

X (Piksel)	Y (Piksel)
261	559
291	426
247	422
389	334
503	226
621	271

**Tablo 4.4.** Kurp tünel içerisindeki armatürlerin yerleşim noktaları

X (Piksel)	Y (Piksel)
177	552
197	508
218	463
241	418
270	375
310	347
360	328
408	314
452	300
502	282
546	260
590	233
627	205
664	174
699	141
733	108

Çalışmada, kurp eksenli tünel zone uzunluklarının hesaplanması için tünel 4 kısma ayrılmış olup, her bir zone için 0-1/4, 1/4-2/4, 2/4-3/4, 3/4-4/4 mesafelerinin öncelikle hesaplanması gerçekleştirilmiştir. Bu hesaplamalarda, öncelikle 0, 1/4, 2/4, 3/4 ve 4/4 zone ayırma noktalarının piksel esaslı olarak koordinatlarından, yatay zemin esaslı x ve y koordinat farklarından yararlanılarak, 0-1/4, 1/4-2/4, 2/4-3/4, 3/4-4/4 arası mesafeler,

$$H = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2} \quad (4.1)$$

(4.1) eşitliği kullanılarak, tablo 3'deki gibi hesaplanmıştır.

**Tablo 4.5.** 0-1/4, 1/4-2/4, 2/4-3/4, 3/4-4/4 arası mesafeler

Zone	0-1/4	1/4-2/4	2/4-3/4	3/4-4/4
Mesafe	205.8276	206.4946	173.6663	187.6832

Tünel içerisinde yer alan 16 armatürün her biri 0° düşey eksenle yere bakmakta olup, her bir armatürün, aydınlatma düzeyleri hesaplanacak olan tünel içi 6 nokta (A, B, C, D, E ve F) ile yaptığı düşey açıların ayrı ayrı hesaplanması gerekir. Bu amaçla, (4.1) eşitliğine benzer biçimde öncelikle, her bir armatürün düşey iz düşüm noktalarının, aydınlatma düzeyleri hesaplanacak olan 6 noktaya (A, B, C, D, E ve F) ait uzaklıklarının (K mesafeleri) bulunmaları gerekir. Sonrasında ise, armatürlerin düşey iz düşüm noktalarının, aydınlatma düzeyleri hesaplanacak noktalara olan mesafeleri ve armatür yükseklikleri (5 m) kullanılarak, her bir armatürün aydınlatma düzeyleri hesaplanacak olan 6 noktaya (A, B, C, D, E ve F) ait “L”uzaklıkları,

$$L = K^2 + 5^2 \quad (4.2)$$

Eşitliği kullanılarak bulunur. Buradan, her bir armatürü aydınlatma düzeyleri hesaplanacak noktalara birleştiren doğru ile bu armatüre ait düşey eksen arasındaki “β” açıları ayrı ayrı olarak,

$$\tan^{-1} \beta = \frac{K}{5} \quad (4.3)$$

(4.3) eşitliğinden elde edilirler (Tablo 4.4:4.9).

**Tablo 4.6.** A noktası için K, L ve  $\beta$  değerleri

Yatay Uzaklık (K)		Hipotenüs Uzaklık (L)		Açı ( $\beta$ )	
I -Ax	14.70818	I -A	15.53482	I -A	71.2247
II-Ax	14.27964	II-A	15.12971	II-A	70.70235
III-Ax	18.35493	III-A	19.02376	III-A	74.762
IV-Ax	24.84973	IV-A	25.34777	IV-A	78.62345
V-Ax	32.14502	V-A	32.53156	V-A	81.15877
VI-Ax	37.96768	VI-A	38.2955	VI-A	82.49783
VII-Ax	43.85357	VII-A	44.13769	VII-A	83.49546
VIII-Ax	49.85544	VIII-A	50.10554	VIII-A	84.27296
IX-Ax	56.15355	IX-A	56.37572	IX-A	84.91171
X-Ax	64.06755	X-A	64.26236	X-A	85.53753
XI-Ax	72.07749	XI-A	72.2507	XI-A	86.03176
XII-Ax	80.81796	XII-A	80.97248	XII-A	86.45977
XIII-Ax	88.84947	XIII-A	88.99005	XIII-A	86.77908
XIV-Ax	97.25267	XIV-A	97.38112	XIV-A	87.05687
XV-Ax	105.6463	XV-A	105.7646	XV-A	87.29034
XVI-Ax	113.9137	XVI-A	114.0234	XVI-A	87.48674

