

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**YOL AYDINLATMASI OTOMASYON SİSTEMLERİ'NDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ  
KAPSAMINDA GÖRSEL PERFORMANS KOŞULLARINA BAĞLI  
KONTROL STRATEJİLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**



**DOKTORA TEZİ**

**Burcu BÜYÜKKINACI**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Programı**

**MART 2018**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**YOL AYDINLATMASI OTOMASYON SİSTEMLERİ'NDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ  
KAPSAMINDA GÖRSEL PERFORMANS KOŞULLARINA BAĞLI  
KONTROL STRATEJİLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Burcu BÜYÜKKINACI  
(301082001)**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sermin ONAYGİL**

**MART 2018**



İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 301082001 numaralı Doktora Öğrencisi Burcu BÜYÜKKINACI, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “YOL AYDINLATMASI OTOMASYON SİSTEMLERİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ KAPSAMINDA GÖRSEL PERFORMANS KOŞULLARINA BAĞLI KONTROL STRATEJİLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Prof. Dr. Sermin ONAYGİL** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Prof. Dr. Önder GÜLER** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. Cenk YAVUZ** .....  
Sakarya Üniversitesi

**Prof. Dr. Nurettin UMURKAN** .....  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. Ramazan ÇAĞLAR** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi** : **5 Şubat 2018**  
**Savunma Tarihi** : **8 Mart 2018**



## ÖNSÖZ

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, ilgi ve desteğini esirgemeyen, her konuda yol gösterici ve örnek bir insan olan tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Sermin Onaygil'e bana kattığı tüm değerler için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamın bilimsel temeller ışığında şekillenmesinde büyük katkısı olan sayın hocam Prof. Dr. Önder Güler'e, tüm ölçüm ve analizler sırasındaki desteği için sevgili arkadaşım Dr. Berker Yurtseven'e, çalışmanın hayata geçmesinde üniversite sanayi işbirliği ve proje desteğine imkan sağlayan İSBAK Genel Müdürü Sayın Muhammed Alyürük'e, bu çalışmaya ilk günden itibaren inanan ve destekleyen İSBAK Ar-Ge ve İnovasyon Müdürü Sayın Yusuf Dursun'a, değerli katkıları için İSBAK Test ve Tasarım Şefi Sayın Hakan Çelik'e teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan sevgili eşim Soner Büyükkınacı'ya, kızlarım Nil ve Ela'ya, varlıklarıyla bana güç veren sevgili anne ve babama, kız kardeşlerim Ceyda ve Aycan'a teşekkür ederim.

Şubat 2018

Burcu Büyükkınacı  
Elektrik Mühendisi





## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER .....	vii
KISALTMALAR .....	ix
SEMBOLLER .....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY .....	xix
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Görülebilirlik Kavramı, Tanım ve Formüller .....	3
1.1.1 Yol aydınlatmalarında silüet prensibi.....	3
1.1.2 Kontrast ve kontrast eşiği .....	4
1.1.3 Açığa çıkarma gücü (revealing power) .....	8
1.1.4 Görülebilirlik seviyesi .....	9
1.2 Uluslararası Standart ve Önerilere Uygun Olarak Yol Aydınlatma Sınıfının Belirlenmesi .....	9
1.3 Yol Aydınlatması Kalite Büyüklükleri .....	13
1.4 Tezin Amacı.....	14
1.5 Literatür Araştırması.....	15
1.5.1 Sürücülerin görsel performansını değerlendirmek için gerçekleştirilmiş deneysel çalışmalar.....	15
1.5.2 Yol aydınlatması otomasyon sistemlerinde geliştirilen kontrol stratejileri ve senaryolar.....	24
1.5.2.1 Zaman ayarlı loşlaştırma .....	24
1.5.2.2 Trafik yoğunluğuna bağlı loşlaştırma .....	25
1.5.2.3 Meteorolojik koşullara bağlı loşlaştırma.....	26
1.6 Hipotez.....	28
<b>2. DENEY SAHASININ TASARIMI VE ÖLÇÜMLER.....</b>	<b>31</b>
2.1 Test Yolu Aydınlatma Tesisatının Tasarımı.....	32
2.2 Armatür Fotometrik Ölçümleri ve Loşlaştırma Seviyelerinin Belirlenmesi ....	35
2.3 Parıltı Ölçümleri .....	38
<b>3. KRİTİK GÖRÜLEBİLİRLİK SEVİYESİ (VL) DEĞERİNİN BELİRLENMESİ .....</b>	<b>43</b>
3.1 Kritik Cisim Yansıtma Faktörünün Belirlenmesi .....	43
3.2 Sabit Gözlemci İçin Görülebilirlik Seviyesi Hesapları .....	48
3.3 Görülebilirlik Seviyesine Bağlı Olarak Test Yolunun Açığa Çıkarma Gücü... 55	
3.4 Laboratuvar Gözlemci Deneyleri İle Farklı Senaryolar İçin Kritik VL Değerlerinin Bulunması.....	57
3.4.1 Denek grubu .....	57
3.4.2 Deneyin yapılışı.....	57
3.4.3 Deney sonuçları ve kritik VL değerleri .....	58
<b>4. DOĞRU STRATEJİLERİN BELİRLENMESİ.....</b>	<b>63</b>

4.1 Farklı Araç Hızları İçin Güvenli Durma Mesafelerinin Hesaplanması .....	63
4.2 Minimum Kritik VL Değerlerine Bağlı Olarak Hareketli Gözlemci İçin Farklı Aydınlatma Sınıflarında Görülebilirlik Değişimi .....	64
<b>5. AKILLI YOL AYDINLATMASI UYGULAMA ÖRNEĞİ .....</b>	<b>69</b>
5.1 Cendere Caddesi LED Dönüşümü Çalışmaları .....	69
5.1.1 Yolun mevcut aydınlatma durumu .....	70
5.1.2 Yolda yeni kurulan aydınlatma tesisatı.....	71
5.2 Otomasyon Senaryolarının ve Buna Uygun Yol Aydınlatma Sınıflarının Belirlenmesi .....	72
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>79</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>83</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>87</b>



## KISALTMALAR

<b>ANSI</b>	: American National Standards Institute
<b>AWS</b>	: Automated Weather Stations
<b>C</b>	: Conflict areas (çakışma alanları)
<b>cd</b>	: Candela
<b>cm</b>	: Santimetre
<b>CEN</b>	: Comité Européen de Normalisation (European Committee for Standardization)
<b>CIE</b>	: Commission Internationale de l'Eclairage (International Commission on Illumination)
<b>dak</b>	: Dakika
<b>EN</b>	: European Norm
<b>GDM</b>	: Güvenli Durma Mesafesi
<b>IES</b>	: Illuminating Engineering Society
<b>İSBAK</b>	: İstanbul Bilişim ve Akıllı Kent Teknolojileri Anonim Şirketi
<b>İTÜ</b>	: İstanbul Teknik Üniversitesi
<b>K</b>	: Kelvin
<b>km</b>	: Kilometre
<b>LED</b>	: Light Emitting Diode
<b>m</b>	: Metre
<b>ms</b>	: Milisaniye
<b>M</b>	: Motorized traffic (motorlu trafik)
<b>P</b>	: Pedestrian and low speed areas (yaya ve düşük hız alanları)
<b>STV</b>	: Small Target Visibility
<b>TEDAŞ</b>	: Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi
<b>TMS</b>	: Traffic Monitoring Station
<b>TSE</b>	: Türk Standartları Enstitüsü
<b>TU</b>	: Technische Universiteit
<b>V</b>	: Volt
<b>VTTI</b>	: Virginia Tech Transportation Institute
<b>YBSB</b>	: Yüksek Basıncılı Sodyum Buharlı
<b>W</b>	: Watt
<b>Wh</b>	: Watt saat



## SEMBOLLER

<b>C</b>	: Bağlı parıltı kontrastı
<b>C<sub>eşik</sub></b>	: Bağlı parıltı kontrast eşiği
<b>CO<sub>2</sub></b>	: Karbon dioksit
<b>E</b>	: Aydınlık düzeyi
<b>E<sub>v</sub></b>	: Düşey aydınlık düzeyi
<b>f</b>	: Lastik ve yol kaplaması arasındaki sürtünme kuvveti
<b>F<sub>kp</sub></b>	: Kontrast polarite faktörü
<b>g</b>	: Yerçekimi ivmesi
<b>L</b>	: Parıltı düzeyi
<b>L<sub>cisim</sub></b>	: Cisim parıltısı
<b>L<sub>fon</sub></b>	: Fon parıltısı
<b>L<sub>ort</sub></b>	: Ortalama yol yüzeyi parıltısı
<b>L<sub>örtü</sub></b>	: Örtü parıltısı
<b>R</b>	: Yol kaplaması sınıfı
<b>R<sub>a</sub></b>	: Renksel geriverim endeksi
<b>s</b>	: Yolun eğimi
<b>SR</b>	: Çevreleme oranı
<b>t</b>	: Gözlem süresi
<b>t<sub>o</sub></b>	: Reaksiyon süresi
<b>T<sub>gözlem</sub></b>	: Gözlem süresi faktörü
<b>TI</b>	: Bağlı eşik artışı
<b>u</b>	: Seyahat hızı
<b>U<sub>o</sub></b>	: Ortalama parıltı düzgünlüğü
<b>U<sub>1</sub></b>	: Boyuna parıltı düzgünlüğü
<b>VL</b>	: Görülebilirlik seviyesi
<b>V<sub>w</sub></b>	: Ağırlıklandırma değeri
<b>V<sub>ws</sub></b>	: Ağırlıklandırma değerlerinin toplamı
<b>x</b>	: Fren mesafesi
<b>x<sub>o</sub></b>	: Reaksiyon süresi boyunca alınan mesafe
<b>YF</b>	: Yaş faktörü
<b>α</b>	: Açısal boyut
<b>ΔL</b>	: Parıltı farkı
<b>ΔL<sub>eşik</sub></b>	: Parıltı farkı eşiği
<b>Δt</b>	: Zaman aralığı
<b>ρ</b>	: Yansıtma faktörü



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

<b>Çizelge 1.1</b> : TSE CEN/TR 13201-1'e göre M aydınlatma sınıfının seçimiyle ilgili parametreler. ....	<b>12</b>
<b>Çizelge 1.2</b> : TS EN 13201-2'ye göre yol aydınlatma sınıflarının kalite kriterleri..	<b>13</b>
<b>Çizelge 2.1</b> : 4000 K ve 6000 K LED'li armatürler için farklı senaryolardaki loşlaştırma seviyeleri, armatür ışık akıları ve güçleri. ....	<b>37</b>
<b>Çizelge 2.2</b> : Farklı yol kaplamaları için hesaplanan ortalama yol yüzeyi parlıtları (cd/m <sup>2</sup> ). ....	<b>39</b>
<b>Çizelge 2.3</b> : Hesap, kameralı parlıtlı ölçer ve noktasal parlıtlı ölçer sonuçlarına göre ortalama parlıtlı düzeyi değerleri (cd/m <sup>2</sup> ). ....	<b>40</b>
<b>Çizelge 2.4</b> : Ortalama ve boyuna parlıtlı düzgünlük değerleri. ....	<b>40</b>
<b>Çizelge 2.5</b> : Aydınlık düzeyi değerleri (lux). ....	<b>41</b>
<b>Çizelge 3.1</b> : 4000 K LED armatür, M2 aydınlatma sınıfı için hesap noktalarındaki kritik yansıtma faktörleri. ....	<b>44</b>
<b>Çizelge 3.2</b> : 4000 K LED armatür, M3 aydınlatma sınıfı için hesap noktalarındaki kritik yansıtma faktörleri. ....	<b>45</b>
<b>Çizelge 3.3</b> : 4000 K LED armatür, M4 aydınlatma sınıfı için hesap noktalarındaki kritik yansıtma faktörleri. ....	<b>45</b>
<b>Çizelge 3.4</b> : 4000 K LED armatür, M5 aydınlatma sınıfı için hesap noktalarındaki kritik yansıtma faktörleri. ....	<b>45</b>
<b>Çizelge 3.5</b> : 6000 K LED armatür, M2 aydınlatma sınıfı için hesap noktalarındaki kritik yansıtma faktörleri. ....	<b>46</b>
<b>Çizelge 3.6</b> : 6000 K LED armatür, M3 aydınlatma sınıfı için hesap noktalarındaki kritik yansıtma faktörleri. ....	<b>46</b>
<b>Çizelge 3.7</b> : 6000 K LED armatür, M4 aydınlatma sınıfı için hesap noktalarındaki kritik yansıtma faktörleri. ....	<b>46</b>
<b>Çizelge 3.8</b> : 6000 K LED armatür, M5 aydınlatma sınıfı için hesap noktalarındaki kritik yansıtma faktörleri. ....	<b>47</b>
<b>Çizelge 3.9</b> : 4000 K, M2 aydınlatma sınıfı ve dört farklı cisim yansıtma faktörü için VL değerleri. ....	<b>50</b>
<b>Çizelge 3.10</b> : 4000 K, M3 aydınlatma sınıfı ve dört farklı cisim yansıtma faktörü için VL değerleri. ....	<b>50</b>
<b>Çizelge 3.11</b> : 4000 K, M4 aydınlatma sınıfı ve dört farklı cisim yansıtma faktörü için VL değerleri. ....	<b>51</b>
<b>Çizelge 3.12</b> : 4000 K, M5 aydınlatma sınıfı ve dört farklı cisim yansıtma faktörü için VL değerleri. ....	<b>51</b>
<b>Çizelge 3.13</b> : 6000 K, M2 aydınlatma sınıfı ve dört farklı cisim yansıtma faktörü için VL değerleri. ....	<b>52</b>
<b>Çizelge 3.14</b> : 6000 K, M3 aydınlatma sınıfı ve dört farklı cisim yansıtma faktörü için VL değerleri. ....	<b>52</b>
<b>Çizelge 3.15</b> : 6000 K, M4 aydınlatma sınıfı ve dört farklı cisim yansıtma faktörü için VL değerleri. ....	<b>53</b>

<b>Çizelge 3.16</b> : 6000 K, M5 aydınlatma sınıfı ve dört farklı cisim yansıtma faktörü için VL değerleri. ....	<b>53</b>
<b>Çizelge 3.17</b> : Farklı senaryolarda görülebilir cisim yüzdeleri.....	<b>54</b>
<b>Çizelge 3.18</b> : 4000 K ve 6000K renk sıcaklığında farklı aydınlatma sınıfları için hesap noktalarının açığa çıkarma gücü yüzdeleri. ....	<b>56</b>
<b>Çizelge 3.19</b> : 4000 K deney sonuçları. ....	<b>59</b>
<b>Çizelge 3.20</b> : 6000 K deney sonuçları. ....	<b>60</b>
<b>Çizelge 3.21</b> : Minimum VL değerleri ve görülebilme yüzdeleri.....	<b>62</b>
<b>Çizelge 4.1</b> : Güvenli durma mesafelerinden alınan ölçümlere göre M2, M3 ve M4 sınıfları için hesaplanan VL değerleri.....	<b>65</b>
<b>Çizelge 4.2</b> : 78 metreden alınan ölçümlere göre M2, M3 ve M4 sınıfları için hesaplanan VL değerleri. ....	<b>67</b>
<b>Çizelge 4.3</b> : 50 metreden alınan ölçümlere göre M3, M4 ve M5 sınıfları için hesaplanan VL değerleri. ....	<b>67</b>
<b>Çizelge 5.1</b> : Aylara göre araç sayısı ve hızları. ....	<b>72</b>
<b>Çizelge 5.2</b> : 4 Temmuz 2016 Pazartesi günü için TSE CEN/TR 13201-1'e göre yol aydınlatma sınıfının seçimi. ....	<b>74</b>
<b>Çizelge 5.3</b> : Cendere Caddesi'nde farklı aydınlatma sınıfları için gerekli olan armatür ışık akısı ve güçleri. ....	<b>75</b>
<b>Çizelge 5.4</b> : Cendere Caddesi örnek aydınlatma sınıfları ve saatlik enerji tüketimleri. ....	<b>76</b>
<b>Çizelge 5.5</b> : Cendere Caddesi'nde otomasyon sistemi sayesinde elde edilebilecek tasarruf oranları.....	<b>77</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1 : Monokromatik cisimlerin farklı fon parlıtları üzerindeki görüntüsü... ..	4
Şekil 1.2 : Farklı açısal boyutlardaki cisimler için bağıl kontrast eşliğinin fon parlıtısına göre değişimi.....	5
Şekil 1.3 : Yaya kıyafetleri ve yol kaplaması üzerindeki cisimlere ait yansıtma faktörlerinin kümülatif yüzde eğrileri. ....	8
Şekil 1.4 : Deney parkuru. ....	17
Şekil 1.5 : Deneysel amaçla aydınlatılan bölge şeması. ....	17
Şekil 1.6 : Hedef konumları ve görülebilirlik seviyeleri. ....	18
Şekil 1.7 : Parlıtı ölçümleri için kullanılan geometrik uzaklıklar.....	18
Şekil 1.8 : LED ve yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalı armatürler ile aydınlatılan akromatik hedef için değerlendirme ve hesap sonuçları arasındaki ilişki. ....	21
Şekil 1.9 : LED’li armatürlerle aydınlatılan akromatik ve renkli hedefler için değerlendirme ve hesap sonuçları arasındaki ilişki. ....	22
Şekil 1.10 : Yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalı armatürler ile aydınlatılan akromatik ve renkli hedefler için değerlendirme ve hesap sonuçları arasındaki ilişki. ....	23
Şekil 2.1 : Test yolu direk tasarımı.....	33
Şekil 2.2 : Direk numunesinin fabrikada kontrolü.....	34
Şekil 2.3 : Direklerin sahaya yerleştirelmesi ve armatür montajı. ....	34
Şekil 2.4 : İTÜ-İSBAK Test yolu.....	35
Şekil 2.5 : Lightra Power LXMLED 150W armatür ışık dağılım eğrisi. ....	36
Şekil 2.6 : İki farklı renk sıcaklığındaki LED’li armatürler için loşlaştırma seviyesine bağlı ışık akısı değişimi. ....	36
Şekil 2.7 : Armatür ışık akısı kontrol arayüzü. ....	37
Şekil 2.8 : Hesap noktalarının konumu. ....	38
Şekil 2.9 : Test yolu ve kameralı parlıtı ölçer fotoğrafı. ....	39
Şekil 3.1 : 4000 K için kritik cisim yansıtma faktörleri yüzdesel dağılımı. ....	47
Şekil 3.2 : 6000 K için kritik cisim yansıtma faktörleri yüzdesel dağılımı. ....	48
Şekil 3.3 : Hesap alanına yerleştirelilen kritik cisimler.....	49
Şekil 3.4 : Yaya kıyafetlerine ait yansıtma faktörlerinin istatiksel dağılımı. ....	55
Şekil 3.5 : Laboratuvar deneylerinin yapılışı.....	58
Şekil 3.6 : 4000 K renk sıcaklığında farklı yol aydınlatma sınıfları için VL değerlerinin görölme yüzdeleri. ....	61
Şekil 3.7 : 6000 K renk sıcaklığında farklı yol aydınlatma sınıfları için VL değerlerinin görölme yüzdeleri. ....	61
Şekil 5.1 : Cendere Caddesi pilot yol ve LMK Kameralı Lüminansmetre ile parlıtı ölçümü. ....	70
Şekil 5.2 : Cendere Caddesi’nde mevcut 250W YBSB lambalı armatürlere ait ışık dağılım eğrisi. ....	71
Şekil 5.3 : LED’li armatür ışık dağılım eğrisi. ....	71



# **YOL AYDINLATMASI OTOMASYON SİSTEMLERİ'NDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ KAPSAMINDA GÖRSEL PERFORMANS KOŞULLARINA BAĞLI KONTROL STRATEJİLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

## **ÖZET**

Son yıllarda yalnızca Türkiye’de değil tüm dünyada bilgi ve iletişim teknolojisi alanlarındaki gelişmelerden faydalanılarak yerleşim merkezlerini akıllı şehirlere dönüştürme stratejileri uygulanmakta, ulaşım, çevre, güvenlik, enerji ve daha pek çok alandaki akıllı teknolojiler şehirlerin yaşam kalitesini arttırmak için kullanılmaktadır. Akıllı sistemlerin hızla uygulanabildiği en önemli alanlardan biri yol aydınlatması tesisatlarıdır. Özellikle LED teknolojisindeki gelişmeler sayesinde, LED’li armatürlerin hem etkinlik faktörlerinin yüksek, ömürlerinin uzun olması hem de ışık akılarına kolayca kumanda edilebilmesi akıllı yol aydınlatması sistemleri ile ilgili çalışmaları hızlandırmıştır.

Standart yol aydınlatması sistemleri genellikle zaman ayarlı ya da foto elektrik kontroller ile anahtarlanmakta ve tesis edilmiş lambalar gün ışığı bulunmayan saatlerde sürekli aynı güçte çalışarak aynı ışık akısını vermektedirler. Diğer yandan yoldaki trafik ya da meteorolojik koşullarda zamana bağlı oluşan değişimler sonucunda farklı koşullar oluşabilmekte ve bu durumlarda yol üzerinde ihtiyaç duyulan ortalama parıltı düzeyi değerleri değişebilmektedir. Yol üzerinde o anda ihtiyaç olmadığı halde, fazla aydınlatma gerçekleştirilmesi, enerjinin boşa harcanması anlamına gelmektedir. Günümüzde çok basit sistemlerden, son teknolojinin kullanıldığı karmaşık sistemlere kadar çeşitlilik gösteren aydınlatma kontrol sistemleri kullanılarak yolun değişen dinamik durumuna göre aydınlatma yapabilecek yol aydınlatma tesisatları kurulmaktadır. Teknik olarak LED ışık kaynaklı armatürlerin ışık akıları istenilen seviyelerde loşlaştırılabilmektedir. Ancak yol aydınlatmalarında temel amaç gerekli aydınlatma koşullarının oluşturulması ve trafik güvenliğinin sağlanmasıdır. Can ve mal güvenliği açısından yeterli aydınlatma kriterlerinin sağlanması gereken yol aydınlatmalarında armatür ışık akısının gelişigüzel loşlaştırılması düşünülemez. Aydınlatma kalite kriterlerinden ödün vermeden ve görüş konforunu bozmadan gereksiz enerji tüketiminin önüne geçmek için doğru stratejiler uygulanmalıdır. Bu nedenle, sürüş güvenliği açısından, armatür ışık akısını azaltmanın sürücülerin görme performansı üzerindeki etkisinin belirlenmesi önemlidir.

İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Ayazağa Kampüsü’nde, İTÜ ve İSBK İstanbul Bilişim ve Akıllı Kent Teknolojileri Anonim Şirketi ortak çalışması ile Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından desteklenen San-Tez projesi kapsamında, sürücülerin görme performansını ölçüp değerlendirmek için değişik koşul ve senaryoların yaratılabileceği bir test yolu kurulmuştur. Projenin sonunda, trafik algılayıcılarından araç hız ve yoğunluk bilgilerini alan, yol üzerindeki mevcut koşullara uygun loşlaştırma oranına karar verebilen ve armatürlere bu yönde kumanda ederek sürücü emniyet ve konforunu bozmadan enerji tasarrufu sağlayabilen bir akıllı yol aydınlatma kontrol sisteminin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Sürücüler için gerekli

güvenlik koşullarının göz ardı edilmemesi ve söz konusu gerekliliklerin belirlenmesi amacıyla, denekler ile görülebilirlik testleri gerçekleştirilmiş, yol aydınlatması otomasyon sistemlerinin güvenlik ve verimliliklerini doğrudan etkileyen loşlaştırma senaryoları, görülebilirlik testlerinin sonuçlarına göre belirlenmiştir. Gerçekleştirilen ölçüm ve deneyler sonucunda, araç hızı şehir içi yollarda geçerli hız limitleri olan 90 km/saat, ya da 70 km/saat’de sabit olduğunda hesap alanındaki VL değerlerinin farklı aydınlatma sınıfları için kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığı, armatür ışık akılarının değiştirilmesinin sürücülerin görme performansını önemli oranda değiştirmeyeceği görülmüştür. Bu sonuçla, trafik yoğunluğunun azaldığı, buna karşılık araç hızlarının düşmediği saatlerde yol parıltı düzeyinin azaltılabileceği ortaya konmuştur.

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen görülebilirlik ölçüm ve hesapları göstermiştir ki trafik algılayıcılarından araç hız ve yoğunluk bilgilerini alan, yol üzerindeki mevcut koşullara uygun loşlaştırma oranına karar verebilen ve armatürlere bu yönde kumanda ederek sürücü emniyet ve konforunu bozmadan enerji tasarrufu sağlayabilen bir akıllı yol aydınlatma kontrol sisteminin geliştirilmesi mümkündür. Geliştirilen bu “otomasyon sistemi ve kontrol yazılımı”nın şehir içi yollardaki aydınlatma tesislerinde kullanılmasına örnek oluşturacak ilk pilot uygulama Kağıthane Cendere Caddesi’nin 500 metrelik kısmında tesis edilmiştir. Cendere Caddesi için yapılan örnek hesaplamalar sonucunda aydınlatma otomasyon sistemi kurulduğunda yaz aylarında yaklaşık %58-64 oranında, kış aylarında ise yaklaşık %62-63 oranında enerji tasarrufu elde edilebileceği tahmin edilmektedir. Tez çalışması, trafik algılayıcılarından araç hız ve yoğunluk bilgisini alan, yol üzerindeki mevcut koşullara uygun loşlaştırma oranına karar verebilen ve armatürlere bu yönde kumanda ederek sürücü emniyet ve konforunu bozmadan enerji tasarrufu sağlayabilen bir "akıllı yol aydınlatma kontrol sistemi"nin geliştirilmesi için gerekli olan loşlaştırma senaryolarına bilimsel altyapı sağlaması açısından önemlidir.

# **DEVELOPING CONTROL STRATEGIES IN SCOPE OF ENERGY EFFICIENCY DEPENDING ON VISUAL PERFORMANCE CONDITIONS IN ROAD LIGHTING AUTOMATION SYSTEMS**

## **SUMMARY**

Road lighting automation systems, by which the luminous flux of the luminaires can be adjusted according to the road conditions, seems to be a significant way to save energy. However, there is not enough research yet on how the reduction of luminous flux will affect the visual performance, safety and comfort of drivers. So there are contradictory approaches when determining control strategies and dimming scenarios. Therefore, tests on real road conditions, surveys with real road users and more research about driving safety must be carried out, as much as possible, before determining the automation strategies and applications.

Istanbul Technical University (ITU) and Istanbul IT and Smart City Technologies Inc. (ISBAK), developing a common project, with the support of Turkish Ministry of Science Industry and Technology, established a test road in Istanbul, ITU Ayazaga Campus where different road conditions and scenarios can be practiced in order to assess and measure the visual performance of drivers. The test road is 250 m long with two lanes. Each lane is 3.5 m wide and the total width of the road is 7 m. The lighting arrangement is single sided from the left. Eight lighting poles are installed with 30 m spacing. The height of the poles can be adjusted between 8 and 12 m and the overhang can be adjusted between 0.5 and 1.5 m. Two luminaires with high pressure sodium lamps and two LED luminaires are placed on each pole. The luminous flux of the luminaires can be dimmed to the desired level. Thus, different quality criteria can be ensured for different lighting classes on the test road. In this study 4000 K and 6000 K LED luminaires are used. The luminous flux of the luminaires can be controlled by 1-10V control system and different luminous flux values can be adjusted to deliver M2, M3, M4, M5 road lighting classes according to the EN 13201-1 standard. By the measurements and experimental results on the test road, it is aimed to develop a "road lighting automation system" working with correct dimming scenarios.

Technically, it is possible to adjust the luminous flux of luminaires with LED light sources at desired levels. However, when traffic safety is considered in real road conditions, the lack of information about the time and amount of dimming is the biggest obstacle in the application of road lighting automation systems in existing or newly installed road lighting. This thesis describes the studies which are carried out in order to determine the effect of dimming on the visibility performance of the drivers, in terms of driving safety.

In order to be able to determine dimming scenarios correctly, driver's visual performance should be evaluated for time-varying parameters, such as traffic intensity and vehicle speed on the road. The visual performance of the drivers are studied in terms of visibility level (VL) calculations of the critical objects on the test road. In laboratory studies and on the visibility tests for road lighting, a 20 cm x 20 cm flat

square object is mostly used. These objects, which are called the critical objects, have been used to form the basis of standards and recommendations for road lighting. Therefore, a 20 cm x 20 cm flat square object with a Lambertian surface is used in this study. In CIE recommendations the reflectance of the critical object is accepted as 0.20 and in ANSI/IES standard as 0.50. Theoretically, it is stated that for VL values higher than 1.0, the object starts to appear as a silhouette on the road surface background but for the critical object with a reflectance of 0.20, the minimum calculated VL is 2.22. In order to study the visual performance of drivers in a wider range of VL values, objects with higher reflectances are required. Taking precalculations on the test road into consideration the reflectances of the critical objects were selected as 0.20, 0.30, 0.40 and 0.50. Thus, VL values between 0 and 11 were obtained.

The measurements of the visibility levels (VL) and tests on the road are carried out for the fixed observer, located 60 meters behind the calculation area, which is used in the calculation of the road surface luminance in current standards and recommendations. In order to be able to define the required lighting quality values in different dimming scenarios, VLs of critical objects with different reflectances for all measurement points on the test road are calculated for different lighting classes. From the measured VL's, minimum VL values are found by experiments which were carried out under laboratory conditions. Measurement photographs that are taken for a fixed observer at 60 m are evaluated by real subjects in the laboratory. The intention is to find out which VL values of critical objects can easily be seen and which VL values are hard to see. The experiments, were conducted with a total of 30 subjects aged 25 to 35 years, including 18 men and 12 women. 121 scenes with different object reflectances on different road lighting classes are evaluated by each subject. According to the results, it is evident that critical objects with a VL value of 7 or greater can be seen 100% of the time in all scenarios. The minimum VL value varies between 7 and 8.5 for 100% of the critical objects on the road to be seen, the minimum VL value varies between 3.5 and 5.5 for 90% and the minimum VL value is 2.5 for 80% of the critical objects on the road to be seen.

According to EN13201-3 and CIE 140 standards and recommendations, the observer position is fixed for luminance measurements and is 60 meters from the first lighting pole in the measurement area. However, in real conditions, drivers move at a certain speed and one of the parameters taken into account when deciding the lighting class in road lighting automation applications is vehicle speed. The road lighting should be able to provide enough illumination to allow the drivers to notice the obstacles that come into their way when they are moving and to stop within safe stopping distance. The amount of light that drivers will need to drive safely on the road and recognize the obstacles, changes with time. The aim of the lighting automation system is to follow the variable parameters on the road and to provide a dynamic lighting accordingly. When a lighting automation system is applied, the luminous flux of the luminaires can be adjusted and the lighting class of the road can be changed between M1 and M6 classes according EN 13201-1 technical report while the vehicles are moving at a certain speed on the road. When choosing the road lighting class according to EN 13201-1, there are many parameters to take into consideration such as; road design speed or speed limit, traffic intensity, traffic composition (only motor vehicles or mixed with non-motorized vehicles), separation of the carriageway, intersection density, presence of parked vehicles, ambient luminosity and navigational task. Some of these parameters are related to the geometric structure of the road and do not change, while the parameters such as traffic intensity, and ambient luminosity vary depending

on time. Consequently the road lighting class may vary according to these time dependent parameters. At the same time it is necessary to provide a luminance level that drivers can see the obstacles from a safe stopping distance. For this reason, the VL values are calculated for the moving observer from safe stopping distance to show how changing the road surface luminance will change the VL of the critical objects placed in the calculation area, while the vehicle speed is not changed.

When vehicles are moving at 90 km/h, which can be considered as the legal speed limit for M2 class roads, if the luminance is reduced from 1.5 cd/m<sup>2</sup> to 1 cd/m<sup>2</sup> (road class is changed from M2 to M3) and then from 1 cd/m<sup>2</sup> to 0.75 cd/m<sup>2</sup> (road class is changed from M3 to M4) the visual performance of the drivers should not be degraded. In order to reveal the change in the visual performance of the drivers under different road lighting classes, object and background luminances are measured under the lighting quality criteria appropriate to the classes M2, M3 and M4, from 78 meters which is the calculated value of safe stopping distance for the vehicle speed of 90 km/h, according to CIE 88 and for dry road conditions. Similarly object and background luminances are measured under the lighting quality criteria appropriate to the classes M3, M4 and M5, from 50 meters which is the calculated value of safe stopping distance for the vehicle speed of 70 km/h. VL values are calculated from these object and background luminances. The minimum VL values which are determined by laboratory experiments are then used as indicators to find out how dimming the luminous flux of the luminaires effect the visibility of the critical objects. As a result of the calculations, VL values could be seen with a probability of 80% in all scenarios. It is shown that the variation of VL values in the calculation area for different lighting classes is within acceptable limits, which means that changing the road lighting class up to two levels does not change the visual performance dramatically while the drivers are traveling at a constant speed. In this way, it is acceptable to reduce the road surface luminances at times when the time dependent parameters such as traffic intensity, ambient luminosity and navigational task is changing but the vehicle speeds are not reducing.

The first pilot application, which will be an example of the use of this "automation system and control software" developed for urban roads, was established in 500 meters of Cendere Street in Istanbul. The ability to obtain the expected performance of these "intelligent systems" which intend to provide energy savings in lighting installations without compromising safety and comfort conditions, depends largely on the quality of the particular installations in which they are installed. When these systems with high costs are used in installations that are not well designed for energy use, the payback periods are very long and the targeted savings rates are not achieved. For this reason, high pressure sodium lamp luminaires, which are available in 500 meters of Cendere Street, were replaced with LED luminaires. A total of 25 pieces of LED lamps in 500 meters can be controlled with the automation system and control software.

For the lighting scenarios to be realized in accordance with the road lighting classes given in EN 13201-1, it is possible to take the vehicle speed and traffic intensity information from the traffic sensors and to adjust the luminous flux of the luminaires according to the existing conditions on the road. If a smart road lighting control system which can save energy is applied, according to the average speed of the passing vehicles, traffic density, road and ambient conditions, the lighting classes for Cendere Street will be changed between M2 and M5. When the lighting automation system is installed, it is estimated that energy saving ratios will be about 58-64% in the summer months and 62-63% in the winter months, as a result of the calculations.





