

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 DANIŞMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ NAZIM 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 DANIŞMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ NAZIM 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 sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |  |                            |          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|----------------------------|----------|
| Bu çalışmanın,<br>Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda;<br>projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise<br>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><br>.....                                                                                                                                                                                                                                                                               |  |                            |          |
| <b>ETİK KURUL onayı var ise;</b>                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |                            |          |
| <b>ETİK KURUL karar tarih/sayı:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                       |  | ...../.....<br>.....       |          |

**Ömer Önder ISIYEL**

**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. Yolu yansıtmalı 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 |

## TABLÖLAR 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. Uzak açı .....                                                           | 6  |
| Şekil 2.3. Aydınlanma düzeyi belirlemede kullanılan parametreler .....              | 7  |
| Şekil 2.4. Parıltının belirlenmesinde kullanılan açıları .....                      | 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, transvers ve balasttan oluşan demiryolu üstyapı elemanları .....    | 20 |
| Şekil 3.2. Basit kurplu yol planı.....                                              | 22 |
| Şekil 3.3. Ters yerleştirilmiş yatay karp ve birleşik karp.....                     | 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:** Aydınlık 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 parlaklık düzeyleri de farklılık gösterebilmektedir. Günümüz dünyasında yaşanmakta olan enerji krizleri, enerjiye olan talep fazlalığı göz önüne alındığında yapmayı amaçladığımız yol aydınlatması 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 açisal 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 deverlerinde 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 kararlar 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.

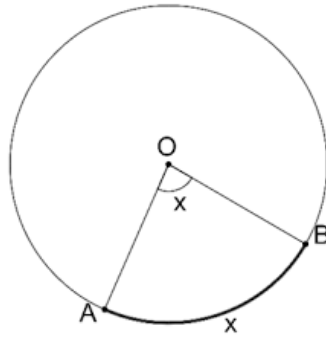
Taşıtların sürücülerinin görüşünü seyir halindeyken etkileyen pek çok parametre bulunur. Trafikteki diğer taşıtlar, yolcular, yayalar, çevredeki ışık yayan cisimler gibi. Ayrıca meteorolojik etkenlerde sürücünün görüş kalitesini doğrudan etkilemektedir. Yağışlı bir havada yol örtüsünün ayna gibi davranarak 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 kullanacak olduğumuz fotometrik kavramlardan bahsedilmiştir.

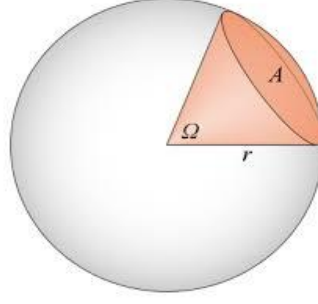
#### 2.1.1. Düzlem açısı ve uzay açısı

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 duyarlılık 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:

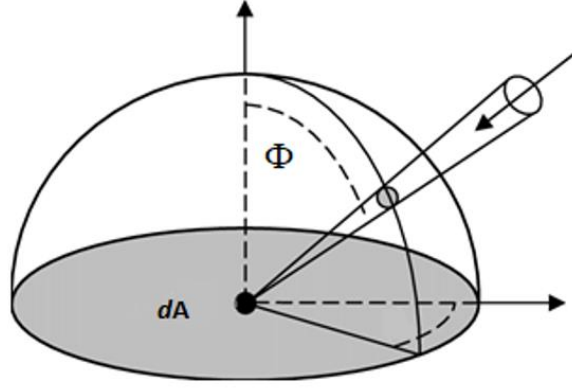
$$I_\alpha = \lim_{\nabla\Omega_\alpha \rightarrow 0} \frac{\nabla\Phi}{\nabla\Omega_\alpha} = \frac{d\Phi}{d\Omega_\alpha} \quad (2.2)$$

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 (Sucuğil, 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**

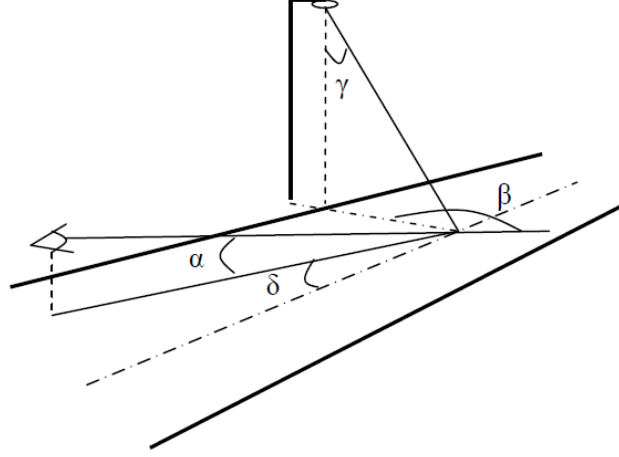
Parıltının oluşumu sadece ışık yayan yüzey veya alanlarda değil aynı zamanda ışığın yansıdığı karanlık alanlarda da gerçekleşebilir. Yol yüzeyi bu duruma örnektir. Yol yüzeyinin yansıtma ile ilişkili davranışlarını bilmek aydınlatma tasarımı için oldukça önemlidir. Yol yüzeyine ait yansıtma karakteristikleri:

- 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  $\alpha \approx 1$  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 tasarımıda 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 olan 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 (Büyükkıncı, 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)<br>Trafik yoğunluğu ve yolun karmaşıklık düzeyi;<br>Yüksek<br>Orta<br>Düşük           | M1<br>M2<br>M3           |
| Devlet yolu ve il yolları (tek yönlü veya iki yönlü; kavşaklar ve bağlantı noktaları ile şehir geçişleri ve çevre yolları dahil)<br>Trafik kontrolü ve yol kullanıcılarının tiplerine göre ayrımı;<br>Zayıf<br>İyi | M1<br>M2                 |
| Şehir içi ana güzergahlar (bulvarlar ve caddeler), ring yolları, dağıtıcı yollar<br>Trafik kontrolü ve yol kullanıcılarının tiplerine göre;<br>Zayıf<br>İyi                                                        | M2<br>M3                 |
| Şehir içi yollar (yerleşim alanlarına giriş çıkışın yapıldığı ana yollar ve bağlantı yolları)<br>Trafik kontrolü ve yol kullanıcılarının tiplerine göre ayrımı;<br>Zayıf<br>İyi                                    | M4<br>M5                 |

**Kaynak:** (Büyükkıncı,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:** (Büyükkıncı,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)<br>-Hız $\geq 90$ km/h;<br>-Hız $< 90$ km/h                                                                                                                                                                                                     | M1<br>M2             |
| Şehir içi ana güzergahlar (bulvarlar ve caddeler; ring yolları, dağıtıcı yollar)<br>-50 km/h $\leq$ Hız $< 90$ km/h; 3 km’den kısa aralıklarla kavşak, yonca ayrımı var;<br>-50 km/h $\leq$ Hız $< 90$ km/h; 3 km’den kısa aralıklarla kavşak, yonca ayrımı yok;                                                                                                    | M1<br>M2             |
| Şehir içi yollar (verleşim alanlarına giriş çıkışın yapıldığı yollar ve bağlantı yolları)<br>-Hız $\geq 50$ km/h; 3km’den kısa aralıklarla kavşak, yonca var;<br>-Hız $\geq 50$ km/h; 3km’den kısa aralıklarla kavşak, yonca yok;<br>-Hız $< 50$ km/h; 3km’den kısa aralıklarla kavşak, yonca var;<br>-Hız $< 50$ km/h; 3km’den kısa aralıklarla kavşak, yonca yok; | M3<br>M4<br>M4<br>M5 |
| Yerleşim bölgelerindeki yollar<br>-30 $\leq$ hız $< 50$ km/h; suç oranı yüksek,<br>-30 $\leq$ hız $< 50$ km/h; suç oranı normal,<br>-Hız $< 30$ km/h; suç oranı yüksek,<br>-Hız $< 30$ km/h; suç oranı yüksek;                                                                                                                                                      | M4<br>M5<br>M5<br>M6 |

**Kaynak:** (Büyükkıncı,2008)

M=6-AFT

M; Yol aydınlatma sınıfı

AFT; Ağırlık faktörü terimi

**Tablo 2.3.** Aydınlatma sınıfı parametreleri

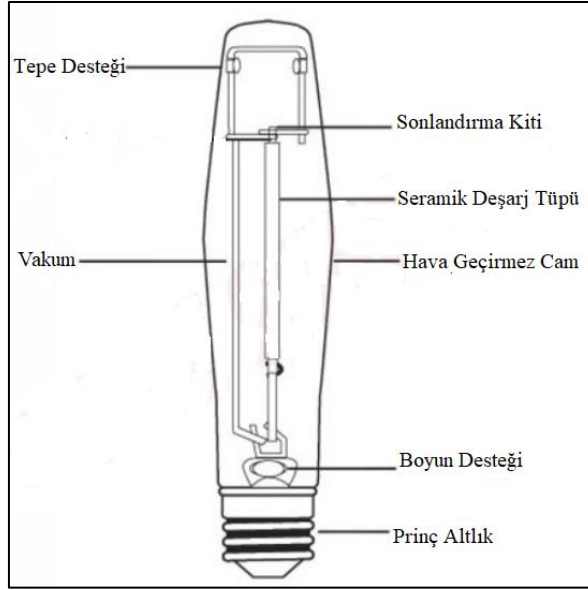
| Parametre                            | Seçenekler                                       | Ağırlık Faktörü (AF) | Seçilen AF |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------|------------|
| Hız                                  | Yüksek                                           | 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<br>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 günden güne ekonomik verimlilik ve ömür açısından çok daha avantajlı olan LED (light-emitting diode) lambalara bırakmaya başlamıştır.





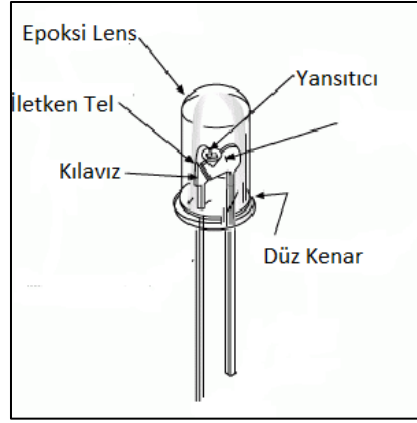
**Şekil 2.6** Yüksek basınçlı sodyum buharlı lamba

### 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 azaltmak 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 sarfıyatının 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 karşılaması 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.



### 3.3.1. Basit kurplar

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

### 3.3.2. Birleşik kurplar

Birinci yola ait ikinci kurbun, 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 yönlerde kıvrıma sahip kurpların ardışık sıralanması gösterilmektedir. Aynı şekilde birleşik kurp yapısının faklı 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.