**Tablo 4.7.** B noktası için K, L ve  $\beta$  değerleri

Yatay Uzaklık (K)		Hipotenüs Uzaklık (L)		Açı ( $\beta$ )	
I -Bx	29.64937	I -B	30.06801	I -B	80.42784
II-Bx	21.76616	II-B	22.33306	II-B	77.06278
III-Bx	14.2807	III-B	15.13071	III-B	70.70369
IV-Bx	8.8356	IV-B	10.15223	IV-B	60.4948
V-Bx	9.624023	V-B	10.84536	V-B	62.54662
VI-Bx	14.17799	VI-B	15.03381	VI-B	70.57433
VII-Bx	20.91365	VII-B	21.50304	VII-B	76.55421
VIII-Bx	28.26188	VIII-B	28.70076	VIII-B	79.96723
IX-Bx	35.67382	IX-B	36.02251	IX-B	82.02147
X-Bx	44.57492	X-B	44.85447	X-B	83.59985
XI-Bx	53.09309	XI-B	53.328	XI-B	84.62008
XII-Bx	62.09829	XII-B	62.29926	XII-B	85.39662
XIII-Bx	70.17489	XIII-B	70.35279	XIII-B	85.92453
XIV-Bx	78.54746	XIV-B	78.70643	XIV-B	86.35771
XV-Bx	86.84212	XV-B	86.98594	XV-B	86.70479
XVI-Bx	95.01247	XVI-B	95.14394	XVI-B	86.98761

**Tablo 4.8.** C noktası için K, L ve  $\beta$  değerleri

Yatay Uzaklık (K)		Hipotenüs Uzaklık (L)		Açı ( $\beta$ )	
I-Cx	25.76352	I-C	26.24422	I-C	79.01698
II-Cx	17.35829	II-C	18.06406	II-C	73.93112
III-Cx	8.762935	III-C	10.08905	III-C	60.29156
IV-Cx	1.258284	IV-C	5.155897	IV-C	14.12555
V-Cx	9.130483	V-C	10.40989	V-C	61.29418
VI-Cx	17.09137	VI-C	17.80772	VI-C	73.69341
VII-Cx	25.64804	VII-C	26.13086	VII-C	78.96873
VIII-Cx	33.82862	VIII-C	34.19614	VIII-C	81.59234
IX-Cx	41.62627	IX-C	41.92549	IX-C	83.15065
X-Cx	50.76056	X-C	51.00622	X-C	84.37442
XI-Cx	59.33903	XI-C	59.54931	XI-C	85.18355
XII-Cx	68.33564	XII-C	68.51831	XII-C	85.81522
XIII-Cx	76.35702	XIII-C	76.52055	XIII-C	86.25351
XIV-Cx	84.65913	XIV-C	84.80665	XIV-C	86.62002
XV-Cx	92.86958	XV-C	93.00408	XV-C	86.91823
XVI-Cx	100.9635	XVI-C	101.0873	XVI-C	87.16487