## 1. GİRİŞ

Azalan fosil yakıt kaynakları, elektrik enerjisi üretimi sırasında çevreye salınan zararlı gazlar, ayrıca enerjide dışa bağımlılık gibi çeşitli nedenlerle, yalnızca ülkemizde değil tüm dünyada enerjinin daha verimli kullanılması, boşa harcanan enerjinin önüne geçilmesi amacıyla gerçekleştirilen çalışmalar büyük önem taşımaktadır. Enerji verimliliği çalışmalarına konu olan alanlardan biri de aydınlatma için harcanan elektrik enerjisi miktarının azaltılmasıdır. Yol aydınlatması tesisleri, gece saatlerinde sürücülerin yol yüzeyini ve trafikteki diğer araç ve yayaların hareketlerini daha iyi görebilmeleri, böylece trafikte can güvenliğini arttırmak amacıyla kurulmaktadır. Enerji tasarrufu yapmak üzere bütün yol aydınlatma tesisatlarını ortadan kaldırmak gibi bir yaklaşım olamayacağına göre, sürücülerin yolu ve yoldaki hareketli cisimleri yeterince iyi görebilecekleri kadar aydınlatılan ama bu sırada daha az enerji harcayan aydınlatma tesislerinin oluşturulması gerekmektedir. Bunun için ilk adım aydınlatma tesislerindeki ışık kaynaklarını aynı aydınlık düzeyini daha az enerji tüketimi ile gerçekleştiren, diğer bir deyişle daha verimli çalışan ışık kaynakları ile değiştirmek ya da yeni kurulacak tesislerde verimli ışık kaynakları ve armatürler kullanmaktır. İkinci adım biraz daha karmaşık bir yaklaşım gerektiren ışık akısının loşlaştırılması uygulamasıdır. Bakımı yapılan kaliteli bir yol aydınlatması tesisi kurulduktan sonra, zaman içinde eskime ve kirlenme nedeniyle ışık akısında bir miktar azalma olmasına rağmen, genelde yol yüzeyinde sürekli aynı aydınlık düzeyi sağlanmaktadır. Diğer yandan özellikle şehir içindeki yollarda, trafik kullanıcı çeşitinin, sayısının ve araç hızlarının değişken olduğu düşüncesi, loşlaştırma uygulamalarının ortaya çıkmasının nedeni olmuştur. Genel bir yaklaşıma göre, trafik ne kadar karmaşıksa sürücünün yerine getirmesi gereken görme, algılama, tepki verme gibi işlevler o kadar karmaşıklaşmakta ve bu karmaşık görevleri yerine getirmek için daha yüksek parlıltı düzeylerine gereksinim olmaktadır. Yol üzerindeki hareketler azaldığında, daha sakin bir trafikte sürücülerin konforlu bir şekilde seyahat edebilmeleri için gereken yol parlıltı düzeyi değerleri azalmaktadır. Trafik değiştikçe, sürücülerin görsel işlevlerini gerçekleştirebilmek için ihtiyaç duydukları parlıltı düzeyinin de değişken olduğu

düşüncesiyle, dünyanın çeşitli ülkelerinde, yol üzerindeki ihtiyaca göre farklı saatlerde farklı parlaltı düzeylerini sağlayacak şekilde lamba ışık akılarının loşlaştırıldığı otomasyon sistemleri kurulmaktadır. Dünyadaki uygulamalar incelendiğinde, en basit ve en yaygın uygulamanın trafikteki araç sayısı ve karmaşıklığı azaldığında ışık akılarının loşlaştırılması olduğu görülmektedir. Ancak ışık akısını azaltmanın sürücülerin görsel performansını nasıl etkileyeceği, sürücü emniyet ve konforunu nasıl değiştireceği üzerinde henüz yeterli araştırma yapılamadığı için, kontrol stratejileri ve loşlaştırma senaryoları belirlenirken çelişkili yaklaşımlar ortaya konulmaktadır. Bir görüşe göre trafik yoğunluğu azaldığında ışık akısı (ortalama yol yüzeyi parlaltısı) azaltılabilirken, diğer bir görüşe göre trafik yoğunluğu azaldığında araç hızı ve güvenli duruş mesafesi arttığı için daha yüksek yol parlaltı düzeyine ihtiyaç olduğudur. Tüm bu parametreleri hesaba katan, yüksek maliyetler ve büyük enerji tasarrufu beklentileri ile tesis edilen yol aydınlatması otomasyon sistemlerinde sürücü emniyet ve konforunu bozmadan enerji tüketimini azaltabilen loşlaştırma senaryolarının nasıl belirlenmesi gerektiğini gösteren standart veya öneri şeklinde bir uluslararası başvuru kaynağı henüz mevcut değildir. Bu nedenle ülkemizde yoğun olarak sürdürülen enerji verimliliği çalışmaları kapsamında özellikle son yıllarda üzerinde önemle durulan ve uygulama projelerinin kısa bir süre içinde başlayacağı ifade edilen otomasyon sistemli ve LED ışık kaynaklı yol aydınlatma tesisatlarından beklenen faydaların elde edilebilmesi için gerekli otomasyon strateji ve senaryolarının doğru ve güvenilir olarak belirlenmesi hem ulusal hem de uluslararası arenada beklenen ve ihtiyaç duyulan araştırmalardır.

Mevcut teknolojik gelişmeler çeşitli algılayıcılar ve kameralar ile yoldan geçen araç sayısının ve trafik yoğunluğunun gerçek zamanlı olarak ölçülmesine olanak sağlamaktadır. Elde edilen bu tip bilgiler kontrol sistemine bir giriş parametresi olarak konulduğunda, yine gerçek zamanlı olarak armatür ışık akılarını o anki yol koşullarına uygun şekilde değiştirmek mümkün olabilecektir. Teknik olarak armatür ışık akıları istenilen seviyelerde loşlaştırılabilmektedir. Ancak can ve mal güvenliği açısından ele alındığında, gerçek yol koşullarında hangi saatlerde ve ne oranda loşlaştırma yapılması gerektiği konusundaki bilgi eksikliği, yol aydınlatması otomasyon sistemlerinin mevcut ya da yeni kurulacak olan aydınlatma tesislerinde uygulanmasının önündeki en büyük engeldir. Sürüş güvenliği açısından, armatür ışık akısını azaltmanın sürücülerin görsel performansı üzerindeki etkisinin belirlenmesi önemlidir. Bu

nedenle, ışık akısının ayarlanabildiği yol aydınlatması tesislerinde loşlaştırma oranı, loşlaştırma hızı gibi parametreleri diğer bir deyişle otomasyon stratejilerini belirlemeden ve uygulamadan önce mümkün olabildiğince test projeleri üzerinde çalışılması, sürücülerin görsel performansının belirlenmesi amacıyla çeşitli deneysel çalışmaların yapılması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, yol aydınlatması tesisatlarında armatür ışık akıları azaltılarak yol yüzeyi parlaltısının düşürülmesinin sürücüler açısından güvenli olup olmadığını araştırmak ve yol aydınlatması otomasyon uygulamaları için doğru senaryoları belirleyebilmek amacıyla İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) ve İSBAK İstanbul Bilişim ve Akıllı Kent Teknolojileri Anonim Şirketi ortak çalışması ile Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından desteklenen San-Tez projesi kapsamında, İTÜ Ayazağa Kampüsü'nde kurulan test yolunda gerçekleştirilen ölçümler ve deneysel çalışmalar açıklanmakta ve elde edilen bulgular paylaşılmaktadır.

## **1.1 Görülebilirlik Kavramı, Tanım ve Formüller**

Farklı aydınlatma senaryoları altında sürücülerin görsel performansını değerlendirebilmek için aydınlatma kalite büyüklükleri ve görülebilirlik ile ilgili performans kriterleri arasındaki ilişkinin ortaya konulması gerekmektedir. Bunun için de öncelikle yol aydınlatmalarında görülebilirliğin ne anlama geldiği, nasıl ölçüldüğü ve hesaplandığı bilinmelidir.

### **1.1.1 Yol aydınlatmalarında silüet prensibi**

Yol aydınlatmaları cisimlerin parlak yol yüzeyinde karanlık silüetler olarak algılanmasını sağlamaya çalışmaktadır. Yol yüzeyi parlaltısı arttıkça, cisimlerin silüet olarak görülme olasılığı da artmaktadır. Şekil 1.1'de farklı yansıtma faktörlerine sahip monokromatik cisimlerin yukarıdan aşağıya doğru artan üç farklı fon parlaltısı üzerindeki görüntüsü verilmiştir. Yalnızca fon parlaltısı en yüksek olan durumda cisimlerin tamamı görülebilmektedir. Daha düşük parlaltıya sahip fonlar üzerinde ara tonlardaki cisimlerin görülmesi zorlaşmakta ya da cisim tamamen görülemez hale gelmektedir.



**Şekil 1.1** : Monokromatik cisimlerin farklı fon parlıtları üzerindeki görüntüsü.

Yol yüzeyindeki cismin kontrastının yüksek olabilmesi ve yol yüzeyindeki her noktada daha iyi görülebilmesi için, minimum ve ortalama yol yüzeyi parlıtları arasındaki fark çok büyük olmamalıdır. Ortalama parlıtı düzgünlüğü olarak adlandırılan ve  $U_0$  sembolü ile gösterilen aydınlatma kalite büyüklüğünün değeri ne kadar küçükse (düzgünlük ne kadar kötüyse) cisimlerin özellikle yol yüzeyi parlıtısı düşük olan noktalarda görülebilmesi o ölçüde zorlaşmaktadır. Ortalama parlıtı düzgünlüğü kötü olduğunda, görüş alanındaki yol yüzeyi parlıtısı değişiminin fazla olması nedeniyle gözün kontrast duyarlılığı azalmaktadır. Yolun karanlık kısımlarına bakan bir göz için yol yüzeyindeki aydınlık alanlar kamaşmaya da sebep olabilmektedir (van Bommel, 2015).

### 1.1.2 Kontrast ve kontrast eşiği

Yol üzerindeki bir cismin görülebilmesi için cisim ve cismin arka fonu arasında belli bir parlıtı farkı olmalıdır. Yol aydınlatmaları için geçerli olan görece düşük aydınlık düzeylerinde renklerin algılanması zor olduğundan, görülebilirlik hesaplarında renk kontrastı yerine cisim ve arka fon arasındaki parlıtı kontrastı esas alınmaktadır. Denklem 1.1'de görüleceği üzere bağıl parlıtı kontrastı (C) şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$C = \frac{\Delta L}{L_{fon}} \quad (1.1)$$

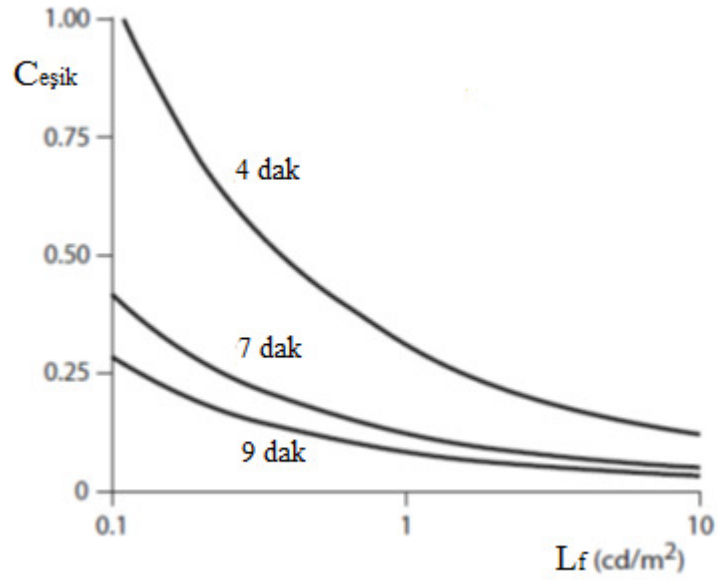
$$\Delta L = L_{cisim} - L_{fon} \quad (1.2)$$

$L_{cisim}$  : cismin parlıltısı

$L_{fon}$  : fon parlıltısı

Cismin parlıltısı arka fon parlıltısından yüksek olabilir (pozitif kontrast) ya da cisim arka fondan daha karanlık görünebilir (negatif kontrast).

Şekil 1.2'de cismin ancak algılanabildiği bağıl kontrast değeri olan kontrast eşiği ( $C_{eşik}$ ) ile fon parlıltısı ( $L_f$ ) arasındaki ilişki üç farklı açısal boyuttaki cisim için (4, 7 ve 9 dakikalık yay oluşturacak açılardan görülebilen cisimler) gösterilmiştir.



**Şekil 1.2 :** Farklı açısal boyutlardaki cisimler için bağıl kontrast eşiğinin fon parlıltısına göre değişimi (Pozitif kontrast, gözlem süresi 0,2 saniye, gözlemci yaşı 30).

Şekil 1.2'de cismin boyutu (görüş açısı) arttıkça  $C_{eşik}$  değerinin azaldığı görülmektedir. Fon parlıltısı yani yol yüzeyinin parlıltısı arttıkça kontrast eşiği düştüğü için cismin görülebilme şansı da artmaktadır. Diğer bir deyişle gözün adapte olduğu parlıltı değeri ne kadar yüksekse gözün kontrast duyarlılığı da o kadar yüksek olmaktadır (van Bommel, 2015).

Adrian, parlı farkı eşiğinin fon parlıtısı, kamaşma derecesi, cisim boyutu, gözlem süresi ve gözlemci yaşına bağı olarak hesaplanabilmesini sağılayan bir model geliştirmiştir (Adrian, 1989).

Parlı farkı eşiği'nin ( $\Delta L_{eşik}$ ) hesaplanmasına ait denklemler 1.3 ile 1.16 arasında verilmiştir.

$$\Delta L_{eşik} = 2,6 \times \left\{ \left( \frac{b}{\alpha} \right) + c \right\}^2 \times F_{kp} \times YF \times T_{gözlem} \quad (1.3)$$

$\alpha$  : cismin dakika cinsinden açısal boyutu

$F_{kp}$  : kontrast polarite faktörü

YF : yaş faktörü

$T_{gözlem}$  : gözlem süresi faktörü

b ve c : ara hesap fonksiyonları (Adrian'ın orjinal formülünde b fonksiyonunun hesabında yer alan 4,1925 değeri, ANSI/IES standartlarında verilen formül ile aynı değerin elde edilebilmesi amacıyla  $L_f=0,6 \text{ cd/m}^2$  için 4,2841 olarak değiştirilmiştir. Bu yeni değer ANSI/IES standartları tarafından tanımlanan değer ile aynıdır.)

$L_f \geq 0,6 \text{ cd/m}^2$  için;

$$b = \log(4,2841 \times L_f^{0,1556}) + 0,1684 \times L_f^{0,5867} \quad (1.4)$$

$$c = 0,05946 \times L_f^{0,466} \quad (1.5)$$

$0,0042 \text{ cd/m}^2 < L_f < 0,06 \text{ cd/m}^2$  için;

$$b = 10^{-0,072+0,3372 \times \log(L_f)+0,0866 \times \{\log(L_f)\}^2} \quad (1.6)$$

$$c = 10^{-1,256+0,319 \times \log(L_f)} \quad (1.7)$$

Kontrast Polarite Faktörü,  $F_{kp}$ ;

$$F_{kp} = 1 - \frac{d \times \alpha^{-e}}{2,4 \times \Delta L_{eşik,pozitifkontrast}} \quad (1.8)$$

$\alpha$  : cismin açısal boyutu (dakika)

d ve e : ara hesaplama fonksiyonları

$L_f \geq 0,1 \text{ cd/m}^2$  ise;

$$d = 10^{-10} \left[ 0,125 \times \{\log(L_f)\}^2 + 0,0245 \right] \quad (1.9)$$

$$e = 0,6 \times L_f^{-0,1488} \quad (1.10)$$

Yaş Faktörü, YF;

yaş=23 için YF=1 alınır.

23 < yaş ≤ 64 için;

$$YF = \frac{(yaş - 19)^2}{2160} + 0,99 \quad (1.11)$$

64 < yaş ≤ 75 için;

$$YF = \frac{(yaş - 56,6)^2}{116,3} + 1,43 \quad (1.12)$$

Gözlem Süresi Faktörü,  $T_{gözlem}$ ;

$$T_{gözlem} = \frac{f + t}{t} \quad (1.13)$$

t : gözlem süresi (saniye)

t=2 saniye için  $T_{gözlem} = 1$  alınır.

f : ara hesaplama fonksiyonu

$$f = \frac{(g^2 + h^2)^{0,5}}{2,1} \quad (1.14)$$

g ve h : ara hesaplama fonksiyonları

$$g = 0,36 - 0,0972 \times \frac{\{\log(\alpha) + 0,523\}^2}{\{\log(\alpha) + 0,523\}^2 - 2,513 \times \{\log(\alpha) + 0,523\} + 2,7895} \quad (1.15)$$

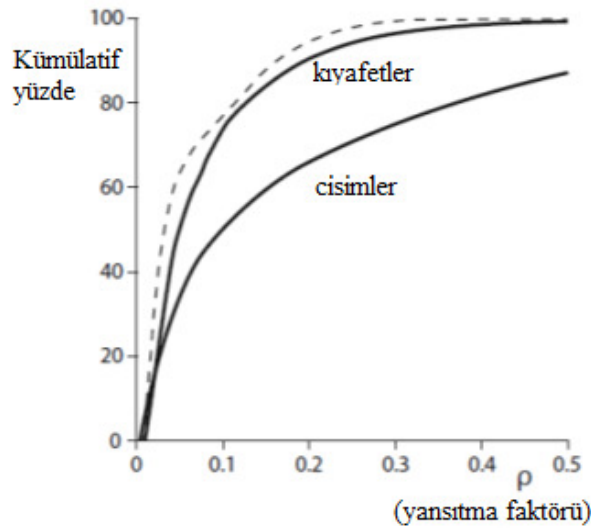
$$h = 0,355 - 0,1217 \times \frac{\{\log(L_f) + 6\}^2}{\{\log(L_f) + 6\}^2 - 10,4 \times \{\log(L_f) + 6\} + 52,28} \quad (1.16)$$

### 1.1.3 Açığa çıkarma gücü (revealing power)

Açığa çıkarma gücü, yolun en karanlık noktasında bir dizi yansıtma faktörüne sahip hedeflerin yüzde kaçının görülebilir olduğunun ifadesidir (Waldram, 1938).

Açığa çıkarma gücünü hesaplayabilmek için fon parıltısı ( $L_f$ ), cismin görülebilir olması için gerekli olan parıltı farkı eşiği ( $\Delta L_{eşik}$ ) ve hedef cisim üzerindeki düşey aydınlık düzeyi ( $E_v$ ) bilinmelidir. Buradan cismin pozitif ve negatif kontrastta görülebilmesi için gerekli olan alt ve üst sınır yansıtma faktörleri hesaplanabilir. Alt değer altındaki ve üst değer üstündeki yansıtma faktörüne sahip cisimler görülebilir olarak kabul edilir. Bu iki sınır değer arasındaki yansıtma faktörleri geçerli yol aydınlatması koşullarında görülebilir değildir.

Trafik güvenliği söz konusu olduğunda, sürücülerin karşısına çıkabilecek en önemli engel olan yayaların kıyafetlerine ait olası yansıtma faktörleri ( $\rho$ ) önce Smith (Smith, 1938) daha sonra da Hansen ve Larsen (Hansen ve Larsen, 1979) tarafından ölçülmüştür. Hansen ve Larsen sokakta rasgele seçilen 1024 yayanın kıyafetlerine ait yansıtma faktörlerini ölçmüşlerdir. Daha sonra Hirakawa (Hirakawa, 2007), yaya kıyafetleri ile yetinmemiş ve Japonya'da ekspres yollarda bulunduğu 10 cm'den büyük boyutlardaki 1300 cismin yansıtma faktörünü ölçmüştür. Şekil 1.3'de bu kıyafet ve cisimlere ait yansıtma faktörlerinin kümülatif dağılımı gösterilmektedir.



**Şekil 1.3 :** Yaya kıyafetleri ve yol kaplaması üzerindeki cisimlere ait yansıtma faktörlerinin kümülatif yüzde eğrileri. Düz çizgiler Hansen ve Larsen'in yaya kıyafetlerine ait yansıtma faktörlerini belirledikleri çalışmadan ve Hirakawa'nın otoyollardaki cisimlerin yansıtma faktörlerini belirlediği çalışmasından alınmıştır. Kesikli çizgi 1938 yılında Smith'in yaya kıyafetlerinin yansıtma faktörlerine ait çalışmasından alınan egridir.



#### 1.1.4 Görülebilirlik seviyesi

Görülebilirlik seviyesi, VL, verilmiş olan belirli bir büyüklük, şekil ve yansıtma katsayısına sahip bir cismin görülebilirlik değerinin, eşik değerinin ne kadar üstünde olduğunu gösteren bir ölçüdür (van Bommel, 2015). Denklem 1.17 ile hesaplanır.

$$VL = \frac{|\Delta L|}{\Delta L_{eşik}} \quad (1.17)$$

Burada;  $\Delta L$  cisim ve arka fon (yol yüzeyi parlıtısı) arasındaki gerçek parlıtı farkı,  $\Delta L_{eşik}$  ise o cismin yol yüzeyinde ancak görülebilir olması için gerekli olan parlıtı farkıdır. VL 1'e eşitse; cisim tam olarak laboratuvar koşullarında hesaplanan görülebilme eşiğindedir. Deneylerde kullanılan laboratuvar ortamı ile gerçek yol koşulları arasında pek çok fark bulunmaktadır. Laboratuvarda yalnızca hedefi fark etme görevi yerine getirilirken, araç sürme aktivitesi sırasında yapılan iş çok daha karmaşıktır. Laboratuvarda düz standart hedefler ile deney yapılırken gerçek yol koşullarında karşımıza çok farklı hedefler çıkabilir, yine laboratuvarda merkezi görme altında deneyler yapılırken gerçek yol koşullarında dış merkezli başka uyaranlar da bulunabilir. Gerçek yol koşullarında karşımıza çıkan arka fon, laboratuvar koşullarına göre çok daha karmaşık olabilir. Laboratuvar çalışmaları ile saha testleri arasındaki bu ve benzer farklılıklar "saha etkisi" olarak adlandırılmaktadır. Laboratuvar koşullarında elde edilen eşik kontrastı değerlerine göre görülebilir kabul edilen cisimler gerçek yol koşullarında görülemeyebilir (Mayeur ve diğerleri 2008). Bu nedenle gerçek yol koşullarındaki eşik değerine ulaşabilmek için laboratuvarda elde edilen eşik değerine "saha faktörü" eklenmelidir.

Saha faktörü olarak farklı çalışmalarda 3 ve 5 arasındaki değerler kullanılmıştır (Narisada and Karasawa, 2001; CIE, 2016; Adrian, 1989; Schreuder, 1998).

## 1.2 Uluslararası Standart ve Önerilere Uygun Olarak Yol Aydınlatma Sınıfının Belirlenmesi

Yol aydınlatmalarında temel amaç gerekli aydınlatma koşullarının oluşturulması ve trafik güvenliğinin sağlanmasıdır. Bu amaçla uluslararası standart ve önerilerde yollar fiziksel özellikleri ve trafik koşullarına göre farklı sınıflara ayrılmış ve bu sınıflar için sağlanması gereken aydınlatma kalite büyüklükleri belirlenmiştir (CEN, 2014; CEN, 2015a; CIE, 2010).

TSE CEN/TR 13201-1 (TSE, 2015) numaralı teknik raporda, yol aydınlatma sınıfı seçilirken, yolun tasarım hızı veya hız sınırı, trafik yoğunluğu, trafiğin yalnızca motorlu araçlardan mı oluştuğu yoksa motorsuz araç ve yayalar ile karışık mı olduğu, yolda gidiş geliş şeritlerini ayıran bir orta refüjün bulunup bulunmaması, kavşak yoğunluğu, park etmiş araçların olup olmaması, ortam parlaklığı ve görsel kılavuzlama gibi bir çok parametre göz önünde bulundurulmaktadır. Bu parametrelerin bazıları yolun geometrik yapısı ile ilgili olup değişmezken yoldaki araçların hızı, trafik yoğunluğu, ortam parlaklığı gibi parametreler ise zamana bağlı olarak değişebilmektedir. Bu nedenle sürücülerin yolda güvenli bir şekilde araç sürmeleri ve önlerine çıkan engelleri fark edebilmeleri için ihtiyaç duyacakları aydınlatmanın miktarı da zamana bağlı olarak değişebilmektedir. Aydınlatma otomasyon sisteminin amacı yoldaki değişken parametreleri takip ederek buna uygun dinamik bir aydınlatma yapılmasını sağlamak olmalıdır.

TSE CEN/TR 13201-1’de adaptif aydınlatma; “trafik yoğunluğu, zaman, hava şartları veya diğer parametrelere göre parlıltı veya aydınlık düzeyinde geçici olarak yapılan kontrollü değişiklikler” olarak tanımlanmaktadır. Raporda dikkat edilmesi gereken noktalar şu şekilde belirtilmiştir; “Normal (tasarım) aydınlatma sınıfının seçiminde herhangi bir çalışma periyodunda ortaya çıkması olası seçim parametrelerinin en yüksek değeri (örneğin en yoğun saatlerdeki trafik hacmi) göz önüne alınmalıdır. Diğer yandan bu sınıfta yapılan uygulama, değişen şartlar (örneğin hafta sonları, farklı hava şartları, farklı trafik hacimleri vb.) nedeniyle karanlık saatler boyunca sürekli geçerli olmayabilir. Normal (tasarım) aydınlatma sınıfını seçerken dikkate alınan parametrelerde meydana gelen geçici değişikliklerle, normal düzeydeki ortalama parlıltı veya aydınlık düzeyinin genellikle azaltılarak uyarlanmasına izin verilebilir, ya da bu zorunlu hale getirilebilir. Bu açıdan olması muhtemel en önemli parametreler; trafik hacmi, trafik oluşumu, kaldırımın gerçek zamanlı yansıtma özellikleri ve yol yüzeyinin mevcut durumudur (karanlık, aydınlık, kuru, ıslak, tuzlu, karlı, vb.). Ortam parlıltısının değişken etkisi de dikkate alınabilir. Adaptif aydınlatma düzeyi veya düzeyleri, normal aydınlatma sınıfının seçildiği çizelgede belirtilen bir sınıf veya sınıflardan seçilen ortalama parlıltı veya aydınlık düzeyi olmalıdır. Adaptif aydınlatma kullanılırken ortalama aydınlatma seviyesinde meydana gelen değişikliklerin M (motorlu trafik), C (çakışma alanları) veya P (yaya ve düşük hız alanları) aydınlatma sınıfları için gerekli olan diğer kalite büyüklüklerini (düzgünlük, kamaşma

sınırlaması, vb.) etkilememesi de önemlidir. Her ışık kaynağından çıkan ışık akısının loşlaştırma teknikleri kullanılarak aynı oranda azaltılması, parıltı veya aydınlık düzeyi düzgünlüğünü veya nesne kontrastını etkilemeyecek ancak eşik kontrast değerini artıracaktır. Bazı armatürleri devre dışı bırakarak ortalama aydınlatma düzeyini azaltmak, genellikle kalite kurallarınının gereklerini karşılamadığı için tavsiye edilmez. Parametre değerlerinin (örneğin trafik güzergâhları üzerindeki trafik izleme istasyonları (TMS) ve hava durumu (meteoroloji) istasyonlarında (AWS) tutulan kayıtlardan) değişkenlik yapısının iyi bilindiği ya da makul ölçülerde tahmin edilebildiği durumlarda birçok yerleşim alanlarında zaman esaslı basit bir kontrol sisteminin kullanılması uygun olabilir. Diğer durumlarda, gerçek zamanlı veriye dayalı interaktif kontrol sistemi tercih edilebilir. Bu yaklaşım, normal aydınlatma sınıfının; yol çalışmaları, ciddi kazalar, kötü hava veya yetersiz görüş durumunda da etkin olmasını sağlayacaktır.”

M aydınlatma sınıfları, orta seviyeden yüksek seviyeye kadar sürüş hızlarına izin verilen trafik güzergâhlarını kullanan ve bazı ülkelerde meskûn mahallerdeki yollar üzerinde giden motorlu araç sürücüleri için amaçlanmıştır. Bu sınıfların uygulaması, ilgili alanın geometrisine, trafiğe ve zamanla değişen koşullara bağlıdır. Uygun aydınlatma sınıfı, yolun işlevine, tasarım hızına, genel yol düzenine, trafik hacmine, trafik oluşumuna ve çevresel şartlara göre seçilmelidir.

M aydınlatma sınıfının seçilmesine ait TSE CEN/TR 13201-1’de yer alan örnek Çizelge 1.1’de verilmiştir.

**Çizelge 1.1 : TSE CEN/TR 13201-1'e göre M aydınlatma sınıfının seçimiyle ilgili parametreler.**

Parametre	Seçenekler	Açıklama		Ağırlıklandırma Değeri $V_w$	Seçilen $V_w$			
					$\Delta t_1$	$\Delta t_2$	$\Delta t_3$	$\Delta t_4$
Tasarım hızı veya hız sınırı	Çok yüksek	$v \geq 100$ km/saat		2				
	Yüksek	$70 < v < 100$ km/ saat		1	1	1	1	1
	Orta	$40 < v \leq 70$ km/saat		-1				
	Düşük	$v \leq 40$ km/ saat		-2				
Trafik hacmi		Otoyollar, çok şeritli yollar	İki şeritli yollar					
	Yüksek	Azami kapasitenin %65'inden büyük	Azami kapasitenin %45'inden büyük	1	1			1
	Orta	Azami kapasitenin %35'i ile %65'i arasında	Azami kapasitenin %15'i ile %45'i arasında	0		0		
	Düşük	Azami kapasitenin %35'inden küçük	Azami kapasitenin %15'inden küçük	-1			-1	
Trafik oluşumu	Yüksek oranda motorlu olmayan trafik ile karışık			2				
	Karışık			1				
	Yalnızca motorlu araç			0	0	0	0	0
Taşıt yolu ayrımı	Yok			1				
	Var			0	0	0	0	0
Kavşak yoğunluğu		Hemzemin kavşak / km	Köprülü kavşaklar, köprüler arası mesafe, km					
	Yüksek	$> 3$	$< 3$	1	1	1	1	1
	Orta	$\leq 3$	$\geq 3$	0				
Park etmiş araçlar	Var			1				
	Yok			0	0	0	0	0
Ortam Parlaklığı	Yüksek	Mağaza vitrinleri, reklam afişleri, spor sahaları, istasyon alanları, depo alanları		1	1	1	1	1
	Orta	Normal durum		0				
	Düşük			-1				
Görsel Kılavuzlama	Çok zor			2				
	Zor			1				
	Kolay			0	0	0	0	0
				Ağırlıklandırma değerlerinin toplamı $V_{ws}$	4	3	2	4
				$M = 6 - V_{ws}$	M2	M3	M4	M2

Trafik hacminin zamana bağlı olarak değişimi, tablodaki örnekte armatürlerin devreye girmesinden akşam yoğun trafik saatinin bitimine kadar ( $\Delta t_1$ ) akşam yoğun trafik saatinin bitiminden gece yarısına kadar ( $\Delta t_2$ ) gece yarısından sabah yoğun trafik saatinin başlangıcına kadar ( $\Delta t_3$ ) ve sabah yoğun trafik saatinin başlangıcından

armatürlerin devreden çıkmasına kadar ( $\Delta t_4$ ) olmak üzere dört zaman aralığı ( $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$ ,  $\Delta t_3$  ve  $\Delta t_4$ ) biçiminde ele alınmıştır. Uygulanacak olan M aydınlatma sınıfının belirlenmesi amacıyla kabul edilen zaman aralıklarının her biri için farklı parametrelere göre hesaplanan ağırlıklandırma değerlerinin toplanması gerekir. Ağırlıklandırma değerlerinin toplamının azami değeri (burada  $V_{WS, azami} = 4$ ), normal M aydınlatma sınıfının değerini hesaplamak için kullanılır (örneğin  $6 - V_{WS} = 2$  olur. Bu değer M2 sınıfının uygulanacağı anlamına gelir). Ağırlıklandırma değerlerinin toplamının en yüksek (burada  $V_{WS, asgari} = 2$ ) olduğu,  $\Delta t_3$  zaman aralığında ortalama parıltı düzeyi açısından uygulanabilen adaptif aydınlatma sınıfı M4 olarak seçilirken,  $\Delta t_2$  zaman aralığı için adaptif aydınlatma sınıfı M3 olarak uygulanabilir. Adaptif aydınlatma sınıfındaki değişikliklerin ortalama parıltı düzeylerini etkilediği, ancak diğer yandan o yol sınıfı için önerilen aydınlatma kalite büyüklüklerinin de sağlanması gerektiğine dikkat edilmesi önemlidir.

### 1.3 Yol Aydınlatması Kalite Büyüklükleri

TS EN 13201-2 Yol Aydınlatması – Bölüm 2: Performans Özellikleri başlıklı standartta motorlu trafik için yol yüzeyi parıltısına bağlı yol aydınlatma sınıflarının kalite kriterleri Çizelge 1.2'deki gibi verilmektedir.

**Çizelge 1.2 :** TS EN 13201-2'ye göre yol aydınlatma sınıflarının kalite kriterleri.

Sınıf	Kuru yol yüzeyi şartlarında taşıt yolunun yol yüzeyi parıltısı			Kamaşma sınırlandırılması	Çevrenin aydınlatılması
	$L_{ort}$ ( $cd/m^2$ ) [muhafaza edilen en düşük değer]	$U_0$ [en düşük]	$U_1$ [en düşük]	TI (%) <sup>a</sup> [en yüksek]	SR <sup>b</sup> [en düşük]
M1	2,0	0,4	0,7	10	0,5
M2	1,5	0,4	0,7	10	0,5
M3a	1,0	0,4	0,7	15	0,5
M3b	1,0	0,4	0,6	15	0,5
M3c	1,0	0,4	0,5	15	0,5
M4a	0,75	0,4	0,6	15	0,5
M4b	0,75	0,4	0,5	15	0,5
M5	0,5	0,35	0,4	15	0,5
M6	0,3	0,35	0,4	15	gerekli değil

<sup>a</sup> Düşük parıltıya sahip ışık kaynaklarının kullanıldığı yerlerde TI'da %5'lik bir artışa izin verilebilir.  
<sup>b</sup> bu kriter yalnızca taşıt yoluna bitişik kendine özgü şartları olan trafiğin bulunmadığı alanlarda uygulanabilir.

Çizelgede yer alan kalite büyüklüklerine ait tanımlar aşağıda verilmiştir.

**Ortalama yol yüzeyi parlıtısı (  $L_{ort}$  ):** Yol üzerindeki hesap noktaları parlıtılarının toplamının hesap nokta sayısına bölümü ile elde edilir. Birimi  $cd/m^2$ 'dir.

**Ortalama düzgünlük (  $U_0$  ):** En düşük yol yüzeyi parlıtısının, ortalama değere oranı.

**Boyuna düzgünlük (  $U_1$  ):** Sürüş şeridinin ortasındaki bir hat boyunca en düşük yol yüzeyi parlıtısının en yüksek yol yüzeyi parlıtısına oranı. Her bir şerit için ayrı ayrı hesaplanarak, bulunan en düşük değer alınır.

**Bağıl eşik artışı (  $TI$  ):** Yol aydınlatma tesislerinde, armatürlerdeki istenmeyen kamaşma ile neden olunan görülebilirlik kaybı ölçüsü.

**Çevreleme oranı (  $SR$  ):** Taşıt yolunun, hemen dış kenarlarında bulunan şeritlerin üzerindeki ortalama aydınlık düzeyinin, hemen iç kenarlarında bulunan şeritlerin üzerindeki ortalama aydınlık düzeyine oranı.

#### 1.4 Tezin Amacı

Bu tez çalışması kapsamında, trafik yoğunluğu ve yol üzerindeki araçların seyir hızı bilgisini trafik kontrol merkezinden alan, bu bilgiyi kullanarak loşlaştırma seviyesine karar veren ve armatür ışık akılarını uygun şekilde loşlaştıran ve tüm bunları yaparken güvenlik koşullarını bozmayan, bir yol aydınlatması kontrol sisteminin oluşturulması amaçlanmıştır. Sürücüler için gerekli güvenlik koşullarının göz ardı edilmemesi ve söz konusu gerekliliklerin belirlenmesi amacıyla, sistem tasarımının her aşamasında, açık alanda tesis edilen bir test yolu üzerinde çok sayıda görülebilirlik ölçümleri ve laboratuvar koşullarındaki testler ile doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Yol aydınlatması tesislerinin güvenlik ve verimliliklerini doğrudan etkileyen otomasyon loşlaştırma senaryoları, görülebilirlik ölçüm ve testlerinin sonuçlarına göre belirlenmiştir. Testler en yeni teknoloji olarak kabul edilen LED ışık kaynaklı yol aydınlatma tesisatları için yapılarak, kontrol sisteminin gerek görsel konfor, gerekse enerji verimliliği açısından optimum çalışabileceği koşullar belirlenmiştir.