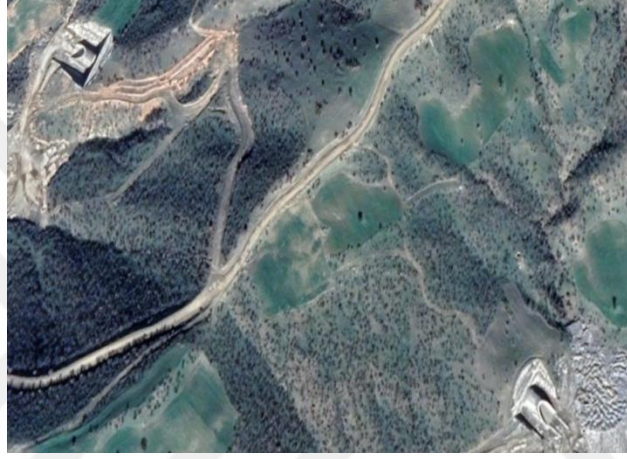
### 3.5. Tünel Yapılar

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 kısılmasından 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 farlı 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).

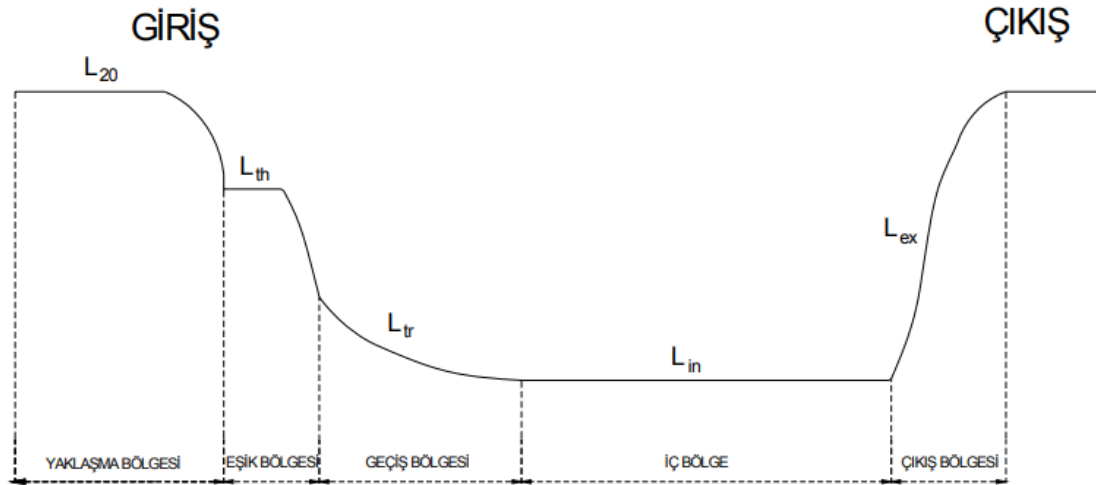
#### *Uzun Tüneller*

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

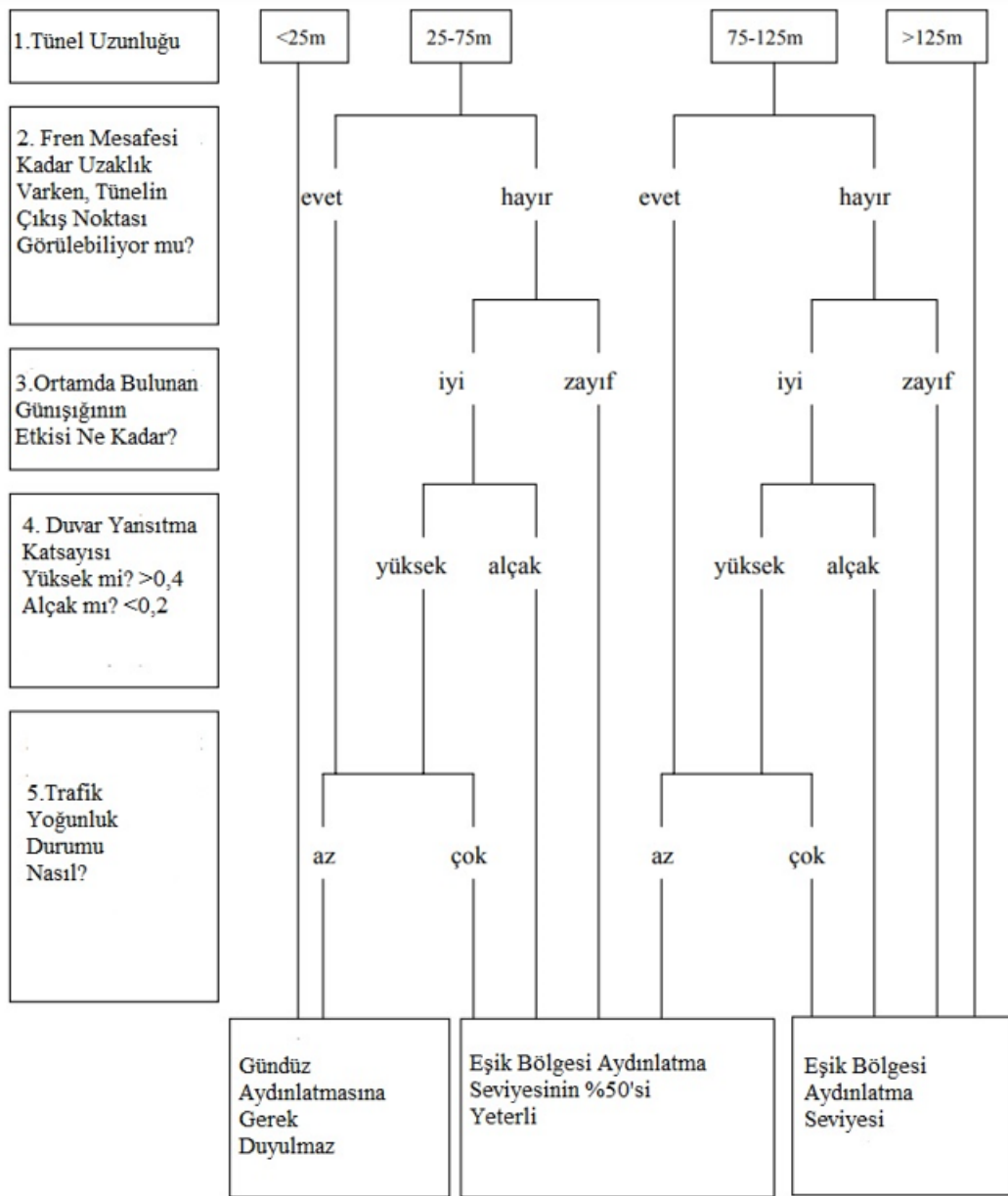
Aydınlatılmasında hassasiyet gerektiren uzunluğa sahip tünellerin gündüz koşullarında aydınlatılması için daha önemli şartların sağlanması gerekmektedir. Bunun sebebi gündüz var olan gün ışığıdır. Adaptasyon sorunu yaşanabilmektedir. Tünele ilk girildiği zaman kısa süreliğine körlük hissi yaşanabilmektedir. Bu olumsuz durumu ortadan kaldıracı olarak 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