**Tablo 4.9.** D noktası için K, L ve  $\beta$  değerleri

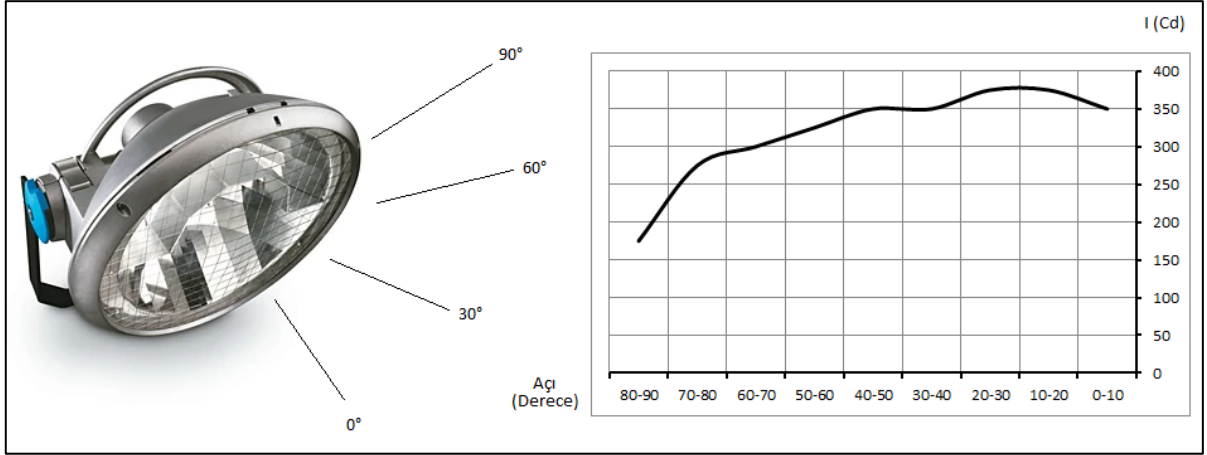
Yatay Uzaklık (K)		Hipotenüs Uzaklık (L)		Açı ( $\beta$ )	
I-Dx	53.06067	I-D	53.29573	I-D	84.61681
II-Dx	45.21346	II-D	45.48908	II-D	83.6895
III-Dx	37.37646	III-D	37.70942	III-D	82.38055
IV-Dx	29.69452	IV-D	30.11253	IV-D	80.44212
V-Dx	21.96251	V-D	22.52448	V-D	77.1746
VI-Dx	13.97031	VI-D	14.83811	VI-D	70.30762
VII-Dx	5.167457	VII-D	7.190452	VII-D	45.94357
VIII-Dx	4.813593	VIII-D	6.94051	VIII-D	43.91181
IX-Dx	12.49177	IX-D	13.45527	IX-D	68.18557
X-Dx	21.70523	X-D	22.27368	X-D	77.02769
XI-Dx	30.28591	XI-D	30.69586	XI-D	80.62541
XII-Dx	39.25192	XII-D	39.56909	XII-D	82.74063
XIII-Dx	47.23725	XIII-D	47.50113	XIII-D	83.95782
XIV-Dx	55.51635	XIV-D	55.74106	XIV-D	84.85362
XV-Dx	63.71944	XV-D	63.91531	XV-D	85.51325
XVI-Dx	71.82061	XVI-D	71.99445	XVI-D	86.01761

**Tablo 4.10.** E noktası için K, L ve  $\beta$  değerleri

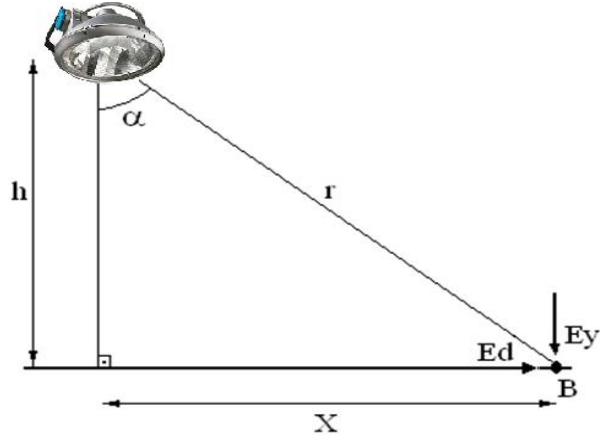
Yatay Uzaklık (K)		Hipotenüs Uzaklık (L)		Açı ( $\beta$ )	
I -Ex	80.44696	I -E	80.60219	I -E	86.44348
II-Ex	72.61073	II-E	72.78268	II-E	86.06081
III-Ex	64.67865	III-E	64.87162	III-E	85.57953
IV-Ex	56.67868	IV-E	56.89879	IV-E	84.95861
V-Ex	48.25912	V-E	48.51744	V-E	84.08484
VI-Ex	39.74833	VI-E	40.06157	VI-E	82.83034
VII-Ex	30.64967	VII-E	31.05482	VII-E	80.73473
VIII-Ex	22.59595	VIII-E	23.14254	VIII-E	77.52272
IX-Ex	15.68202	IX-E	16.45982	IX-E	72.31582
X-Ex	9.773144	X-E	10.9779	X-E	62.90544
XI-Ex	9.565315	XI-E	10.7933	XI-E	62.40294
XII-Ex	15.22992	XII-E	16.02967	XII-E	71.82493
XIII-Ex	21.94518	XIII-E	22.50757	XIII-E	77.1648
XIV-Ex	29.52227	XIV-E	29.94269	XIV-E	80.38739
XV-Ex	37.27817	XV-E	37.61199	XV-E	82.3607
XVI-Ex	45.10693	XVI-E	45.3832	XVI-E	83.67472