Deneysel çalışmalar ile belirlenen loşlaştırma strateji ve senaryo algoritmalarının yol aydınlatması kontrol sistemlerine entegre edilmesi ile yol üzerinde değişen koşullara uygun olarak armatür ışık akılarını ayarlayarak enerji tasarrufuna olanak sağlayan,

diğer yandan gerekli güvenlik ve konfor koşullarını bozmayan “akıllı bir sistem” tasarlanması hedeflenmiştir.

## **1.5 Literatür Araştırması**

Bu tez çalışması ile ilgili literatür araştırması tezin amacına uygun olarak, sürücülerin görsel performansını değerlendirmek için gerçekleştirilmiş deneysel çalışmalar ile yol aydınlatması otomasyon sistemlerinde kullanılan kontrol stratejileri ve senaryolar olmak üzere iki başlık altında incelenmiştir.

### **1.5.1 Sürücülerin görsel performansını değerlendirmek için gerçekleştirilmiş deneysel çalışmalar**

Işık akısı ayarlanabilir yol aydınlatma sistemleri için geliştirilen pek çok kontrol sistemi bulunmaktadır. Literatürde de, elektronik kontrol devrelerinin ve haberleşme sistemlerinin performanslarını ortaya koyan çok sayıda çalışma mevcuttur (Yang ve diğerleri, 2014; Liang ve Chung Ku, 2014; Atıcı ve diğerleri, 2011; Zotos ve diğerleri, 2012; Lecesse ve diğerleri, 2014).

Sürücülerin görsel performansını değerlendiren çalışmalar ise daha az sayıdadır. Literatürde bu tezin esas amacı olan yol aydınlatması tesisatlarında ışık akısının loşlaştırılmasının görsel performansı nasıl etkilediğini doğrudan araştıran bir çalışmaya ulaşılamamış olmasına rağmen, tez kapsamında yol gösterici olacağı düşünüülerek bazı deneysel araştırmalara aşağıda yer verilmiştir.

Mayeur ve diğerleri, küçük hedef görülebilirliği (STV) konusunda laboratuvar ortamı ile gerçek yol koşulları arasındaki farkları (saha etkisi) ortaya çıkarabilmek için araştırmalar gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada çevre şartlarının (değişken fon ve belirgin hareketlilik) hedef fark etme performansını etkileyip etkilemediği araştırılmıştır. Sonuçta sabit bir fonda kolaylıkla fark edilebilen hedeflerin, fona değişken çevre koşulları eklendiğinde fark edilebilirliklerinin önemli oranda azaldığı görülmüştür.

Söz konusu çalışmada deneyler sırasında 1,5 m x 2 m genişliğindeki bir ekranın 2,75 metre uzağına oturan gözlemcilerden, ekranda beliren hedefleri fark ettiklerinde ayaklarının altındaki pedala basmaları istenmiştir. Üç farklı deney uygulanmıştır. İlk deneyde hedefler sabit bir fonda gösterilmiş, ikinci deneyde hedefler ekrandaki sabit

yol fotoğrafları üzerinde belirmiş, üçüncü deneyde ise yolda seyir halindeki bir aracın ön camından görünen görüntüye ait video gösterilerek aynı zamanda deneklerin bir direksiyon ile yoldaki virajları takip etmesi istenmiştir. Kare şeklindeki hedefler bu video görüntü üzerinde belirli zamanlarda ortaya çıkmıştır.

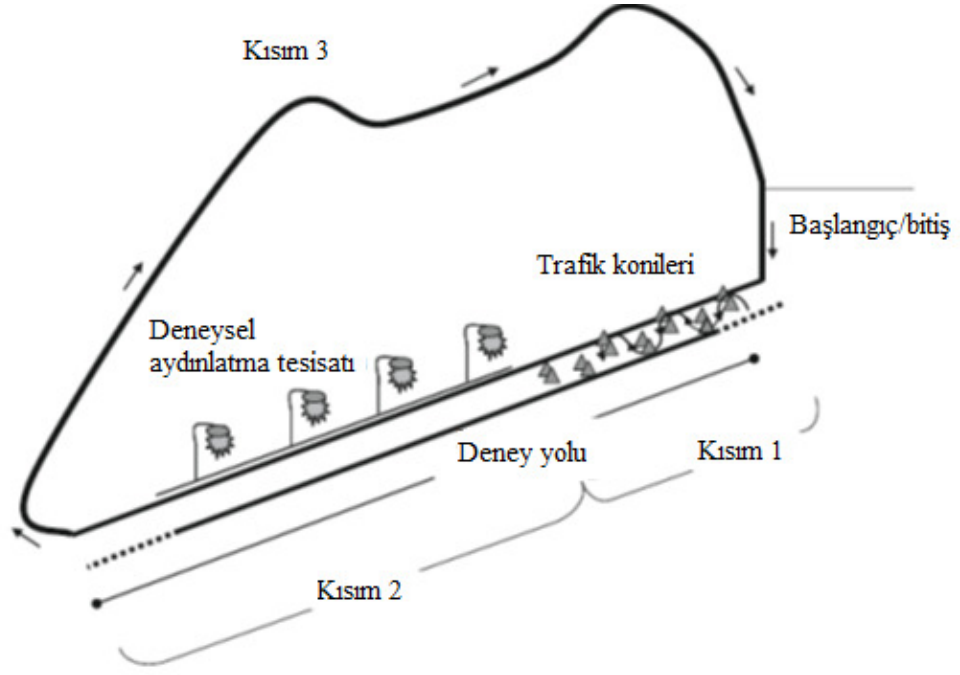
Deneyler sırasında, pedal hareketleri izlenerek doğru ve yanlış tepkiler ölçülmüştür. Ekranın farklı noktalarında 230 ms süreyle gösterilen hedefler, 1,5 s'den daha kısa sürede fark edilip pedala basıldığında gözlemcinin yeterli tepki verdiği kabul edilmiştir. Buna göre gözlemcilerin üç farklı deneydeki hedefi fark etme performansları karşılaştırılmıştır.

Performansların ortalamasına bakıldığında 1. deneyde hedefi fark etme oranı %99 iken, 2. deneyde %81; 3. deneyde ise %37 olmuştur. Hedef kontrastı 0,3 iken hedefi fark etme oranı %52, kontrast 1,2 iken hedefi fark etme oranı %79, kontrast 4,8 iken ise hedefi fark etme oranı %86 olmuştur.

Deneylerin sonucunda tüm kontrastlar için fon karmaşıklığı arttıkça hedef fark etme performansının düştüğü gözlemlenmiştir. Kontrast değeri 0,3 iken 1. 2. ve 3. deneylerde hedef fark etme performansları sırasıyla %98, %58 ve %7,8 olmuştur. Kontrast değeri 1,2 iken 1. 2. ve 3. deneylerde hedef fark etme performansları sırasıyla %99, %92 ve %46 olmuştur. Kontrast değeri 4,8 iken 1. 2. ve 3. deneylerde hedef fark etme performansları sırasıyla %99, %95 ve %62 olmuştur (Mayeur ve diğerleri, 2010a).

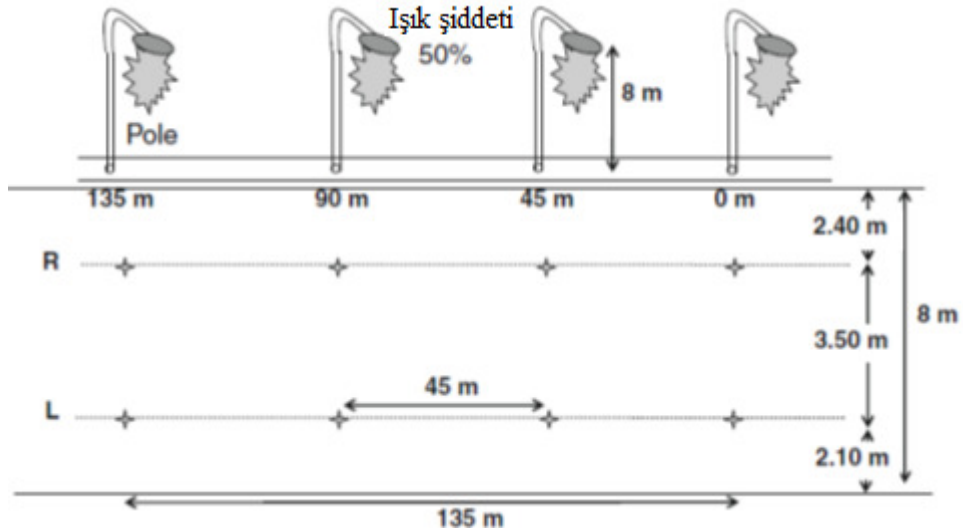
Mayeur ve diğerleri gerçekleştirdikleri bir başka deneysel çalışmada, araç sürücüsü ve yolcusunun yoldaki hedefleri fark etme sürelerini birbiri ile karşılaştırarak araç kullanma faaliyetinin görüş performansına etki edip etmediğini araştırmışlardır. Bu çalışma Şekil 1.4'de gösterilen toplam 1,2 km uzunluğundaki trafiğe kapalı bir parkurda gerçekleştirilmiştir.





**Şekil 1.4 :** Deney parkuru; Kısım 1: başlangıç noktası ve trafik konileri, Kısım 2: deney yolu aydınlatması, Kısım 3: ofis binaları.

8 metre genişliğindeki yolun 450 metrelik kısmı deneyler için veri toplama alanını oluşturmuştur. Bu 450 metrelik veri toplama sahasının 135 metrelik kısmı 8 metre yüksekliğindeki direklere yerleştirilen 150 W yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalı armatürler ile aydınlatılmıştır. Aydınlatma tesisatına ait parametreler Şekil 1.5'de gösterilmektedir. Yol kaplaması R2 sınıfıdır.

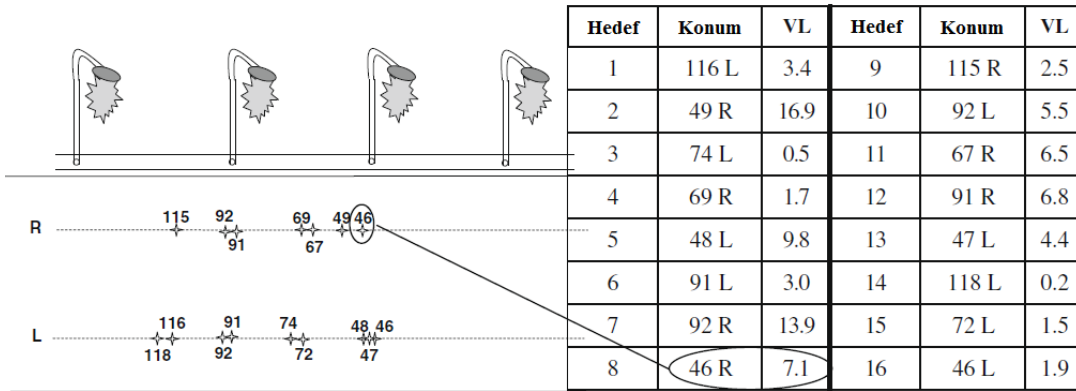


**Şekil 1.5 :** Deneysel amaçla aydınlatılan bölge şeması.

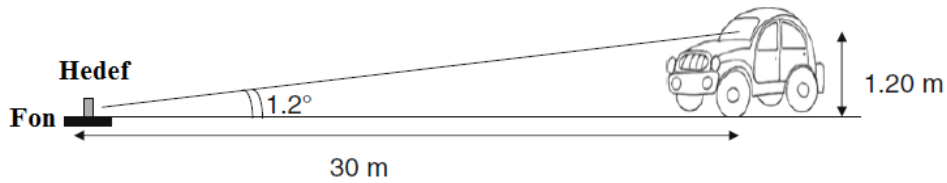
2002 model Peugeot 806 marka araç deney için gerekli ekipmanla donatılmıştır. Direksiyona yerleştirilen bir butona basıldığında aracın konumu kaydedilmektedir.

Böylece sürücü yoldaki hedefi görüp butona bastığında araç ile hedef arasındaki mesafe hesaplanabilmektedir. Deneyler sırasında aracın kısa farları açık tutulmuştur.

Bir kenarı 20 cm, yansıtma faktörü 0,60 olan kare hedefler kullanılarak, 30 metre uzaklıktan ve 1,2 metre gözlem yüksekliğinden fotometrik ölçümler alınarak görülebilirlik seviyeleri hesaplanmıştır. Adrian'ın modeli ile yapılan görülebilirlik seviyesi hesaplarına göre, hedefin konumu değişikçe kontrast değerlerinin 0,016 ile 0,608 arasında, görülebilirlik seviyesinin de 0,20 ile 16,9 arasında değiştiği hesaplanmıştır. Hedeflerin konumlarına göre görülebilirlik seviyeleri Şekil 1.6'da verilmektedir. Şekil 1.7'de ise parıltı ölçümleri için kullanılan geometri gösterilmektedir.



Şekil 1.6 : Hedef konumları ve görülebilirlik seviyeleri.



Şekil 1.7 : Parıltı ölçümleri için kullanılan geometrik uzaklıklar.

Bu hesaplamalara göre, kullanılacak hedeflerin yerleştirileceği 16 farklı nokta belirlenmiştir. Deneyler sırasında gözlemci önce sürücü konumunda sonra yolcu konumunda bulunmaktadır. Sürücü konumunda iken gözlemciden önce Şekil 1.4'de gösterilen deney sahasının başlangıcına yerleştirilmiş olan konileri 30 km/saat hız ile geçmesi, sonra aracı L ve R doğrultuları arasında sabit 40 km/saat hızla sürmesi istenmiştir. Aracın dışında bulunan bir araştırmacı L ve R doğrultularında daha önce belirlenmiş olan konumlara hedefleri yerleştirmiştir. Her turda hedefin yeri değiştirilmiştir. 16 farklı görülebilirlik seviyesinin test edilmesi için gözlemci

parkurda sürücü konumunda 16 tur, yolcu konumunda 16 tur atarak toplam 32 turda deneyi tamamlamıştır. Deneylede denek olarak yaş ortalaması 36 olan 34 yetişkin yer almıştır.

Deneylelerin sonucunda, yolcu konumunda olan gözlemcilerin daha erken hedefi görerek butona bastıkları ortaya çıkmıştır. Araştırmacılar araç kullanırken yoldaki engelleri fark etmenin zorlaştığını savunmaktadırlar. Diğer yandan yolun trafiğe kapalı olması nedeniyle görüş alanının karmaşık olmadığını, araç hızının düşük olması gibi parametrelerin önemli olduğunu, gerçek yol koşullarındaki sonuçların daha kabul edilebilir olabileceğini belirtmişlerdir. Bu amaçla gerçek yol koşullarını taklit eden simülasyon programları ile deneyleler yapılmasını önermişlerdir (Mayeur ve diğerleri, 2010b).

Aynı araştırmacılar araç farlarının performansını ölçtükleri bir diğer çalışmalarında, araç sürüş simülatörü ile deneyleler gerçekleştirmişler, Adrian'ın görülebilirlik seviyesi modelinin, görüş performansını hedef farketme uzaklığına bağlı olarak açıklayabilen uygun bir yöntem olduğu sonucuna varmışlardır. Aynı zamanda deneylelerde kullanılan referans hedefin (bir kenarı 20 cm olan küçük kare hedefler) doğal koşullarda yolda karşılaşılabilcek olan gerçek engelleri doğru şekilde temsil ettiğini de ifade etmişlerdir. Ancak çalışmanın sadece araç farlarını dikkate aldığını ve yol aydınlatmaları için genellenemeyeceğini de belirtmişlerdir (Brémond ve diğerleri, 2013).

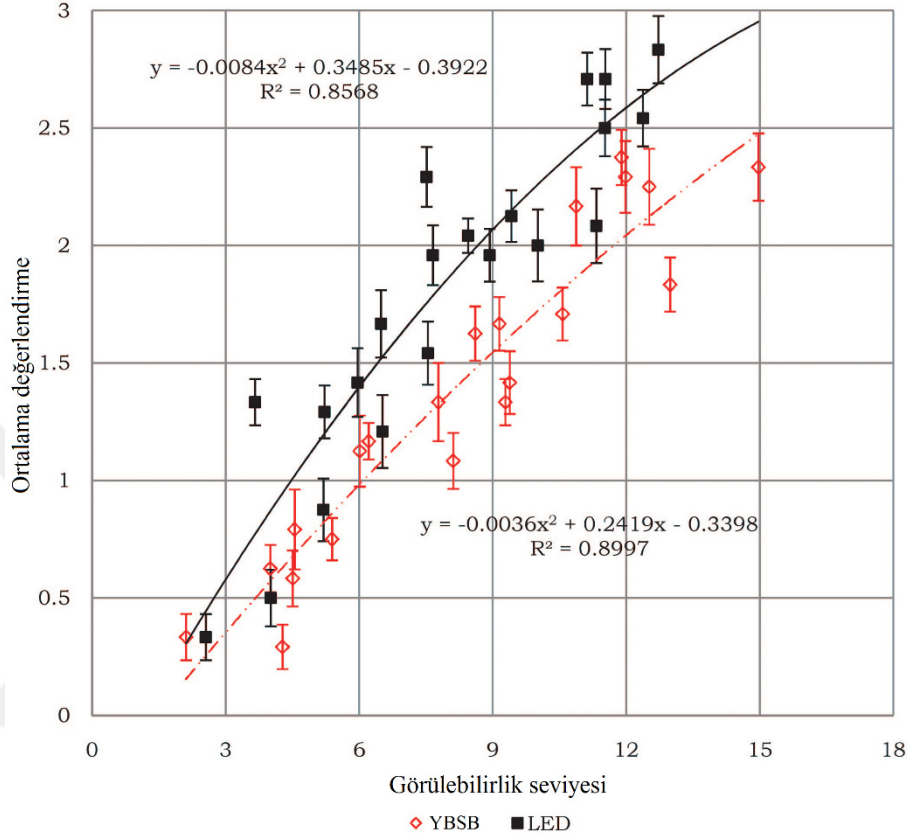
Davoudian ve diğerleri, gerçekleştirdikleri bir çalışmada kamaşmanın görüş performansına etkisini araştırmışlardır. Gözlemciden 4 metre uzaktaki beyaz bir ekran üzerine bir sokak görüntüsü yansıtılmıştır. Kamaşma için, bu ekrandaki sokak aydınlatma armatürlerinin bulunduğu konumlara LED ışık kaynakları yerleştirilmiştir. Deneyleler kamaşma yokken, düşük kamaşma (gözlemcinin gözünde ölçülen aydınlık düzeyi yaklaşık 1 lux) ve yüksek kamaşma (gözlemcinin gözünde ölçülen aydınlık düzeyi yaklaşık 2 lux) koşullarında ve ayrıca farklı renk sıcaklıkları için (soğuk ve sıcak) gerçekleştirilmiştir. Her bir kamaşma koşulu için ekranda, 650 ms süreyle farklı hedefler merkezi ve çevresel görme alanları içinde gösterilmiştir. Gözlemciden merkezdeki landolt çemberinin eksik bölgesinin konumunu belirlemesi (üst-alt), köpeğin yolun sağında mı, solunda mı olduğunu bilmesi ve köpeğin yönünü belirlemesi istenmiştir.

Deneyler yaşları 20 ile 75 arasında değişen toplam 42 gözlemci (21 erkek, 21 kadın) ile gerçekleştirilmiştir. Her bir gözlemci için yaşına bağlı olarak kamaşmadan kaynaklanan örtü parıltısı ( $L_{\text{örtü}}$ ) değeri hesaplanmıştır. Örtü parıltısı değerlerine göre de kamaşma koşulları altında hedef cismin etkin kontrast değeri hesaplanmıştır. Ayrıca her bir gözlemci için ardışık deneyler yapılarak hedef cismin kontrast değeri değiştirilmiş ve gözlemcinin hedef cisimi görebildiği parıltı kontrast eşik değeri bulunmuştur.

Deneyler sonucunda kamaşmadan kaynaklanan örtü parıltısının, parıltı kontrast eşikini arttırdığı görülmüştür. Ancak bu artış, matematiksel hesaplar ile tahmin edilen artıştan daha düşük olmuştur. Kamaşma kaynağının boyutunun ve renk sıcaklığının istatistiksel açıdan belirgin bir fark oluşturmadığı bulunmuştur. Deney sonuçlarına göre, aynı kamaşma koşulları altında, kamaşma nedeniyle gözde oluşan örtü parıltısı özellikle 50 yaştan sonra artmakta, daha genç yaşlarda ise örtü parıltısında yaşa bağlı belirgin bir değişiklik olmamaktadır. Kamaşma kaynağı değiştirilerek örtü parıltısı arttığında ise 50 yaşın üzerinde parıltı kontrast eşik değeri değişmezken, 50 yaşın altındaki gözlemciler için eşik değerinin de arttığı gözlemlenmiştir (Davoudian ve diğerleri, 2014).

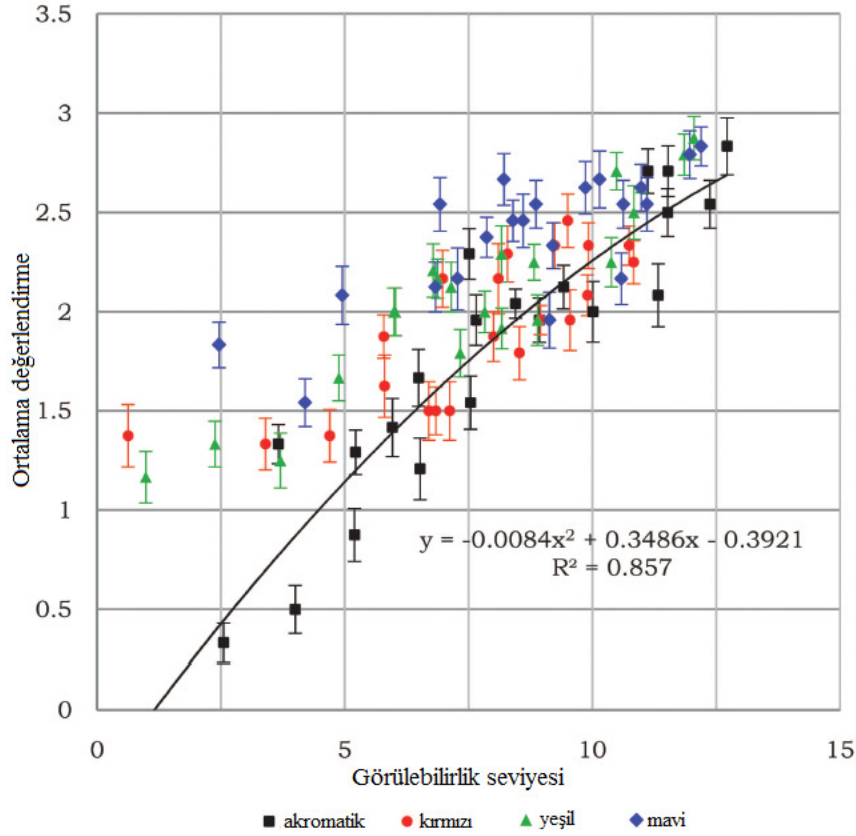
Fusheng Li ve diğerleri, LED ve yüksek basınçlı sodyum buharlı lambaları karşılaştıran çalışmalarında, üniversite kampüsünde aynı geometrideki iki yoldan birini LED, diğerini yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalı armatürler ile aydınlatmışlardır. Aydınlatma sistemleri her iki yolda da  $2 \text{ cd/m}^2$  yol yüzeyi parıltısı elde edilecek şekilde tasarlanmıştır. Deneysel çalışmada 18 cm x18 cm boyutlarında düz kare şeklinde, 3 adet renkli (mavi, yeşil ve kırmızı) bir adet de akromatik (fizikte beyaz ve siyah radyoaktif spektrumda bulunmadığı için renk olarak kabul edilmemekte, beyaz, siyah ve bu iki rengin aralarında oluşturdukları ara renkler akromatik renk olarak tanımlanmaktadır) hedef kullanılmıştır. Yaş ortalaması 24 olan 2 kız, 6 erkek toplam 8 üniversite öğrencisi ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Gözlemciler hedefe arkası dönük olacak şekilde hedeften 83 metre uzakta konumlanmıştır. Araştırmacı hedeflerden birini rasgele seçerek yola yerleştirdikten sonra, gözlemciden hedefe doğru dönerek hedefin görülebilirliğini 0-4 arasındaki skalada değerlendirerek yazmasını istemiştir. Hedeflerin görülebilirlik seviyesi de ayrıca cisim ve fon parıltı ölçümleri yapılarak hesaplanmıştır. Daha sonra her bir hedef için değerlendirme ve hesap sonuçları arasındaki ilişki Şekil 1.8'de verilen grafik ile

gösterilmiştir. Hesaplanan görülebilirlik seviyesi arttığında gözlemcinin değerlendirdiği görülebilirlik seviyesi de artmaktadır. Gözlemcilerin değerlendirmelerine göre, hesaplanan görülebilirlik seviyesi aynı olan akromatik hedeflerin LED ışık kaynağı altında daha iyi görüldüğü belirlenmiştir.



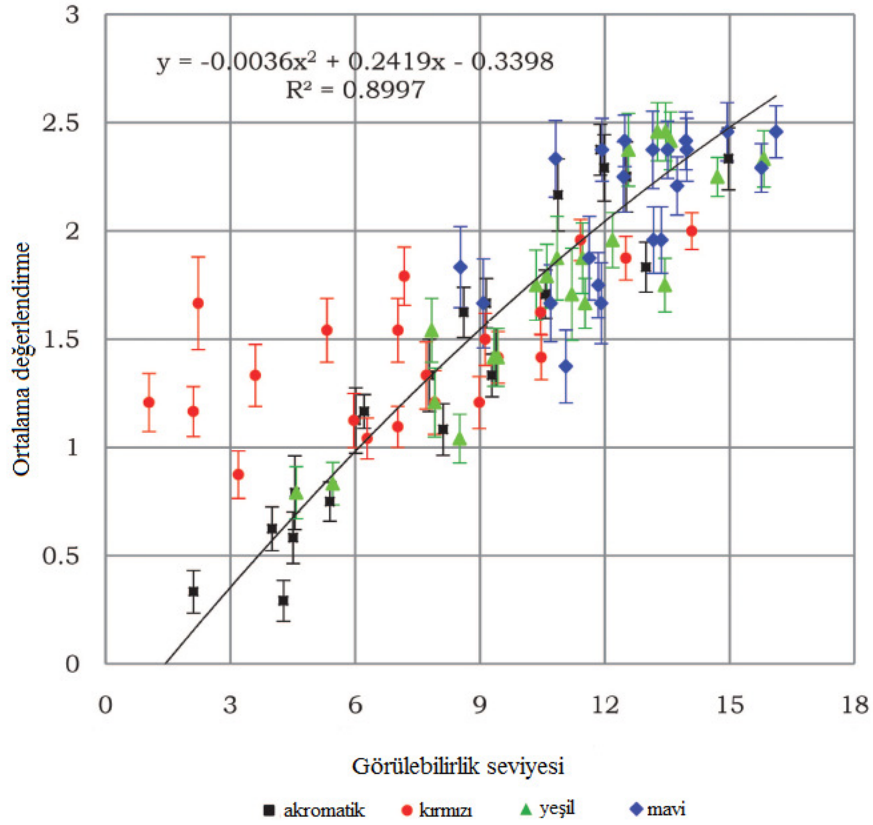
**Şekil 1.8 :** LED ve yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalı armatürler ile aydınlatılan akromatik hedef için değerlendirme ve hesap sonuçları arasındaki ilişki. (Burada; x: bağımsız değişken (görülebilirlik seviyesi), y: bağımlı değişken (ortalama değerlendirme),  $R^2$ : açıklayıcılık (belirtme) katsayısıdır.)

LED ışık kaynaklı armatürler ile aydınlatılan yolda, aynı görülebilirlik seviyesindeki renkli hedeflerin değerlendirme sonuçları akromatik hedeflere göre daha yüksek olmuştur. Sonuçlar Şekil 1.9'da gösterilmektedir.



**Şekil 1.9 :** LED’li armatürlerle aydınlatılan akromatik ve renkli hedefler için değerlendirme ve hesap sonuçları arasındaki ilişki. (Burada; x: bağımsız değişken (görülebilirlik seviyesi), y: bağımlı değişken (ortalama değerlendirme),  $R^2$ : açıklayıcılık (belirtme) katsayısıdır.)

Yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalı armatürler ile aydınlatılan yolda, aynı görülebilirlik seviyesindeki mavi ve yeşil renkli hedeflerin değerlendirme sonuçları akromatik hedefler ile neredeyse aynı olmuştur. Buna göre, yüksek basınçlı sodyum buharlı ışık kaynağının yeşil ve mavi renklerin görülebilirlikleri üzerinde belirgin bir etkilerinin olmadığı sonucuna varılmıştır. Ancak özellikle düşük görülebilirlik seviyelerinde kırmızı renkli hedef için değerlendirme sonuçları yüksek çıkmıştır. Sonuçlar Şekil 1.10’da gösterilmektedir.



**Şekil 1.10 :** Yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalı armatürler ile aydınlatılan akromatik ve renkli hedefler için değerlendirme ve hesap sonuçları arasındaki ilişki. (Burada; x: bağımsız değişken (görülebilirlik seviyesi), y: bağımlı değişken (ortalama değerlendirme),  $R^2$ : açıklayıcılık (belirtme) katsayısıdır.)

Deneylerde kullanılan LED'li armatürlerin renksel geriverimi ( $R_a=66$ ) yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalı armatüre göre ( $R_a=26$ ) daha yüksektir. Görülebilirliğin yalnızca parlıltı kontrastına bağlı olarak değişmediğini, renk kontrastının da çok önemli bir kriter olduğunu söyleyen bu çalışmada, renksel geriverimi daha yüksek olan LED ışık kaynaklı armatürler ile aydınlatılan yolun üzerindeki cisimlerin görülebilirliğinin daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır (Fusheng ve diğerleri, 2012).

Cengiz ve diğerleri, üç ayrı sürücü ile kırsal alandaki bir yolda gece ve gündüz saatlerinde deneyler yaparak mezopik görme koşullarında adaptasyon parlıltısını araştırmışlardır. “Gözün odaklandığı nokta ve aynı anda odaklanılan noktanın etrafındaki parlıltı dağılımı da bilinirse, retinadaki ışık dağılımını hesaplamak mümkün olabilir” tezinden yola çıkılarak, sürücülerin araç kullanırken göz hareketleri kamera ile kaydedilmiş, eş zamanlı olarak yol üzerinde yine kamera ile parlıltı ölçümleri yapılmıştır.  $1^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  ve  $20^\circ$  görme açılarında yapılan ölçümler sonucunda, görme alanı genişledikçe gözlemciden gözlemciye değişen ortalama parlıltı

değerlerindeki farklar azalmıştır. Yolun aydınlatılmayan bölgelerinde sürücüler uzun farları yaktıkları için tüm görme açılarında ortalama parıltı değeri aydınlatılmış yoldakine göre daha yüksek olmuştur. Yapılan bu çalışmada görsel adaptasyon merkezi görüş alanının merkezi ile aynı alınmıştır. Çalışma gerçek yol koşullarında yapılan bir görsel deney olması açısından önemlidir, ancak çalışmanın sonuçlarının doğrulanması için araç sürüşünü simüle eden daha fazla deneylerin yapılması gerektiği de araştırmacılar tarafından belirtilmiştir (Cengiz ve diğerleri, 2014).

### **1.5.2 Yol aydınlatması otomasyon sistemlerinde geliştirilen kontrol stratejileri ve senaryolar**

Enerji tasarrufu ve CO<sub>2</sub> emisyonlarının azaltılması, diğer birçok alanda olduğu gibi yol aydınlatma tesisleri için de son yıllarda üzerinde önemle durulan konulardır. Yol aydınlatmalarında, gelişen teknolojilerin kullanımıyla birlikte enerji tasarrufuna yönelik çalışmalar dünya çapında hız kazanmıştır. Kuzey Amerika'dan, Avrupa ve Asya'ya uzanan coğrafyada birçok ülkede gerçekleştirilen pilot projelerle yol aydınlatmalarında yeni teknolojilerin kullanılması yaygınlaşmaktadır.

Tüm dünyada tesis edilen kontrol edilebilir aydınlatma sistemlerinin sayısı arttıkça, trafik güvenliğini tehlikeye atmadan, doğru ve etkin loşlaştırma stratejilerinin geliştirilmesi konusu da gündeme gelmektedir.

Yol aydınlatması otomasyon sistemlerinde geliştirilen kontrol stratejileri ve senaryolar incelendiğinde üç yaklaşım görülmektedir.

- Zaman ayarlı loşlaştırma,
- Trafik yoğunluğuna bağlı loşlaştırma,
- Meteorolojik koşullara bağlı loşlaştırma.

#### **1.5.2.1 Zaman ayarlı loşlaştırma**

Bu yöntemde geçmiş verilere dayanarak o yol üzerinde farklı saatlerdeki trafik yoğunluk seviyeleri belirlenmekte yada tahmin edilmekte, daha sonra belli zaman aralıklarında bu yoğunluk seviyelerine göre hesaplanan parıltı düzeyini sağlayacak şekilde lamba ışık akılarının loşlaştırılması gerçekleştirilmektedir.

Çin Guangdong bölgesindeki Heshan şehrinde Eylül 2004 tarihinde mevcut lambaları değiştirmeden, merkezi loşlaştırma yapılan bir sistem kurulmuştur. 1350 lambayı



kapsayan tesisatta yol aydınlatmaları akşam 18:00'dan sabah 6:00'a kadar çalışmaktadır. İlk 20 dakika boyunca lambalar loşlaştırma yapılmadan çalıştırılmakta, böylece deşarj lambalarının kararlı (rejime girme) çalışmaya başlayana kadar geçen ısınma süresi garantiye alınmaktadır. 18:20'de armatür gücü %80 seviyesine azaltılarak ışık akısı düşürülmekte ve gece yarısına kadar bu seviyede çalışmaya devam etmektedir. Armatür gücünün düşürülmesi 15 dakika gibi bir süreye yayılarak, sistem güç tüketimindeki azalmaya bağlı oluşan ışık akısındaki değişimin yavaş olması ve sürücülerin (kullanıcıların) değişimi fark etmemeleri sağlanmaktadır. Trafik yoğunluğunun az olduğu gece yarısından sabah 5:00'a kadar olan zaman aralığında sistem güç tüketimi %70 seviyesine azaltılmaktadır. Çalışmada lamba ışık akılarını azaltmanın trafik güvenliği ve sürüş konforu açısından sorun oluşturmadığı belirtilmektedir. Bu uygulama ile 9 aylık bir periyot sonunda %27 oranında enerji tasarrufu elde edildiği kaydedilmiştir (Chung ve diğerleri, 2005).

2009 yılında Kanada Quebec'te 6000 kişinin yaşadığı bir yerleşim bölgesi olan Lac Megantic şehrinde, konutsal alandaki yolun bir kısmında gece 22:00 ile sabah 6:00 saatleri arasında armatürler %65 seviyesine loşlaştırılmaktadır. Bu çalışma ile %53 oranında enerji tasarrufu elde edildiği ve ileride loşlaştırma uygulamasının tüm şehir geneline yayılmasının planlandığı açıklanmaktadır (Adaptive Street Lighting Guide, 2012).