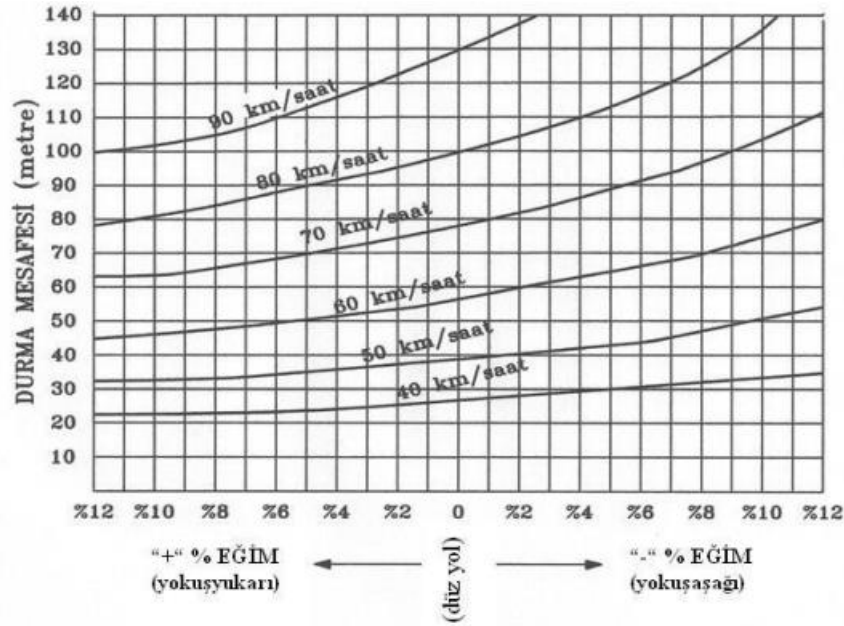
**Kaynak:** (CIE)

### 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 sürücüye 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 olamayacağı 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 parıltı düzeyleri  $1-15 \text{cd/m}^2$  arasında seçilmesi tavsiye edilmiştir. Fakat adaptasyon süresi aydınlıktan karanlığa geçildiğinde uzun zaman aldığı için minimum parıltı değerinin  $3 \text{cd/m}^2$  değerinin altında olmaması istenmektedir (Onaygil vd., 2009).

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

| Fren Mesafesi (m) | Trafik Yoğunluğuna bağlı olarak Tünel iç Parıltıları ( $\text{cd/m}$ ) |                                       |                      |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
|                   | Düşük (Araç/h<100)                                                     | Orta ( $100 < \text{Araç/h} < 1000$ ) | 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 parıltısından yeniden etkilenmeye başladığı bölge olarak adlandırılır. Adaptasyon olayı düşük parıltıdan yükseğe doğru olduğu için aydınlık adaptasyonu olarak adlandırılır ve diğer duruma göre daha kolay olur. Kolay adaptasyon sebebiyle çoğu uygulamada iç bölgede sağlanan parıltı 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 parıltı 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. Tünellerde 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 bulundurmak 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

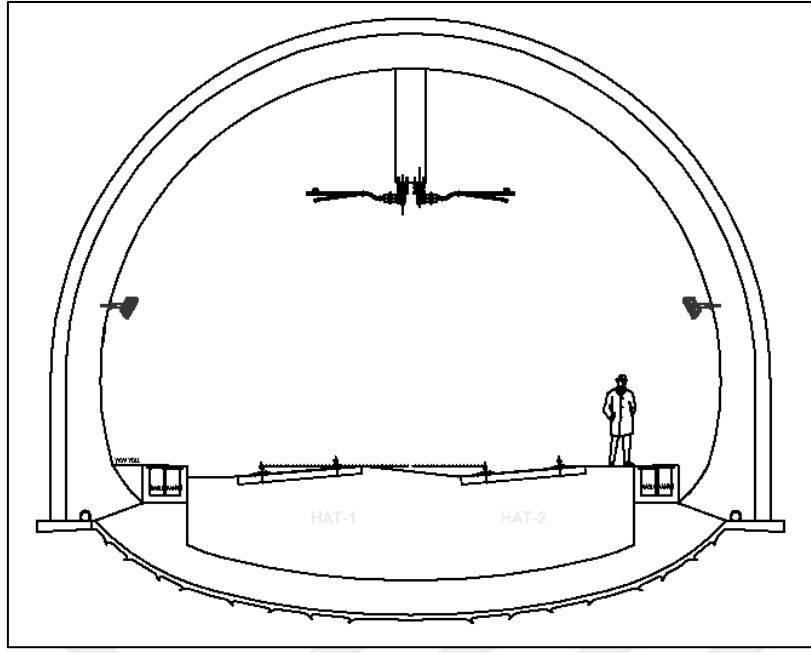
#### **4. TÜNEL AYDINLATMA UYGULAMALARI**

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.