**Tablo 4.11.** F noktası için K, L ve  $\beta$  değerleri

Yatay Uzaklık (K)		Hipotenüs Uzaklık (L)		Açı ( $\beta$ )	
I -Fx	91.68702	I -F	91.82326	I -F	86.87856
II-Fx	84.75834	II-F	84.90569	II-F	86.62396
III-Fx	77.89351	III-F	78.05382	III-F	86.32721
IV-Fx	71.09562	IV-F	71.27122	IV-F	85.97714
V-Fx	63.87883	V-F	64.07422	V-F	85.5244
VI-Fx	55.86407	VI-F	56.08739	VI-F	84.88549
VII-Fx	46.61599	VII-F	46.88337	VII-F	83.8779
VIII-Fx	37.91673	VIII-F	38.24497	VIII-F	82.48787
IX-Fx	29.92027	IX-F	30.33517	IX-F	80.51292
X-Fx	20.85314	X-F	21.4442	X-F	76.51662
XI-Fx	13.22695	XI-F	14.14045	XI-F	69.29261
XII-Fx	8.557257	XII-F	9.910936	XII-F	59.70228
XIII-Fx	11.564	XIII-F	12.59866	XIII-F	66.61749
XIV-Fx	18.51432	XIV-F	19.17759	XIV-F	74.88715
XV-Fx	26.45391	XV-F	26.92228	XV-F	79.2969
XVI-Fx	34.50942	XVI-F	34.86975	XVI-F	81.7559



Şekil 4.13. Tasarımda kullanılan armatür ve ışık dağılım eğrisi



Şekil 4.14. Tasarımda kullanılan armatür ve ışık dağılım eğrisi

$$E_y = \frac{I}{h^2} \cos^3 \alpha \quad (4.4)$$

$$E_d = \frac{I}{\left(\frac{h}{\cos \alpha}\right)^2} \times \sin \alpha \quad (4.5)$$

**Tablo 4.12.** Kullanılan armatürün karakteristik özellikleri

Fiziksel Özellikleri	
Gövde Özellikleri	: Alüminyum enjeksiyon elektrostatik toz boyalı gövde Tüm bağlantı elemanları paslanmaz Silikon Conta
Difüzör	: Temperli cam
Koruma Sınıfı	: IP65
Ağırlık	: 2.4 kg
Ölçüler	: 200 x 325 x 65

Performans Özellikleri	
Çalışma Sıcaklığı	: -30°/+45° C
Dönme Açısı	: 160°
Işık Kaynağı	: Power LED
Led Adedi	: 8
Renk Seçenekleri	: Soğuk beyaz, Sıcak beyaz, Doğal beyaz
Açı Seçenekleri	: Geniş Açı

Tablo 4.4. ile tablo 4.9. arası tablolardaki açı ( $\beta$ ) değerleri esas alınarak, şekil 4.12'den elde edilen ışık dağılım veri tabanı, şekil 4.13 teki geometrik yapı, Eşitlik 4.4 ve Eşitlik 4.5 kullanılarak, her bir armatürün aydınlatma düzeyi hesaplanan noktalara yönlendirdiği ışık şiddeti değerleri Tablo 4.10'daki gibi elde edilir. Bir sonraki aşama ise her bir armatürün aydınlatma düzeyi hesaplanan noktalarda oluşturduğu yatay ve düşey aydınlık düzeylerinin hesaplanmasıdır (Tablo 4.11 ve Tablo 4.12).