Fransa'da Senart en Essonne şehrinde, yaklaşık 3100 adet yol aydınlatması armatüründen oluşan tesiste trafik yoğunluğu olan saatlerde lambaların ışık akıları %80, diğer zamanlarda ise %60 oranında olacak şekilde ayarlanmaktadır. Trafik yoğunluğunun daha az olduğu bölgelerde ise gece 11:00 ile sabah 5:00 arası %40'a kadar loşlaştırma yapılabilmektedir. Enerji tasarruf oranının %35 olduğu ifade edilmektedir (Smart Cities, 2012).

### **1.5.2.2 Trafik yoğunluğuna bağlı loşlaştırma**

Mevcut teknolojik gelişmeler, çeşitli algılayıcılar ve kameralar ile yoldan geçen araç sayısının ve trafik yoğunluğunun gerçek zamanlı olarak ölçülmesine olanak sağlamaktadır. Ölçülen veriler, kontrol sistemine giriş parametresi olarak tanımlandığında, yine gerçek zamanlı olarak lamba ışık akılarını o anki yol koşullarına uygun şekilde değiştirmek mümkün olabilmektedir.

İngiltere'de ilk loşlaştırılabilen aydınlatma uygulaması M65 otoyolunda gerçekleştirilmiştir. Bu tesisatta yol üzerinden saatte geçen araç sayısı takip edilerek loşlaştırma yapılmaktadır. Otoyoldan saatte 3000'den daha fazla sayıda araç geçiyorsa loşlaştırma yapılmamakta, lambalar %100 ışık akısı ile çalışmaktadır. Saatte geçen araç sayısı 3000 ile 1500 arasında olduğunda lambaların ışık akısı %70 seviyesine indirilmekte, araç sayısı 1500'ün altında iken de lambaların ışık akısı %50 seviyesine düşürülmektedir. Bu proje ile yılda %24 oranında enerji tasarrufu elde edildiği açıklanmaktadır (Collins ve diğerleri, 2002).

Finlandiya'da 2005 sonbaharında Helsinki Ring III yolu üzerinde ve 2006 yılı sonunda da Helsinki Porvoo'da VT7 otoyolunda akıllı yol aydınlatması sistemleri kurulmuştur. Her iki yolda da merkezi kontrol sisteminde, yoldan geçen araç sayısı ve yol kaplaması üzerindeki parlıltı düzeyi bilgileri toplanarak lambaların ışık akıları uygun loşlaştırma seviyesine ayarlanmaktadır. Ring III yolunda yoldan geçen araç sayısına bağlı olarak armatür ışık akıları %40, %50, %60, %70, %80, %90 ve %100 olmak üzere 7 farklı seviyede ayarlanabilmektedir. VT7 yolunda ise armatür ışık akıları %40, %60, %80, ve %100 olmak üzere 4 farklı seviyede ayarlanabilmektedir.

Trafik yoğunluğu sürekli değişim gösteren Ring III yolunda lamba ışık akıları da sürekli değiştirilmektedir. Bu sistemde, araç sayısı verisi alınmakta, işlenmekte ve armatürlere komut verilmektedir. Sürücü konforunu etkilememek için lambaların ışık akıları aniden değiştirilmemekte, ışık akısındaki değişim belli bir süreye (%5 değişim için 2 dakika) yayılarak yapılmaktadır. Bu gecikme nedeniyle, araç sayısındaki değişimin hızlı olduğu bazı durumlarda yol üzerindeki ortalama parlıltı düzeyi gerekenden fazla ya da az olabilmektedir. Bu nedenle Ring III yolundaki gibi lamba ışık akılarını sürekli değiştirmek yerine, trafik yoğunluğuna bağlı sadece 2 ya da 4 loşlaştırma seviyesinin kullanılması önerilmektedir. Dört loşlaştırma seviyeli VT7 yolunda lambalar daha uzun süre aynı loşlaştırma seviyesinde kararlı bir şekilde çalışabilmektedir. VT7 yolunda yapılan hesaplar ortalama %45 oranında yıllık enerji tasarrufu elde edilebileceğini göstermektedir (Guo ve diğerleri, 2007).

### **1.5.2.3 Meteorolojik koşullara bağlı loşlaştırma**

Yol yüzeyi üzerinde yaratılan parlıltı düzeyi değerleri ve görüş konforu yolun ıslak, kuru, karla kaplı ya da havanın sisli olmasına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Meteorolojik koşullara göre değişen yol kaplaması üzerindeki parlıltı düzeyleri, gerçek

zamanlı ölçülerek otomasyon sisteminde kontrol parametresi olarak kullanıldığında, yol yüzeyindeki parıltı düzeyi güvenlik ve konfor için ihtiyaç duyulan seviyelere ayarlanabilmektedir.

Hollanda'da trafik yoğunluğu ve meteorolojik koşulları dikkate alarak loşlaştırma yapılan bir yol aydınlatma otomasyon sistemi bulunmaktadır. Bu sistemde, sis ya da yoğun trafik ve yağmur koşulları bir araya geldiğinde, lambalar %200 ışık akısı seviyesinde (yol yüzeyi ortalama parıltı düzeyi:  $2\text{cd/m}^2$ ), yoğun trafikte %100 seviyesinde (yol yüzeyi ortalama parıltı düzeyi:  $1\text{cd/m}^2$ ) çalışmakta, gece geç saatlerde saatte geçen araç sayısı 800'den az olduğu durumda ise, hava koşulları da uygunsa, ışık akısı %20 seviyesine (yol yüzeyi ortalama parıltı düzeyi:  $0,2\text{cd/m}^2$ ) loşlaştırılmaktadır (Hogema ve diğerleri, 1998).

Norveç Oslo'da kurulan otomasyon sisteminde araç yoğunluğu az, yol yüzeyi ya da kenarları karla kaplı iken lambaların ışık akısı %20 seviyelerine düşürülebilmektedir. Bu uygulamanın ışık kirliliğini azaltarak yıldızları ve aurora yani kuzey ışıklarını gözlemlemek isteyenler için olumlu etkilerinin de olduğu açıklanmaktadır (Bjelland ve Kristoffersen, 2007).

Güney Finlandiya'da dört şeritli bir otoyol olan VT1 yolunda farklı hava koşullarında yol yüzeyi parıltı düzeyi değerleri ölçülmüş, bu bilginin yol aydınlatması otomasyon sistemlerinde uygun şekilde kullanılabilmesi için çalışmalar yapılmıştır. Yapılan ölçümlere göre; kar yağışı durumunda, yapılan tuzlama ve temizleme çalışmaları sonrasında yol yüzeyinde kar bulunmasa dahi, yol çevresinin karla kaplı olması nedeniyle, yol yüzeyinde yaratılan ortalama parıltı düzeyleri kuru hava koşullarına oranla %40 ila %100 oranında daha fazla olabilmektedir (Ekrias ve diğerleri, 2008).

Islak yol koşullarında da yol yüzeyi ortalama parıltısının normaldekenden yüksek olduğu ölçülmektedir. Ancak bu koşullarda yol yüzeyinin aynasal yansıtma karakteristiği nedeniyle parıltı düzgünlüğünün bozulması sürücüler için rahatsız edici olmakta ve yağışlı havanın loşlaştırma için kontrol parametresi olarak kullanılmasını zorlaştırmaktadır.

Yol üzerinde gerçek zamanlı parıltı düzeyi ölçümleri ile farklı hava koşullarında lambalar loşlaştırılabilen, böylece enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Literatürde bu tür uygulamalarda, araç farlarının yol yüzeyi parıltısı üzerindeki etkisinin de dikkate alınması, ölçüm aletlerinin yerleştirileceği nokta ve yüksekliğin çok dikkatli

hesaplanması gerektiği üzerinde önemle durulmaktadır. Enerji tasarrufu için önemli bir potansiyel olsa da, meteorolojik koşulların otomasyon sistemlerinde kontrol parametresi olarak kullanılabilmesi için daha fazla araştırma ve örnek uygulamalara ihtiyaç vardır.

Dünyadaki uygulamalarda çok basit sistemlerden, son teknolojinin kullanıldığı karmaşık sistemlere kadar çeşitlilik gösteren aydınlatma kontrol sistemleri için telemanagement, adaptive, dynamic ve intelligent control systems gibi farklı isimler kullanılmaktadır. Hollanda, Norveç, Finlandiya, Kuzey Amerika ve Çin'deki örnek projelerin yanı sıra, E-Street adı altında birçok ülkenin ortak olduğu bir Avrupa Birliği projesi de gerçekleştirilmiştir (Intelligent Road and Street Lighting in Europe, 2007).

## 1.6 Hipotez

Yol aydınlatmaları, sürücülerin hareket halinde iken önlerine çıkan engeli fark edip güvenli durma mesafesi içinde durmalarını sağlayacak şekilde yeterli aydınlatmayı sağlayabilmelidir. Aydınlatma otomasyon sistemi uygulandığında, yolda araçlar belli bir hızda seyrederken armatürlerin ışık akıları ayarlanarak aydınlatma sınıfı TSE CEN/TR 13201-1 numaralı teknik rapora uygun olarak M1 ile M6 sınıfları arasında değiştirilebilmektedir. Literatür incelendiğinde, sürücülerin çeşitli koşullar altındaki görsel performansını araştıran çalışmalar olmakla birlikte, armatür ışık akılarının loşlaştırılmasının diğer bir deyişle aydınlatma sınıfının değiştirilmesinin sürücülerin görsel performansını nasıl etkilediği konusunda kapsamlı bir araştırma bulunmamaktadır. Bu tez çalışması ile; araçlar, şehir içi yollarda geçerli olan M2 sınıfı için yasal hız sınırı olarak kabul edilebilecek olan 90 km/saat ile hareket ederken, aydınlatma sınıfının M3 yada M4 yapılmasının diğer bir deyişle yol yüzeyi parlaltısının  $1,5 \text{ cd/m}^2$ 'den  $1 \text{ cd/m}^2$  yada  $0,75 \text{ cd/m}^2$ 'ye düşürülmesinin ya da araçlar M3 sınıfı yollar için yasal hız sınırı olarak kabul edilebilecek olan 70 km/saat ile hareket ederken, aydınlatma sınıfının M4 yada M5 yapılmasının diğer bir deyişle yol yüzeyi parlaltısının  $1,0 \text{ cd/m}^2$ 'den  $0,75 \text{ cd/m}^2$  yada  $0,5 \text{ cd/m}^2$ 'ye düşürülmesinin sürücülerin görsel performansına etkilerinin araştırılması hedeflenmektedir. Tez çalışmasının amacı araçlar belli bir hızda seyrederken yol yüzeyi parlaltısı değiştiğinde yoldaki cisimlerin VL değerlerindeki değişimi ortaya koymaktır. Hesap alanındaki VL değerleri farklı aydınlatma sınıfları için aynı güvenli durma mesafesinden alınan ölçümlere göre değişmiyorsa yada değişim kabul edilebilir sınırlar içinde kalıyorsa,

armatür ışık akılarının değiştirilmesinin sürücülerin görsel performansını değiştirmeyeceği sonucu ortaya çıkacaktır. Bu şekilde, trafik yoğunluğunun azaldığı, buna karşılık araç hızlarının düşmediği saatlerde yol parıltı düzeyinin azaltılmasının güvenlik açısından kritikliği de incelenmiş olacaktır.





## 2. DENEY SAHASININ TASARIMI VE ÖLÇÜMLER

Son yıllarda bazı araştırma birimlerinde (üniversiteler, enstitüler, vs.) yol aydınlatması otomasyon sistemlerinin geliştirilmesi amaçlı test sahaları tesis edilmektedir. Bu test sahalarında, hem farklı ışık kaynağı ve armatürlerin karşılaştırılması hem de farklı yol koşulları oluşturularak sürücü güvenlik ve konfor koşullarının incelenmesi çalışmaları yapılmaktadır.

ABD’de Virginia Tech Üniversitesi’ne bağlı Ulaştırma Enstitüsü (VTTI) tarafından işletilen “Akıllı Yol” son teknoloji ile donatılmış, tam kapsamlı bir araştırma tesisidir. Yol üzerinde yağmur, sis ve kar simülasyonları yapılabilmektedir. 39 aydınlatma direği, her bir direkte 3 farklı aydınlatma armatürü bulunmakta ve direk yükseklikleri 11 ile 15 metre arasında ayarlanabilmektedir. Ayrıca hareketli zeminlere yerleştirilmiş portatif aydınlatmalar, yaya yolları gibi farklı yol tesisatlarını oluşturma amaçlı kullanılmaktadır. Kablosuz haberleşme sistemi ile donatılmış olan deney yolu bir kontrol odasından izlenmekte ve kumanda edilmektedir (Virginia smart road, 2013).

Hollanda’da Delft Teknoloji Üniversitesi’nde (TU Delft), üniversite kampüs alanında LED ışık kaynaklı aydınlatma armatürleri kullanılan ve mevcut sistemlere göre daha az enerji tükettiği iddia edilen bir aydınlatma sistemi test edilmektedir. Hareket sensörleri ile donatılmış olan sistemde herhangi bir araç, bisiklet ya da yaya algılanmadığında lambalar belli oranlarda loşlaştırılmaktadır. Kablosuz haberleşme ile tüm sistem bir merkezden kontrol edilmektedir (Intelligent street lighting, 2013).

Ülkemizde de Ankara’da örnek olması amacı ile tesis edilmiş herbiri yaklaşık 50 armatürlü üç LED ışık kaynaklı yol aydınlatma tesisatından birinde tüm stratejilerin yaratılabilmesine olanak sağlayan otomasyon sistemi mevcuttur (Sokak aydınlatma pilot projeler, 2012). Maalesef, güvenlik ve konfor koşullarını bozmadan enerji tasarrufu sağlayabilen loşlaştırma stratejileri hakkında uluslararası geçerlilikte net bir bilgi olmadığı için, demo amaçlı tesis edilmiş bu tesisatta otomasyon sistemi verimli olarak kullanılamamaktadır.

Tez çalışmasının deney sahasını oluşturabilmek için, İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) ve İSBAK İstanbul Bilişim ve Akıllı Kent Teknolojileri Anonim Şirketi ortak

çalışması ile, T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından desteklenen 0660.STZ.2014 kodlu proje kapsamında, İTÜ Ayazağa Kampüsü'nde, sürücü güvenlik ve konforunu tehlikeye sokmadan, tüketilen enerji miktarını azaltmak için doğru loşlaştırma senaryolarının entegre edilebilmesi hedefli, gerçek yol modeli üzerinde tüm parametreler dikkate alınarak deneysel çalışmaların gerçekleştirilebileceği bir test yolu kurulmuştur.

## **2.1 Test Yolu Aydınlatma Tesisatının Tasarımı**

Test yolu aydınlatma tesisatı için armatür seçimi, direk yüksekliği, direkler arası açıklık, konsol boyu gibi çeşitli parametrelere karar verilirken gerek bu çalışma kapsamında gerçekleştirilecek saha testlerinde ihtiyaç duyulması halinde farklı parlı ve kontrastlar yaratılabilmesi amacıyla; gerekse ileride yol aydınlatması konusunda gerçekleştirilecek benzer ya da farklı deneysel çalışmalarda esnek çözümler oluşturulabilmesi için, test yolunda direk yüksekliği ve konsol boyları ayarlanabilir şekilde tasarlanmış, LED'li ve yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalı armatürler olmak üzere iki farklı tipte ışık kaynağı kullanılmıştır.

Şekil 2.1, Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'de gösterildiği biçimde armatür yüksekliği 8, 9, 10, 11 ya da 12 metreye ayarlanabilen direkler tasarlanmıştır. Direkler üzerinde, dört armatürün yan yana yerleştirilebileceği bir konsol yer almaktadır. Konsol boyu 0,5 metre, 1 metre ve 1,5 metre olacak biçimde ayarlanabilmektedir. Her bir direğe bir adet 4000 K renk sıcaklığında LED'li armatür, bir adet 6000 K renk sıcaklığında LED'li armatür, bir adet 150W YBSB lambalı armatür, bir adet 100W YBSB lambalı armatür olmak üzere toplam dörder adet armatür yerleştirilmiştir.

Test yolu, Şekil 2.4'de gösterildiği gibi, her birinin genişliği 3,5 metre olmak üzere iki şeritli, toplam 7 metre genişliğinde ve 250 metre uzunluğundadır. Toplam sekiz adet direk kullanılarak, soldan tek taraflı düzenle aydınlatılmıştır. Bu tez çalışması için olası senaryolara uygun gerçekleştirilen tasarım hesapları sonucunda direk yüksekliğinin 10 metre, direkler arası mesafenin 30 metre, konsol boyunun 1 metre olmasına karar verilmiştir. Tez kapsamındaki ölçüm hesap ve deneyler 4000 K ve 6000 K renk sıcaklıklarındaki LED'li armatürler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



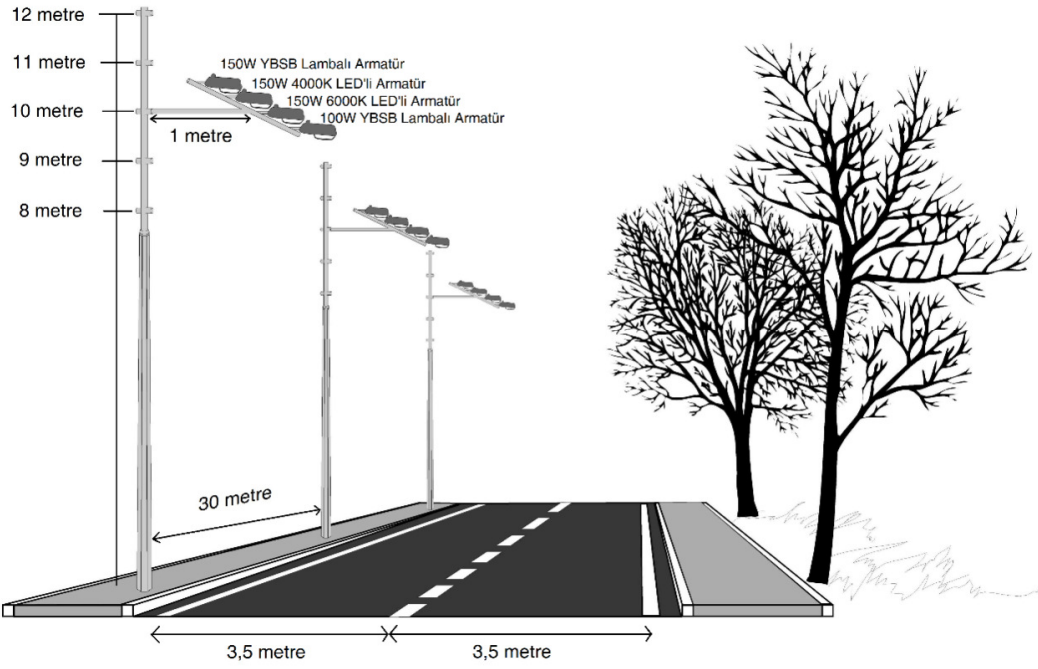




Şekil 2.2 : Direk numunesinin fabrikada kontrolü.



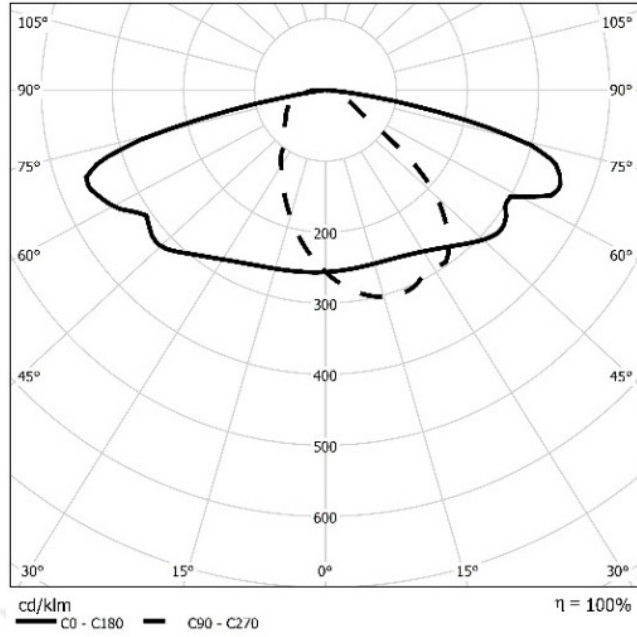
Şekil 2.3 : Direklerin sahaya yerleştirilmesi ve armatür montajı.



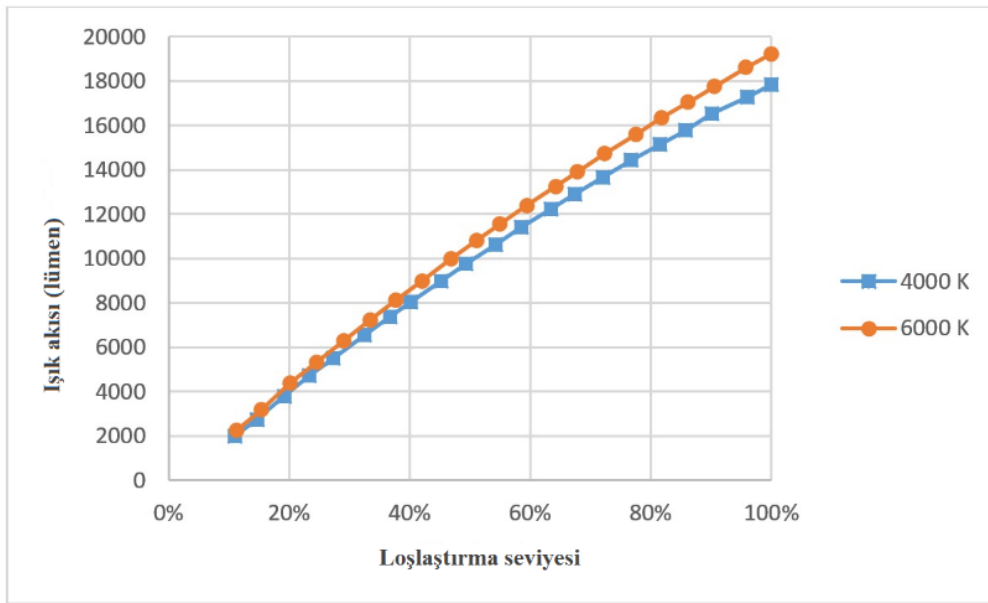
Şekil 2.4 : İTÜ-İSBAK Test yolu.

## 2.2 Armatür Fotometrik Ölçümleri ve Loşlaştırma Seviyelerinin Belirlenmesi

İSBAK Lightra Power LXMLED 150W LED'li armatürün fotometrik özellikleri (ışık akısı, etkinlik faktörü ve ışık dağılım eğrileri) İTÜ Enerji Enstitüsü "Enerji Verimliliği ve Aydınlatma Tekniği Laboratuvarı"nda ölçülmüştür. Loşlaştırma seviyelerine karşılık gelen ışık akısı değerleri Labsphere Ulbrich küresi kullanılarak belirlenmiştir. 4000 K LED'li armatürün toplam ışık akısı 17850 lümen (152,2 W), 6000 K LED'li armatürün toplam ışık akısı 19240 lümen (149,7 W) olarak ölçülmüştür. Armatürlere ait ışık dağılım eğrileri Şekil 2.5'de, farklı loşlaştırma seviyeleri için ışık akısı değişimleri ise Şekil 2.6'da gösterilmektedir.



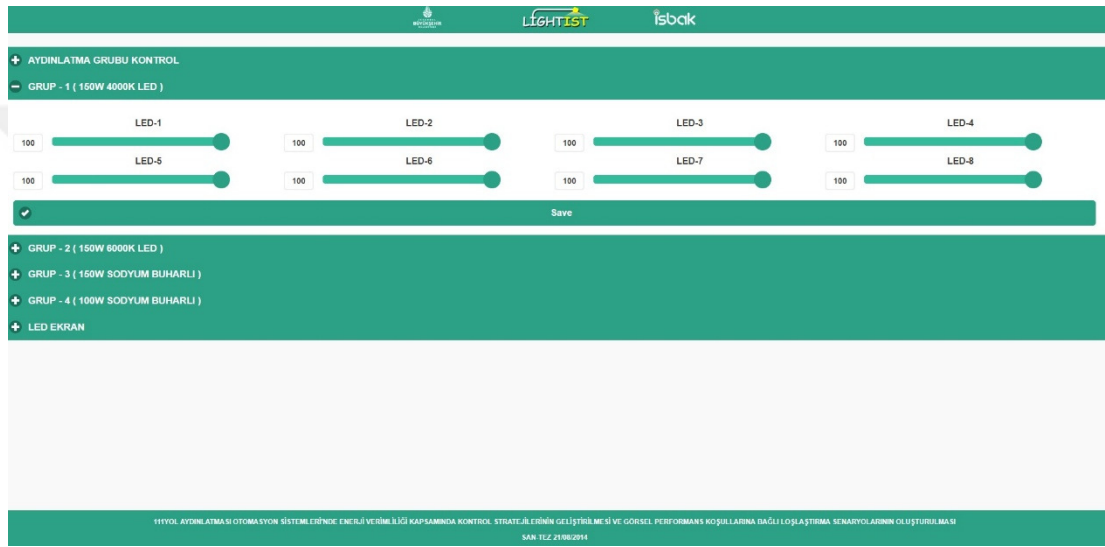
**Şekil 2.5 :** Lightra Power LXMLED 150W armatür ışık dağılım eğrisi.



**Şekil 2.6 :** İki farklı renk sıcaklığındaki LED’li armatürler için loşlaştırma seviyesine bağlı ışık akısı değişimi.

Şehir içindeki yollar için otomasyon senaryolarının oluşturulması amaçlandığı ve şehir içindeki yoğun trafikli yollar genellikle M2 sınıfına girdiği için, test yolunda maksimum ışık akısında sağlanacak yol aydınlatma sınıfı M2 olarak belirlenmiştir. Armatürlerin mevcut maksimum ışık akıları dikkate alındığında, test yolunda istendiğinde M1 yol aydınlatma sınıfının gerekleri de sağlanabilmektedir. Dialux 4.11 yazılımı kullanılarak, EN 13201-2 standardına uygun M2, M3, M4 ve M5 yol aydınlatma sınıflarını sağlayacak şekilde ön tasarım hesaplamaları yapılmış,

armatürlerin loşlaştırılacağı seviyeler bulunmuştur. Daha sonra 1-10 V kontrol sistemi ile donatılmış armatürler bu hesap sonuçlarına göre sahada gerekli aydınlatma sınıfına uygun olarak loşlaştırılmıştır. Bunun için, armatürlerin, bilgisayar, tablet ya da cep telefonu kullanılarak Şekil 2.7’de gösterildiği gibi internet bağlantısı üzerinden elle (manuel) loşlaştırılabileceği bir yazılım hazırlanmış, böylece farklı senaryoların uygulanabilmesi için armatürlerin sahada istenen ışık akısını verecek şekilde ayarlanabilmesi sağlanmıştır. Sahada test yolunda yapılan ölçümlerle farklı aydınlatma sınıfları için gerekli aydınlatma kalite büyüklükleri ölçülerek, gerçek koşullara uygun loşlaştırma seviyeleri belirlenmiştir.



**Şekil 2.7 :** Armatür ışık akısı kontrol arayüzü.

Loşlaştırma seviyeleri, bu seviyelerde armatürlerin ışık akıları ve güçleri her bir aydınlatma sınıfı için Çizelge 2.1’de verilmiştir.

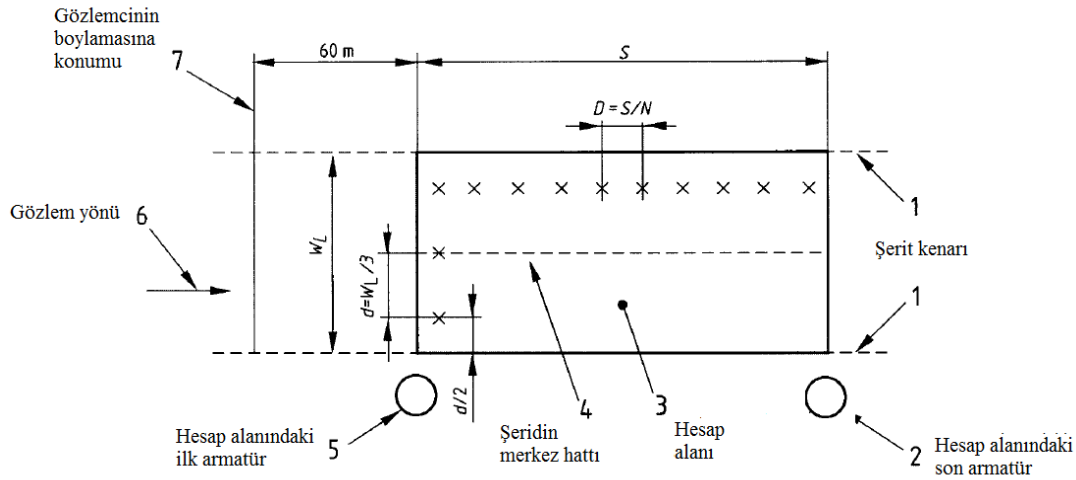
**Çizelge 2.1 :** 4000 K ve 6000 K LED’li armatürler için farklı senaryolardaki loşlaştırma seviyeleri, armatür ışık akıları ve güçleri.

Yol aydınlatma sınıfı		Loşlaştırma seviyesi (%)	Armatür Işık akısı (lümen)	Armatür gücü (W)
M2	4000 K	60	10710	81,74
	6000 K	56	10900	78,47
M3	4000 K	38	6782	50,48
	6000 K	36	7116	50,12
M4	4000 K	27	4820	36,05
	6000 K	27	5412	38,15
M5	4000 K	17	3035	23,53
	6000 K	17	3519	25,35

İSBAK LightraPower LXMLED 150W LED armatür ile gerçekleştirilen aydınlatma hesaplarına göre M2 yol aydınlatma sınıfının kalite kriterlerini sağlamak için toplam ışık akısı 17850 lümen olan 4000 K LED’li armatürün 10710 lümen ışık akısı vermesi, toplam ışık akısı 19240 lümen olan 6000 K LED’li armatürün ise 10900 lümen ışık akısı vermesi yeterlidir. Bu esnek uygulama, test yolunda gerektiğinde daha yüksek ışık akısı kullanılarak M1 yol aydınlatma sınıfı kriterlerine de ulaşılabilme olasılığını sağlayabilecektir.

### 2.3 Parıltı Ölçümleri

EN 13201-3’de tanımlanan ve Şekil 2.8’de gösterilen hesap alanına uygun olarak iki direk arası eşit parçalara bölünmüş ve 60 adet hesap noktası test yolu üzerinde işaretlenmiştir. Armatürlerin ışık akısı Bölüm 2.2’de anlatıldığı şekilde sahada belirlenen loşlaştırma seviyelerine ayarlanmış ve M2, M3, M4, M5 yol aydınlatma sınıfları için tüm hesap noktalarının parıltısı, 60 metrede sabit gözlemci konumundan, LMT L1009 noktasal parıltı ölçer ve EN13201-3’e uygun ölçüm yazılımı entegreli LMK Mobile Advanced kameralı parıltı ölçer ile ölçülmüştür. Kameralı parıltı ölçere ait örnek bir ölçüm fotoğrafı Şekil 2.9’da verilmiştir.



Şekil 2.8 : Hesap noktalarının konumu.



**Şekil 2.9 :** Test yolu ve kameralı parıltı ölçer fotoğrafı.

Belirlenen loşlaştırma seviyelerine karşılık gelen ışık akıları veri olarak kullanılarak Dialux 4.11 yazılımı ile aydınlatma tasarım hesapları yapılmıştır. Hesaplar, yol kaplaması yansıtma özellikleri R1, R2, R3 ve R4 sınıfı kabul edilerek, her bir farklı yol aydınlatma sınıfı için tekrarlanmıştır. Farklı yol kaplaması yansıtma özelliklerinde değişik yol aydınlatma sınıfları için hesaplanan ortalama parıltı değerleri Çizelge 2.2'de verilmektedir. Kameralı ve noktasal parıltı ölçer ile gerçekleştirilen saha ölçümleri ve hesap sonuçları karşılaştırıldığında, ölçümlere en yakın sonuçların R4 sınıfı ile elde edildiği görülmüştür.

**Çizelge 2.2 :** Farklı yol kaplamaları için hesaplanan ortalama yol yüzeyi parıltıları ( $\text{cd/m}^2$ ).

		<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R4</b>
<b>4000 K</b>	M2	1,84	1,39	1,35	1,50
	M3	1,17	0,88	0,86	0,95
	M4	0,83	0,62	0,61	0,67
	M5	0,52	0,39	0,38	0,42
<b>6000 K</b>	M2	1,88	1,41	1,38	1,52
	M3	1,22	0,92	0,90	0,99
	M4	0,93	0,70	0,68	0,76
	M5	0,61	0,46	0,44	0,49

Kameralı parıltı ölçer, noktasal parıltı ölçer ve R4 yol kaplama sınıfı için hesap sonuçları Çizelge 2.3'de toplu olarak gösterilmektedir.

**Çizelge 2.3 :** Hesap, kameralı parıltı ölçer ve noktasal parıltı ölçer sonuçlarına göre ortalama parıltı düzeyi değerleri ( $\text{cd/m}^2$ ).

		Hesap	Kameralı parıltı ölçer	Noktasal parıltı ölçer
M2	4000 K	1,50	1,51	1,54
	6000 K	1,52	1,54	1,42
M3	4000 K	0,95	1,01	0,95
	6000 K	0,99	1,01	0,92
M4	4000 K	0,67	0,75	0,65
	6000 K	0,76	0,76	0,67
M5	4000 K	0,42	0,49	0,39
	6000 K	0,49	0,49	0,39

Farklı senaryolar için yol yüzeyi ortalama ve boyuna düzgünlük değerleri de Çizelge 2.4'de verilmektedir.

**Çizelge 2.4 :** Ortalama ve boyuna parıltı düzgünlük değerleri.

		Ortalama düzgünlük ( $U_0$ )	Boyuna düzgünlük ( $U_1$ )	
		<b>4000 K</b>		
M2	Hesap	0,58	0,90	
	Noktasal p. ölçer	0,65	0,93	
	Kameralı p. ölçer	0,75	0,78	
			<b>6000 K</b>	
	Hesap	0,58	0,90	
	Noktasal p. ölçer	0,71	0,93	
		<b>4000 K</b>		
M3	Hesap	0,58	0,90	
	Noktasal p. ölçer	0,63	0,82	
	Kameralı p. ölçer	0,76	0,77	
			<b>6000 K</b>	
	Hesap	0,58	0,90	
	Noktasal p. ölçer	0,65	1,00	
		<b>4000 K</b>		
M4	Hesap	0,58	0,90	
	Noktasal p. ölçer	0,62	1,00	
	Kameralı p. ölçer	0,77	0,79	
			<b>6000 K</b>	
	Hesap	0,58	0,90	
	Noktasal p. ölçer	0,59	0,86	
		<b>4000 K</b>		
M5	Hesap	0,58	0,90	
	Noktasal p. ölçer	0,52	0,75	
	Kameralı p. ölçer	0,76	0,78	
			<b>6000 K</b>	
	Hesap	0,58	0,90	
	Noktasal p. ölçer	0,52	1,00	
		<b>6000 K</b>		
		0,80	0,80	



Sahada ayrıca her ölçüm noktasının yol seviyesindeki yatay aydınlık düzeyleri de Konica Minolta T10M marka aydınlık düzeyi ölçer ile ölçülerek hesap sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Ölçülen ve hesaplanan aydınlık düzeyi değerleri Çizelge 2.5'de verilmektedir.