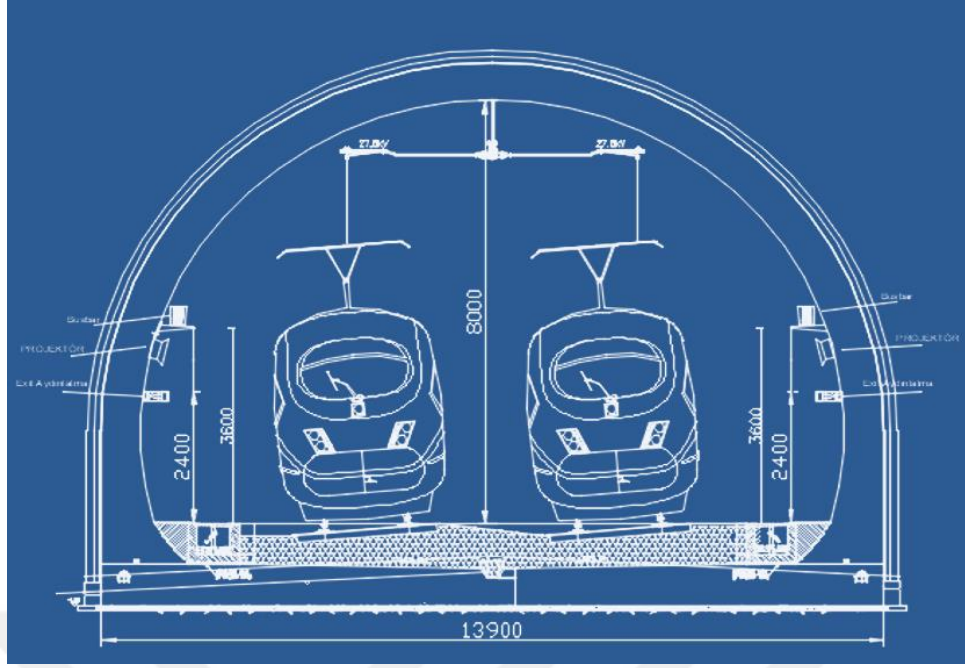
Çalışmamızda, Ankara-İstanbul arasında hizmet veren yüksek hızlı trenin Bilecik iline bağlı Bozyk ilçesi sınırlarında bulunan 3304m uzunluğundaki demiryolu tünelinin lineer yapıya sahip olan kısmının aydınlatma tasarımı incelenmiştir.



**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.

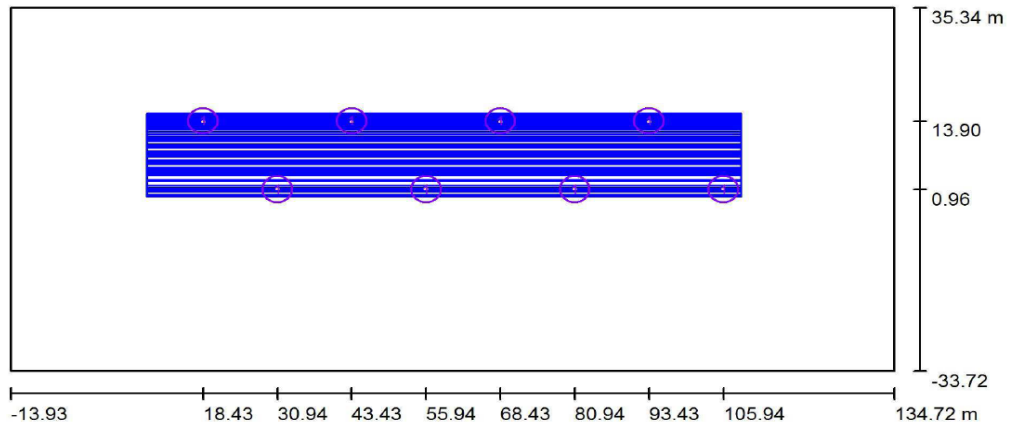
Tünel yerleşim planında görüldüğü üzere ana aydınlatma armatürlerine ve acil durum kaçış armatürlerine enerji iletimi busbar aracılığıyla sağlanmaktadır. Ayrıca armatürler ve iletim hatlarının konumlandırılmasında katener hattından geçen 27500 volt gerilim göz önünde bulundurularak hassasiyet gösterilmiştir. 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

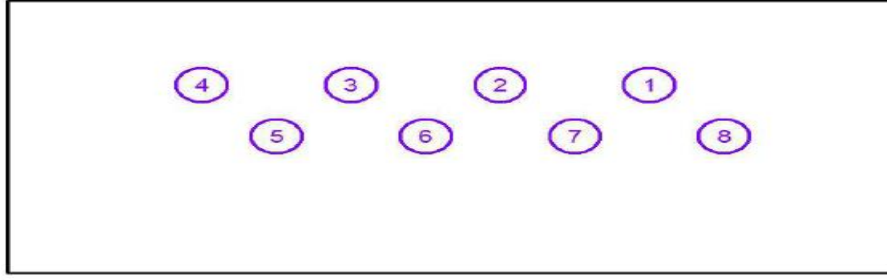
Armatürlerin sadece tren geçişi esnasında yanmasını sağlayan sensörler mevcuttur, bu sensörler sayesinde gereksiz enerji sarfiyatının önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Acil durum kaçış armatürleri ise 5W güce sahip olup IP65 koruma sınıfı niteliklerini bulundurmaktadır. Enerji kesintisi durumunda 3 saat 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 |