**Tablo 4.13.** Aydınlatma düzeyi hesaplanan noktalara, armatürlerin yönlendirdiği ışık şiddetleri

Yön	Candela	Yön	Candela	Yön	Candela	Yön	Candela	Yön	Candela	Yön	Candela
IA	275	IB	175	IC	275	ID	175	IE	175	IF	175
IIA	275	IIB	275	IIC	275	IID	175	IIE	175	IIF	175
IIIA	275	IIIB	275	IIIC	300	IIID	175	IIIE	175	IIIF	175
IIVA	275	IIVB	300	IIVC	375	IIVD	175	IIVE	175	IIVF	175
IIIA	175	IIIB	300	IIIC	300	IIID	275	IIIE	175	IIIF	175
IIIA	175	IIIB	275	IIIC	275	IIID	275	IIIE	175	IIIF	175
IIIA	175	IIIB	275	IIIC	275	IIID	350	IIIE	175	IIIF	175
IIIA	175	IIIB	275	IIIC	175	IIID	350	IIIE	275	IIIF	175
IIIA	175	IIIB	175	IIIC	175	IIID	300	IIIE	275	IIIF	175
IIIA	175	IIIB	175	IIIC	175	IIID	275	IIIE	300	IIIF	275
IIIA	175	IIIB	175	IIIC	175	IIID	175	IIIE	300	IIIF	300
IIIA	175	IIIB	175	IIIC	175	IIID	175	IIIE	275	IIIF	325
IIIA	175	IIIB	175	IIIC	175	IIID	175	IIIE	275	IIIF	300
IIIA	175	IIIB	175	IIIC	175	IIID	175	IIIE	175	IIIF	275
IIIA	175	IIIB	175	IIIC	175	IIID	175	IIIE	175	IIIF	275
IIIA	175	IIIB	175	IIIC	175	IIID	175	IIIE	175	IIIF	275
IIIA	175	IIIB	175	IIIC	175	IIID	175	IIIE	175	IIIF	175

**Tablo 4.14.** Her bir armatürün aydınlatma düzeyi hesaplanan noktalarda oluşturduğu yatay aydınlık düzeyleri

EIAy	4.401139	EIBy	0.386256	EICy	0.912815	EIDy	0.06936	EIEy	0.020052	EIFy	0.013562
EIIAy	4.764226	EIIBy	1.481286	EIIICy	2.799227	EIIDy	0.11155	EIIIEy	0.027234	EIIIFy	0.017155
EIIIAy	2.396596	EIIIBy	4.763276	EIIICy	17.52754	EIIIDy	0.195812	EIIIEy	0.038461	EIIIFy	0.02208
EIVAy	1.013129	EIVBy	17.20235	EIVCy	164.1609	EIVDy	0.384545	EIVEy	0.057001	EIVFy	0.029003
EVAy	0.304982	EVBBy	14.11044	EVCy	15.95639	EVDy	1.443843	EVEy	0.091938	EVFy	0.039915
EVIAY	0.186959	EVIBy	4.855976	EVICy	2.921856	EVIDy	5.050659	EVIIEy	0.163307	EVIIFy	0.059511
EVIIAy	0.122113	EVIIBy	1.659527	EVIICy	0.924747	EVIIDy	56.48728	EVIIEy	0.350592	EVIIFy	0.10189
EVIIIAy	0.08347	EVIIBy	0.697917	EVIICy	0.262578	EVIIDy	62.81237	EVIIEy	1.331224	EVIIFy	0.187701
EIXAy	0.058602	EIXBy	0.22463	EIXCy	0.14248	EIXDy	7.389162	EIXEy	3.700056	EIXFy	0.376141
EXAy	0.039566	EXBy	0.116352	EXCy	0.079126	EXDy	1.493166	EXEy	13.6055	EXFy	1.673226
EXIAy	0.02784	EXIBy	0.069235	EXICy	0.049723	EXIDy	0.363036	EXIEy	14.31562	EXIFy	6.366238
EXIIAy	0.019778	EXIIBy	0.043425	EXIICy	0.032641	EXIIDy	0.169481	EXIIEy	4.005992	EXIIFy	20.03045
EXIIIAy	0.014899	EXIIBy	0.030154	EXIICy	0.023434	EXIIDy	0.097966	EXIIEy	1.447098	EXIIFy	9.001185
EXIVAy	0.01137	EXIVBy	0.021536	EXIVCy	0.017215	EXIVDy	0.060627	EXIVEy	0.391126	EXIVFy	2.339387
EXVAy	0.008875	EXVBy	0.015953	EXVCy	0.013052	EXVDy	0.040214	EXVEy	0.197338	EXVFy	0.845568
EXVIAy	0.007083	EXVIBy	0.012191	EXVICy	0.010165	EXVIDy	0.028138	EXVIEy	0.112332	EXVIFy	0.247652