**Çizelge 2.5 : Aydınlık düzeyi değerleri (lux).**

		<b>Hesap</b>	<b>Ölçüm</b>
<b>M2</b>	4000 K	20,00	22,90
	6000 K	20,00	23,70
<b>M3</b>	4000 K	13,00	14,75
	6000 K	13,00	15,44
<b>M4</b>	4000 K	8,91	10,57
	6000 K	10,00	11,61
<b>M5</b>	4000 K	5,61	6,52
	6000 K	6,50	7,30

Tüm sonuçlar karşılaştırıldığında R4 sınıfı yol kaplaması için yapılan hesapların kameralı ve noktasal parıltı ölçer ile elde edilen değerlere en yakın sonuçları verdiği görülmüştür. Buna göre, test yolu kaplaması yansıtma özelliklerinin, ortalama parıltı faktörü ( $q_0$ ) 0,08 olan R4 sınıfına yakın olduğu sonucuna varılmıştır.

Kameralı parıltı ölçer sonuçlarının noktasal parıltı ölçümlerine göre daha yüksek, hesap sonuçları ile kameralı parıltı ölçer sonuçlarının ise birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir.

Yol yüzeyi ortalama parıltı düzgünlüğü ve boyuna parıltı düzgünlüğüne bakıldığında ise, kameralı parıltı ölçer ile ölçülen ortalama düzgünlük değerlerinin, noktasal ölçüm ve hesap sonuçlarına oranla daha yüksek, boyuna düzgünlük değerlerinin ise noktasal ölçüm ve hesap sonuçlarına oranla daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin EN13201-3 standardında tanımlanan 60 adet hesap noktası koordinatlarının, farklı ölçüm ve hesaplarda tam olarak çakışmaması olabileceği düşünülmektedir.

Ölçülen aydınlık düzeyleri, hesaplanan değerlerden daha yüksektir. Bu da, daha yüksek parıltı değerlerinin ölçüldüğü kameralı parıltı ölçer sonuçlarının gerçek koşulları daha iyi temsil edebileceğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar Light and Engineering dergisinde makale olarak yayınlanmıştır (Büyükkınacı, 2016).



### 3. KRİTİK GÖRÜLEBİLİRLİK SEVİYESİ (VL) DEĞERİNİN BELİRLENMESİ

Yol yüzeyindeki bir cismin görülebilirliğini araştıran laboratuvar çalışmalarında ve yol aydınlatması görülebilirlik testlerinde genellikle 20 cm x 20 cm boyutunda, düz yüzeyli, kare şeklinde engeller kullanılmaktadır. Kritik cisim olarak adlandırılan bu cisimler yol aydınlatması ile ilgili öneri ve standartlara da temel teşkil etmiştir. Standartlarda hedef cismin kenar uzunluğunun 20 cm olarak belirlenmesinin nedeni bir çok aracın 20 cm yüksekliğindeki bir engelin üzerinden çarpmadan geçebilmesi olasılığı olarak açıklanmaktadır. Gerçek yol koşullarında düz cisimlerle karşılaşılma olasılığının oldukça düşük olduğu yollarda daha çok üç boyutlu engeller bulunduğu ifade edilmekle birlikte, düz cisimler üç boyutlu cisimlere göre daha zor görülebildikleri için daha kritik engeller olarak tanımlanmaktadır. Bu tez çalışmasında da 20 cm x 20 cm boyutunda, düz yüzeyli, kare şeklinde hedefler kullanılmıştır. İlk olarak kullanılan kritik cisimler için yansıtma faktörleri belirlenmiş, EN 13201-3'de tanımlanan sabit gözlemci konumundan belirlenen yansıtma faktörlerine ait görülebilirlik seviyeleri hesaplanmış ve yolun açığa çıkarma gücü bulunmuş, daha sonra laboratuvar koşullarında gözlemcilerin görebildiği minimum görülebilirlik seviyeleri belirlenmiştir.

#### 3.1 Kritik Cisim Yansıtma Faktörünün Belirlenmesi

Bölüm 2.3'de anlatıldığı şekilde ölçülen fon parıltıları (hesap noktalarındaki yol yüzeyi parıltıları) kullanılarak, her bir hesap noktasında cismin görülebilmesi için gerekli olan parıltı farkı eşiği Bölüm 1.1.2'de verilen denklem 1.3 yardımı ile pozitif ( $F_{kp}=1$ ) ve negatif ( $F_{kp}\neq 1$ ) kontrast için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Buna bağlı olarak cismin görülebilmesi için gerekli olan üst ve alt sınır parıltı değerleri denklem 3.1 ve denklem 3.2 ile belirlenmiştir.

$$L_{cisim,üst\ sınır} = L_f + \Delta L_{eşik,pozitif} \quad (3.1)$$

$$L_{cisim,alt\ sınır} = L_f - \Delta L_{eşik,negatif} \quad (3.2)$$

Işığın düzgün dağıtan lambert yüzeye sahip cisim için yansıtma faktörü denklem 3.3 ile hesaplanabilmektedir;

$$\rho = \frac{\pi \times L}{E} \quad (3.3)$$

M2, M3, M4 ve M5 yol aydınlatma sınıflarında, 4000 K ve 6000 K renk sıcaklıklarında yol yüzeyindeki toplam 60 adet hesap noktasının her birine 20 cm x 20 cm boyutlarındaki akromatik düz kare cisimler yerleştirilmiş ve cisim yüzeylerinin orta noktalarında düşey aydınlık düzeyleri Konica Minolta T10M marka lüksmetre ile ölçülmüştür. Ölçümlerde kullanılan kritik cisimler lambert yüzeyli oldukları için Denklem 3.4’de L yerine  $L_{cisim, üst\ sınır}$ , E yerine de cismin yüzeyinde ölçülen aydınlık düzeyi konularak, yolun o noktasındaki cismin pozitif kontrastta görülebilmesi için gerekli olan kritik yansıtma faktörü, benzer şekilde L yerine  $L_{cisim, alt\ sınır}$  konularak da cismin negatif kontrastta görülebilmesi için gerekli olan kritik yansıtma faktörü hesaplanmıştır.

M2, M3, M4 ve M5 yol aydınlatma sınıflarında, 4000 K ve 6000 K renk sıcaklıklarında toplam sekiz senaryo için elde edilen kritik yansıtma faktörleri Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.8 arasında verilmiştir.

**Çizelge 3.1 : 4000 K LED armatür, M2 aydınlatma sınıfı için hesap noktalarındaki kritik yansıtma faktörleri.**

		EN 13201-3’e göre hesap noktalarının enine konumları											
		1		2		3		4		5		6	
		pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif
EN 13201-3’e göre hesap noktalarının boyuna konumları	1	0,72	0,65	0,65	0,58	0,66	0,59	0,83	0,74	0,84	0,75	0,6	0,54
	2	0,94	0,84	0,94	0,84	0,87	0,78	0,71	0,63	0,67	0,6	0,58	0,52
	3	0,74	0,66	0,77	0,69	0,7	0,62	0,56	0,5	0,5	0,44	0,42	0,38
	4	0,61	0,55	0,67	0,6	0,6	0,54	0,46	0,41	0,4	0,35	0,34	0,3
	5	0,47	0,42	0,57	0,51	0,49	0,44	0,42	0,37	0,35	0,31	0,3	0,26
	6	0,34	0,31	0,44	0,4	0,38	0,34	0,32	0,28	0,27	0,24	0,25	0,22
	7	0,28	0,25	0,37	0,33	0,3	0,27	0,25	0,22	0,23	0,21	0,22	0,19
	8	0,24	0,22	0,33	0,3	0,27	0,24	0,22	0,2	0,21	0,19	0,21	0,19
	9	0,26	0,23	0,33	0,29	0,27	0,24	0,26	0,23	0,25	0,22	0,24	0,22
	10	0,35	0,31	0,42	0,38	0,35	0,32	0,3	0,27	0,3	0,27	0,27	0,24

**Çizelge 3.2 : 4000 K LED armatür, M3 aydınlatma sınıfı için hesap noktalarındaki kritik yansıtma faktörleri.**

		EN 13201-3'e göre hesap noktalarının enine konumları											
		1		2		3		4		5		6	
		pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif
EN 13201-3'e göre hesap noktalarının boyuna konumları	1	0,73	0,65	0,6	0,53	0,66	0,58	0,55	0,49	0,56	0,5	0,58	0,51
	2	0,96	0,85	0,91	0,81	0,88	0,78	0,72	0,63	0,67	0,59	0,54	0,52
	3	0,76	0,67	0,76	0,68	0,73	0,65	0,58	0,51	0,5	0,44	0,43	0,38
	4	0,63	0,55	0,66	0,58	0,61	0,54	0,46	0,41	0,4	0,36	0,33	0,3
	5	0,47	0,41	0,6	0,53	0,51	0,46	0,41	0,36	0,35	0,31	0,31	0,26
	6	0,37	0,33	0,49	0,43	0,42	0,37	0,31	0,27	0,27	0,24	0,26	0,22
	7	0,29	0,25	0,4	0,36	0,35	0,31	0,26	0,23	0,24	0,21	0,23	0,19
	8	0,27	0,24	0,35	0,31	0,31	0,27	0,25	0,22	0,21	0,19	0,22	0,19
	9	0,27	0,24	0,34	0,31	0,31	0,28	0,26	0,23	0,25	0,22	0,24	0,22
	10	0,38	0,33	0,48	0,43	0,38	0,33	0,31	0,27	0,3	0,26	0,31	0,24

**Çizelge 3.3 : 4000 K LED armatür, M4 aydınlatma sınıfı için hesap noktalarındaki kritik yansıtma faktörleri.**

		EN 13201-3'e göre hesap noktalarının enine konumları											
		1		2		3		4		5		6	
		pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif
EN 13201-3'e göre hesap noktalarının boyuna konumları	1	0,76	0,67	0,67	0,59	0,67	0,59	0,80	0,70	0,79	0,70	0,81	0,71
	2	1,00	0,89	0,97	0,85	0,92	0,81	0,74	0,65	0,69	0,61	0,57	0,52
	3	0,81	0,71	0,81	0,71	0,76	0,67	0,60	0,53	0,52	0,46	0,45	0,38
	4	0,65	0,57	0,69	0,61	0,65	0,57	0,46	0,41	0,42	0,37	0,36	0,30
	5	0,49	0,43	0,63	0,55	0,53	0,47	0,41	0,36	0,36	0,32	0,33	0,26
	6	0,39	0,34	0,51	0,45	0,43	0,38	0,31	0,27	0,29	0,26	0,28	0,22
	7	0,30	0,27	0,42	0,37	0,35	0,31	0,25	0,22	0,25	0,22	0,25	0,19
	8	0,28	0,24	0,37	0,32	0,32	0,28	0,25	0,22	0,23	0,20	0,25	0,19
	9	0,28	0,25	0,35	0,31	0,31	0,27	0,27	0,23	0,26	0,23	0,26	0,22
	10	0,39	0,34	0,50	0,45	0,41	0,36	0,34	0,30	0,34	0,30	0,32	0,24

**Çizelge 3.4 : 4000 K LED armatür, M5 aydınlatma sınıfı için hesap noktalarındaki kritik yansıtma faktörleri.**

		EN 13201-3'e göre hesap noktalarının enine konumları											
		1		2		3		4		5		6	
		pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif
EN 13201-3'e göre hesap noktalarının boyuna konumları	1	0,77	0,68	0,59	0,52	0,67	0,59	0,58	0,51	0,60	0,53	0,59	0,52
	2	1,00	0,92	0,99	0,87	0,92	0,81	0,76	0,67	0,73	0,65	0,65	0,52
	3	0,85	0,75	0,83	0,73	0,77	0,68	0,64	0,57	0,57	0,51	0,49	0,38
	4	0,72	0,64	0,73	0,64	0,67	0,59	0,50	0,44	0,47	0,42	0,38	0,30
	5	0,56	0,49	0,67	0,59	0,59	0,52	0,46	0,41	0,41	0,37	0,35	0,26
	6	0,41	0,37	0,50	0,44	0,46	0,40	0,34	0,31	0,31	0,28	0,30	0,22
	7	0,32	0,29	0,41	0,36	0,37	0,32	0,27	0,24	0,28	0,25	0,27	0,19
	8	0,29	0,26	0,38	0,33	0,32	0,29	0,27	0,24	0,26	0,23	0,26	0,19
	9	0,29	0,26	0,38	0,33	0,32	0,29	0,29	0,25	0,29	0,25	0,28	0,22
	10	0,39	0,34	0,46	0,41	0,40	0,35	0,33	0,29	0,35	0,31	0,35	0,24

**Çizelge 3.5 : 6000 K LED armatür, M2 aydınlatma sınıfı için hesap noktalarındaki kritik yansıtma faktörleri.**

		EN 13201-3'e göre hesap noktalarının enine konumları											
		1		2		3		4		5		6	
		pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif
EN 13201-3'e göre hesap noktalarının boyuna konumları	1	0,65	0,58	0,57	0,51	0,57	0,51	0,50	0,45	0,48	0,43	0,49	0,44
	2	0,95	0,85	0,94	0,84	0,89	0,79	0,71	0,64	0,65	0,58	0,54	0,48
	3	0,77	0,68	0,78	0,70	0,75	0,68	0,57	0,51	0,51	0,45	0,43	0,38
	4	0,58	0,51	0,67	0,60	0,61	0,55	0,46	0,41	0,40	0,35	0,33	0,29
	5	0,47	0,42	0,57	0,51	0,51	0,46	0,39	0,35	0,34	0,31	0,31	0,27
	6	0,38	0,33	0,48	0,43	0,43	0,38	0,32	0,29	0,28	0,24	0,26	0,23
	7	0,30	0,26	0,42	0,37	0,36	0,32	0,26	0,24	0,25	0,22	0,24	0,22
	8	0,27	0,24	0,35	0,31	0,29	0,26	0,25	0,22	0,22	0,19	0,21	0,19
	9	0,28	0,25	0,32	0,29	0,29	0,26	0,25	0,22	0,25	0,22	0,25	0,23
	10	0,35	0,32	0,47	0,43	0,36	0,33	0,31	0,28	0,30	0,27	0,29	0,26

**Çizelge 3.6 : 6000 K LED armatür, M3 aydınlatma sınıfı için hesap noktalarındaki kritik yansıtma faktörleri.**

		EN 13201-3'e göre hesap noktalarının enine konumları											
		1		2		3		4		5		6	
		pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif
EN 13201-3'e göre hesap noktalarının boyuna konumları	1	0,69	0,61	0,50	0,45	0,60	0,53	0,54	0,48	0,54	0,48	0,51	0,45
	2	0,95	0,84	0,94	0,83	0,89	0,79	0,74	0,65	0,66	0,58	0,56	0,49
	3	0,73	0,64	0,76	0,67	0,73	0,65	0,61	0,54	0,52	0,46	0,44	0,39
	4	0,61	0,54	0,64	0,56	0,60	0,54	0,44	0,39	0,41	0,36	0,34	0,30
	5	0,47	0,41	0,59	0,52	0,50	0,45	0,39	0,34	0,36	0,32	0,31	0,27
	6	0,36	0,32	0,46	0,41	0,42	0,37	0,29	0,26	0,27	0,24	0,26	0,23
	7	0,29	0,26	0,37	0,33	0,34	0,30	0,25	0,22	0,24	0,21	0,22	0,20
	8	0,25	0,22	0,33	0,30	0,29	0,26	0,23	0,20	0,22	0,19	0,22	0,20
	9	0,25	0,22	0,33	0,29	0,28	0,24	0,25	0,22	0,24	0,21	0,25	0,22
	10	0,34	0,30	0,39	0,34	0,34	0,30	0,29	0,25	0,29	0,25	0,28	0,25

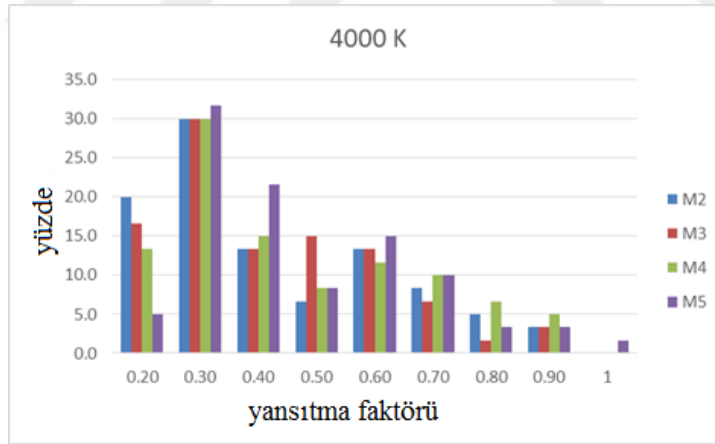
**Çizelge 3.7 : 6000 K LED armatür, M4 aydınlatma sınıfı için hesap noktalarındaki kritik yansıtma faktörleri.**

		EN 13201-3'e göre hesap noktalarının enine konumları											
		1		2		3		4		5		6	
		pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif
EN 13201-3'e göre hesap noktalarının boyuna konumları	1	0,67	0,59	0,49	0,43	0,58	0,51	0,50	0,44	0,52	0,46	0,54	0,48
	2	0,94	0,83	0,92	0,81	0,88	0,77	0,72	0,64	0,66	0,58	0,56	0,49
	3	0,73	0,64	0,75	0,66	0,73	0,64	0,59	0,52	0,52	0,46	0,46	0,40
	4	0,61	0,54	0,65	0,57	0,61	0,54	0,45	0,40	0,41	0,36	0,34	0,30
	5	0,48	0,42	0,58	0,51	0,52	0,45	0,41	0,36	0,38	0,33	0,31	0,27
	6	0,37	0,32	0,47	0,41	0,42	0,37	0,31	0,27	0,28	0,24	0,26	0,23
	7	0,30	0,26	0,38	0,33	0,34	0,30	0,26	0,23	0,27	0,23	0,23	0,20
	8	0,26	0,23	0,33	0,30	0,29	0,26	0,23	0,20	0,21	0,19	0,22	0,19
	9	0,26	0,22	0,33	0,29	0,28	0,25	0,25	0,22	0,24	0,22	0,26	0,23
	10	0,33	0,29	0,39	0,35	0,34	0,30	0,28	0,24	0,28	0,24	0,28	0,25

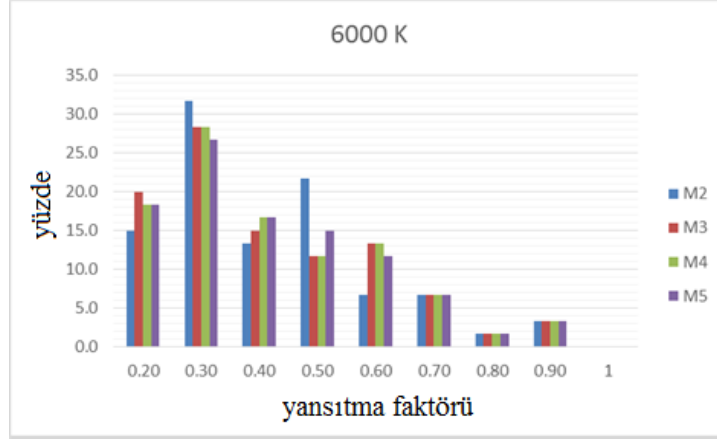
**Çizelge 3.8 : 6000 K LED armatür, M5 aydınlatma sınıfı için hesap noktalarındaki kritik yansıtma faktörleri.**

		EN 13201-3'e göre hesap noktalarının enine konumları											
		1		2		3		4		5		6	
		pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif	pozitif	negatif
EN 13201-3'e göre hesap noktalarının boyuna konumları	1	0,66	0,58	0,49	0,43	0,58	0,51	0,51	0,45	0,53	0,47	0,50	0,44
	2	0,93	0,82	0,91	0,80	0,87	0,77	0,72	0,64	0,65	0,58	0,56	0,50
	3	0,70	0,62	0,76	0,67	0,73	0,64	0,60	0,53	0,53	0,47	0,47	0,42
	4	0,62	0,55	0,65	0,57	0,61	0,54	0,45	0,40	0,42	0,38	0,35	0,32
	5	0,49	0,43	0,60	0,53	0,52	0,46	0,41	0,36	0,38	0,34	0,33	0,29
	6	0,38	0,34	0,47	0,41	0,42	0,37	0,31	0,28	0,29	0,26	0,28	0,25
	7	0,30	0,27	0,39	0,34	0,35	0,31	0,26	0,23	0,26	0,23	0,25	0,22
	8	0,26	0,23	0,34	0,30	0,30	0,27	0,23	0,21	0,22	0,20	0,24	0,21
	9	0,26	0,23	0,33	0,29	0,29	0,26	0,25	0,22	0,26	0,23	0,25	0,23
	10	0,34	0,30	0,40	0,35	0,35	0,31	0,29	0,26	0,31	0,28	0,30	0,27

Çizelge 3.1'den Çizelge 3.8'e kadar verilen pozitif yansıtma faktörü sınır değerlerinin üzerindeki ve negatif yansıtma faktörü sınır değerlerinin altındaki cisimler görülebilir. Bu iki sınır değer arasında kalan cisimler ise görülemez. Pozitif ve negatif yansıtma faktörleri sınır değerlerinin orta noktası en yakın tam sayıya yuvarlanmış ve yüzdesel dağılım grafiği halinde Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi 4000 K ve 6000 K için dağılımlar benzerdir.



**Şekil 3.1 : 4000 K için kritik cisim yansıtma faktörleri yüzdesel dağılımı.**



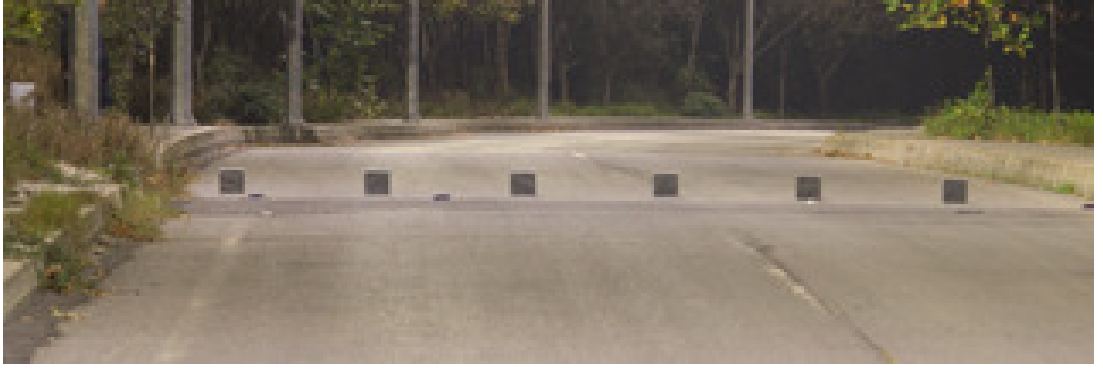
**Şekil 3.2 :** 6000 K için kritik cisim yansıtma faktörleri yüzdesel dağılımı.

Kritik cisim yansıtma faktörü CIE önerilerinde 0,20 (CIE,2010), ANSI/IES standartlarında ise 0,50 (IESNA, 2014) olarak kabul edilmektedir. Ancak yapılan hesaplarda, test yolu için kritik yansıtma faktörlerinin çoğunlukla 0,30 olduğu görülmüştür. Ayrıca, 0,40 yansıtma faktörünün de kritik olabileceği anlaşılmaktadır. Bu nedenle, tez çalışması kapsamında gerçekleştirilecek ölçüm ve hesaplamalarda kritik cisim yansıtma faktörü olarak standart ve önerilerde kabul edilen 0,20 ve 0,50 değerlerinin yanı sıra 0,30 ve 0,40 değerlerinin de dikkate alınması uygun görülmüştür.

### 3.2 Sabit Gözlemci İçin Görülebilirlik Seviyesi Hesapları

Kameralı parıltı ölçer cihazı EN13201-3 (CEN, 2015b) ve CIE 140 (CIE, 2000) standartlarında belirtildiği gibi hesap alanındaki ilk aydınlatma direğinden 60 metre geride, 1,5 metre yükseklikte, şeridin orta noktasına sabitlenmiştir. İlk olarak 4000 K LED’li armatürler M2 yol aydınlatma sınıfını sağlamak üzere %60 seviyesine loşlaştırılmıştır. 0,20 yansıtma faktörüne sahip altı adet 20 cm x 20 cm boyutunda, kare şeklindeki kritik cisim hesap alanındaki 60 noktanın ilk sırasına Şekil 3.3’de gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Bu konumdan ölçüm fotoğrafı alınmıştır. Daha sonra bu altı cisim bir sonraki sıraya kaydırılarak yeniden ölçüm alınmış, bu işlem hesap alanındaki 10 sıra boyunca tekrarlanmıştır. Ölçümler 0,30, 0,40, 0,50 yansıtma faktörleri için ve M3, M4, M5 yol aydınlatma sınıfları için tekrarlanmıştır. Daha sonra tüm ölçümler 6000 K LED’li armatürler için bir kez daha yapılmıştır. Kameralı parıltı ölçer ile toplam 320 fotoğraf çekilmiş, herbirinde altı adet cisim yer alan bu fotoğraflardan 1920 adet fon parıltısı ve cisim parıltısı değerleri elde edilmiştir. Fon parıltısı için cismin alt, üst, sağ ve sol olmak üzere dört tarafında ölçülen değerlerin ortalaması alınmıştır.





**Şekil 3.3 :** Hesap alanına yerleştirilen kritik cisimler.

Ölçülen cisim ve fon parlıtları kullanılarak denklem 1.17 yardımı ile görülebilirlik seviyeleri (VL) hesaplanmıştır.

M2, M3, M4, M5 aydınlatma sınıfları, 4000 K, 6000 K renk sıcaklıkları ve dört farklı cisim yansıtma faktörü ( $\rho$ ) için hesaplanan VL değerleri Çizelge 3.9 ile Çizelge 3.16 arasında verilmiştir. VL değerleri 0 ile 12,37 arasında değişmektedir. Teorik olarak, cisim ve fon parlıtısı arasındaki fark eşik değerinden fazla ise cisim görülebilir kabul edilmektedir. Diğer bir deyişle, VL değeri 1'den büyükse, cisim yol yüzeyi üzerinde silüet olarak görülmeye başlar. Çizelgelerde VL değeri 1'den küçük olan noktalar farklı şekilde gösterilmiştir. Cisim yansıtma faktörü 0,20 iken VL değeri 1'den küçük olan nokta bulunmamaktadır. Diğer bir deyişle; 0,20 yansıtma faktörüne sahip cisimler, bütün senaryolarda ve bütün hesap noktalarında teorik olarak görülebilirdir.

**Çizelge 3.9 : 4000 K, M2 aydınlatma sınıfı ve dört farklı cisim yansıtma faktörü için VL değerleri.**

		$\rho=0,20$						$\rho=0,40$						
		10	9	8	7	6	5	10	9	8	7	6	5	
EN 13201-3'e göre hesap noktalarının boyuna konumları	10	4,88	6,99	8,64	9,37	7,66	7,16	2,49	5,44	6,67	7,22	5,58	4,68	
	9	4,77	7,72	8,91	9,23	7,36	6,80	1,54	5,36	6,37	6,30	4,35	3,07	
	8	4,56	8,04	9,26	9,20	6,93	6,16	0,72	4,59	5,92	6,29	3,85	2,14	
	7	4,82	7,88	9,34	9,06	6,73	5,71	0,49	4,29	5,87	5,11	1,78	0,02	
	6	4,55	8,32	10,02	8,26	5,57	4,99	0,14	4,40	6,09	3,86	0,23	0,64	
	5	3,84	8,07	9,91	7,75	5,61	6,15	1,82	3,96	4,49	1,32	1,90	1,06	
	4	4,49	7,89	9,11	6,75	3,00	5,74	3,61	2,23	2,86	1,13	4,39	1,37	
	3	4,64	8,64	8,22	7,06	5,28	6,08	3,28	0,75	1,50	1,74	3,82	1,05	
	2	7,46	9,93	9,32	8,44	6,66	7,57	0,46	1,43	3,15	0,44	0,72	1,31	
	1	10,81	12,37	12,37	11,86	10,35	11,00	5,67	7,67	8,66	7,03	5,80	5,23	
		$\rho=0,30$						$\rho=0,50$						
		10	9	8	7	6	5	10	9	8	7	6	5	
		10	4,02	6,62	7,88	8,27	7,13	6,58	2,20	5,22	6,22	7,11	5,58	4,46
		9	3,76	6,84	7,67	8,23	6,79	5,14	1,34	5,14	6,37	6,36	4,35	2,68
		8	2,96	6,36	7,83	7,81	5,77	4,15	0,08	3,95	5,78	5,83	2,69	1,13
		7	2,87	6,58	8,23	7,12	4,80	3,46	0,33	3,80	5,66	4,68	1,03	0,62
		6	2,23	6,73	8,30	6,26	3,42	2,86	1,38	3,90	5,60	3,22	0,78	1,24
		5	1,75	6,64	7,85	4,75	2,82	3,21	2,52	3,21	4,57	0,62	2,61	2,09
		4	1,12	5,92	6,43	4,04	1,71	3,31	4,39	1,03	1,64	2,04	5,05	2,57
		3	2,10	5,89	6,01	3,50	2,61	3,69	3,28	0,35	0,09	2,36	5,86	2,96
		2	4,52	6,87	7,68	5,46	4,73	6,68	1,48	1,24	2,19	0,16	1,70	0,42
		1	8,43	10,34	10,89	9,67	7,52	8,36	5,04	7,13	7,07	6,34	4,57	5,35
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	
		gözlemci ↑						gözlemci ↑						
		EN 13201-3'e göre hesap noktalarının enine konumları												

**Çizelge 3.10 : 4000 K, M3 aydınlatma sınıfı ve dört farklı cisim yansıtma faktörü için VL değerleri.**

		$\rho=0,20$						$\rho=0,40$						
		10	9	8	7	6	5	10	9	8	7	6	5	
EN 13201-3'e göre hesap noktalarının boyuna konumları	10	3,21	5,96	6,82	7,00	5,92	5,56	0,90	4,30	5,44	5,37	4,16	3,44	
	9	3,15	5,78	6,95	6,97	6,09	5,53	1,07	3,74	5,52	5,04	3,57	2,84	
	8	3,54	6,23	7,47	7,34	5,91	5,26	0,65	3,85	5,39	4,71	2,85	1,68	
	7	3,56	6,50	7,67	6,86	5,32	4,44	0,30	3,22	5,12	3,69	1,19	0,22	
	6	4,23	6,64	7,82	7,14	5,15	4,44	0,23	3,32	5,06	3,30	0,40	0,41	
	5	3,93	6,69	7,87	6,50	4,89	4,90	1,85	2,17	4,24	1,28	0,68	1,16	
	4	2,64	6,80	7,28	6,32	5,12	5,48	3,40	0,52	2,93	0,58	2,16	1,13	
	3	3,48	7,07	7,45	6,53	5,16	5,83	3,79	0,11	1,33	1,00	1,75	1,27	
	2	5,70	8,42	8,53	7,52	6,96	7,46	1,28	1,45	2,82	0,43	0,73	0,26	
	1	8,87	11,22	10,73	10,26	9,16	9,56	3,95	6,67	7,03	5,34	4,75	5,06	
		$\rho=0,30$						$\rho=0,50$						
		10	9	8	7	6	5	10	9	8	7	6	5	
		10	2,18	5,22	6,25	5,92	4,87	4,73	0,64	4,02	4,79	4,13	3,81	3,44
		9	2,11	4,81	6,79	6,04	5,06	4,43	0,29	3,64	4,94	4,62	3,19	2,04
		8	2,49	5,14	6,52	6,02	4,53	3,47	0,26	3,66	5,04	4,53	2,25	1,37
		7	2,74	5,12	6,76	5,51	3,48	2,72	0,32	2,90	4,84	3,69	0,87	0,52
		6	2,73	5,57	6,78	5,52	3,41	2,64	0,58	3,00	4,49	3,00	0,29	1,24
		5	1,31	4,99	6,25	4,23	2,49	2,40	2,34	1,72	3,63	0,71	1,65	5,67
		4	0,16	4,25	5,43	3,50	1,02	1,76	4,58	0,06	1,41	1,22	3,56	2,23
		3	0,82	4,27	5,45	3,48	2,85	4,17	4,85	0,84	0,03	1,45	2,98	2,56
		2	3,77	5,84	6,63	4,16	4,70	4,61	2,50	0,81	1,17	0,81	1,50	0,16
		1	7,17	9,09	9,45	8,42	7,69	7,79	3,27	6,39	6,74	5,19	4,75	5,06
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	
		gözlemci ↑						gözlemci ↑						
		EN 13201-3'e göre hesap noktalarının enine konumları												

**Çizelge 3.11 : 4000 K, M4 aydınlatma sınıfı ve dört farklı cisim yansıtma faktörü için VL değerleri.**

		$\rho=0,20$						$\rho=0,40$					
		10	9	8	7	6	5	10	9	8	7	6	5
EN 13201-3'e göre hesap noktalarının boyuna konumları	10	2,76	6,17	5,89	6,72	5,84	5,41	1,02	4,83	4,99	5,02	4,14	3,29
	9	3,85	5,88	6,55	6,72	5,80	5,29	1,59	4,31	4,90	4,28	3,65	2,93
	8	2,70	4,91	6,39	6,14	5,18	4,30	0,76	3,55	4,69	4,55	2,53	1,64
	7	3,09	5,35	6,97	6,39	5,05	4,03	0,00	3,05	4,40	3,77	1,53	0,30
	6	3,60	5,72	6,96	6,71	4,79	4,24	0,04	2,70	4,24	3,11	0,06	0,60
	5	3,26	6,14	6,84	6,75	4,42	4,85	1,73	2,28	3,07	1,85	0,81	0,48
	4	2,74	5,28	6,41	4,54	3,87	4,49	2,94	1,31	1,63	1,11	2,14	1,39
	3	3,36	6,55	6,72	5,40	5,18	5,04	2,84	0,76	0,43	1,23	1,44	2,10
	2	5,17	7,70	7,72	6,49	6,46	6,94	1,31	2,46	2,65	0,00	0,57	0,41
	1	8,49	9,77	9,94	8,93	9,40	9,03	3,78	6,23	5,52	4,82	4,80	5,26
		$\rho=0,30$						$\rho=0,50$					
EN 13201-3'e göre hesap noktalarının boyuna konumları	10	2,28	5,55	5,79	5,87	5,09	4,30	0,55	4,72	4,69	4,83	3,82	3,07
	9	2,64	5,21	6,03	5,30	4,78	4,23	0,98	3,75	4,60	4,48	3,20	2,45
	8	2,37	4,79	5,96	5,71	4,45	3,54	0,44	3,06	4,15	4,13	2,17	1,26
	7	1,72	4,71	5,40	5,25	3,36	2,19	0,42	2,66	3,95	3,43	1,14	0,90
	6	2,04	5,19	6,02	4,97	2,93	2,29	0,61	2,70	3,65	2,36	0,07	1,36
	5	1,65	4,76	5,83	4,63	2,57	2,74	2,02	1,59	2,57	1,72	1,20	0,73
	4	0,51	4,01	4,42	2,89	1,57	2,13	3,40	0,18	1,36	0,98	3,10	2,32
	3	0,90	4,67	4,00	2,78	2,07	3,53	3,46	0,09	0,24	1,37	2,16	2,25
	2	2,85	5,54	5,26	3,68	3,71	4,58	1,79	1,69	0,96	0,29	0,42	0,56
	1	6,44	8,18	8,00	7,43	7,87	7,04	3,17	5,52	5,52	4,63	4,99	4,46
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
		gözlemci ↑						gözlemci ↑					
EN 13201-3'e göre hesap noktalarının enine konumları													