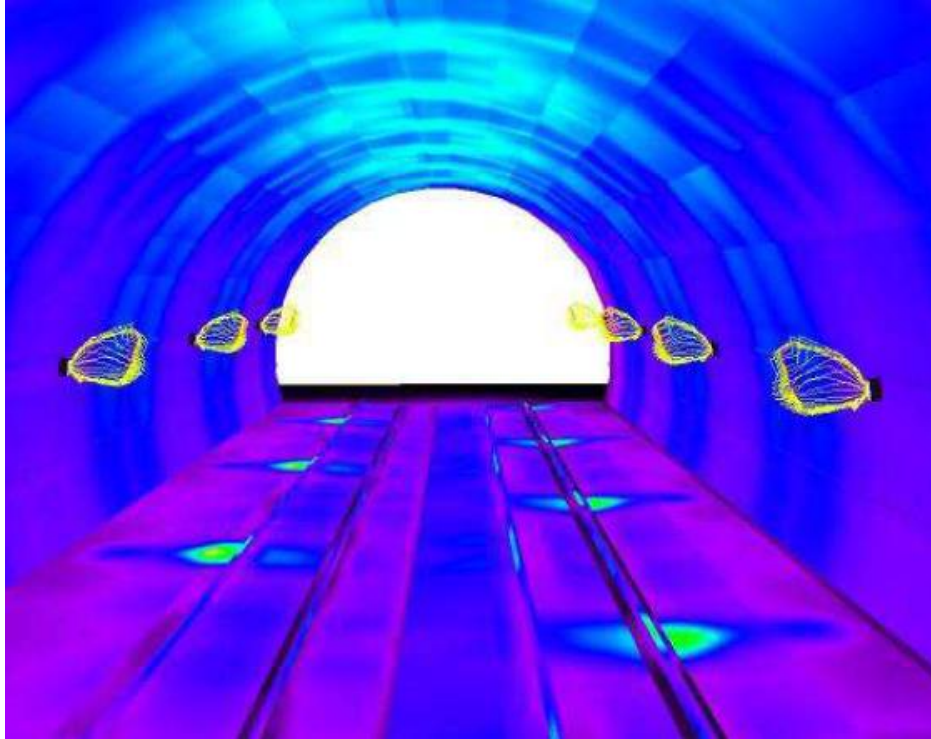
Tablodaki koordinatlara ve açı değerlerine göre yerleştirilmiş armatürlerin tünel kesitinde gösterilmiş olan ray üzeri, yürüyüş yolu ve zemine etki eden aydınlık düzeyleri program tarafından hesaplanmıştır.

**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              |



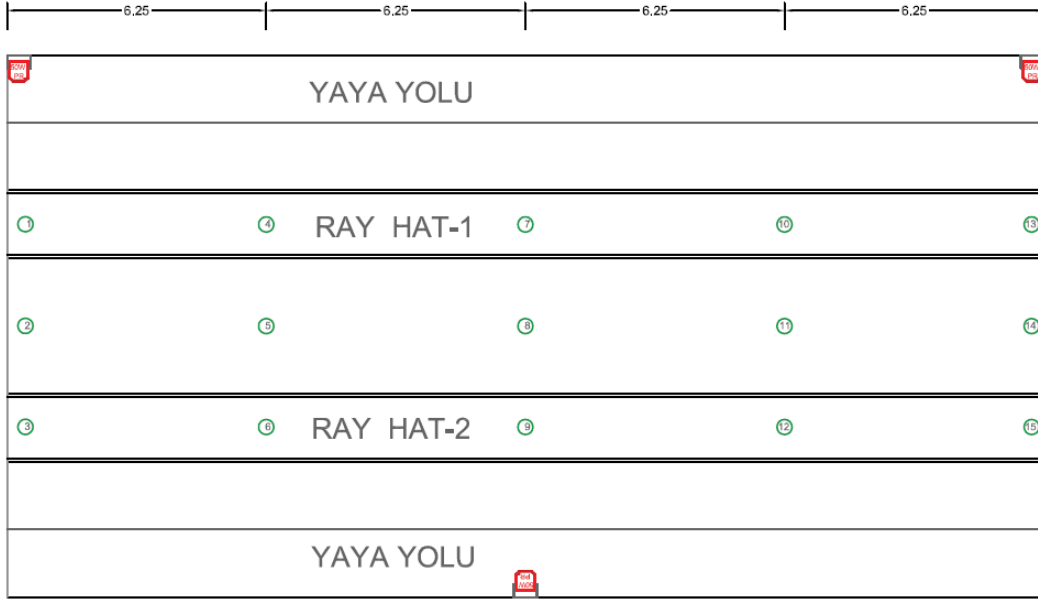
Şekil 4.5. Tasarımın 3B görüntülenmesi



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:

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



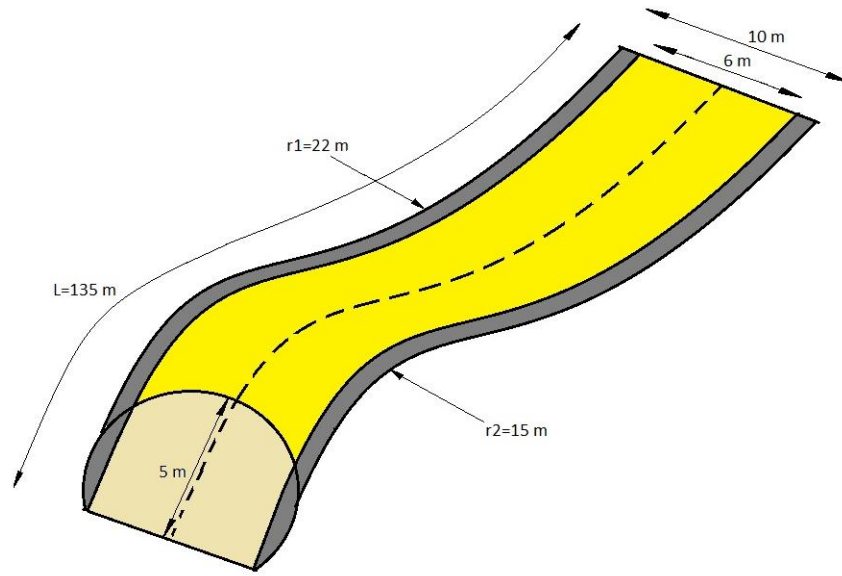
**Şekil 4.9.** Tünelde aydınlatma düzeyi ölçülen bölge