**Tablo 4.15.** Her bir armatürün aydınlatma düzeyi hesaplanan noktalarda oluşturduğu düşey aydınlık düzeyleri

EIA <sub>d</sub>	12.94655	EIB <sub>d</sub>	2.29045	EIC <sub>d</sub>	4.703467	EID <sub>d</sub>	0.736063	EIE <sub>d</sub>	0.322618	EIF <sub>d</sub>	0.248696
EIIA <sub>d</sub>	13.60628	EIIB <sub>d</sub>	6.448383	EIIIC <sub>d</sub>	9.717957	EIID <sub>d</sub>	1.008708	EIIIE <sub>d</sub>	0.39549	EIIIF <sub>d</sub>	0.290798
EIIIA <sub>d</sub>	8.79787	EIIIB <sub>d</sub>	13.60459	EIIIC <sub>d</sub>	30.71855	EIIID <sub>d</sub>	1.463754	EIIIE <sub>d</sub>	0.497526	EIIIF <sub>d</sub>	0.343984
EIVAd	5.035199	EIVB <sub>d</sub>	30.39862	EIVC <sub>d</sub>	41.31221	EIVD <sub>d</sub>	2.283778	EIVE <sub>d</sub>	0.646145	EIVF <sub>d</sub>	0.412401
EVA <sub>d</sub>	1.960732	EVB <sub>d</sub>	27.15985	EVC <sub>d</sub>	29.13791	EVD <sub>d</sub>	6.342083	EVE <sub>d</sub>	0.88737	EVF <sub>d</sub>	0.509949
EVIAd	1.41968	EVI <sub>d</sub>	13.7696	EVIC <sub>d</sub>	9.987706	EVID <sub>d</sub>	14.11185	EVI <sub>d</sub>	1.298238	EVI <sub>d</sub>	0.6649
EVIIA <sub>d</sub>	1.071015	EVIIB <sub>d</sub>	6.941353	EVIIC <sub>d</sub>	4.743588	EVIID <sub>d</sub>	58.37911	EVIIE <sub>d</sub>	2.149106	EVIIF <sub>d</sub>	0.949943
EVIIIA <sub>d</sub>	0.83229	EVIIB <sub>d</sub>	3.944888	EVIIC <sub>d</sub>	1.77653	EVIID <sub>d</sub>	60.47063	EVIIE <sub>d</sub>	6.016054	EVIIF <sub>d</sub>	1.4234
EIXAd	0.658143	EIXB <sub>d</sub>	1.602681	EIXC <sub>d</sub>	1.186185	EIXD <sub>d</sub>	18.46074	EIXE <sub>d</sub>	11.60487	EIXF <sub>d</sub>	2.250845
EXAd	0.506976	EXB <sub>d</sub>	1.037272	EXC <sub>d</sub>	0.803297	EXD <sub>d</sub>	6.4819	EXE <sub>d</sub>	26.5937	EXF <sub>d</sub>	6.978403
EXIA <sub>d</sub>	0.401322	EXIB <sub>d</sub>	0.735176	EXIC <sub>d</sub>	0.590105	EXID <sub>d</sub>	2.198975	EXIE <sub>d</sub>	27.38668	EXIF <sub>d</sub>	16.84119
EXIIA <sub>d</sub>	0.31968	EXIIB <sub>d</sub>	0.539325	EXIIC <sub>d</sub>	0.446115	EXIID <sub>d</sub>	1.330491	EXIIE <sub>d</sub>	12.20219	EXIIF <sub>d</sub>	34.28114
EXIIIA <sub>d</sub>	0.264758	EXIIB <sub>d</sub>	0.423211	EXIIC <sub>d</sub>	0.357877	EXIID <sub>d</sub>	0.925533	EXIIE <sub>d</sub>	6.351365	EXIIF <sub>d</sub>	20.81795
EXIVAd	0.221155	EXIVB <sub>d</sub>	0.338315	EXIVC <sub>d</sub>	0.291476	EXIVD <sub>d</sub>	0.673154	EXIVE <sub>d</sub>	2.309387	EXIVF <sub>d</sub>	8.662429
EXVA <sub>d</sub>	0.187522	EXVB <sub>d</sub>	0.277078	EXVC <sub>d</sub>	0.24243	EXVD <sub>d</sub>	0.51248	EXVE <sub>d</sub>	1.471278	EXVF <sub>d</sub>	4.473714
EXVIA <sub>d</sub>	0.161366	EXVIB <sub>d</sub>	0.231663	EXVIC <sub>d</sub>	0.205255	EXVID <sub>d</sub>	0.404177	EXVIE <sub>d</sub>	1.013391	EXVIF <sub>d</sub>	1.709268