**Çizelge 3.12 : 4000 K, M5 aydınlatma sınıfı ve dört farklı cisim yansıtma faktörü için VL değerleri.**

		$\rho=0,20$						$\rho=0,40$					
		10	9	8	7	6	5	10	9	8	7	6	5
EN 13201-3'e göre hesap noktalarının boyuna konumları	10	2,94	4,47	5,32	5,73	4,94	4,51	0,75	3,27	4,43	4,26	3,43	2,93
	9	3,12	4,48	5,47	5,74	5,02	4,50	0,66	3,27	4,00	3,89	2,98	2,00
	8	3,26	5,05	5,64	5,80	4,63	4,23	0,65	3,34	3,97	3,44	2,16	1,41
	7	2,86	4,99	5,83	5,49	4,24	3,63	0,27	2,68	3,78	2,90	1,02	0,15
	6	3,11	4,75	5,96	5,17	3,99	3,48	0,53	2,70	3,65	2,42	0,28	0,99
	5	2,82	4,89	5,77	4,86	3,57	3,97	1,04	1,09	2,82	0,94	0,80	0,80
	4	2,22	4,91	5,57	5,06	3,85	4,27	3,46	0,42	1,57	0,64	1,72	1,21
	3	2,89	5,73	5,58	5,10	4,42	4,86	2,37	0,10	0,89	1,37	2,33	1,24
	2	4,74	6,72	6,21	6,26	5,69	5,97	0,20	1,34	1,62	0,11	0,81	0,19
	1	6,81	8,31	8,24	7,73	7,62	7,39	2,76	5,50	5,01	3,77	4,80	3,99
		$\rho=0,30$						$\rho=0,50$					
EN 13201-3'e göre hesap noktalarının boyuna konumları	10	1,35	3,87	5,06	4,75	4,52	4,08	0,55	3,12	4,17	4,14	3,29	2,51
	9	1,89	4,33	5,07	4,95	4,15	3,25	0,46	3,27	4,13	3,89	2,84	1,68
	8	2,06	4,27	5,08	4,69	3,71	2,74	0,65	3,03	3,83	3,44	2,01	1,08
	7	1,78	4,00	5,25	4,27	3,05	2,00	0,30	2,18	3,49	2,59	0,68	0,59
	6	2,00	4,24	5,34	4,20	2,51	1,32	0,70	2,18	3,34	2,10	0,23	1,31
	5	1,44	3,62	5,11	3,26	2,18	2,18	1,41	0,91	2,00	0,76	1,29	1,29
	4	0,19	3,23	4,18	2,73	1,50	2,01	3,65	0,05	1,22	0,95	2,06	1,87
	3	0,92	3,40	3,89	2,55	1,67	2,43	2,95	0,72	0,33	0,86	1,97	1,95
	2	3,00	4,45	4,54	3,53	3,06	3,35	1,18	0,72	0,16	0,46	0,24	0,19
	1	4,65	6,90	7,54	6,49	6,34	6,08	2,49	4,80	4,32	3,03	3,52	2,68
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
		gözlemci ↑						gözlemci ↑					
EN 13201-3'e göre hesap noktalarının enine konumları													

**Çizelge 3.13 : 6000 K, M2 aydınlatma sınıfı ve dört farklı cisim yansıtma faktörü için VL değerleri.**

		$\rho=0,20$						$\rho=0,40$					
		10	9	8	7	6	5	10	9	8	7	6	5
EN 13201-3'e göre hesap noktalarının boyuna konumları	10	4,93	7,89	8,25	8,26	7,26	6,82	2,73	6,43	6,73	6,50	5,65	4,53
	9	5,04	7,50	8,38	8,49	7,04	6,28	2,31	5,76	6,58	6,44	4,87	3,32
	8	5,11	7,91	8,48	8,40	6,78	5,88	1,57	5,45	5,92	6,02	3,52	1,68
	7	4,81	8,19	8,71	8,05	6,23	4,81	0,90	4,60	5,70	4,98	1,38	0,70
	6	5,18	8,17	9,16	7,77	5,74	4,76	0,13	4,63	5,44	3,56	0,33	1,65
	5	3,68	7,94	8,45	6,74	5,01	5,42	1,62	2,86	3,99	1,73	1,91	2,07
	4	3,27	7,74	7,97	6,26	4,63	5,36	3,09	0,47	1,78	0,37	2,96	3,35
	3	3,71	6,68	7,91	6,40	4,92	5,25	3,62	1,70	1,15	1,45	3,95	3,37
	2	6,21	9,26	8,95	6,73	6,79	6,48	1,21	1,34	0,77	1,17	1,74	1,94
	1	9,93	12,19	11,38	10,69	10,84	9,86	4,29	6,58	6,06	5,01	4,14	4,02
		$\rho=0,30$						$\rho=0,50$					
	10	3,74	7,29	7,68	7,65	6,45	5,68	2,27	5,96	6,47	6,25	5,38	4,10
	9	3,82	6,85	7,64	7,47	5,81	5,11	1,93	5,25	6,17	6,12	4,50	2,93
	8	3,63	6,79	7,51	7,18	5,30	4,37	1,18	5,01	5,78	5,41	3,14	1,51
	7	3,17	6,59	7,42	6,44	3,85	2,73	0,39	4,30	5,12	3,96	0,96	0,94
	6	3,07	6,96	7,67	5,94	3,24	2,48	0,53	3,99	4,92	2,76	0,41	1,56
	5	1,98	5,73	6,58	4,72	1,67	2,64	2,41	1,93	2,86	0,24	2,97	2,41
	4	0,84	4,81	5,60	3,34	0,99	1,67	4,50	0,38	1,02	1,45	4,15	3,70
	3	1,12	3,55	5,21	3,34	1,29	1,50	4,95	3,25	0,42	2,97	5,48	4,30
	2	3,72	6,44	6,36	2,92	4,05	3,38	1,93	0,78	0,37	2,64	1,34	2,04
	1	7,93	9,97	10,08	8,02	7,79	7,55	3,54	6,16	6,38	2,81	4,38	3,53
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
		gözlemci ↑						gözlemci ↑					
		EN 13201-3'e göre hesap noktalarının enine konumları											

**Çizelge 3.14 : 6000 K, M3 aydınlatma sınıfı ve dört farklı cisim yansıtma faktörü için VL değerleri.**

		$\rho=0,20$						$\rho=0,40$					
		10	9	8	7	6	5	10	9	8	7	6	5
EN 13201-3'e göre hesap noktalarının boyuna konumları	10	3,05	5,63	6,61	6,60	5,84	6,76	1,00	4,45	5,29	5,16	4,28	5,42
	9	3,30	6,04	6,59	6,78	5,42	5,18	1,08	4,54	5,08	4,98	3,33	2,94
	8	3,86	6,03	5,93	6,69	5,20	4,09	1,35	3,66	4,43	4,74	2,60	1,47
	7	3,64	6,49	6,85	6,56	4,79	3,63	0,39	3,82	4,57	3,46	0,96	0,67
	6	4,02	6,60	7,35	6,49	4,55	4,22	0,11	3,62	4,18	2,75	0,12	1,14
	5	3,40	6,48	6,91	5,94	3,65	4,13	1,00	2,01	2,97	0,75	1,70	1,11
	4	3,04	6,27	6,94	5,39	3,25	4,29	3,52	1,67	1,66	0,56	3,48	2,82
	3	3,80	6,98	7,14	5,34	3,33	4,82	2,46	0,51	0,51	1,83	4,01	2,25
	2	5,47	8,02	7,69	6,43	4,99	5,99	0,92	1,73	1,49	0,96	2,06	1,26
	1	8,40	10,50	9,92	9,22	9,22	9,07	3,72	5,73	4,92	3,73	3,50	4,03
		$\rho=0,30$						$\rho=0,50$					
	10	2,09	5,08	6,19	5,88	5,32	6,29	0,88	4,18	5,37	4,84	4,02	5,11
	9	2,19	5,29	5,88	5,84	4,66	4,30	0,96	4,26	4,99	4,64	3,14	2,65
	8	2,86	5,24	5,84	6,07	4,50	3,22	0,97	3,66	4,34	4,47	2,30	0,93
	7	2,34	5,36	6,09	5,11	3,37	2,08	0,00	3,21	4,00	3,36	0,41	1,18
	6	2,41	5,32	6,07	4,83	3,15	1,39	0,34	3,19	3,89	2,65	0,23	1,88
	5	1,68	4,80	5,63	3,75	1,47	2,11	1,85	1,45	2,34	0,52	2,25	2,52
	4	0,19	4,43	4,80	2,80	0,62	1,63	4,03	0,75	0,65	1,09	3,96	3,84
	3	1,27	4,34	4,73	2,07	0,55	1,44	3,60	0,18	0,08	2,42	4,26	3,69
	2	2,97	5,50	5,84	3,81	2,67	2,63	1,72	0,85	0,30	1,08	2,19	2,42
	1	6,73	8,54	8,89	7,34	6,99	7,77	2,72	5,16	4,78	4,20	3,18	3,21
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
		gözlemci ↑						gözlemci ↑					
		EN 13201-3'e göre hesap noktalarının enine konumları											

**Çizelge 3.15 : 6000 K, M4 aydınlatma sınıfı ve dört farklı cisim yansıtma faktörü için VL değerleri.**

		$\rho=0,20$						$\rho=0,40$					
		10	9	8	7	6	5	10	9	8	7	6	5
EN 13201-3'e göre hesap noktalarının boyuna konumları	10	2,41	4,24	5,49	5,59	4,89	4,38	1,60	3,49	4,62	4,55	3,88	3,17
	9	3,29	5,15	6,04	6,08	5,11	4,25	1,35	3,94	4,62	4,80	3,47	2,36
	8	3,57	5,72	5,85	6,33	4,68	3,92	1,29	4,03	4,00	4,15	2,56	0,94
	7	3,32	5,59	6,37	3,97	3,67	2,76	0,93	3,20	4,14	0,82	0,94	0,42
	6	3,78	5,96	6,72	5,82	4,13	3,51	0,51	2,98	3,90	2,49	0,03	1,23
	5	3,05	6,02	6,38	4,93	3,22	3,52	1,08	1,68	2,63	0,58	1,63	1,54
	4	2,92	5,81	6,01	4,58	2,64	3,17	2,93	1,49	2,03	0,88	2,41	2,41
	3	3,62	6,11	6,21	4,79	3,17	3,73	2,80	0,91	0,85	1,39	3,15	2,26
	2	5,42	6,88	6,43	5,81	4,90	5,70	0,79	1,16	0,43	0,71	1,60	0,98
	1	7,53	9,40	8,96	8,30	7,45	8,05	3,40	5,17	4,29	3,56	2,45	3,17
		$\rho=0,30$						$\rho=0,50$					
EN 13201-3'e göre hesap noktalarının boyuna konumları	10	1,46	3,81	4,91	4,93	4,08	3,39	1,46	3,49	4,42	4,27	3,78	2,95
	9	2,32	4,60	5,13	5,39	4,24	3,42	1,07	3,61	4,31	4,40	3,04	1,89
	8	2,29	4,93	5,31	5,29	3,98	2,75	0,86	3,69	4,22	4,15	2,33	0,81
	7	2,42	4,64	5,48	2,47	3,15	1,34	0,48	2,84	3,70	0,14	0,42	1,38
	6	2,38	4,97	5,66	4,34	2,33	1,32	0,23	2,61	3,55	2,12	0,50	1,98
	5	1,55	4,05	5,00	3,16	1,10	1,15	1,91	1,15	2,00	0,17	2,01	1,79
	4	0,48	4,05	4,55	2,51	0,69	1,01	3,65	0,95	1,23	1,50	3,63	2,93
	3	0,83	4,15	4,37	1,89	0,57	1,02	3,81	0,06	0,00	2,60	4,30	3,39
	2	2,87	4,71	3,91	2,90	2,92	2,62	1,40	0,54	0,30	0,71	1,60	2,03
	1	5,76	7,88	6,88	5,75	5,72	5,32	2,61	4,66	3,94	3,19	1,30	2,39
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
		gözlemci ↑						gözlemci ↑					
EN 13201-3'e göre hesap noktalarının enine konumları													

**Çizelge 3.16 : 6000 K, M5 aydınlatma sınıfı ve dört farklı cisim yansıtma faktörü için VL değerleri.**

		$\rho=0,20$						$\rho=0,40$					
		10	9	8	7	6	5	10	9	8	7	6	5
EN 13201-3'e göre hesap noktalarının boyuna konumları	10	3,16	5,02	5,43	5,21	4,62	4,48	1,69	3,77	4,43	3,94	3,21	3,01
	9	3,15	4,53	4,71	5,18	4,41	3,95	1,65	3,52	3,90	3,84	2,95	2,21
	8	2,48	4,52	4,59	4,80	3,64	2,94	1,36	3,63	4,03	3,69	2,26	1,26
	7	2,99	4,60	4,73	4,62	3,12	2,43	0,60	2,55	2,93	2,31	0,76	0,61
	6	2,74	4,39	4,92	4,48	2,96	2,25	0,05	1,86	2,84	1,85	0,19	0,93
	5	1,87	3,60	4,08	3,53	1,96	1,81	1,24	1,49	2,25	1,09	0,79	1,14
	4	1,76	3,75	4,00	3,11	1,80	2,21	1,85	0,23	0,54	1,01	1,79	2,55
	3	2,76	5,58	5,01	4,04	2,26	3,41	0,41	3,51	3,51	1,49	0,64	1,17
	2	3,53	5,58	4,96	4,11	3,44	3,95	0,88	1,67	1,32	0,27	1,10	0,19
	1	6,44	8,14	7,67	7,04	6,65	6,40	2,19	4,04	4,42	2,77	2,74	2,40
		$\rho=0,30$						$\rho=0,50$					
EN 13201-3'e göre hesap noktalarının boyuna konumları	10	2,42	4,32	4,93	4,58	3,91	3,60	1,51	3,63	4,30	3,81	3,07	2,72
	9	2,40	4,24	4,58	4,11	3,83	3,16	1,46	3,09	3,90	3,57	2,52	1,74
	8	1,36	3,33	3,33	3,55	2,41	1,43	1,17	3,33	3,47	3,13	1,80	0,76
	7	1,59	3,65	4,28	3,39	2,28	0,75	0,20	2,40	2,93	2,00	0,42	1,06
	6	1,50	3,38	3,64	3,17	1,45	0,45	0,62	1,35	2,04	1,69	0,65	1,73
	5	0,80	2,90	3,58	2,83	1,17	0,60	1,41	1,14	1,75	0,74	1,43	1,79
	4	0,40	2,45	2,91	1,53	0,11	0,05	2,39	0,57	0,15	1,65	3,16	3,59
	3	2,76	5,58	5,01	4,04	2,26	3,18	2,84	0,52	0,33	1,37	2,99	2,46
	2	2,84	4,80	4,35	3,00	2,75	2,56	1,25	0,88	0,10	0,80	1,83	1,30
	1	5,11	6,32	6,05	4,78	4,82	4,53	1,66	3,58	2,79	2,01	0,39	0,80
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
		gözlemci ↑						gözlemci ↑					
EN 13201-3'e göre hesap noktalarının enine konumları													

Tüm senaryolar için 60 noktadaki VL değerlerinin 1'den büyük olma koşulları değerlendirilmiş ve Çizelge 3.17'de dört farklı cisim yansıtma faktörü için görülebilir olma ( $VL > 1$ ) yüzdeleri verilmiştir.

**Çizelge 3.17 :** Farklı senaryolarda görülebilir cisim yüzdeleri.

		0,20	0,30	0,40	0,50
4000 K	M2	%100	%100	%83	%85
	M3	%100	%97	%75	%75
	M4	%100	%97	%78	%73
	M5	%100	%97	%68	%67
6000 K	M2	%100	%97	%88	%83
	M3	%100	%95	%80	%75
	M4	%100	%93	%75	%77
	M5	%100	%88	%77	%75

Görülebilirlik ölçüm ve hesaplama sonuçlarına göre 0,20 yansıtma faktörü için tüm noktalarda VL değeri 1'den büyük çıkmıştır. Cisim yansıtma faktörü 0,20'den 0,40'a çıktıkça VL değeri 1'den küçük olan, yani görülemez noktaların sayısı artmaktadır. 0,40 ve 0,50 arasındaki bazı durumlarda ise bunun tam tersi durumlar da gerçekleşmiştir. Yansıtma faktörü 0,40'tan 0,50'ye yükseldiğinde 4000 K M2 sınıfında, 6000 K M4 sınıfında görülebilir cisimlerin yüzdesi artmış, 4000 K M3'te aynı kalmış, diğer koşullarda ise görülebilir cisimlerin yüzdesi azalmıştır.

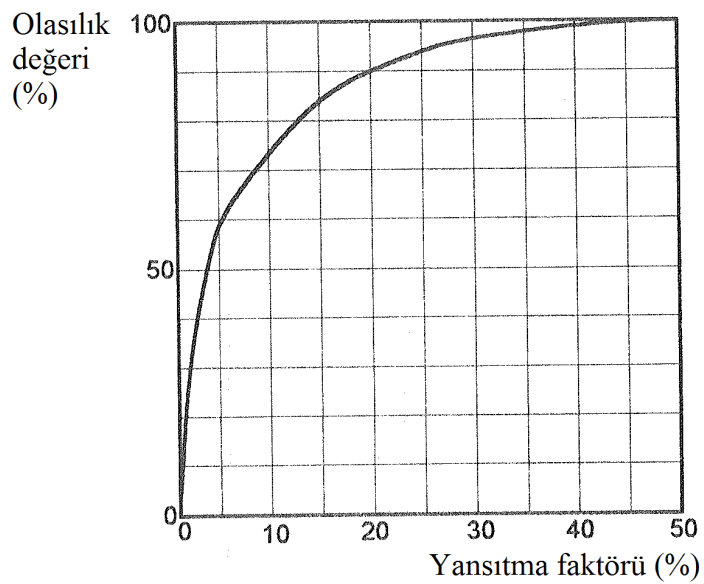
Farklı cisim yansıtma faktörleri ve farklı renk sıcaklıkları için aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Yansıtma faktörü 0,20 için, 4000 K ve 6000 K renk sıcaklıklarında VL değerleri 1'den büyüktür.
- 0,30 için, VL değeri 1'den büyük olan noktaların sayısı 4000 K'de daha fazladır.
- 0,40 için, M4 sınıfı hariç VL değeri 1'den büyük olan noktaların sayısı 6000 K'de daha fazladır.
- 0,50 için, M2 sınıfında VL değeri 1'den büyük olan noktaların sayısı 4000 K'de daha fazla, M3 sınıfında VL değeri 1'den büyük olan noktaların sayısı 4000 K ve 6000 K için aynı, M4 ve M5 sınıfında VL değeri 1'den büyük olan noktaların sayısı 6000 K'de daha fazladır.

### 3.3 Görülebilirlik Seviyesine Bağlı Olarak Test Yolunun Açığa Çıkarma Gücü

Hesap noktalarında görülebilirlik sınırının altında kalan (VL değeri 1'den küçük olan) ve Çizelge 3.9 ile Çizelge 3.16 arasında verilmiş olan yansıtma faktörlerinin yolda engel olarak karşımıza çıkma olasılıkları Şekil 3.4'de verilen Smith'in eğrisi yardımı ile bulunabilir (Smith, 1938). Buradan da farklı renk sıcaklıkları ve aydınlatma sınıfları için her bir hesap noktasında yansıtma faktörü 0,20 ile 0,50 arasında olan yaya kıyafetlerinin yüzde kaçının görülebilir olduğunu ifade eden açığa çıkarma gücü yüzdeleri bulunabilir.

Örneğin; 4000 K M2 aydınlatma sınıfı için, hesap alanının ikinci sırasındaki dördüncü noktada 0,20 ve 0,30 yansıtma faktörleri görülebilirken ( $VL > 1$ ), 0,40 ve 0,50 yansıtma faktörüne sahip cisimler bu noktada teorik olarak görülemez ( $VL \leq 1$ ). Smith'in eğrisine göre yayaların kıyafetlerine ait yansıtma faktörünün 0,30'dan daha büyük olma olasılığı yalnızca %3'tür. 4000 K M2 aydınlatma sınıfı için, hesap alanının ikinci sırasındaki dördüncü noktada %97 olasılıkla yansıtma faktörü 0,30'dan daha küçük, yani teorik hesaplara göre bu noktada görülebilir kabul edilen engeller karşımıza çıkacaktır. Olasılık olarak bu noktada yayaların %97'si görülebilir, dolayısı ile açığa çıkarma gücü %97'dir. Çizelge 3.18'de, 4000 K ve 6000 K renk sıcaklıkları, M2, M3, M4, M5 sınıfları için 60 hesap noktasındaki yaya kıyafetlerine göre açığa çıkarma gücü yüzdeleri verilmiştir.



Şekil 3.4 : Yaya kıyafetlerine ait yansıtma faktörlerinin istatistiksel dağılımı.

**Çizelge 3.18 : 4000 K ve 6000K renk sıcaklığında farklı aydınlatma sınıfları için hesap noktalarının açığa çıkarma gücü yüzdeleri.**

		4000K						6000K								
M2	EN 13201-3'e göre hesap noktalarının boyuna konumları	10	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	
		9	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	
		8	%97	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	
		7	%97	%100	%100	%100	%100	%100	%97	%97	%100	%100	%100	%100	%100	
		6	%97	%100	%100	%100	%100	%97	%97	%97	%100	%100	%100	%100	%100	
		5	%100	%100	%100	%99	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	
		4	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%90	%97	%100	%97	%90	%100
		3	%100	%97	%99	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%99	%100	%100	%100	%100
		2	%97	%100	%100	%97	%97	%97	%99	%100	%100	%99	%97	%100	%100	%100
		1	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100
M3	EN 13201-3'e göre hesap noktalarının boyuna konumları	10	%97	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	
		9	%99	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	
		8	%97	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%99	%97	%97	
		7	%97	%100	%100	%100	%100	%99	%97	%97	%100	%100	%100	%100	%100	
		6	%97	%100	%100	%100	%100	%97	%97	%97	%100	%100	%100	%100	%100	
		5	%100	%100	%100	%99	%97	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	
		4	%90	%97	%100	%97	%100	%100	%100	%100	%90	%99	%99	%97	%90	%100
		3	%90	%97	%99	%97	%100	%100	%100	%100	%100	%97	%97	%100	%90	%100
		2	%100	%99	%100	%97	%97	%97	%97	%97	%97	%99	%97	%100	%100	%100
		1	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100
M4	EN 13201-3'e göre hesap noktalarının boyuna konumları	10	%99	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	
		9	%99	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	
		8	%97	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%99	%100	%100	%97	%97	
		7	%97	%100	%100	%100	%100	%100	%97	%97	%97	%100	%100	%100	%100	
		6	%97	%100	%100	%100	%100	%97	%97	%97	%100	%100	%100	%100	%100	
		5	%100	%100	%100	%100	%97	%97	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	
		4	%90	%99	%100	%99	%100	%100	%100	%100	%90	%99	%100	%97	%90	%100
		3	%90	%97	%97	%100	%100	%100	%100	%100	%90	%97	%97	%100	%90	%100
		2	%100	%100	%99	%97	%97	%97	%97	%97	%97	%99	%97	%100	%97	%100
		1	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100
M5	EN 13201-3'e göre hesap noktalarının boyuna konumları	10	%97	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	
		9	%97	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	
		8	%97	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%99	%97	
		7	%97	%100	%100	%100	%99	%97	%97	%97	%100	%100	%100	%97	%90	
		6	%97	%100	%100	%100	%97	%97	%97	%97	%100	%100	%100	%97	%90	
		5	%100	%99	%100	%99	%97	%97	%97	%97	%90	%100	%100	%99	%97	%90
		4	%90	%97	%100	%99	%100	%100	%100	%100	%90	%97	%97	%100	%90	%90
		3	%90	%97	%97	%99	%100	%100	%100	%100	%97	%99	%99	%100	%97	%100
		2	%97	%99	%99	%97	%97	%97	%97	%97	%97	%99	%97	%100	%97	%100
		1	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%99	%97	%99
		1	2	3	4	5	6									
		↑ gözlemci														
		EN 13201-3'e göre hesap noktalarının enine konumları														
								↑ gözlemci								
								EN 13201-3'e göre hesap noktalarının enine konumları								



### **3.4 Laboratuvar Gözlemci Deneyleri İle Farklı Senaryolar İçin Kritik VL Değerlerinin Bulunması**

Teorik olarak VL değeri 1'den büyük olan cisimler görülebilir kabul edilse de gerçek koşullardaki kontrast eşiği daha yüksek olduğu için, görülebilirlik sınırını ifade eden VL değeri de daha yüksektir. Gerçek koşullardaki kritik sınır VL değerini bulabilmek için 60 metrede sabit gözlemci için alınan ölçüm fotoğrafları bilgisayar ortamında gözlemci deneyleri ile değerlendirilerek, hangi VL değerine sahip kritik cisimlerin rahat görülebildiği, hangi VL değerlerinin ise görülmesinin zor olduğu belirlenmiştir.

#### **3.4.1 Denek grubu**

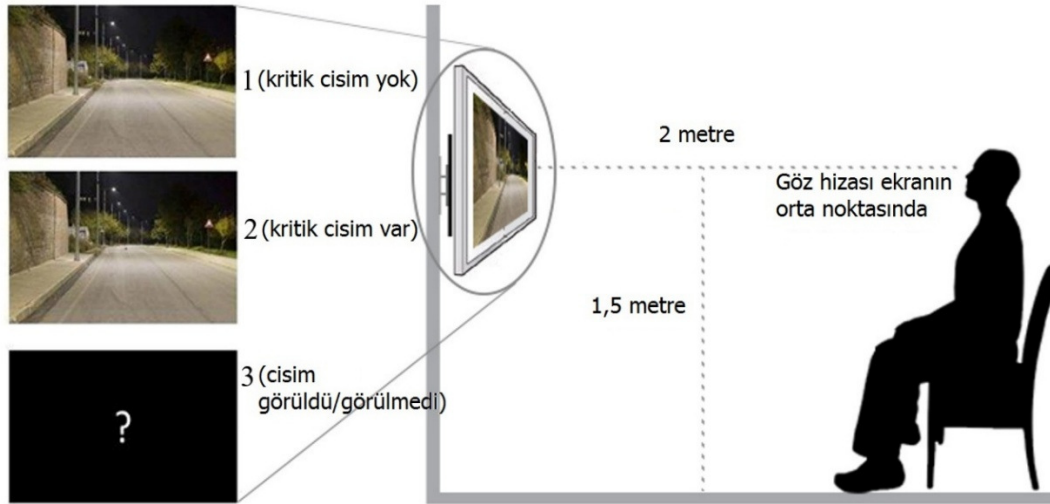
Deneyler, yaşları 25 ile 35 arasında değişen, 18 erkek 12 kadın olmak üzere, toplam 30 adet denek ile gerçekleştirilmiştir. Deneklerin biri lisans mezunu, diğerleri yüksek lisans öğrencisidir. Deneylere başlamadan önce tüm deneklere online olarak bilgisayar ekranında göz bozukluk testi ve renk körlüğü testi uygulanmıştır (zeiss online görme tarama testi, 2017). İnternet üzerinden ulaşılabilen online görme testi ile göz kusurlarının derecesi ve şekli belirlenememekle birlikte bu uygulama, kişinin profesyonel bir görme testi yaptırma zamanının gelip gelmediğini hızlı ve kolay şekilde tespit etmeye yardımcı olan bir ön test niteliğindedir. Sonuçları verilen 30 adet denegin tamamı testi başarıyla geçmiş, testi geçemeyen kişiler denek olarak kabul edilmemiştir.

#### **3.4.2 Deneyin yapılışı**

Önceki dönem çalışmaları sırasında kameralı parıltı ölçer cihazı EN13201-3 (CEN, 2015b) ve CIE 140 (CIE, 2000) standartlarında belirtildiği gibi hesap alanındaki ilk aydınlatma direğinden 60 metre geride, 1,5 metre yükseklikte, her şeridin orta noktasına sabitlenmiştir. Hesap alanı içindeki toplam 60 adet noktanın her birinde bir kenarı 20 cm uzunluğundaki kare şeklindeki kritik cismin fotoğrafları çekilmiştir. 4000 K ve 6000 K renk sıcaklıklarında, M2, M3, M4, M5 yol aydınlatma sınıfları ve 0,20, 0,30, 0,40, 0,50 yansıtma faktörleri için ayrı ayrı olmak üzere toplam 1920 adet kritik cisim fotoğrafı elde edilmiştir. Bu fotoğraflar içinden farklı renk sıcaklıklarını, yol aydınlatma sınıflarını ve yansıtma faktörlerini temsil edecek şekilde 270 adet fotoğraf seçilmiş, bu fotoğraflar 4000 K renk sıcaklığında dört farklı yol aydınlatma sınıfı, 6000 K renk sıcaklığında dört farklı yol aydınlatma sınıfı olacak şekilde toplam

8 senaryo için gruplanmış ve ekranda gösterilmek üzere sunum haline getirilmiştir. Hazırlanan sunumlar, İTÜ Enerji Enstitüsü Enerji Verimliliği ve Aydınlatma Tekniği Laboratuvarı'ndaki LED televizyon ekranında deneklere gösterilmiştir. Sunumlar sırasında televizyon ekranına ilk önce Şekil 3.4'de gösterildiği gibi yolun boş haline (yolda herhangi bir kritik cisim yokken) ait görüntü gelmektedir. Bu görüntü 2 ila 3 saniye arasında rasgele bir süre ekranda kaldıktan sonra yol üzerinde bir kritik cisim bulunan fotoğraf 0,2 saniye süreyle gösterilip daha sonra siyah soru işaretli ekrana geçilmektedir. Deneklerden, ekranda soru işareti belirdiğinde yolda herhangi bir cisim görüp görmediklerini söylemeleri istenmiş, “evet” ya da “hayır” şeklinde verdikleri cevaplar kaydedilmiştir. Deneklerin güvenilirliğini belirleyebilmek için her bir senaryoda iki adet yol üzerinde hiç kritik cisim olmayan fotoğraf gösterilmiş, deneklerin tamamı bu boş fotoğrafta cisim görmediklerini belirtmişlerdir.

Gerçekte bir kenarı 20 cm uzunluğundaki cisimler televizyon ekranında 0,6 cm olarak görülmektedir. Sahada 60 metre uzaktaki gözlemcinin 20 cm yüksekliğindeki cismi görme açısı sabit kalacak şekilde oranlanarak, denekler televizyon ekranından 2 metre uzağa ve göz hizası ekranın orta noktasında olacak şekilde konumlandırılmışlardır. Deney düzeneği Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5 : Laboratuvar deneylerinin yapılışı.

### 3.4.3 Deney sonuçları ve kritik VL değerleri

Deneklerin verdikleri cevaplara göre, farklı aydınlatma sınıflarında, cisimlerin VL değerlerine ve yansıtma faktörlerine bağlı görülebilme yüzdeleri 4000 K ve 6000 K renk sıcaklıkları için sırasıyla Çizelge 3.19 ve Çizelge 3.20'de verilmiştir. Bu yüzdeler

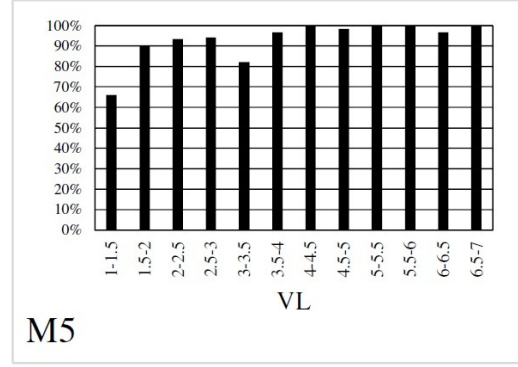
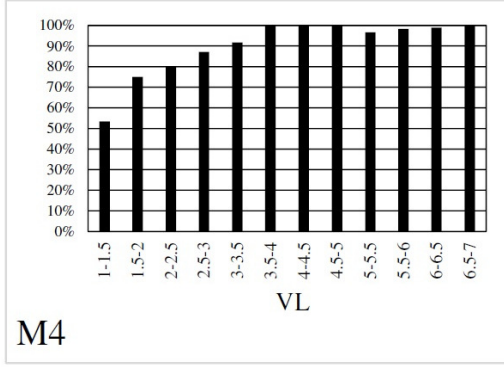
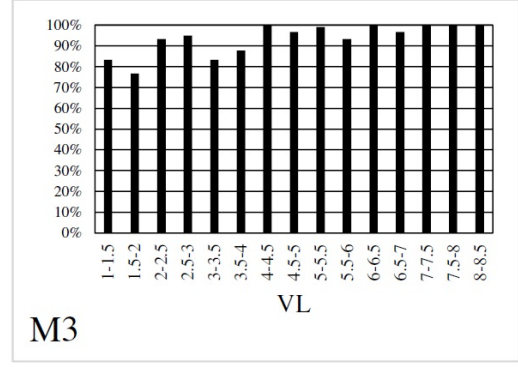
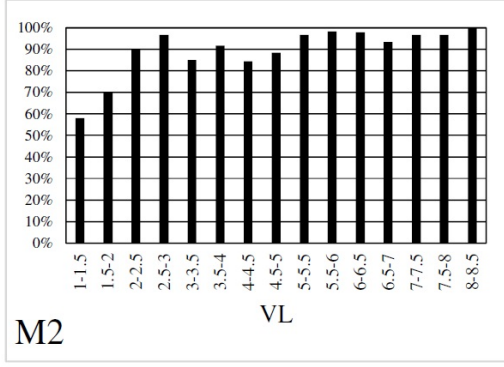
ayrıca Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de grafik olarak gösterilmiştir. VL değerleri deneklerin yaş ortalamasına uygun olarak 30 yaş için hesaplanmıştır.