#### **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).

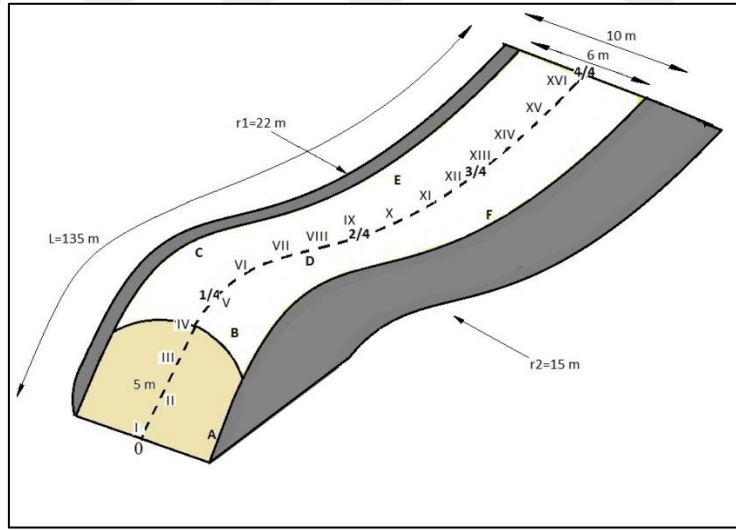


**Şekil 4.10.** Çalışmada ele alınan kurp eksenli tünelin iç simülatif görünümü



**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 kılabilirdiğinden, 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 kısıma 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

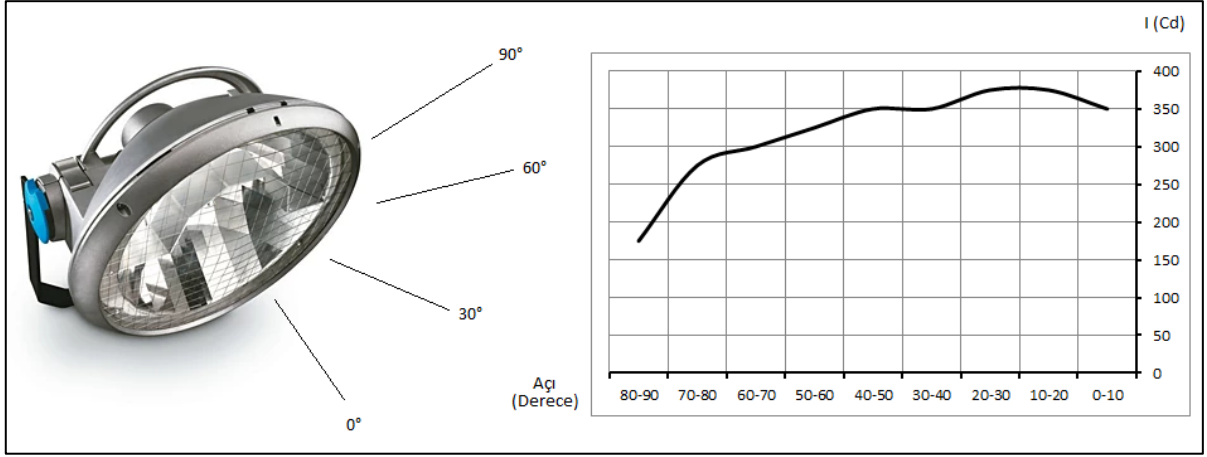
| Yatay Uzaklık (K) |          | Hipotenüs Uzaklık (L) |          | Açı ( $\beta$ ) |          |
|-------------------|----------|-----------------------|----------|-----------------|----------|
| I-Dx              | 53.06067 | I-D                   | 53.29573 | I-D             | 84.61681 |
| II-Dx             | 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