Buradan, aydınlatma düzeyi hesaplanan noktalarda oluşan yatay ve düşey aydınlık düzeyleri Tablo 4.13'deki gibi aritmetik toplamlar ile elde edilir.

**Tablo 4.16.** Tablo Aydınlatma düzeyi hesaplanan noktalarda oluşan yatay ve düşey aydınlık düzeyleri

Nokta	Eyatay	Edüşey
A	13.46063	48.39055
B	45.69051	109.7424
C	205.8339	136.2207
D	136.1972	175.7834
E	39.85487	101.1454
F	41.35066	100.859

Elde edilen bu verilerden, aydınlatma düzeyi hesaplanan noktalarda oluşan minimum, maksimum ve ortalama, yatay ve düşey aydınlık düzeyleri, tablo 4.14'deki gibi elde edilebilir.

**Tablo 4.17.** Aydınlatma düzeyi hesaplanan noktalarda oluşan minimum, maksimum ve ortalama, yatay ve düşey aydınlık düzeyleri

Eymin	13.46063	Edmin	48.39055
Eymax	205.8339	Edmax	175.7834
Eyort	80.39796	Edort	112.0236

Aydınlatma düzeyi hesaplanan noktalarda oluşan aydınlatma dağılım katsayıları ise Tablo 4.16'daki gibi bulunur.

**Tablo 4.18.** Aydınlatma düzeyi hesaplanan noktalarda oluşan yatay ve düşey aydınlatma dağılım katsayıları

Uhy1	0.065396	Uhd1	0.275285
Uhy2	0.167425	Uhd2	0.431967

## 5. SONUÇ

Tünel aydınlatma uygulamaları, özellikle, araçların sürüş güvenliğini sağlama bakımından büyük önem arz etmektedir. Öyle ki demiryollarında ve karayollarında sıklıkla kullanılan tünel yapıların güvenliği; taşıtlardaki hız ve konfor düzeyinin artmasıyla birlikte ihtiyaçları karşılayabilecek düzeye getirilmelidir. Etkin aydınlatma, tünellerdeki güvenlik koşullarının sağlanmasında öncelikli koşul olarak kabul edilmektedir.

Çalışmamızda öncelikle DIALux tasarımı olan doğrusal eksenli yüksek hızlı tren tüneline ışık verilerini saha ölçümleriyle kıyaslanmıştır.

Sonraki aşamada ise tünellerde kurp olarak adlandırılan eksenel eğilme koşullarının var olabileceği durumlarda eksenel kaymanın aydınlatma değerleri üzerinde ne gibi etki yapabileceğini; tünel içerisindeki farklı armatürlerin farklı mesafe ve açılara göre aydınlatma düzeylerini inceleyerek anlamaya çalışılmıştır.

Burada, standart yapılardan farklı olan çift kurp eksene sahip bir tünelde aydınlatma tasarımının nasıl gerçekleştirildiği aşama açıklanmıştır. Bu tanımlamalar, benzer aydınlatma uygulamalarında tasarımın nasıl gerçekleştirildiğini açıklamaya yönelik olup, aslında burada da tüm işlemler bilgisayar destekli olarak gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada, ele alınan kurp eksenlere sahip tünel için, armatür konumları ve aydınlatma düzeyi hesaplanacak konumların koordinat bilgileri, tünel yüksekliği ile birlikte başlangıç verilerinin temelini oluşturmuştur.