**Çizelge 3.19 : 4000 K deney sonuçları.**

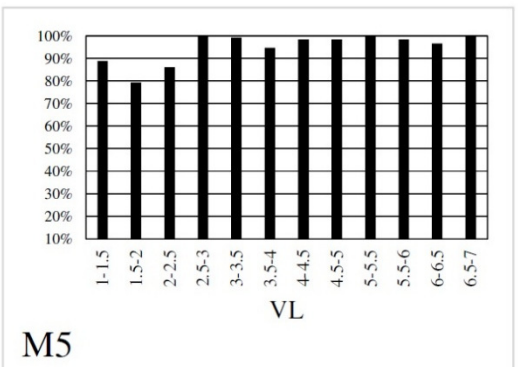
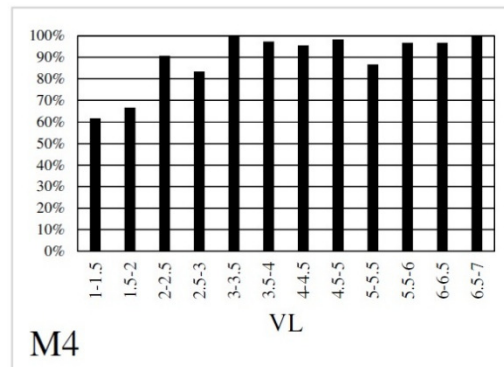
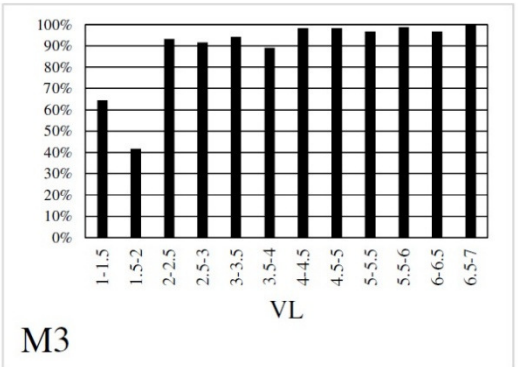
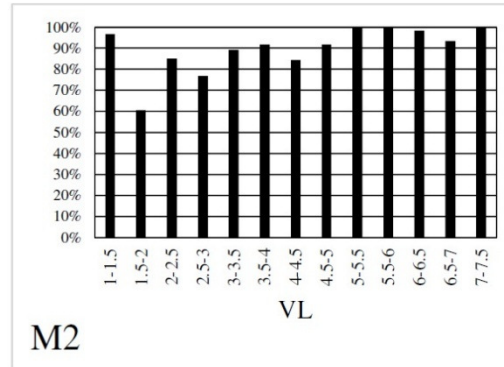
M2			M3			M4			M5		
VL	$\rho$ (%)	Görme yüzdesi %	VL	$\rho$ (%)	Görme yüzdesi %	VL	$\rho$ (%)	Görme yüzdesi %	VL	$\rho$ (%)	Görme yüzdesi %
0,16	50	53	0,81	50	93	1,20	50	53	0,64	40	50
0,44	40	67	1,19	40	67	1,53	40	73	0,72	50	73
0,49	40	63	1,22	50	90	1,57	30	77	0,91	50	100
1,13	50	23	1,68	40	77	2,45	50	80	1,09	40	90
1,37	40	83	2,16	40	97	2,57	50	87	1,29	50	77
1,71	30	70	2,17	40	90	2,65	40	83	1,41	40	7
2,04	50	90	2,84	40	97	2,70	40	100	1,50	30	87
2,82	30	93	2,85	30	93	2,70	20	93	2,00	40	93
2,96	50	100	3,15	20	73	2,74	20	93	2,22	20	93
3,00	20	97	3,21	20	80	2,84	40	57	2,55	30	97
3,31	30	67	3,27	50	90	2,93	40	97	2,84	50	93
3,42	30	90	3,41	30	90	3,07	40	90	2,89	20	93
3,46	30	87	3,54	20	93	3,10	50	93	3,05	30	93
3,61	40	90	3,63	50	90	3,54	30	100	3,11	20	100
3,96	40	93	3,69	40	93	3,65	50	100	3,29	50	100
4,35	40	97	3,69	50	93	4,30	30	100	3,34	50	97
4,39	50	77	3,79	40	77	4,49	20	100	3,43	40	97
4,49	20	80	3,93	20	80	4,54	20	100	3,46	40	17
4,57	50	93	4,23	30	100	4,60	50	100	3,62	30	97
4,64	20	83	4,53	30	97	4,67	30	100	3,65	40	100
5,11	40	97	4,75	40	93	4,82	40	100	3,71	30	93
5,46	30	97	4,75	50	93	4,90	40	100	4,13	50	100
5,60	50	100	4,99	30	97	5,52	50	97	4,27	30	100
5,71	20	93	5,12	30	100	5,54	30	97	4,80	50	100
5,78	50	100	5,12	40	100	5,72	20	97	4,89	20	97
5,87	40	100	5,32	20	100	5,83	30	100	5,08	30	100
6,26	30	100	5,34	40	97	5,96	30	100	5,10	20	100
6,29	40	100	5,52	40	100	6,39	20	100	5,50	40	100
6,43	30	93	5,67	50	73	6,41	20	100	5,64	20	100
6,62	30	93	5,84	30	100	6,46	20	97	6,21	20	97
8,22	20	97	6,74	50	97				6,90	30	97
8,64	20	100	7,45	20	100						
			7,52	20	100						

Çizelge 3.20 : 6000 K deney sonuçları.

M2			M3			M4			M5		
VL	ρ (%)	Görme yüzdesi %	VL	ρ (%)	Görme yüzdesi %	VL	ρ (%)	Görme yüzdesi %	VL	ρ (%)	Görme yüzdesi %
0,53	50	23	0,00	50	60	0,06	50	17	0,65	50	80
1,51	50	40	1,45	50	87	0,79	40	83	1,06	50	97
1,67	30	50	1,47	40	47	0,93	40	60	1,14	40	90
1,68	40	77	1,67	40	37	1,34	30	87	1,65	50	97
1,73	40	47	1,88	50	47	1,55	30	67	1,76	20	90
1,74	40	90	2,02	40	93	2,33	50	97	1,79	40	100
2,31	40	77	2,07	30	93	2,33	30	80	1,85	40	47
2,48	30	93	2,60	40	100	2,41	40	93	1,96	20	97
2,76	50	63	2,97	30	83	2,47	30	100	2,04	50	100
2,86	40	90	3,04	20	90	2,49	40	80	2,25	40	67
3,07	30	93	3,21	50	90	2,60	50	93	2,26	30	80
3,14	50	80	3,33	20	100	2,64	20	63	2,41	30	100
3,27	20	87	3,36	50	97	2,98	40	93	2,45	30	83
3,34	30	97	3,80	20	87	3,04	50	100	2,84	40	100
3,55	30	90	3,81	30	93	3,55	50	90	3,12	20	100
3,68	20	93	3,84	50	83	3,90	40	100	3,13	50	100
3,71	20	83	4,22	20	93	3,92	20	100	3,33	50	100
3,95	40	100	4,34	30	97	3,94	50	97	3,47	50	97
4,10	50	87	4,34	50	100	3,98	30	100	3,52	40	93
4,30	50	90	4,43	30	100	4,05	30	97	3,53	20	83
4,50	50	77	4,43	40	100	4,30	50	93	3,58	50	97
4,92	20	97	4,47	50	100	4,34	30	97	3,60	20	100
4,95	50	87	4,92	40	97	4,62	40	100	3,83	30	100
5,36	20	100	4,99	20	100	4,93	20	97	4,04	40	93
5,65	40	100	5,29	40	93	5,17	40	100	4,04	30	100
5,70	40	100	5,37	50	100	5,42	20	73	4,08	20	100
5,76	40	100	5,84	30	97	5,76	30	97	4,30	50	100
5,78	50	100	5,84	30	100	5,96	20	97	4,80	30	100
6,23	20	97	5,93	20	100	6,33	20	100	4,93	30	97
6,44	30	100	6,07	30	100	6,88	30	100	5,43	20	100
6,58	30	97	6,94	20	100				5,58	30	97
6,68	20	90							5,58	20	100
7,47	30	100							6,32	30	100
									7,04	20	100



**Şekil 3.6 :** 4000 K renk sıcaklığında farklı yol aydınlatma sınıfları için VL değerlerinin görülme yüzdeleri.



**Şekil 3.7 :** 6000 K renk sıcaklığında farklı yol aydınlatma sınıfları için VL değerlerinin görülme yüzdeleri.

Şekil 3.6'da 4000 K M2 sınıfı için verilen grafiği incelediğimizde, VL değeri 8-8,5 aralığında ise, deneklerin tamamı ekranda beliren cismi görebilmişlerdir. Deneklerin %90'ı VL değeri 5-5,5 aralığından büyük cisimlerin tamamını görebilmişlerdir. Deneklerin %80'i ise VL değeri 2-2,5 aralığından büyük cisimlerin tamamını görebilmişlerdir. Tüm grafikler değerlendirildiğinde elde edilen minimum VL değerleri ve görülme yüzdeleri Çizelge 3.21'de toplu olarak verilmiştir. Sonuçlar Lighting Research and Technology dergisinde makale olarak yayınlanmıştır .

**Çizelge 3.21 :** Minimum VL değerleri ve görülebilme yüzdeleri.

	%80		%90		%100	
	4000 K	6000 K	4000 K	6000 K	4000 K	6000 K
M2	2,5	3,5	5,5	5,0	8,5	7,5
M3	2,5	2,5	4,5	4,5	7,5	7,0
M4	2,5	2,5	3,5	3,5	7,0	7,0
M5	2,0	2,5	4,0	3,0	7,0	7,0

Çizelge 3.21'de elde edilen sonuçlara göre test yolunda cisimlerin tamamının tüm senaryolarda görülebilir olması için VL değerlerinin 7 ve üzerinde olması gerektiği görülmektedir. Bu sonuç literatürde çeşitli çalışmalarda elde edilen değerlerle de uyumludur. Dijon gerçekleştirdiği deneyler sonucunda minimum VL değerinin 8 olması gerektiğini söylemiştir (Dijon ve diğerleri, 1998). Benzer şekilde Bacelar, görülebilirliğin geçerli kabul edilebilebilmesi için VL'nin 7 ile 8 arasında bir değerde olması gerektiğini ortaya koymuştur (Bacelar ve diğerleri, 2000). Lecocq çalışmaları sonucunda minimum VL değerini 7 olarak bulmuştur (Lecocq, 1997). Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (CIE)'nin hazırladığı taslak teknik raporda da özellikle belli bir yaşın üzerindeki sürücülerin trafikte yeterli görme performansı gösterebilmeleri için VL değerinin 8 olması gerektiği belirtilmiştir (CIE, 2016).

#### 4. DOĞRU STRATEJİLERİN BELİRLENMESİ

EN13201-3 (CEN 2015b) ve CIE 140 (CIE, 2000) standart ve önerilerinde parıltı ölçümü için gözlemci konumu sabittir ve hesap alanındaki ilk aydınlatma direğinden 60 metre geridedir. Ancak gerçek koşullarda sürücüler belli bir hızla hareket etmektedir ve yol aydınlatması otomasyon uygulamalarında yolun aydınlatma sınıfına karar verilirken dikkate alınan parametrelerden biri de araç hızıdır. Yol aydınlatmaları, sürücülerin hareket halinde iken önlerine çıkan engeli fark edip güvenli durma mesafesi içinde durmalarını sağlayacak şekilde yeterli aydınlatmayı sağlayabilmelidir. Aydınlatma otomasyon sistemi uygulandığında yolda araçlar belli bir hızda seyrederken armatürlerin ışık akıları ayarlanarak aydınlatma sınıfı TSE CEN/TR 13201-1 numaralı teknik rapora uygun olarak M1 ile M6 sınıfları arasında değiştirilebilmektedir. Ancak bu değışimin sürücülerin görsel performansını olumsuz etkilememesi gerekmektedir.

Araçlar aynı hızla ilerlerken yol yüzeyi parıltısının değıştirilmesinin hesap alanına yerleştirilen kritik cisimlerin görülebilirlik değerlerini ne kadar değıştireceğini ortaya koymak amacıyla, araç hızına bağlı olarak hesaplanan güvenli durma mesafesinden hareketli gözlemci için cisim ve fon parıltıları ölçülerek VL değerleri hesaplanmıştır.

##### 4.1 Farklı Araç Hızları İçin Güvenli Durma Mesafelerinin Hesaplanması

Tünel aydınlatması ile ilgili olan CIE 88:2004'te (CIE, 2004) güvenli durma mesafesinin hesaplanmasına ait formüller verilmiştir. Güvenli durma mesafesi;

- Reaksiyon süresi (sürücünün hedefi görmesi ve frene basması arasında geçen süre) boyunca alınan mesafe; " $x_0$ " ile
- Fren mesafesi; " $x$ " bileşenlerinin toplamıdır.

Durma eylemi başladığı anda sabit olan seyahat hızı " $u$ " ise;  $x_0$  denklem 4.1 ile ifade edilir.

$$x_0 = u \times t_0 \quad (4.1)$$

Burada  $t_0$  reaksiyon süresidir. Herhangi bir değer verilmediyse  $t_0$  1 saniye alınabilir.

Fren mesafesi ise denklem 4.2 ile hesaplanır.

$$x = \frac{u^2}{2 \times g \times (f \pm s)} \quad (4.2)$$

f : lastik ve yol kaplaması arasındaki sürtünme kuvveti,

g : yerçekimi ivmesi,

s : yolun eğimi.

Sürtünme katsayısı pratikte uygulanan testler sonucunda belirlenir ve hıza bağlı bir grafik olarak verilir.

Reaksiyon mesafesi (denklem 4.1) ve fren mesafesinin (denklem 4.2) toplamı alındığında “güvenli durma mesafesi”nin (GDM) genel formülü elde edilir:

$$GDM = u \times t_0 + \frac{u^2}{2 \times g \times (f \pm s)} \quad (4.3)$$

Şehir içi yasal hız sınırları dikkate alınarak ilgili grafik ve denklemler kullanılarak M2 sınıfı için araç hızı 90 km/saat, durma mesafesi 78 metre; M3 sınıfı için araç hızı 70 km/saat, durma mesafesi 50 metre, M4 sınıfı için araç hızı 50 km/saat, durma mesafesi 28 metre, M5 sınıfı için araç hızı 30 km/saat, durma mesafesi 14 metre olarak hesaplanmıştır. Hesaplarda sürtünme katsayısı kuru yol koşulları için alınmıştır.

#### **4.2 Minimum Kritik VL Değerlerine Bağlı Olarak Hareketli Gözlemci İçin Farklı Aydınlatma Sınıflarında Görülebilirlik Değişimi**

Daha önce sabit gözlemci için gerçekleştirilen parıltı ölçümleri hareketli gözlemci için tekrarlanmıştır. 4000 K ve 6000 K renk sıcaklığında M2, M3, M4 ve M5 sınıflarında sırasıyla 78 metre, 50 metre, 28 metre ve 14 metre olan güvenli durma mesafesindeki hareketli gözlemci konumundan ölçülen fon ve cisim parıltılarına bağlı olarak görülebilirlik seviyeleri hesaplanmıştır. Smith'e göre 0,30 ile 0,50 arasındaki yansıtma faktörlerinin yolda karşımıza çıkma olasılığı yalnızca %3'tür (Smith, 1938). Karşılaşılan cisimlerin yansıtma faktörlerinin büyük çoğunluğu 0,30'un altında olduğu için, farklı aydınlatma sınıfları altında hesap alanındaki VL değerleri 0,20 yansıtma faktörüne sahip kritik cisimler için bulunmuş ve Çizelge 4.1'de verilmiştir.



**Çizelge 4.1 : Güvenli durma mesafelerinden alınan ölçümlere göre M2, M3, M4 ve M5 sınıfları için hesaplanan VL değerleri.**

		4000K						6000K						
M2	EN 13201-3'e göre hesap noktalarının boyuna konumları	10	8,0	10,5	11,0	10,5	8,5	7,0	8,5	10,0	10,5	9,5	8,5	7,0
		9	7,5	10,5	11,0	9,5	8,0	7,5	9,0	12,0	11,5	10,0	8,0	7,5
		8	7,0	10,0	11,0	9,5	7,5	6,0	9,0	11,0	11,0	9,5	7,5	6,5
		7	7,0	9,5	10,0	8,0	6,0	5,5	8,5	10,5	9,5	8,0	6,5	4,5
		6	6,0	8,0	8,5	8,5	6,0	5,0	8,0	9,5	8,5	7,5	4,5	4,5
		5	5,5	7,0	7,5	7,5	5,5	5,0	6,0	8,5	6,5	5,5	3,0	3,0
		4	4,0	6,0	6,5	7,0	5,5	5,5	4,5	7,5	5,5	5,0	3,0	1,0
		3	3,0	6,0	6,0	5,5	6,0	4,0	3,5	6,0	4,0	3,5	2,5	2,0
		2	4,5	6,0	6,5	6,5	7,0	7,0	5,5	6,0	5,0	5,0	5,5	5,0
		1	7,5	9,0	8,5	7,0	7,5	7,5	8,0	9,5	9,0	8,0	8,0	7,5
M3	EN 13201-3'e göre hesap noktalarının boyuna konumları	10	12,0	15,0	15,0	14,0	13,5	12,0	14,0	16,5	16,5	14,5	13,0	13,0
		9	13,0	15,0	14,0	12,5	12,0	10,0	13,0	16,0	15,0	13,5	12,5	12,0
		8	11,5	14,0	13,0	12,0	10,5	9,0	11,5	13,0	13,0	11,0	9,5	7,5
		7	10,5	12,5	11,5	9,5	8,5	9,5	9,5	12,5	11,0	9,5	7,0	7,0
		6	9,5	12,0	10,5	8,5	6,5	8,5	9,0	10,0	10,0	7,5	6,0	4,5
		5	8,0	10,0	9,5	8,0	6,0	6,0	5,5	8,0	7,5	5,0	3,0	2,0
		4	6,0	8,5	7,5	5,5	4,0	7,0	2,0	5,5	5,0	1,0	4,0	3,0
		3	6,5	8,0	8,0	7,5	7,0	7,0	2,5	6,0	6,0	2,5	4,5	3,0
		2	9,0	11,0	10,0	10,0	9,0	9,5	7,5	7,5	9,0	9,5	7,0	9,0
		1	13,5	14,5	14,0	13,5	12,0	13,0	13,0	14,0	14,5	15,0	15,5	13,5
M4	EN 13201-3'e göre hesap noktalarının boyuna konumları	10	23,0	24,5	25,0	21,0	21,5	21,0	22,0	26,0	24,0	20,5	20,0	18,5
		9	22,5	23,0	22,0	19,0	20,5	18,5	21,0	23,5	22,5	20,5	19,5	19,5
		8	20,0	19,0	16,5	14,5	16,5	15,5	20,0	20,0	21,0	13,0	15,5	14,0
		7	17,5	18,5	16,5	13,5	14,5	13,0	11,5	16,0	16,0	13,0	11,0	11,0
		6	14,0	15,5	12,0	9,5	10,5	8,5	9,0	13,0	11,5	10,0	8,0	5,0
		5	8,0	11,5	8,0	8,0	5,0	5,5	4,5	5,5	6,5	4,5	2,0	6,0
		4	6,5	9,0	9,0	2,5	4,0	3,5	4,5	5,0	3,0	0,0	2,5	4,5
		3	7,0	12,0	9,0	3,0	10,5	8,5	3,0	11,5	6,5	6,5	11,0	7,5
		2	15,5	16,5	16,5	16,0	16,0	14,5	12,0	13,5	12,0	12,5	13,5	18,0
		1	24,0	23,0	24,0	21,5	22,5	23,0	23,5	10,0	21,5	25,5	22,0	24,0
M5	EN 13201-3'e göre hesap noktalarının boyuna konumları	10	31,0	32,5	31,5	28,0	29,0	28,5	31,5	33,5	28,0	30,5	27,5	26,0
		9	28,5	29,5	28,0	25,5	24,0	25,5	26,0	28,5	27,0	23,5	23,0	22,5
		8	24,0	24,5	22,5	17,5	18,0	19,0	23,0	21,5	22,5	20,0	16,5	14,0
		7	16,5	21,5	18,0	14,0	13,0	10,5	16,5	15,5	13,5	9,0	10,0	9,5
		6	11,5	14,0	14,5	2,5	8,5	9,0	10,5	14,5	11,5	4,0	3,5	1,5
		5	6,5	8,5	7,5	2,5	5,5	2,0	6,5	6,5	0,0	2,5	1,0	11,0
		4	2,5	7,0	5,5	2,0	4,0	6,5	2,0	3,0	3,5	1,5	1,0	3,5
		3	11,5	16,5	11,5	11,5	14,0	11,0	0,5	13,0	7,0	9,0	14,5	16,0
		2	22,5	23,0	23,5	17,5	26,5	27,5	14,5	18,5	17,5	16,0	21,5	22,5
		1	33,5	34,0	32,5	30,5	32,5	33,5	28,5	30,0	29,5	33,0	30,0	33,5
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	
		EN 13201-3'e göre hesap noktalarının enine konumları						EN 13201-3'e göre hesap noktalarının enine konumları						

Çizelge 4.1’de, daha önce hesaplanan kritik minimum VL değerleri (Çizelge 3.21) göz önünde bulundurularak, gözlemcilerin tamamı tarafından görülebilen VL değerleri beyaz, gözlemcilerin %90’ı tarafından görülebilen (%10’u tarafından görülemeyen) VL değerleri gri, gözlemcilerin %80’i tarafından görülebilen (%20’si tarafından görülemeyen) VL değerleri koyu gri, görülme oranı %80’in altında kalan noktalar ise siyah ile gösterilmiştir. Görülebilirlik esasına dayanan kişisel değerlendirme çalışmalarında %75-%80 olasılıkla cisimlerin görülebilir olması yeterli kabul edilmektedir (Narisada, 1974). Çizelge 4.1’de görüldüğü gibi 4000 K renk sıcaklığında tüm hesap noktaları için bulunan VL değerleri Çizelge 3.21’de verilen kritik sınır değerlerinin üzerindedir ve %80 olasılıkla görülebilir kabul edilebilmektedir. 6000 K renk sıcaklığında ise görülebilirlik oranı %80’in altında kalan noktalar bulunmaktadır. Bu sonuçlara göre, TEDAŞ LED Işık Kaynaklı Yol Aydınlatma Armatürleri Teknik Şartnamesi’ne (TEDAŞ, 2015) uygun olarak 4000 K LED’li armatürlerin kullanılmasının görülebilirlik açısından daha iyi olacağı anlaşılmaktadır.

Otomasyon uygulamalarında aydınlatma sınıfının değiştirilmesinin görülebilirlik üzerine etkisini belirleyebilmek için, geometrik özellikleri dikkate alınarak şehir içindeki M2 sınıfı bir yol olarak tanımlanan test yolunda gerekli aydınlatma kalite kriterleri 4000 K LED’li armatürler ile sağlanmıştır. Araçlar M2 sınıfı yollar için yasal hız sınırı olarak kabul edilebilecek olan 90 km/saat ile hareket ederken, araç hızı, dolayısı ile güvenli durma mesafesi değişmediği halde, aydınlatma sınıfı M3 yapıldığında, diğer bir deyişle yol yüzeyi parlaklığı 1,5 cd/m<sup>2</sup>’den 1 cd/m<sup>2</sup>’ye düşürüldüğünde, ya da yol sınıfı M3’ten (1 cd/m<sup>2</sup>), M4’e (0,75 cd/m<sup>2</sup>) düşürüldüğünde sürücülerin görsel performansının bozulmaması istenmektedir. VL değerlerine bağlı olarak açıklanan sürücülerin görsel performansındaki değişimi ortaya koyabilmek amacıyla, M2 sınıfı yolda yasal hız sınırı olarak kabul edilen 90 km/saat için hesaplanan güvenli durma mesafesi olan 78 metreden, M2, M3 ve M4 sınıflarına uygun aydınlatma kalite kriterleri altında cisim ve fon parlaklıkları ölçülmüş, buradan VL değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca M3 sınıfı yollarda, araç hızının 70 km/saat olması durumunda, hesaplanan güvenli durma mesafesi olan 50 metreden, M3, M4 ve M5 sınıflarına uygun aydınlatma kalite kriterleri altında cisim ve fon parlaklıkları da ölçülmüş, buradan da VL değerleri hesaplanmıştır. Aynı güvenli durma mesafesi için farklı aydınlatma sınıfları altında hesap alanındaki VL karşılaştırması Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3’de verilmiştir.



sınırları içinde olduğundan, M3 ve M4 sınıflarına geçilmesi için görülebilirlik açısından bir engel bulunmamaktadır. Aynı şekilde M3 sınıfı aydınlatma büyüklüklerine göre aydınlatılmış olan bir yolda, araç hızı düşmese bile, 70 km/saat hızda güvenli durma mesafesi olan 50 metreden cisimler görülebilirlik sınırları içinde olduğundan, M4 ve M5 sınıflarına geçilmesi için görülebilirlik açısından bir engel bulunmamaktadır.



## 5. AKILLI YOL AYDINLATMASI UYGULAMA ÖRNEĞİ

Aydınlatmada enerjinin daha verimli kullanılmasına yönelik çalışmaların hız kazanmasıyla, yol aydınlatma tesisatlarında ışık kaynağı ve armatürlerin otomasyon sistemleri ile birlikte kullanılarak yoldaki aydınlık düzeyi, dolayısı ile parıltının farklı seviyelerde gerektiği kadar ayarlanabilmesine olanak sağlayan “akıllı yol aydınlatması” uygulamaları gündeme gelmektedir. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen görülebilirlik ölçüm ve hesaplamaları sonucunda, trafik algılayıcılarından araç hız ve yoğunluk bilgilerini alan, yol üzerindeki mevcut koşullara uygun loşlaştırma oranına karar verebilen ve armatürlere bu yönde kumanda ederek sürücü emniyet ve konforunu bozmadan enerji tasarrufu sağlayabilen bir akıllı yol aydınlatma kontrol sisteminin geliştirilmesinin mümkün olduğu anlaşılmaktadır. Geliştirilen bu “otomasyon sistemi ve kontrol yazılımı”nın şehir içi yollardaki aydınlatma tesislerinde kullanılmasına örnek oluşturacak ilk pilot uygulama Kağıthane Cendere Caddesi'nin 500 metrelik kısmında tesis edilmiştir.

Tüm uygulamalarda olduğu gibi aydınlatma tesisatlarında da, güvenlik ve konfor koşullarını bozmadan enerji tasarrufu sağlanması amaçlanan “akıllı sistemler”den beklenen performansın alınabilmesi, büyük ölçüde bunların tesis edildikleri baz tesisatların kalitesine bağlıdır. Maliyetleri yüksek olan bu sistemler, enerji kullanımı açısından iyi tasarlanmamış tesisatlarda kullanıldığında geri ödeme süreleri çok uzun olmakta ve hedeflenen tasarruf oranları sağlanamamaktadır. Bu nedenle ilk olarak Cendere Caddesi'nin 500 metrelik bölümünde mevcut yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalı armatürler LED'li armatürler ile değiştirilmiştir. 500 metrelik bölümde LED dönüşümü gerçekleştirilen toplam 25 adet armatürün ışık akıları otomasyon sistemi ve kontrol yazılımı ile kontrol edilebilmektedir.

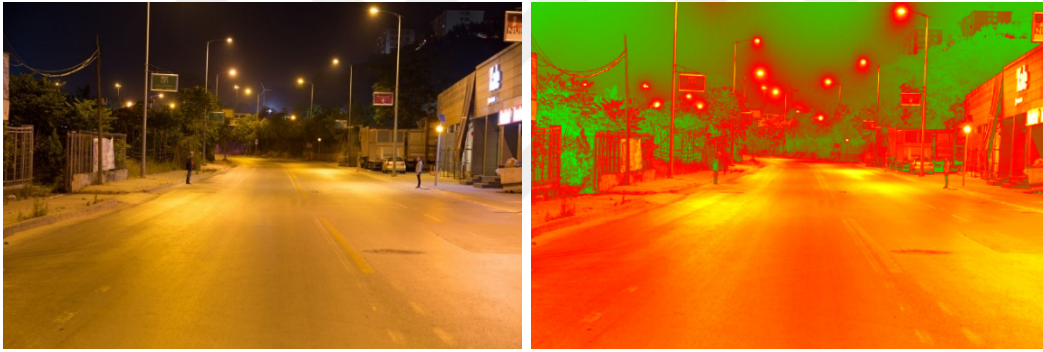
### 5.1 Cendere Caddesi LED Dönüşümü Çalışmaları

Cendere Caddesi iki geliş iki gidiş olmak üzere toplam dört şeritten oluşan bir yoldur. Ortada gidiş ve geliş şeritlerini ayıran refüj bulunmamaktadır. Yol karşılıklı kaydırılmış düzenek ile aydınlatılmaktadır. Direkler 12 metre yükseklikte olup, konsol

boyları 1,25 metredir. Uygulama yapılacak yoldaki mevcut direkler arası mesafelerin 38 metre ila 53 metre arasında değiştiği belirlenmiş, 500 metrelik pilot yoldaki değerlerin ortalaması bulunarak hesaplarda direkler arası mesafe 43 metre olarak alınmıştır.

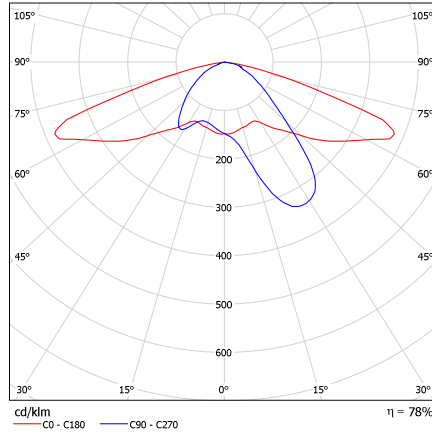
### 5.1.1 Yolun mevcut aydınlatma durumu

Karşılıklı kaydırılmış düzenek ile aydınlatılmış yolun 25 direkten oluşan yaklaşık 500 metrelik bölümünde bazı armatürlerin yanmaz durumda olduğu gözlemlenmiş, pilot yol olarak seçilen bu 500 metrelik bölümde tüm armatürlerin lambaları yenileri ile değerştirilmiştir. Pilot yolda LMK Kameralı Lüminansmetre ile yapılan ölçümler sonucunda, yol yüzeyi ortalama parıltısı  $2,28 \text{ cd/m}^2$  olarak bulunmuştur. Pilot yolun mevcut durumu ve bu durumda gerçekleştirilen parıltı ölçümüne ait bir fotoğraf Şekil 5.1’de verilmiştir.



**Şekil 5.1 :** Cendere Caddesi pilot yol ve LMK Kameralı Lüminansmetre ile parıltı ölçümü.

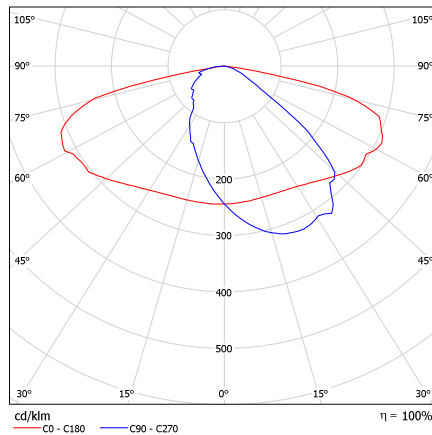
Daha sonra yolun mevcut durumunda yer alan 250W YBSB lambalı armatürlerin fotometrisi kullanılarak Dialux hesap programı yardımıyla parıltı hesabı gerçekleştirilmiştir. Pilot yoldaki mevcut YBSB lambalı armatürün ışık dağılım eğrisi Şekil 5.2’de verilmiştir. Hesaplarda, koruma sınıfı IP 6X olan armatürlerin orta kirli kategorisinde olup iki yılda bir temizlik yapıldığı kabulü ile TEDAŞ Yol Aydınlatma Armatürleri Teknik Şartnamesi de dikkate alınarak bakım-işletme faktörü 0,89 olarak kabul edilmiştir (CIE, 2003, TEDAŞ, 2008). Hesaplar sonucunda ortalama yol yüzeyi parıltısı  $2,63 \text{ cd/m}^2$  olarak bulunmuştur. Ölçüm sonuçları ile hesap sonuçları arasında farklılıklar olduğu görölmektedir. Sahadaki armatürlerin kirlilik durumu, hesaplarda kabul edilen bakım-işletme faktörü değerinin uygunluğu, yol kaplamasının özelliği, direkler arası mesafelerdeki farklılıklar dikkate alındığında aradaki fark açıklanabilmektedir.



**Şekil 5.2 :** Cendere Caddesi'nde mevcut 250W YBSB lambalı armatürlere ait ışık dağılım eğrisi.

### 5.1.2 Yolda yeni kurulan aydınlatma tesisatı

Cendere Caddesi'nin pilot yol olarak belirlenen 500 metrelik bölümünde gerçekleştirilecek dönüşüm uygulamasında kullanılacak LED'li armatürler TEDAŞ LED Işık Kaynaklı Armatürler Teknik Şartnamesi'ne uygun olarak bu proje kapsamında İSBAK tarafından üretilmiştir. Üretilen LED ışık kaynaklı armatürün ışık dağılım eğrisi Şekil 5.3'de verilmiştir. Armatürlerin maksimum gücü 150W olup, bu durumda etkinlik faktörü 131,2 lm/W'dır. Armatürler farklı ışık akılarında çalıştırıldığında yolda M1'den M5'e kadar farklı aydınlatma sınıflarının gerekleri TS EN 13201-2 numaralı teknik rapora uygun olarak yerine getirilebilmektedir. Bu sayede otomasyon sistemi ile donatılacak tesisatta farklı senaryo olanaklarına imkan yaratılmaktadır.



**Şekil 5.3 :** LED'li armatür ışık dağılım eğrisi.

## 5.2 Otomasyon Senaryolarının ve Buna Uygun Yol Aydınlatma Sınıflarının Belirlenmesi

Cendere Caddesi'nde araç hızları ve trafik yoğunluğu yol kenarına yerleştirilmiş olan sensörler ile izlenmekte ve veriler toplanmaktadır. Geçmiş yıla ait veriler incelenerek Cendere Caddesi'nde ölçülmüş en yüksek ve en düşük araç hızları ile en yüksek ve en düşük araç sayıları aylara göre Çizelge 5.1'de verilmiştir.

**Çizelge 5.1 :** Aylara göre araç sayısı ve hızları.

		Eki. 2015	Kas. 2015	Ara. 2015	Oca. 2016	Şub. 2016	Mar. 2016	Nis. 2016	May. 2016	Haz. 2016	Tem. 2016	Ağu. 2016	Eyl. 2016	Eki. 2016	Kas. 2016
Araç sayısı	maks	1405	1982	1360	1540	1305	1865	1434	2093	1369	1295	1808	1279	1450	1348
	min	5	0	4	0	1	0	7	0	21	15	0	0	0	5
Araç hızı (km/h)	maks	75	104	77	92	74	85	69	117	77	74	109	60	61	65
	min	10	2	11	14	13	11	10	5	11	34	5	8	12	13

Cendere Caddesinde izin verilen yasal hız sınırı 80 km/saat'dir. Yolda araç hızlarının 2 km/saat ile 117 km/saat arasında değiştiği görülmektedir. Kasım, Mayıs ve Ağustos aylarında yasal hız sınırının aşıldığı saatler genellikle öğle saatleri olup, aydınlatma yapılan gece saatlerinde hız ortalamaları 80 km/saatin altında ölçülmüştür. TSE CEN/TR 13201-1 numaralı teknik raporda yol aydınlatma sınıfının belirlenmesine ait bir tablo yer almaktadır. Bu tablodaki tasarım hızı veya hız sınırı parametresi Cendere Caddesi için farklı saatlerde ölçülen ortalama hız değerlerine göre “düşük”, “orta” ya da “yüksek” olmak üzere değişmektedir.

Yıl boyunca yoldan bir saatte geçen en yüksek araç sayısı bir yön için 2093 olmuştur. Buna göre trafik hacmi TSE CEN/TR 13201-1 numaralı teknik raporda iki şeritli yol için verilen yüzdelere göre hesaplanarak; yoldan geçen araç sayısı 942'nin üzerindeyse trafik hacmi “yüksek”, araç sayısı 942 ile 314 arasında ise trafik hacmi “orta”, araç sayısı 314'ün altındaysa trafik hacmi “düşük” kabul edilmiştir. Trafik hacmi yüksek olduğunda araçların öndeki aracın arka farlarını takip etmeleri sayesinde görsel kılavuzlama “kolay”, trafik hacmi orta olduğunda görsel kılavuzlama “zor”, trafik hacmi düşük olduğunda görsel kılavuzlama “çok zor” kabul edilmiştir. Ortam parlaklığı yolun bulunduğu konumda mağaza vitrinleri yoğun olmadığı için sadece



araç farları dikkate alınarak trafik hacmi yüksek olduğunda “yüksek”, trafik hacmi orta olduğunda “orta” trafik hacmi düşük olduğunda “düşük” kabul edilmiştir.