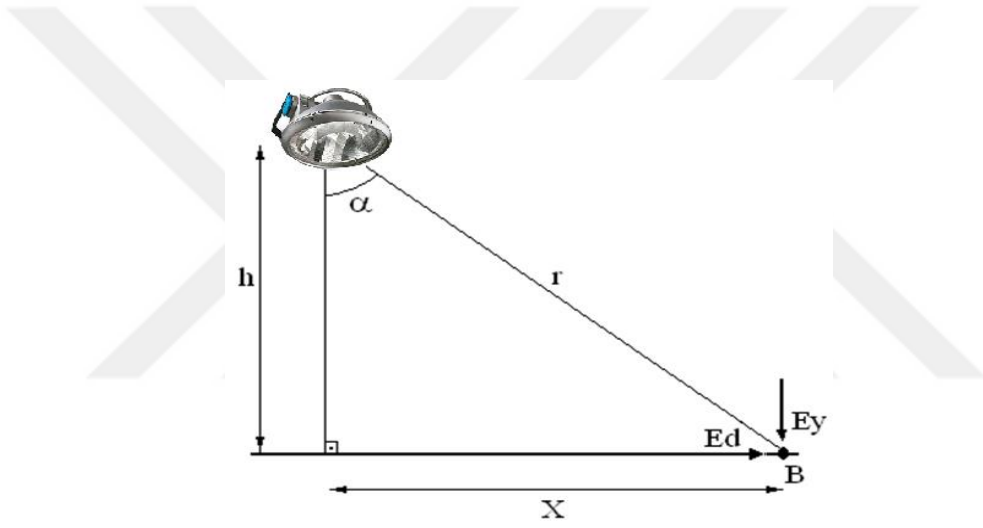
| Yatay Uzaklık (K) |          | Hipotenüs Uzaklık (L) |          | Açı ( $\beta$ ) |          |
|-------------------|----------|-----------------------|----------|-----------------|----------|
| I -Ex             | 80.44696 | I -E                  | 80.60219 | I -E            | 86.44348 |
| II-Ex             | 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<br>Tüm bağlantı elemanları paslanmaz<br>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     |
| IVA   | 275     | IVB   | 300     | IVC   | 375     | IVD   | 175     | IVE   | 175     | IVF   | 175     |
| VA    | 175     | VB    | 300     | VC    | 300     | VD    | 275     | VE    | 175     | VF    | 175     |
| VIA   | 175     | VIB   | 275     | VIC   | 275     | VID   | 275     | VIE   | 175     | VIF   | 175     |
| VIIA  | 175     | VIIIB | 275     | VIIIC | 275     | VIIID | 350     | VIIIE | 175     | VIIIF | 175     |
| VIIIA | 175     | VIIIB | 275     | VIIIC | 175     | VIIID | 350     | VIIIE | 275     | VIIIF | 175     |
| IXA   | 175     | IXB   | 175     | IXC   | 175     | IXD   | 300     | IXE   | 275     | IXF   | 175     |
| XA    | 175     | XB    | 175     | XC    | 175     | XD    | 275     | XE    | 300     | XF    | 275     |
| XIA   | 175     | XIB   | 175     | XIC   | 175     | XID   | 175     | XIE   | 300     | XIF   | 300     |
| XIIA  | 175     | XIIB  | 175     | XIIC  | 175     | XIID  | 175     | XIIE  | 275     | XIIF  | 325     |
| XIIIA | 175     | XIIIB | 175     | XIIIC | 175     | XIIID | 175     | XIIIE | 275     | XIIIF | 300     |
| XIVA  | 175     | XIVB  | 175     | XIVC  | 175     | XIVD  | 175     | XIVE  | 175     | XIVF  | 275     |
| XVA   | 175     | XVB   | 175     | XVC   | 175     | XVD   | 175     | XVE   | 175     | XVIF  | 275     |
| XVIA  | 175     | XVIB  | 175     | XVIC  | 175     | XVID  | 175     | XVIE  | 175     | XVIF  | 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 |
| IIIAy   | 4.764226 | IIIBy   | 1.481286 | IIICy   | 2.799227 | IIIDy   | 0.11155  | IIIEy   | 0.027234 | IIIFy   | 0.017155 |
| IIIAy   | 2.396596 | IIIBy   | 4.763276 | IIICy   | 17.52754 | IIIDy   | 0.195812 | IIIEy   | 0.038461 | IIIFy   | 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 | EVEy    | 0.163307 | EVIFy   | 0.059511 |
| EVIIAY  | 0.122113 | EVIBBy  | 1.659527 | EVICy   | 0.924747 | EVIDy   | 56.48728 | EVIEy   | 0.350592 | EVIFy   | 0.10189  |
| EVIIIAy | 0.08347  | EVIIIBy | 0.697917 | EVIIICy | 0.262578 | EVIIIDy | 62.81237 | EVIIIEy | 1.331224 | EVIIIFy | 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 | EXIIIBy | 0.030154 | EXIIICy | 0.023434 | EXIIIDy | 0.097966 | EXIIIEy | 1.447098 | EXIIIFy | 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 |
| IIIA <sub>d</sub>   | 13.60628 | IIIB <sub>d</sub>   | 6.448383 | IIIC <sub>d</sub>   | 9.717957 | IIID <sub>d</sub>   | 1.008708 | IIIE <sub>d</sub>   | 0.39549  | IIIF <sub>d</sub>   | 0.290798 |
| IIIA <sub>d</sub>   | 8.79787  | IIIB <sub>d</sub>   | 13.60459 | IIIC <sub>d</sub>   | 30.71855 | IIID <sub>d</sub>   | 1.463754 | IIIE <sub>d</sub>   | 0.497526 | IIIF <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>Bd</sub>   | 13.7696  | EVIC <sub>d</sub>   | 9.987706 | EVID <sub>d</sub>   | 14.11185 | EVE <sub>d</sub>    | 1.298238 | EVIF <sub>d</sub>   | 0.6649   |
| EVIIAd              | 1.071015 | EVII <sub>Bd</sub>  | 6.941353 | EVII <sub>Cd</sub>  | 4.743588 | EVII <sub>Dd</sub>  | 58.37911 | EVII <sub>E</sub>   | 2.149106 | EVII <sub>Fd</sub>  | 0.949943 |
| EVIIIA <sub>d</sub> | 0.83229  | EVIIIB <sub>d</sub> | 3.944888 | EVIIIC <sub>d</sub> | 1.77653  | EVIIID <sub>d</sub> | 60.47063 | EVIIIE <sub>d</sub> | 6.016054 | EVIIIF <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 |
| EXIIAd              | 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 | EXIIIB <sub>d</sub> | 0.423211 | EXIIIC <sub>d</sub> | 0.357877 | EXIIID <sub>d</sub> | 0.925533 | EXIIIE <sub>d</sub> | 6.351365 | EXIIIF <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 toplamalar 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.

**Büyükkınacı, 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.