Söz konusu veriler ışığında seçilmiş olan armatüre bağlı olarak dimlenebilme özelliğinin koordinat esaslı tasarımını yapabilme olanağı; aydınlatmanın etkin ve verimli olmasını sağlamaktadır. Aydınlatma tasarımı yönünden optimum koşulların sağlandığı bir sürüş ortamı tünel güvenliğinin sağlanmasında başlangıç koşul olarak kabul edilmektedir.

Koordinatlara bağlı aydınlatma tasarımı yapılırken Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (CIE) 'nun tünel aydınlatması konusunda önerileri doğrultusunda hazırlanan kılavuzlardaki esaslar dikkate alınmıştır. Bu kılavuzlarda tünellerde giriş, geçiş, adaptasyon ve çıkış bölgelerinde gün ışığının etkisine bağlı olarak aydınlatma düzeylerinde yapılması gereken değişikliklerden bahsedilmektedir.

Çalışmada, dikkate alınacak noktaların koordinat verileri değiştirilerek, farklı yapıdaki tünellere uyarlanabilme imkânı mevcuttur.

## KAYNAKÇA

**Akbulut, A.** (2006). Tünel aydınlatması.

**Büyükknacı, B.** (2008). *Yol Aydınlatması Otomasyonu* (Doctoral dissertation, Enerji Enstitüsü).

**Chen, H. Y., Whang, A. J. W., Chen, Y. Y., & Chou, C. H.** (2020). The hybrid lighting system with natural light and LED for tunnel lighting. *Optik*, 203, 163958.

**CIE Pub. 47,** (1979). Road Lighting for Wet Conditions, International Commission on Illumination, Viyana

**CIE Pub.115,** (1995). Recommendations for the Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic, International Commission on Illumination, Viyana

**CIE Pub 140,** (2000). Road Lighting Calculations. International Commission on Illumination, Viyana

**CIE Pub 140,** (2000). Road Lighting Calculations. International Commission on Illumination, Viyana

**CIE Pub. 154,** (2003). The Maintenance of Outdoor Lighting Systems, International Commission on Illumination, Viyana.

**Çelebi, F., & Karatekin, C.** (2014). İstanbul Halit Ulukurt Tünelinde Eşik Parıltı Değeri ve Fren Mesafesine Göre LED Armatür ile Aydınlatma Tasarımı.

**Erçetin, R.** (1999). *Optimal Yol aydınlatması* (Doctoral dissertation, Marmara Üniversitesi (Turkey)).

**İzbek, K.K.,** (2006), Tünel Aydınlatma Tekniği, Ege Üniversitesi Basımevi

**Jianyou, Y., Zhizhong, L., Jianbo, W., Yanxin, C., & Shengshen, G.** (2021). Simulation and Analysis of glare effect of two lane tunnel lighting under symmetrical lighting arrangement. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 636, No. 1, p. 012003). IOP Publishing.

**Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) Kurumsal Tarihçe** (2022)

<https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Kurumsal/Tarihce.aspx>

**Nazım, İmal., & Taşkan, B.** (2016). Yol Aydınlatmasında Flicker Etkisi Esaslı Direk Açıklığı Tespiti. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(2), 462-468.

**Onaygil, S., Güler, Ö., & Erkin, E.** (2009). Yol Aydınlatmalarında Led Kullanımı. *V. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu ve Sergisi*.

**Özkaya, M.**, (2004) Aydınlatma Tekniği, Birsen Yayınevi, İstanbul.

**Su, B., Hu, J., Zeng, J., & Wang, R.** (2022). Traffic Safety Improvement via Optimizing Light Environment in Highway Tunnels. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(14), 8517.

**Sucugil, R. M.** (2000). *Tünel Aydınlatma Sistemlerinde Enerji Tasarrufu ve Aydınlatma Teknolojisi* (Doctoral dissertation, Marmara Üniversitesi (Turkey)).

**Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) İstatistikler** (2022)

<https://www.tcdd.gov.tr/kurumsal/istatistikler>

**Yüce, D., & Ünsalan, C. P. H.** Aydınlatmada Geleneksel Işık Kaynaklarından Led'e Kadar Uzanan Tarihçe

**Zhang, Y., Zhuo, X., Guo, W., Wang, X., & Zhao, Z.** (2019). Lighting environment optimization of highway tunnel entrance based on simulation research. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(12), 2195.