Cendere Caddesi’nde trafikte genellikle motorlu araçlar bulunmakta ancak az sayıda da olsa yayalar zaman zaman yolu kullanabilmektedir. Bu nedenle Cendere Caddesi için trafik oluşumu “karışık”tır. Şekil 5.1’de görüldüğü gibi gidiş ve geliş yönündeki şeritleri ayıran bir orta refüj bulunmadığı için, taşıt yolu ayrımı “yok”tur. Kilometre başına düşen hemzemin kavşak sayısı üçten az, köprülü kavşaklar, köprüler arası mesafe üç kilometreden uzun olduğu için kavşak yoğunluğu “orta”dır. Yolda park etmiş araçlar “yok”tur.

TSE CEN/TR 13201-1 numaralı teknik rapordaki tabloda yol aydınlatma sınıfının hesaplanması için önerilen değerler ile Cendere Caddesi’nin 4 Temmuz 2016 Pazartesi gününe ait örnek yol aydınlatma sınıfı hesapları seçilen saatlerde Çizelge 5.2’de gösterilmiştir. Farklı zaman dilimleri, yol aydınlatmasına ihtiyaç olan saat ve yolun kullanım durumu dikkate alınarak örnek olarak belirlenmiştir. Aydınlatma sınıfları her iki yön için ayrı ayrı hesaplanmış, uygulanması gereken en yüksek parlaklık kriterini gerektiren şerit için hesaplanan yol aydınlatma sınıfı tabloda altı çizili olarak gösterilmiştir.

**Çizelge 5.2 : 4 Temmuz 2016 Pazartesi günü için TSE CEN/TR 13201-1'e göre yol aydınlatma sınıfının seçimi.**

Parametre	Seçenekler	Açıklama		Ağırlıklandırma Değeri $V_w$	Seçilen ağırlıklandırma değeri					
					Saat: 21.00		Saat: 23.00		Saat: 02.00	
					Gidiş yönü	Geliş yönü	Gidiş yönü	Geliş yönü	Gidiş yönü	Geliş yönü
Tasarım hızı veya hız sınırı	Çok yüksek	$v \geq 100$ km/saat		2						
	Yüksek	$70 < v < 100$ km/ saat		1	-1	-1	-1	-1	-1	1
	Orta	$40 < v \leq 70$ km/saat		-1	64 km/s (orta)	68 km/s (orta)	60 km/s (orta)	65 km/s (orta)	62 km/s (orta)	74 km/s (yüksek)
	Düşük	$v \leq 40$ km/ saat		-2						
Trafik hacmi		Otoyollar, çok şeritli yollar	İki şeritli yollar							
	Yüksek	Azami kapasitenin %65'inden büyük	Azami kapasitenin %45'inden büyük	1	-1	-1	-1	0	-1	-1
	Orta	Azami kapasitenin %35'i ile %65'i arasında	Azami kapasitenin %15'i ile %45'i arasında	0	117 (düşük)	252 (düşük)	138 (düşük)	323 (orta)	57 (düşük)	120 (düşük)
	Düşük	Azami kapasitenin %35'inden küçük	Azami kapasitenin %15'inden küçük	-1						
Trafik oluşumu	Yüksek oranda motorlu olmayan trafik ile karışık			2	1	1	1	1	1	1
	Karışık			1						
	Yalnızca motorlu araç			0						
Taşıt yolu ayrımı	Yok			1	1	1	1	1	1	1
	Var			0						
Kavşak yoğunluğu		Hemzemin kavşak / km	Köprülü kavşaklar, köprüler arası mesafe, km		0	0	0	0	0	0
	Yüksek	$> 3$	$< 3$	1						
	Orta	$\leq 3$	$\geq 3$	0						
Park etmiş araçlar	Var			1	0	0	0	0	0	0
	Yok			0						
Ortam Parlaklığı	Yüksek	Mağaza vitrinleri, reklam afişleri, spor sahaları, istasyon alanları, depo alanları		1	-1	-1	-1	0	-1	-1
	Orta	Normal durum		0	Düşük	Düşük	Düşük	Orta	Düşük	Düşük
	Düşük			-1						
Görsel Kılavuzlama	Çok zor			2	2	2	2	1	2	2
	Zor			1	Çok zor	Çok zor	Çok zor	Zor	Çok zor	Çok zor
	Kolay			0						
Ağırlıklandırma değerlerinin toplamı ( $V_{ws}$ )					1	1	1	2	1	3
AYDINLATMA SINIFI ( $M=6-V_{ws}$ )					<b>M5</b>	<b>M5</b>	<b>M5</b>	<b>M4</b>	<b>M5</b>	<b>M3</b>

Bu kriterlere göre Çizelge 5.2'deki ağırlıklandırma değerleri kullanılarak, Cendere Caddesi'nde 4 Temmuz 2016 Pazartesi günü saat 21.00'da M5, 23.00'da M4, 02.00'da M3 aydınlatma sınıflarının yaratılmasının uygun olacağı bulunmuştur. Bu sonuç, yollarda gece belli saatlerden sonra aydınlatmaların belli oranlarda azaltılması uygulamalarından farklı bir yaklaşımdır.

Cendere Caddesi'nde tesis edilen 150W gücündeki LED'li armatürün toplam ışık akısı 19000 lümen'dir. Armatür ışık akısı loşlaştırılarak, yolda farklı aydınlatma sınıfları için gerekli kalite kriterleri sağlanabilmektedir. Dialux hesap programı ile gerçekleştirilen hesaplar sonucunda M2 ile M5 arasındaki aydınlatma sınıfları için armatürün ayarlanması gereken ışık akısı ve armatür güçleri Çizelge 5.3'de verilmiştir.

**Çizelge 5.3 :** Cendere Caddesi'nde farklı aydınlatma sınıfları için gerekli olan armatür ışık akısı ve güçleri.

Aydınlatma sınıfı	Işık akısı (lümen)	Armatür gücü (W)
M2	14000	106
M3	9500	69
M4	7000	50,4
M5	4750	34,6

İstanbul için güneş doğuş batış saatlerine uygun olarak (Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, 2017) pilot yolda aydınlatma yapılan saatler boyunca yaz ve kış mevsimlerinde hafta içi ve hafta sonu örnek seçilmiş günlere ait saat başına aydınlatma sınıfı değişimleri ile bu saatlerde armatürlerin güç ve bir saat boyunca enerji tüketim değerleri Çizelge 5.4'de verilmiştir. Çizelgeden hız, trafik, yol ve ortam koşullarına göre Cendere Caddesi için aydınlatma yapılacak farklı saatlerde geçerli olabilecek yol aydınlatma sınıflarının M3 ile M5 arasında değiştiği görülmektedir.

**Çizelge 5.4 :** Cendere Caddesi örnek aydınlatma sınıfları ve saatlik enerji tüketimleri.

Saat	4 Temmuz Pazartesi		10 Temmuz Pazar		18 Ocak Pazartesi		24 Ocak Pazar	
	Aydınlatma sınıfı	Armatür enerji tüketimi (Wh)	Aydınlatma sınıfı	Armatür enerji tüketimi (Wh)	Aydınlatma sınıfı	Armatür enerji tüketimi (Wh)	Aydınlatma sınıfı	Armatür enerji tüketimi (Wh)
18					M4	50,4	M4	50,4
19					M4	50,4	M4	50,4
20					M3	69	M4	50,4
21	M5	34,6	M4	50,4	M5	34,6	M4	50,4
22	M4	50,4	M4	50,4	M5	34,6	M4	50,4
23	M4	50,4	M5	34,6	M5	34,6	M5	34,6
0	M5	34,6	M5	34,6	M5	34,6	M5	34,6
1	M3	69	M5	34,6	M5	34,6	M5	34,6
2	M3	69	M5	34,6	M5	34,6	M5	34,6
3	M5	34,6	M5	34,6	M5	34,6	M5	34,6
4	M5	34,6	M5	34,6	M5	34,6	M5	34,6
5	M5	34,6	M5	34,6	M5	34,6	M5	34,6
6	M5	34,6	M5	34,6	M5	34,6	M5	34,6
7					M5	34,6	M5	34,6
Toplam		<b>446,4</b>		<b>377,6</b>		<b>550,4</b>		<b>563,4</b>

Yeni yerleşim ve iş merkezlerini birleştiren bir yol olduğu için Cendere Caddesi, trafik ve ortam bilgileri dikkate alınmadığında M2 aydınlatma sınıfı olarak kabul edilebilir. Pilot yolda dönüşümden önce gerçekleştirilen ölçüm ve hesaplamalar sonucunda 2 cd/m<sup>2</sup>'nin üstünde değerler elde edildiği için, M2 yol aydınlatma sınıfı kabulü gerçekçidir. Bu durumda herhangi bir aydınlatma otomasyonu uygulanmadığında, armatürler M2 sınıfının gerekliliğini sağlamak için gece saatleri boyunca 106W (14000 lümen) gücünde çalışacaktır. Temmuz ayında günde yaklaşık 10 saat boyunca çalışan bir armatürün günlük enerji tüketimi 1060 Wh olmaktadır. Ancak otomasyon sistemi kurulursa, Çizelge 5.4'de görüleceği gibi 4 Temmuz Pazartesi günü aydınlatma sınıfı M3 ile M5 arasında değişmektedir. Bu durumda, toplam enerji tüketimi 446,4 Wh olmakta ve günlük yaklaşık %58 oranında enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. 10 Temmuz Pazar günü ise toplam enerji tüketimi 377,6 Wh olup günlük yaklaşık %64 oranında enerji tasarrufu sağlanacaktır. Yine herhangi bir aydınlatma otomasyonu uygulanmadığında Ocak ayında günde 14 saat boyunca çalışacak olan bir armatürün toplam enerji tüketimi günlük 1484 Wh olmaktadır. Önerilen senaryoların uygulandığı otomasyon sistemi kurulursa, 18 Ocak Pazartesi günü toplam enerji tüketimi 550,4

Wh, bu durumda enerji tasarrufu yaklaşık %63; 24 Ocak Pazar günü toplam enerji tüketimi 563,4 Wh, bu durumda da enerji tasarrufu yaklaşık %62 olacaktır.

Çizelge 5.5’de bir yıl boyunca yaz, kış, hafta içi ve hafta sonu günleri temsil eden örnek günler için aydınlatma otomasyonu varken ve aydınlatma otomasyonu yokken toplam enerji tüketimi değerleri ve otomasyon sistemi sayesinde elde edilebilecek tasarruf oranları verilmiştir.

**Çizelge 5.5 :** Cendere Caddesi’nde otomasyon sistemi sayesinde elde edilebilecek tasarruf oranları.

	Otomasyon sistemi yokken toplam enerji tüketimi (Wh)	Otomasyon sistemi kurulduğunda toplam enerji tüketimi (Wh)	Elde edilecek enerji tasarruf oranı (%)
4 Temmuz Pazartesi	1060	446,4	58
10 Temmuz Pazar	1060	377,6	64
18 Ocak Pazartesi	1484	550,4	63
24 Ocak Pazar	1484	563,4	62



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez süresince test yolunda ve laboratuvarında gerçekleştirilen parıltı ölçümleri, görülebilirlik hesap ve deneylerinin amacı, yol yüzeyi parıltısı değiştiğinde yoldaki cisimlerin VL değerlerindeki değişimi ortaya koymaktır. Gerçekleştirilen ölçüm ve deneyler sonucunda, araç hızı şehir içi yollarda geçerli hız limitleri olan 90 km/saat, ya da 70 km/saat'de sabit olduğunda hesap alanındaki VL değerlerinin farklı aydınlatma sınıfları için kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığı, armatür ışık akılarının değiştirilmesinin sürücülerin görme performansını önemli oranda değiştirmeyeceği görülmüştür. Bu sonuçlarla, trafik yoğunluğunun azaldığı, buna karşılık araç hızlarının düşmediği saatlerde yol parıltı düzeyinin mevcut durumun dışında ilave iki farklı aydınlatma sınıfı daha yaratılacak şekilde azaltılabileceği ortaya konmuştur.

Çalışmanın hedef alanı şehir içinde M2 ya da M3 yol aydınlatma sınıfına giren yollardır. Buna göre sürücülerin görsel performansındaki değişim, 90 km/saat ve 70 km/saat hızlar için araştırılmış ve bu hızlardaki güvenli durma mesafesi sırasıyla 78 metre ve 50 metre olarak hesaplanmıştır. Güvenli durma mesafeleri, şehir içinde kullanılan kısa hüzmeli araç farlarının aydınlatabildiği mesafe olan 25 metreden daha uzak olduğu için bu çalışmada gerçekleştirilen ölçümlerde araç farlarının etkisi dikkate alınmamıştır. Ancak daha düşük araç hızlarının geçerli olacağı M4 ve M5 aydınlatma sınıflarında loşlaştırma uygulanması durumlarında, araç farlarının etkisinin hesaba katılması doğru olacaktır.

Bu çalışmadaki hesap ve deneylerde kabul edilen yaş ortalaması 30'dur. Diğer yandan, yaş arttıkça, gözdeki optik bozulma ve göz sinir hücrelerindeki değişikliklere bağlı olarak görme kapasitesinin azalacağı unutulmamalıdır. Bu nedenle ileri yaşlar için daha yüksek  $\Delta L_{eşik}$  değerleri gerekeceğinden, hesaplanan VL değerleri düşecektir. Bu da ileri yaştaki kişiler için kritik cismin görülme olasılığının daha düşük olacağı anlamına gelmektedir. Yüksek oranda yaşlı nüfusun olduğu bölgelerde daha yüksek yol aydınlatma sınıflarının seçilmesi ya da kullanılacak ışık kaynaklarının renksel geri verim indekslerinin daha yüksek olması önerilmektedir (CIE, 2010).

TSE CEN/TR 13201-1 numaralı teknik raporda yol aydınlatma sınıfı seçilirken, yolun tasarım hızı veya hız sınırı, trafik yoğunluğu, trafiğin yalnızca motorlu araçlardan mı oluştuğu yoksa motorsuz araç ve yayalar ile karışık mı olduğu, yolda gidiş geliş şeritlerini ayıran bir orta refüjün bulunup bulunmaması, kavşak yoğunluğu, park etmiş araçların olup olmaması, ortam parlaklığı ve görsel kılavuzlama gibi bir çok parametre göz önünde bulundurulmaktadır. Bu parametrelerin bazıları yolun geometrik yapısı ile ilgili olup değişmezken yoldaki araçların hızı, trafik yoğunluğu, ortam parlaklığı gibi parametreler ise zamana bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle sürücülerin yolda güvenli bir şekilde araç sürmeleri ve önlerine çıkan engelleri fark edebilmeleri için ihtiyaç duyacakları aydınlatmanın miktarı da zamana bağlı olarak değişim göstermektedir. Aydınlatma otomasyon sisteminin amacı yoldaki değişken parametreleri takip ederek buna uygun dinamik bir aydınlatma yapılmasını sağlamaktır.

Tezde, TSE CEN/TR 13201-1 numaralı teknik rapora göre belirlenen yol aydınlatma sınıflarına uygun olarak gerçekleştirilecek loşlaştırma senaryoları için trafik algılayıcılarından araç hız ve yoğunluk bilgilerini alan, yol üzerindeki mevcut koşullara uygun loşlaştırma oranına karar verebilen ve armatürlere bu yönde kumanda ederek sürücü emniyet ve konforunu bozmadan enerji tasarrufu sağlayabilen bir akıllı yol aydınlatma kontrol sisteminin Cendere Caddesi'nde uygulanması halinde olası aydınlatma sınıfı değişimleri de gösterilmeye çalışılmıştır. Yaz ve kış, hafta içi ve hafta sonu koşulları dikkate alındığında yoldan geçen araçların ortalama hızı, trafik yoğunluğu, yol ve ortam koşullarına göre Cendere Caddesi için aydınlatma yapılacak farklı saatlerde geçerli olabilecek yol aydınlatma sınıflarının M2 ile M5 arasında değiştiği görülmüştür.

Gerçekleştirilen örnek hesaplamalar sonucunda, aydınlatma otomasyon sistemi kurulduğunda yaz aylarında yaklaşık %58-64 oranında, kış aylarında ise yaklaşık %62-63 oranında enerji tasarrufu elde edilebileceği tahmin edilmektedir.

Tez çalışması, trafik algılayıcılarından araç hız ve yoğunluk bilgisini alan, yol üzerindeki mevcut koşullara uygun loşlaştırma oranına karar verebilen ve armatürlere bu yönde kumanda ederek sürücü emniyet ve konforunu bozmadan enerji tasarrufu sağlayabilen bir "akıllı yol aydınlatma kontrol sistemi"nin geliştirilmesi için gerekli olan loşlaştırma senaryolarına bilimsel altyapı sağlaması açısından önemlidir.



Bundan sonraki adım, loşlaştırma senaryolarının uygulanabilmesi için araç hızı ve araç sayısı verilerini girdi olarak kullanan ve bunlara bağlı olarak yol aydınlatma sınıfına karar verecek olan algoritmanın uygulama yapılacak yol verilerine göre hazırlanması olacaktır. Bu algoritma oluşturulurken, kontrol edilecek armatürler bölgelere (yol parçalarına) ayrılarak bölgesel olarak birlikte kontrol edilmelidir. Bu bölgelerin sınırları belirlenirken, araçların ortalama hızlarına bağlı olarak belli bir sürede kat ettikleri mesafe ve o mesafe içinde kalan armatürler dikkate alınabilir. Ancak, araç hız ve sayısı algılayıcılar tarafından tek bir noktada ölçüldüğünden, algılayıcıdan alınan bu verinin hangi uzunluktaki bir yol parçası üzerindeki armatürleri kontrol etmek için kullanılacağına doğru karar verilmesi amaçlı gerçek verilere dayalı analizlerin yapılması gerekmektedir. Kontrol edilecek olan yol parçasının başında ve sonunda iki adet algılayıcı olması ve her iki algılayıcının verilerinin değerlendirmeye alınması, ya da tek bir noktadan veri toplamak yerine belli bir bölgeyi kapsayacak şekilde ölçüm yapan algılayıcıların kullanılması durumları değerlendirilmelidir. Karar verilmesi gereken bir diğer parametre ise trafik algılayıcılarından alınacak verilerin sıklığıdır (ne kadar zamanda bir veri alınacağı). Yolun karakteristiğine göre ortalama araç hızı ve ortalama araç sayıları zamana bağlı olarak çok değişken olabileceği gibi durağan da olabilir. Aynı mevsimlerde, aylarda ya da hafta içi ve hafta sonu günlerinde benzer değişim gösteriyor da olabilir. Hızlı değişimlere anında cevap vermek ve aydınlatma sınıfını çok sık değiştirmek sürücüler için adaptasyon problemleri yaratabilmektedir. Tüm bu kararların uygun şekilde verilebilmesi için akıllı yol aydınlatması sisteminin uygulanacağı yolda anlık veriler ile çalışmak yerine, geçmiş araç hız ve sayılarının analiz edilmesi, bu geçmiş verilerden öğrenerek karar veren akıllı bir algoritmanın geliştirilmesi doğru bir yaklaşım olacaktır. Anlık veriler ise geliştirilen bu algoritmanın doğru çalışmasını sağlamak amacıyla kontrol parametresi olarak kullanılabilir.

Geçerliliğinin kanıtlanabilmesi için, tanımlanan algoritmalar ile çalışan akıllı yol aydınlatması sistemleri farklı geometri ve farklı aydınlatma sınıflarındaki yollarda uygulanarak en az bir yıl süre ile izlenmeli, tüm mevsimsel değişimler ve buna bağlı enerji tasarruf oranları ortaya çıkarılmalıdır. Ayrıca sürücülerin, akıllı yol aydınlatması uygulamasından önceki ve sonraki durumu değerlendirecekleri anketler ile görüşleri alınarak, memnuniyet oranları da belirlenmelidir. Bu uygulama ve analizler yapıldığında, bu tez çalışması gerçek amacına ulaşmış olacak, trafik güvenliği, sürücü

memnuniyeti ve enerji verimliliği açısından doğrulanmış akıllı yol aydınlatması sistemi uygulamaya geçebilecektir.



## KAYNAKLAR

- Adaptive Street Lighting Guide**, (2012). Erişim: 07.12.2012, <http://www.lightsavers.ca/BCH%20A10-217%20PSP%20Adaptive%20Lighting%20Guide%20hi-res.pdf>
- Adrian, W.** (1989). Visibility of Targets: Model for Calculation, *Lighting Research & Technology*, 21 (4) :181–188.
- Atıcı, Ç., Özçelebi, T., Lukkien, J.J.**, (2011). Exploring User-Centered Intelligent Road Lighting Design:A Road Map and Future Research Directions, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 57 (2) : 788– 793.
- Bacelar A, Cariou J, Hamard M**, (2000). Calculated Visibility Model for Road Lighting Installations. *Lighting Research & Technology*, 31 (4) :177–180.
- Bjelland, E., Kristoffersen, T.**, (2007). Intelligent Street Lighting in Oslo, Norway, *Proceedings of the ECEEE 2007 Summer Study-Saving Energy-Just Do It*, (pp. 469-474). Cote d'Azur, France, June 4-9.
- Brémond, R., Bodard, V., Dumont, E., Mayeur, A.**, (2013). Target Visibility Level and Detection Distance on a Driving Simulator, *Lighting Research & Technology*, 45 (1) :76–89.
- Büyükkıncı B., Onaygil S., Güler Ö., Yurtseven M. B.**, (2016). Comparison of Road Lighting Calculations with Measurements Using Conventional and Camera Luminance Meters, *Light & Engineering* (ISSN 0236-2945); 24 (4) :56-63.
- Büyükkıncı B., Onaygil S., Güler Ö., Yurtseven M. B.**, (2017). Experimental Study to Determine Minimum VL Values in Different Road Lighting Scenarios, *Lighting Research & Technology*, (ISSN: 14771535 ); 0: 1–12.
- CEN**, (2014). *EN 13201-1: 2014-Road lighting - Part 1: Selection of lighting classes*, Brussels, CEN.
- CEN**, (2015a). *EN 13201-2: 2015-Road lighting - Part 2: Performance requirements*, Brussels, CEN.
- CEN**, (2015b). *EN 13201-3: Road lighting - Part 3: Calculation of performance*, Brussels, CEN.
- Cengiz, C., Kotkanen, H., Puolakka, M., Lappi, O., Lehtonen, E., Halonen, L., Summala, H.**, (2014). Combined Eye-tracking and Luminance Measurements While Driving on a Rural Road: Towards Determining Mesopic Adaptation Luminance, *Lighting Research & Technology*, 46 (6): 676–694.
- Chung, H.S.H., Ho, N.M, Hui, S.Y.R, Mai, W.Z**, (2005). Case Study of A Highly-Reliable Dimmable Road Lighting System with Intelligent Remote

- Control, *European Conference on Power Electronics and Applications*, (pp. 1-10). Dresden, Germany, September 11-14.
- CIE, (2010).** *CIE 115-2010, Recommendations for the Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic*, Vienna, CIE.
- CIE, (2003).** *CIE 154-2003, The Maintenance of Outdoor Lighting Systems*, Vienna, CIE.
- CIE, (2016).** *CIE TC 4-36, Visibility Design in Road Lighting*, Vienna, CIE.
- CIE, (2000).** *CIE 140-2000, Road Lighting Calculations*, Vienna, CIE.
- CIE, (2004).** *CIE 88-2004, Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses*, Vienna, CIE.
- Collins, A., Thurrell, T., Pink, R., Feather, J., (2002),** Dynamic Dimming: The Future of Motor Way Lighting, *The Lighting Journal*, 67 (5) : 25-33.
- Davoudian, N., Raynham, P., Barrett, E., (2014).** Disability Glare: A Study in Simulated Road Lighting Conditions, *Lighting Research & Technology* 46 (6) : 695–705.
- Dijon J. M., Justin, M., (1998).** Quality Criteria for Road Lighting: Luminance and Uniformity Levels Or Visibility, *1. Ulusal Aydınlatma Kongresi*, (pp. 138-141). İstanbul, 26-27 Kasım.
- Ekrias, A., Guo, L., Eloholma, M., Halonen, L., (2008)** Intelligent Road Lighting Control in Varying Weather Conditions. *Light & Engineering*, 16 (1), 72-78.
- Fusheng, L., Yuming, C., Yang, L., Dahua, C., (2012).** Comparative In Situ Study of LEDs and HPS in Road Lighting, *LEUKOS The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America*, 8 (3): 205–214.
- Guo, L., Eloholma, M., Halonen, L., (2007).** Lighting Control Strategies for Telemangement Road Lighting Control Systems, *LEUKOS The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America*, 4 (3): 157-171.
- Hansen E.R., Larsen J.S., (1979)** Reflection Factors For Pedestrian’s Clothing. *Lighting Research & Technology*, 11 (3):154–157.
- Hirakawa S., Sato M., Sugawara T., Toeada K., Ito H., Sakamoto S., (2007)** Total Revealing Power For Tunnel Lighting (The Second Report). *Proceedings of 26th session of CIE*, (pp.148–151). Beijijng, China, July 4-11.
- Hogema, J.H.,van der Horst, A.R.A., (1998).** *Dynamic Road-Lighting (DYNO). Phase 4: Synthesis* (Report TM98C065). Soesterberg, The Netherlands: TNO Human Factors Research Institute.
- IESNA, (2014).** *ANSI/IES RP-8-14, Roadway Lighting*, Illuminating Engineering Society of North America.
- Intelligent Street Lighting, (2013).** Erişim: 5.02.2013, <http://tudelft.nl/en/current/latest-news/article/detail/intelligente-sstraatverlichting-tu-delft-kan-tot-80-energie-besparen/>

- Intelligent Road and Street Lighting in Europe (E-Street)**, (2007). *WP 3: Market penetration and procurement activities D 3.2: Report on small scale test projects*, Sofia.
- Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü**, (2017)., Erişim: 30.06.2017, <http://www.koeri.boun.edu.tr/astronomy/dogusbatis/Istanbul.htm>
- Leccese, F., Cagnetti, M., Trinca, D.**, (2014). A Smart City Application: A Fully Controlled Street Lighting Isle Based on Raspberry-Pi Card, a ZigBee Sensor Network and WiMAX, *Sensors*, 14 (2): 24408-24424; doi:10.3390/s141224408
- Lecocq, J.**, (1997). Visibility in Road Lighting Correlation of Subjective Assessments With Calculated Values, *Proceedings of Lux Europe*, (pp.22-36), Amsterdam, May 11-14.
- Liang, J., Chung Ku, N.**, (2014) LED Roadway Lighting Control Scheme Based on TALQ Protocol, *Advanced Materials Research.*, 1044-1045, 1541-1544.
- Mayeur, A. Brémond, R. Bastien, C.**, (2008). The Effect of Task and Eccentricity of the Target on Detection Thresholds in Mesopic Vision: Implications for Road Lighting. *Human Factors: The Journal of the human Factors and Ergonomics Society*, 50 (4) : 712–721.
- Mayeur, A., Brémond, R., Bastien, J.M.**, (2010a). Effects of the Viewing Context on Target Detection. Implications for Road Lighting Design, *Applied Ergonomics*, 41 (3): 461–468
- Mayeur, A., Brémond, R., Bastien, J.M.**, (2010b). The Effect of the Driving Activity on Target Detection as a Function of the Visibility Level: Implications for Road Lighting, *Transportation Research*, 13 (2) : 115–128.
- Narisada K, KarasawaY**, (2001). Re-consideration of the Revealing Power on the Basis of Visibility Level, *Proceedings of International Lighting Congress*, (pp. 473–480). Istanbul, September 6-12.
- Narisada, K., Yoshikawa, K.**, (1974). Tunnel Entrance Lighting – Effect of Fixation Point and Other Factors on the Determination of Requirements, *Lighting Research & Technology*, 6 (1) : 9-18.
- Schreuder D.A.**, (1998). *Road Lighting For Safety*. (p.99), Thomas Telford, London
- Smart Cities**, (2012). Erişim: 05.12.2012, <http://www.echelon.com/customers/smart-cities/docs/senart.pdf>
- Smith F.C.**, (1938). Reflection Factors and Revealing Power, *Lighting Research & Technology*, 3 (12) :196 -206.
- Sokak Aydınlatma Pilot Projeler**, (2012). Erişim: 03.12.2012, [http://www.eie.gov.tr/duyurular\\_haberler/h\\_sokak\\_aydinlatma\\_pilot\\_ptojeler.aspx](http://www.eie.gov.tr/duyurular_haberler/h_sokak_aydinlatma_pilot_ptojeler.aspx)
- TEDAŞ**, (2015). *TEDAŞ-ARGEP/2010-057.B LED Işık Kaynaklı Yol Aydınlatma Armatürleri Teknik Şartnamesi*, TEDAŞ.
- TEDAŞ**, (2008). *TEDAŞ-MYD/95-009.B Yol Aydınlatma Armatür Şartnamesi*, Ekim 1995, Revize Mayıs 2008, TEDAŞ.

- TSE**, (2015). *TSE CEN/TR 13201-1, Yol Aydınlatması - Bölüm 1: Aydınlatma Sınıflarının Seçimiyle İlgili Kılavuz Bilgiler*, Ankara, TSE.
- TSE**, (2006). *TSE CEN/TR 13201-2, Yol Aydınlatması – Bölüm 2: Performans Özellikleri*, Ankara, TSE.
- van Bommel, W.**, (2015). *Road Lighting: Fundamentals, Technology and Application*, Switzerland, Springer International Publishing.
- Virginia smart road**, (2013). Erişim: 5.02.2013,  
<http://www.vtti.vt.edu/virginiasmartroad.php>
- Waldram, J.H.**, (1938). The revealing power of street lighting installations. *Lighting Research & Technology*, 3 (12) : 173-186.
- Yang, Y., Song, J., Tian, Y.** (2014). The Project of Expressway Intelligent Lighting System, *Applied Mechanics and Materials*. 543-547, 1453-1456.
- Zotos, N., Pallis, E., Stergiopoulos, C., Anastasopoulos, K., Bogdos, G., Skianis, C.**, (2012). Case Study of a dimmable outdoor lighting system with intelligent management and remote control, *International Conference on Telecommunications and Multimedia (TEMU)*, Chania, Greece, 30 July-1 August.
- Zeiss online görme tarama testi**, (2016). Erişim: 26.05.2016,  
[http://www.zeiss.com.tr/vision-care/tr\\_tr/better-vision/zeiss-ile-daha-iyi-goerme/zeiss-online-goerme-tarama-testi.html](http://www.zeiss.com.tr/vision-care/tr_tr/better-vision/zeiss-ile-daha-iyi-goerme/zeiss-online-goerme-tarama-testi.html)

## ÖZGEÇMİŞ



**Ad-Soyad** : Burcu Büyükkınacı  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 10.04.1979/Aydın  
**E-posta** : bbuyukkinaci@isbak.istanbul

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2001, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2008, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2002-2007 yılları arasında Eges Elektrik Elektronik Gereçler A.Ş.'de Ar-Ge Mühendisi olarak çalıştı.
- 2010-2012 yılları arasında Bakalit Tic. ve San. A.Ş.'de, Aydınlatma Proje Tasarım Mühendisi olarak çalıştı.
- 2013 yılından beri İSBAK İstanbul Bilişim ve akıllı Kent Teknolojileri A.Ş.'de Ar-Ge mühendisi olarak çalışıyor.

### DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Büyükkınacı B**, Onaygil S, Güler Ö, Yurtseven M. B. 2017. Determination Of Road Lighting Automation Strategies Considering Driving Safety Based On Visibility Concept, *Proceedings of the CIE Conference*, October 20-28, Jeju, Korea.
- Çelik H, **Büyükkınacı B**, Yurtseven M.B. 2017. Aydınlatma Otomasyon Teknikleri: Cendere Caddesi Örneği, *V. Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi ve Aydınlatma Sempozyumu*, 18-21 Ekim 2017, İzmir.

- Onaygil S, Dursun Y, **Büyükknacı B**, Güler Ö, Yurtseven M.B., Çelik H. 2017. Akıllı Yol Aydınlatması Projesi, *V. Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi ve Aydınlatma Sempozyumu*, 18-21 Ekim 2017, İzmir.
- **Büyükknacı B.**, Onaygil S., Güler Ö., Yurtseven M. B. 2017. Yol Aydınlatması Otomasyon Uygulamalarında Doğru Strateji ve Senaryoların Belirlenmesi, *11. Ulusal Aydınlatma Kongresi*, 21-24 Eylül 2017, İstanbul.
- **Büyükknacı B.**, Onaygil S., Güler Ö., Yurtseven M. B., Dursun Y. 2017. Akıllı Yol Aydınlatması Uygulamaları: Cendere Caddesi Örneği, *11. Ulusal Aydınlatma Kongresi* 21-24 Eylül 2017, İstanbul.
- **Büyükknacı B.**, Onaygil S., Güler Ö., Yurtseven M. B. 2017. Experimental Study to Determine Minimum VL Values in Different Road Lighting Scenarios, *Lighting Research & Technology*, (ISSN: 14771535 ); 0: 1–12.
- **Büyükknacı B.**, Onaygil S., Güler Ö., Yurtseven M. B., Dursun Y. 2017. Yol Aydınlatmalarında Enerji Verimliliği Uygulamaları, *8. Enerji Verimliliği Forumu*, 11-12 Ocak 2017, İstanbul.
- **Büyükknacı B.**, Onaygil S., Güler Ö., Yurtseven M. B. 2016. Comparison of Road Lighting Calculations with Measurements Using Conventional and Camera Luminance Meters, *Light & Engineering* (ISSN 0236-2945); 24 (4) : 56-63.
- **Büyükknacı B.**, Onaygil S., Güler Ö, Yurtseven M. B. 2016. Analysis of Road Lighting Automation Scenarios According to Visibility Performance, *Proceedings of the CIE Lighting Quality and Energy Efficiency Conference 2016*, (pp: 355-364), March 3-5, 2016 Melbourne, Australia.
- **Büyükknacı B.**, Onaygil S., Güler Ö. 2015. Yol Aydınlatması Tesisatlarında Otomasyon Stratejileri, *IV. Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi ve Aydınlatma Sempozyumu*, 21-24 Ekim 2015, İzmir.
- **Büyükknacı B.**, Onaygil S., Güler Ö., Yurtseven M. B. 2015. Visibility Concept in Road Lighting and Analysis of the Critical Object, *Proceedings of the Balkanlight 2015*, (pp: 413-418), September 16-19, 2015, Athens, Greece.

#### **DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:**

- **Büyükknacı B.**, Dursun Y. 2014. Türkiye'de LED'li Yol Aydınlatması Armatürleri için İstenen Teknik Özellikler ve Standartlar, *6. LED Konferansı*, 25-28 Eylül 2014, İstanbul.
- **Büyükknacı B.**, Onaygil S. 2013. Yol Aydınlatmalarında Otomasyon Senaryolarının Analizi, *9. Ulusal Aydınlatma Kongresi*, 19-20 Nisan 2013, İstanbul.
- Onaygil S., **Büyükknacı B.** 2009. Road Lighting Automation Strategies According to Traffic Speed and Density, *11th European Lighting Conference Lux Europa 2009*, September 9-11, 2009, İstanbul.
- Onaygil S., **Büyükknacı B.** 2008. Yol Aydınlatması Otomasyonu, *7. Ulusal Aydınlatma Kongresi*, 27 - 28 Kasım 2008, İstanbul.
- **Büyükknacı B.** 2008. *Yol Aydınlatması Otomasyonu* (Yüksekisans Tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.